

KIST

과학기술
전망
2016

21세기, 뇌의 시대
건강하고 행복한 삶
지속가능한 환경
새로운 융합소재
빛의 과학
깨끗한 에너지
미래의 컴퓨터 혁명

KIST
과학기술
전망
2016



과학기술
전망
2016

| 발간사 |

2016년 KIST가 바라본 과학기술전망



KIST가 올해 설립 50주년을 맞습니다. 부존자원 하나 없는 우리나라가 지난 반세기, 유례없는 성장과 성공을 거둘 수 있었던 힘은 바로 과학기술에 있었습니다. 대한민국의 번영의 역사 한 가운데서 KIST는 한국 기술과 산업의 미래를 노정하고 앞장서서 이끌어 왔습니다. 그러하기에 KIST의 50년은 곧 대한민국 과학기술의 50년이라고 감히 말할 수 있을 것입니다.

지금 대한민국은 새로운 도전과 시련의 시기에 직면했습니다. 후발주자의 추격으로 그동안 우리나라를 지탱해 온 제조업과 수출에 비상이 걸리는가 하면, 그 여파로 젊은 청년들이 일할 수 있는 좋은 일자리도 줄어들었습니다. 침체된 경제로 기업들은 저마다 허리띠를 졸라매고 있고, 일반 국민이 느끼는 체감경기는 어려워지기만 합니다. 이러한 시점에 다시 과학기술의 역할을 생각해 봅니다. 전쟁의 폐허에서 한강의 기적을 일구었던, 지금의 국가적 위기 극복을 위한 해법도 결국은 과학기술 발전을 통한 패러다임의 변화에 있습니다.

이제 우리나라는 지난 반세기의 발전과 성장을 넘어, 다음 반세기를 향한 새로운 여정을 시작해야 합니다. 이 과정에서 과학기술은 다시금 미래를 보여주고 앞장서는 길잡이 역할을 해야 합니다. 망망대해를 향해하는 뱃사람들과 사막을 가로지르는 대상들이 의지했던 별자리처럼, 그저 방향만 가리키지 않고 미래를 넓은 시야로 볼 수 있도록 다양한 모습을 펼쳐 보여주어야 합니다. 이에 미래 과학기술의 발전 방향을 전망하고 그에 따른 대응 전략을 마련하고자 이 책을 준비하였습니다. 'KIST 과학기술전망 2016'이 우리 대한민국의 성공적 미래를 열어가는 첫걸음이 되기를 기원합니다.

한국과학기술연구원 원장 이병권

| 차례 |

발간사 4

총론: 새로운 50년을 위한 이정표 8



CHAPTER 1

21세기, 뇌의 시대

뇌, 21세기 과학기술의 성배 14

21세기 최고의 블루오션, 뇌지도 18 | 뇌건강 발목 잡는 ‘꼬인’ 단백질을 풀어라 32

뇌질환 고치는 스마트 브레인 인터페이스 칩 44



CHAPTER 2

건강하고 행복한 삶

마침내 실현된 생명 연장의 꿈 56

보이지 않는 적으로부터 공동체를 지키다 60 | 사회성 지능을 지닌 소셜 로봇 72

치료 후 스스로 사라지는 금속 골접합 부품 86 | 똑똑한 농장이 만드는 건강하고

안전한 식품 100



CHAPTER 3

지속가능한 환경

신기후체제와 함께 다시 화두에 오른 환경 114

이산화탄소도 잘 모으면 자원 118 | 하수처리와 재이용을 한 곳에서, 분산형 물순환

시스템 기술 130 | 안전한 삶을 지켜주는 환경모니터링 기술 140



CHAPTER 4

새로운 융합소재

지속가능한 성장을 위한 또 다른 키워드, 재료공학 154

강철보다 강하고 알루미늄보다 가볍다, 엔지니어링 플라스틱 158 | 철기시대를 넘어,
탄소문명의 시대 176 | 화장품부터 태양전지까지, 티타니아 나노소재 190



CHAPTER 5

빛의 과학

IT 다음엔 빛의 시대! 202

의료 수술에서 3D프린터까지, 영역 넓어지는 광섬유 레이저 204 | 현실만큼 생생한
영상, 3차원 디스플레이 기술 216 | 빛으로 사람의 뇌를 들여다보다 228



CHAPTER 6

깨끗한 에너지

저탄소 녹색성장을 향한 에너지 전략 242

수소경제사회를 준비하는 연료전지기술 246 | 완벽한 청정 에너지원 만드는 태양광
-수소 제조 기술 264 | 여름철 전력대란의 해결책, 제습냉방기술 276



CHAPTER 7

미래의 컴퓨터 혁명

실리콘과 나노기술, 그리고 그 너머 288

배터리 오래가는 스마트폰, 저전력 소자기술로 실현 292 | 차세대 반도체, 스핀트로
닉스에서 길을 찾다 304 | 미시세계에서 온 정보혁명, 양자컴퓨터와 양자정보 316

새로운 50년을 위한 이정표

시계도, 믿을만한 지도도, 나침반도 없던 시절의 사람들에게, 밤하늘의 별들은 길잡이이자 이정표였다. 별들은 늘 같은 자리에서 방향을 안내하고, 엄격한 규칙에 따라 움직이며 파종과 수확의 때를 예고했다. 어느 문화권에서나 밤하늘은 경외의 대상이자 앞날을 예고하는 예언서로 여겨진 것도 어찌 보면 당연한 일이다. 사람들은 이듬해 작황을 예측하고 미래를 내다보기 위해 별과 하늘을 관찰하고 탐구했다. 이러한 노력의 결실이 차곡차곡 쌓여 오늘날의 과학기술 지식의 토대가 되었음은 굳이 강조하지 않아도 될 것이다. 과학이란 결국 미래를 예측하려는 노력의 산물인 셈이다.

미래를 예측하는 과학의 역할은 과학기술이 고도로 발전한 오늘날, 중요성이 더욱 커졌다. 기술과 사회가 급변하고 신기술의 개발주기가 빨라지면서 미래의 상황에 대해 정확하고 신속하게 판단하지 못하면 경쟁에서 도태되는 시대가 됐다. 자동차가 빠르게 달릴수록 운전자는 신속하고 과감하게 판단해야 하는 것과 마찬가지로

세계 최빈국에서 자원 하나 없이 기술과 인력만으로 선진국의 대열에 우뚝 서는 과정에서, 우리는 과학기술의 힘을 실감했다. 특히 지금은 최근 수출과 주력산업의 부진, 청년 실업률의 증가 등 여러 국가·사회적 문제들이 대두되어 미래에 대한 불안감이 커지는 한편, 선진국으로서 세계를 선도하는 역할을 요구받으면서 과학을 통한 미래 예측이 어느 때보다 중요해졌다.

바야흐로 세계는 인구구조 변화, 도시화, 자원 고갈 등 커다란 변화를 겪고 있다. 과학과 기술이 사람의 필요나 이해관계와 무관하지 않은 이상, 이러한 '메가트렌드'는 과학기술의 발전 방향을 제시하기도 하며, 다른 한편으로 과학기술을 통해 메가트렌드를 엿볼 수도 있다. 또한 이렇게 내다본 미래에 위기가 예상되더라도 이에 대비할 수 있는 기술과 사회 시스템, 그리고 정책을 준비하여 미래의 위기를 기회로 전환할 수도 있다.

이에 KIST는 국내외 연구 동향과 사회 변화를 고려하여 고령화 사회로의 진전, 포스트 탄소사회로의 전환, 과학기술의 융복합화라는 3가지 메가트렌드가 과학기술 발전과 밀접한 연관을 지닐 것으로 전망하고, 예상되는 위기와 대책을 고민해 보고자 한다.

첫 번째 트렌드인 급속한 고령화 사회로의 진전은 세계적으로 중요한 화두다. 인간의 기대수명은 해마다 평균 12주씩 늘어나는 반면, 출산 인구는 그에 비례하여 늘지 않고 있다. 이에 따라 선진국을 중심으로 생산가능인구 감소와 함께 부양인구가 증가하여 다양한 경제·사회적 부담이 예상된다. 특히 우리나라는 OECD 평균보다 2.5배나 빠른 고령화 속도로 인해 채 준비하지도 못한 상태에서 고령화 사회를 맞이할 것으로 우려된다. 타 선진국에 비해 복지 기반이 부족한 우리로서는

노인성 질환에 대한 대책 마련이 시급하다. 이에 따라 조기에 노인성 질환을 준비하고 대응할 수 있는 연구과 함께, 부족한 노동력 대체를 위한 다양한 로봇, 전자·정보 기술의 확보도 중요해지고 있다.

고령화가 국내적인 위기라면 기후변화는 국제적인 위기다. 2015년 12월 제21차 유엔 기후변화협약 당사국총회COP21에서 수립된 이른바 ‘파리 체제’는 회원국 전체에 경제구조와 에너지 정책을 저탄소 중심으로 재편해야 한다는 숙제를 안겨주었다. 국제사회의 일원이자 경제 강국으로서 대한민국 역시 기후변화에 대비할 신재생·미래 에너지에 대한 개발이 중요하다. 에너지원의 수입 의존도가 97%에 이르는 우리나라 입장에서는 신·재생에너지의 핵심 기술력 확보가 더욱 절실하다. 이와 함께 18세기 전세계 인구의 10% 정도였던 도시인구 비율이 2030년 세계 인구의 61%까지 늘어날 것으로 전망됨에 따라 전력, 상하수도, 대기오염 등 수많은 환경문제들을 새로이 발생시킬 것이다. 지속가능한 도시 발전을 이어가려면 이전과는 다른, 새로운 차원의 과학기술적 접근이 필요하다.

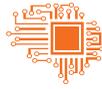
경제·산업적 측면에서는 과학기술과 ICT가 갈수록 빠르게 융합하고 있다. BT, NT, ET 등과 ICT의 결합이 기존 산업을 완전히 새로운 모습으로 변모시키면서 IT가 새로운 산업혁명을 이끈다는 평가마저 나온다. 최근 각광받고 있는 파인 세라믹스, 복합재료, 기능성 고분자, 광기술, 마이크로일렉트로닉스, 우주 기술, 차세대컴퓨터와 같은 첨단 유망기술들은 모두 이러한 융합의 결과로 나타났다. 성장의 정체를 맞아 산업구조의 새로운 패러다임이 필요한 대한민국으로서는 융합 기술에서 재도약을 위한 성장동력을 찾을 수 있을 것이다.

고대 그리스의 철학자 헤라클레이토스는 모든 사물이 변한다는 사실 외에 불변

의 것은 없다고 말했다. 우리의 미래가 지금과 다를 것이라는 것 외에, 미래가 어떻게 변화하고 진화할 것인지 확신할 수 있는 사람도 없을 것이다. 미래 변화의 폭과 속도는 우리가 지금껏 경험한 것과 완전히 다를 수도 있다. 이 놀랍고 거대한 흐름에서 '어떻게 미래를 준비해야 하는가?'는 우리에게 주어진 가장 중요한 숙제다.

이미 지난 반세기 동안 대한민국의 과학기술은 쉽 없는 도전을 거듭해왔다. 그러나 앞으로는 이전과 차원이 다른, 새로운 길을 준비해야 한다. 바로 선진국의 일원으로서 글로벌 메가트렌드를 주도하고 대한민국의 새로운 변화와 도약으로 향하는 길이다. 우리가 앞으로 걸어갈 그 길은 아무도 가 본 적이 없는, 지도조차 없는 미답지다. 사람이 남긴 편리한 흔적을 따르는 것이 아니라, 자연이 펼쳐 보여주는 신호를 신중하게 해석해서 과감하게 개척해 나가야 하는 길이다. 한 발 앞서 미래를 내다보며 미답지를 향한 노력과 도전을 인도하는 것이야말로, 지난 반 세기의 기적을 다음 반 세기로 이어가기 위해 우리 과학기술계가 해야 할 역할이다.





K I S T 과학기술전망 2016

Chapter 1

21세기, 뇌의 시대

뇌, 21세기 과학기술의 성배

김영수 | KIST 뇌의약연구단



“인류는 수 광년 멀리의 은하계도 밝힐 수 있고 원자보다 작은 입자도 연구할 수 있지만, 아직도 우리 귀 사이에 존재하는 1.4 kg짜리 물체의 수수께끼를 풀지 못하고 있습니다.”

- 2013년 4월, 미국 44대 대통령 버락 오바마의 브레인 이니셔티브BRAIN Initiative 연설 중

흔히들 영화를 종합예술이라 한다. 연극, 문학, 음악, 무용, 조각, 패션, 컴퓨터 그래픽, 애니메이션 등 다양한 장르의 예술 요소가 어우러져 한 편의 영화 작품으로 탄생하기 때문이다.

뇌과학은 과학계의 '종합예술'이다. 우리 몸 산소 15%와 포도당 50%를 소비하는 뇌와 여기에 속한 1조 개의 신경세포를 이해하는 일은 쉽지 않다. 이 때문에 수 세기에 걸쳐 뇌 연구는 의학, 심리학, 생물학 등 다양한 학문이 융복합할 수밖에 없었다. 현대에는 이러한 경향이 더욱 심화되어 선진국을 주축으로 '종합과학'으로서

뇌 연구를 본격적으로 추진하고 있다.

과학과 산업 기술의 발전으로 인류는 풍요로운 삶의 혜택을 누리게 됐으나 그 부작용도 만만치 않았다. 그중 하나가 인구구조 변화에 따른 치매, 우울증과 같은 뇌 질환이다. 뇌질환이 현대사회의 심각한 사회문제로 부각되기 시작하면서 미국, 유럽, 일본 등 주요 선진국은 1990년대 초반부터 이에 대한 연구에 적극적으로 투자하기 시작했다.

그럼에도 불구하고 지난 20년간 뇌질환의 유병률은 꾸준히 증가했다. 단적인 예로 미국의 경우 현 상태가 유지될 경우 획기적인 보건혁신이 이루어지지 않는 한, 2050년이 되면 치매환자의 치료 비용이 미연방정부 총예산과 대등한 수준이 될 것으로 예측되고 있다.

이러한 환경 변화에 따라 뇌과학의 패러다임이 융복합 기반 연구로 변화하고 있다. 주요 선진국을 중심으로 기존의 의학, 약학, 신경과학 분야에 전자공학, 기계공학, 통신, 로봇공학, 재료공학과 같은 정보통신기술(CT), 나노기술(NT) 분야를 접



2013년 4월 3일, 오바마 미국 대통령과 프랜시스 콜린스 미국립보건원장이 '브레인 이니셔티브'를 발표하고 있다. © Chuck Kennedy/White House

목해서 다학제적으로 뇌를 이해하려는 대규모 프로젝트가 진행 중이다.

최근 뇌과학의 성과는 정보통신기술 발달 덕분이다. 정보통신기술이 뇌기능과 활동의 메커니즘을 규명하는 데 매우 유용함에 따라 최근 들어 주요국에서는 거대 사업으로 정보통신기술과 빅데이터big data 기반 뇌지도 작성brain mapping 프로젝트를 추진 중이다. 구체적으로는 뇌기능과 뇌질화에 관련된 단백질을 다차원적으로 동정하여 이해하고 이러한 정보들을 축적한 빅데이터를 뇌지도 작성에 도입하는 것이다. 이를 통해 뇌 관련 원천기술 및 응용기술을 확보하고 뇌과학 융합기술을 선점하려 노력하고 있다.

한국과학기술연구원KIST 역시 2000년대 초반부터 뇌과학 관련 융복합연구를 하기 위한 제반 인프라 구축과 연구를 집중적으로 수행하고 있다. 구체적인 연구 현황은 아래와 같다.

국가	미국	EU	일본	한국
프로젝트	BRAIN Initiative (2013)	Human Brain Project (2012)	뇌 과학연구 추진전략 (2008)	21세기 프런티어 사업 (2003)
추진주체	대통령 산하 과학기술 정책국	EU 집행위원회-EPEL	문부과학성	미래부, 교육부, 복지부, 뇌연구원
추진기간	2014년~2023년	2013년~2022년	2008년 이후	2003년~2013년
추진예산	총 10년간 30억 달러	총 10년간 11.9억 유로	1,147억 엔(2012)	연간 600억 원 내외
참여기관	국가기관(NIH 등), 민간 연구기관, 대학	유럽과 전세계의 86개 대학, 연구소 참여	일본 30개 대학, 9개 공공연구기관, 기업참여	대학, 공공연구기관, 민간기업 등
중점분야	뇌지도 작성 및 다학제적 뇌융합연구, 뇌 분야 원천과 개발연구	뇌지도 작성 및 뇌기능 규명, 뇌 응용개발	사회 기여, 건강증진을 위한 뇌 응용연구 중심	뇌신경생물 및 뇌질환 등 기초연구에 집중
ICT 활용	슈퍼컴퓨팅을 활용한 뇌 시뮬레이션 등	슈퍼컴퓨터, 빅데이터 등 ICT 활용 (연구의 주 플랫폼)	뇌 이미징 등 ICT를 기반기술로 활용	뇌 연구에 ICT 부분 활용
ICT의 응용	신규 광센서 개발, 첨단광학 기기 개발, 초 LSI 개발	고성능 컴퓨터, 저전력 컴퓨터 개발에 활용	BMI 등 ICT+뇌융합 기술 개발	뇌-인터페이스 등 뇌 융합기술 개발 추진

각국의 뇌과학 추진 전략.

케모인포매틱스 연구 : 신경과학센터, 케모인포매틱스연구단, 뇌질환 표적 및 조절 물질 발굴과 신경성 통증 치료 후보물질 개발.

복합기술을 이용한 뇌기능 연구 : 신경과학센터, 유전자와 행동의 상관관계 규명연구. 생쥐에서 유전자의 변형기술 및 유전자변형에 따른 생쥐의 행동 등 인지기능 분석 및 분석 신기술 개발.

뇌 인지기능의 신경과학적 연구 : 국가과학자 사업, 인간의 의식을 신경과학적으로 규명. 인지기능에서 시상의 역할 규명.

미세전자제어기술MEMS 기반 초소형 뇌신경·의료용 자극 및 센서 소자 개발 : 바이오마이크로시스템연구단, MEMS를 이용해 뇌의 광자극, 전기 자극 및 신호 검출 기능이 SN비가 개선된 프로브 개발 연구.

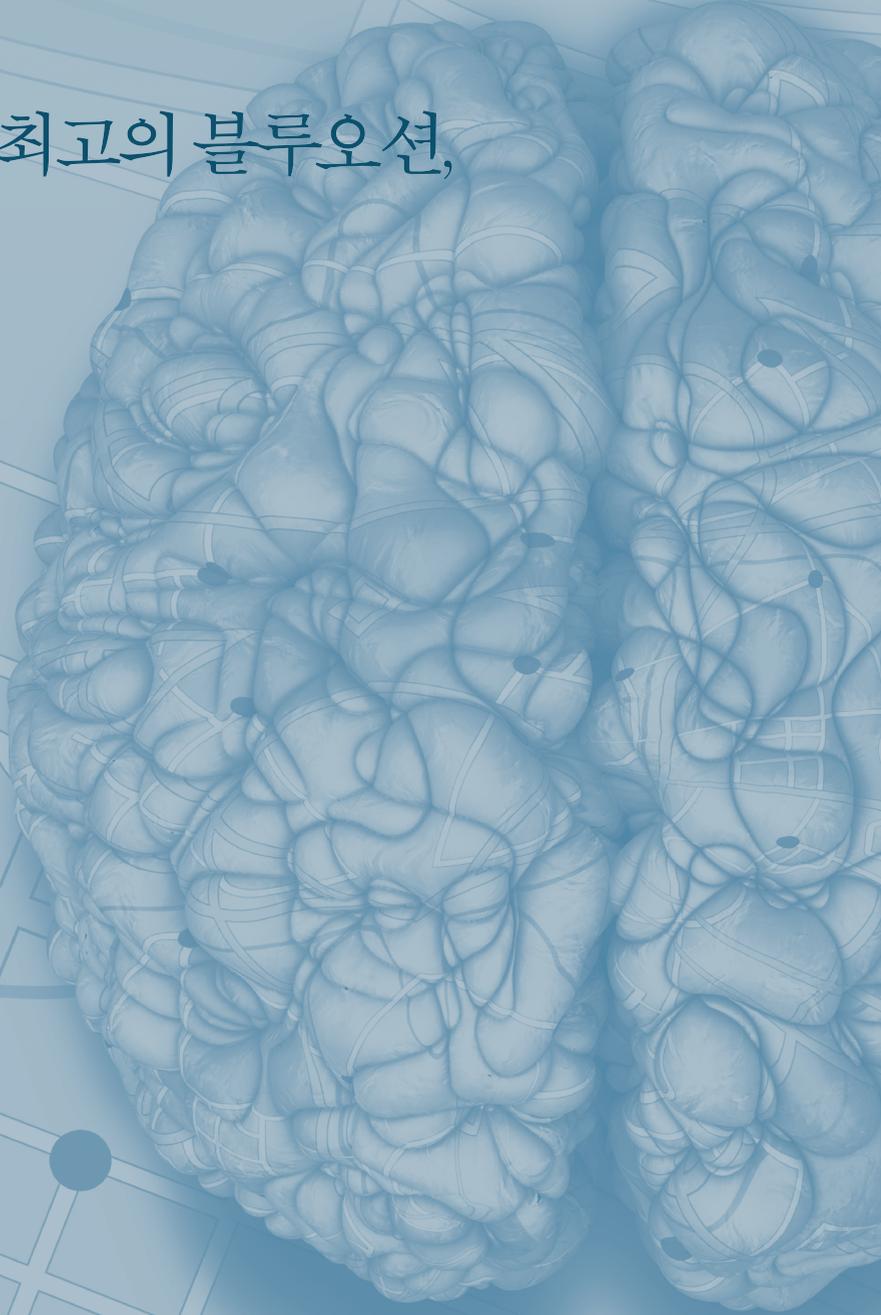
세계 수준의연구센터WCI : 기능커넥토믹스단, 듀크대Duke University의 조지 어거스틴 George Augustine을 센터장으로 유치. 50% 이상의 우수 외국인 연구 인력으로 구성. 시냅스 수준의 기능적 회로 지도 및 시냅스 신호전달의 분자적 메커니즘 연구.

뇌과학연구소 출범 : 신경과학센터, 나노바이오센터, 뇌의약센터를 뇌과학연구소로 통합한 뇌과학 전문연구소를 설립해 BT, NT, IT, CT 기반의 과학 및 공학의 융복합연구 수행.

뇌과학은 이제 단순한 연구 과제가 아니라 국가의 과학 역량이 총집결된 프로젝트가 됐다. 이는 21세기를 주도할 핵심 기술인 뇌과학에 대한 선진국의 주도권 경쟁, 뇌질환이라는 범국가적 아젠다 극복의 필요성, 뇌에 관한 빅데이터 활용 가능성 등 여러가지 의도가 반영된 것으로 보인다. 따라서 동종 및 이종기술 간 상호작용이 강화돼 뇌연구를 근간으로 한 첨단 신기술이 출현하는 한편, 생명·나노·정보·통신BNIC 기술이 융복합된 뇌과학 기술이 21세기를 이끌어 갈 것으로 예측된다.

김진현, 오원찬 | KIST 기능커넥토믹스연구단

21세기 최고의 블루오션, 뇌지도





뇌지도로 우울증 완치하는 세상

어느 대학병원의 정신건강의학과 진료실. 심각한 우울증으로 자살을 시도한 적도 있는 한 남자 환자가 들어선다. 불면증과 식욕부진까지 겪고 있는 이 70대 노인은 심한 경우 자신을 둘러싼 모든 것들이 희망을 앗아가고 절망에 휩싸이게 한다고 고백한다.

이전까지 이런 환자들에게 해줄 수 있는 건 몇몇 항우울제와 비침습적 뇌자극술이 전부였다. 설령 이런 치료법을 사용해도 모든 증상이 완화되는 것도 아니었다. 하지만 이제 시냅스 수준의 해상도를 지닌 뇌지도를 이용해 무엇이 환자를 그토록 괴롭히는지를 직접 눈으로 볼 수 있게 됐다. 정신과적 증상과 뇌지도에 나타난 뇌 세포 회로 변형의 상관관계가 규명됨에 따라 손상된 지점을 복구시킬 수 있는 치료법들이 개발된 것이다.

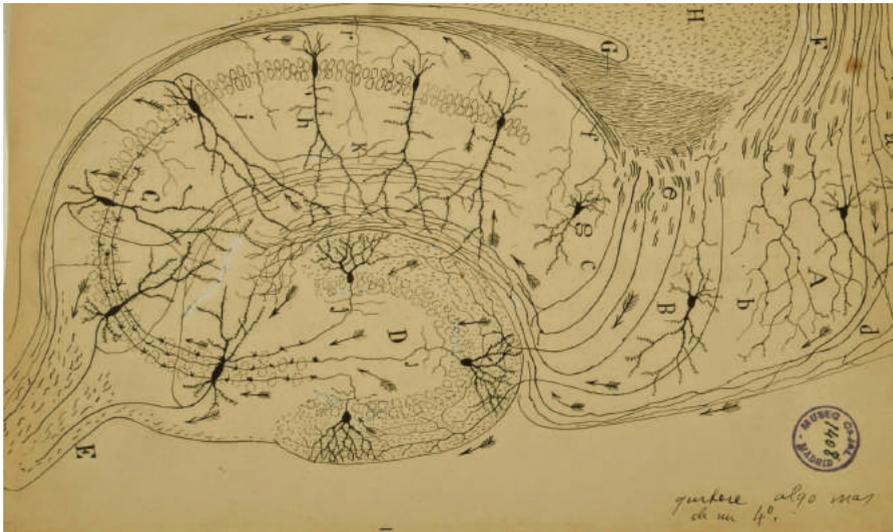
앞서 등장한 환자에게 의사는 최신 치료 방법을 몇 가지 제시한다. 망가진 회로 부위에 전극을 넣어 손상된 세포를 대신하게 하여 회로를 완성할 수도, 환자의 피부 세포를 역분화시켜 만든 줄기세포로 끊긴 회로를 다시 복구할 수도 있다. 회로의 일부인 신경세포가 아닌 연결고리가 망가졌을 경우에는 그 연결고리의 생성을 촉진시키는 약물을 투여하는 방법도 있다. 이러한 치료는 마치 서버가 외부로부터

공격을 받으면 컴퓨터 네트워크 지도를 보고 복구계획을 세우고, 전자제품이 고장 나면 회로도를 보고 고치는 과정과 비슷하다. 뇌에게도 비로소 ‘설계도’ 역할을 하는 지도가 생긴 것이다. 뇌지도 완성 이후 개발된 난치성 뇌질환 치료법들은 거의 모두 이 지도에 바탕을 두게 될 것이다.

영장류 뇌의 회로도를 만들어라

19세기 후반, 노벨 생리의학상을 수상한 스페인 신경해부학자 산티아고 라몬 카할(Santiago Ramón y Cajal)은 골지 염색법을 이용해 광학 현미경으로 신경세포의 구조를 정밀하게 관찰했다. 꼼꼼한 연구 끝에 라몬 카할은 뉴런이라고 명명한 신경세포가 뇌의 구조적, 기능적 기본 단위를 형성한다고 밝혔다. 즉 뇌 속에 세포막을 통해서 분리된 신경세포들이 존재한다는 것이다.

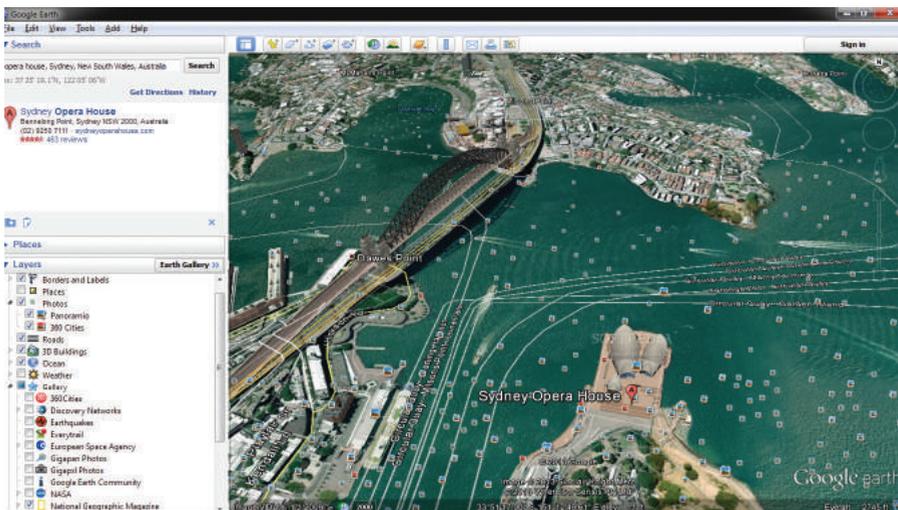
이들 개별적인 신경세포는 전기적인 신호를 생성해 다른 신경세포들과 소통하는



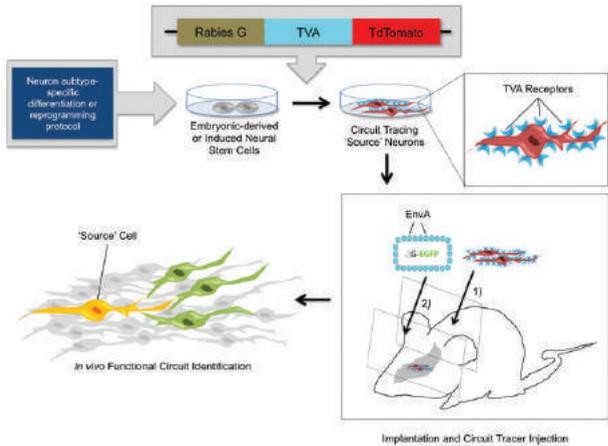
카할이 묘사한 고양이 뇌의 시냅스 구조. 그의 연구는 뉴런의 존재를 규명하는 한편으로 이들의 연결망이 뇌가 복잡한 기능을 나타내는 데 중요한 역할을 한다는 사실을 밝혀냈다.

데, 여러 개의 가지를 뺀어서 다른 뉴런들과 접촉한다. 이 접촉 부위가 바로 시냅스라고 불리는 구조다. 뇌세포가 다른 장기의 세포들과 구분되는 가장 큰 특징은 바로 다른 뇌세포들과 연결시켜주는 수많은 가지들과 그 가지들을 이어주는 시냅스들이다. 뇌지도 작성은 바로 이런 가지들과 시냅스들을 통해 신경세포들이 어떻게 연결됐는지 알려주는 지도를 만드는 작업이다.

뇌지도 작성은 여러 수준에서 이뤄질 수 있다. 전국고속도로전도와 같이 주요 연결망들만 나타낸 평면 지도를 만들 수도 있고, 구글어스와 같이 골목길과 건물 하나하나를 볼 수 있는 삼차원 지도를 만들어도 된다. 도로가 아닌 전선망 지도를 예로 들자면 발전소들 간의 연결을 나타낸 대규모 발전소 네트워크 지도를 만들 수도, 하나의 발전기 내부의 전기 회로도를 제작할 수도 있는 것이다. 구글어스나 전기 회로도 같은 구체적이고 세부적인 지도가 있으면 필요에 따라 관찰 범위를 확대하거나 축소시키며 원하는 정보를 얻을 수 있다. 뇌지도 작성은 바로 포유류와 영



구글 지도의 다양한 정보 레이어들. 뇌 지도와 질병과의 관계는 지도와 이에 얽힌 정보의 관계와 같다. 뇌 지도를 완성하면 다양한 질병이나 생리 정보를 지도에 매핑해 필요한 정보와 메커니즘을 정확하게 확인할 수 있다. © Google



신경추적기법의 활용 개요. 신경세포에 형광단백질을 주입해 이들의 움직임을 파악함으로써 신경세포 간의 네트워크 구조를 알 수 있다. © Frontiers in Cellular Neuroscience

장류 뇌의 구글어스, 또는 회로도를 만드는 것과 비견될 수 있다.

신경추적 기법으로 정밀하게 영상화

그렇다면 어떻게 신경세포의 가지 및 시냅스의 지도를 만들 수 있을까? 몸체와 가지를 모두 포함한 신경세포를 효과적으로 시각화하기 위해선 광학현미경으로 검출할 수 있는 신호를 세포 내에 침투시키는 것이 중요하다. 이를 신경추적neuronal tracing기법이라 하는데 형광단백질이 광학 신호의 역할을 담당한다. 이러한 형광단백질을 발현하는 유전자를 원하는 종류의 신경세포에 전달하는 매개체가 바로 바이러스다. 형광단백질과 바이러스 조합의 대표적인 예가 바로 아데노 관련 바이러스AAV와 녹색 형광단백질GFP의 조합이다.

AAV는 면역 반응이 적고, 신경세포와 같이 분화하지 않는 세포도 감염시킬 수 있으며, 세포 내로 주입된 유전자가 세포의 염색체에 병합되지 않아 유전적 변이를 일으킬 확률이 적다. 또 번식 후 세포를 터트리며 나오지 않기에 세포 독성이 적어 유전자 치료에 적극 활용되고 있다. 한편 AAV를 변형시키면 면역반응을 최소

화하고, 바이러스의 번식을 억제시켜 세포 독성을 줄이는 한편 신경세포에 유전자를 주입시키는 능력은 극대화할 수 있다.

GFP는 해파리에서 발견되는 형광단백질로 높은 강도의 광학 신호를 세포의 손상을 최소화시키며 얻을 수 있는 장점이 있다. 녹색이 아닌 다른 색의 신호를 방출하는 변형 GFP를 통해 여러 종류의 세포를 동시에 시각화할 수도 있다.

작동 메커니즘은 다음과 같다. 먼저 뇌조직에 직접 주입된 AAV가 특정 종류의 세포에만 존재하는 프로모터 염기서열(promoter sequence) 및 GFP 유전자를 포함한 DNA 가닥을 신경세포에 주입한다. 그러면 원하는 종류의 신경세포에 GFP가 발현돼 광학현미경으로 관찰할 때 녹색 빛을 띠게 된다.

AAV와 GFP의 조합 말고도 렌티바이러스(lentivirus), 광견병 바이러스 등 다양한 바이러스와 형광단백질들을 용도에 맞게 사용할 수 있다. 이를 통해 뇌 안의 원하는 부위에 있는 특정 종류의 신경세포를 가지 하나하나까지 정밀하게 영상화하는 것이다.

단일 세포에서 하나의 회로까지 관찰

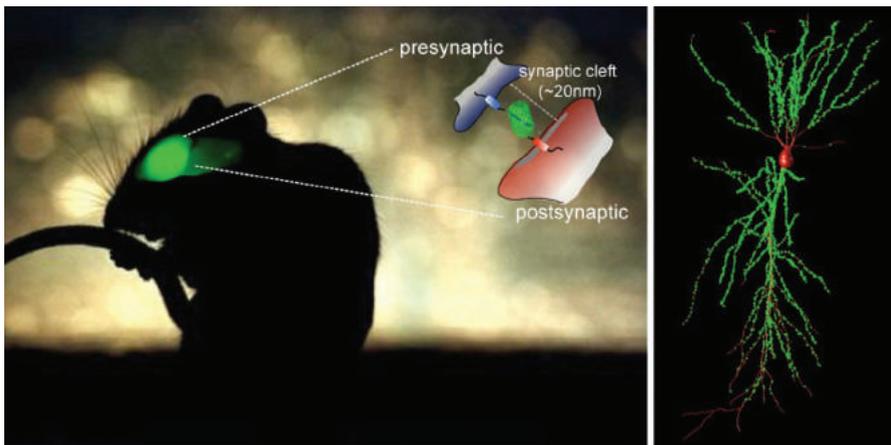
문제는 해상도다. 전자 현미경을 통해 시냅스를 관찰하는 기존 방법은 표본을 준비하는 데 너무 많은 시간과 노력이 소요돼 제한된 부위만 관찰할 수 있는 제약이 있다. 또 사용된 항체의 효율과 조직의 보존 상태에 대한 의존도가 너무 커 불안정하며, 불완전한 결과를 보여주기도 했다.

이후 등장한 뇌 신경망 지도화(mGRASP) 기술은 GFP를 두 부분(GFP1-10, GFP11)으로 나눠 두 단백질 조각을 발현하는 유전자가 각각 화학물질을 분비하는 신경세포(연접이전뉴런)와 화학물질을 받는 신경세포(연접이후뉴런)의 시냅스 단백질과 함께 발현되게 한다. 두 신경세포가 뻗은 가지 사이의 거리가 가까워져 20nm의 시냅스를 이루면 녹색 형광 신호가 광학현미경을 통해 검출된다. 따라서 신경추적 기법에서와 마찬가지로, 원하는 두 종류의 신경세포 사이의 시냅스들만 영상화할 수 있어 더욱 정

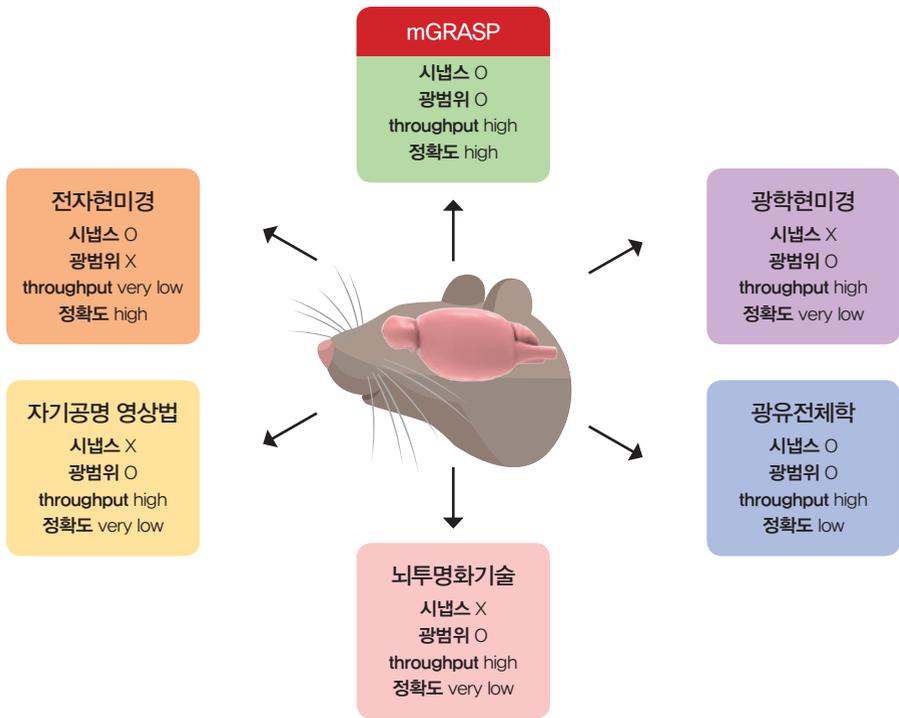
교한 지도 작성이 가능해진다.

신경추적 기법과 mGRASP 기법을 함께 사용하면 한 종류의 신경세포가 다른 종류의 신경세포와 구체적으로 어떻게 연결돼 있는지는 물론이고 가지와 시냅스의 종류, 모양, 개수, 굵기, 길이, 방향, 분포 등 세부적인 특징들을 알 수 있다. 이는 단일세포수준microscopic에서부터 여러 종류의 신경세포들이 어떻게 연결돼 하나의 회로를 이루는지 알아보는 메조스코픽mesoscopic 수준을 아우르는 범위를 가진다.

지금까진 광학현미경으로 신경추적 기법이나 mGRASP가 적용된 표본을 관찰하기 위해선 물리적으로 뇌를 잘라 절편을 만들어야 했다. 하지만 기존의 일차원적 점 대신 이차원적 평면을 단위로 표본을 스캐닝하는 라이트시트 형광현미경light sheet fluorescent microscope을 이용하면 쥐의 뇌 전체를 영상화해 삼차원 뇌 구조를 빠른 시간 안에 생성할 수 있다. 현미경이 빛을 이용해 절편 슬라이드를 대신 만들어준 격이다. 이는 물리적 접촉에 따른 표본의 손상과 뒤틀림, 그리고 이후 데이터 분석 과정에서 모든 절편들을 일일이 정렬시키고 통합해야 했던 번거로움을 일시에 해결한 것이다. 이런 고속화된 영상화 과정 이후에 대규모 영상 데이터의 처리 및 분



KIST는 최근 신경추적기법 중 하나인 mGRASP로 쥐의 뇌를 관찰하는 데 성공했다.



mGRASP 기술의 활용방안. 뇌 연구 기술은 다양한 분야에 활용될 수 있다.

석을 거치면 새로운 차원의 정밀함을 가진 포유류의 뇌지도가 작성된다.

정부 주도로 뇌지도 연구 박차

2000년대 초 인간 유전체의 모든 염기서열을 해독한 휴먼게놈프로젝트의 성공으로 포스트게놈 시대가 열렸다. 이후 유전체genome, 단백질체proteome, 대사체metabolome 등 생명체 특정 시스템의 모든 요소들과 그 요소들 간의 연결 및 상호작용을 대규모 실험과 컴퓨터 모델링 기법을 통해 알아보는 시스템 접근법systems approach이 생물학의 다양한 영역으로 파고들었다. 이는 뇌지도 작성에도 큰 영향을



라이트시트 형광현미경으로 촬영한 쥐 배아의 뇌 영상. 여러 부위를 구분해 한 번에 관찰할 수 있다. 사진은 스페인의 유전자 조작 센터에서 촬영한 것이다. © Jim Swoger / Centre for Genomic Regulation

미쳤다. 2005년 올라프 스포스^{Olaf Sporns} 박사와 패트릭 해그만^{Patric Hagmann} 박사가 뇌의 모든 구성요소와 연결구조에 관한 데이터 세트를 뜻하는 커넥톰^{connectome}이라는 개념을 제시한 이래, 정부 기관 주도의 대규모 연구 프로젝트들이 속속 발표되면서 전세계 연구진들이 뇌지도 연구에 박차를 가하고 있다.

2009년 미국국립보건원^{NIH}은 자기공명영상^{MRI} 영상 기법 중 하나인 확산텐서 영상기법^{DTI}을 이용해 뇌의 주요 신경다발^{백색질}을 영상화하는 휴먼 커넥톰 프로젝트^{Human Connectome Project}를 발표했다. 다양한 영역들이 서로 신경다발을 통해 어떤 구조로 연결돼 있는지 네트워크 이론에 입각해 알아보는 것이 이 프로젝트의 목표다. NIH가 약 400억 원 규모의 연구비를 지원하는 이 프로젝트에는 워싱턴대^{Washington University at St. Louis}, 미네소타주립대^{University of Minnesota} 컨소시엄과 하버드대^{Harvard University}, UCLA 컨소시엄이 양대 축으로 연구를 진행하고 있다.

2013년 1월엔 유럽연합의 미래 기술 주력사업^{Future and Emerging Technologies Flagship} 중 하나로 스위스 로잔연방공대^{Federal Institute of Technology Lausanne} 헨리 마크람^{Henry Markram}이 이끄는 휴먼 브레인 프로젝트^{Human Brain Project}가 선정됐다. 이 프로젝트는 10년 동안 총 1조 8,000억 원 규모의 지원을 받으며, 컴퓨터를 통해 쥐와 사람의 뇌 구조 및 기능을 분자 수준에서 시뮬레이션한다는 목표를 가지고 있다.

한편 2013년 4월 미국 오바마 대통령은 총 3조 원 이상을 투자하는 브레인 이니셔티브^{Brain Initiative}를 발표하면서 뇌의 질병을 치료하기 위해 나노기술이나 컴퓨터 과학과 같은 다양한 학문의 융합을 시도한다고 밝혔다. NIH와 미 국방부 방위고등연구계획국^{DARPA}, 미국 국립과학재단^{NSF}이 참여한 브레인 이니셔티브 뇌지도 작성 프로젝트 결과로, 2014년 4월 앨런뇌과학연구소^{Allen Institute for Brain Science}에서 수행한 쥐 뇌의 메조스케일 커넥톰^{mesoscale connectome}에 관한 연구가 『네이처』^{Nature}지에 게재됐다. 또 같은 해 다른 연구 기관들에서 시행된 비슷한 맥락의 연구 세 가지도 추가로 주요 잡지에 게재됐다. 이들 연구 모두 쥐의 특정 뇌 영역^{대뇌피질}이나 영역

들 간의 연결구조시상-대뇌피질, 특정 신경조절시스템세로토닌계를 각종 신경세포 추적자들을 통해 정밀한 수준으로 영상화한 데이터베이스를 구축했다는 특징이 있다.

연구자들은 이런 연구를 통해 기존에 알려지지 않았던 대뇌피질 간 연결패턴에 따른 세 가지 클러스터를 발견하고, 기존에 알려지지 않았던 세로토닌계로의 새로운 입력 소스를 발견하는 등 걸출한 성과를 냈다. 한편 앨런뇌과학연구소는 AAV-GFP 주입을 통해 만들어진 쥐 뇌 연결 지도Allen Mouse Brain Connectivity Atlas와 더불어 발생 과정의 쥐 뇌지도, 인간 뇌지도, 쥐 뇌의 유전자발현지도 등 다양한 삼차원 지도 데이터베이스를 오픈소스로 제공하고 있다.

기초과학 강국 일본도 본격적인 뇌지도 작성 연구에 뛰어 들었다. 2014년 9월 일본은 정부 주도로 브레인/마인드Brain/MINDS라는 프로젝트를 게이오기주쿠대 Keio University, 이화학연구소RIKEN, 도쿄대The University of Tokyo를 중심으로 진행하고 발표했다. 이 프로젝트의 특이한 점은 실험동물로 영장류의 일종인 비단원숭이



유럽의 뇌 연구 프로젝트인 휴먼 브레인 프로젝트를 이끄는 스위스 로잔연방공대 헨리 마크렘 교수. 최근 유럽연합, 미국, 일본 등 주요 선진국들은 뇌 연구에 박차를 가하고 있다. © PHOTO8.com

marmoset를 이용한다는 것이다.

표준화와 자동화가 관건...영상의 해상도도 높아야

이렇게 전세계적으로 뇌지도 작성을 위한 연구가 치열하게 진행되고 있는 가운데 이들 연구가 생물학적, 의학적으로 유의미해지기 위해 해결해야 할 과제가 있다. 바로 표준화와 자동화다. 이는 실험 동물에 생물학적 신호원을 주입하는 방법, 영상화를 위해 표본을 제작하는 방법, 실제 광학현미경으로 이미지를 얻는 방법, 이미지 데이터를 처리하고 보관하고 분석하고 해석하는 모든 소프트웨어적 방법을 표준화하고 일종의 가이드라인을 만드는 작업이다. 궁극적으로는 서로 다른 연구 기관에서 얻은 데이터가 효과적으로 접근하기 편한 하나의 데이터베이스로 통합돼 소통할 수 있게 돼야 한다.

이런 표준화는 실험 기법, 영상화 기법, 데이터 분석 기법 모두가 자동화될 때 비

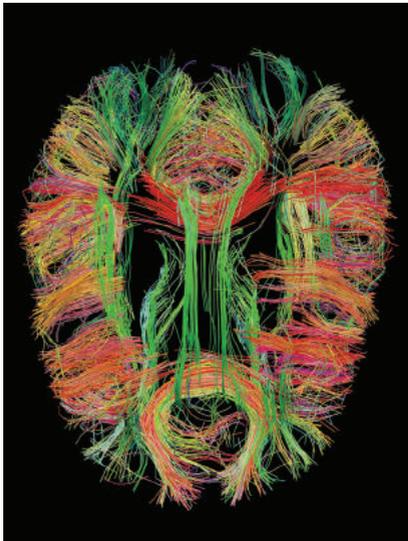


미국은 2013년 4월, 오바마 대통령이 '브레인 이니셔티브'를 발표한 이래 연방정부 차원에서 뇌 연구에 많은 투자를 하고 있다. 사진은 미국 뇌 연구의 중심지 중 하나인 앨런뇌과학연구소. © Joe Mabel

로소 완전히 이루어질 수 있다. 수술 로봇이나 기계 학습 알고리즘을 이용한 영상 획득 및 분석법의 개발은 표준화뿐 아니라 실험주기를 단축시켜 대규모 연구를 용이하게 하고, 데이터의 질과 뇌지도 제작 기술의 발전 속도를 증가시킬 것이다.

또 실험 동물이 아닌 인간의 뇌지도를 더욱 정교하게 만들 수 있는 기술도 필요하다. 기존의 인간을 대상으로 한 연구는 비침습적일 수밖에 없고, 따라서 DTI와 같이 혈관 내 물 분자의 확산 속도와 방향을 통해 신경다발의 경로를 간접적으로 예측하는 수준에 머물러 있다. 영상 데이터의 해상도 또한 동물실험 데이터에 비해 떨어진다.

미국, 유럽연합과 더불어 최근 일본까지 정부 주도로 뇌지도 작성에 대규모 연구비를 투자한다는 것은 이 연구 영역이 세계적인 추세에 부합한다는 강력한 증거다. 고무적인 점은 대부분의 정부 주도 프로젝트들이 10년 단위의 장기 프로젝트이며 조 단위의 규모를 자랑해 비용문제에서 비교적 자유롭다는 것이다. 또한 이런 대규모 프로젝트 이전에도 뇌과학이 빠른 속도로 발전하는 경향을 보여주었기



휴먼 커넥톰 프로젝트를 통해 밝혀진 인간 대뇌의 시냅스 연결구조. 2000년 이후 뇌 연구는 급물살을 타서 최근 10여 년 동안 역사 이래 2000년까지 밝혀진 것보다 뇌에 대해 더 많은 사실을 알아냈다는 평가를 받고 있다.
© Human Connectome Project

때문에 풍성한 결실을 맺을 가능성이 높다.

문제는 유전체와 달리 사람의 커넥톰을 모두 읽어내기 것은 어렵다는 점이다. 사람의 유전체는 모든 세포 안에 담겨 있지만, 커넥톰은 그렇지 않다. 인간에게 시행할 수 있는 비침습적인 실험 기법은 필연적으로 해상도의 저하를 초래한다. 이 때문에 혁신적인 영상 기법이나 신호 추출 기법이 나오기 전까지, 인간 뇌지도 작성은 해상도나 정보의 다양성 면에서 제약이 있을 수 있다.

뇌지도 작성을 바탕으로 새로이 형성될 시장은 광범위하기에 연구를 늦출 수 없다. 알츠하이머병, 파킨슨병과 같은 퇴행성 뇌질환 및 자폐증, 조현병, 우울증 등 정신과적 질병의 메커니즘 연구의 밑바탕이 되기 때문에 제약회사나 생명공학 회사들의 투자를 이끌어낼 수 있을 것이다. 정밀한 뇌지도는 또한 기존의 딥러닝과 같은 기계학습 알고리즘의 발전을 가져와 새로운 형태의 인공지능 및 로봇시스템의 개발에도 큰 도움이 될 것이다.

참고자료



- Bohland, J. W. et al. | "A proposal for a coordinated effort for the determination of brainwide neuroanatomical connectivity in model organisms at a mesoscopic scale ", *PLoS computational biology* | 2009
- Devor, A. et al. | "The challenge of connecting the dots in the BRAIN ", *Neuron* | 2013
- Mitra, P. P. | "The circuit architecture of whole brains at the mesoscopic scale ", *Neuron* | 2014
- Oh, S. W. et al. | "A mesoscale connectome of the mouse brain ", *Nature* | 2014

김윤경 | KIST 뇌의약연구단

뇌건강 발목 잡는 ‘꼬인’ 단백질을 풀어라



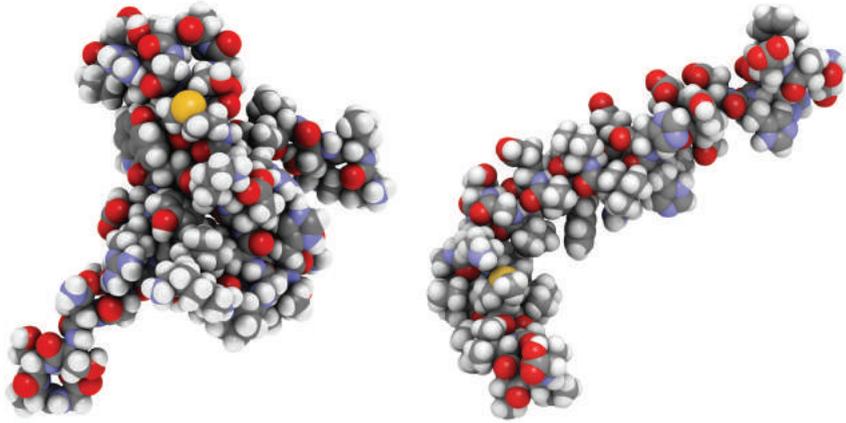


치매에 걸려도 괜찮아

A씨는 행복한 삶을 위해 무엇보다 건강이 최우선이라고 믿는 50대 가장이다. 하지만 최근 아내의 기억력이 예전같지 않다. 건망증이려니 생각하며 흘려 넘겼지만 나이가 나이인지라 신경쓰이는 것은 어쩔 수 없다. 그러던 중 딸 아이가 '뇌' 종합검진을 권유했고 A씨 부부는 병원에서 다양한 뇌기능 검사 및 뇌영상 진단을 받았다.

검사결과 현재 뇌기능은 모두 정상이지만, 이십 년 후 아내가 치매에 걸릴 확률이 99% 이상이라는 진단이 나왔다. 뇌영상 진단 결과 비정상적으로 '꼬인' 단백질 덩어리가 기억을 담당하는 해마 부위에 축적돼 있기 때문이란다. 이는 알츠하이머성 치매의 초기 단계로 뇌기능에 미치는 영향은 아직 미미하나 방치할 경우 위험하다고 한다. 뇌 속의 '꼬인' 단백질은 점차 증가해 신경세포 퇴화를 유도하고 결국 뇌기능 손상을 야기한다는 것이 의사의 이야기다.

다행히도 최근 개발된 치료제를 복용하면 뇌에 축적된 '꼬인' 단백질 응집체들을 말끔히 없앨 수 있다고 한다. 예전같았으면 어림도 없을 이야기다. 약을 처방받아 집으로 돌아오는 길, A씨는 건강한 노후를 위해 아내와 매일 저녁 운동하기로 다짐한다.



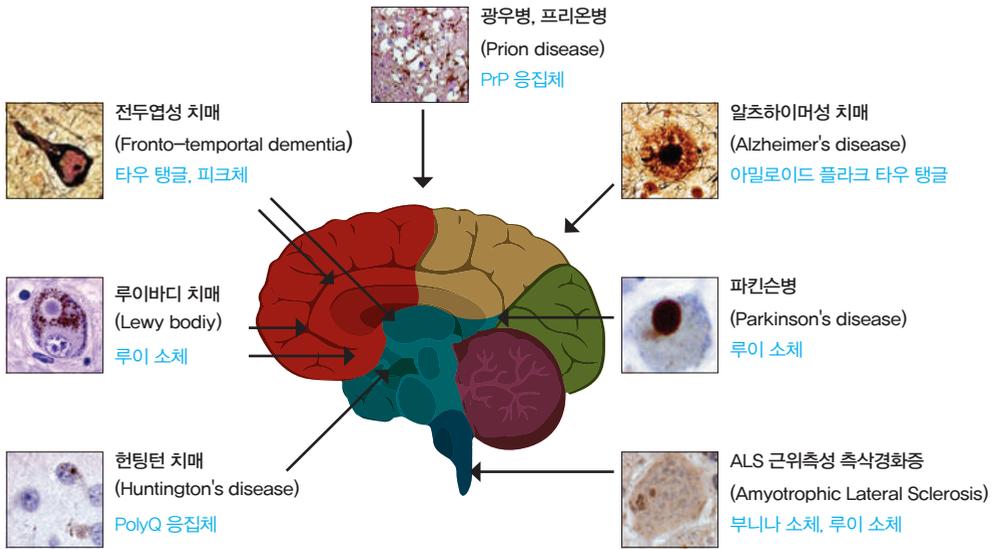
알츠하이머병과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려진 두 가지 단백질인 타우 τ 단백질(왼쪽)과 베타 β 아밀로이드(오른쪽). 대부분의 퇴행성 질환은 특정 단백질의 응집과 관련이 있다.

뇌 단백질 응집으로 야기되는 퇴행성 뇌질환

앞의 예처럼 특정 단백질이 변형돼 응집되는 것은 대부분의 퇴행성 질환에서 나타나는 현상이다. 현재 학계는 뇌에 축적된 단백질 응집체가 정상적인 신경세포의 기능을 저해하고 신경세포의 퇴행을 유발할 뿐 아니라 뇌 염증반응을 일으키는 근본적인 원인이라는 데 대체로 동의하고 있다.

대표적인 예가 알츠하이머병이다. 베타 아밀로이드 및 타우 단백질의 섬유화된 응집현상이 알츠하이머의 주요한 병리 메커니즘으로 꼽힌다. 비정상적으로 응집된 단백질이 해마 및 대뇌피질에 축적돼 기억을 담당하는 뇌 신경세포의 손상을 야기하는 것이다. 손상된 신경세포는 복구되지 않기에 뇌 신경세포의 손상은 뇌기능의 영구적인 손상을 초래한다. 실제 알츠하이머병 환자의 경우 오전에 만난 사람이 누구인지, 점심 먹고 양치질을 했는지와 같은 단기 기억의 상실로부터 시작해, 여기가 어디인지, 나는 누구인지와 같은 종합적 인지 기능의 퇴행 증상을 보인다.

또한 뇌의 특정 부위에서 생겨난 단백질 응집체는 점진적으로 퍼져나가 뇌 전체



퇴행성 뇌질환에서 나타나는 단백질의 응집 현상. 다양한 유전적, 환경적 요인에 의해 뇌의 특정 부위에 축적된 단백질 응집체는 뇌 신경세포의 손상을 야기하며 점차 뇌 전체로 확장된다.

로 확산되는 경향을 나타낸다. 알츠하이머성 치매의 경우, 기억을 관장하는 해마와 대뇌피질의 손상으로부터 시작해 뇌의 전 부위로 손상이 확산된다. 이에 따라 언어능력 이상, 청각능력 이상, 운동능력 저하 등의 문제점을 나타내며 결과적으로 죽음에 이른다.

이렇게 뇌 신경세포의 영구적인 손상을 야기하는 질환군을 총체적으로 퇴행성 뇌질환이라고 한다. 뇌의 어느 부분에서 신경퇴행이 시작되는가에 따라 질환 초기 증상은 다르지만, 시간이 지날수록 뇌 전체로 확장돼 복합적인 뇌기능 상실에 이르는 것으로 보인다.

아밀로이드 플라크, 타우 탱글 등 뇌에 축적된 단백질 응집체는 신경세포 퇴행을 유발하고 뇌염증반응을 일으키는 근본적인 원인이다. 이 때문에 퇴행성 뇌질환을 근본적으로 치료하기 위해서는 단백질 변형 및 응집을 제어하는 기술을 확립해

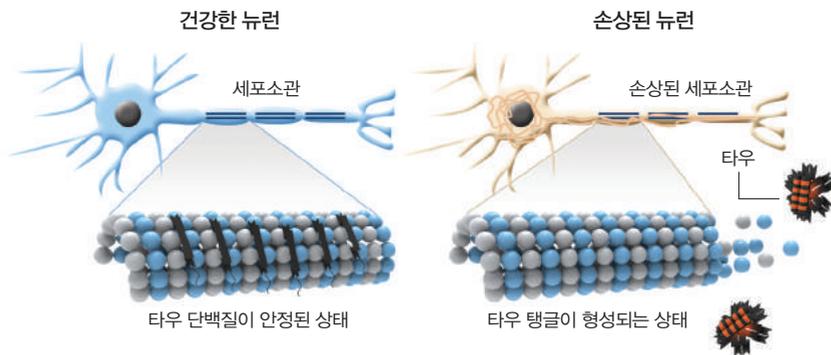
야 한다.

현재 대부분의 퇴행성 뇌질환은 완치가 불가능하다. 또한 뇌질환 치료 약물들이 가지고 있는 부작용의 문제를 감안할 때 뇌 신경질환을 근본적으로 치료하는 뇌 단백질 변형 제어기술에 거는 기대가 매우 높다.

실타래처럼 꼬인 뇌 단백질을 제어하라

지난 이십 년간의 치매 치료제 연구 트렌드는 알츠하이머 질환의 초기 바이오마커인 아밀로이드 플라크의 형성을 저해하는 것이었다. 1990년대 말 알츠하이머 질환 생성의 주된 원인으로 여겨지는 베타 아밀로이드 단백질 생성 관련 유전자를 복제 cloning하는 데 성공하면서 이를 표적으로 하는 신약개발이 탄력을 얻었다. 다국적 제약회사들은 베타 아밀로이드 생성효소를 타겟으로 한 치료제 개발에 막대한 투자를 아끼지 않았다. 하지만 2010년 일라이릴리 Eli Lilly and Company사에서 개발 중이던 베타 아밀로이드 생성효소 저해제가 임상 2상에서 실패한 이후, 대부분의 다국적 제약회사들은 뇌질환 치료제 관련 연구개발 파이프라인을 대폭 축소했다.

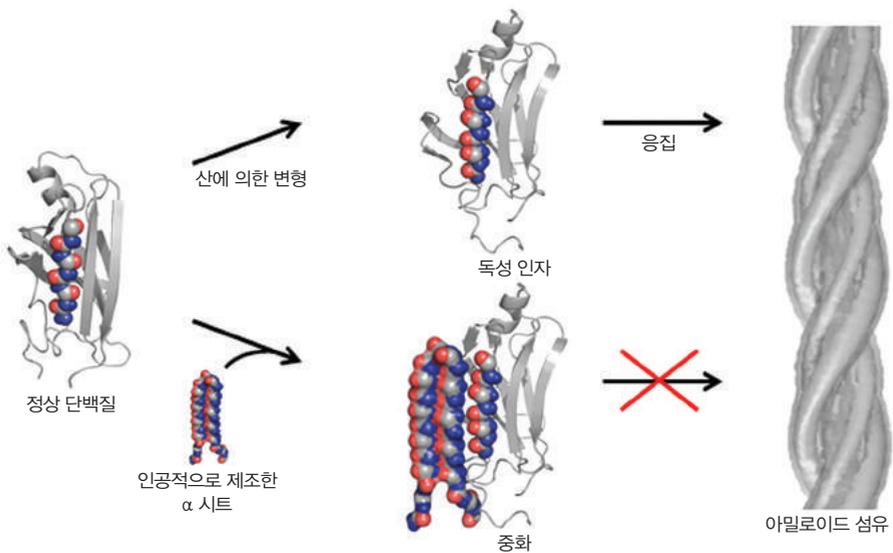
이후 다국적 제약회사들은 뇌에 축적된 아밀로이드 응집체를 제거하는 새로운



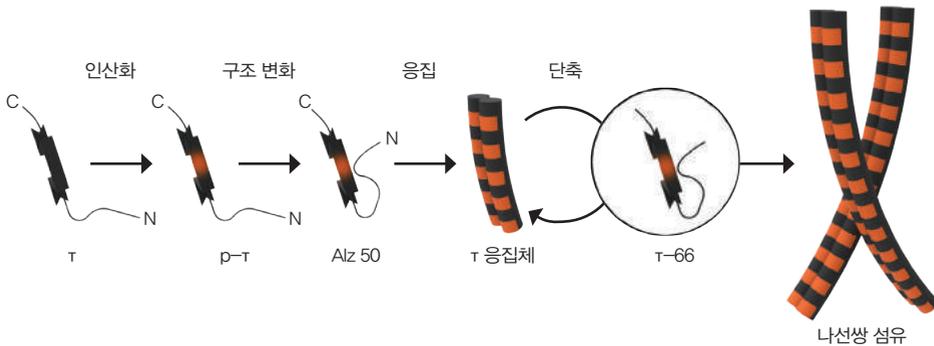
비정상적 타우 단백질 응집으로 신경세포 손상이 일어나는 모습. 타우 단백질이 엉겨붙어 세포 내 소관을 분해한다.

방법으로 아밀로이드 표적 항체백신에 주목하기 시작했다. 화이자Pfizer Incorporated사의 바피뉴주맙Bapineuzumab과 일라이릴리사의 솔라네주맙Solanezumab 등이 대표적인 항체백신이다. 이 백신들은 이미 치매가 진행된 환자의 혈액으로 방출된 베타 아밀로이드 단백질을 제거하는 데 초점을 맞춘다. 항체 의약품을 투여함으로써 아밀로이드 단백질의 변형 및 응집이 더 이상 진행되는 것을 막고, 더 나아가서는 기억력을 개선시킬 수 있을 것이라는 믿음으로 다국적 제약회사를 위주로 많은 연구가 이뤄지고 있다.

하지만 항체 신약품들의 잇따른 임상 3상 실패는 치매 치료제 개발의 어려움을 단적으로 보여준다. 실제로 1998년부터 2011년까지 101개의 알츠하이머병 치료제 개발이 임상 실패로 돌아갔다. 같은 기간 미국 식품의약국FDA의 승인을 받은 치매 증상 완화제는 단 3개에 지나지 않았다. 이는 베타 아밀로이드를 타깃으로 하



최근 약물을 이용해 비정상적인 단백질 응집을 차단함으로써 알츠하이머병을 치료하려는 연구가 활발하다. 이러한 약물들은 '교인 단백질'들에게 항체처럼 작용해 아밀로이드 섬유 형성을 막는다. © University of Washington



타우 단백질의 변형으로 유도되는 타우 단백질의 응집과정. 단백질 응집 메커니즘에 대한 이해가 발전하면서 알츠하이머병 치료 가능성도 높아졌다.

는 약물 개발이 40% 이상을 차지하는 현재 치매 치료제 개발 파이프라인에 대한 우려를 낳았으며, 동시에 새로운 치료 메커니즘 제시를 요구하고 있다.

이러한 요구에 부응해 최근 주목받는 것이 타우 탱글 τ tangle이라 불리는 비정상적 타우 단백질 응집체이다. 정상적 타우 단백질은 신경세포의 기능과 형태를 유지하는 데 필수적인 역할을 한다. 그런데 이것이 비정상적으로 응집될 경우 신경세포의 퇴행을 직접적으로 유도한다. 최근 학계에서는 축적된다고 한들 뇌기능 손상까지 이어지는 데 길게는 10년 이상이 걸리거나 병변이 나타나지 않는 아밀로이드 플라크보다, 뇌 신경세포 사멸에 직접적인 영향을 미치는 타우 단백질의 응집을 예방하고 제거하는 것이 치매 치료에 효과적이라는 의견이 지배적이다. 타우 단백질의 응집은 알츠하이머성 치매뿐 아니라 다양한 퇴행성 뇌질환의 공통 병인으로 작용한다. 이 때문에 타우 단백질의 응집을 제어하는 약물이 개발될 경우 신경세포의 퇴행을 막을 수 있는 근본적인 치료제가 될 것으로 예상된다.

자발적으로 응집되는 아밀로이드 단백질과 달리, 타우 단백질은 신경세포 내에서 다양한 변형을 거쳐 서서히 응집하는 경향을 보인다. 따라서 이를 효과적으로 구현해내는 분석기술 개발이 관건으로 지목된다. 한국과학기술연구원 뇌의약연구

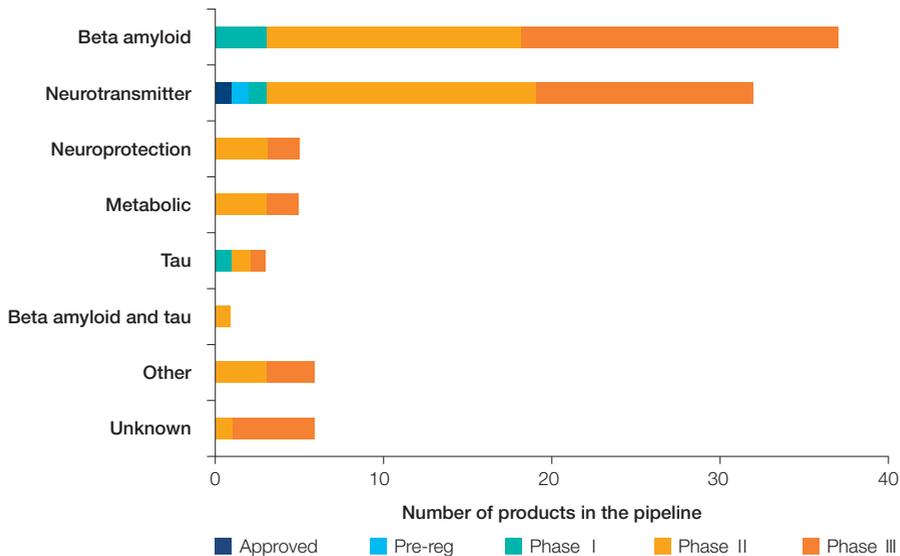


알츠하이머병 치료약 연구는 현재 3상 실험이 진행되고 있다. 사진은 미국 보스턴의 브라이엄 여성병원에서 알츠하이머병 치료제 임상실험에 참여한 헬렌 데코스테 씨. © Jessica Rinaldi / Boston Globe

단은 타우 응집을 신경세포에서 유도하고 치료효과를 실시간으로 모니터링할 수 있는 원천기술을 확보하는 한편, 이를 이용해 타우 응집제어제를 개발하는 데 주력하고 있다.

타우 단백질응집 제어기술 개발, 어디서부터?

그간 치매 치료제 개발의 가장 큰 실패 요인은 동물실험에서 뛰어난 효과를 보였던 후보물질들이 임상실험에서 효능을 나타내지 않았다는 것이다. 사람의 경우 다양한 유전적, 환경적 요인에 의해 치매가 발병한다. 이에 비해 동물 모델의 경우 특정 단백질의 발현을 조절해 인위적으로 질병을 유도시키기 때문에 치료 타겟의 검증이 무엇보다도 선행되어야 한다. 따라서 사람에게 나타나는 비정상적 타우 단백질 변형 및 응집 메커니즘을 구현해주는 플랫폼 기술을 확립하고 이를 조절하기 위한

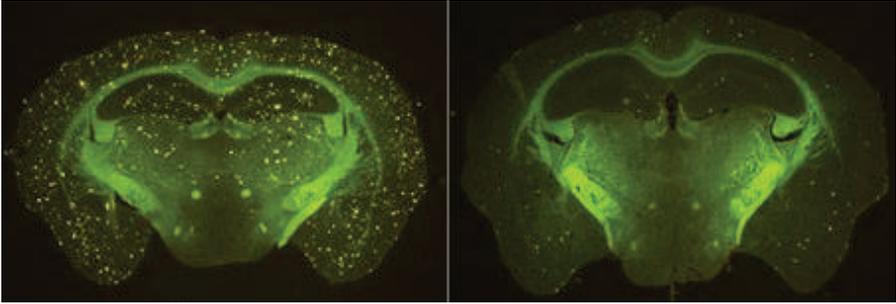


알츠하이머성 치매의 타깃별 치료제 개발 현황. 베타 아밀로이드와 신경전달물질과 관련된 연구가 가장 빠른 진척을 보이고 있다. (Citeline Pipeline Database, 2012)

치료 타깃을 선별하려는 노력이 필요하다.

사실 퇴행성 뇌질환을 근본적으로 치료할 수 있는 치료제는 현재 존재하지 않는다. 지금까지의 치료방법은 단순히 증상완화를 목적으로 하거나 병의 진행속도를 늦추는 수준에 지나지 않는다. 따라서 퇴행성 뇌질환의 병인을 타깃으로 한 뇌 단백질 응집 제어기술은 병의 진행을 멈출 수 있는 최초 신약으로 발전할 수 있다. 이는 향후 퇴행성 뇌질환 치료제 시장을 주도적으로 개척할 수 있는 기틀이 될 것이다.

2014년 알츠하이머병 치료제 시장은 40억 달러에 불과하다. 하지만 현재 임상시험 중인 아밀로이드 응집 저해제들이 FDA 승인을 얻을 것이라 기대되는 2018년을 기점으로 시장이 폭발적으로 증가해 2021년에는 100억 달러에 이를 것으로 추정된다. 베타 아밀로이드에 비해 타우 응집 제어기술은 아직 개발 초기 단계로 응집 제어기술 개발에 성공할 경우 해외기술 의존도를 탈피하고 세계 시장을 선점할



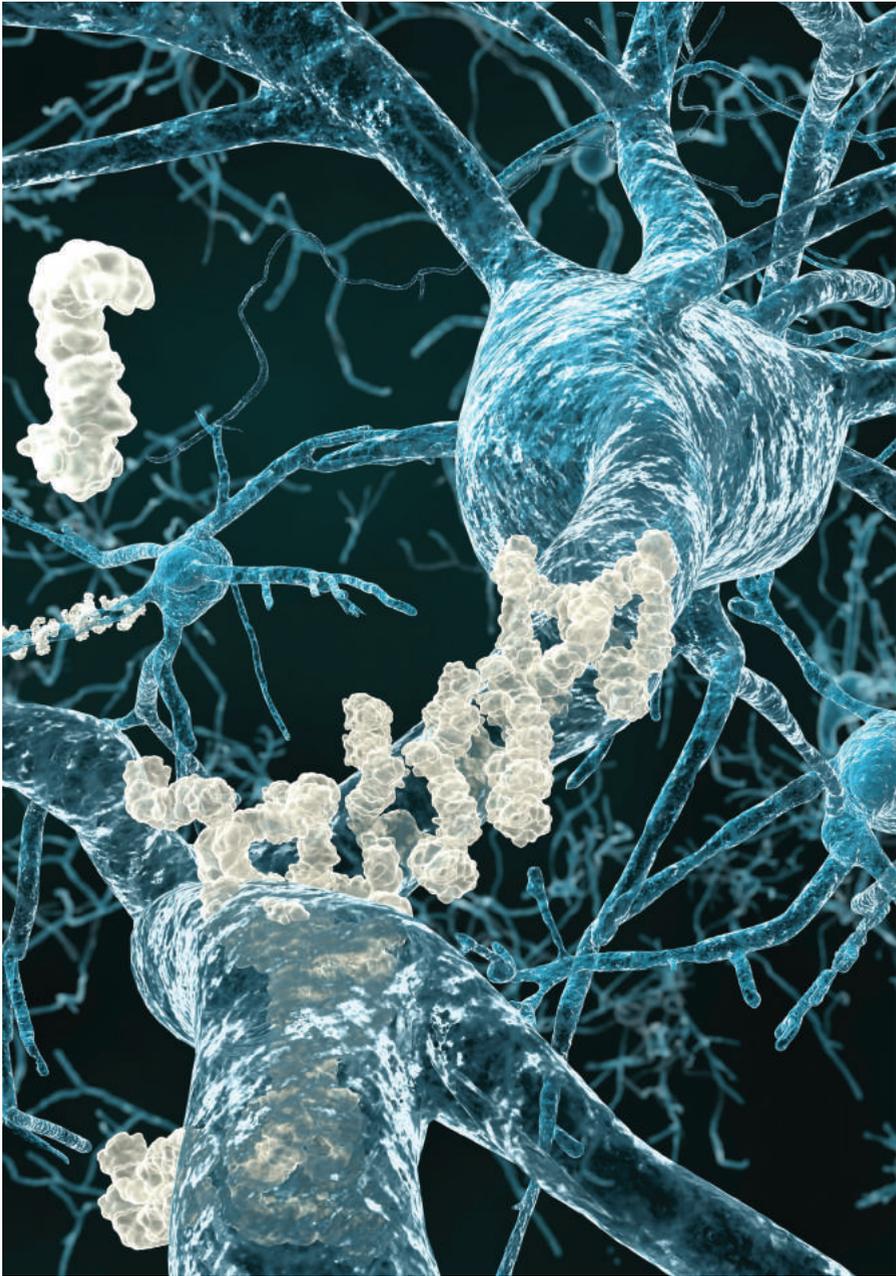
KIST 뇌의약연구단에서 개발한 알츠하이머병 치료제의 효과. 알츠하이머병 생쥐의 뇌(왼쪽)에서 형광색 점으로 확인되는 베타 아밀로이드 응집체가 신약후보물질인 EPPS 투약 후 뇌에서 거의 사라졌음을 확인할 수 있다(오른쪽). 뇌의약연구단은 타우 응집에 대해서도 치료제 개발을 준비하고 있다.

수 있을 것으로 기대된다.

국내 연구, 진단기술에만 쏠려

지금껏 아밀로이드를 표적으로 하는 메커니즘 치료제는 반복적인 임상실험 실패를 경험했다. 이에 학계와 제약회사는 실제 환자와 더 유사한 질환 모델을 구축해 치료 약물의 효능을 예측하는 기술을 개발하는 데 힘쓰고 있다. 그중 가장 두각을 나타내고 있는 것은 인공 줄기세포*iPSC* 기술을 활용해 환자유래 질환모델을 구축하는 것이다. 환자의 유전정보를 반영해 환자와 유전적으로 근접하게 만든 질환모델은 약물 치료 효능을 미리 예측할 수 있게 함으로써 임상실험에 소요되는 막대한 비용을 절감해 줄 수 있을 것으로 기대된다. 또한 치매 환자유래 질환 신경세포 모델은 추후 치매 치료제를 개발하기 위한 주요 플랫폼으로 자리매김할 것으로 예상된다.

미국이나 유럽에서는 아밀로이드 응집 저해제 개발의 연이은 실패 이후 다국적 제약회사 대신 국가가 전면에서 나서 치매 치료제 개발 연구를 지속적으로 이어가고 있다. 이에 비해 우리나라의 경우 뇌질환 치료제 개발에 성공하기 어렵다는 인식



신경세포에 베타 아밀로이드 플라그가 붙어있는 모습. 알츠하이머병 치료제 시장은 아직 작은 편이지만 2018년부터 폭발적으로 성장할 것으로 기대된다. 관건은 단백질 응집을 얼마나 제어할 수 있느냐에 달렸다.

이 지배적이어서 치매 관련 신약 개발이 거의 이뤄지지 않고 있는 상황이다. 현재 국가주도 연구의 대부분은 단기간에 성과를 낼 수 있는 치매 바이오마커 개발이나 이를 활용한 진단기술 개발 연구가 주류를 이루고 있다. 치매를 조기에 진단하더라도 이를 근원적으로 치료할 수 있는 치료제가 없는 현실을 감안하면, 관련기술의 해외 의존도만 높이는 결과를 낳지 않을까 우려된다.

참고문헌



- Pathology of Neurodegenerative Disease | 2012
- "Protein aggregation diseases: pathogenicity and therapeutic perspectives", | *Nature Reviews Drug Discovery* | 2010
- Datamonitor; Citeline Pipeline Database | 2012.

조일주 | KIST 바이오마이크로시스템연구단

뇌질환 고치는 스마트 브레인 인터페이스 칩





뇌질환은 더 이상 난치가 아니다

가까운 미래, 뇌의 동작원리가 완벽히 규명됐다는 뉴스를 상상해본다. 뇌의 동작 원리가 규명된 이후 뇌질환 진단 방법 및 치료제가 속속 개발되면서 뇌질환은 더 이상 난치병이 아니다. 사람들은 병원에서 정기적으로 검진을 받아 뇌 회로에 이상이 있으면 곧바로 작은 칩을 머리에 이식해 치료를 받는다. 치매나 간질, 파킨슨병, 우울증 등 뇌질환의 조기 치료도 가능해져 환자 수는 점점 감소할 것이다.

한편 뇌지도 작성에 큰 역할을 한 스마트 브레인 인터페이스 칩은 뇌신호를 정확히 읽을 수 있어 우리의 생활을 많이 바꿔 놓을 것이다. 생각만으로 TV 채널을 바꿀 수 있고, 자판 없이도 휴대전화나 컴퓨터에 타이핑 입력이 가능하다. 더 나아가 전신마비 환자들조차도 생각으로 제어하는 웨어러블 로봇을 이용하여 자유롭게 활동하는 날이 올 수도 있다. 이쯤 되면 오히려 생각을 훔치는 것을 방지하는 법이 필요하다는 이야기가 들려오지 않을까?

생각을 읽어내는 칩

2015년 5월 흥미로운 실험에 성공했다는 논문이 『사이언스』*Science*지에 발표됐다. 캘리포니아공대(California Institute of Technology)에서 전신마비 환자의 의도를 뇌파를 통

해 읽어 로봇 팔을 조작하는 실험에 성공한 것이다. 2012년에도 사람의 생각을 읽어 로봇 팔을 조작하는 실험이 성공했지만 이번 실험은 사람의 의도를 읽었다는 점에서 그 의미가 크다.

이전의 연구에서는 운동을 제어하는 부분에서 나오는 신호를 분석하여 로봇 팔을 조작해야 했다. 이 때문에 팔을 어디로 움직일지 계속 생각해야 하는 데다, 제어가 복잡해 오랜 시간 환자가 훈련을 해야 한다는 단점이 있었다. 하지만 이번 연구결과는 운동을 명령하는 상위 신호인 '의도'를 읽은 것으로 제어가 이전에 비해 간단해졌다. 이러한 발전이 가능했던 이유는 팔을 움직이려는 의도를 담당하는 부분의 뇌지도가 작성돼 이 부분에서 뇌신호를 읽을 수 있었기 때문이다.

뇌는 1000억 개 이상의 신경세포와 9000억 개 이상의 신경교세포로 이뤄져 있으며, 신경세포들은 서로 연결돼 뇌 회로망을 구성한다. 뇌지도를 작성한다는 것

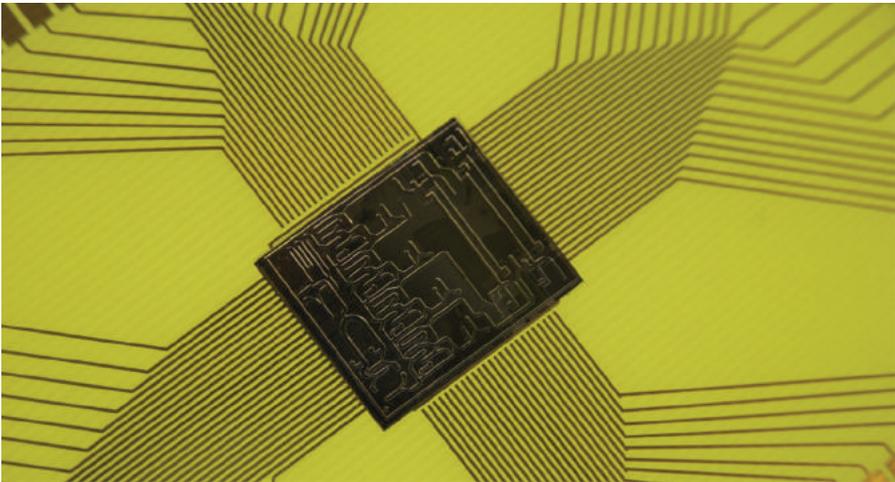


뇌-기계 인터페이스는 이미 생각을 읽는 수준에 이르렀다. 캘리포니아 공과대학의 연구팀은 사람의 머리에 칩을 심어서 생각만으로 로봇 팔을 제어하는 데 성공했다. © Caltech

은 신경세포들의 연결관계를 밝혀 이들 회로망의 물리적, 기능적 연결관계를 밝히는 일이다. 이를 통해 뇌부위 각각의 역할을 알아내는 것이 궁극적인 목표다.

정밀한 뇌지도를 작성하려면 뇌의 각 부위에서 발생하는 뇌신호를 단일 신경세포 수준에서 읽을 수 있어야 한다. 이 때 최대한 많은 신경세포에서 나오는 신호를 동시에 읽는 한편, 각 부위 간의 연결이나 상호작용을 이해하기 위해 동시에 뇌의 여러 부위에서 뇌신호를 측정할 수 있어야 한다. 이에 지금까지 주로 사용한 방법은 해당 부위에 얇은 금속 전극을 삽입하는 것이다. 하지만 이는 금속 전극의 크기 때문에 개수를 늘리는 데 한계가 있어 동시에 여러 부위에서 많은 수의 신경신호를 측정하기는 어려웠다.

이러한 기존 기술의 한계를 극복하고자 개발된 것이 마이크로머시닝micromachining 기술을 이용한 새로운 신경신호 측정 전극이다. '미세전자제어기술MEMS 뉴럴 프로브'라고 불리는 이 기술을 이용하면 머리카락 굵기보다 작은 실리콘 구조에 수십 개의 전극을 동시에 집적할 수 있다. 이를 어레이 형태로 제작하면 수백 개의 전극

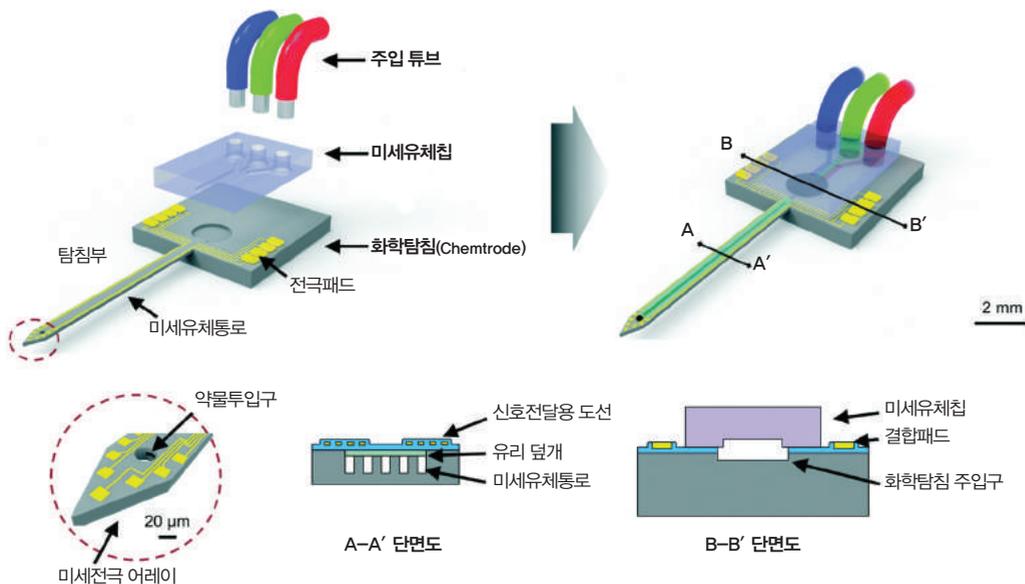


MEMS 기술은 나노 수준 크기의 기계를 만들거나 사진의 '랩온어칩'처럼 생명체의 일부를 실험실 수준에서 모사하는 데 활용되기도 한다. © Maggie Bartlett / NHGRI

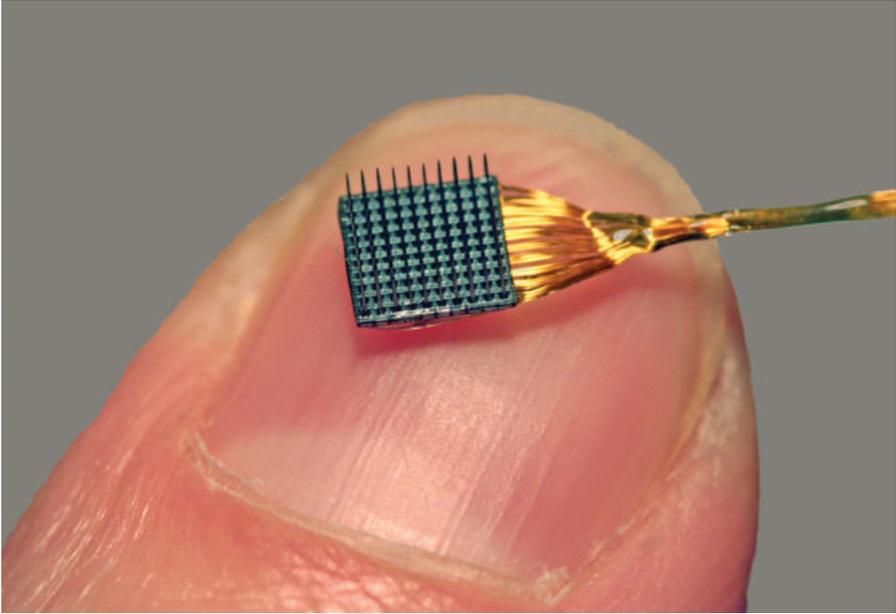
이 있는 뉴럴 프로브 어레이를 손톱보다 작은 크기로 만들 수도 있다. 크기가 작으면 뇌 삽입 시 뇌손상을 크게 줄일 수 있다는 이점이 있다. 앞에서 소개한 사람의 생각으로 로봇 팔을 제어하는 실험에도 여러 신경세포로부터 정확하게 뇌신호를 읽기 위해 MEMS 뉴럴 프로브를 사용했다.

스마트 브레인 인터페이스칩으로 한 발짝 더 전진

MEMS 뉴럴 프로브는 1969년에 처음 소개된 개념이지만 본격적인 개발이 이뤄지기까지는 20년이 넘는 시간이 필요했다. 1990년대 초에 들어서야 미국 미시간대 University of Michigan와 유타대 University of Utah에서 본격적인 연구가 시작됐다. 초기의 프로브는 전극 어레이를 높은 밀도로 집적해서 뇌의 국소부위에 전기자극을 가하고 뇌신경 신호를 읽는 기능만 지녔다. 하지만 기술이 발전한 2000년대 들어서



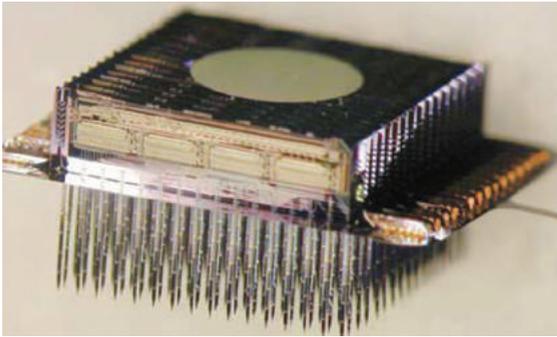
KIST에서 개발한 신경전극의 개요. 단순히 신경 신호를 송수신하는 데 그치지 않고 약물 주입 기능을 결합해 의료 연구에 유용하게 사용될 수 있다. 나노 기술의 발전에 따라 신경 전극의 기능도 복잡해지고 있다.



미국 유타대학교에서 개발한 뉴럴 프로브 어레이. MEMS가 적용되어 뇌 신경신호를 정밀하게 측정해 전달할 수 있다. © University of Utah

는 크게 두 방향으로 MEMS 뉴럴 프로브가 연구되고 있다. 하나는 전극의 집적도를 높여 뇌의 여러 영역에서 동시에 뇌신경 신호를 측정할 수 있는 고집적 3D 뉴럴 프로브, 다른 방향은 전기신호를 측정하는 것은 물론, 직접 발신하여 신경세포를 자극하는 데 더해 다양한 기능이 집적된 프로브다.

특히 2005년 스탠퍼드대Stanford University의 칼 데이세로스Karl Deisseroth 박사가 빛으로 특정 뇌세포만 자극하는 방법을 개발한 이후, 이전에는 불가능했던 정밀한 뇌신경 회로 제어가 가능해졌으며 이를 위해 광자극 기능이 집적된 MEMS 뉴럴 프로브가 개발됐다. 또한 뇌회로를 약물로 제어하기 위해 미소 유체 채널이 집적된 뉴럴 프로브가 개발돼 약물 전달과 동시에 약물에 반응하는 뇌신경 신호도 측정할 수 있게 됐다.

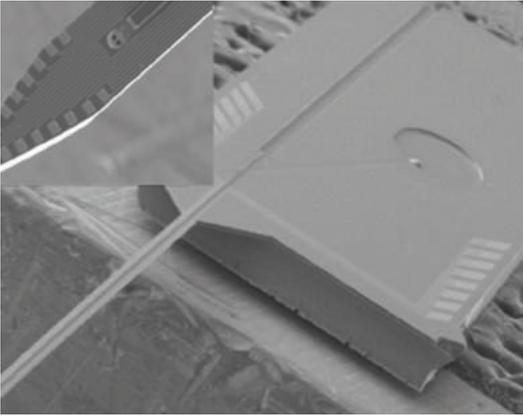
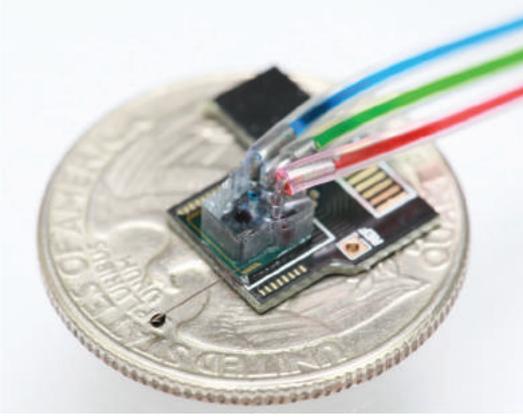


미국 미시간대에서 개발한 3D MEMS 뉴럴 프로브 어레이.
© University of Michigan

우리나라에서는 2015년 KIST에서 약물과 빛 전달, 뇌신경 신호 측정기능이 집적된 스마트 브레인 인터페이스를 개발했다. 가장 작은 MEMS 뉴럴 프로브인 스마트 브레인 인터페이스는 빛, 약물, 전기 신호 등 다양한 방법으로 뇌회로를 정밀하게 제어할 수 있어서 뇌지도 작성은 물론, 뇌질환 관련 연구에도 다양한 방법으로 사용할 수 있다. 예를 들어 파킨슨병 환자의 뇌회로가 정상적으로 작동하도록 신경전달물질을 주입하거나 특정 신경세포를 빛으로 자극하는 방법을 사용할 수 있다. 이는 뇌신경 신호를 측정해 증상 변화를 관찰하는 방법으로 뇌질환의 원인과 치료방법을 찾는 데 중요한 전기를 마련한 성과다. 이러한 방법을 이용하면 파킨슨병 환자의 뇌질환에 관여하고 있는 뇌회로를 찾아내는 것 역시 가능하여 뇌의 학의 난제를 해결하는 길이 열릴 수도 있다.

장기간 삽입 시 뇌조직 손상 줄여야

MEMS 뉴럴 프로브를 장기간 동물실험에 적용하기 위해서는 해결해야 할 문제점이 몇 가지 있다. 그중 가장 중요한 점이 장기간 뇌에 삽입 시 발생하는 뇌조직 손상이다. MEMS 뉴럴 프로브는 생체적합성 물질들로만 이루어져 있기 때문에, 장기간 삽입되어 있어도 안정성에는 문제가 없다. 하지만 대부분의 MEMS 뉴럴 프



KIST에서 개발한 초소형 스마트 브레인 인터페이스 시스템. 동전보다 작은 칩에 다양한 기능을 담았다.

로브가 단단한 물질인 실리콘으로 이루어져 있어서, 장기간 뇌에 삽입되어 있을 시 뇌가 미세하게 움직일 때마다 뇌조직에 손상을 가한다. 이때 생성되는 대식세포가 뉴럴 프로브를 감싸는데, 이 때문에 전극이 신경신호를 측정하지 못해서 뉴럴 프로브가 제 역할을 하지 못하는 문제가 있다.

이러한 문제점은 비침습적인 방법으로 뇌를 정밀하게 자극하는 방법을 개발함으로써 해결할 수 있다. 비침습적인 방법에는 번거로운 외과적 시술 없이도 뇌를 정밀하게 자극할 수 있다는 장점도 있어서 여러가지 뇌질환 치료도 가능하다.

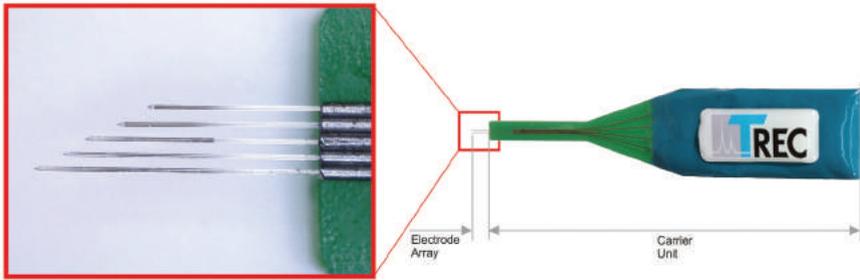
장기간 뉴럴 프로브를 뇌에 삽입할 때 뇌조직의 손상을 최소화하기 위한 방법 중 하나가 유연한 물질로 제작한 MEMS 뉴럴 프로브다. 유연한 프로브는 뇌에 삽입됐을 때 뇌가 미세하게 움직이더라도 프로브가 뇌의 움직임을 따라갈 수 있기 때문에 뇌조직 손상을 줄일 수 있다. 하지만 아직 다양한 기능을 집적하기에는 구조 및 제작 공정상 한계가 있어 이를 극복하는 기술을 개발해야 한다.

비침습적인 뇌자극 방법으로는 최근 초음파를 이용한 방법이 크게 주목받고 있다. 아직 뇌세포가 초음파에 자극되는 정확한 원리가 밝혀지지 않았고 뇌의 심부를 정확히 자극하기에는 공간 분해능이 부족하지만 이러한 점들이 해결된다면 수술 없이 다양한 뇌질환을 치료할 수 있는 획기적인 방법이 될 것이다.

아직은 연구 시장만 형성...적극적 투자 필요해

전세계적으로 고령화가 진행되면서 각국은 뇌질환을 극복하는 데 노력을 아끼지 않고 있다. 미국에서는 오바마 대통령이 뇌지도 연구에 투자하겠다고 발표했고, EU와 일본의 투자 규모도 만만치 않다. 국내에서도 2010년 이후 뇌과학 연구가 활발히 진행되고 있으며, 뇌질환 조기 진단을 비롯하여 다양한 과제들이 정부의 주도로 진행 중이다.

현재 MEMS 뉴럴 프로브는 연구용 시장만 형성된 수준이라 시장 규모는 크지 않다. 하지만 이를 이용한 연구결과의 파급력은 매우 클 것으로 예상되며, 궁극적으로 뇌질환 치료에 적용될 경우 시장 규모 또한 막대할 것이다. 이러한 이유로 미국, EU 등은 정부 차원에서 뉴럴 프로브처럼 뇌지도 작성에 관련된 시스템 연구에 투자하고 있다. 그러나 우리나라에서는 아직 관련 연구에 대한 투자가 미미한 실정이다. 게다가 이러한 기술 대부분이 아직은 연구용 시장에서 더 확장하지 못하고 있어 정부주도 연구가 주를 이루는 점도 앞으로의 전망을 어렵게 만드는 요인이다. 하지만 일단 뇌지도 작성이 어느 정도 완료되고 나면 신경 신호를 이용한 제품



해외에서는 제한적으로나마 신경전극 시장이 본격적인 태동 단계에 진입했다. 사진은 독일의 정밀기기 기업 '토마스 레코딩'의 신경전극 탐침 제품. © Thomas RECORDING GmbH

을 개발할 수 있어 관련 기업들의 시장 참여에 따라 민간 부문에서의 투자도 확대 될 것으로 기대된다. 고령화 시대를 대비한 뇌지도 연구에 많은 관심을 기울여야 하는 이유다.

참고문헌



- Alfalo, Tyson, et al | "Decoding motor imagery from the posterior parietal cortex of a tetraplegic human", *Science* | 2015
- Olsson, Roy H., and Kensall D. Wise | "A three-dimensional neural recording microsystem with implantable data compression circuitry", *Solid-State Circuits* | 2005
- Lee, Hyunjoon J., et al. | "A multichannel neural probe with embedded microfluidic channels for simultaneous in vivo neural recording and drug delivery." *Lab on a Chip* | 2015
- Takeuchi, Shoji, et al. | "Parylene flexible neural probes integrated with microfluidic channels", *Lab on a Chip* | 2005





K I S T 과학기술전망 2016

Chapter 2

건강하고 행복한 삶

마침내 실현된 생명 연장의 꿈

김태송 | KIST 바이오마이크로시스템연구단



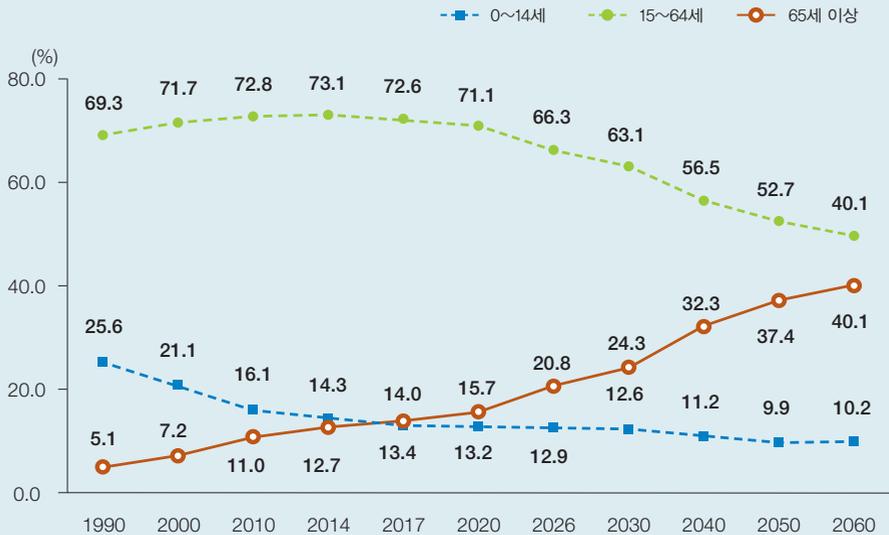
과학기술분야에서 20세기 전반은 물리학이 혁명을 이끌었다. 그러나 후반에는 그 무게중심이 생물학으로 옮겨갔다. 21세기의 초입을 지나는 지금, 배아세포의 유전자를 편집해 형질을 개선하고, 뇌의 신경신호를 제어해 의식을 읽어내는 기술이 현실로 다가왔다. 생명공학 분야의 내적 에너지가 본격적으로 분출되기 시작하면서 우리들이 사는 세상도 그만큼 빠른 변화를 겪고 있다.

긴 세월 동안 오래 사는 것은 인류의 공통된 꿈이었다. 그런 의미에서 현재의 인류는 축복받은 셈이다. 우리는 옛날 같으면 엄청난 '사건'이었을 팔순조차도 이제는 그리 드문 일이 아닌 세상에 살고 있다. 여든을 맞이한 노인들조차도 거창한 행사보다 소박하게 부부끼리 여행이나 하는 정도로 기념하려는 경우가 많다. 환갑은 아예 잔치 축에도 들지 못해서 그저 가족들이 모두 모여 식사하는 데 의미를 두곤 한다. 환갑을 기념해 친척들과 친구들이 모여 떠들썩하던 잔치는 이제 기억으로만 희미할 뿐이다. 사실 이렇게 한 세대 만에 판이하게 달라져서 적응하기 숨가쁜 장

면들은 우리 주변에 꽤 흔하다.

오래 사는 것은 한편으로는 새로운 숙제를 안겨주기도 한다. 우리나라는 세계에서 가장 빠른 속도로 고령화가 진행되는 사회이며, 그 전에 가장 빠른 산업화 과정을 거치면서 도시화의 수준은 이미 매우 높다. 그러니 이제 60세는 기념할 만큼 특별하지도 않고 가족공동체의 범위는 줄어서 '잔치'도 어색하다. 성공적인 경제성장에 따라 삶의 질을 기대하는 수준도 높아져서 건강과 안전을 지키는 것은 기본권이 라고 생각하게 되었다.

이러한 일련의 변화를 겪으며 그 중요성이 특히 높아진 분야가 바로 생명보전, 헬스케어 기술이다. 최근에는 관련 기업들이 다수 등장하고 시장도 확대됨에 따라 미래의 유망기술이 아닌 당당한 산업으로서 자리매김해 가고 있다. 산업적 중요성을 차치하더라도, 사회전체가 겪는 변화에 따른 비용과 스트레스를 덜기 위해 집



통계청에서 발표한 장래 인구 추계. 현재 한국은 65세 이상 노년층의 인구는 늘어나고 생산인구와 14세 미만 인구는 지속적으로 감소하고 있다. 급속한 고령화는 경제적, 사회적으로 다양한 문제를 초래하는데, 특히 보건 및 복지 문제에 대한 대책이 시급하다.



2015년 한 해 동안 가장 큰 보건 이슈는 중동호흡기증후군(메르스)이었다. 한국은 세계에서 두 번째로 많은 확진자가 발생했으며, 전문가들은 대규모 감염병에 대비하는 시스템 전반을 손보고 관련 연구에 투자해야 한다는 의견을 내놓았다. 사진은 2015년 6월 4일 오후 인천 영종도 아시아나항공 격납고에서 직원들이 메르스를 예방하기 위해 기내를 방역하는 모습. © 뉴스시스

중 투자가 꼭 필요한 분야기도 하다.

과학기술이 공동체의 미래 먹거리를 이끌어내야 한다는 사명은 여전하지만, 정부 주도의 연구개발 규모가 커지면서 과학기술이 공공재로서 담당해야 할 역할도 중요해졌다. 정부출연연구기관인 KIST를 보아도 공공분야의 기술적인 공백에 대한 책임을 강화하는 방향으로 점차 진화하고 있다. 생명보건 분야에서는 앞으로 다가올 초고령화 사회를 대비하는 의료용 생체재료와 지능형 로봇, 그리고 도시화와 세계화에 따른 사회안전망으로서 스마트팜 기술과 감염병 대응 기술을 전망하고 각 분야에서 필요한 기술적 전략을 제시하고자 한다.

골절은 생애 전주기에 걸쳐 발생하지만 특히 고령기의 골절은 치료와 재활이 까다롭고 삶의 질에 치명적인 영향을 끼친다. 신소재를 이용한 의료 및 재활 기술이

앞으로 더 중요해지는 이유는 2050년 우리 사회의 40%가 65세 이상의 노인으로 구성될 것으로 예측되기 때문이다.

가족문화도 달라지고 있으니, 노인을 돌보는 의무는 가정에서 사회로 이전되고 그 수요와 비용의 문제가 심각해질 것이다. 고령인구의 보호와 사회보장지출의 효율이라는 두 가치의 딜레마를 푸는 데 지능형 소셜로봇 기술이 기여할 것으로 기대된다. 또한 도시화된 환경에서 식품을 안전하게 키우고 유통하며, 나아가 천연물 기반의 의약품의 효능을 높이는 미래 산업으로서 ICT 기반의 스마트팜이 촉망받고 있다. 이와 함께 감염원을 빠르게 파악하고 전파경로를 차단하는 기술을 통해 도시와 물류의 확대로 위협이 커지고 있는 신변종 감염병에도 대비해야 한다.

김상경 | KIST 바이오파이브로시스템연구단

보이지 않는
적으로부터
공동체를 지킨다



미래에 드리운 그림자

얼마 전 미국에서 한 기사 제목이 사람들을 깜짝 놀라게 한 적이 있었다. 'Chicken Ebola' 라는 제목의 기사가 나왔던 것. 몇몇 사람들은 “이제 닭에서도 에볼라 바이러스가 발견된 건가?”라는 생각으로 공포에 떨며 기사를 읽었지만, 다행히 아칸소, 미네소타, 미주리 등의 닭 농가에서 조류 인플루엔자가 발생했는데 전파가 빠르고 피해도 크다는 내용으로, 조류 인플루엔자를 에볼라에 빗댄 것이었다.

위의 기사는 그저 비유일 뿐이지만 현실을 반영하기도 한다. 서아프리카를 휩쓴 치명적 바이러스가 몇 달 후 미국의 닭에서 발견될 위험을 실제 걱정해야 하는 세상이다. 만약 에볼라가 닭에게 전파된다면 닭의 폐사로 인한 피해쯤은 우습게 보일 만큼 무시무시한 시나리오가 현실이 될 수 있다.

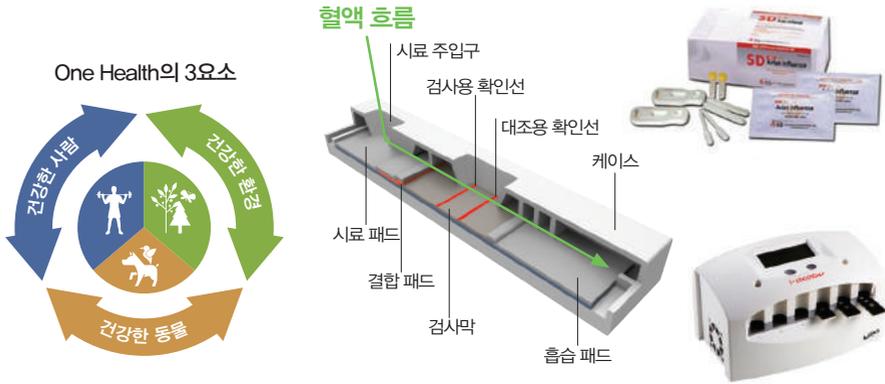
전 세계적으로 닭은 200억 마리가 사육되고 있으며 주변의 야생조류를 비롯한 다양한 매개체와 빈번하게 바이러스를 주고받는다. 닭이 접촉하는 매개체에는 당연히 농장에서 일하는 사람들도 포함된다. 에볼라가 사람끼리의 전염 뿐 아니라 수많은 닭을 통해 확산될 수도 있는 것이다. 미국은 아프리카보다 훨씬 밀접하게 전 세계와 연결된 허브와 같은 지역이라는 점까지 생각해보면 에볼라가 순식간에 전 세계를 휩쓰는 오싹한 상상이 가능하다.

어디에서든 사용할 수 있는 병원균 감시 기술

보건의학이 병원균과 싸워 온 오랜 역사를 보면 사람만이 유일한 숙주인 천연두, 소아마비 등은 현대에 들어 거의 박멸된 것을 알 수 있다. 그러나 동물에게서 사람으로 전파되는 인수공통감염병^{zoonosis}은 지난 10년간 오히려 문제가 커지고 있다. 중증급성 호흡 증후군^{SARS}, 신종플루, 에볼라 그리고 2015년 5월에 우리나라에까지 전파된 중증호흡기증후군^{MERS} 등이 모두 인수공통감염병이다. 해마다 국내 축산업에 막대한 피해를 주는 조류 인플루엔자 역시 인체감염의 잠재적 위험이 높은 바이러스다. 그래서 최근의 감염병 대책은 'One Health' 라는 개념에 기반한다. 적어도 감염병에 있어서는 가축, 야생동물의 질병을 사람 질병과 함께 관리해야 한다는 의미다.

지금까지 사람의 감염병을 진단하고 치료하는 역할의 중심은 병, 의원이었다. 하지만 One Health 시스템에서는 병원균을 확인하고 방역하는 장소가 공항, 항만과 같은 다중이용시설과 철새 서식지, 가축 농장, 도축시설처럼 사람과 동물이 접촉하는 곳까지 확장된다. 특히 위험이 큰 감염병일수록 병원 혹은 중앙실험실로 시료를 모으는 과정이 오히려 확산을 일으킬 위험을 내포하고, 그 과정에 걸리는 시간이 감염원을 격리하고 방역하는 전 과정의 성패를 좌우하는 '골든 타임'이 된다. 게다가 이처럼 병원체 정보를 한 곳에 모으는 과정에서 오히려 질병이 확산될 가능성마저 있다. 따라서 병원균을 분석하는 전 과정을 집적하여 언제 어디서나 간편하게 병원체의 유무를 판별할 수 있는 기술이 필요하다.

현재까지 다양한 병원체 전파경로에 적용할 수 있는 유일한 기술은 임신진단키트처럼 생긴 측방유동분석^{lateral flow assay}이다. 이 방식은 현장에서 빠르게 작동한다는 뜻으로 흔히 래피드키트^{rapid kit}라고 불린다. 측방유동분석은 흡습성 패드에 바이러스의 단백질만 강력하게 잡는 항체를 고정해두고 순차적으로 그 단백질에 결합하는 발색제가 흘러가도록 설계됐다. 패드에 시료를 흘려보내면 검출하려는 병



One Health는 사람과 가축, 환경과 야생동물의 질병이 서로 긴밀하게 연결돼 있다는 개념이다(왼쪽). 감염병 현장에서의 병원체 확인에 이용되는 래피드키트(오른쪽).

원체가 패드에 단단히 고정되고, 여기에 다시 발색제가 결합함으로써 색상 띠가 나타나는지의 여부로 간편하게 병원체의 유무를 판단하는 것이다.

래피드키트의 핵심은 특정 단백질을 잡아내는 항체의 성능인데, 현재의 키트들은 현장에서 필요한 성능을 제대로 발휘하지 못하는 경우가 많다. 대개 적은 양의 바이러스는 검출하지 못하거나, 바이러스의 변이가 일어나면 시약을 개선하는데 긴 시간이 걸리는 등 기술적인 약점도 있다. 이에 다양한 재료와 칩의 설계로 더욱 정밀한 성능을 구현한 플랫폼이 속속 등장하고 있다.

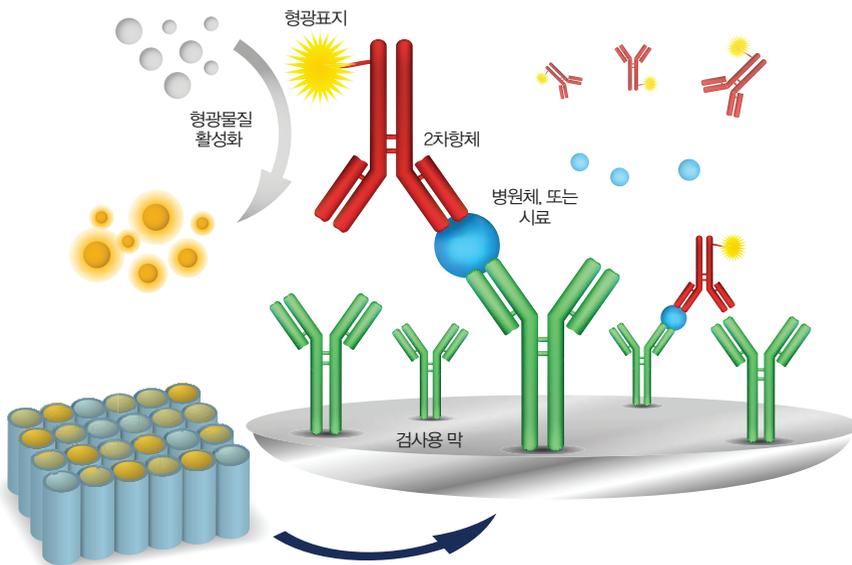
손바닥만한 장치로 병원균을 확인

감염은 외부의 바이러스나 박테리아와 같은 병원체가 숙주에 침입해서 일으키는 것이다. 이 과정에서 병원체의 유전자와 단백질은 숙주의 세포에 '흔적'을 남기는데, 이 때문에 환자의 혈액이나 침, 콧물에서 검출한 바이러스에 있는 고유한 단백질이나 핵산은 감염의 가장 확실하고 직접적인 증거가 된다. 래피드키트는 주로 병원균의 고유한 단백질을 검출하지만 감염 이력이 있는 숙주가 면역반응을 통해

보유한 항체를 검출하기도 한다. 널리 쓰이는 금나노입자 발색제는 맨눈으로 확인 가능하므로 별도의 장치가 필요하지 않아 간편하다는 장점이 있지만, 신호에 대한 판단이 주관적이고 미약한 신호는 놓치기 쉽다. 이를 극복하기 위해 형광이나 전기발색(electrochemiluminescence)을 이용해 감도를 높이는 연구가 활발하다.

우리나라는 래피드키트 분야에서 세계적 수준의 기술을 보유했을 뿐 아니라 관련 산업도 제법 활성화됐다. 바이오노트(BioNote)사는 발색제 기반 바이러스 검출 제품을 출시해 아시아 시장을 선도하고 있다. 형광기반 래피드키트의 선발 주자인 바디텍메드(Boditech Med)사도 바이러스 검출용 제품을 개발하는 중이다. 기술 개발 연구도 한창이다. 최근 원광대 박현 교수팀은 조류 인플루엔자용 형광기반 래피드키트를 개발했다.

한편 생체시료가 가진 약한 형광배경신호나 기관으로부터 산란되는 신호를 배제하



래피드키트의 원리. 대부분의 래피드키트는 형광물질 등으로 표지된 항체를 이용하여 병원체를 검출하는 방식을 사용한다. 임신 테스트기와 동일한 원리다.

면 더 적은 양의 바이러스 검출도 가능해진다. 이를 위해 텍사스주립대(University of Texas at Austin)의 크룩스(Crooks) 그룹에서는 전기발색방식을 이용하는 연구를 진행 중이다.

래피드키트 뛰어넘는 차세대 기술들

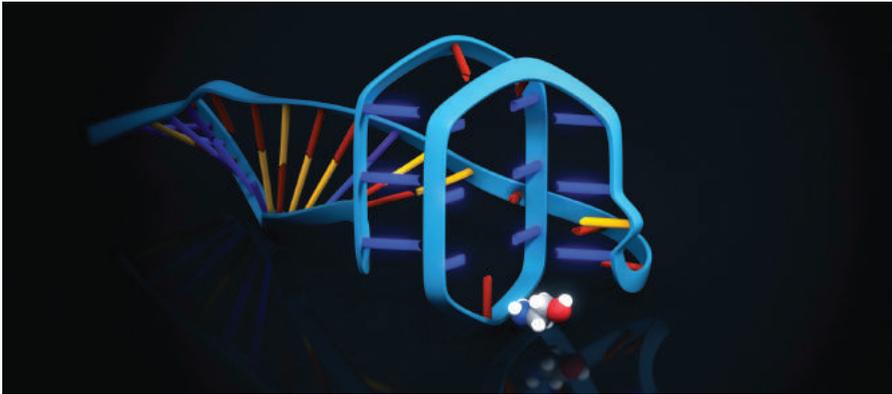
병원체의 고유한 단백질을 검출하는 방식에서 가장 중요한 요소는 항체다. 그런데 높은 선택성을 보이는 항체쌍을 얻는 과정은 상당한 비용과 시간, 그리고 분자생물학적 기술을 요한다. 이에 동물에게 항원을 주입하여 면역반응을 유도하는 기존 방식을 대체할 기술 개발이 필요하다.

그 중 핵산 기반의 앵타머를 이용해 항체보다 빠르게 새로운 바이러스를 잡는 기술에 많은 연구자들이 주목하고 있다. 앵타머를 선택하는 과정은 화학적인 제어가 가능하고 표적 단백질과 방해물질을 미리 선정해 골라낼 수 있어서 향후 항체를 대체하는 진단소재가 될 수 있다. 미국 노로코어(NoroCore)사의 리안 제이커스(Lee-Ann Jakus) 교수팀은 노로바이러스를 선택적으로 잡는 앵타머를 발굴해 보고한 바 있다. 국내에서는 KIST, 고려대, 포항공대 등에서 바이러스용 앵타머를 개발하고 있다.

최근에는 항체쌍을 이용하는 래피드키트보다 감도가 우수한 나노소자로 바이러스를 검출하려는 노력이 이어져 왔으나, 래피드키트의 간편한 구동이나 저렴한 가격에 밀려 실용화에 어려움을 겪었다. 이에 KIST 이관희 박사팀은 나노입자기반 고감도 전계효과트랜지스터(FET)의 구동부를 분리해 매 측정의 단위가격을 획기적으로 줄이는 원천기술을 개발했다. 이 기술은 미량 단백질의 검출에 뛰어나고 어레이 형태로 고용량 다중분석에 적용할 수 있어 래피드키트를 보완하는 차세대 기술이 될 것으로 기대된다.

병원균의 유전자 분석, 핵산검출 기술

핵산, 즉 병원균의 유전자 분석 역시 감염질환 진단의 표준적인 검사법이다. 중합효



에탄올아민에 결합하는 앵타머의 모델링 이미지. 오른쪽 아래의 작은 분자가 에탄올아민으로, 가운데의 고리처럼 생긴 부분에 결합한다. Ronny Jesse/www.jesse3d.de

소 연쇄반응-PCR이라는 핵산증폭 방법 덕분에 매우 적은 양의 바이러스도 확실하게 검출할 수 있는 고감도의 분석법으로 자리잡을 수 있었다. 특히 PCR을 이용해 10여 분 이내에 핵산을 검출하는 기술이 개발돼 그 활용영역을 넓혀가고 있다. 다만 바이러스나 박테리아로부터 핵산을 추출하는 전처리과정이 복잡한 탓에 이 기술은 아직 현장에 본격적으로 도입되지는 못하고 있다. 2014년 에볼라 발생으로 아프리카 각 지역에서 바이러스 검사의 수요가 절실한 때에도 핵산 검사법은 십여 군데 거점의 실험실에서 수행할 수밖에 없어 에볼라 감염의 조기 판정에 어려움을 겪었다.

이 때문에 지난 수년간 시료의 전처리 과정과 핵산 검출과정을 통합해 자동화한 플랫폼 개발에 다양한 노력이 집중됐다. 핵산 자동분석의 선두주자는 진단기술 전문개발회사 세페이드Cepheid사의 진엑스퍼트GeneXpert 시스템이다. 이 시스템은 혈액이나 면봉에 묻힌 시료를 입구에 넣으면 1시간여 만에 병원체의 유무를 판정할 수 있다. 그러나 1회 분석에 40달러 정도의 비용이 들고 분석기의 크기가 커 다양한 현장에 투입되기에 부담스럽다는 단점이 있다. 한편 후발 주자인 바이오파이어Biofire사의 필름어레이FilmArray는 구두상자 크기의 장치와 상대적으로 낮은 비용, 그리고

(가)



자동화
 ●●●●●●●●●●
 ●●●●●●●●●●
 소형화



(나)



(다)

(가) 에볼라 대응을 지원하기 위해 거점지역에 조성된 이유모바일랩(EU mobile lab)에서 시료전처리와 핵산분석을 진행하는 모습

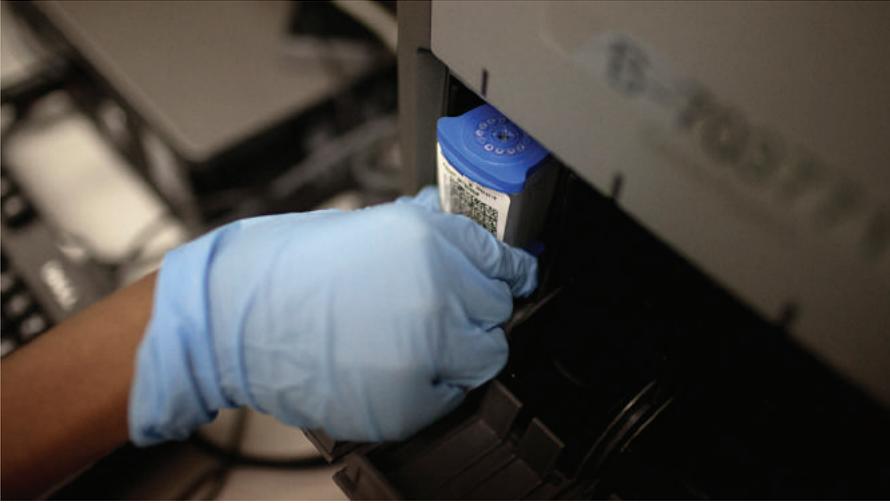
(나) 시료에서 결과까지 자동화된 핵산검출 시스템(Cepheid)

(다) 소형화된 자동핵산검출기와 분석용 카트리지의 세부적인 모습(Biofire)

한 번에 10여 가지 병원균을 감별 진단할 수 있다는 장점을 보유하고 있다. 국내에서는 나노바이오시스, 랩지노믹스 등의 분자진단 기반의 벤처기업에서 자동화된 핵산 검출 플랫폼을 출시할 예정이다. KIST에서도 수십 종의 핵산을 10여 분에 분석할 수 있는 원천기술을 개발해 감염성 질환의 정밀 진단에 적용하는 연구를 진행 중이다.

핵산 검출기술은 래피드키트보다 현장에 진입하는 시기는 늦어졌지만 반드시 구현해야 할 핵심기술이다. 전파력이 높은 감염성 질환일수록 발병의 초기에 인지해야 피해 확산을 줄일 수 있기 때문이다. 대부분의 병원균이 3일에서 2주에 이르는 잠복기가 있는 것을 감안할 때 적은 양의 병원균 검출에 탁월한 핵산 검출기술의 가치는 여전히 높다. 게다가 몇 차례 국내 축산업에 심각한 피해를 입힌 바 있는 구제역 바이러스처럼 진단표적이 될 만한 특이 단백질이 없어 핵산을 통해서만 확인 가능한 병원체도 있다.

최근 몇 년간의 감염병 발병추이를 보면 그 주기가 짧아지고 전파범위는 점점 넓



고속 검사 기술은 세계 각국의 의료 현장에서 병원체에 조기 대응하는 데 중요한 역할을 하고 있다. 사진은 남아프리카공화국에서 다제내성 결핵 발병 여부를 확인하기 위해 진엑스퍼트 시스템에 시료를 세팅하는 모습. © Jose Cendon

어지는 것을 알 수 있다. 전파력이 강한 질병은 개인의 책임에 맡겨두면 공동체에 오히려 위험을 가중시키는 판단을 할 수도 있어 공적인 영역에서 통제가 필수적이다. 따라서 현장진단시스템에서 실시간으로 보고되는 병원균의 전파과정을 모니터링해 그 경로를 예측하는 기술과 플랫폼도 개발 중이다. 국내에서는 질병관리본부와 KT가 참여해 인플루엔자 전파경로 예측을 시연한 바 있으며, KIST와 검역본부가 협력해 조류 인플루엔자 전파경로를 예측하는 기술을 개발하고 있다. IT 기반과 현장진단기술의 융합은 감염병 대응체계에 획기적인 변화를 가져올 것으로 기대된다.

더 빨리, 더 정확하게, 더 저렴하게

인구가 많고 자연환경의 다양성이 크다 보니 중국에서는 전 세계에서 가장 많은 종류의 바이러스가 발견된다. 우리나라는 중국에 가장 인접한 주요 국가로서, 인적,

물적 교류가 빈번할 뿐만 아니라 철세의 교류를 제어할 수 없는 감염병의 최전방에 위치하고 있다. 따라서 우리는 공동체의 안전을 지키기 위해 감염원을 예찰하는 기술을 고도화할 수밖에 없다. 감염병의 전파범위는 지구적인 이슈로 변화하는 추세이며 결국 지금 우리가 겪는 문제는 곧 다른 나라들이 겪을 문제일 것이다. 어쩌면 감염병과 현장진단기술의 속도경쟁에서 우리는 출발선에 미리 서 있는 것일지도 모른다.

실제로 최근 중국을 비롯하여 아프리카 개발도상국의 래피드키트 진단시장이 커지면서 국내 진단시약 기업이 그 시장에 진입해 빠르게 성장하고 있다. 래피드키트 기술과 제품 개발의 경험을 토대로 현장진단기술을 강화하고 선점한다면 차세대 현장진단기술의 세계 시장 진출에 유리하게 작용할 것이다.

감염병 진단기술 시장은 앞으로 10% 수준의 빠른 성장세를 유지할 것으로 예상된다. 그 중에서도 핵산분석을 기반으로 하는 분자진단시장은 12% 이상의 가장 빠른 성장을 할 것으로 전망된다. 여기에 2~3년 내에 출시될 것으로 알려진 현장진단용 핵산분석 플랫폼이 성공한다면 진단시장은 더 빨리 재편될 수도 있다.

Year	Immunodiagnosics	Molecular Methods	Clinical Microbiology	Total (\$ Million)
2011	4,670.8	1,326.7	640.2	6,637.7
2012	4,960.5	1,591.6	688.3	7,240.4
2013	5,334.7	1,826.6	756.0	7,917.3
2014	5,796.9	2,030.9	828.3	8,656.1
2015	6,225.3	2,349.1	903.9	9,478.3
2016	6,813.9	2,608.8	989.8	10,412.5
2017	7,453.9	2,918.7	1,099.7	11,472.3
2018	8,112.9	3,347.5	1,305.3	12,775.7
CAGR (%)	8.8	12.9	11.5	10.0

2018년까지의 감염병 진단기술 시장 예상 매출



2014년 말 에볼라 대유행 당시 에볼라 의심 환자를 후송하는 모습. 인구가 늘어나고 지역 간 교류가 활발해지면서 전염병의 확산 가능성도 이전에 비해 크게 높아졌다. 에볼라가 절대적 규모로 보면 그다지 크게 확산되지 않았는데도 각국이 촉각을 곤두세운 이유는 현대 사회에서 유행병의 확산이 매우 빠르게 일어나기 때문이다. © Davide Calabresi / shutterstock.com

감염병을 감시하기 위한 현장진단기술들은 병원에서 활용되는 진단기술을 기반으로 지속적으로 새로운 기술을 도입하고 성장할 것이다. 그런데 새로운 기술이 도입되기 위해서는 분석 속도, 정확성, 비용이라는 문제를 해결해야 한다. 지금까지 성공한 래피드키트의 핵심은 분자생물학 기반의 항체 개발 및 생산기술의 우수성이었다. 이미 래피드키트는 새로운 진단소재, 마이크로시스템과 정보통신기술과의 접점에서 진화하고 있으며 수 년 내로 핵산분석을 기반으로 현장에서 진단하는 새로운 제품의 등장도 예측된다.

또한 분자진단기술의 선두주자인 다국적 기업들이 병원용 진단자동화 시스템에서 눈을 돌려 자회사 형태로 동물진단 시장에도 진입하면서 경쟁이 높아질 것으로 예상된다. 따라서 차별화된 원천기술 없이는 장래의 현장진단기술 시장에서 경쟁

력을 유지하기는 어려울 것으로 보인다.

단백질, 핵산분석 신기술의 중요한 성공요건은 바이러스, 박테리아의 라이프 스타일과 감시현장의 환경을 잘 파악해 대응하는 전략이 될 것이다. 다양한 기술적 자원을 활용할 수 있는 실험실 기반 진단기술에서는 한두 가지 성능에서 뛰어난 바이오센서가 각광받을 수 있었다. 하지만 현장진단기술은 사용 환경에서 요구하는 안정성, 편의성, 속도와 함께 감도, 선택성, 가격 등의 지표와 각 감염원의 특이적인 요구들을 모두 만족시킬 때만 실용성을 확보할 수 있다. 따라서 바이러스의 생물학과 전파역학, 감염 의학 등이 재료, 시스템, 센서, 정보공학 등과 융합해 진화 과정을 거칠 때, 경쟁력 높은 현장진단기술이 나올 수 있다.

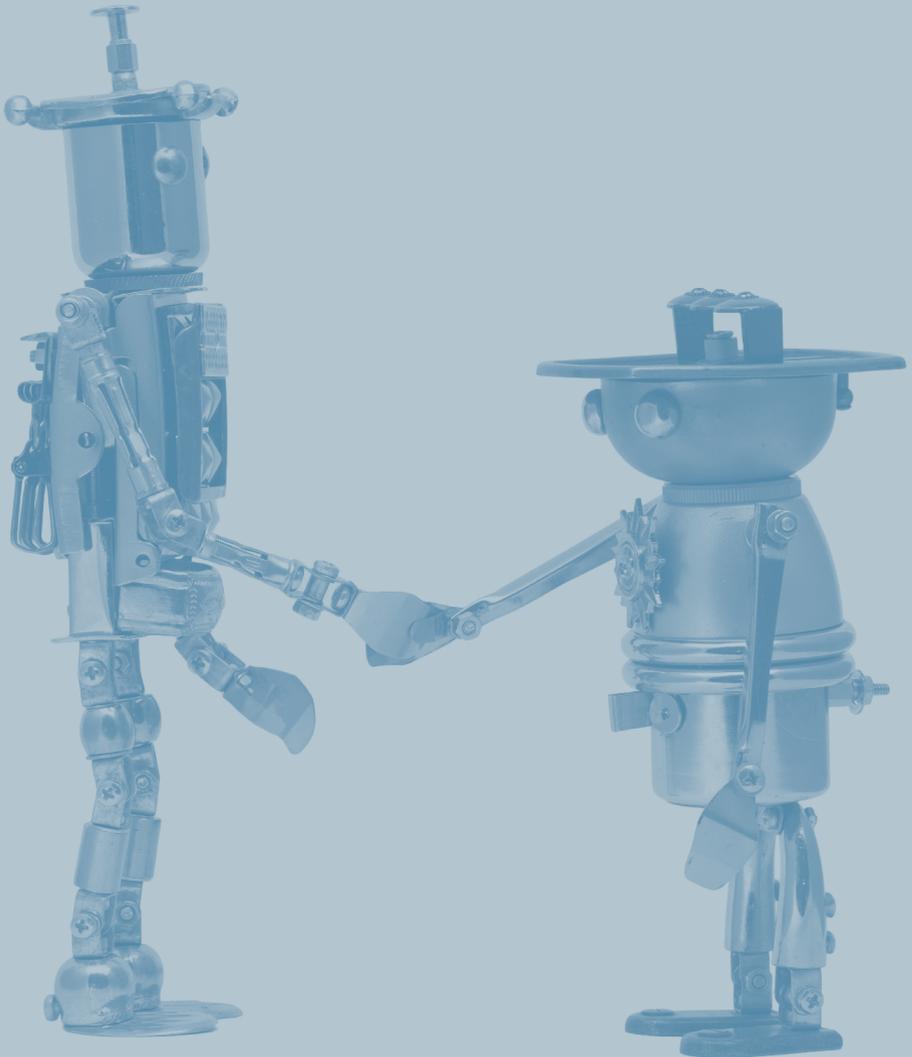
참고문헌

- Mandy LY Sin, et al. | "Advances and challenges in biosensor-based diagnosis of infectious diseases", *Experts review of molecular diagnostics* | 2014
- <http://www.cdc.gov/onehealth/>
- 보건복지부 외 | "감염병 조기감시 및 조기대응 기반 확보". 『사회문제해결 10대 실천과제 공동기획보고서』 | 2014
- OHA and S&T | "BioWatch: Lessons learned and the path forward" *House Committee on Homeland Security* | 2014
- Analysis of the Global Infectious Disease Diagnostics Market | Frost & Sullivan | 2013



김동환, 박성기 | KIST 로봇연구단

사회성 지능을 지닌 소셜 로봇





인간과 교감하는 로봇

2015년 초 개봉과 동시에 많은 사람들의 관심을 집중시킨 미국 애니메이션 영화 '빅 히어로Big Hero 6'에는 다양한 신기술이 등장해 이목을 집중시켰다. 부풀어 오르는 몸체를 가지는 소프트 로보틱스soft robotics, 수십만 개의 작은 나노봇nanobot들이 다양한 형태로 결합해 스스로 재구성하는 모듈라 로보틱스modular robotics 등이다.

이와 같이 눈에 보이는 외형적 기술은 아니지만 우리가 주목해야 할 기술 중 하나가 로봇 베이맥스가 보여준 교감 능력, 즉 사회성이다. 젊은 천재 공학도 타다시가 개발한 개인용 의료 도우미 로봇 베이맥스는 타다시가 죽은 후, 그의 동생 14살 소년 히로를 보호하며 그와 교감한다. 남을 돌보는 따뜻한 본성을 가진 로봇 베이맥스는 주인공 히로의 육체적 상처뿐 아니라 형을 잃고 상처 입은 마음까지 따뜻하게 어루만져주어, 히로는 점차 베이맥스에 의지하며 애정을 느끼게 된다.

우리 주변에는 생활을 편리하게 해 주는 로봇들이 많다. 로봇 청소기는 이미 10여 년 전에 상용화됐고 박물관이나 매장 앞에서 고객에게 인사하는 안내로봇도 주변에서 쉽게 찾아볼 수 있다. 공장에서는 산업용 로봇들이 필수적으로 활용되고 있고 의료, 경찰, 교육 등 많은 분야에서 로봇들이 활약한다. 그러나 청소 로봇이 아무리 청소를 잘하고 안내 로봇이 설명을 잘해도 사람들은 로봇에 실제 애정을 느



영화 '빅 히어로' 속 베이맥스는 주인공 히로의 상처 입을 마음까지 따뜻하게 어루만져주는 소셜 로봇이다.
© Walt Disney Pictures

끼거나 로봇과 교감하지는 않는다. 친근한 외양과 자연스러운 상호작용 인터페이스를 통해 호기심은 끌어낼 수 있을지 모르지만 늘 똑같은 기계적인 반복에 쉽게 싫증을 느끼기 마련이다.

반면 2014년 개봉한 영화 '그녀Her'에서는 외롭고 공허한 삶을 살고 있는 한 대필 작가가 스스로 생각하고 느낄 수 있는 인공지능 운영체제와 사랑에 빠지는 이야기를 그리고 있다. 이는 물리적인 실체가 없는 실질적인 상호작용의 부재 속에서도 인공지능 운영체제가 가지고 있는 사회성이 우리의 교감 능력을 이끌어 내는 데 얼마나 중요한 역할을 하는가를 상징적으로 보여준다.

소셜 로봇은 한마디로 이렇게 사회성을 갖추고 인간과 교감하는 로봇을 말한다. 인간의 정서 및 사회규범에 대한 이해를 바탕으로 정신적인 측면에서 인간에게 도움을 줄 수 있는 것이다. 소셜 로봇에서 가장 중요한 기술 중 하나는 인간과의 사회

적인 상호작용 기술이다. 이는 소셜 로봇의 주된 기능이 인간과 인지적, 감정적으로 교류하는 것이기 때문이다. 따라서 소셜 로봇 분야에서는 사회성 지능에 대한 관심 및 수요가 점차 증가하고 있다.

초고령화 사회 대비한 소셜 로봇의 활약

사실 사람과 관계를 맺는 로봇은 꽤나 오래된 기술 중 하나다. 2005년부터 일본에서 제작된 물개로봇 파로PARO는 현재 약 3,000여 대가 개인 혹은 단체에서 치매 환자의 치료 및 간호 목적으로 사용되고 있다. 파로는 또 덴마크, 독일, 영국, 호주 등지의 임상연구에서 치매환자의 외로움을 덜어주고, 공격적 성향을 감소시키며, 즐거움을 제공하는 데 사용되어 그 효능을 입증했다.

2015년 스웨덴 멜라달렌대(Malardalen University)에서는 치매환자와의 상호작용 및



2005년, 일본의 모리카미에서 출시한 물범 로봇 '파로'는 세계 곳곳에서 치매 환자들을 치료하는 데 활약하고 있다. ©Full Life Care



사람의 감정을 읽고 반응하는 홈 오토메이션

커뮤니케이션 증진을 목적으로 고양이 로봇 주스토캣^{JustoCat}을, 일본 엔이씨^{NEC Corporation}에서는 파페로^{PaPeRo}를 개발해 치매환자를 포함한 고령자의 케어 목적으로 활용을 시도하고 있다. 이러한 로봇들은 오디오 및 비디오 센서 등을 통해 사용자의 목소리에 반응하거나 정해진 서비스를 제공하는 등의 역할을 수행한다.

그러나 지금까지의 로봇은 사용자의 감정 상태를 인식하고 그에 따라 상호작용하는 수준의 사회성 지능을 보유한 것은 아니었다. 즉, 실제 활용 시 미리 정의된

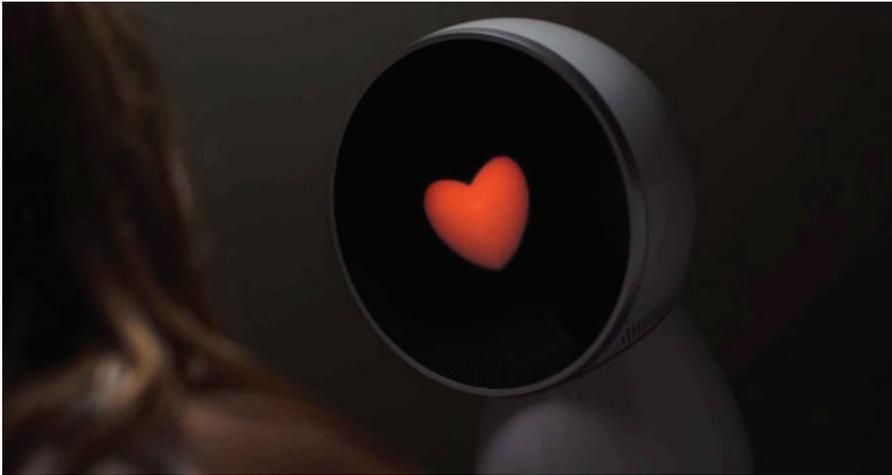
특정 상황에만 제한적으로 적용이 가능한 것이다. 따라서 미리 학습되지 않은 새로운 상황에 대한 대응과 학습 능력을 갖춘 소셜 로봇의 개발이 요구됐다.

사회성 지능 및 인간과의 사회적 상호작용에 초점을 맞춘 대표적인 로봇이 2014년 6월 공개된 세계 최초의 감성인식 로봇 '페퍼Pepper'다. 일본 소프트뱅크Softbank사가 프랑스 기업 알데바란 로보틱스Aldebaran Robotics사와의 공동 연구로 개발한 페퍼는 베이맥스 스타일의 개인용 로봇 도우미다. 인간의 음성과 움직임에 반응하며 인간의 감정을 인식한다. 또한 매일의 경험을 클라우드 서버에 업로드해 학습하는 능력을 갖췄으며 경험치가 쌓일수록 감성인식 기술이 더욱 정교해지는 것이 특징이다. 소프트뱅크는 2015년 여름 19만 8,000엔(한화 약 177만 원)이라는 저렴한 가격으로 페퍼를 출시해 개인용, 가정용 로봇 시장에 대한 새로운 반향을 일으키고 있다.

한편 미국 MIT는 스타트업 기업 지보IIBO를 통해 2014년 7월 세계 최초의 패



일본의 소프트뱅크가 2014년 발표한 '페퍼'는 세계 최초로 사람의 감정을 인식하는 로봇으로 화제를 모았다. 일상생활 속에서 사람의 감정과 상태에 따라 적절한 서비스를 제공하는 로봇으로 기획됐다. ©Bloomberg



사람과 교감하는 로봇이 반드시 인간의 형태를 갖추어야 할 필요는 없다. 미국의 '지보'는 가족의 얼굴이나 음성을 인식해 메시지를 전송하거나 영상을 보낼 수 있다. 오픈소스로 개발되어 다양한 피드백이 가능하도록 설정할 수 있어 향후 발전이 기대된다. © Jibo

밀리 로봇 '지보(jibo)'를 공개했다. 지보는 전면 카메라를 통해 가족 구성원의 얼굴을 인식하고 메시지를 전송하거나 영상 통화 등을 가능하게 해 준다. 또한 음성 명령으로 동작해 가족 구성원들을 연결하는 역할도 수행한다. 지보는 2016년 3월에서 4월 사이 749달러에 출시될 예정인데, 일반적인 스마트 기기의 가격대와 비슷하게 책정돼 일반 사용자 대상의 로봇 시장이 활성화될 것으로 기대된다.

국내에서는 인간-로봇 상호작용(HRI) 기술 개발이 십여 년 정도 수행됐으나 미국, 유럽 등 선진국의 연구에 비해 아직 미진한 실정이다. 특히 사회성을 표현하고 학습에 의해 로봇의 행동을 변화시키면서 그 수준을 높여가는 전체적인 소프트웨어 프레임워크에 대한 연구는 아직 미미한 수준이다. 상호작용의 인지적 모델에 대한 이해, 상호작용 중 학습 능력의 부여 여부 등에 대한 연구도 더 필요하다. 이에 KIST 로봇연구단에서는 소셜 로봇 분야의 세계적인 연구 흐름에 발맞춰 고품질의 독립적인 생활을 지원할 수 있는 사회성을 보유한 지능로봇 기술을 개발하고 있

다. 이를 통해 사회적인 맥락 인식 및 행동 표현이 가능한 로봇 기술 및 적응적 학습이 가능한 인지 소프트웨어 프레임워크 기술을 확보하는 것이 목표다. 로봇연구단은 향후 초고령화 사회에 대비해 미래 고령자 대상 로봇 및 정보통신기술 기반의 스마트 케어 시스템을 준비하고자 한다. 또 독거노인 문제에 대한 사회적 비용을 사회성을 갖춘 로봇 시스템으로 보완하는 것도 연구 목표 중 하나다.

인간에 필적하는 소셜 로봇 나올까

기존의 자동화된 로봇 시스템들은 대부분 미리 프로그래밍된 작업을 빠르고 정확하게 반복적으로 수행할 수 있도록 설계됐다. 이를 넘어 로봇이 스스로 주변 환경을 이해하고 사용자의 정서를 인식하는 상호작용을 통한 맞춤형 서비스를 제공하기 위해서는 사회성 지능 기술에 대한 체계적인 연구가 필요하다. 특히 인간이 실제로 사회성을 어떻게 인식하고 학습하는가에 대한 심리학적, 사회학적인 분석 연구가 병행돼야 한다. 실제 인간이 사회성을 이해하는 방식에 기반한 사회성 지능 모델을 통해 좀 더 정확하고 자연스러운 인간과의 사회적인 상호작용이 가능하기 때문이다. 따라서 학제간의 협동연구 및 다양한 시도를 통해 이러한 메커니즘을 규명하고 이를 소셜 로봇에 적용하려는 노력이 필요하다.

지금까지 많은 대학, 연구소, 기업 등에서 각자의 목적에 맞는 다양한 형태의 로봇들을 개발해 왔다. 그러나 이런 로봇들은 개발 목적에 맞는 작업 및 서비스에만 적합하고 다른 작업에는 적용이 불가능한 경우가 많다. 따라서 현재 로봇 분야에서는 다양한 형태로 결합해 재구성이 가능한 하드웨어 모듈에 대한 관심이 증가하고 있다. 이에 더해 사회성 지능 구현을 포함한 소프트웨어 플랫폼 및 모듈 분야에서도 마찬가지로 개별적으로 개발된 컴포넌트들을 통합하려는 시도가 계속된다.

미국 구글Google사는 윌로우개러지Willow Garage의 로봇 운영체제ROS와 같은 다른 종류의 하드웨어에서도 사용 가능한 오픈소스 통합 운영 체제를 개발할 수 있도록

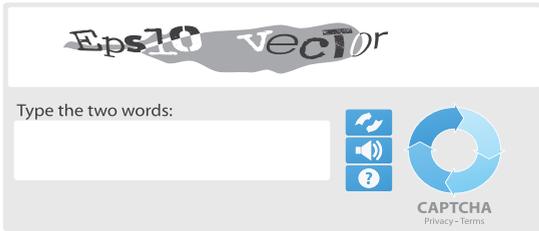
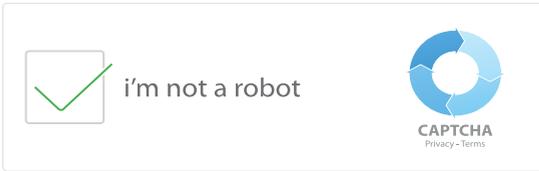
꾸준히 지원하고 있다. 특히 관련 커뮤니티를 통해 많은 개발자들이 서로의 아이디어를 공유하며 사회성 지능의 요소 기술을 포함한 다양한 응용 기술들을 발전시켜 나가고 있다. 이러한 통합 환경에서 누구나 쉽게 각자의 새로운 아이디어를 개발시켜 나갈 수 있는 오픈소스 커뮤니티의 활성화를 통해 사회성 지능에 대한 연구 또한 탄력을 받을 것으로 예상된다. 여기에 페퍼나 지보 등과 같은, 사회성을 보유한 개인용 소셜 로봇의 보급은 사회성 지능에 대한 연구에 새로운 전기가 될 전망이다.

스마트폰에 새로운 앱을 다운받아 실행함으로써 개별 스마트폰에 새로운 기능을 쉽게 더할 수 있는 것처럼 각자가 가지고 있는 소셜 로봇에 새로운 사회성 컴포넌트 프로그램을 다운로드받을 수도 있을 것으로 보인다. 사용자가 필요로 하는 새로운 사회적 특성을 로봇에 반영하는 사회적 설정 과정을 통해 정서적인 측면에서의 개인 맞춤형 로봇의 시대가 도래할 것으로 예상된다.

현재 사회성 지능 분야에서는 학습을 통한 상대방의 감정인식에 대한 연구가 주로 이뤄지고 있다. 향후에는 인간의 정서 및 사회규범에 대한 이해를 바탕으로 상대방 및 상황에 어울리는 감정과 행동의 표현, 나아가 다양한 사람과의 긍정적인 관계 형성에 도움을 줄 수 있는 원만한 상호작용을 통한 인간과의 교감 등을 가능하게 하는 기술들이 개발될 것이다. 이를 통해 사람에 조금 더 가까운 사회성을 보유한 소셜 로봇이 탄생할 것으로 기대된다.

문자 대화와 관련된 인공지능 분야에서는 2014년 러시아와 우크라이나 연구팀에서 공동 개발한 인공지능 프로그램 유진 구스트만(Eugene Goostman)이 65년 만에 처음으로 튜링 테스트를 통과한 바 있다. 기준은 심사위원 중 30% 이상에게 사람으로 판단받는 것으로, 유진 구스트만은 30명 중 10명을 속이는 데 성공했다. 물론 영어가 모국어가 아닌 우크라이나의 13세 소년이라는 설정 자체가 많은 심사위원들을 속이는 데 도움이 됐을지 모른다. 또 5분간 5번의 문자대화도 사람인지를 판

i'm a captcha!

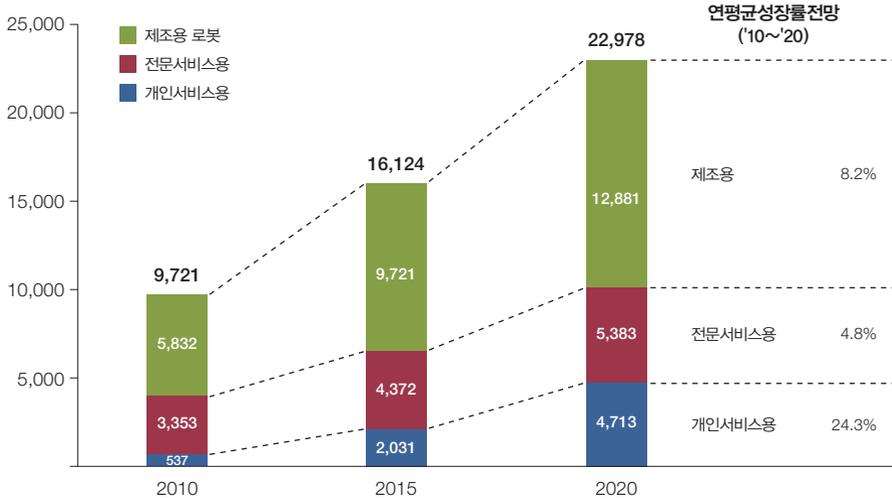


웹상에서 사람과 봇을 구분하기 위해 고안된 튜링 테스트, '캡차'. 시각적인 문자 정보를 해석하는 인지능력만 이용한 기초적인 방법이지만 간단하면서도 효과가 좋아 봇이나 자동 프로그램을 걸러내기 위한 용도로 널리 이용되고 있다. 그러나 시각정보 해석기능의 발달에 따라 곧 무력화될 것으로 보는 시선이 많다. 사회성 지능 분야에서도 마찬가지다. 머지않아 인공지능이 인간의 감정과 표현을 '그렇듯하게' 모사할 수 있을 것으로 전망된다.

단해야 하는 튜링 테스트 자체가 가진 한계점도 많이 지적되고 있다. 하지만 이런 점에도 불구하고 인공지능 프로그램이 조만간 인간의 수준에 도달할 것이란 기대감은 갈수록 커지고 있는 상황이다.

선진국에서도 관련 분야 개발에 본격적으로 나서고 있다. 미국에서는 2013년 4월 10년간 총 30억 달러를 투입하는 '브레인 이니셔티브BRAIN Initiative' 프로젝트를 발표했고, 유럽연합EU에서도 10년간 총 10억 유로를 투입하는 '휴먼 브레인 프로젝트Human Brain Project'를 시작했다. 인간의 두뇌를 모델링해 인간의 생각과 행동이 만들어지는 과정을 밝혀내기 위한 시도가 속속 추진되는 것이다. 이러한 연구를 통해 2040년경에는 인간 수준에 필적할 만한 사회성 지능을 보유한 소셜 로봇이 개발될 것으로 예상되고 있다. 구글의 인공지능 사업을 총괄하는 레이 커즈와일Ray Kurzweil에 따르면 2045년경 인공지능이 인간의 능력을 넘어서는 특이점singularity이 도래할 것으로 전망된다.

단위 : 백만 달러



세계 로봇 시장 전망

나는 선진국, 걷는 우리나라

미국, 유럽, 일본 등 로봇 선진국은 20여 년 전부터 이미 인간-로봇 상호작용 기술에 대한 꾸준한 투자 및 연구를 통해 소셜 로봇이라는 연구 분야를 개척했다. 특히 유럽에서는 EU 차원에서의 프레임워크 프로그램FP을 통해 1980년대부터 지능형 서비스로봇에 대한 연구를 발전시켜 왔고, 현재 사회성 보유 서비스 로봇을 상용화하려는 시도를 하고 있다. 국제 로봇 연맹IFR에 따르면 전문 및 개인서비스용 로봇 산업에 참여하는 전 세계 주요 기업은 2011년 216개사에서 2012년 167개사로 22.7%가량 감소했으나, 2014년 선정된 세계 50대 로봇기업에는 신규 선정 기업 22개사 중 서비스용 로봇 기업이 19개사에 이를 만큼 서비스용 로봇에 대한 기업들의 관심이 증가하고 있다. 국내에서도 로봇에 대한 기업들의 관심은 꾸준히 높아지고 있으며 로봇기업의 수는 2008년 204개사에서 2012년 368개사로 지속적으로 증가해 왔다. 이 중 전문 및 개인서비스용 로봇 기업은 각각 55, 51개 사로 전체

로봇기업의 약 28.8%를 차지하며 사회성 지능을 포함한 지능형 로봇에 대한 수요 또한 계속 늘어나고 있다.

2012년 세계 로봇 시장 규모는 총 133억 2000만 달러로 전년대비 5.8% 증가했으며 그중 개인용서비스용 로봇은 12억 2000만 달러 규모로 전년 대비 90.6% 급증했다. 세계 로봇 시장은 아직 제조용 로봇이 가장 큰 비중을 차지하고 있으나 향후 서비스용 로봇, 특히 개인서비스용 로봇이 빠르게 성장할 것으로 전망된다. 국제 로봇 연맹은 개인서비스용 로봇 시장은 연평균 24.3%씩 증가해 2020년에는 47억 1300만 달러 규모로 성장할 것으로 예상하고 있다. 특히 페퍼, 지보처럼 감성 인식 및 학습이 가능한 로봇이 출시되어 사회성 지능을 보유한 로봇에 대한 관심이 점차 증가할 것으로 예측되며 개인서비스용 로봇 시장 또한 급격한 성장을 거듭할 것으



한때 인공지능 연구는 불가능한 것을 시도하려는 부질없는 노력으로 치부되기도 했다. 그러나 최근 컴퓨팅 기술의 발전에 힘입어 인공지능이 다시 주목받고 있다. 세계에서 가장 많은 정보를 다루는 기업인 구글도 인공지능의 전담부서를 두어 인공지능 시대를 준비하고 있다. 사진은 구글의 서버실. © Google



실용성과는 거리가 멀다는 평가를 받아 온 인간형 로봇 관련 연구도 활발하다. 센서와 데이터 분석기술의 발전으로 사람과 '교감'할 수 있는 가능성이 생겼기 때문이다. 감정적, 정서적 상호작용을 하는 로봇이라면 인간과 최대한 가까운 모습일 때 그 효과를 극대화할 수 있을 것이다. 사진은 싱가포르 난양공과대학의 나디아 탈만(오른쪽) 교수와 탈만 교수가 개발한 인간형 사회성 로봇 나딘(왼쪽). © Google

로 기대된다.

그러나 사회성 지능을 가진 소셜 로봇은 그 자체만으로는 아직 경제성을 논하기 이르며 시장에서의 가시적인 성과조차 보여주지 못하고 있다. 그러나 사회성 지능 기술이 일반적으로 반복 작업을 수행하거나 단순 서비스를 제공하기 위해 다른 로봇과 결합돼 사용자와 사회적인 상호작용을 하며 동작할 때 그 파급 효과는 상당할 것으로 예상된다. 따라서 시장에서의 초기 성공을 위해서는 타 로봇 분야와의 결합이 중요하다.

구글은 분야별로 최고의 기술력을 보유하고 있는 미국과 일본의 로봇기업 9개사와 인공지능 전문기업 5개사를 인수하며 로봇사업을 본격화하고 있으며, 일본 소프트뱅크 또한 프랑스의 대표 로봇기업인 알데바란 로보틱스를 인수해 클라우드

기술과 빅데이터 분석기술 등을 결합해 폐퍼를 공개하며 시장을 선점하려는 경쟁 구도를 펼치고 있다. 그러나 국내에서는 로봇 산업이 아직 대기업의 관심을 받지 못하고 중소기업에 편중돼 있어 투자에 한계가 있으며 세계적인 경쟁력을 확보하기가 어려운 상황이다.

애플Apple사는 아이폰을 개발하며 스마트폰 기기 그 자체를 넘어 앱스토어를 통한 광범위한 생태계를 창조해서 스마트폰 시장의 패러다임 변화를 주도했다. 국내 대기업들도 특정 로봇 그 자체만을 보지 말고 그 너머에 펼쳐질 새로운 시장을 위한 적극적인 투자가 아쉬운 시점이다.

참고문헌



- Terrence Fong, Illah Nourbakhsh, and Kerstin Dautenhahn | "A Survey of Socially Interactive Robots," *Robotics and Autonomous Systems* | 2003
- <http://www.ros.org>
- 신소재경제신문 7월 9일자 | 2014
- 백봉현 | 로봇 이슈 브리프 2014-7호: 글로벌 로봇산업 동향과 전망 | 한국로봇산업진흥원 | 2014

김유찬, 한형섭, 석현광 | KIST 생체재료연구단

치료 후
스스로 사라지는
금속 골접합 부품

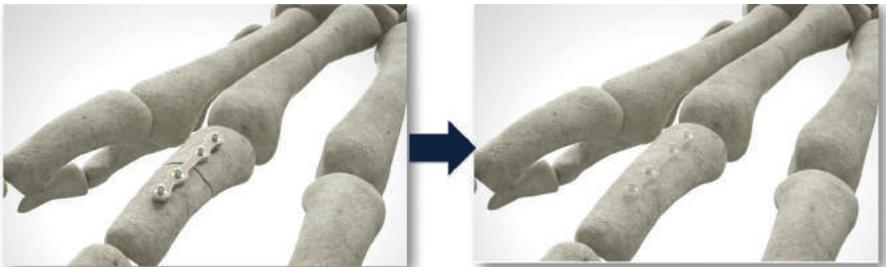




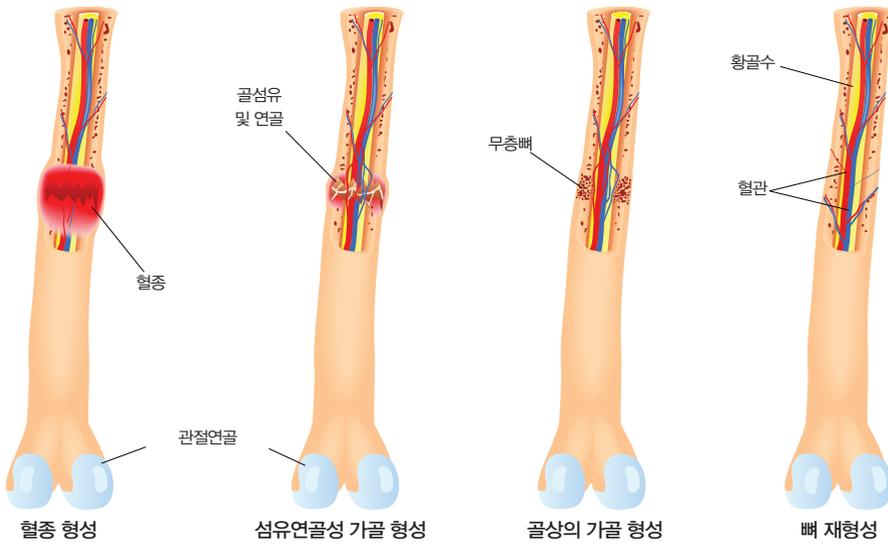
제거 수술 필요 없는 뼈 고정 금속나사

어느 날 오후 A씨는 이들의 유치원에서 전화를 받았다. 그네를 타고 놀던 아이가 착지를 잘못해서 손가락뼈가 부러졌다는 것이다. 다급한 마음으로 병원으로 가는 길에 A씨는 10년 전 사고로 다리에 철심을 넣는 수술을 받던 생각이 문득 떠오른다. 수술도 수술이었지만 뼈가 붙은 후 나사를 제거하기 위해 또 다시 수술대에 올랐던 기억이다. 두 번이나 마취와 수술을 하면 성장기의 아이들에게 악영향을 주지는 않을까 걱정이 된다. 아들이 아픈 것을 끄찍이도 싫어하는 터라 걱정은 배가된다.

A씨는 새로 개발된 정형외과용 생체분해성 금속 나사에 대한 이야기를 담당 의사로부터 듣고 걱정을 한시름 덜어낸다. 이를 사용하면 치료 후 1년 뒤에 나사가



생분해성 소재를 사용하면 별도의 제거수술 없이 골절상을 치료할 수 있다.



사람의 뼈가 다시 결합하는 과정. 뼈는 고정되어 있는 한 자연치유능력에 의해 다시 붙는다.

저절로 사라져 2차 제거 수술을 하지 않아도 되기 때문이다. 생체분해성 금속 나사는 나사가 분해되며 나오는 마그네슘과 칼슘이 성장기 과정의 뼈 회복능력을 촉진시켜 주기도 한다는 사실도 알게 됐다. 덕분에 아이는 뼈가 붙은 후 제거 수술에 대한 두려움 없이 마음껏 뛰어놀 수 있을 것이다.

인체에서 답을 찾다

앞의 사례는 미래의 이야기가 아니다. 지금도 가능한 이야기다. 이미 생체분해성 실을 봉합에 사용하는 것은 신기한 일도 아니다.

많은 양의 칼슘과 마그네슘으로 이뤄진 사람의 뼈는 생성과 파괴를 반복하는 자연스러운 리모델링 과정을 거쳐 유지된다. 외부적인 요인으로 인해 부러지거나 손상돼도 고정돼 있는 한 자연치유능력에 의해 다시 붙는다.

그런데 문제는 골절이 심각해 자체적으로 고정하기 힘든 경우다. 골절된 뼈를 제 자리에 맞춘 후 금속나사로 뼈를 단단히 고정해야 한다. 이때 사용되는 소재는 대부분 충분한 강도와 생체적합성을 가진 티타늄 합금이다. 티타늄 소재는 뼈와 잘 유착되는 성질이 있어 골절 치료에 많이 사용돼 왔다.

하지만 성장기에 있는 유아나 청소년의 경우 뼈의 절대적인 크기가 자라나기에 이와 같은 뼈 고정 장치를 영구적으로 몸 안에 사용하기 곤란하다. 또한 티타늄을 사용할 경우 뼈의 퇴화나 용해와 같은 심각한 문제를 일으킬 수 있다. 우리 몸의 뼈는 적절한 하중을 반복적으로 가하지 않으면 퇴화되거나 약해져서 장기적으로 우리 몸을 지탱하기 어려울 수 있는데, 티타늄의 경우 뼈 대비 탄성계수가 너무 높아 주변의 하중을 먼저 흡수하므로 우리 몸의 뼈가 반복적으로 받아야 하는 적절한 하중을 차단하는 응력차폐현상을 일으킬 수 있기 때문이다. 이 때문에 골절이 치유되면 2차 수술을 통해 나사를 제거하는 경우가 많지만, 이 과정에서 환자의 고통, 의사의 수고와 같은 사회적 비용이 많이 발생한다.

From Human ! To Human !

Recommended Daily Intake:
 Calcium (1,000 mg)
 Magnesium (400 mg)
 Zinc (11 mg)

Elements (Overall):
 Calcium (1.4%)
 Magnesium (0.05%)
 Zinc (0.0032%)

Elements (Bone):
 Calcium (~30%)
 Phosphate (~20%)
 Magnesium (0.26%)
 Zinc (0.02%)

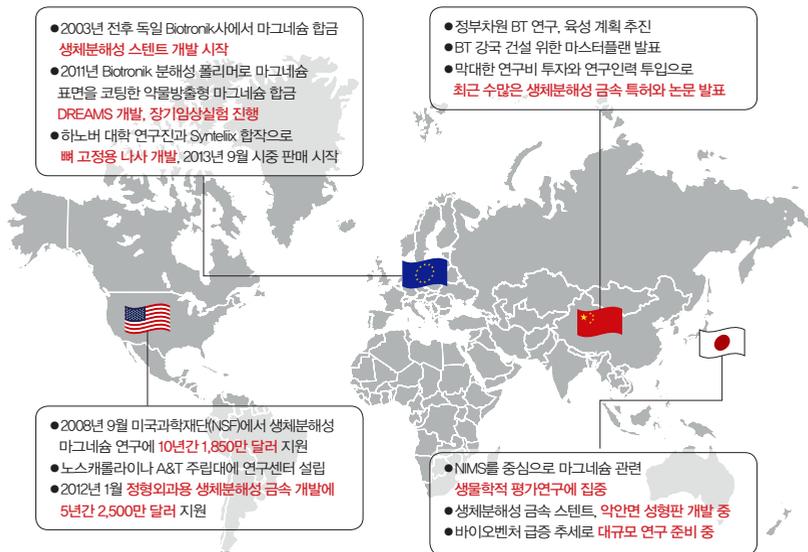
KIST-U&I Bio Mg	
U.T.S	256 MPa
U.C.S	386 MPa
Corrosion Rate	0.01 mm/y
Elongation	9%

Developed Revolutionary Biodegradable Mg through Optimized Tailoring of Human-Intrinsic Elements.

최근 KIST 등이 새롭게 개발한 생체분해성 금속은 이미 우리 몸 안에 뼈를 구성하고 있는 마그네슘과 칼슘을 주 원소로 사용해 만든 합금이다.

이와 같은 문제를 해결하기 위해 처음 도입된 대안은 몸 안에서 분해돼 없어지는 고분자, 즉 플라스틱과 같은 소재였다. 하지만 생체분해용 고분자 소재의 물성은 금속에 비해 상대적으로 너무 약하다는 단점이 있다. 분해 또한 일정한 속도로 이뤄지지 않아 많은 연구에도 불구하고 아직 사용에 제약이 있다. 이에 많은 연구자들은 생체 내에서 분해되는 고강도의 금속을 찾게 됐다. 그래서 제시된 대안이 마그네슘 소재다. 금속 소재이므로 물성은 플라스틱 소재에 비해 월등히 우수하다. 또한 분해도 비교적 일정한 빠르기로 서서히 없어지니 뼈의 생성과 주기를 맞추면 매우 우수한 뼈 고정 장치가 될 수 있을 것으로 기대됐다.

그런데 또 하나의 해결과제가 남아 있었다. 대부분의 연구가 소재의 강도와 분해와 관련된 문제에 머물러 있는 동안, 마땅히 고려돼야 할 인체 내 적합성의 문제가 제기되기 시작한 것이다. 일부 연구자들은 이를 해결하기 위해 인체를 구성하고 있는 원소만을 이용하여 합금을 만드는 아이디어를 떠올렸다. 생체분해성 합금



전세계 생분해성 금속의 개발 현황

은 몸속에서 완전히 분해돼 사라지기 때문에 모든 구성 원소가 생체적합성에 영향을 미칠 수 있다. 이 때문에 연구자들은 이들 원소의 종류와 첨가량이 적절히 구성돼야 문제없이 생체 내에서 사용할 수 있다고 판단했다. 하지만 기존 외국에서 발표되는 소재들은 이미 산업용으로 개발된 소재를 기반으로 하기 때문에 알루미늄, 희토류처럼 인체에 해가 될 수도 있는 원소들을 포함했다. 이는 장기적으로 인체에 문제를 일으킬 가능성이 존재하므로 새로운 소재를 만들 필요가 있었다.

최근 KIST 등이 새롭게 개발한 생체분해성 금속은 이미 우리 몸 안에 뼈를 구성하고 있는 마그네슘과 칼슘을 주 원료로 사용한 합금이다. 이 합금은 뼈를 고정할 수 있을 만큼 강도가 충분하면서도 손상된 뼈가 생성되는 동안 버틸 수 있을 정도로 분해속도가 느리다. 또한 뼈를 구성하는 원소로 이루어져 새로운 뼈의 재생을 촉진 시킴으로써 회복을 빠르게 한다는 장점도 있다. 최근 손가락 골절에 사용되는 나사를 이 합금으로 생산하여 국내에서는 최초로 임상을 거쳐 판매승인을 획득했다. 이를 통해 제거 수술을 원천적으로 배제함으로써 성장기 아이들의 골절이나 성인 환자의 응력차폐에 따른 골절 저하 등 다양한 문제를 해결할 수 있는 길이 열렸다.

미래지향형 원천기술 국내서 개발

사실 생체 흡수성 활성금속의 하나인 마그네슘에 대한 연구는 1930년대 초에 시작됐다. 그러나 당시에는 정련 기술이 부족해 인체 내에서의 과도한 분해를 방지할 수 없었다. 이후 산업용 마그네슘 합금에 대한 연구가 활발히 진행되면서 기술이 발전하기까지 오랜 시간이 지나야 했다. 결국 2001년 독일 하노버대 *Universität Hannover* 연구진이 그간의 기술을 바탕으로 마그네슘을 새로운 개념의 생체용 소재로 활용하기 위한 기초연구를 시작했다. 연구진은 이후 2003년도 전후 독일 바이오트로닉 *Biotronik*사와 공동으로 생체분해성 마그네슘 합금을 이용해 좁아진 혈관을 확장시켜주는 의료기기인 스텐트 개발에 돌입했다.

2005년 전후로는 한국·일본·중국이 관련 연구에 참여하기 시작했다. 생분해성 금속 소재에 대한 본격적인 연구가 시작됐고 마침내 2007년 독일 바이오토크에서 프로그레스-AMSProgress-AMS라는 마그네슘 합금을 이용한 관상동맥 스텐트 개발에 성공했다. 이 관상동맥 스텐트는 임상시험까지 완료했으나 혈관이 다시 막히는 재협착restenosis률이 높아, 코팅 및 표면 처리를 통해 이를 해결하기 위한 후속 연구가 진행되고 있다.

현재까지 유럽과 미국에서는 스텐트 회사를 중심으로 생분해성 금속을 스텐트에 활용하기 위한 연구를 중점적으로 진행했다. 한편 국내에서는 정형외과용으로의 활용을 목표로 2005년부터 연구를 진행했고 현재까지 이를 선도하고 있다. 국내의 결과들이 많은 논문에 보고되면서 최근에는 유럽에서도 스텐트 중심 연구에서 정형외과용 임플란트 소재 개발로 연구 주제를 바꾸면서 점차 연구 범위가 확장되고 있는 추세다. 2011년 독일 하노버대 연구진이 정형외과용 임플란트 제조회사인 신텔릭스Syntellix사와 함께 분말야금법을 사용해 뼈 고정용 나사를 개발한 것이 한 예라 할 수 있다. 연구진은 무지외반증 환자 26명을 통해 임상 시험을 진행한 것으로



독일의 바이오토크이 개발한 스텐트. 약물주입기능도 함께 갖추었다. © Biotronic

알려져 있다. 앞으로도 정형외과용 임플란트에 대한 연구는 지속적으로 진행될 것으로 예상된다.

생체분해성 금속 소재의 중요성을 인식한 미국은 2008년 9월에 미국 과학재단NSF의 지원으로 노스캐롤라이나 A&T 주립대North Carolina Agricultural and Technical State University에 연구센터를 설립하고 생체분해성 마그네슘 연구에 5년 동안 1850만 달러(약 200억 원)를 지원하고 있다. 2012년 1월에는 정형외과용 생체분해성 금속을 개발하기 위해 추가적으로 5년 동안 2,500만 달러(약 270억 원)를 지원해 연구를 진행 중이다.

국내 연구도 빛을 보기 시작하고 있다. KIST를 중심으로 한 국내 연구진은 정형외과용 의료기기 소재 부품을 전문으로 제조하는 유앤아이(주)사와 함께 2005년부터 정형외과용 생체분해성 의료기기 부품에 대한 연구를 진행했다. 연구진은 인체 구성원소만으로 이루어진 생체분해성 마그네슘 합금을 개발하고 식약처로부터 임상허가를 받아 수부골절환자를 대상으로 임상연구를 마쳤다. 이를 바탕으로 2015년 4월에 식약처의 판매승인을 획득해 곧 상용화가 진행될 예정이다. 판매가 시작되면 아마도 생체용으로 개발된 마그네슘 소재로서 상용화된 첫 사례가 될 것이며 향후 이를 확장해 보다 다양한 응용분야를 찾아 활용의 폭을 넓힐 수 있으리라 생각된다.

새로운 소재의 개발과 산·학·연·관 협력이 해당

생체분해성 금속 소재 기술을 다양한 정형외과적 치료에 적용하기 위해서는 아직 해결해야 할 난관이 많다. 우선 소재기술면에서 기존의 골고정장치로 사용되는 티타늄 합금에 비해 강도와 연신율 등 기계적 물성이 낮다는 문제를 해결해야 한다. 기계적 물성이 낮다는 것은 하중이 상대적으로 많이 걸리는 척추, 다리 등의 치료 부위에 사용할 경우 제약을 받을 수 있다는 뜻으로 지금의 소재보다 더욱 뛰어난 물성을 가진 새로운 합금소재의 개발이 필요하다.

적절한 합금 개발뿐만 아니라 합금의 물성을 제어할 수 있는 공정 개발도 병행해야 한다. 이러한 과정에서 특히 고려해야 할 사항은 의료기기로 사용되는 만큼 고정 정 공정기술을 구현해야 한다는 점이다. 마그네슘이나 칼슘 같은 원소는 반응성이 크기 때문에 이를 인체에 사용할 만큼 청정하게 만드는 데 많은 노하우가 필요하다. 또한 인체에 사용되는 의료기기라는 점을 고려하여 불량률을 최소화해서 신뢰도를 높이는 것도 상용화에 반드시 필요한 과제라 할 수 있다.

정책면에서도 변화가 필요하다. 현재까지 사용된 바가 없는 의료용 소재기술이므로 국가적 관심과 식약처, 산업부, 보건복지부 등 관계부처의 지원이 절실하다. 아울러 국내에서 불모지에 가까운 의료기기 산업을 육성하기 위한 다양한 정책과 지원이 나와 많은 벤처형 기업들이 중견의료기기 회사로 도약할 수 있는 길을 터주는 것도 현재로서는 무엇보다 중요한 과제라 할 수 있다.

물론 의료기기산업의 특성상 기술 개발만으로 상용화가 이루어질 수는 없다. 실용화하려면 기술 개발과 함께 사람을 대상으로 사용할 의료기기로서의 안전성과 유효성을 확보해야 하기 때문이다. 여기에는 이와 관련된 여러 가지 기술적 표준화도 포함된다. 또한 전임상 및 임상시험을 거쳐야 제품을 허가하고 판매할 수 있기 때문에 다양한 동물실험을 통해 얻은 신뢰성 있는 결과를 바탕으로 식약처로부터 임상시험에 대한 허가를 획득하고 표준화된 임상시험을 진행해야 한다.

이처럼 복잡하고 어려운 구조는 그동안 의료기기산업이 선진국 중심으로 이루어진 것과 무관하지 않다. 생체분해성 금속 소재처럼 유용하지만 아직 상용화되지 않은 새로운 기술이 있더라도, 이것이 의료기기로 자리매김하려면 복잡하고 정교한 과정을 거쳐야 하기 때문이다. 결국 경험이 부족한 의료기기 후발주자들에게는 결코 쉬운 일이 아니다.

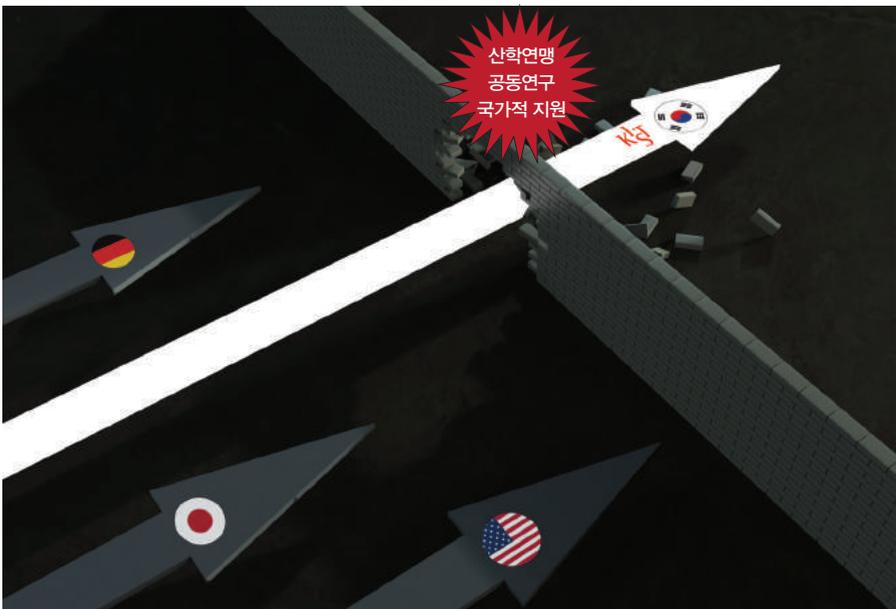
그러면 성공적인 생체분해성 금속 소재를 개발하고 상용화하기 위해서 필요한 핵심 요소는 어떤 것이 있을까? 기술적인 측면에서 고강도 생체적합성 소재 기술,

지능형 생체적합성 코팅 기술, 최적의 제품 설계 및 제조 기술이 필요할 것이다.

개발된 의료기기 사용의 측면에서는 극도의 인체 안전성 확보기술, 전임상·임상시험을 통한 유효성 평가기술이 필요하다. 최종적으로 개발된 제품을 양산하기 위한 상용화 단계에서는 설비 투자 및 판매망 구축이 필요하다.

이러한 과정을 효율적으로 진행하기 위해서는 최고의 기술을 보유한 연구기관과 수요병원 및 인증기관, 그리고 이들을 제품화할 수 있는 의료기기 전문업체 등 각 분야 최고 전문가 그룹의 참여와 유기적인 역할분담이 필요하다. 그리고 이들 기관들의 협력에 의한 효율적인 연구 수행뿐만 아니라 정부 및 관련부처의 세세한 관심과 지원 또한 성공을 위한 필수 요소라 할 수 있다.

지금까지의 국내 성과를 통해 지속적으로 세계 시장을 선도할 수 있으려면 개발



한국의 의료소재 및 기기 분야에서 앞서 나간다면 의료복지비용을 크게 절감할 수 있을 뿐 아니라 향후 크게 성장할 관련 산업 시장도 선점할 수 있을 것으로 기대된다.



정강이뼈 골절을 결합 시술한 모습. 기존의 골절 치료는 결합재 제거 수술이 별도로 필요해 매우 번거로웠다.

된 소재에 대한 후속 연구가 계속돼야 할 것이다. 세계적인 연구추세로 볼 때 생체 분해성 금속 소재 기술은 대략 5년 이내에 시장에 등장해 정형외과용 의료기기의 판도를 바꿀 수 있을 것이라 생각한다. 이와 같은 예측에 대한 대비가 향후 선진 의료강국으로 도약할 수 있느냐를 결정하는 중요한 열쇠가 될 것이다.

전망 밝지만 경쟁도 치열

정형외과용 생체분해성 금속 소재는 자라나는 유아, 청소년이나 젊은 나이에 임플란트를 한 경우처럼 장시간 뼈를 고정 장치로 고정하기 어려운 사람에게 매우 유용한 기술임에 틀림없다. 또한 상대적으로 골질이 나쁜 노령환자 치료에도 적합해서 다가오는 노령화 사회 대비 기술로서도 반드시 개발되어야 하는 의료기술이라 할 수 있다. 이는 관련 연구나 특허가 지속적으로 증가하는 것만 보아도 그 중요성을 알 수 있다. 현재까지의 국내 정형외과용 생체분해성 금속 소재의 연구결과를 바

탕으로 판단해보면 충분히 세계 시장을 선도하고 새로운 시장을 창출하며 중견기업을 배출할 가능성이 있다고 전망된다.

지금까지의 국내의 주력산업인 철강, 반도체 등의 산업이 포화되면서 국가적으로 새로운 먹거리 산업이 필요한 시점에서 새로운 전략산업이 필요하다는 것दन관적인 전망에 힘을 보탠다. 차세대 성장동력을 찾는 과정에서 국내 의료기기 산업에 대한 투자와 관심도 자연히 증가할 것이기 때문이다. 여기에 의료기기 관련 무역수지가 큰 적자를 기록하는 상황에서 신기술 등장과 이에 대한 시장선점 가능성은 미래를 준비하는 여러 기업에게도 고무적인 일이다. 신기술을 통해 벤처기업들이 중견기업으로 성장할 수 있는 기반을 다진다는 면에서도 상당한 가치가 있다.

현재 청형외과의 생체분해성 의료기기는 모두 고분자를 기반으로 하고 있으며 3~4개의 메이저 의료기기 회사가 세계 시장^{2014년} 700억 달러, 연성장률 10%의 90% 이상을 독점하고 있다. 한해 75조 원 정도의 전 세계 시장에 이 기술이 적용될 수 있다면 초기 약 11조 원 규모의 시장이 즉시 대체될 수 있을 것으로 보인다. 2차 검증을 통해 새롭게 진입할 수 있는 분야를 포함하면 약 40조 원 규모의 시장이 형성될 수 있을 것으로 전망된다.

기술적인 가능성도 충분하다. 우리나라는 이미 확보된 기술원천 특히 20건 이상을 적용해 저부하용 단일 구성품으로 수부골고정용 나사제품을 우선적으로 개발해 1단계에 임상시험을 진행한 적이 있다. 이를 바탕으로 시장규모가 큰 고강도 골접합용 플레이트와 스크루를 개발해 임상시험을 진행하며 기술을 선도하고 있다. 의료기기 시장에서 이와 같은 경험과 노하우는 얻기 힘든 자산으로 이를 바탕으로 새로운 의료기기 개발에 한 발 앞서갈 수 있을 것이다.

한편 지금까지 한국에서의 임상시험은 국제임상시험관리기준GCP에 따라 진행하고 있으며 그 비용도 선진국보다 저렴하다. 특히 유럽에서 우리의 임상시험 데

이터를 인정하기 때문에 추가적인 승인을 확보할 수 있고, 이를 보완해 미국을 포함한 전 세계 시장에 진입할 수 있다는 것이 가장 긍정적인 요인이라 할 수 있겠다.

하지만 낙관은 이르다. 의료기술 선진국과의 경쟁이 만만치 않은 것이 사실이다. 현재 미국, 유럽, 일본 정부 모두 생체분해성 금속 연구에 막대한 투자를 하고 있다. 독일 등 유럽 국가는 앞선 기술력을 바탕으로 지속적으로 새로운 의료기기를 개발하고 있으며, 미국은 국가와 기업의 대규모 투자를 바탕으로 원천기술 확보에 주력하고 있는 상황이다. 이들 나라는 의료강국으로 기존에 많은 인프라를 갖추고 있어 기술의 확보를 통해 앞서 나가는 우리나라를 빠른 속도로 추격하고 있는 상황이다.

새로운 소재를 이용한 의료용 임플란트의 경우 전임상 및 임상시험 시 상대적으로 많은 비용이 소요되고 2~3회에 걸쳐 임상이 수행되는 예가 많다. 특히 새로운 소재 기술이 적용될 경우 기존 양산 라인과 분리된 신규 제조 설비 구축이 요구되고 국내외에 광범위한 판매망을 구축하기 위해서는 많은 자금이 요구된다. 이때문에 개발 기술이 사장되지 않고 성과를 얻기 위해서는 국가적인 투자나 투자 여력이

생체분해성 합금을 적용할 수 있는 시장

단위 : 백만 달러

시장	금액
골접합 고정 장치	340
관절 고정 장치	1,615
악안면 고정 장치	912
혈관확장기기	8,379
합계	11,246

생체분해성 합금을 적용할 수 있는 2차 진입 시장

단위 : 백만 달러

시장	금액
생물학제재	6,563
인공 관절	19,441
추간체 고정 보형재	2,250
합계	28,254



3D 프린터를 이용해 발가락뼈를 조형하는 모습. 생체분해용 소재와 함께 기존의 인공 골격을 대체하는 소재 역시 활발하게 연구 중이다. 특히 3D 프린터는 정형외과 치료의 새로운 지평을 열 것으로 기대된다.

있는 중견기업 혹은 대기업의 주도적 참여가 필요하다. 이를 통해 관련 인프라를 구축하고 향후 의료기기 강국으로 가는 길을 여는 것이 중요하다.

또한 의료기기 최대 수요국인 미국의 식품의약국FDA이 한국에서 수행한 임상시험 데이터를 인정할 것인가의 문제도 중요한 사항이다. 이를 위해 많은 노력을 기울이고 있지만 자국의 이익을 위해 행할 수 있는 다양한 형태의 방어수단에 잘 대처하는 것이 향후 시장 선도에 중요한 요소라 생각된다.

참고문헌



- Frank Witte | “The history of biodegradable magnesium implants: A review”, *Acta Biomaterialia* | 2010
- Zheng, et al. | “Biodegradable metals”, *Materials Science and Engineering* | 2014
- Cha, et al. | “Biodegradability engineering of biodegradable Mg alloys: Tailoring the electrochemical properties and microstructure of constituent phases”, *Scientific Reports* | 2013
- iData Research | U.S. Market for Orthopedic Bioabsorbable Bone Pins and Screws | 2009

노주원 | KIST Smart Farm Solution 융합연구단

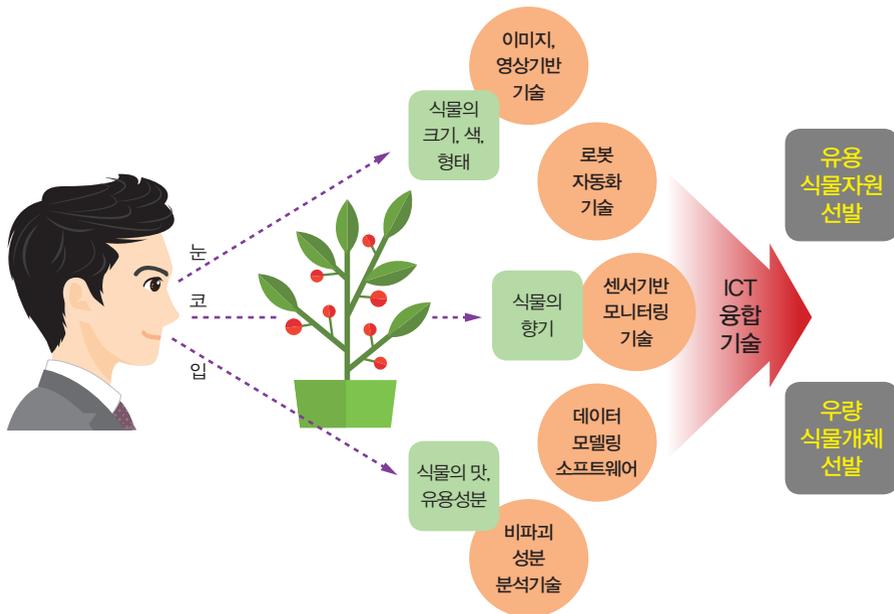
똑똑한 농장이 만드는
건강하고 안전한 식품



ICT와 농업의 융합으로 미래농업 실현

A씨는 아침에 눈을 뜨자마자 스마트폰을 집어 들고 열심히 정보를 들여다본다. 그가 운영하는 스마트팜smart farm에서 작물들이 어떻게 자라고 있는지 확인하기 위해서다. 사실 A씨는 원래 농업과 별 관련이 없었다. 대학교에서 정보통신기술ICT 분야를 전공한데다 도시 태생이라 농사짓는 방법은 본 적도, 배운 적도 없는 초보 농부다. 그러나 A씨가 창업의 꿈을 이루기 위해 아이템을 찾던 중, 도시형 농업에 관심을 두기 시작했다. 꿈을 실제로 이루어 자신만의 스마트팜을 설계하고 실제 운영하는 것이다. 비록 지금은 소규모로 운영 중이지만, 층별로 다양한 고부가가치 작물을 생산하는 10층 규모의 수직형 스마트팜을 통해 신선하고 건강한 먹을 거리를 일 년 내내 제공하는 것을 목표로 하고 있다.

ICT의 발달로 인류는 편리하고 신속한 정보교환이 가능한 스마트라이프에 돌입했다. ICT는 시간과 장소의 제약 없이 업무가 가능한 환경을 제공할 수 있다. 농업 현장도 예외는 아니다. 이미 미국, 네덜란드 등 농업선진국에서는 ICT를 접목한 스마트농업이 작물 생산성과 농가 수익성을 향상시키고 있다. 다양한 정보와 ICT 프로그램을 통해 농부가 농업현장에 가지 않고도 영농과정에 필요한 정보를 실시간으로 획득하고 지시할 수 있는 스마트팜이 현실로 다가왔다.



ICT 기반으로 식물생육데이터를 획득하는 자동화 시스템. 다양한 센서가 농부의 감각기관을 대신하고, 이러한 정보는 한 곳에 모여 데이터베이스로 관리된다. 농장을 운영한 정보는 앞으로의 농업에 반영되어 농부의 의사결정을 도와준다.

스마트팜 ICT 시스템은 작물이 잘 자랄 수 있도록 생육환경을 실시간으로 모니터링하고 파종에서 수확까지 자동으로 조절하는 데 그 초점을 맞추고 있다. 이를 통해 균질한 품질의 농산물을 효율적으로 생산하는 것이다.

관련 핵심 기술에는 사람의 눈을 대신해 식물의 크기, 색, 형태를 감지하는 이미지 및 영상기반기술, 사람의 코와 미각을 대신해 식물의 향기와 식물의 맛과 유용성분 등을 탐지하는 센서기반 모니터링기술, 비파괴 성분 분석기술 등이 있다. 인력을 절감해주는 로봇자동화 기술, 식물 생육데이터를 분석하고 유용한 농업정보로 변환해주는 데이터 모델링·소프트웨어 기술도 유용하다.

스마트팜 기술은 그 특성 상 정밀제어가 가능한 시설농업유리온실, 식물공장 등 분야에

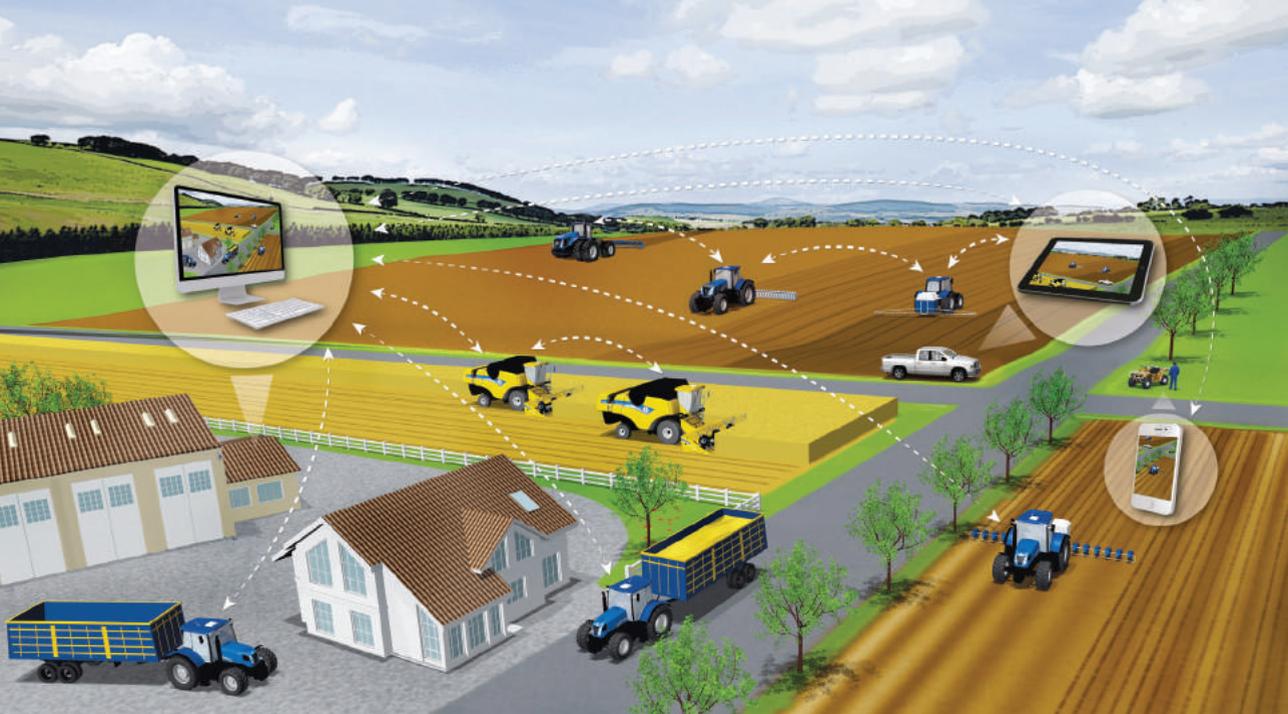
서 활발히 사용되고 있다. 특히 식물생육모델링 시스템을 이용하면 식물의 어린잎부터 생육상태를 관찰해 성체가 됐을 때의 생산성이나 수확량을 예측할 수 있어 향후 우량품종 선발에도 유용하게 사용될 수 있다. ‘될성부른 나무는 떡잎부터 알아본다’는 옛 선조들의 지혜가 현대의 과학 기술로 실제 구현될 수 있는 대목이다.

스마트팜, 기술 표준화 및 세대 전환 진행 중

스마트팜은 이미 전 세계적으로 진행되고 있는 고부가가치 6차 산업으로 주목받고 있다. 이런 흐름을 주도하는 기업이 네덜란드 프리바Priva사다. 프리바는 온실 복합 환경제어시스템 및 관련 센서설비 분야에서 글로벌 선도기업으로 평가받는다. 프리바 시스템의 핵심기술은 재배작물의 환경변화에 따른 생육·생리 특성변화 정보를 생육환경 제어에 바로 적용하는 것이다. 프리바의 농장 관리 시스템은 다양한 재배환경 조건하에 영상 및 분광 센서를 적용해 주요 작물품종별 생육·생리상태 변화 데이터를 획득해 분석한다. 최적의 생산성과 품질을 확보하기 위한 미세



네덜란드 프리바사의 설비를 적용한 토마토 온실. 토마토는 땅이 아닌 별도의 화분에 심어 지표에서 떨어뜨려 놓는다. 작물과 토양, 실내 공기의 상태는 실시간으로 확인되어 이에 맞도록 난방, 영양성분과 수분 공급, 환기 등이 자동으로 이루어진다. © PRIVA



데이터 네트워크를 활용한 정밀농업의 개요. 정밀농업을 실현하려면 다양한 곳에서 수집한 정보를 한데 모아 처리해야 한다. 이 때문에 통신기능을 갖춘 센서가 농지 곳곳은 물론, 농기계에도 설치되어 최대한 많은 정보를 수집한다. 최근에는 개별 농장에서 위성정보를 이용하는 사례도 늘고 있다. © PCropTec 2014

재배환경 제어를 시스템 상으로 구현한 것이다.

유전자재조합식품GMO으로 유명한 미국 몬산토Monsanto사도 스마트팜을 적극 활용 중이다. 몬산토는 재배작물의 품종별 생육·생리 데이터를 분석해 처방농업 *prescription farming*을 구현하고 있다. 처방농업이란 작물의 재배환경별 맞춤형 품종 종자 및 최적 재배관리법을 제공하는 서비스다.

이들 기업의 기술 선도와 함께 스마트팜 ICT 시스템은 기술 표준화와 세대 전환이 순조롭게 이루어지고 있다. 관련 기술 선진국인 네덜란드와 일본은 시설원예 자재, 센서, 센서네트워크, 복합환경제어 관련 표준화 작업을 진행 중인 상황이다. 특히 네덜란드 프리바 등에서는 표준화된 시설, 시설 내 다양한 환경제어 장치 등을 모두 일괄적으로 생산·공급하고 있다.

세대 전환도 착착 진행 중이다. 지난 1세대 스마트팜스마트팜 1.0에 적용된 ICT는

시설 내 온도, 습도 등 단순 환경제어 및 자동화 등 하드웨어 중심에 그쳤다. 하지만 소프트웨어 중심의 2세대 스마트팜스마트팜 2.0은 센싱의 범위를 단순 재배환경 수준에서 작물의 실제 생육·생리 상태로 확대해 작물의 품질과 생산성에 직결된 데이터 중심의 정밀생육제어로 전환하는 데 성공했다. 스마트팜 2.0은 현재 미국과 네덜란드에서 연구개발과 상용화가 진행되고 있는 단계로 고부가가치 식품과 의약품 원료 생산에 적용되어 사업화에 큰 진전을 보이고 있다.

그렇다면 우리나라의 스마트팜 관련 ICT 연구는 어떻게 진행되고 있을까? 그 중심에는 KIST 강릉분원 천연물연구소가 있다. KIST 강릉분원 천연물연구소는 KIST 서울 본원 ICT 연구팀과 함께 '데이터기반 농업'이라는 새로운 접근법을 스마트팜에 적용하고자 연구 중이다. 연구팀은 스마트팜 농업현장에서 얻어지는 작물생육, 생육환경, 기능성작물 표준화 데이터 등을 획득하고 분석해 농업 빅데이터 플랫폼을 만들고자 한다. 이를 실제적으로 농업현장에서 다시 활용해 생산성과 경제성을 높이는 시스템을 구축하는 것이 팀의 과제다.

연구팀의 1차 목표는 스마트팜에서 식의약·향장 원료가 될 수 있는 고부가가치 작물을 생산하는 것이다. 이 때문에 관련 기업들의 수요에 따라 맞춤형으로 규격화된 산업화 원료를 제공할 예정이다. KIST 강릉분원은 이를 위한 초기 스마트팜 모델인 스마트 유팜Smart U-FARM 테스트베드를 2015년 6월 구축했다. 150평 규모의 스마트 유팜에는 인공광형 식물공장과 자연광형 유리온실 시스템이 공존하고 있다. KIST 강릉분원은 향후 강릉시에 산·학·연·지자체로 구성된 천연물 농산업 클러스터를 구축하고, 이를 스마트팜과 연계한 대규모 시범사업으로 확장해 나갈 계획이다.

한국형 스마트팜 개발의 과제와 해답

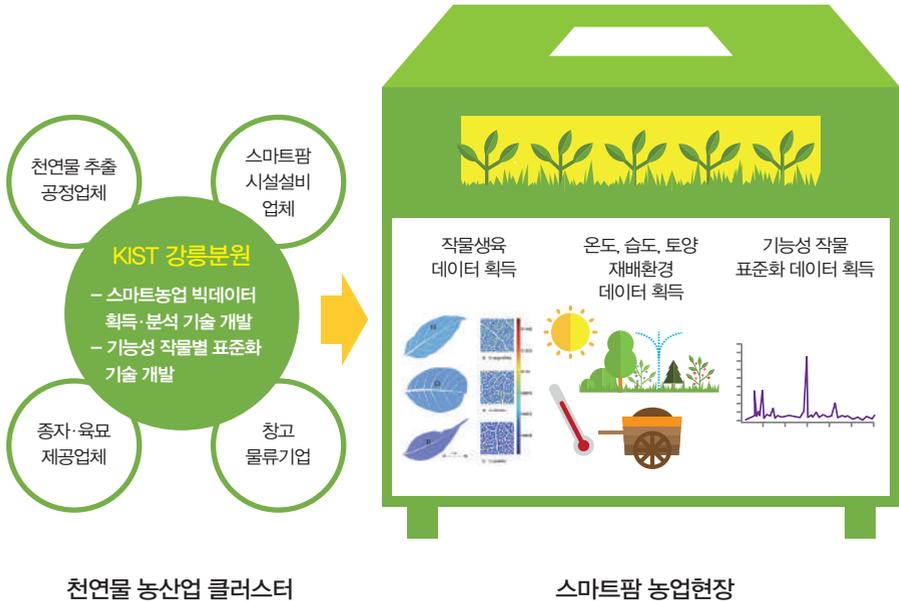
이렇게 미래형 과학농업인 스마트팜을 위한 기술 개발이 한창이지만, 필요한 과제

가 아직 많이 남아 있다. 첫 번째는 스마트팜 구성모듈, 자동화설비, 복합환경제어 하드웨어 및 소프트웨어의 개발이다. 중요한 점은 표준화가 반드시 연계돼야 한다는 점이다. 우리나라 기후토양환경과 기호 작물에 따른 한국형 스마트팜 시설이 표준화돼야 작물별로 일정한 품질과 생산성을 확보할 수 있다.

두 번째는 고부가가치 작물의 대량생산과 규격화다. 식물 원료를 천연물신약, 건강기능식품, 기능성화장품 등에 적용하기 위해서는 반드시 원료를 표준화하여 원료 내 기능성분을 일정하게 유지해야 한다. 미국이나 유럽에서는 이들 제품에 사용될 원료에 대한 표준기준이 매우 엄격하기 때문에 허가에 필요한 여러 가지 자료를 사전에 준비해서 제출해야 한다. 실제로 미국 식품의약품안전청FDA에서는 원료식물의 중분석, 식물학적 감정, 화학적 프로파일링, 재배지·생산지 정보, 생태 환경, 재배이력, 채집 등에 대한 상세한 정보를 요구한다. 또한 나고야의정서 발효에 따른 해외수입 식품과 의약품용 식물원료의 수급 문제와 함께 단가 상승에 대한



농업선진국에서는 농업 중 노동집약적인 작업 상당수가 자동화됐다. 이에 따라 농업로봇 시장도 급속히 성장할 전망이다. 사진은 독일 보쉬에서 개발한 잡초제거용 로봇 보니로브(Bonirob). © BOSCH



천연물 농산업 클러스터

스마트팜 농업현장

스마트팜 2.0 개념도

근본적인 대책도 마련해야 한다.

이러한 과제의 해답은 ICT 기반의 과학농업이다. 시설농업 자동화, 첨단화 등 사람의 편이성에 중점을 둔 기존의 스마트팜 1.0에서 작물의 최적 생육조건 및 환경을 찾아 적용하는 작물 중심의 스마트팜 2.0으로의 전환이 요구된다. 구체적으로는 작물의 생육재배환경 데이터와 생산성, 품질 관련 특성의 상관요인들을 구명해 이를 실제 재배관리에 적용하기 위한 재배관리 프로토콜 및 실증시스템으로 개발해야 한다. 데이터 중심의 스마트팜 기술 전환은 농민을 농업 첨단화의 중심에 설 수 있도록 하는 변화의 촉매 역할을 할 것으로 기대된다. 이는 결국 농업에서 과학의 필요성에 대한 공감대를 넓히고 국내 농업 환경을 변화시킬 수 있을 것이다.



일본 치바대학교에서 연구 중인 식물공장. 머지않은 미래에 농촌과 농부들의 모습은 지금과 무척 달라져 있을 것이다. © Chiba University

선진국 따라가는 우리나라 스마트팜 사업

미국, 네덜란드, 일본 등 글로벌 농업강국은 이미 오래전부터 데이터 기반의 농업을 실현해 농업의 생산성을 높이고 있다. 미국에서는 농작물 생장에 대한 각종 데이터를 현장에서 농민이 직접 분석하고 과학적으로 관리해 농업생산성을 급격하게 향상시키고 있다. 사과와 감의 경우 5~15%를 증수하고 품질은 10~25% 향상시키며 관개수량도 10~40% 절감할 수 있었다. 또한 ICT 기반 식물생육 데이터 획득·분석시스템을 이용해 미래 기후환경에 대비한 종자개발에도 박차를 가하고 있다.

세계 농산물 수출국 중 2위를 차지하고 있는 네덜란드는 유리 온실형 스마트팜을 개발해 자동화 및 데이터에 기반한 화훼 생산과 고부가 농작물과 **프리카, 토마토** 생산에 성공한 대표적인 사례다. 높은 기술 수준의 식물 생육·생리특성 분석 플랫폼에 더해 적정 영상 분석 기술을 대규모 유리온실 설비에 적용해 생산 및 품질관리, 출하, 수출형 플랜테이션에까지 효과적으로 접목시키고 있다.

일본 역시 식물공장형 스마트팜 상용화를 1990년대부터 추진해 오고 있다. 2009년부터 일본 농림수산성은 식물공장을 보급하기 위한 실증, 전시사업과 설비를 보조하는 국비 지원사업을 추진하고, 경제산업성은 식물공장 기반기술 연구개발을 지원했다. 일본의 식물공장 산업은 2009년 95억 엔에서 2020년 417억 엔 규모로 성장할 전망이다.

최근 우리나라도 농촌진흥청과 일부 정부출연연구소를 중심으로 스마트팜 핵심 기술을 개발하고 있다. 특히 정부에서 의욕적으로 나서 농업을 미래성장 산업으로 지목하고 ICT 기반의 농업혁신을 강조하고 있다. 세종시에 창조농업마을을 지정해 스마트팜 시범단지를 조성하고 2017년까지 사물인터넷 기반의 자동화된 스마트팜을 8,000여 농가에 보급해 3년 간 5조 700억 원의 경제적 파급효과를 거둔다는 계획을 세우고 현재 진행 중이다.

그러나 아직은 가야 할 길이 멀다. 세계 스마트팜 기술과 산업은 ICT를 농업유



2015년 밀라노 엑스포에는 이탈리아의 식품유통체인 COOP가 미래의 슈퍼마켓을 선보였다. 파종부터 수확, 유통에 이르기까지 농산물의 이력이 하나하나 기록되어 최종소비자가 간편하게 정보를 확인할 수 있는 시스템이다. 스마트 농업은 궁극적으로 양질의 식품을 소비자에게 제공함으로써 국가 차원의 보건의료에 중요한 역할을 한다. © Stryk.com

통과 서비스에까지 접목한 스마트팜 3.0으로 빠르게 변화하고 있다. 우리나라는 아직 온실개폐 및 관수 자동화, 온열풍기 가동, 농약살포 원격자동제어 등 하드웨어에 치중한 스마트팜 1.0 수준이다. 또한 네덜란드형 유리온실 시스템을 전면 수입해 농가가 작물을 생산함에 있어서도 동일 작물의 생산성이 네덜란드의 60% 수준에 그친다. 이는 우리나라 토양 및 기후환경에 맞는 작물 생육환경 데이터의 부재에서 오는 당연한 결과라 할 수 있다. 이를 극복하기 위해 정부의 집중적인 연구비 투자를 바탕으로 관련 핵심기술들이 개발되어야 한다. 우리나라의 스마트팜 시설과 관련해 취약한 연계산업기반(농업시설자재, 농업 IT, 소프트웨어) 등을 개선하는 것도 반드시 넘어야 할 관문이다.

3,000조 원 이상 규모의 블루오션

‘일가의 인디애나 존스’로 불리는 투자의 귀재 짐 로저스(Jim Rogers) 로저스 그룹 회장은 2014년 한국을 방문한 자리에서 미래의 가장 유망한 직업으로 농부를 지목했

다. 농업이야말로 최고의 투자처라는 것이다. 국제연합식량농업기구의 집계에 따르면 실제 세계 농업식량 시장은 지난해 3,000조 원 이상으로 자동차, 반도체를 합친 규모보다 크다.

OECD는 ‘2030년 바이오경제 보고서’를 통해 농업이 작물 생산을 통해 먹거리를 확보할 뿐 아니라 제약, 식품, 화장품, 바이오산업 원료, 에너지 부분으로 확대 적용될 가능성이 크다고 예견했다. 이러한 흐름을 반영하듯 듀폰Dupon트사 등 글로벌 기업들은 농생명 산업으로 사업을 확장하고 있다. 일본의 대표적인 IT기업들인 파나소닉, 도시바, 샤프 등과 최근 도요타 자동차까지 식물공장 사업에 뛰어들어 차세대 농업기술시장에 도전장을 내밀었다.

이런 상황에서 ICT 기반의 한국형 스마트팜 개발은 우리나라의 차세대 신성장 동력이 될 수 있는 미래농업 혁신모델 구현사업이라 할 수 있다. 농가 소득증대는 물론 관련 산업의 동반성장으로 이어질 수 있는 블루오션이 될 것이다.

참고문헌



- 농촌진흥청 | “2011년 농산업 트렌드”, 『RDA Interrobang』 | 2011
- 농촌진흥청 | “스마트시대, 스마트 농업”, 『RDA Interrobang』 | 2011
- 한국과학기술기획평가원 | “2030년 바이오경제 실현을 위한 정책방향과 시사점”, 『KISTEP ISSUE PAPER』 | 2009
- 한국지식재산전략원 | “ICT기반 스마트 식물공장 시스템개발”, 『정부 R&D 특허전략지원 사업 보고서』 | 2014





K I S T 과학기술전망 2016

Chapter 3

지속가능한 환경

신기후체제와 함께 다시 화두에 오른 환경

정윤철 | KIST 물자원순환연구단



21세기에 들어 기후변화, 에너지, 물 부족 등 크고 작은 환경 문제가 지구촌의 건강과 안전을 위협하고 있다. 이에 수많은 과학기술 전문가들이 관련 문제를 해결하기 위한 연구를 활발히 진행하고 있다. 이번 섹션에서는 그중 의미 있는 성과가 있는 기술을 세 가지 소개한다. 이산화탄소의 자원화, 분산형 물순환 시스템, 미래 환경모니터링이 그것이다.

최근 '내셔널지오그래픽'에서 공개한 동영상 하나가 사람들에게 충격을 준 적이 있다. 1999년부터 2014년까지 불과 15년 사이에 북극 빙하지대가 거의 절반 가까이 줄어들고 있는 장면이 담긴 북극지도 동영상이다.

이렇게 극지방의 빙하지대가 사라지는 가장 큰 이유가 지구온난화다. 지구온난화를 막기 위해서는 이산화탄소와 같은 온실가스 배출량을 최대한 줄여야 한다. 세계 각국은 기후변화에 대비해 공동의 노력을 해오고 있으나 국가 간 이해관계가 얽혀 그 효과가 그다지 크다고는 볼 수 없는 상태다. 다행히 온실가스를 감축하기 위



2015년 12월 파리에서 열린 제21차 기후변화협약 당사국총회(COP21)에 회원국들이 '파리협약'에 정식으로 승인했다. 이를 계기로 세계 각국은 온실가스를 전례 없이 크게 줄이겠다고 발표했다. 사진은 COP21 전야, 회원국의 귀빈들을 기다리는 프랑수아 올랑드 프랑스 대통령과 반기문 UN 사무총장, 레옹 파비우스 전 프랑스 총리, 세골렌 루아얄 푸아투사랑트 주지사, 아를렘 데시르 전 사회당 당비서(앞쪽 오른쪽 끝부터 왼쪽으로 순서대로).

한 기술 개발은 활발히 추진되고 있다. 온실가스, 특히 이산화탄소의 배출량을 줄이는 대체에너지를 개발하고 이미 발생한 이산화탄소를 포집, 저장하는 연구가 대표적이다.

먼저 '이산화탄소 자원화 기술'은 이미 발생한 이산화탄소를 유용한 다른 물질로 변화시키는 기술이다. 단순히 이산화탄소 배출을 줄이는 것뿐만이 아니라 이산화탄소를 산업적으로 이용할 수 있는 새로운 공정으로도 그 가치가 높다. 일례로 이산화탄소를 가솔린, 메탄올과 같이 액화탄소연료를 만드는 원료로 사용하거나, 이산화탄소를 폴리카보네이트 등의 다른 합성유기화합물의 제조 원료로 이용할 수도 있다. 이산화탄소의 산업적 이용은 유용한 물질 생산과 이산화탄소 배출저감 효과라는 두 마리 토끼를 동시에 잡을 수 있을 것이다.

한편 인구 증가와 산업 발전으로 물 수요량은 계속 증가하고 있으나 사용가능한 물의 양은 감소 추세에 있다. 21세기 전 지구적인 물 부족이 예견되면서 사용 후



최근 환경 기술의 주요 트렌드는 '분산'이다. 건물 하나, 지역 하나만 담당하는 소규모 시스템을 통해 폐기물 처리와 전력생산, 자원 재생을 소규모 지역 단위로 처리하여 중앙집중식 처리방법에 따른 낭비를 줄이려는 것이다. 사진은 분산형 물 순환 시스템이 적용된 미국 뉴욕시의 슬레이어 빌딩.

버려지는 폐수나 생활하수를 이용 가능한 자원으로 활용하는 물재이용 기술이 각광받고 있다. 특히 기후변화로 인한 강수량 변동 및 지표수의 증발량 증가로 인해 대체 물자원 확보의 중요성은 갈수록 중요해지고 있다. 대체 물자원 확보에는 용수절약, 빗물이용, 해수담수화, 누수 방지 등이 모두 포함되지만, 여기에 소개하는 것은 최근에 주목을 받고 있는 하수의 재이용과 자원회수다.

지금의 하수처리에는 대부분 중앙집중식 대규모 하수처리방식을 사용하고 있다. 대규모 하수처리방식은 하수를 지하에 매설된 하수관거를 통해 하천 하류지역에 위치한 대규모 하수처리장으로 이송해 처리하는 것이다. 이는 초기에 막대한 시설투자가 필요할 뿐만 아니라 운영, 유지, 보수에도 많은 비용이 지속적으로 발생하는 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 기술이 '분산형 물순환 시스

템'이다. 이번에 소개되는 분산형 물순환 시스템은 하수가 발생하는 지점에서 바로 처리해 처리된 물을 바로 재이용하는 기술이다. 예를 들면 아파트 단지 규모의 하수 및 음식물쓰레기를 동시에 처리할 수 있는 분산형 시스템을 생각할 수 있다. 그렇다면 긴 연장의 하수관거 건설이 필요 없을 뿐만 아니라 관거시설의 유지관리에 필요한 비용도 절감할 수 있다. 또 하수의 재이용과 함께 질소, 인 등의 자원을 회수할 수도 있다.

그리고 안전한 사회를 위해서 중요한 것 중 하나가 각종 유해물질의 발생으로 야기될 수 있는 환경위험의 과학적인 관리다. 이를 위해 필요한 것이 대기환경 수준의 지속적인 개선과 더불어 화학물질 사고를 사전에 예방하고 환경오염 발생 시에 신속하고 적절히 대응할 수 있는 안전관리 체계 확립이다.

여기에 소개되는 '환경복지를 위한 미래 환경모니터링' 기술은 우리가 활동하는 모든 환경에 대한 오염 정도를 상시 측정해 오염사고를 예방하고 사고 시에 신속하게 대처하기 위한 것이다. 환경모니터링을 위해서는 오염물질을 정확하게 감지할 수 있는 환경센서 기술과 센서로부터 얻어지는 데이터를 취합하고 분석할 수 있는 기술 그리고 개별 센서를 연결하는 네트워크 기술이 확보돼야 한다. 이 때문에 정확도가 높고 경제적인 새로운 소형 환경센서, 광범위한 데이터를 얻기 위해 센서와 연결한 사물인터넷, 대기환경을 감시하기 위한 환경위성 등과 같은 첨단기술이 필요하다. 안전한 미래사회를 구현하기 위해 지금도 환경 과학자들을 주축으로 연구개발이 활발히 진행되고 있다.

이현주, 정광덕 | KIST 청정에너지연구센터

이산화탄소도 잘 모으면 자원





이산화탄소가 자원이 되는 마법

2015년 8월 3일 오바마 미국 대통령은 탄소배출을 더욱 줄이고 재생에너지 비중을 높이기 위한 '청정전력계획'을 발표했다. 이튿날인 4일에는 반기문 UN 사무총장과 회담을 가졌다. 지구온난화로 인해 세계적으로 집중 폭우, 가뭄, 예상치 못한 극한 추위 및 더위가 이어지자 주범으로 지목된 이산화탄소의 배출 줄이기에 미국이 본격적으로 나선 것이다. 오바마 대통령의 이런 행보는 미국뿐만 아니라 다른 나라들도 기후변화에 맞서도록 촉구하는 것으로 볼 수 있다.

2012년 우리나라의 이산화탄소 배출량은 6억 3000만 톤으로 세계 7위에 해당한다. 문제는 이산화탄소 배출량은 지속적으로 증가하고 그 순위 또한 높아지고 있는 실정이라는 것이다. 이에 정부는 2010년 온실가스종합정보센터를 설립하고 국내 온실가스와 관련된 정보를 공개하고 있다. 동시에 실질적으로 온실가스를 감축하고자 이산화탄소포집저장CCS 기술 개발 전문센터를 설립해 관련 기술 개발을 지속적으로 추진하고 있다. 이산화탄소 전환 및 이용기술은 이제 '선택'이 아닌 '필수'가 된 것이다.

우리나라에서는 미래창조과학부에서 지원하는 'Korea CCS 2020' 사업을 통해 60여 개의 CCS 원천기술 개발 연구 사업이 진행 중이다. 이를 통해 개발 중인 대

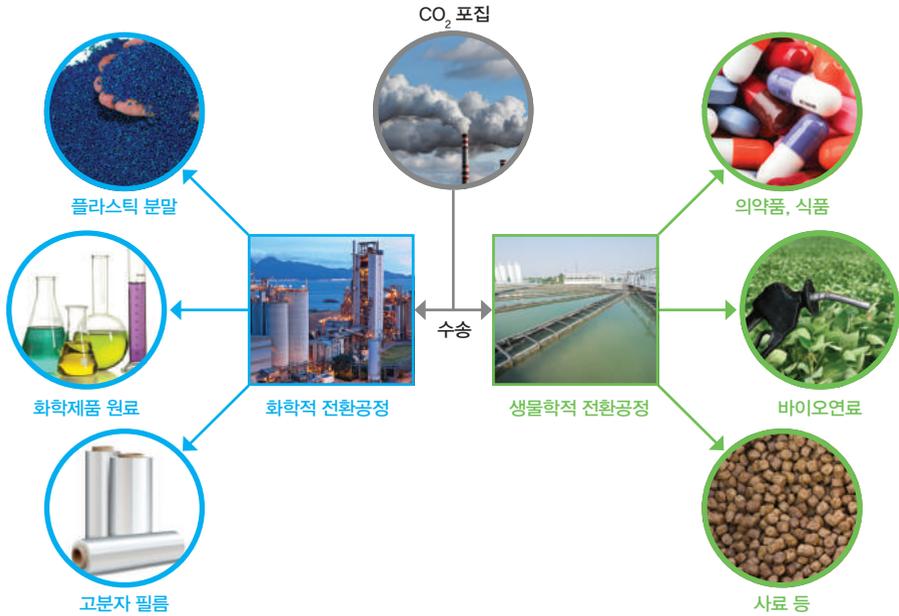
표적 이산화탄소 전환 및 이용기술에는 ‘무기탄산제조기술’, ‘친환경폴리카보네이트 제조기술’, ‘포름산 및 포름산 유도체 제조기술’, ‘합성가스 제조기술’ 등이 있다.

이산화탄소 전환기술의 비밀은 탄소에 있다. 모든 ‘탈 수 있는 것’에는 탄소가 포함되어 있다. 이 탄소화합물이 타면, 즉 공기 중의 산소와 결합하면 이산화탄소와 에너지가 생긴다. 여기서 생성되는 에너지는 타기 전 탄소화합물이 가지고 있던 에너지와 이산화탄소가 갖는 본연의 에너지와의 차이에 해당하는 만큼이다. 결국 이산화탄소는 탄소를 기반으로 하는 물질로부터 에너지를 만들 때 필수적으로 생성되는, 지구상에 존재하는 가장 안정한 물질 중 하나이다. 이러한 이산화탄소를 자원으로 바꾸려면 과연 어떻게 해야 할까?

가장 일반적으로 사용하는 방법은 안정한 이산화탄소를 바꿀 수 있을 정도로 높은 에너지를 갖는 물질과 반응시키는 것이다. 또 이산화탄소가 ‘산성’을 띠는 성질을 이용해 ‘염기’ 물질과 반응시키거나 미생물을 활용하는 방법도 있다. 살아 있는 생물들은 비록 그 속도가 화학공정에 비해 느리기는 하지만 열역학적으로, 그리고 화학적으로 매우 어려운 반응이 일어나게 할 수 있다. 이의 가장 대표적인 예가 광합성이다.

그러면 이산화탄소를 원료로 만들어져 사용되는 물질들에는 어떤 것이 있을까? 가장 많이 만들어지는 물질은 암모니아와 반응을 통해 만들어지는 요소우레아일 것이다. 비료 및 여러 화학원료로 사용되는 요소는 1900년대 프리츠 하버Fritz Haber에 의해 암모니아를 질소와 수소로부터 공업적으로 합성하는 방법이 개발된 후 매년 엄청난 양이 만들어졌다. 지구상의 인구가 현재의 상황에 이르도록 만든 1등 공신이라고 해도 과언이 아니다.

또 다른 물질은 에틸렌카보네이트ethylene carbonate와 디메틸카보네이트dimethyl carbonate라고 하는 유기카보네이트 물질이다. 이산화탄소를 이들 카보네이트계 유기화합물로 바꾸는 방법은 기존의 독성 포스젠을 대체한다는 관점에서 그 의의가



이산화탄소 포집해 활용하는 기술의 개요. 이산화탄소를 재활용해 나온 탄화수화물은 다양한 분야에 활용된다.

크다. 현재 유기카보네이트 화합물들은 리튬이차전지의 핵심 전해질 성분으로 사용되며, 폴리카보네이트 고분자 전구체로도 활용된다. 아스피린의 원료인 살리실산 역시 이산화탄소를 페놀과 반응시켜 만들어진다.

2000년대 초반 KIST 연구팀은 이산화탄소를 에틸렌카보네이트로 전환할 수 있는 고효율 촉매를 개발해 롯데케미칼에 기술이전을 완료했다. 그 후 전세계적으로 수많은 유사 반응 촉매가 보고되고 있지만 KIST가 개발한 촉매보다 뛰어나면서 실제 상업화 공정에 적용될 수 있는 물질의 개발은 알려지지 않은 상태다.

최근 국내 기업인 SK 이노베이션은 이산화탄소 기반 폴리머의 파일럿 제조 연구를 수행했다. 그린폴이라고 불리는 새로운 이산화탄소 폴리머는 기존 폴리카보네이트의 원료이자 환경호르몬 물질인 비스페놀A를 함유하지 않는다. 또한 생물

학적으로 분해되고 분해 부산물의 독성이 거의 없다는 장점도 있다. SK 이노베이션의 목표는 이산화탄소 폴리머의 물성 향상과 용도 개발을 통한 상업화다. SK 이노베이션 외에도 여러 국내외 기업들이 이산화탄소의 직접 전환을 통해 얻어지는 다양한 종류의 고분자 플라스틱에 대한 연구를 진행 중이다.

신·재생에너지로 이산화탄소 자원화를

태양광, 풍력, 수력 등 대부분의 신·재생에너지 자원과 원자력은 1차적으로 전기를 생산한다. 이러한 전기를 사용해 이산화탄소를 화학물질로 전환할 수 있다면 기존 석유화학 기반의 사회를 신·재생에너지와 이산화탄소의 반응시스템으로 전환하는 새로운 패러다임의 변화가 가능하다.

예를 들어 촉매 및 전기화학적 방법에 의해 이산화탄소로부터 개미산 HCO_2H 을 제조할 수 있다. 개미산은 여러 가지 화학원료이기도 하지만 특정 조건에서 수소 H_2 를 다시 발생할 수 있는 화합물이 된다. 즉 연료로 사용가능하다. 전기화학적으로 이산화탄소를 변환하면 개미산 외에도 일산화탄소, 메탄올 등의 합성도 가능하다. 이 화합물들은 현대 석유화학 기반 문명의 가장 바탕이 되는 화학물질들로 신·재생에너지로부터 생산된 전기를 이용한다면 기존의 상용화 공정보다 경제적인 공정을 구성할 수 있을 것이다.

더 나아가 전기를 생산하지 않고 태양광을 직접 활용해 이산화탄소로부터 화학 제품을 생산하는 광전기화학적 기술도 있다. 비록 쉽지 않은 것이 사실이지만, 기술만 개발된다면 이산화탄소로부터 새로운 화학제품을 생산하는 환경순환형 사회를 구현 가능하다. 이 기술은 태양광으로부터 전기를 생산하는 소재, 이산화탄소의 환원전극 및 물 산화전극 소재를 개발할 수 있다면 충분히 실현할 수 있다.

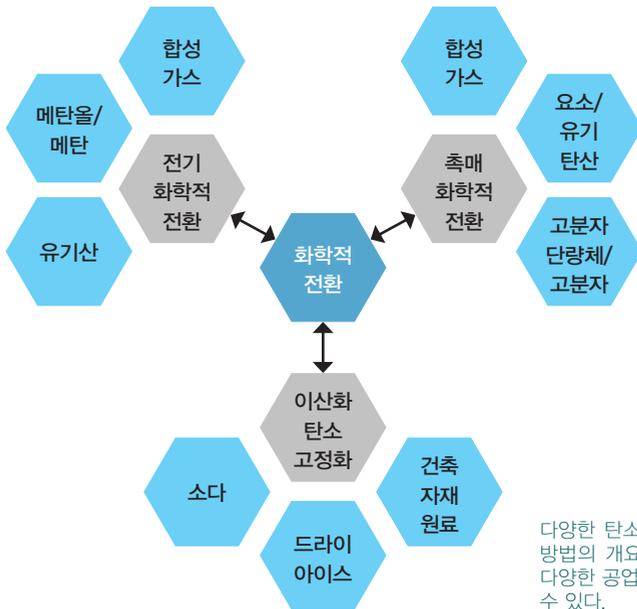
한편 이산화탄소를 대량으로 전환하거나 저장하는 기술로서 광물화반응을 들 수 있다. 이산화탄소는 물에 녹으면 약산성을 띠는 물질로 알칼리금속이나 알칼리토

금속과 만나면 열적, 화학적으로 안정된 금속카보네이트가 만들어진다. 이를 무기탄산화 기술 혹은 광물화 기술이라고 한다. 현재 발전소에서 대량으로 발생하는 이산화탄소를 바다속이나 땅속에 저장하는 기술은 이산화탄소에 의한 산성화 문제를 해결하지 못했다. 무기탄산화는 거의 중성상태의 물질이므로 이에 대한 해결책이 될 뿐만 아니라 생성물을 건축 재료로 사용할 수 있다는 점에서 매우 긍정적이다. 이산화탄소와 반응시키는 원료 물질로 광물과 직접 반응시키는 방법, 광물 중 알칼리금속 성분을 분리해 탄산화시키는 방법, 그리고 폐콘크리트, 발전소의 비산재, 스틸 슬래그 등을 이용하는 방법이 다각적으로 연구되고 있다.

경제성의 비결, 촉매

화학원료로 이산화탄소를 화학 자원으로 전환하는 기술의 가장 근본적인 문제는 반응에 필요한 에너지를 석유화학 기반에서 얻는 경우 원료로 사용되는 이산화탄소의 양보다 더 많은 이산화탄소가 발생한다는 점이다. 이러한 문제를 해결하기





다양한 탄소화합물을 화학적으로 전환하는 방법의 개요. 화학적 전환방법을 활용하면 다양한 공업에 이산화탄소를 원료로 투입할 수 있다.

위해서는 이산화탄소를 전환하는 데 사용하는 에너지원 자체를 신·재생에너지로 해야 한다. 아직은 신·재생에너지의 가격이 기존 화석연료 기반 에너지에 비해 높기 때문에 논란의 여지가 많은 상황이다. 그러나 더욱 우수한 촉매를 개발해 저에너지 공정 전환 기술을 개발함과 더불어 기존 포스젠과 같은 독성 원료를 이산화탄소로 대체함으로써 얻는 경제사회적 이득을 고려한다면 그리 비관적이지는 않다.

이산화탄소 자원화의 또 하나 이슈는 과연 '대기 중의 이산화탄소 농도를 낮출 수 있을 만큼 전환대상인 화합물의 양이 많은가' 하는 것이다. 매년 지구상에는 수십 억 톤의 이산화탄소가 발생하고 있지만 이 중 극소량만이 화학적으로 전환돼 사용되고 있는 실정이다. 이러한 관점에서 이산화탄소를 지구상에서 가장 많이 사용하고 있는 물질인 수송 연료 및 고분자로 바꾸는 연구가 가장 이상적이라고 할 수 있겠다.

자연에서도 이러한 과정을 관찰할 수 있다. 바로 광합성이다. 식물은 엽록체를

이용해 이산화탄소와 햇빛 그리고 물로부터 당과 같은 유기화합물을 만든다. 이 과정은 식물에 존재하는 여러 촉매계를 통해 매우 복잡하고 정교하게 일어나는데, 실제로 그 과정을 인공적으로 구현하는 것은 대단히 어렵다.

대신 과학기술자들은 그 과정을 단순화·직접화하여 이산화탄소를 매우 작은 분자로 전환한다. 이와 관련해 가장 핵심적인 역할을 하는 것이 바로 촉매다. 촉매는 안정된 이산화탄소를 활성화시켜 비교적 온화한 조건에서 다른 반응물과 반응을 유도하는 역할을 하는데, 열화학반응의 균일계 및 불균일계 촉매, 광전기화학반응의 전극, 생명체 혹은 이의 유사기구인 박테리아 및 효소 등이 모두 포함된다.

최근 일본의 아사히 화학(Asahi Chemical)에서는 이산화탄소를 메탄올과 직접 반응시켜 디메틸카보네이트를 제조하는 공정의 상업화를 진행하고 있다. 또 스탠퍼드대(Stanford University) 연구팀은 전기와 이산화탄소를 메탄으로 변환시킬 수 있는 독특한 특성을 지닌 메탄을 생성하는 미생물(methanogens)에 관한 반응 경로를 규명하기도 했다. 이 연구는 미생물을 통해 대기 중 이산화탄소와 태양광, 풍력과 같은 재생에너지를 이용해 고부가가치 화학물질을 생산하는 데 사용하는 생물 반응 장치(bioreactors)에 꼭 필요한 기술이다.

한편 최근 떠오르는 기술 중 하나로 꼽히는 것이 이산화탄소 무기탄산화를 통한

CO₂로부터 상업적으로 생산되는 화합물

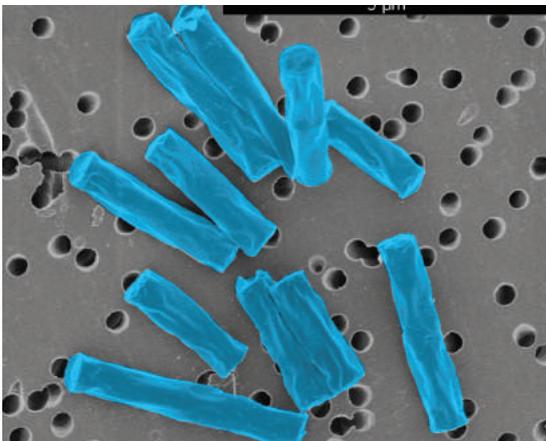
단위 : 톤/년

화합물	생산량
요소	157,000,000
살리실산	90,000
고리형 카보네이트	80,000
지방족 탄화수소	76,000
방향족 탄화수소	605,000
메탄올	4,000

건축 자재 제조 기술이다. 이 기술에서 가장 중요한 요소는 이산화탄소의 추출 및 정제에 필요한 산과 염기의 제조 가격이다. 현재 염화나트륨 NaCl 이 녹아 있는 바닷물을 전기분해해 수산화나트륨 NaOH , 염기과 염화수소 HCl , 산를 제조하고 있다. 이때 더 낮은 전기에너지를 활용해 분해반응을 일으킬 수 있는 전극 소재의 개발이 가장 관건이라 할 수 있다. 이를 위하여 산, 염기 수용액에서 안정적으로 작동하면서 저가인 금속 재료 및 소재를 개발하기 위한 연구가 활발하게 진행 중이다. 전극 개발 및 정제 기술이 확보되고, 현재 가동되고 있는 수산화나트륨 NaOH 전기분해 시설과 연계하면 이산화탄소 무기탄산화 공정을 실현할 수 있을 것으로 여겨진다.

상용화 연구 앞장서는 국내 기업들

2015년 12월 유엔기후협약 당사국총회COP21 195개 협약 당사국은 파리에서 열린 총회 본회의에서 2020년 이후 새로운 기후변화 체제를 수립하기 위한 최종 합의문을 채택했다. 금세기 말까지 지구상 '탄소 중립'을 목표로 한 파리협약은 국내 온실가스 정책에도 큰 변화를 몰고 올 것이다. 기존 감축 목표에 맞춰 짜인 온실가스 배출권 거래제도 역시 조정이 불가피할 것으로 예상된다. 이산화탄소의 저감이 단순



메탄올을 생성하는 것으로 알려진 메탄생성균(Methanosaela) 속의 박테리아.
© Dale Callahan and Amelia-Elena Rolaru

히 환경론자나 연구자의 관심사에 그치지 않고 국가, 기업을 비롯해 전 세계인들에게 초미의 관심사로 대두된 것이다. 결과적으로 이러한 급박한 움직임은 이산화탄소를 감축하는 방법뿐만 아니라 이산화탄소를 활용하는 분야까지 영향을 미칠 것으로 보인다.

이에 우리나라 많은 기업들이 관련 연구에 매진하고 있다. 최근 한국전력연구원과 동서발전은 화력발전소에서 배출되는 이산화탄소를 소금물 전기분해산물인 수산화나트륨과 반응시켜 중탄산나트륨, 수소, 염소를 동시에 생산하는 기술을 개발하고, 연간 2,500톤 규모의 실증플랜트 구축 과제를 추진 중이다.

한편 현재 이산화탄소 자원화 기술 중 가장 유망한 것으로 꼽히는 ‘이산화탄소 기반 고분자’ 개발과 관련해 다수의 연구자를 비롯한 화학기업 및 고분자 기업이 관심을 갖고 연구 개발을 진행 중이다. 이는 이산화탄소 기반 고분자의 환경적 부담이 타 석유계 고분자에 비해 현저하게 낮은 동시에 기업의 친환경이미지에 크게 기여하기 때문이다. 따라서 가까운 시일 내에 제품화된 이산화탄소 기반 고분자 물질을 시장에서 볼 수 있을 것이다.

LG화학은 지난 2009년부터 이산화탄소로 고분자 물질을 만드는 기술 개발을 추진, 현재 상용화를 눈앞에 두고 있다. 롯데케미칼 역시 이산화탄소 기반의 생분해성 고분자 제조 관련 기술을 대학으로부터 이전받아 그 상용화 연구를 수행하고 있다. 이 기술로 생산되는 고분자 물질은 생분해성 플라스틱, 포장재 소재, 필름, 의료소재 등 다양한 분야에 적용될 수 있어 국내 기업의 세계 시장 지배력이 확대될 것으로 전망된다.

우리나라의 이산화탄소 기반 고분자 제조기술은 이미 기술적으로 90% 정도 완성된 상태다. 그러나 현재 우리 생활에서 사용되고 있는 석유화학 기반 고분자 물질과 상이해 직접 대체하기는 어려운 상황이다. 이산화탄소 기반 고분자의 복합화 및 공중합체 개발을 통해 직접 기존 고분자를 대체하거나 이산화탄소 고분자 고유

의 특성을 활용할 수 있는 신규 시장이 형성돼야 한다.

한편 이산화탄소 기반 고분자가 생분해성 친환경 소재인 만큼 국내외 관련 기술의 개발은 이산화탄소 저감과 맞물려 더욱 치열해질 것으로 예상된다. 플라스틱 폐기물 등의 환경문제에 직면해 최근 유럽연합과 미국 등에서는 분해성 수지 사용 의무화를 비롯한 비분해성 플라스틱 사용 규제를 강화하는 가운데, 2024년 중국 등에서는 대규모 생분해성 고분자 생산시설 구축이 예정돼 있어 전 세계적으로 생분해성 고분자를 생산하기 위한 준비가 진행 중이다.

이에 대해 시장조사업체 글로벌 인더스트리 애널리스트Global Industry Analyst는 2016년 세계 바이오고분자 시장을 82만 5,000톤 규모, 금액으로는 약 29억 달러³조 2000

조지아공대 연구팀은 최근 대기 중에서 이산화탄소를 직접 포집하는 방법을 개발해냈다. 별도의 포집 패드에 이산화탄소가 포함된 공기를 통과시키는 이전의 방법에 비해 폭넓은 곳에 포집장치를 적용할 수 있을 것으로 기대된다. 사진은 포집량을 측정하는 연구진. © Gary Meek





독일에서 출시된 생분해성 비닐봉투 제품. 최근 생분해성 고분자 제품 사용을 의무화하는 경향이 강해지면서 관련 산업 성장이 기대되고 있다. 탄소 포집 기술 역시 마찬가지다. © ABW

억 원으로 예상한 바 있다. 최근 전 세계적 움직임을 고려할 때 세계 바이오고분자 시장은 더욱 확대될 것이다. 2020년 기준으로 자원화에 필요한 이산화탄소 양은 연간 2000만 톤에 이르는데, 이를 제품가격으로 환산하면 10배 이상의 시장 규모가 형성될 것으로 예상된다.

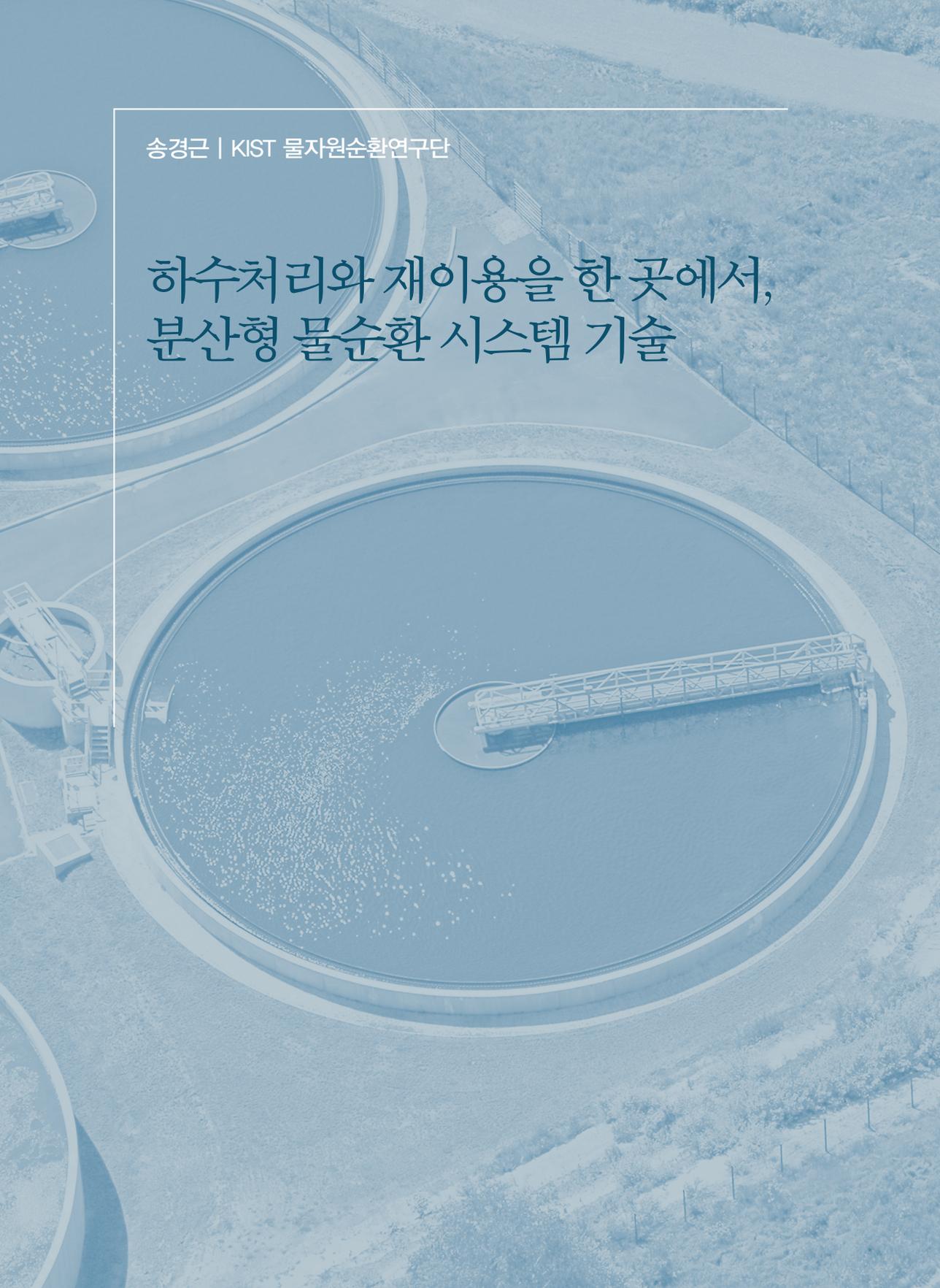
참고문헌



- P. Brinckerhoff | Accelerating the uptake of CCS: industrial use of captured carbon dioxide | Global CCS Institute | 2011
- P. Styring et al. | Carbon dioxide utilization: closing the carbon cycle | Elsevier | 2015
- 한국과학기술정보연구원 | 이산화탄소 포집, 저장, 전환 시장 분석 | 2014
- 정광덕 외 | 전기화학적 이산화탄소 전환기술 | Nice | 2013

송경근 | KIST 물자원순환연구단

하수처리와 재이용을 한 곳에서, 분산형 물순환 시스템 기술





하수처리장이 아파트 단지로 들어오다

최근 새로 지어진 아파트로 이사를 왔다. 이 아파트는 분양시장에서 최고의 인기를 누리던 아파트다. 인기의 비결은 아파트 단지 내에 설치된 분산형 물순환 시스템. 분산형 물순환 시스템은 아파트 단지 내에서 나오는 하수와 음식물 폐기물을 처리해 순환시키는 기술이다. 깨끗하게 정화된 물은 아파트 단지 내 각 가정에 공급돼 화장실 세척수나 분수대에 필요한 조정용수로 재이용되고 남은 물들은 단지 옆 소하천으로 흘러들어 일 년 내내 깨끗하고 풍부한 물이 흐르게 만들어 준다. 아파트 단지 옆 소하천은 얼마 전까지도 물이 흐르지 않아 주민들이 접근하지 않던 하천이었다. 분산형 물순환 시스템이 확립된 이후에는 물고기가 헤엄치고 물새들도 날아와 한가로이 노니는 하천으로 탈바꿈해 인근 주민들로부터 큰 사랑을 받고 있다.

이 아파트의 장점은 이뿐만이 아니다. 이사온 후 전기료와 도시가스 사용료를 거의 내지 않고 있다. 분산형 물순환 시스템에서 하수와 음식물 폐기물을 처리하며 나오는 바이오가스를 이용해 아파트 단지 내에서 필요로 하는 도시가스로 공급하고 있기 때문이다. 남은 바이오가스로는 전기를 생산해 단지 내에 공급하고 있기도 하다. 오늘 저녁뉴스에서는 분산형 물순환 시스템을 갖춘 아파트 단지의 개발로 기능을 상실한 한 하수처리장이 공원으로 탈바꿈해 주민들에게 개방됐다는 보



현재 사용 중인 대규모 하수처리 시스템. 넓은 지역의 하수를 대규모로 정화하는 방식이다.

도가 나왔다.

미생물 이용한 하수처리시설의 등장

인류가 도시를 형성하기 시작한 이래 하수의 배제와 처리는 매우 중요한 문제가 됐다. 이미 기원전 6,000년에 배수시설의 흔적이 인도에서 발견됐고, 기원전 500년 로마시대에는 대규모의 하수관이 존재했다. 물론 오늘날과 같은 개념의 하수처리 시설이 있었던 것은 아니고 단순히 하수관을 통해 하수가 직접 강이나 바다로 유입 되는 정도였다.

현대적 개념의 하수관망은 1830년대 런던에서 발생한 콜레라를 계기로 건설됐다. 이후 도시하수관망은 함부르크, 파리, 베를린 등 유럽 도시들을 중심으로 퍼져나갔다. 이 시대의 하수처리시설은 하수가 직접 강으로 유입되거나 혹은 하수를 약간 경사진 지표 위를 흐르게 한 것이다. 오염물질이 땅속으로 스미게 하거나 일부 썩게 하는 효과를 기대할 수 있었지만 결과적으로 지하수를 오염시키거나 냄새가 나는 위생 문제가 발생했다.



가장 기본적인 하수처리는 미생물이 공기를 이용하여 유기물을 분해하는 것이다. 사진에서 하수처리과정 중 미생물이 하수를 처리할 수 있도록 공기를 넣어주는 것을 볼 수 있다.

오늘날과 같은 개념의 하수처리시설이 등장한 것은 20세기에 들어서였다. 1914년 영국인 아덴Edward Ardern과 로켓William T. Lockett은 영국 특허청에서 최초의 하수처리 특허를 얻었다. 하수에 연속적으로 공기를 불어 넣어주어 미생물오니이 하수에 생겨나게 하고 이 오니를 처리과정에 재순환시키는 것이 특허의 요지인데, 오늘날 ‘활성오니공법에 의한 하수처리공법’의 효시라 할 수 있다. 이 공법은 10여 년의 세월이 지난 후에야 비로소 실용화됐다. 독일 하수처리의 아버지라 할 수 있는 임호프Karl Imhoff 교수에 의해 독일 에센Essen 지역에 최초의 활성오니공법을 이용한 하수처리장이 건설된 것이다. 그 후 같은 종류의 하수처리장이 각 도시와 마을에 빠른 속도로 건설됐으며 오늘날까지 이어지고 있다.

대규모 하수처리방식의 문제와 대안

지금까지의 하수처리 방식은 하수를 도시 지하에 거미줄처럼 연결된 하수관거를 통해 대규모 하수처리장으로 이송해 처리하는 중앙집중식 대규모 하수처리방식이였다. 이는 초기의 막대한 시설투자와 함께 운영, 유지, 보수에 많은 비용이 지

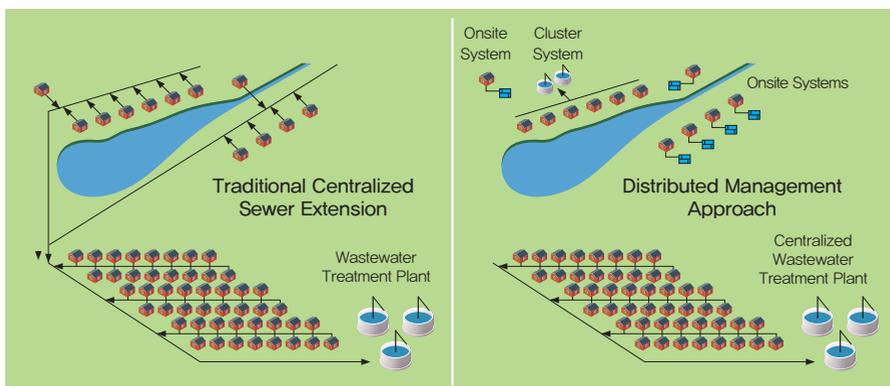
속적으로 발생하는 단점이 있다. 또한 하수관거의 부식이나 파손은 비용 측면에서 뿐만 아니라 최근 빈발하고 있는 싱크홀과 같은 안전상의 문제도 야기하고 있다. 특히 상류지역에서 발생하는 하수를 모아 하류지역에서 처리해 방류하는 중앙집중식 대규모 하수처리방식은 상류하천을 건전화시키는 문제도 발생시켰다.

이뿐만이 아니다. 처리된 물을 재이용하기 위해서는 별도의 관로를 설치해 재이용수가 필요한 상류지역으로 재이송해야 하는 문제점도 있었다.

이에 따라 중앙집중식 대규모 하수처리방식의 문제점을 해결하는 대안으로서 조명받는 기술이 분산형 물순환 시스템이다. 분산형 물순환 시스템은 하수가 발생하는 지점에서 소규모로 처리해 처리된 물을 발생원에서 바로 재이용하는 기술을 의미한다. 이는 대규모의 하수관거의 건설이 필요 없어 하수관거 건설 및 유지관리에 필요한 비용을 절감할 수 있다. 하수의 재이용과 함께 에너지 및 유용자원의 회수도 고려할 수 있다는 장점도 가지고 있다.

하수는 수자원인 동시에 에너지원

분산형 물순환 시스템은 1995년 미국의 엔지니어인 초바노글로스George Tchobanoglous



중앙집중형(왼쪽)과 분산형 하수처리의 개념 비교

가 처음 적용한 개념이다. 초바노글로스는 오염원의 발생지점이 개개인의 가정이든, 군락이든, 지역사회이든, 산업단지든 상관없이 하수의 채집, 처리, 재이용 등 일련의 하수 처리 순환과정을 분산형 물순환 시스템으로 정의했다. 이후 2008년에는 자이니 우장Zaini Ujang이 하수처리에 있어서 대규모 중앙집중형 시스템과 소규모 분산형 시스템을 개념적으로 분석·비교하는 도식도를 이용해 배출구end-of-pipe 개념과 지속가능 위생설비sustainable sanitation 개념으로 표현했다.

최근에는 하수가 수자원 및 에너지원으로 인식됨으로써 하수처리과정에서 에너지와 질소, 인과 같은 유용자원의 회수를 고려하는 개념으로도 확장되고 있다. 스위스, 스웨덴, 독일 등 환경선진국에서는 하수를 발생원에서 특성에 따라 분리 배출해 처리하는 방안도 시도하고 있다.

하수는 오염물질 함유 정도에 따라 오수black water, 생활배수grey water, 소변기배수yellow water로 구분할 수 있다. 세탁 및 목욕물은 생활배수로서 도시 하수에서 가장 큰 부피를 차지하지만 오염도는 낮으므로 간단한 처리 후 비음용수로 재이용이 가능하다. 처리에 필요한 에너지도 작고, 온도도 높은 편이므로 열교환기나 히트 펌프로 에너지 회수도 가능하다.

설거지 물이나 화장실에서 사용한 물은 소위 오수로서 양은 작지만 유기물 농도는 높으므로 에너지 생산혐기소화 등에 유리하다. 소변은 소변기배수로서 하수의 1% 부피기준에 불과하지만 하수에 함유된 질소의 87%, 하수에 함유된 인의 50%가 소변에서 기인하므로 소변을 분리해 처리하면 스트루바이트struvite, 인산칼슘calcium phosphate 등의 형태로 질소와 인을 회수하기 용이하다. 이에 자원회수와 하수처리의 단순화 및 경량화가 동시에 가능해진다는 장점이 있다.

분산형 물순환 시스템을 도입하기 위해 필요한 것이 처리시스템의 소형화와 처리수질의 고도화다. 멤브레인 기술은 이런 면에서 분산형 물순환 시스템에 중요한 기술로 고려되고 있다. 특히 분리막 생물반응조MBR 기술은 처리장치가 크지 않고 처

리수질도 매우 우수해 국내에서도 소규모 마을하수도 기술로 적용된 경우가 있다.

그러나 MBR 기술은 에너지소모가 크다는 단점이 있다. 그렇기 때문에 이에 대한 대안기술로서 혐기성 MBR 기술이 KIST를 비롯해 전 세계적으로 활발하게 연구되고 있다. 혐기성 MBR 기술은 산소공급이 필요 없어 에너지 소모가 적고 유기물을 바이오가스로 전환해 에너지 생산이 가능하다는 점에서 큰 장점을 갖고 있다.

혐기성 MBR 기술 역시 파울링의 억제, 질소와 인의 처리처럼 해결이 필요한 문제가 있지만 기술발전이 진행되고 있어 머지않아 분산형 물순환 시스템 기술로서 적용이 기대된다. 이 외에도 새로운 멤브레인 기술로서 정삼투FO, 막증류MD 등의 고도의 수질을 얻을 수 있는 신기술 등이 선보이고 있다.

하수 중 유용자원인 질소, 인의 회수 관련해서도 많은 기술이 연구되고 있다. 현재 스트루바이트, 수산화인회석hydroxyapatite 등으로의 결정화, 미세조류 또는 아나목스균을 이용한 생물학적 처리 그리고 나노소재 기반의 흡착제 등을 이용한 질소, 인의 회수기술 등이 있다.



분리막 생물반응조 설치 모습. 비교적 좁은 공간에서도 고효율 하수 처리가 가능해 지역 단위의 소규모 하수처리 시스템에 주로 활용된다. © LEOPOLD

컴팩트화, 시스템화, 경제성 해결이 숙제

KIST는 2014년부터 본격적으로 분산형 물순환 시스템 기술의 연구에 나서고 있다. 새로운 막분리 기술을 이용해 하수를 상수에 근접한 수질로 처리해 재이용하고 처리과정에서 생성되는 농축하수는 혐기성미생물을 이용해 유기물을 바이오가스로 전환하는 기술이다. 바이오 가스는 회수해 에너지원으로 사용 가능하며 하수 중의 질소와 인은 회수해 비료 등으로 사용할 수 있다. 이는 소규모 아파트 단지 등에 적용 가능한 기술로서 새로운 개념의 분산형 물순환 시스템 기술을 확보할 것으로 기대되고 있다.

그런데 이런 분산형 물순환 시스템 기술을 실제로 적용하기 위해서는 아직 해결해야 할 난관이 많다. 일단 하수 중에 포함된 다양한 오염물질들을 처리하고 요구되는 수질을 확보해야하기 때문에 하나의 처리기술로는 도입이 쉽지 않다. 이 때문에 다양한 요소기술들을 융합하는 한편, 이를 하나의 시스템으로 관리할 수 있는 시스템 기술도 확보해야 한다.

소규모화도 매우 중요한 고려사항이다. 건물 내 혹은 아파트단지와 같이 제한된 장소에 설치해야 하기 때문에 소형화된 구성이 가능해야 한다. 이러한 점에서 멤브레인을 이용한 처리기술이 중요한 역할을 할 것으로 판단된다.

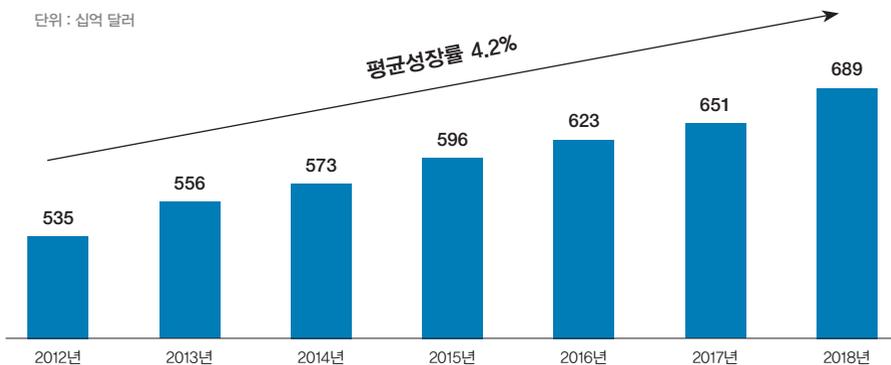
경제성도 중요한 문제다. 기존 대규모 중앙집중형 하수처리 시스템은 분산형 물순환 시스템에 비해 처리단가가 낮을 것으로 예상된다. 따라서 분산형 물순환 시스템은 경제적인 측면에서 경쟁력이 낮기 때문에 도입하기 수월하지 않을 수 있다. 이러한 경제성의 극복과 도입의 타당성을 확보하기 위해서는 에너지 생산과 유용자원의 회수를 연계한 접근이 필요하다. 이러한 점에서 하수의 농축과 음식물 폐기물의 혼합처리를 통한 바이오가스의 생산증대는 경제성 확보에 중요한 전략이 될 수 있다. 동시에 질소, 인의 회수도 도입의 타당성을 확보하는 데 중요하게 고려할 사항이다.

미래 하수도 시스템은 지속가능성이 필수

2013년 세계 물시장 규모는 5560억 달러로 추정되며, 2018년에는 6890억 달러로 연 평균 4.2% 성장할 전망이다. 이러한 증가세는 중국, 인도 등 신흥공업국과 개발도상국의 경제성장 및 소득수준 향상에 따른 물수요 증가 때문이다. 이런 신흥공업국 및 개발도상국은 상하수도의 보급율이 낮고 국토면적에 비해 인구가 분산돼 있어 대규모 중앙집중식 처리시설에 비해 분산형 시스템이 좀 더 경제적인 접근법이 될 수 있다. 또한 중앙집중식 처리시설은 대규모의 투자가 필요하지만 재정여건상 쉽지 않은 점도 소규모 투자로 가능한 분산형 물순환 시스템의 도입을 확대하는데 긍정적인 면이다.

환경선진국의 경우 이미 1990년대부터 물, 에너지, 자원회수 개념의 분산형 하수처리 및 재이용 기술에 대한 연구를 진행해 이를 적용하기 위한 전략을 확보하고 있다. 또한 하수처리시설에서의 바이오가스 생산과 관련한 상용화 기술은 상당한 수준에 이르고 있어 이를 따라잡기 위한 지속적인 노력이 필요하다.

우리나라의 경우 이미 하수도 보급률이 90%를 넘어서고 있어 전통적인 개념의 하수도 시스템은 거의 완성단계에 도달하고 있다고 볼 수 있다. 그러나 미래의 하



세계 물시장 규모 및 전망 (자료제공: 글로벌웹인덱스(Globalwebindex))

수도에는 하수의 재이용, 에너지 자립을 향상과 같이 지속가능성이 필수적인 부분으로 자리잡을 것으로 보인다. 이에 분산형 물순환 시스템의 확장은 더욱 더 탄력을 받을 것으로 기대된다.

세계적인 기후변화와 물부족 문제에 대비하기 위해 환경부는 2011년 물 재이용 기본계획을 수립해, 국가 차원의 물재이용 촉진 및 지속가능한 물순환체계를 구축하기 위한 정책적 목표를 설정하고 지원체계를 마련했다. 정부는 또한 하수처리장의 에너지를 자립화하기 위해 2010년 하수처리시설 에너지자립화기본계획을 마련하고 전국적으로 시범사업형태의 친환경에너지타운 계획을 수립했다. 이렇게 하수처리장의 에너지 생산을 독려하는 정책의 추진은 향후 하수의 재이용 및 에너지 생산을 연계한 분산형 물순환 시스템 기술 개발에 활기를 불어넣을 것으로 전망된다.

참고문헌

- 장덕진 | “지속 가능성 측면에서 바라본 우리나라 하수도”, 『첨단환경』 | 2013
- 미래사회 대응 친환경 공정기술 개발 | 한국환경산업기술진흥원 | 2012
- G. Tchobanoglous et al. | “Decentralized wastewater management: challenges and opportunities for the twenty-first century”, *Water Science and Technology: Water Supply* | 2004
- M. A. Massoud et al. | “Decentralized approaches to wastewater treatment and management: Applicability in developing countries”, *Journal of Environmental Management* | 2009
- 국내물산업의 해외진출 전략 | 한국수출입은행 | 2014



김병찬, 김진영 | KIST 환경복지연구단

안전한 삶을 지켜주는 환경모니터링 기술





센서와 네트워크로 내 주변 환경을 관리한다

출근 전 아침 뉴스에서 오늘 하루 미세먼지 농도가 심각하게 높다고 한다. 외부활동을 많이 하는 사람은 반드시 마스크를 챙기고 노약자나 어린이는 외출을 절대 삼가라는 경고도 나온다. 과연 창밖을 내다보니 많이 보이지 않을 정도로 뿌연다. 평소 창밖으로 보이던 산이 오늘은 형태조차 보이지 않는다. 바깥은 이런데 집 안의 먼지 농도도 높은 건 아닌지 불안하다. 방에서 아직 잠들어 있는 아내와 아기는 안전하지, 근처에 살고 계시는 부모님도 무탈하신지 괜한 걱정도 든다.

하지만 걱정도 잠시, 집 안 실내 오염도를 알려주는 스크린에서 실내 공기가 깨끗하다고 안내하는 녹색 창이 뜬다. 미세먼지, 부유세균, 휘발성 화학물질, 이산화탄소 농도 등이 일목요연하게 정확한 수치로 표시된다. 모두 전혀 걱정할 필요 없이 깨끗하다고 알려준다. 다른 아이콘을 터치하니 부모님댁의 실내 공기 항목도 정확하게 표시된다. 모두 실내 오염을 실시간으로 측정할 수 있는 각종 센서와 사물 인터넷으로 연결돼 있는 실내 환경모니터링 네트워크 시스템 덕분이다.

출근하기 위해 차에 앉으니 지능형 네비게이션이 작동한다. 사고 및 차량 정체에 대한 정보는 물론이고 내가 있는 주변 지역의 대기오염 정보가 상세히 표시되면서 공원 둘레를 따라 약간 돌아서 가는 길을 추천한다. 도심 곳곳에 설치된 환경 센



환경 네비게이션(Environmental Navigation) 시스템 개념도

서를 통해 수집되는 환경모니터링 빅 데이터가 네트워크를 통해 실시간으로 전송되면서 환경 오염도가 높은 지역을 스스로 판단해 피해갈 수 있는 환경 네비게이션 environmental navigation 시스템이다.

센서와 네트워크로 내 주변 환경을 관리한다

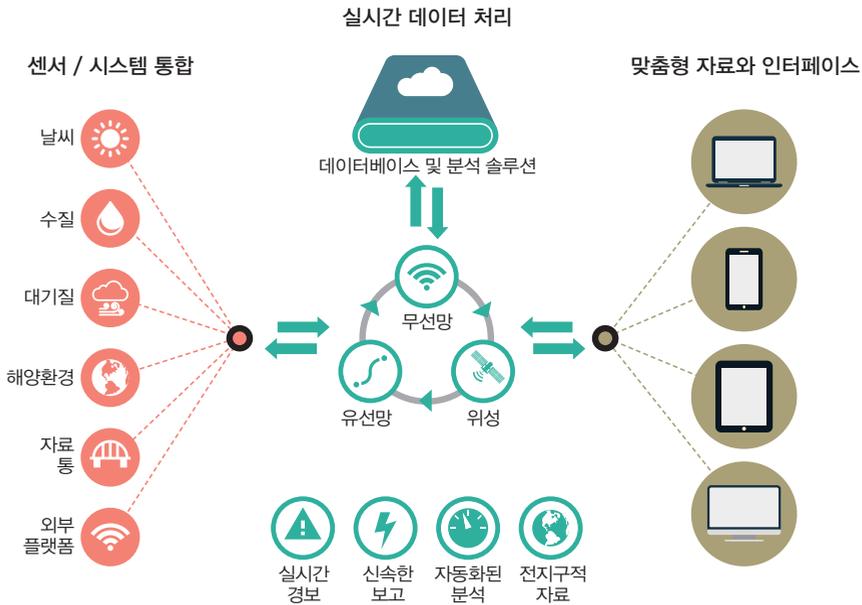
미세먼지가 연일 기승을 부리고 있다. 중국발 오염 때문인지 도시화에 따른 국지적 오염 때문인지는 논쟁이 분분하지만 결과적으로 발생한 미세먼지의 최종 피해자는 이 한반도에 살고 있는 우리 국민이다. 지속적인 산업화로 인한 환경오염 문



2014년 4월 4일, 울산 석유 유출사고 현장. 구미 불산 유출사고를 계기로 환경 방재 노력을 지속한 결과 사고 규모에 비해 인명피해 없이 대처할 수 있었다. 환경모니터링 기술은 이러한 재난의 초동 대응에 매우 중요하다. © 문화체육관광부

제는 항상 우리 곁에 머물러 있고, 잊을 만하면 어김없이 나타난다. 그러나 국민 대다수는 큰 오염 사고가 한 번씩 날 때 빼고는 크게 인식하지 못하며 사는 것이 현실이다. 큰 환경 오염사고는 그 피해만큼 충격도 커서 경각심을 가질 수 있지만 우리가 매일 숨쉬고 마시는 공기와 물의 오염은 오랜 시간 지속적으로 피해를 축적시키는데도 그 위험성을 실감하지 못한다. 개인의 삶의 영역에 대한 환경오염 모니터링이 절실히 필요한 이유다.

정부의 새로운 복지 화두가 환경복지인 이유도 바로 이 때문이다. 환경복지는 곧 국민 전체의 건강과 직결되는 문제이며, 누구에게나 안심하고 깨끗한 환경을 제공함으로써 삶의 질을 높이겠다는 문제의식에 바탕을 둔 것이다. 일례로 2차 수도권



환경모니터링 기술 개요도.

대기환경관리 기본계획의 비전은 '맑은 공기로 건강한 100세 시대 구현'이다. 안전하고 깨끗한 환경을 제공하기 위해서는 오염된 환경을 처리하기 이전에 현재 환경 상태를 정확하게 진단하고 모니터링하는 일이 반드시 선행되어야 한다. 대규모 화학 물질 사고에서 경험했듯이 환경오염 사고는 항상 '소 잃고 외양간 고치기'가 되기 쉽다.

환경모니터링 기술은 실내외 할 것 없이 실시간으로 측정된 정보를 기반으로 이를 분석해 관리 지시를 내리는 것을 목표로 한다. 이를 위해 필요한 것이 측정 대상을 정확하게 감지할 수 있는 환경센서 기술, 센서로부터 얻어지는 데이터를 취합하고 분석할 수 있는 기술, 그리고 개별 센서를 연결하는 네트워크 기술이다.

환경센서를 기반으로 한 환경모니터링 기술이 가정, 학교, 보건소, 병원, 작업

장, 도로, 인도, 공공시설 등 우리 생활환경에 보급되기 위해서는 몇 가지 선결 과제가 있다. 환경센서의 크기가 작아야 하고, 가격이 저렴해야 하며, 정확도가 높아야 한다. 또한 데이터를 원활하게 취득하기 위해 사물인터넷 기술과 같은 IT와의 융합이 필수적이다. 불특정 다수의 오염원을 현장에서 정확하게 지속적으로 모니터링 할 수 있는 센서를 확보하고 관련 네트워크 기술을 융합해야 앞서 언급한 미래상을 실현할 수 있을 것이다.

하나의 센서로 모든 오염물질 탐지

환경모니터링 기술은 물리적, 화학적, 생물학적 기술을 기반으로 하는 센서 및 측정장치 기술과 IT가 융합된 복합기술이다. 실질적으로 생활 곳곳에서 활용되기 위해 센서 개념의 소형화 기술을 개발해 확보할 필요가 있다.

각종 오염 대상을 정확하게 측정할 수 있는 센서 기술은 환경모니터링 기술의 핵심이다. 고전적 의미의 센서는 특정물질을 감지하는 수준에 그친다. 하지만 미래의 센서 기술은 감지 신호를 정확하게 중앙에 전달해 정확한 판단을 내릴 수 있도록 정보를 제공하는 노드의 역할도 수행한다.

우리 주변에는 이미 수질 원격감시 체계나 대기 오염 감시 체계 등이 구축돼 활용 중이다. 도로변에 놓인 미세먼지 농도, 대기 오염 농도 전광판이 대표적이다. 수질, 대기 환경모니터링 측정 장치들은 우리가 잘 인식하지 못하는 도처에 설치돼 있고, 여기서 얻어지는 데이터들은 중앙으로 수집돼 다시 일반 시민들에게 공지되고 있다.

그럼에도 불구하고 아직 우리 주변에서 직접 느낄 수 있는 환경모니터링 기술 서비스는 요원해 보이는 것이 사실이다. 그러나 환경모니터링 기술의 필요성은 점점 부각되고 있고, 기술 개발에 대한 노력이 차근차근 진행되고 있어 조만간 환경모니터링을 실생활에서 경험할 수 있을 것으로 보인다.

대중화를 위해 풀어야 할 숙제들

그러나 아직은 많은 분발이 필요하다. 가장 시급한 것은 더 작고 관리하기 용이한 센서다. 미치오 카쿠(Michio Kaku) 뉴욕시립대(The City University of New York) 교수는 그의 저서 '미래의 물리학'에서 대부분 기술의 단계는 나름대로 진화법칙을 따라 크게 4 단계를 겪는다고 설명했다. 1단계는 제품의 가치가 워낙 높아 관련 기술을 보호하는 단계, 2단계는 보편적으로 그 기술을 많은 사람들이 알게 돼 누구나 가질 수 있는 단계, 3단계는 종이 한 장의 가격처럼 푼돈으로 소유할 수 있는 단계, 마지막은 너무 흔해서 그 존재조차 인식하지 못하는 단계다. 환경모니터링 센서 기술은 아직 1단계와 2단계의 중간 정도로 판단된다. 실외 모니터링을 위한 다양한 센서 기술은 확보돼 있으나 아직 보편적으로 누구나 사용할 수 있는 여건은 아니다. 일부 이산화탄소 센서나 고급형 가스 센서만 해도 설치비용과 같은 제반 부대비용을 고려하면 아직 누구나 소유할 수 있는 수준은 아니다.

앞으로 문제가 될 수 있는 다양한 오염 물질에 대한 확장성도 고려해야 한다. 화학물질의 사용량이 많아지면서 기존에는 관심조차 없었거나 위험하지 않다고 알려진 물질들에 대한 측정과 진단이 중요해지고 있다. 대표적인 사례가 심각한 물의를 빚은 바 있었던 가습기 살균제다. 가정에서 흔히 사용하는 화학물질에도 위험요소가 도사릴 수 있을뿐 아니라 이러한 화학물질이 점점 더 다양해지는 것이다. 따라서 다양한 센서를 지속적으로 개발해야 하며, 이런 물질들을 정확하게 진단하고 모니터링하려면 새로운 센서 원리와 개발 기술이 필요하다. 측정하고자 하는 물질에 따라 아직까지 센서가 확보되지 않은 대상 물질들도 많다.

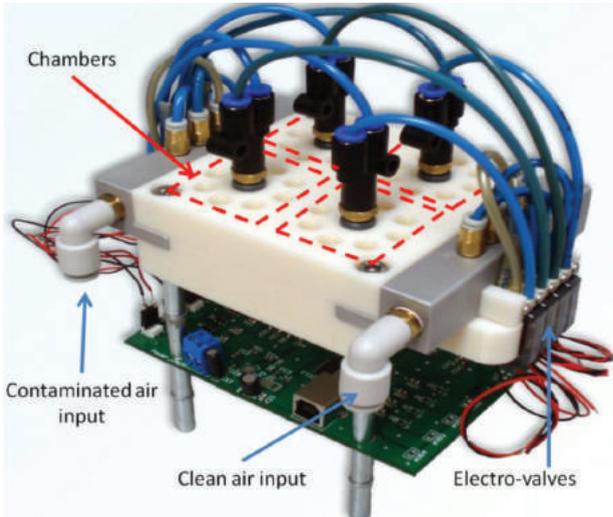
각 센서 간 측정 원리가 일치하지 않은 점도 풀어야 할 숙제다. 현재 우리나라 실내 대기환경 기준은 미세먼지, 총부유세균, 이산화탄소, 일산화탄소, 이산화질소, 석면, 오존 등 몇몇 항목에 대한 규정을 두고 있다. 문제는 이들을 측정하는 센서에 다양한 물리적, 화학적, 생물학적 방법이 이용되고 있고 대상 물질에 따라 대상



최근의 센서 기술은 네트워크 노드를 겸하도록 진화하고 있다. 사진의 공장용 센서는 컨베이어벨트에서 물품간의 거리를 측정하는 데 사용되며, 측정 정보를 제어시스템에 보내 컨베이어 벨트의 속도를 조절한다.

물질에 대해 가스의 흡탈착 정도를 전기적 신호에 의해 구분하는 방식, 대상 물질의 존재 정도를 빛이 흡수하는 변화를 측정하는 광학적 방식 등으로 측정 원리가 다르다는 점이다.

현재 많은 연구자들이 다양한 대상 물질들을 하나의 유닛 안에서 모두 측정할 수 있는 기술을 연구하고 있다. 이를 위해 각각의 센서 원리를 통합하거나 서로 다른 센서들을 나노기술 및 미세전자제어기술MEMS을 활용해 소형화하고 통합시키려 한다. 또한 실내외 오염원에 대한 다수의 센서를 조합하고 배열array해 감지 신호를



스페인 말라가대 연구팀이 2011년 개발한 전자코 모듈. 여러 센서를 한데 묶어 감각기관을 흉내내는 연구는 상당한 수준으로 진척됐다.
© Javier Gonzalez-Jimenez et al. / Sencors

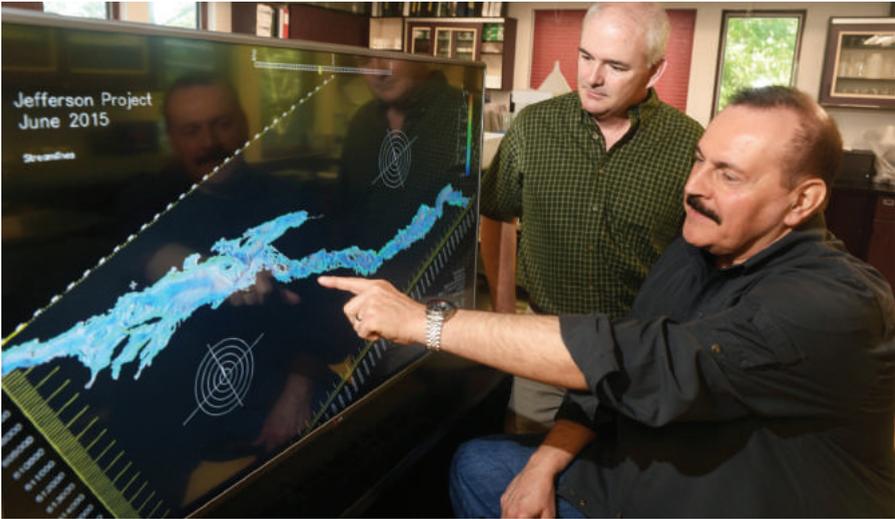
확인하고, 각 센서에서 나오는 신호의 패턴을 인식해 오염원을 분석하는 전자코 *electronics nose* 연구도 활발하게 진행 중이다.

기술적인 발전 이외에 정책적인 뒷받침 역시 중요한 요소로 꼽힌다. 측정 대상물질 결정에 따라 대상 오염원을 측정할 수 있는 기술 개발 여부가 결정되기 때문에 환경모니터링 기술 개발은 정부, 산학연 모두가 한 테이블에 앉아 고민해야 한다.

다학제적 연구와 기술 융합 필요

환경모니터링 시스템을 모범적으로 운영하는 사례로 미국을 들 수 있다. 미국은 네트워크와 센서 기술을 이용한 환경모니터링 기술 개발에 적극적으로 나서고 있다. 특히 자국의 강 주변과 함께 전 세계 수질 모니터링 정보를 취합해 서비스하려는 시도가 활발하다.

그 일환으로 미국은 허드슨 강의 수중 환경을 실시간으로 모니터링하는 시범서비스를 시행하기 위해 IT와 센서 기술을 융합한 프로젝트를 2008년부터 수행해오



IBM은 빅데이터 분석기술을 뉴욕 조지호(湖) 모니터링에도 적용하고 있다. '제퍼슨 프로젝트'로 명명된 이 연구의 책임자 릭 켈리(왼쪽)와 IBM의 수석 엔지니어 해리 콜라오르쪽(가운데)이 모니터 화면에서 조지호의 상태를 점검하고 있다. © Feature Photo Service for IBM

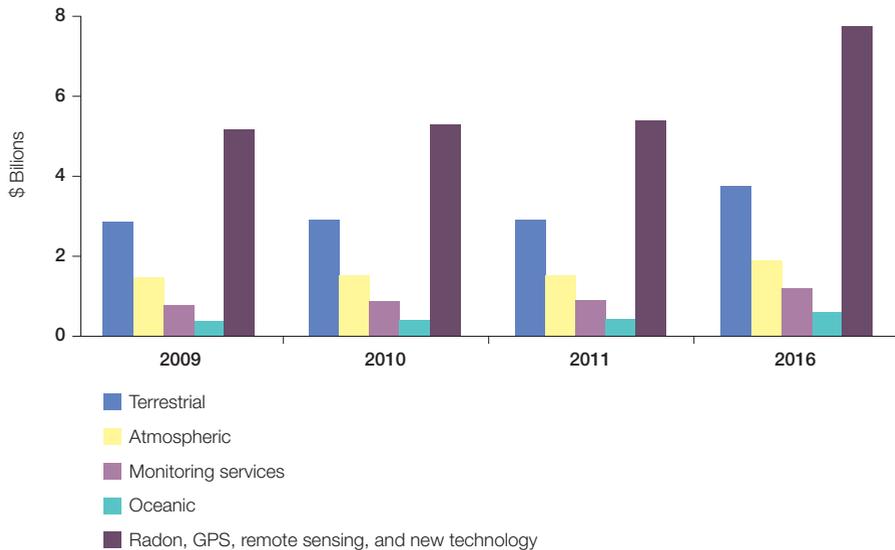
고 있다. 'REON(River & Estuary Observatory Network)'으로 명명된 이 프로젝트에는 비콘 Beacon 연구소, 클락슨대(Clarkson University), IBM이 참여했다. 연구진은 315마일 길이의 허드슨 강 전 구간을 실시간으로 모니터링할 수 있도록 센서, 로봇틱스, 컴퓨터 부품으로 이루어진 이동형 모니터링 시스템을 개발했다. 자율 통제가 가능한 이 이동형 모니터링 시스템은 태양광 발전 패널과 배터리를 가지고 있어 센서와 무선 통신을 하기 위한 전원을 공급할 수 있다. 또 컴퓨터에서는 센서로부터 수집된 데이터를 원격지로 보내거나 분산 네트워크를 구축할 수 있다. 이뿐만 아니라 센서 자체에도 컴퓨터 칩을 내장해 통신 기능이 가능하다. 연구진은 강에 일정 간격으로 모니터링 시스템을 배치하고 이들을 네트워크로 연결해 온도, 수온, 탁도, 용존 산소량처럼 수질을 관리하기 위한 기본 항목 정보를 실시간 수집했다. 각 모니터링 시스템에서 보내온 데이터는 다양한 기법을 활용해 분석됐다. 특히 IBM은 처리 속

도와 정확도를 높이기 위해 스트림 컴퓨팅 기법을 이 프로젝트에 최초로 적용했다.

오염 측정 센서 개발 절실

미국 시장조사 업체인 BCC리서치(BCC research)사에 따르면 2016년까지 환경센서를 포함한 환경모니터링 글로벌 시장이 약 153억 달러에 달할 것으로 추정된다. 국내 환경센서를 포함한 계측기기 및 모니터링 시장은 세계 시장의 약 1.8% 수준으로 매우 낮은 실정이나, 대기환경오염 규제의 강화 및 환경오염의 가속화에 따라 환경 관련 시장이 앞으로 지속적으로 성장할 것은 자명한 일이다. 생활수준이 향상될수록 환경과 삶의 질에 대한 관심이 증폭되면서 자동차, 산업체 작업환경, 다중이용시설, 생활환경 등의 실내외 환경오염도 측정 센서 개발이 더욱 절실하게 요구된다.

이에 발맞춰 고감도, 고성능 센서 기술 개발이 활발히 진행되고 있으며 최근에는 전자코, 전자혀를 개발할 수 있는 나노·바이오 융합기술 등도 활용하고 있다.



환경센서와 환경모니터링 글로벌 시장 규모. 자료: BCC research

국내 관련 기업들도 센서를 국산화하기 위한 정부 지원 정책에 힘입어 기술 개발에 대응하고는 있으나 대부분 핵심 부품은 수입에 의존하고 있는 상황이다. 특히 원천기술이 연구소와 대학을 중심으로 활발하게 개발되고 있으나 실용화, 상용화까지 가지 못하는 경우가 많아, 학계와 기업 간의 연계가 절실하다. 향후 환경모니터링 관련 시장은 지속적으로 확대될 것으로 예측되는 만큼, 국내 기술이 해외 기술과 비교해 기술우위를 점하고, 이를 바탕으로 시장을 선점하고 점유율을 높이기 위한 전략적 접근이 필요하다.

참고문헌



- BCC research | Environmental Sensing and Monitoring Technologies: Global markets
- 미치오 카쿠 | 미래의 물리학 | 2012
- 윤영훈 외 | “주요 산업공정 가스입자상물질 진단 및 평가를 위한 통합관리시스템 기술”, 『환경기술동향 보고서』 | 환경산업기술원 | 2011
- 이정아 | 유비쿼터스 IT 활용 환경관리 현황 및 과제 | 한국정보사회진흥원 | 2008
- “환경융합 센서 기술 동향과 전망”, 『방송통신기술 이슈 & 전망』 | 한국방송통신전파진흥원 | 2014





K I S T 과학기술전망 2016

Chapter 4

새로운 융합소재

지속가능한 성장을 위한 또 다른 키워드, 재료공학

홍경태 | KIST 물질구조제어연구센터



금속은 우수한 물성과 저렴한 가격 덕분에 오늘날 산업의 근간을 이루는 구조용 소재로 널리 활용되고 있다. 주위를 잠깐만 둘러보아도 금속 소재가 없으면 생활이 불가능하다는 것을 알 수 있다. 금속이 이처럼 인류 문명에 빼놓을 수 없는 요소로 자리잡은 이유는 다른 물질과 비견할 수 없는 금속만의 특징이 있기 때문이다. 그러나 소재 공학의 발전과 함께 이제는 더 가볍고 강도가 우수하면서도 용도에 맞게 합성할 수 있어 금속을 넘어설 만큼 유용성이 큰 소재가 속속 등장하고 있다. 이러한 소재들은 지하자원 사용을 최소화하는 데 기여한다는 점에서, 우리나라와 같이 자원이 없는 국가에게는 단비와도 같은 기술이다.

미래의 융복합소재로 가장 주목받는 것 중 하나가 탄소복합재료다. 탄소는 기본적으로 우리 주위에서 쉽게 구할 수 있다. 여기에 첨단 기술을 활용해 우수한 물성을 갖는 탄소 물질을 만들어 이를 용도에 맞게 변화시키거나 융합하면 다양한 물성을 가진 융복합소재로 만들 수 있다. 대표적으로 나노탄소복합재, 탄소섬유강화복



플라스틱은 어느 정도 강성을 지니면서도 가공이 자유로워 엔지니어링 소재로 널리 사용된다. 부품으로서 내구성과 신뢰성이 높아 하기 때문에 고강도 엔지니어링 플라스틱에 대한 수요가 늘어나고 있다.

합재가 빠르게 상업화되는 편이다.

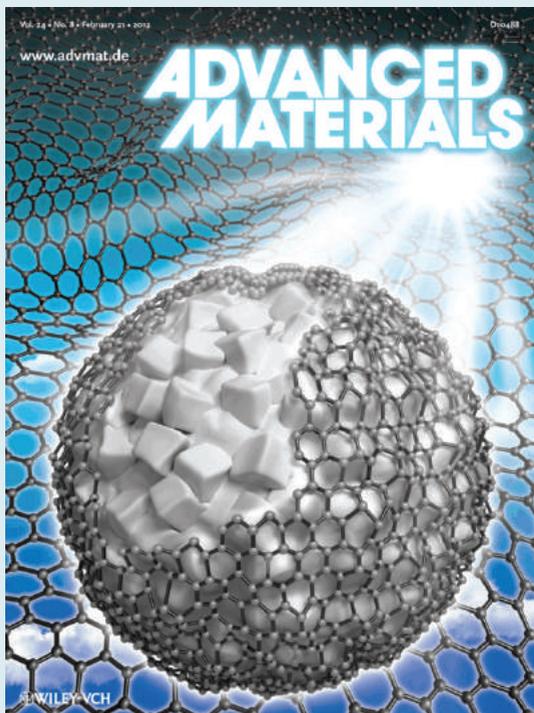
또 다른 소재로 내열성과 강도 면에서 약점이 있는 기존 플라스틱 소재의 한계를 극복한 슈퍼 엔지니어링 플라스틱(super engineering plastic)을 들 수 있다. 슈퍼 엔지니어링 플라스틱의 현재 목표는 내열성 250℃ 이상, 강도 160MPa 이상의 품질에 적당한 가격으로 알루미늄 같은 경량성 금속과의 경쟁력을 확보하는 것이다. 화학약품에 대한 내식성이 우수하고, 복잡한 형상을 쉽게 만들 수 있는 우수한 성형성을 바탕으로 그 활용도가 점차 커지고 있다.

탄소복합재와 슈퍼 엔지니어링 플라스틱은 복잡한 형상의 부품을 일체형으로 만들 수 있어 금속에 비해 성형공정이 단순하고 재료의 낭비가 적다는 공통점을 가지고 있다. 아직 많이 미흡하기는 하나 장차 금속을 대체할 미래의 융복합소재로 자

리잡을 가능성은 충분하다.

융복합재료와는 다른 개념으로 미래의 지속가능한 성장에 부합하는 것이 나노소재다. 나노소재는 크기가 수십 나노미터 nm 이하로, 표면부위에 있는 원자들의 비율이 내부에 비해 큰 재료를 말한다. 이 때문에 물질의 표면적, 즉 반응면적이 넓어져서 표면 반응이 활발하다. 나노소재는 적은 재료로 다양한 특성을 갖게 할 수 있어 앞으로 활용도가 급격히 증가할 것으로 여겨진다.

대표적인 나노소재로 꼽히는 것이 나노크기의 티타니아 TiO_2 분말이다. 새로운 원소 첨가나 재료 혼합 없이 크기를 100nm 이하로 줄이면 오염방지 코팅제, 태양 전지용 전극소재, 자외선 차단 화장품 소재, 인쇄용 토너 등으로 사용할 수 있는 물성을 갖게 된다.



국내에서도 티타니아 나노소재 연구가 활발하다. KIST에서 티타니아 나노분말을 대량 생산하는 법을 개발한 데 이어 한국과학기술원(KAIST)에서는 광감응성이 높은 이산화티타니아를 개발해 세계적인 재료공학 학술지 『어드밴스드 머티어리얼』 표지에 게재했다. © John Wiley & Sons, Inc.

지금까지 소개한 융복합소재들은 고갈되는 천연자원 사용을 최소화하고, 에너지를 적게 사용하면서도, 다양한 물성을 구현할 수 있다. 또 성형과정에서 재료 손실과 에너지 소모가 가장 작은 일체화 공정이 가능해 지속가능성이 중요한 미래 사회에 적합한 기술이라 할 수 있다. 우리나라처럼 지하자원이 부족한 나라에서도 우수한 융복합재료 관련 원천기술을 확보할 수 있다면 향후 세계 소재 시장을 주도할 수 있을 것이다.

황승상 | KIST 물질구조제어연구센터

강철보다 강하고
알루미늄보다 가볍다,
엔지니어링 플라스틱



강철보다 강하고 알루미늄보다 가벼운 첨단소재

2013년 4월 일본 대형 건설업체 오오바야시구미(大林組)는 ‘우주 엘리베이터 실용연구개발팀’을 출범시켰다. 2050년까지 지구와 우주정거장을 오가는 우주 엘리베이터를 건설하는 것이 이 팀의 목표다. 오오바야시구미에 따르면 우주 엘리베이터에 서는 좌석에 앉아 안전벨트만 착용하면 누구나 손쉽게 우주여행을 즐길 수 있다. 속도가 시속 200km에 달하지만 대기권을 빠져나가면 느려지기 때문에 인체에 부담도 없다. 승객들은 탑승 8일 후에 고도 3만 6,000km의 우주 정거장에 도착해 별빛이 펼쳐진 우주를 체험할 수 있다.

첨단소재 기술의 발달 덕분에 소설이나 영화에서나 나올 법한 위와 같은 이야기들이 현실에서도 가능해졌다. 비중은 낮으면서 강도가 높아 비강도가 우수한 소재는 케이블 구조체의 중력과 원심력을 극복할 수 있어 우주 엘리베이터의 소재로 손색이 없다. 개발이 성공적으로 진행된다면, 2030년까지 우주 엘리베이터에 쓰일 케이블 제작이 가능할 것으로 보인다.

이처럼 놀라운 일을 해낼 수 있는 재료 중 대표적인 것이 바로 엔지니어링 플라스틱(engineering plastics)이다. 기계 부품이나 구조재료 등에 적용하는 플라스틱 재료로, 현재 사용 중인 금속 소재를 대체해 경량화하는 것을 목적으로 하는 고분자 및 고



우주 엘리베이터는 일각에서 진지하게 논의되기도 했지만, 사실상 공상의 영역에 가까웠다. 그러나 소재기술의 발달로 우주 엘리베이터의 실현 가능성이 엿보이기 시작했다. © NASA

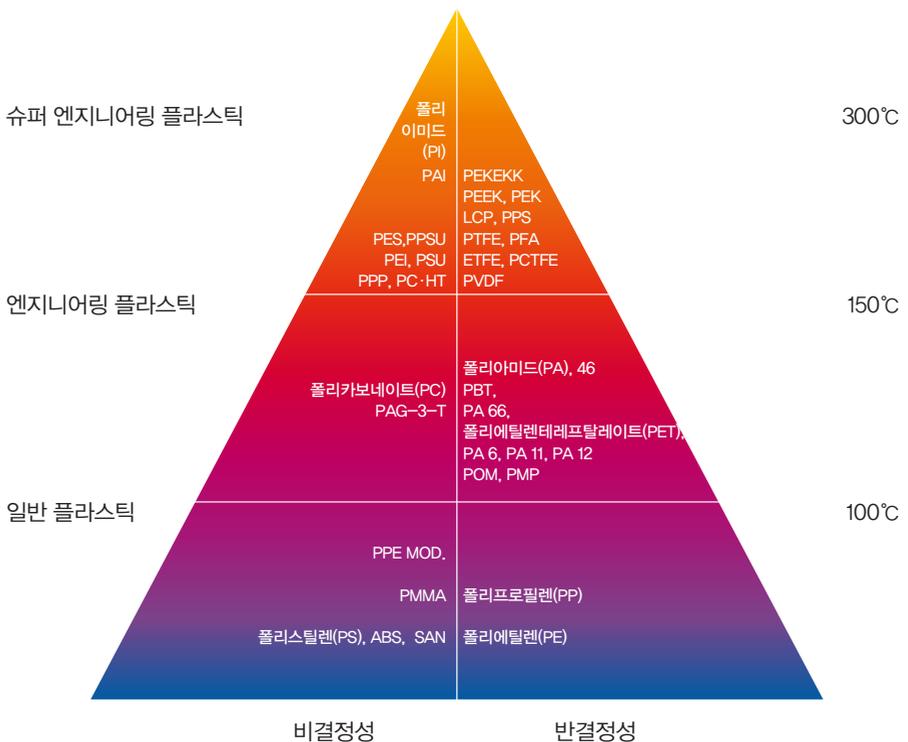
분자 복합소재라고 할 수 있다. 이를 위해 필요한 것이 기존 플라스틱과는 차별화된 우수한 특성이다. 엔지니어링 플라스틱은 강도와 탄성이 우수하고 연속 사용 온도 100℃ 이상의 내열성을 가지고 있다. 물성적 측면에서도 일반 플라스틱 보다 우월해 500kg/cm² 이상의 인장강도와 2만kg/cm² 이상의 굴곡 탄성률을 만족할 수 있어야 한다.

엔지니어링 플라스틱은 강철보다 강하고 알루미늄보다 가벼운 꿈의 소재다. 금

속재료 대비 비강도가 우월해 박막성형을 포함한 가공성이 우수하다. 또한 탄성, 내충격성, 내마모성, 내약품성 및 전기절연성이 우수해 생활용품, 전기전자 제품, 항공기 2차 구조재 등의 다양한 분야에서 널리 사용된다. 가장 중요한 특징은 화학 구조의 변형을 통해 기능을 설계할 수 있다는 점이다. 덕분에 엔지니어링 플라스틱은 산업체의 수요에 따라 다양하게 개발돼 왔다.

5대 엔지니어링 플라스틱의 특성

이렇게 다양한 엔지니어링 플라스틱 중 현재 가장 많이 사용되는 소재로는 크



엔지니어링 플라스틱의 구분

계 5가지가 있다. 폴리아미드poly amide, 폴리아세탈poly acetal, 폴리카보네이트poly carbonate, 변성 폴리페닐렌옥사이드poly phenylene oxide 및 폴리부틸렌 테레프탈레이트 poly buthylene terephthalate로 대표되는 폴리에스테르 수지다.

상업화	엔지니어링 플라스틱	개발회사	Asia지역회사
1939	Poly Amide (Nylon)	DuPont	Toray, Teijin, Kolon
1949	Poly Ethylene Terephthalate	ICI	Toray,TNC, Kolon
1950	불소 수지 (PTFE)	DuPont	DIC
1955	Nylon 11	ATO	-
1956	Poly Acetal	DuPont	Asahi
1958	Poly Carbonate	Bayer	Teijin, Mitsubishi
1960	Acetal Copolymer	Celanese	Polyplastics
1964	Polyimide (VespeI SP)	DuPont	Ube
1964	Ionomer (SURLYN A)	DuPont	Mitsui
1964	Poly Phenylene Oxide (PPO)	GE	Mitsubishi
1965	Poly Sulfone (UDEL)	UCC	-
1966	Modified PPO (NORYL)	GE	Asahi
1966	Nylon 12	Huls	Toray
1968	Poly Phenylene Sulfide	Phillips	DIC, SKI
1969	투명 Nylon (TROGAMID T)	Dynamit Nobel	-
1969	Poly Amino Bismaleimide(Kerimide)	Phone-Poulenc	-
1970	Poly Buthylene Terephthalate	Celanese	Mitsubishi, LG, SYC
1971	Poly Arylate (EKONOL) 101	Caborandom	-
1971	Poly Amide Imide (TORLON)	Amoco	-
1971	Polyester Elastomer (HYTREL)	DuPont	Toyobo, SKI, Kolon
1972	Poly Ether Sulfone (VICTREX)	ICI	-
1972	Poly Amide Mineral filled (MINLON)	DuPont	-
1972	Poly Arylate (EKONOL)1000, 2000	DuPont	Sumitomo
1972	TFE/Ethylene Copolymer (TEFZEL)	Carborandom	Asahi
1973	Poly Arylate (U Polymer)	Unitica	-
1976	Super Tough Nylon (ZYTEL)ST801	DuPont	Toray, Kolon, Asahi
1980	PEEK	ICI	-
1980	Poly Amide Elastomer	Huls	-
1980	Super Tough PBT	GE	Motsubishi, LG
1981	Poly Ether Imide (ULTEM)	GE	-
1983	Super Tough Poly Acetal	DuPont	Ashahi

엔지니어링 플라스틱의 개발 역사

폴리아미드는 가장 생산량이 많은 대표적인 엔지니어링 플라스틱이 나일론6 NYLON6과 나일론66 NYLON66이다. 기계적 강도, 내열성, 내마모성, 내약품성, 난연성 등이 뛰어나다. 가공성도 우수해서 자동차부품, 전기부품, 전자부품, 기계부품, 건재부품, 의료용품, 가정용품 등 다양한 분야에 이용되고 있다. 다만 수분을 잘 흡수해 전기저항성이 나쁜 점이 극복과제로 남아 있다.

폴리아세탈은 강도, 치수안정성, 내마모성 등이 뛰어나 엔지니어링 플라스틱 중 금속 기계부품의 대체 소재로 많이 쓰인다. 전기부품, 전자부품, 각종 기어, 볼트, 너트 등 기계부품, 자동차부품, 가전부품, 배관부품 등에 사용된다. 또한 자동차에서 흔히 쓰이는 도어락, 와이퍼, 탱크용 탭 등에도 사용되고 있다. 플라스틱 중에서 피로수명이 가장 길지만 접착성과 도장성이 떨어지고 강산 및 강알칼리에 취약한 약점이 있다.

폴리카보네이트는 투명한 엔지니어링 플라스틱으로 기계적 강도가 높고 내열성, 전기절연성이 뛰어나며 충격강도가 우수하다. 또한 습기나 온도의 변화에도 강해 인공장기, 카메라, 시계, 자동차 외장품, 카메라, 시계 등 다양한 분야에 활용되고 있다. 다만 내화학성이 낮고 알칼리 용액에 취약하며 자외선에 민감해 기후 변화에 약한 점이 극복 과제다.

변성 폴리페닐렌옥사이드는 강도, 치수안정성 및 내열성이 뛰어나지만 단독 성형이 어려워 타 수지와와의 복합화를 통해 사용하는 엔지니어링 플라스틱이다. 전기절연 특성이 우수해 각종 전기, 전자 분야에 주로 사용되며, 사무자동화 기기 및 커넥터, 스위치, 호일커버, 퓨즈박스의 소재로 인기가 많다. 기후변화에 취약하고 내약품성도 떨어지는 단점이 있으나 향후 복합화를 통해 다양한 용도개발이 가능하다.

폴리부틸렌 테레프탈레이트는 강도, 내열성, 전기절연성 등이 뛰어난 엔지니어링 플라스틱으로 커넥터와 스위치, 오디오부품 등의 전기·전자부품과 와이퍼암 등의 자동차 부품용 소재로 사용되고 있다. 폴리아미드와 유사한 물성에 가격은



PBT는 물성이 우수하고 저렴해서 다양한 소비재에 널리 사용된다. 특히 반복적인 충격을 견뎌야 하는 키보드와 같은 부품에 최적의 소재로 손꼽힌다. © MechanicalKeyboards.com

저렴하기 때문에 폴리아미드 대체 수지로서도 각광받고 있다.

떠오르는 미래의 대세 소재들

현재 많이 쓰이는 엔지니어링 플라스틱은 위의 5가지이지만, 향후 산업의 변화 및 기술 개발로 더 많이 활용될 수 있는 소재도 많이 있다. 이 중 슈퍼 엔지니어링 플라스틱은 150℃ 이상에서 장시간 사용이 가능하도록 내열성을 확보한 열가소성 수지를 말한다. 비교적 최근에 상용화됐으나 신산업의 출현으로 성장세가 높아 미래의 대세 고부가가치 소재로 손색이 없다. 대표적인 슈퍼 엔지니어링 플라스틱으로 폴리아미드(polyimide), 폴리에테르에테르케톤(PEEK), 폴리페닐렌설파이드(PPS), 액정 고분자(LCP) 및 불소수지(fluororesin)를 들 수 있다.

폴리아미드는 극저온부터 300℃ 이상에 걸쳐 장시간 사용에 견딜 수 있으며 전기절연성과 유연성이 우수해 고부하가 걸리는 공업용 모터의 절연재료와 프린트

회로 기판 등에 사용되고 있다. 고가임에도 불구하고 항공기와 컴퓨터용 부품으로 인기이며, 향후 항공우주분야에의 활용도 기대되는 재료다. 탄소섬유와의 복합재료는 항공우주용의 내열구조부품에 이용되고 유리섬유 직물과의 적층판은 대형 컴퓨터의 다층 회로 기판으로 사용되고 있다. 제트엔진 전자레인지의 회전부처럼 극한 환경에서 사용하는 기계의 부품으로도 활용된다.

폴리에테르에테르케톤은 내열성이 특히 뛰어난 열가소성 수지로 폴리이미드에 비해 성형가공이 용이하다. 내열성이 폴리이미드 수지보다 낮다는 단점이 있으나 비용이 저렴하고 내약품성, 내충격성, 착색성이 뛰어나기 때문에 원자력 발전용 재료와 복사기 부품, 식품기계 부품, 레이저용품 등에 사용되고 있다. 보강섬유와의 복합화가 쉽고 이를 통해 내열성 향상도 가능하기 때문에 복합재료로서 항공우주 분야에서의 응용도 기대되는 소재다.

폴리페닐렌설파이드는 근래에 수요가 급성장하는 특수 엔지니어링 플라스틱이다. 강도, 내열성, 내약품성, 치수안정성 등 성능이 우수하면서도 가격이 싼 것이 강점이다. 특히 열가소성수지로서 성형이 용이하기 때문에 경량화를 위한 자동차 부품으로 수요가 급격히 늘어나고 있다. 현재 배기가스 밸브, 안개등 렌즈, 각종 센서, 전장 부품 등 내열성이 요구되는 분야에 우선 적용되고 있다. 시장 전망이



폴리이미드는 온도변화에 강하면서도 유연성과 전기절연성이 좋아 회로 기판에 이용된다. 사진은 폴리이미드를 이용한 프린트 기판. © dbk group



엔지니어링 플라스틱 중 일부는 금속보다도 내마모성과 내열성이 우수해서 우주공간의 극한 환경과 대기권 돌입 시의 고온에서도 신뢰성을 유지할 수 있어 우주선 제작에 활용된다. 사진은 NASA의 차기 우주선인 오리온의 시험용 모델을 제작하는 모습. © NASA

받아 신규업체의 참여 가능성이 높는데, 염소함유 단량체를 사용하는 기존공정의 한계를 극복하는 것이 후발진입의 관건이다.

액정고분자는 고분자 물질이지만 용융 상태에서도 배향성을 유지하며 성형되는 특징을 가지고 있다. 막대형의 분자구조 특성으로 자기 섬유보강 효과를 갖고 있으며 낮은 선팅창률, 고탄성률, 치수안정성, 성형가공 특성이 매우 우수해 정밀사출성형에 적합하다. 이러한 특성을 바탕으로 전기·전자부품의 경박단소화에 기여함으로써 차세대 전자소재로 각광을 받고 있다. 국내에서는 삼성정밀화학이 기술개발을 통해 2007년 12월 양산을 시작해 국산화하는 데 성공했다.

불소수지는 분자 안에 불소를 함유한 소재를 모두 일컫는 말이다. 불소원소의 강한 전기음성도로 인해 내약품성, 내열성, 윤활성 및 내식성이 뛰어나 구조재 등으



PCTFE로 만든 개스킷 부품. 부식에 강하여 파이프의 연결부와 같은 곳에 많이 이용된다.
© FLUORTEN SRL

로 용도가 확대되고 있다. 폴리테트라플루오르에틸렌(PTFE), 폴리클로로플루오르에틸렌(PCTFE) 등이 있으며 현재 생산량의 약 80%가 폴리테트라플루오르에틸렌이다. 불소수지는 전기·전자재료, 기계재료 외에 화학 플랜트의 탱크, 밸브처럼 내식성을 필요로 하는 화학분야에 고루 사용되고 있다. 최근에는 체육관 등 대형 구조물의 지붕에 사용하는 방수 통기성 다공질 필름으로도 용도가 확대되고 있다. 특별히 내기후성이 우수한 고분자 소재로서 태양전지처럼 가혹한 환경조건에서 장시간의 내구성이 요구되는 분야에 적용 가능한 유일한 대안이다.

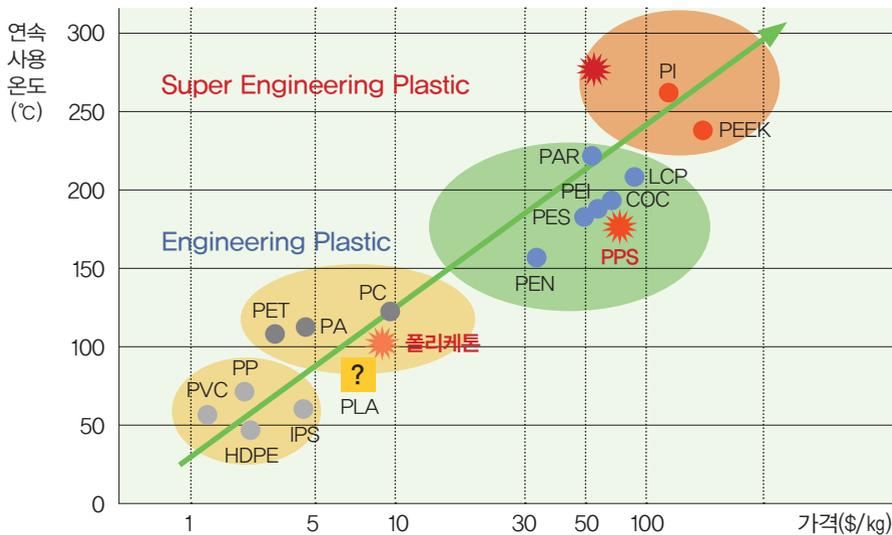
석유화학산업의 새로운 성장동력

범용 플라스틱을 기반으로 하는 우리나라의 합성수지 제품은 40여 년 전 출발된 석유화학산업으로부터 태동했으며 국민소득 2만 불 시대를 여는 데 중요한 기여를 했다. 그러나 대량생산 및 저가격을 바탕으로 한 지금까지의 고도성장 패러다임은 후발국의 추격 등으로 경쟁력을 잃게 됐다.

현재 플라스틱 산업의 추진과제는 신산업에 적용 가능한 용도의 개발 및 고부가가치화다. 특히 자동차, 기계, 전기전자 분야 등 공업적 용도에 사용이 커지면서 내열성과 기계적 특성이 우수한 엔지니어링 플라스틱이 새로운 대안으로 떠오르고 있다. 엔지니어링 플라스틱의 물성 향상에 따른 부가가치의 증가는 기대 이상이다. 따라서 엔지니어링 플라스틱은 국내의 석유화학 인프라를 그대로 활용하면서 우리나라 고분자산업의 성장동력을 이어갈 수 있는 전략 제품으로 인식되고 있다.

우리나라는 엔지니어링 플라스틱 기술 후발주자이지만 범용 플라스틱보다 현저히 빠르게 기술 격차를 줄이고 있다. 5대 엔지니어링 플라스틱 중 폴리아미드와 폴리에스테르는 섬유산업이라는 안정적 국내 시장을 기반으로 기술력을 향상시켜 왔으며 이미 세계 수준의 기술을 확보하고 있다.

폴리아세탈의 경우 국내에서는 코오롱플라스틱을 비롯하여, 미국 셀라니스사와 일본 미츠비시가스케미칼사가 합작하여 설립한 한국엔지니어링플라스틱 두 기업



플라스틱의 내열성 대비 제품가격 추이

이 각각 연간 5만 7,000 톤, 14만 5,000 톤 규모로 생산하고 있다. 최근에는 내구성
성이 강하고 고온에도 잘 견디는 특성 때문에 자동차 경량화를 목표로 다양한 부품
개발이 이뤄지고 있다.

변성 폴리페닐렌옥사이드의 경우 향후 전기차 배터리 및 충전용 부품류로 용도
확대가 예상되는 소재다. 국내의 경우 베이스 수지는 전량 수입해 컴파운드 제품
으로만 판매돼 국내 수요를 감당하고 있다. 향후 국내 수요를 고려해 원료수지의
중합기술 확보가 필요한 소재다.

폴리카보네이트의 경우는 국내 생산 능력이 최근 급격히 상승했다. LG 다우폴
리카보네이트, 삼양화학, 제일모직 그리고 롯데케미칼 4개사에서 전 세계 생산량
의 10% 이상을 차지하고 있다. 기술적으로도 세계적 경쟁력을 확보하는 데 성공했
다. 국내 기업인 LG화학에서는 유독물질인 포스겐^{phosgen}을 사용하지 않는 폴리카
보네이트 제조공정을 자체 개발해 기존 폴리카보네이트 공정에 비해 15% 이상의
경제성을 확보한 것은 물론 색상 및 투명성 등의 제품품질 문제를 획기적으로 개선
했다.

엔지니어링 플라스틱에서의 성과를 바탕으로 향후 기술 개발도 더욱 박차를 가
하고 있다. 기존 선도국에서 상용화에 실패한 소재를 상용화하거나 슈퍼 엔지니어
링 플라스틱에 대한 연구개발 투자가 활발하다. 대표적인 사례가 불소수지, 폴리
페닐렌설파이드^{PPS} 수지인 폴리케톤, 특수 엔지니어링 플라스틱이다. 현재 KIST
에서 연구개발에 참여해 진행 중이다.

폴리케톤은 올레핀과 일산화탄소를 원료로 제조되는 고분자재료로 내충격성, 내
마모성, 내화학성 및 기체차단성 등이 우수한 신소재다. 1980년대부터 미국과 일
본의 선진화학업체가 개발을 추진해 왔지만 아직까지 상업화에 성공하지 못했다.
이를 (주)효성 컨소시엄이 '세계 10대 일류소재기술' 과제를 통해 국내에서 최초로
상용화에 성공했다. 향후 슈퍼섬유 및 엔지니어링 플라스틱으로의 응용기술 개발



폴리카보네이트로 만든 스마트폰의 후면 커버. 삼성전자의 스마트폰 부품 중 플라스틱 상당수는 같은 계열 사인 제일모직에서 생산하고 있다. © 삼성전자

을 통해 다양한 산업적 용도 개발 및 시장 창출이 예상된다.

불소수지는 1980년대에 이미 KIST에서 원료물질 제조기술을 개발한 바 있으나 시장 규모에 따른 경제성의 문제로 상용화가 지연됐다. 그러다 최근 다양한 분야에서 수요가 급증하고 있어 독자기술 개발이 이뤄지고 있다. 특히 에너지 산업용 소재부품처럼 내환경성이 요구되는 부분에서 고부가가치의 수요가 커지고 있으며 향후 코팅제 또는 필름 등으로 활발한 응용이 예상된다.

폴리페닐렌설파이드 수지는 자동차의 경량화 추세에 대응해 기존 자동차의 내열 및 전장부품에 활발하게 적용되고 있다. 전기차EV 및 하이브리드 자동차HEV 등 차세대 자동차 관련 부품에도 폴리페닐렌설파이드가 활용돼 수요가 팽창하고 있다. 그간 국내에는 폴리페닐렌설파이드 수지를 수입해 컴파운딩과 부품에 적용하는

기술을 개발하는 데 소극적이었다. 하지만 2015년 SK케미칼에서 독자기술로 상업 생산을 시작함으로써 기존 용도를 대체하는 것은 물론이고 새로운 용도개발을 위해 활발한 연구개발이 예상된다.

친환경 및 고부가 기능화가 트렌드

이렇게 우수한 특성은 물론 가격경쟁력으로 인해 엔지니어링 플라스틱의 산업적 수요는 앞으로 커질 것으로 예상된다. 그러나 장기적이고 안정적인 시장을 확보하려면 먼저 해결해야 할 숙제가 있다. 유해 원료의 배제 및 제조공정에서의 친환경성 확보다. 일례로 투명한 엔지니어링 플라스틱으로서 광학적 용도에 넓게 적용되는 폴리카보네이트의 경우 독가스로 사용됐던 포스겐을 원료로 최초의 중합기술이 개발돼 30여 년 이상 수요가 제한적이었다. 하지만 디페닐카보네이트를 적용한 용융중합법이 새롭게 개발돼 유해성을 극복함에 따라 수요가 급증한 바 있다.

또 다른 해결과제는 물성 및 기능성의 한계를 극복하는 것이다. 금속 소재를 대체함으로써 경량화를 구현하고자 하는 목적으로 적용되고 있지만 더 넓은 응용분야를 대체하기 위해서는 획기적인 비강도의 확보가 필요하다. 또한 현재와 미래의 산업



엔지니어링 플라스틱의 시장 전망(2010~2020년). (자료출처: Frost and Sullivan)

현장에서 다양하게 활용될 수 있도록 용도 맞춤형 기능성의 설계가 요구된다.

한국의 고분자산업 역사에 있어서 2015년은 도약의 해로 기록될 것이다. 엔지니어링 플라스틱 분야에서 친환경을 화두로 한 2개의 공정기술이 상용화돼 메가트렌드를 선도할 수 있었기 때문이다.

폴리케톤은 산업통상자원부 세계 10대 일류소재기술WPM 과제를 통해 개발된 원천기술을 (주)효성이 최초로 상용화한 사례다. 환경유해물인 일산화탄소를 원료로 해 고부가가치의 수지를 제조했다. 연간 5만 톤 규모의 폴리케톤 제조설비에 사용되는 일산화탄소의 양은 2만 5천 톤으로, 소나무 380만 그루를 심는 것과 비슷한 효과를 낼 것으로 예상된다.

한편 폴리페닐렌설파이드와 같은 특수 엔지니어링 플라스틱은 우수한 반응성을 확보하기 위해 불소나 염소를 함유한 유해성 원료를 사용해 용액중합으로 제조해 왔다. 그러나 SK 케미칼은 기존의 용액 공정과는 달리 요오드 및 황을 원료로 적용한 새로운 용융공정으로 친환경성을 확보했다. 개발된 신공정은 수율을 2배 이상 향상시키고 정제공정을 획기적으로 단축하여 베이스 수지의 가격 경쟁력을 확보하고 최종 제품의 잔류 염소를 낮췄다. 이를 통해 전기·전자부품에 적용할 수 있는 고품질의 폴리페닐렌설파이드를 제조할 수 있게 됐다.

엔지니어링 플라스틱은 다양한 산업에서 나무, 금속과 같은 기존의 소재를 대체하고 있다. 우수한 성형성을 바탕으로 복잡한 모양도 쉽게 만들 수 있기 때문이다. 비강도 측면에서도 기존 소재의 성능을 능가한다. 그러나 절대 강도는 아직 금속 등 무기소재에 비해 낮아 폭넓게 이용하려면 강성을 강화해야 한다. 강성을 높이는 대표적인 방법이 복합재료다. 엔지니어링 플라스틱을 유리섬유 또는 탄소섬유 등과 혼합시켜 더욱 강력한 물성을 구현하는 섬유강화 플라스틱을 개발하는 것이다.

부가가치를 높이기 위해 용도에 맞는 기능성 설계도 필요하다. 엔지니어링 플라



아직 강도 면에서 개선이 필요하지만, 지금도 탄소섬유강화 플라스틱은 금속을 대신하여 사용되고 있다. 사진은 2013년 제네바 모터쇼에 출품된 독일 자동차회사 로딩(Roding)사의 로드스터. 차체를 탄소섬유 플라스틱으로 제작했다. © MOTORTREND

스틱은 모양뿐 아니라 성분을 조절함으로써 용도에 따라 맞춤형 설계가 가능하다. 일례로 플라스틱에 유기 소재를 혼합해서 전기가 통하게 할 수도 있는데, 이를 이용하면 이전보다 훨씬 가벼운 전선이나 코일을 만들 수도 있다. 전자파 차폐나 방열과 같은 전달제어 기능도 유기소재를 플라스틱에 혼합해서 얻을 수 있다.

친환경성 확보라는 숙제 풀어야

현 시점에서 엔지니어링 플라스틱의 활용이 가장 기대되는 분야는 자동차 산업이다. 연비개선 경쟁 및 온실가스 배출 규제에 따른 차량 경량화의 필요성에 따라 평균 10% 수준에 그치고 있는 자동차용 플라스틱의 비중이 2035년경에는 약 20%까지 증가할 것으로 예상된다. 경량화하기 위해 성능이 향상된 금속 소재를 소량 적용하는 방안도 있지만 근본적인 해결책은 될 수 없다. 이에 일정수준 이상의 내

열성을 가지면서 비강도가 우수한 엔지니어링 플라스틱이 현실적인 대안이라 유
립을 중심으로 사용량이 급격히 증가하고 있다.

유·무기 소재와의 복합화를 통한 성능 향상 및 기능성 구현은 하이브리드자동
차나 스마트카 등 미래형 자동차에 엔지니어링 플라스틱의 적용을 더욱 확대할 것
으로 예상된다. 일례로 엔지니어링 플라스틱을 매트릭스로 한 탄소나노튜브 복합
소재는 우수한 강성뿐만 아니라 레이더파 흡수 기능을 구현할 수 있어 고성능 레이
더 센서의 성형부품으로 적용이 가능하다. 이미 국내에서 개발이 완료돼 실차 적
용단계에 이르고 있다.

전기·전자 분야의 경우 스마트 기기의 확산 등으로 인해 경박단소화의 추세로
방열 및 전자파 차폐 등 다양한 기능성이 요구되고 있다. 의료복지 산업에서도 친
환경성 및 무해성은 물론이고 생체적합성이라는 기능 설계가 필요하다. 이를 위해
엔지니어링 플라스틱의 베이스 수지 개발은 물론 기능성 유무기 소재와의 하이브
리드화에 대한 기술 개발이 진행되고 있다.

하지만 엔지니어링 플라스틱의 확산이 수월하기만 한 것은 아니다. 엔지니어링
플라스틱은 대량으로 생산되는 가벼운 소재라는 점에서 기존 플라스틱의 한계도
그대로 가지고 있다. 대양에 형성돼 바다 생태계를 교란시키는 플라스틱처럼 현
재 플라스틱이 일으키는 환경적 문제 역시 동일하게 적용될 수 있는 것이다.

현재 해결책으로 제시되는 것이 리사이클이나 환경 분해성 등 환경친화적인 기
능성을 설계하는 방안이다. 그러나 금속이나 유리 등은 스크랩으로 모아서 재생형
해도 물성이 재현되는 반면, 플라스틱은 저급 용도로 일부만 재사용이 가능하다.
분해성을 설계하는 방안도 내구성의 확보와 상반될 수 있고, 분해물의 유해성을
먼저 검증해야 한다는 큰 과제가 남아 있다.

슈퍼 엔지니어링 플라스틱 제품 개발이 중요

엔지니어링 플라스틱은 우수한 성능으로 인해 금속 소재의 대체는 물론 범용 플라스틱 소재의 성능 한계를 극복하기 위한 대체재로서도 활발한 시장적용이 이뤄지고 있다. 기본물성 이외에 중요한 요소로는 성형가공성 및 기능성이 있으며, 가격 대비 성능이 시장경쟁력의 관건이 된다. 화학제품의 특성상 제조기술의 발전과 수요 증대에 따르는 대량생산으로 가격 경쟁력은 계속적으로 향상되고 있으며, 환경 규제에 따른 자동차의 경량화 요구는 폭발적인 잠재시장을 예고하고 있다. 세계적인 시장조사기관인 프로스트앤설리반^{Frost & Sullivan}에 의하면 2020년까지 연평균 시장성장률 5.7%로 850억 달러의 세계 시장을 형성할 것으로 예상된다.

우리나라의 경우 가전 및 자동차 등에 대한 자체 수요산업이 있고 거대 중국시장이 이웃하고 있기에 세계 평균^{2012년 기준 세계점유율 4.6%}보다 높은 연평균 6%의 시장성장이 예상된다. 그러나 현재까지는 범용 엔지니어링 플라스틱의 컴파운딩 제품을 중심으로 시장이 구성돼 있다. 때문에 시장지배력을 확장하기 위해서는 향후 수요가 많고 고부가가치 제품인 슈퍼 엔지니어링 플라스틱의 베이스 수지와 컴파운딩 제품을 개발하는 데 힘써야 할 것이다.

참고문헌



- 최기대 | “엔지니어링 플라스틱 기술 동향”, 『고분자과학과 기술』 | 2009
- 엔지니어링 플라스틱의 개발 역사 | http://www.loito.com/product_1_3.htm
- 김은진 | “슈퍼 엔지니어링 플라스틱 시대 오는가?”, 『CMRI Multi Client Report—슈퍼 EP 시장분석』 | 화학경제연구원 | 2009
- Analysis of the Global Engineering Plastics Market | Frost and Sullivan | 2014
- 김용석 외 | 신공정 저비용 하이퍼 플라스틱 소재기술 (연구기획 최종보고서) | 산업통상자원부 | 2014

홍경태 | KIST 물질구조제어연구센터

철기시대를 넘어, 탄소문명의 시대



인류 문명은 아직 철기 시대?

인류 문명은 도구를 만드는 재료에 따라 석기 시대, 청동기 시대, 철기 시대로 크게 구분된다. 인류는 철기를 다루기 시작하면서 본격적인 문명 시대로 접어드는데, 생산량이 증가함에 따라 중앙집권 국가가 설립되고 체계적인 기록이 이루어지기 시작하여 철기 문명은 2000년 이상 계속돼 지금에 이르고 있다.

하지만 과학기술이 발전하면서 오랜 역사를 지닌 철기를 대신하여 새로운 시대를 열 소재에 대해 많은 의견이 나오고 있다. 20세기에 가장 많이 쓰인 소재 중 하나인 플라스틱, 반도체 재료인 실리콘이 중요하게 거론되는 한편, 유형의 재료가 아닌 데이터 같은 정보가 앞으로 나타날 문명의 기반을 이룰 것이라는 의견도 있다.

그러나 인류가 철기시대를 벗어났는가 하면, 그렇지 않다. 철강을 비롯한 금속 재료는 우수한 물성에 저렴한 가격을 바탕으로 여전히 대표적인 구조용 소재로 사용되고 있다. 현재 소비되는 철강은 연간 15억 톤 이상인데 이는 전 세계 인류 1인당 매년 200kg 이상을 사용할 수 있는 양이다. 철이 전체 금속 소재 중 80% 이상을 담당할 정도다.

문제는 연간 15억 톤의 철강을 생산하는 반대급부가 만만찮다는 점이다. 철강 생산은 제조업에서 사용하는 에너지의 2.8%를 소비하고 전 세계 이산화탄소 배출

량의 5.2% 이상을 차지하는 대표적인 에너지 과소비, 이산화탄소 과다 배출 산업이다. 세계 각국이 지속가능한 성장을 모색하는 현재의 분위기와는 맞지 않다. 제철 분야에서 많은 노력이 이루어져 이전보다 에너지 소비량이 크게 줄었지만 여전히 제철 산업은 에너지와 온실가스 부담이 크다.

가볍고 강한 탄소복합재의 등장

이에 대한 대안으로 떠오르고 있는 것이 고강도 탄소섬유강화복합재로 대표되는 탄소복합재다. 탄소복합재는 그 무게가 철강의 1/4도 안 되면서 강도는 10배나 된다. 탄성 계수도 클 뿐 아니라 내구성도 우수해 사용 가치가 무궁무진하다. 탄소복합재는 새로이 개발되는 대형 항공기나 전기자동차의 구조용 재료로 활용되면서 수송기기 경량화의 핵심 소재로도 주목받는다.

탄소복합재를 자동차의 구조용 재료로 사용하면 외부 충격을 완화시켜주면서도 진동이 적어 안락하다. 또한 피로 파괴가 일어나지 않아서 장기간 사용할 수 있으며, 여기에 모양 변경도 쉬워 자신만의 개인용 자동차에 이용할 수도 있을 것이다. 탄소복합재로 제작된 대형 항공기 역시 유연한 형태에 가볍고 강하게 만들어지기 때문에 이용비용이 대폭 하락한다.

탄소복합재는 건축 구조물에도 유용하다. 고가 도로나, 교량 기둥의 간격을 넓힐 수 있을뿐더러 구부러지거나 다양한 형태의 긴 교량들을 만들 수도 있다. 탄소복합재가 본격적으로 사용된다면 벽의 형태를 자유자재로 만들 수 있으면서도 기둥을 줄일 수 있어서 지금보다 높고 복잡한 형상의 건축물도 실용적인 수준으로 만들 수 있을 것이다. 도심의 외관이 완전히 바뀌는 것이다.

이 뿐만 아니라 각종 기계설비나 부품에 탄소복합재를 활용하면 가볍고 튼튼해서 에너지 효율을 높일 수 있다. 에너지와 산업 분야에서 미래의 화두는 에너지를 효율적으로 사용해서 지속가능성을 확보하는 것이므로 탄소복합재의 필요성은 더욱 커질 것이다.

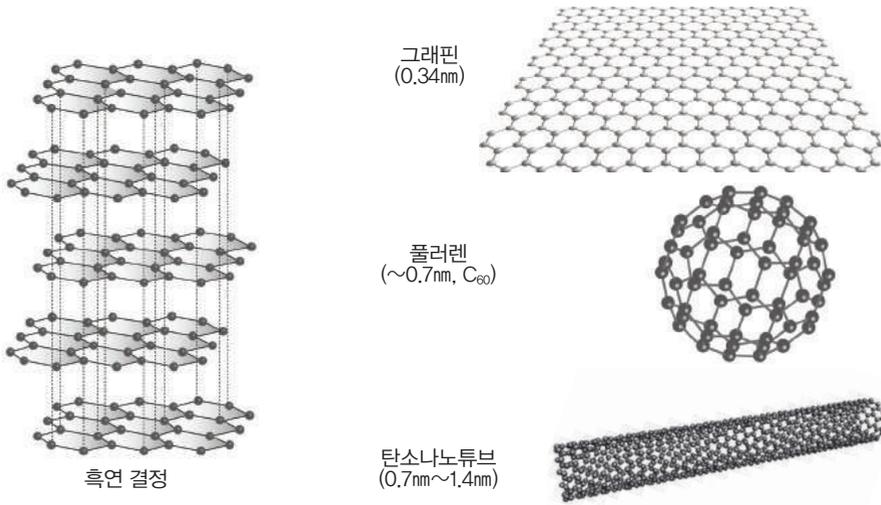


탄소복합재를 사용한 대형항공기(위), 미래형 건물(왼쪽 아래), 전기자동차 (오른쪽 아래). © Airbus, 서울시, Mercedes-Benz

탄소복합재란 무엇인가?

탄소복합재는 작은 크기의 탄소재료들을 금속, 고분자재료에 분산시킨 것을 말한다. 탄소는 생명체를 구성하는 기본 원소이며, 생명체로부터 만들어진 화석연료는 탄소가 산소와 결합하면서 에너지를 발생시킨다. 화석연료의 탄소 성분을 기반으로 탄소의 결합 방법을 변경시키고, 여기에 다른 원소를 결합시켜 만든 것이 플라스틱, 석유화학 제품들이다.

순수한 탄소끼리만 결합하는 경우, 탄소 원자 하나가 3개의 다른 탄소 원자들과 같은 평면상에서 120도 각도로 결합한다. 이것을 육각형 탄소결합이라고 한다. 이런 한 개의 원자층 평면 형태가 그래핀(graphene)이며, 이들 그래핀이 여러 층으로 쌓여 3차원 형태로 된 것을 흑연(graphite)이라고 한다. 그래핀이 원통형으로 말린 형태는 탄



탄소 나노구조의 다양한 형태.

소나노튜브carbon nanotube, CNT, 구형으로 된 것은 풀러렌fullerene 혹은 버키볼buckyball이라고 한다.

순수하게 탄소 원자들만으로 완벽하게 결합된 그래핀은 이상적인 재료라고 할 수 있다. 인장 강도 100GPa, 탄성계수 1TPa이고 탄성변형도 20%에 다이아몬드와 같은 우수한 열전도도를 가지고 있으며 전기도 잘 통한다. 다만 크기가 작아 고분자, 금속 등과 혼합해 전기가 통하는 고분자, 열전달이 잘되는 성형재, 강도가 높은 구조재 등으로 만들어진다. 이를 나노탄소복합재라고 한다. 현재 기술로는 나노탄소들을 금속 등의 재료에 균일하게 혼합하기 어려워 나노탄소분산복합재를 대규모로 생산하는 수준에는 이르지 못했다. 그러나 추후 기술 개발을 통해 안정적인 대규모 생산이 가능하리라 여겨진다.

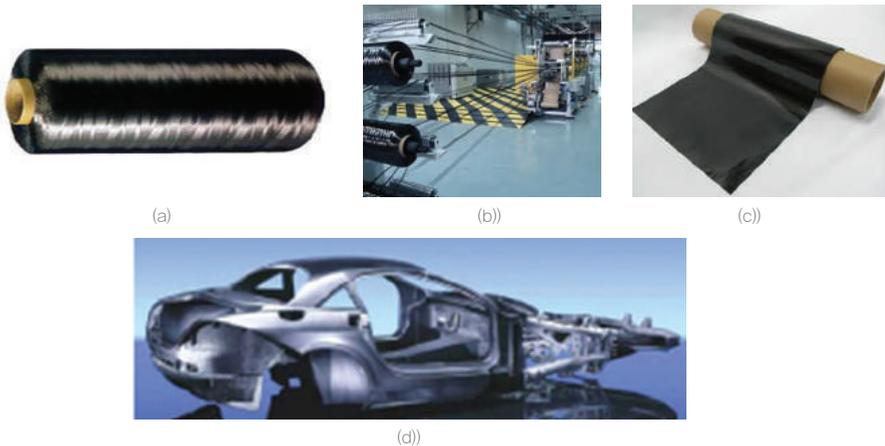
이런 나노탄소복합재 외에도 탄소섬유강화복합재가 있다. 먼저 탄소만으로 직경 10 μ m 이하의 섬유를 만들고, 이를 천으로 짠 후, 고분자를 침투시켜 천과 같은 형태

로 만들어야 한다. 이를 재단하고 덧붙여 형태를 만든 후 고온, 고압에서 고분자수가 치밀하게 침투해 단단한 형태로 만든 것이 탄소섬유강화복합재이다. 탄소섬유강화복합재로 만든 승용차 차체는 철강으로 만들었을 때보다 무게가 1/4에 불과하다. 무게의 감소로 인한 연료절감효과 외에도 탄성계수 증가 및 감쇠(damping) 효과가 증가하여 충돌 시 안전도가 커지고 차량 진동이 줄어든다.

탄소복합재의 속제들

나노탄소복합재는 금속에 비해 가볍고 강하다는 장점이 있으나 가격이 아주 비싸다. 탄소섬유강화복합재의 원료인 산업용 탄소섬유의 가격은 1kg당 2만 5,000원 이상으로 알루미늄의 10배가 넘는다. 탄소섬유강화복합재의 가격 역시 용도에 따라 다르나 탄소섬유 가격의 5배 정도여서 탄소복합재가 널리 활용되는 데 걸림돌이다. 따라서 가격을 낮추기 위한 기술 개발이 시급하다.

가격을 낮추기 위한 가장 일반적인 방법으로 값싼 탄소 원료를 사용하는 방안



(a) 탄소섬유, (b) 탄소섬유를 천으로 짜는 모습, (c) 탄소섬유로 만든 천 형태의 프리프레그(Prepreg), (d) 탄소섬유강화복합재로 만든 자동차 골격.



탄소섬유는 가볍지만 강도가 높고 탄성이 좋아서 자동차 차체에 활용하면 성능 향상을 기대할 수 있다. 그러나 아직 가격대가 높아 고급차량의 옵션이나 별도의 튜닝용 제품으로 판매되며, 그마저도 고급스러운 장식을 위한 외장재 소비가 많은 편이다. 사진은 영국의 슈퍼카 브랜드인 맥라렌 P1 모델의 탄소복합재 차체. 금속 강판을 사용할 때에 비해 무게를 크게 줄일 수 있다. © McLaren

이 있다. 하지만 값싼 탄소 원료는 불순물이 많고 육각형 탄소결합도 불충분하다는 단점이 있다. 이러한 단점을 해결하는 데 필요한 기술이 불순물 제거 및 탄소결합에서 결합 제거와 규칙도 향상을 쉽게 하는 것이다. 미국 오크리지국립연구소 ORNL에서 플라즈마를 활용해 탄소섬유를 저렴하게 제조하는 기술을 개발하고 있으며, KIST 전북분원 복합소재연구소에서도 유사한 연구를 진행하고 있다. 특히 폐목재를 원료로 하여 탄소섬유를 만드는데 도전하고 있다. 석유관련 업체에서도 원유정제 부산물인 피치를 원료로 고강성의 탄소섬유를 개발 중이다.

또 하나의 방법이 탄소섬유, 나노탄소와 고분자수지와의 복합재를 만드는 공정 비용을 절감하는 것이다. 탄소섬유강화복합재 부품을 만들기 위해 고온, 고압에서 2시간가량 유지해야 하는데, 이 시간을 줄여서 비용을 절감할 수 있다. 최근 일본

업계에서 이를 10분 정도로 단축시킬 수 있는 새로운 공정 기술을 개발했는데, 향후 금속 성형 공정과 경쟁할 수 있도록 이를 1분 정도까지 줄이고자 노력하고 있다.

유럽에서는 이와는 다른 방식으로 문제를 해결하려 한다. 고온에서 액체와 같은 유동 상태가 되는 열가소성수지를 이용해 탄소섬유강화복합재를 만들 수 있는 기술을 개발한 것이다. 이 기술을 적용하면 연속공정이 가능해서 제조가격을 대폭 절감할 수 있다. 우리나라에서도 KIST 전북분원을 중심으로 탄소섬유와 접착이 잘 되고 액상의 유동도가 큰 열가소성고분자수지를 개발해 탄소섬유복합재가 널리 사용될 수 있도록 노력하고 있다.

또 하나의 숙제는 금속 등 다른 재료와의 접합이 쉬워야 하는 점이다. 탄소복합재는 접합 부위가 취약해 다른 재료와 접합 자체가 잘되지 않는다. 특히 금속과 탄소 접촉하는 경우, 사용 중에 금속 부위가 급격히 부식되는 문제가 있다. 현재 탄소복합재의 접합을 최소화한 일체형으로 모듈화하여 조립하는 방식으로 부품을 설계하고 있으나 궁극적으로는 빠르고 신뢰성 높은 접합 기술이 개발돼야 할 것이다.

완전 재활용 여부도 중요하다. 완전 재활용이란 재활용을 해도 재료가 손실되지 않고 물성도 그대로 유지돼야 하는 것을 의미한다. 금속의 경우 완전 재활용에는 못 미치나 상당한 수준으로 재활용되고 있다. 탄소복합재는 아직 재활용에 대한 기술 개발이 미흡한 상태로 탄소섬유복합재를 아주 작게 조각을 내어 재활용하는 수준에 불과하다. 최근 고분자수지의 물성을 변화시켜 복합재에서 탄소섬유를 재활용할 수 있는 기술을 개발한 바 있어 관련 산업체에서 관심을 보이고 있다.

탄소복합재의 또 하나의 숙제로 균일 분산과 함께, 탄소와 기저 재료의 표면 반응에 의한 슬립(摺動, sliding)의 문제가 있다. 이 때문에 현재 고분자수지 기반의 탄소복합재만 상용화되고 있다. 슬립 문제가 해결돼 금속 및 세라믹 기반의 탄소복합재를 대량으로 생산할 수 있다면 그 활용도는 대폭 늘어날 것이다. 이를 위해 필요한 것이 금속 내에 나노탄소 또는 탄소섬유가 자발적으로 균일 분산되게 할 수 있는 기술이



버려지는 탄소섬유는 잘게 잘려서 다양한 구조물의 보강재로 사용된다. 독일의 자동차회사, BMW에서 생산하는 i시리즈의 좌석에도 이렇게 재활용된 탄소섬유가 활용된다. 최근에는 탄소섬유 폐기물을 다시 섬유 형태로 재생하려는 연구도 한창이다. © BMW

다. 또한 탄소와 금속에 습동이 생기더라도 결합할 수 있게 하는 기술도 개발해야 한다. 금속과 탄소는 밀도차이가 커서 혼입이 안 되고 계면 반응에 의한 결합도 일어나지 않기 때문에, 탄소와 금속의 결합 방법은 기초 원리부터 규명하는 장기 연구 과제로 진행돼야 한다. 금속 분말과 혼합하는 연구는 지속적으로 추진되고 많은 연구결과가 발표되고 있으나 자발적인 분산이 아니기 때문에 첨가량에 제한이 있다. 또한 균일 분산이 쉽지 않고 비용도 상당해 아직은 산업체에서 활용하기에는 어려운 실정이다.

자동차, 항공기... 탄소복합재 전망은 밝음

최근 미국, 유럽, 일본 등에서 많은 연구자들이 관심을 갖고 연구에 매진하고 있는 대상이 바로 그래핀이다. 2004년 영국 맨체스터대 [University of Manchester](#) 안드레 가임

Andre Geim과 콘스탄틴 노보셀로프Konstantin Novoselov 교수가 그래핀을 처음 발견한 이후 단 6년 만인 2010년 노벨물리학상을 받았다는 점은 그래핀이 얼마나 혁신적인 소재인지를 잘 보여준다. 영국을 시작으로 EU, 미국, 일본 그리고 우리나라에서도 본격적인 그래핀 연구를 시작한 것이 2013년이니, 노벨상을 수상한 기초 연구 내용을 산업화하기 위한 연구가 이렇게 빠르게 진행되는 것도 유례가 없다.

그래핀 결합 제어기술을 비롯해 다른 재료와의 복합을 통한 물성 제어기술 그리고 양산 기술이 성공적으로 개발된다면 탄소복합재 산업도 획기적으로 발전할 수 있다. 나노 분석 기술과 제어기술의 발달로 5년 내 상업적 적용이 가능할 것으로 예측되는 가운데 많은 연구비가 투입되고 있어 전 세계 기업들의 관심과 기대를 받고 있다.

앞으로의 전망도 밝다. 현재 새로 생산되는 대형 민간항공기 재료의 50% 정도가 초고강도 탄소섬유강화복합재다. 또한 승용차 경량화와 플러그인 전기자동차의

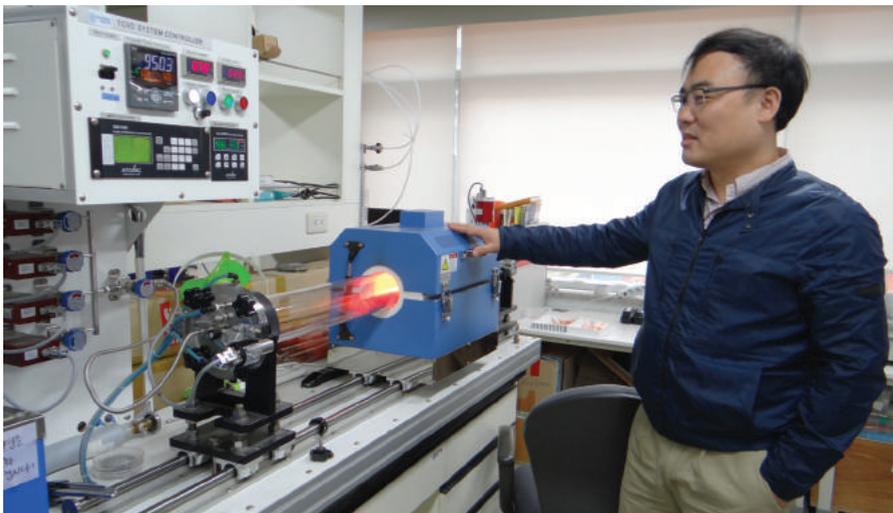


그래핀은 첫 발견 이래 급속도로 상업화 시도가 이루어졌다. 현재 그래핀 자체에 대한 인기는 시들해졌지만 그래핀 연구 과정에서 얻은 정보를 다양한 소재에 적용함으로써 소재기술의 전반적인 발전이 이루어졌다. 사진의 인물은 그래핀 발견 공로로 노벨상을 수상한 콘스탄틴 노보셀로프(왼쪽)로 영국 맨체스터대에서 영국 재무장관 조지 오스본과 함께 세계 최초의 그래핀 전구를 보고 있다. © University of Manchester

상용화에 따라 산업용 탄소섬유강화복합재의 수요도 폭증이 예상된다. 이에 탄소 섬유제조업체들이 설비를 증설해서 전 세계 생산량이 수요량의 두 배를 넘어설 정도로 산업이 확대됐다. 국내 업체들도 공장을 신설해서 국내 수요의 세 배 이상을 생산하고 있다. 이에 따라 공급량이 늘어난 결과, 산업용 고강도 탄소섬유의 가격이 자동차업체에서 요구하는 가격에 근접한 수준으로 떨어졌다.

한편 독일 자동차업체에서는 탄소섬유강화복합재로 자동차 부품을 대량 생산할 수 있는 기술을 개발했다. 현재 양산형 전기자동차가 제작돼 2014년도에 시판됐으며 고급승용차에도 본격적으로 적용되고 있다. 국내 자동차업체에서도 2020년 전에 실제 생산분에 적용하기 위해 관련 기술을 연구 중이다.

이처럼 탄소복합재 사용이 많아지는 추세이긴 하지만 현재 기술로는 품질이 균일하면서도 결함을 제어한 그래핀, 탄소나노튜브 등을 양산하기 쉽지 않다. 이 때문에 탄소나노튜브의 보급은 기대보다 더딘 편이다. 탄소나노튜브에 대한 많은 연



국내에서도 그래핀을 비롯한 탄소 기반의 2차원 소재에 대한 연구가 활발하다. 그래핀 응용 분야의 주요 연구자 중 한 명인 홍병희 서울대 교수는 2차원 물질 대면적 합성장비를 개발해 별도의 기업으로 독립시키기도 했다.

구가 진행됐고 저품위 탄소나노튜브의 가격도 충분히 하락하기는 했지만 아직 시장이 작다 보니 세계 최대의 생산 규모를 갖고 있는 국내 업체도 어려움을 겪고 있는 실정이다.

그래핀의 경우도 아직도 연간 수 톤 정도를 생산하는 업체들만 있다. 활용 기술도 아직 기초적인 수준에 머물러 있는 데다 그래핀 자체의 활용성에 대한 회의론도 나오고 있어 다른 재료와 융합해 사용하기 위한 기초기술 연구에 더욱 매진해야 하는 상황이다.

탄소섬유강화복합재의 경우는 기존 탄소섬유를 만드는 원료 자체가 비싸다. 비용을 줄이려면 원료의 순도를 높이고 탄소섬유 공정에서 결합과 불균일도를 제어하는 기술을 확보해야 하지만 현재 관련 업계가 기술 공개보다는 보호를 선택해 다양한 연구에 어려움이 많다. 특히 탄소섬유 산업은 대규모 투자가 선행돼야 하는 설비산업이라 도전적인 신생기업이 참여하기에는 장벽이 높다. 자연히 안정성 위주로 경영이 이루어지다 보니 다양한 아이디어가 구현되기 어려워서 혁신적인 기술 개발이 쉽지 않다.

탄소섬유강화복합재의 또 다른 중요한 기술인 열가소성수지 분야에서도 어려움이 있다. 기계적 물성이 우수하면서 균일한 품질의 탄소섬유강화복합재를 빠르게 만들려면 저점도수지를 개발해야 하지만, 고분자수지의 한계로 인해 어려운 상태다.

고분자 기반의 복합재 시장을 획기적으로 확대할 수 있는 금속 기반 복합재에 대한 연구도 난항이다. 자발적 분산과 표면 반응이 근본적으로 해결되지 않기 때문이다. 현재로서 산업화는 어렵다고 볼 수 있으며, 산업계에서도 검토만 하고 있다.

가격 15%만 절감돼도 수요 2배 이상 증가

우리나라는 2014년부터 연간 5,700톤의 고강도 탄소섬유를 양산하고 있다. 조만간 연간 1만 톤 이상을 생산할 수 있을 것으로 보인다. 탄소섬유를 바탕으로 탄소

섬유복합재를 만들면 10배 정도의 부가가치가 생기는데, 1만 톤의 탄소섬유를 이용해 국내 기업들이 탄소섬유복합재를 만든다면 2조 4000억 원을 상회하는 매출을 올릴 것으로 기대된다.

탄소나노튜브도 소량이나마 생산되고 있다. 국내 기업을 포함한 4개 회사 정도가 연간 400톤을 생산하고 있다. 특히 자동차 부품으로 탄소나노튜브 분산 고분자, 정전기 방전용 고분자 등을 사용하기 시작하면서 국내에만 6~7개 기업이 탄소나노튜브 양산을 개시했으며 투명 전극에 사용할 수 있는 고품위 탄소나노튜브를 생산하는 기업들도 등장하기 시작했다.

그래핀은 아직 샘플 수준인 연간 5톤 정도를 생산하는 기업들만 다수 있는 실정이다. 하지만 기술 개발과 상업적 응용 가능성이 확인되면서 대기업을 중심으로 많은 기업들이 그래핀 제조 및 응용 분야에 뛰어들고 있다.

탄소섬유강화복합재의 경우 연간 16%씩 시장규모가 커지고 있다. 2015년에는 연간 7만 톤 정도의 탄소섬유가 사용된 것으로 보인다. 이 분야의 강대국은 중국이



한국은 탄소소재 분야의 상업화가 다소 늦은 편이다. 다행히 최근 들어 대기업들이 관련 시장에 주목하고 본격적인 양산 준비를 갖추면서 탄소소재 분야의 발전이 기대된다. 탄소소재는 관련 기술이 아직 개발중이라 성장가능성이 큰 분야다. 사진은 효성이 전주에 준공한 탄소섬유 공장. 연산 2,000톤 규모다. © 효성

다. 중국은 탄소섬유를 자체 생산하고 이를 사용한 탄소섬유강화복합재로 스포츠 용품을 만들어 세계 시장을 석권했다. 탄소섬유를 가장 많이 소비하고 있는 유럽 역시 풍력발전설비와 항공부품을 제조하고 있으며 북미지역은 항공산업과 고압가스 용기 등을 제조하는 데 탄소섬유복합재를 주로 사용하고 있다.

탄소복합재는 기존 소재보다 가볍고 강하므로 수송기기, 고압용기, 우주, 국방 등 많은 분야에 활용될 수 있다. 주로 기존 금속제품을 대체하는 대안 재료로 활용돼 가격이 15% 정도만 하락해도 수요가 2배 이상 증가할 수 있다. 이러한 이유로 저가의 탄소섬유를 개발하거나 탄소섬유강화복합소재를 제조하는 저가 공정 또는 생산성을 향상시키려는 기술 개발이 진행 중이다. 특히 탄소섬유의 가격을 현재의 1/2로 절감할 수 있는 기술을 개발한다면 자동차에 본격적으로 탄소섬유복합재를 적용할 수 있어 시장 규모가 현재의 수십 배 수준으로 급증할 수 있다. 지금도 장래에 확대될 시장을 선점하기 위한 경쟁이 치열하게 진행 중이다.

참고문헌



- A.Walker and D. Dunstan | Forecast for the composite industry 2013–2023
- Bernhard Jahn et al. | “Market developments, trends, challenges and opportunities”, “The global CRP market”, “The European GRP market”, “Carbon Composite”, *Composite Market Report* | 2012
- Toray Business Strategy for Carbon Composite Materials | 2012
- The Global Markets for Graphene to 2020, Graphene | 2013
- Growth opportunities in the Global Composites Industry | Lucintel | 2011

조소혜, 변지영 | KIST 물질구조제어연구센터

화장품부터 태양전지까지, 티타니아 나노소재





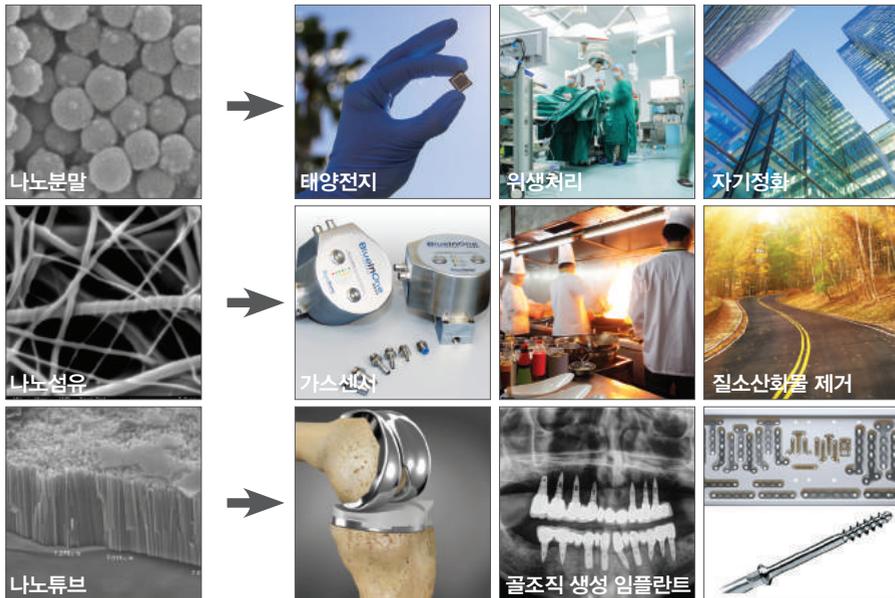
기반소재에서 핵심원천소재로

티타니아 분말소재는 백색 도료에서부터 제지^{製紙} 첨가제, 의약 및 식료품, 화장품에 이르는 다양한 분야에 활용되는 원천소재다. 현재 세계적으로 연간 약 700만 톤이 생산되고 있다.

티타니아 TiO_2 는 분말로 만들었을 때 입자의 직경이 수십 나노미터 수준으로 작아지며, 마이크론 크기일 때 나타나지 않던 새로운 성질이 나타난다. 자외선을 흡수하는 성질, 광촉매성, 초친수성과 같은 특성 덕분에 자외선으로부터의 보호를 필요로 하는 화장품, 의류, 포장재, 코팅제 등에 유용하게 쓰일 수 있다. 또 오염물의 분해 및 제거, 염료감응 태양전지, 유기 태양전지 등에서도 핵심적인 기능으로 작용한다. 따라서 티타니아 나노분말 소재는 환경 및 에너지 분야에 다양하게 응용하는 데 필요한 핵심소재라고 할 수 있다. 특히 자기정화 코팅, 화장품, 인쇄토너 등 생활소재에 사용되는 티타니아 나노소재는 나노제품 산업화 및 시장의 확대로 더욱 시장이 빨리 성장할 것으로 전망된다.

나노크기가 가져다 준 선물

3차원적으로 볼 때 적어도 한 변의 길이가 100nm 이하인 물질을 일반적으로 나노



티타니아 나노소재의 활용 분야.

© Deutsches Textilforschungszentrum Nord-West, Tai-Ping Sun et al. / Sensors, Kunal Mukherjee, Rongrong Cheacharoen / Stanford University, Zimmer Orthopedics, OSSEO source, Peter F. M. Choong et al. / Int. J. Mol. Sci., BlueSens, Osteotec Ltd.

재료라고 한다. 티타니아 나노재료는 자연에서 얻어지는 루타일(rutile) 원석을 인위적으로 가공해 한 번의 길이를 100nm 이하로 만든 것이다. 티타니아 나노재료는 박막, 막대형상, 기공체 등 여러 형상을 지닌다. 이를 활용한 티타니아 나노제품들은 이러한 소재들을 뭉쳐서 눈에 보이는 큰 수준의 벌크 재료로 만든 것이다. 따라서 나노제품은 얼핏 보면 일반제품과 크게 차이가 없으나 특정 분야에서 필요로 하는 특수한 성질을 갖고 있다. 다음은 나노소재를 활용한 제품들의 몇 가지 예시다.

(1) 오염방지 코팅제

티타니아 나노분말은 오염방지에 탁월한 효능을 가지고 있다. 건축물, 자동차 내·외장 제품 등에 얼룩이 생기지 않도록 하고 햇빛에 의한 빛 바램 현상을 방지

한다. 또한 세정을 용이하게 하기 위해 티타니아 나노분말을 사용하기도 한다. 이는 티타니아 나노분말의 광촉매 성질을 이용한 것이다. 티타니아 나노분말에 빛을 쬐이면 표면에 전자⁻와 정공⁺전하를 가진 전자와 같은 거동을 하는 입자^이 생긴다. 전자는 티타니아 표면에 있는 산소와 반응해서 슈퍼옥사이드 음이온 O_2^- 을 만들고 정공은 공기 속에 존재하는 수분과 반응해 하이드록시 라디칼 OH^{\cdot} 을 만든다. 이는 유기물질을 산화 분해할 수 있어 공기 속에 존재하는 먼지, 악취물질, 바이러스, 박테리아 같은 세균 등을 분해 제거한다. 따라서 건물 외벽, 공기 오염도가 높은 터널 내부, 가정용 마루 등의 표면에 티타니아 나노분말 코팅제를 사용하면 햇빛이나 실내광을 쬐어주는 것만으로도 오염물질을 자기 정화할 수 있다.

(2) 에너지 소재

티타니아 나노분말의 반도체 성질은 신·재생에너지 분야의 핵심 소재로 사용하기에 유용하다. 특히 염료감응 태양전지의 광전극으로 사용할 수 있다. 염료감응 태양전지는 식물의 광합성 작용을 모방해 만든 전지로, 빛을 흡수하는 염료와 이를 지지하는 티타니아 광전극, 전해질로 구성된 3세대 태양전지다. 태양전지 소재에서는 염료에서 발생된 전자를 효율적으로 전달하기 위해 $50m^2/g$ 이상의 높은 비



자기정화 유리창

PPG Industroes
Asahi Glass
Nippom Sheet Glass 등



자기정화 터널

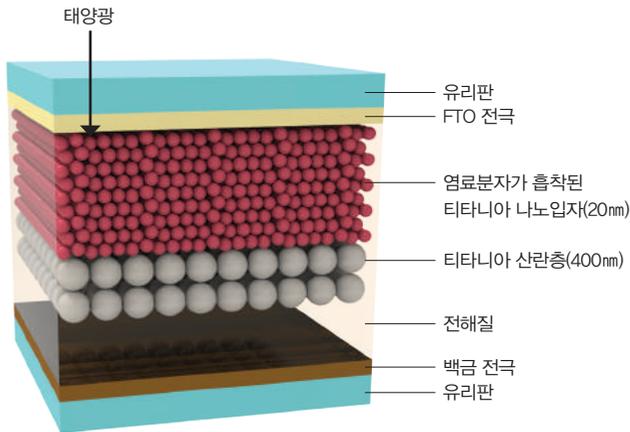
Södra länken 터널
스웨덴 소재



자기정화 마루

한솔홀데코

티타니아 나노소재의 오염 방지막을 적용한 예



염료감응 태양전지의 구성.

표면적이 필요하므로 30nm 이하의 초미세 티타니아 나노입자를 사용한다.

(3) 화장품 소재

티타니아 나노분말은 산화아연(ZnO) 나노분말과 함께 자외선 차단제로도 널리 사용된다. 자외선을 잘 흡수할뿐 아니라 투명도가 높고, 질감이 부드럽기 때문이다. 자외선 차단용 화장품은 국내에서 기능성 화장품 중 미백 화장품과 더불어 최다 승인 품목이다. 여기에 최근 오존층의 파괴에 따른 피부 손상 문제가 크게 대두되면서 자외선 화장품의 인기가 더욱 높아지고 있으며, 관련 시장 또한 확대될 전망이다. 특히 티타니아는 자외선 B 영역(280~320nm)에서 우수한 자외선 차단능력을 보여 자외선 차단제로 우수한 성질을 지닌다. 티타니아의 형상이나 성상, 입자 크기 등을 제어해 더 성능이 우수한 신제품을 만들 수도 있다. 특히 직경 30nm 이하인 초미세 입자와 구형화, 루타일상 비율 향상 등으로 고품질 화장품용 티타니아 분말의 스펙이 제시되어 관련 연구도 이에 맞추어 진행되고 있다.

(4) 인쇄토너

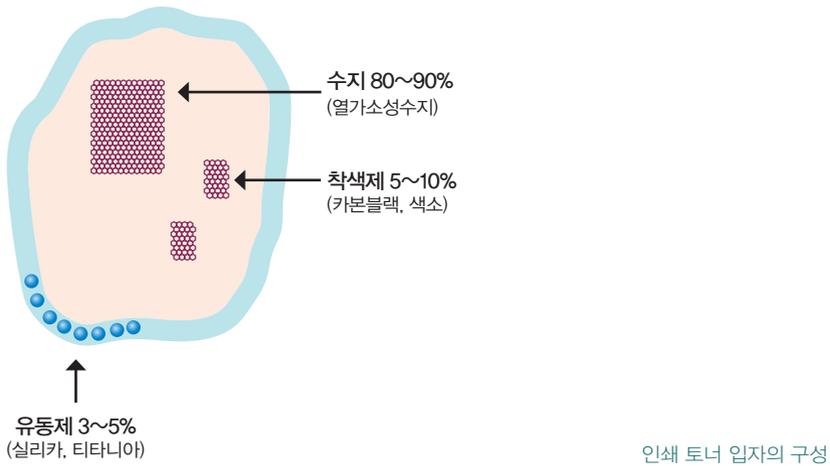
인쇄토너는 크게 분쇄토너와 증합토너로 구분할 수 있다. 분쇄토너는 합성수지와 착색제, 첨가제를 녹여 혼합한 덩어리를 분쇄해서 원하는 크기로 만든 것이고,

중합토너는 화학합성^{중합}을 통해 입자의 크기와 모양을 원하는 대로 조절해 만든 것이다. 따라서 분쇄토너는 표면이 거칠고 입자 크기가 불균일한 반면, 중합토너의 입자는 크기가 작고 균일하며 표면도 매끈하다. 그래서 중합토너는 인쇄 시 분쇄토너보다 선명하며 높은 해상도를 제공한다. 중합토너에는 유동성을 높일 목적으로 외첨제가 사용되는데, 이는 유동성 향상 기능뿐만 아니라 하전 특성의 향상, 전사효율, 클리닝성 향상과 같은 역할도 한다. 따라서 인쇄의 전사 효율을 높이기 위해 중요한 것 중 하나가 고성능 토너 외첨제의 사용이다. 현재 유동화제로 주로 사용되는 외첨제는 실리카 흡^{humed silica}이며, 하전 조절제, 클리닝제 등은 그 외에도 티타니아, 알루미늄 등이 사용된다.

그런데 최근 구형의 티타니아 나노입자를 토너입자 표면에 도포해 토너의 전사 효율을 향상시키는 방법이 개발되면서 고기능·고효율 토너를 제작하기 위한 초미세 구형 티타니아 외첨제가 급부상하고 있다. 초미세 구형 티타니아 외첨제를 사용한 인쇄토너는 높은 전사 효율^{printing efficiency}과 고해상도 프린팅^{high resolution printing}을 가능하게 해 고기능·고효율을 달성할 뿐 아니라 외부로 노출되는 토너입자의 양을 현저히 줄임으로써 친환경적 효과도 얻을 수 있다.

물성제어로 새로운 시장 개척 가능

티타니아 소재는 공업적인 생산을 시작한 지 거의 100년이 지난 전형적인 범용 소재라고 할 수 있다. 산업적으로 기술이 매우 성숙돼 있을 뿐만 아니라 시장 또한 안정적으로 성장하고 있다. 고품위 원광석^{ilmenite}을 생산하는 국가들로부터 세계적인 티타니아 소재의 생산업체, 활용업체에 이르기까지 가치사슬이 잘 정립돼 있다. 그런데도 1980년대 이후 티타니아 소재가 다시 큰 각광을 받고 있는 이유는 티타니아 소재의 다른 가능성 때문이다. 미크론 크기의 기존 티타니아 분말과는 달리 티타니아 나노분말은 이제까지와는 다른 유용한 기능들을 나타낸다.



국내에서는 황산법으로 티타니아 일반분말을 생산하는 코스모화학은 제외하면 대규모 생산시설을 갖춘 업체는 없다. 다만 광촉매 도료용이나 염료감응 태양전지 광전극용 티타니아 나노분말을 제조하는 몇몇 중소기업이 있다. 코스모화학은 황산법으로 마이크론 크기의 분말을 연간 6만 톤 생산 중이며, (주)나노신소재는 졸-겔 법으로 광촉매용 나노분말을 제조하고 있다. (주)캠웰텍은 광촉매나 염료감응 태양전지의 광전극에 사용하는 나노분말을 제조하며, 석경AT에서는 급속가열법으로 만든 나노분말을 내놓고 있다.

연구개발 부문에서는 세종대학교가 분무열분해법 *spray pyrolysis*으로 티타니아 나노분말을 대량으로 제조할 수 있는 기술을 개발한 바 있다. KIST는 기상반응법인 화염법 *flame method*으로 염료감응 태양전지 광전극용 티타니아 나노분말, 화장품이나 컬러토너 외첨제에 적합한 구형 단결정 티타니아 나노분말을 대량으로 제조할 수 있는 기술을 개발했다. KIST는 또한 티타니아에 천이금속 원소와 질소, 탄소를 도핑할 수 있는 기술과 가시광 영역에서도 광촉매 특성이 탁월한 티타니아 나노분말 제조 기술도 개발했다. 최근에는 구형 단결정 티타니아 나노분말을 대량으로 제조할

수 있는 기술을 석경AT에 이전했으며 2016년부터 본격 생산에 들어갈 예정이다.

실제 제조현장에서 티타니아는 그 원재료부터 산업적으로 활용 가능한 최종제품이 되기까지 몇 가지 처리 단계를 거친다. 물성이 제어된 원재료분말의 합성제조 → 중간재분말입자의 분산 → 최종제품분산액, 코팅막, 성형체(담체), 멤브레인 등 → 산업적 활용이 그것이다. 이 가치사슬이 원활히 이어지기 위해서는 경제성을 갖춘 티타니아 나노분말의 합성 기술, 티타니아 나노분말을 용도에 맞게 유연하게 적용할 수 있도록 중간재를 제조하는 공정분산, 성형, 코팅, 소결 기술이 효율적으로 확보되어야 한다.

차별화된 고품질 티타니아 나노소재 개발이 숙제

우리나라는 티타니아 나노소재의 소비량은 많지만 티타니아 나노분말 소재 산업의 기반은 거의 없다. 산업 측면에서 우리나라는 기술 개발 초기에 있다고 할 수 있다. 세계 시장에서 경쟁력을 갖기 위해 고품질 티타늄 전구체의 국산화가 반드시 동반되어야 한다. 티타니아 소재는 ‘원료-소재-부품-완제품’의 가치사슬을 갖고 있어 고품질 티타니아 나노소재를 생산하려면 고순도의 원료를 공급해야 하고, 이를 통해 고급 제품을 생산할 수 있다. 그러나 우리나라는 티타늄관련 정밀 화학산업이 발달하지 못해 고품질 티타니아 소재를 제작하기 위해서 고가, 고순도의 티타늄 전구체를 수입해야 하는 실정이다. 2012년 기준 티타늄계 화합물질 수입량은 6,000톤에 달한다.

우선적으로 연구돼야 하는 분야는 원료 물질 개발 분야다. 티타니아 나노분말 수요가 증가하면서 세계적으로 원료 가격이 상승하고 있다. 따라서 원료를 전량 수입에 의존할 경우 새로운 원료전구체가 없으므로 새로운 티타니아 나노소재의 제조가 어렵고 원가를 일정 수준 이하로 낮출 수 없는 문제점이 있다. 따라서 물질을 더 경제적으로 제조하는 기술을 적어도 기존 업체와 경쟁이 가능한 수준으로 개발할 필요가 있다.



티타니아 최종제품을 위한 처리 단계

티타니아 나노소재용 원료물질 제조 기술을 전략적으로 개발하는 것도 또 다른 선택으로 고려할 수 있다. 새로운 용도를 가진 티타니아 나노소재는 기존의 대형 업체들과 경쟁할 필요가 없으므로 산업화에 성공할 가능성이 있다.

두 번째로 연구해야 할 분야는 선진업체들과 차별화된 특성을 가진 티타니아 나노소재 제조기술을 개발하는 것이다. 선진업체들은 오랜 기간에 걸쳐 제조 공정을 최적화했을 뿐만 아니라 설비비용을 상당 부분 회수했기 때문에 충분한 가격 경쟁력을 갖고 있다. 따라서 우리나라는 선진업체들이 제조하지 못하는 특수한 티타니아 나노소재를 개발해 새로운 시장을 창출하거나 틈새시장을 뚫고 들어갈 수밖에 없다. 예를 들어 가시광 영역에서 반응성이 뛰어난 티타니아 광촉매나 수소 제조 능력이 뛰어난 티타니아 나노소재 개발 등이 목표가 될 수 있을 것이다.

융합 통한 새로운 영역 개척 필요

우리나라가 티타니아 나노소재 산업에서 세계적인 경쟁력을 갖추기 위해서는 고품질의 특수 티타니아 나노소재를 활용하는 새로운 영역을 찾아내야 한다. 새로운 응용 분야는 아마도 다른 영역과의 융합에서 나올 것이다. 국내 나노기술이 최근 10여 년간 선진국 수준으로 향상됐으므로 티타니아 나노소재가 여러 분야의 나노기술과 융합돼 큰 성과를 낼 가능성이 충분하다.

다만 국내 정밀화학 산업이 미흡한 실정에서 원료를 국산화하기 위한 정부의 지

원이 적극 요구된다. 최근 이러한 필요성을 인정해 티타늄 종합 육성산업이 2015년부터 본격 진행되고 있다. 이 산업은 티타늄 함유 원석으로부터 사염화티타늄을 추출해 국내 정밀화학 산업을 육성하는 것을 목표로 한다. 또 이를 이용한 금속, 세라믹 분야 산업의 성장도 중요한 목표다.

문제는 최근 나노소재 산업에 대한 규제 강화가 제약으로 작용할 수 있다는 점이다. 티타니아 나노소재의 경우 인체나 환경에 안전한 것으로 알려져 있으나 노출 정도나 노출 환경에 따라 달라질 수 있는 소지가 있다. 이 때문에 무조건 규제할 것이 아니라 안전 확보를 위해 체계적인 기준을 확립해야 한다.

티타니아 나노소재는 이미 성장기에 접어든 기술이긴 하지만 최근 유망한 분야들이 필요로 하는 물성을 확보하고 있지 못한 경우가 많다. 기초연구 측면에서는 새로운 나노구조를 갖는 티타니아를 계속 개발해서 새로운 특성 혹은 용도를 창출할 필요가 있다. 예를 들어 특정 결정면을 발달시킨 티타니아 입자를 합성해 염료 분자의 흡착속도와 흡착량을 증대시키면 염료감응 태양전지의 효율을 높이고 공정에 소요되는 시간을 줄일 수 있다.

티타니아 나노분말 시장 중 가장 큰 부분을 차지하는 광촉매 분야도 연구할 부분이 남아 있다. 현재 전체 태양광 중 에너지가 큰 자외선 영역에서 반응하는 광촉매 효율을 더욱 높이는 것과 함께 태양광의 대부분을 차지하는 가시광 영역에서 효율적으로 동작하는 광촉매를 개발하는 것이 큰 숙제다. 가시광에서 동작하는 티타니아 광촉매가 개발된다면 관련 산업이 폭발적으로 성장할 것이다.

참고문헌

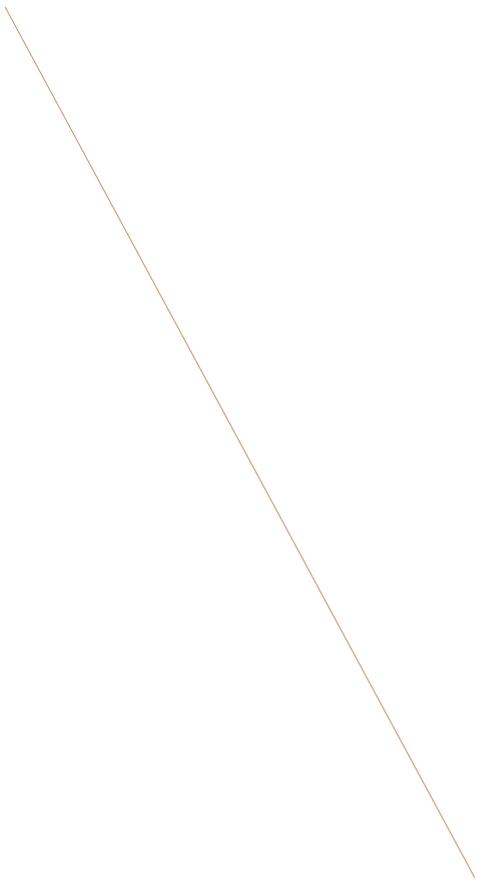


- The World Market for Nanoparticle Titanium Dioxide (TiO₂) | Future Market Inc | 2011
- 한국산업기술평가관리원 | 웹진 | 2013
- C.O. Robichaud et al. | Estimates of upper bounds and trends in nano-TiO₂ production as a basis for exposure assessment | Environ. Sci. Technol. | 2009





K I S T 과학기술전망 2016



Chapter 5

빛의 과학

IT 다음엔 빛의 시대!

박세형 | KIST 바이오닉스연구단



광기술은 빛의 특성을 파악하고 응용하는 분야다. 빛을 직접적으로 사용하는 조명, 광통신, 레이저, 디스플레이뿐 아니라 자동차, 에너지, 나노, 조선, 농생명, 건설, 의료기기 등과 관련된 거의 모든 산업분야에서 활용되고 있다.

에디슨^{Thomas Alva Edison}이 1879년 백열전구를 발명한 이후 주로 조명에 쓰이던 광기술은 1934년 음극선관^{CRT} 기술의 개발로 텔레비전이 출현하면서 디스플레이 분야에 쓰이기 시작했다. 이후 1970년 코닝^{Corning}에서 광섬유 실용화에 성공하면서 광 응용기술은 통신분야에 혁신을 가져왔다. 최근에는 반도체 레이저, 광 다이오드, 광센서 등이 실용화되면서 응용분야가 의료, 자동차 등 전 산업으로 확대되고 있다.

세계 광산업 시장규모는 2010년 기준 3,800억 달러로 매년 약 8% 성장해 2020년 8,900억 달러에 달할 전망이다. 국내 광산업 시장은 2010년 359억 달러로 세계 시장의 9.3%를 점유하고 있다^{광산업 발전을 위한 정책과제, 2011년, 지식경제부}. 향후 광기술



생산단가가 낮아지면서 LED는 매우 빠른 속도로 기존의 광원들을 대체하고 있다.

이 많은 분야에서 전자기술을 대체하거나 보완해 나갈 것으로 예측된다.

이번 장에서는 광기술 응용분야 중 조명, 통신 등 보편화된 분야를 제외하고 레이저와 디스플레이 분야에서의 최근 기술을 살펴보았다. 그중 레이저기술은 2000년대 이후 광섬유 레이저가 실용화되면서 최근 광섬유 레이저가 빠르게 기존의 고체 및 기체레이저를 대체하며 새로운 전환기를 맞고 있다. 이에 광섬유 레이저의 현황과 문제점, 시장 및 기술을 전망해 보았다.

디스플레이 기술은 액정디스플레이LCD기술이 개발되고 발광다이오드LED 백라이트가 도입되면서 고해상도가 가능해졌다. 고해상도의 디스플레이 기술은 3차원 입체영상을 안방에서 볼 수 있는 단계로 발전시켰다. 이에 3차원 입체영상 중 차세대 기술인 무안경 입체영상의 현황 및 미래를 전망해 보았다.

앞서 언급했듯이 광기술은 다양한 산업 분야에 융합되어 응용되고 있다. 그중 최근 가장 혁신을 일으키고 있는 분야는 의료다. 마지막으로는 의료분야 적용의 한 예로 빛을 이용해 일상생활 중 뇌의 활동을 감지하는 근적외선 분광기술과 확산광 영상법 기술을 살펴봤다. 이를 통해 광기술이 향후 어떻게 여러 산업 분야에서 응용될지 가늠해 볼 수 있을 것이다.

이관일, 이상배 | KIST 나노포토닉스연구센터

의료 수술에서 3D 프린터까지, 영역 넓어지는 광섬유 레이저





우리 삶 곳곳에 스며든 레이저

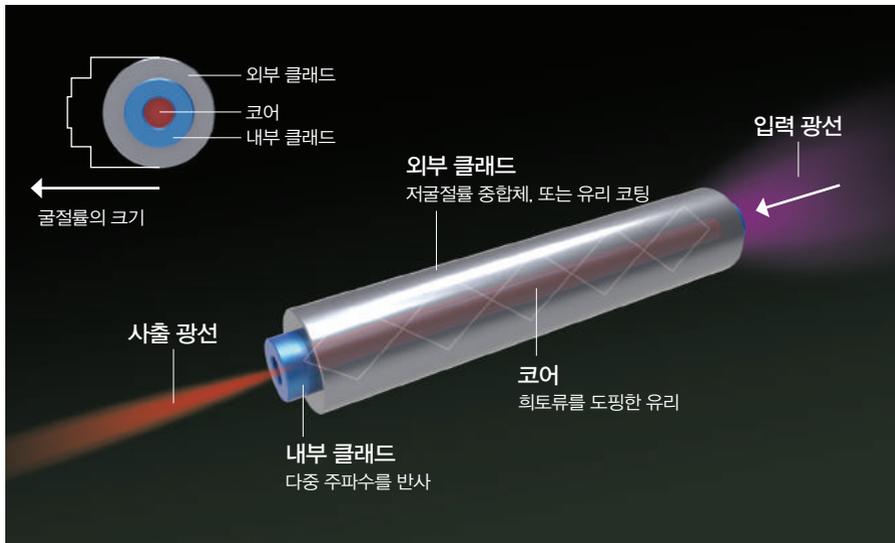
레이저가 세상에 나온 지도 55년이 지났다. 레이저는 이제 초고속 광통신, 바코드 스캐너, 프린터, DVD 플레이어 등 일상생활 곳곳에서 사용되고 있다. 최근에는 병원에서도 레이저를 많이 이용한다. 정교한 움직임이 가능해지면서 수술용 칼 대신 레이저를 절개에 사용하는 경우가 늘어나고 있다. 출혈이 훨씬 적기 때문이다. 또한 안과에서는 시력 교정, 피부과에서는 점을 빼거나 흉터를 제거하는 데 사용하고 치과에서도 충치 치료에 활용한다. 산업 현장에서도 레이저는 유용하다. 반도체나 디스플레이 산업에서의 레이저 마킹 및 패터닝, 자동차·선박·기계 산업에서의 고정밀 가공, 절단, 용접 등 많은 분야에서 레이저가 활약한다.

레이저는 활용분야에 따라 다양한 종류가 사용된다. 그중 최근 주목받고 있는 것이 광섬유 레이저다. 광섬유 레이저는 고출력 여기용 반도체 레이저와 레이저용 광섬유의 비약적인 발전을 바탕으로 기존의 고체레이저와 기체레이저를 빠르게 대체하고 있다. 이는 광섬유의 구조적인 특성에서 오는 우수한 빔품질, 높은 효율, 저손실, 효과적인 열 발산 등의 장점이 있기 때문이다. 또 광섬유에 첨가되는 희토류 원소 종류에 따라 다양한 발진 파장 구현도 가능하다.

광섬유 레이저는 1964년 스니처E. Snitzer가 실험 논문을 통해 최초로 발표한 기술

이다. 하지만 스니처도 광섬유 레이저에 대한 정확한 개념은 확립하지 못했고, 본격적인 개발이 이뤄진 것은 약 20년이 지난 후에야 가능했다. 1985년 영국 사우스햄턴대 University of Southampton의 타운센드 J.E.Townsend가 액상 용액 첨가법으로 단일모드 광섬유 코어에 쉽게 희토류 금속을 첨가하는 법을 발표했다. 이를 기점으로 광섬유 레이저 기술이 본격적으로 연구되기 시작했으며, 이 방식은 현재까지도 가장 널리 쓰이는 방법이다.

현재의 고효율 광섬유 레이저 구현을 가능하게 한 이중클래딩 광섬유 기술은 2000년 이후 구현됐다. 1988년 광섬유 레이저의 아버지인 스니처가 발표했으나



현재 일반적으로 사용되는 이중클래딩 광섬유의 구조.

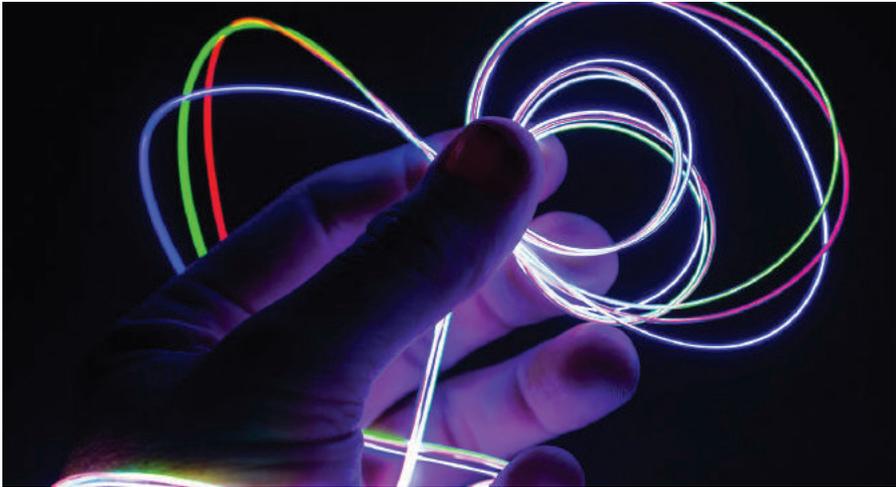
첨가원소	어븀	이터븀	네오디뮴	툴륨	홀뮴	디스프로슘
	(Er)	(Yb)	(Nd)	(Tm)	(Ho)	(Dy)
발진파장 (μm)	0.55 1.5-1.6 2.7	1.0-1.1	0.9-0.95 1.03-1.1 1.32-1.35	0.8 1.45-1.53 1.7-2.1	2.1 2.8-2.9 3.95	2.9

광섬유에 첨가하는 희토류 원소와 발진 파장.

여기용 광섬유 레이저 출력의 한계로 그간 개발이 미뤄져오다가 관련 기술이 발달되며 본격적으로 구현이 가능해진 것이다.

광섬유 레이저는 일반레이저처럼 가스관이나 크리스탈을 이득매질로 사용하지 않고 코어부분에 희토류 원소를 첨가해 이득매질로 사용한다. 첨가하는 희토류 원소로는 어븀Er, 이터븀Yb, 툴륨Tm, 네오디뮴Nd, 홀뮴Ho 등이 있으며 서로 다른 원소를 동시에 첨가하기도 한다. 첨가된 원소에 따른 광섬유 레이저의 출력 파장은 표에서 확인할 수 있다.

광섬유의 구조는 마치 샌드위치를 말아놓은 것 같은 모양새다. 단일 스트립 레이저 다이오드나 다이오드 스택다열 스트립으로 구성된 여기광勵起光을 이득매질active medium인 광섬유의 내부클래딩에 입사시키면 여기광이 나아가며 희토류 원소가 첨가된 코어부분을 건드린다. 이 과정에서 희토류 원소의 전자를 여기시켜 밀도 반전을 일으키게 되고, 윗 준위의 여기된 전자가 바닥상태로 전이하면서 특정 파장의 빛을 낸다.



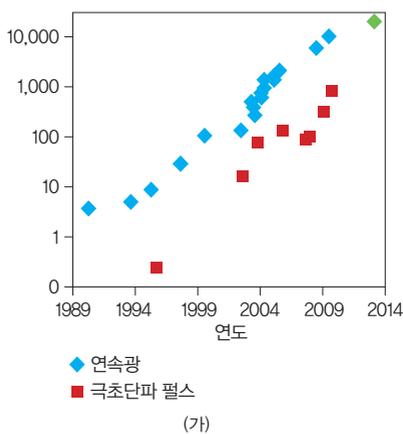
광섬유 속을 비추는 연속광 레이저. 최근의 광섬유는 다양한 파장의 빛을 동시에 전송할 수 있어 전송용량이 크게 늘어났다. © Corning

이 과정에서 희토류 첨가 광섬유의 양 끝 단에는 거울 역할을 하는 광섬유 격자가 사용된다. 일반적으로 하나는 고반사율, 다른 하나는 저반사율로 되어 있어 저반사율 쪽으로 레이저 출력 빛이 나온다. 광섬유 레이저는 공간적인 광소자 없이 광섬유 일체형으로 구성할 수 있어 정밀한 정렬이 필요 없다. 서로 연결만 하면 되기 때문에 안정적이라고 할 수 있다. 또한 레이저 빔이 광섬유 내에서만 진행되고 광섬유 공진기가 길어 고품질의 빔을 얻을 수 있다.

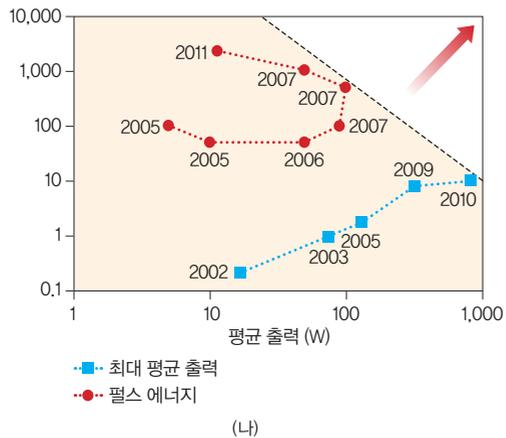
광섬유 레이저의 성능은 갈수록 상승하고 있다. 연속광 광섬유 레이저의 출력은 1990년대 초만 수 W에서 2009년 10kW로 증가했으며, 펄스레이저의 경우도 수 W에서 2005년 100W, 2009년 kW 수준으로 증가했다. 이는 고풍력의 여기용 레이저 다이오드와 이중 클래드 구조의 광섬유 덕분이다.

펄스초 레이저로 시력 향상

널리 알려진 시력교정 수술기법인 라식은 레이저를 이용한다. 먼저 각막 앞부분을



(가) 광섬유 레이저의 출력 증가 그래프. 2013년에는 20kW 연속광 광섬유 레이저가 출시됐다.



(나) 단일이미터-펄스초 광섬유 레이저의 펄스에너지와 평균출력의 발전 양상.

얇게 벗겨내어 절편을 만들어 젖힌 후, 수술 전 검사한 자료를 바탕으로 각막실질에 레이저를 조사해 각막을 목표한 만큼 깎아낸다. 이후 다시 각막 절편을 덮어주는 시력 교정 수술이 바로 라식이다. 근시 교정에서는 각막의 중심부를 절삭해 오목렌즈 형상을 만들고, 원시나 노안의 경우 주변부를 절삭해 볼록렌즈 형상을 만들어 교정하며, 난시교정에서는 난시축을 따라 각막 표면을 선택적으로 연마한다.

그런데 최근 이 라식수술에 펨토초 레이저를 도입하면 그 성과가 훨씬 좋아진다는 주장이 나왔다. 2014년 CNN 보도에 따르면 파면유도 라식수술을 개발한 독일 하이델베르크대Ruprecht Karl Universitaet의 요제프 빌레Josef Bille 박사는 파면유도맞춤형 라식수술에 펨토초 레이저를 도입하면 시력을 완벽하게 회복할 수 있다고 전했다. 그는 CNN과의 인터뷰에서 보통 시력보다 2배 좋게 할 수 있으며 특히 어두운 곳이나 안개나 비가 오는 환경에서는 5배 이상의 분별력을 갖게 할 수 있는 기술을



라식수술 장면. 레이저 기술 덕분에 이전에 비해 정교한 시술이 가능해졌다.

연구하고 있다고 밝혔다. 또 빌레 박사는 “펄토초 레이저의 극초단 결상된 빔을 이용하면 건강한 조직은 전혀 건드리지 않고 거의 개개의 분자를 제어할 정도로 정밀하게 시술이 가능하다”고 확신하며 이를 수많은 테스트로 확인했다고 밝혔다.

상상의 무기가 현실로

어젯밤 서해상에서 큰 사고가 일어날 뻔했다. 훈련용 로켓탄이 방향센서 고장으로 인해 육지방향으로 발사된 것이다. 서울 도심 상공 근처에 도달할 때까지 파괴할 시간적 여유도 없었다. 천만다행으로 우리 군에는 최근 개발돼 실전 배치된 레이저포가 있었다. 레이저포는 말 그대로 빛의 속도로 로켓탄을 격추했고, 이 소식을 들은 사람들은 모두 가슴을 쓸어내렸다.

앞의 이야기는 물론 지금 일어나는 일은 아니다. 그러나 10년 후면 군용 방어체



미국의 상륙함 'USS 폰스'에 시험 배치된 레이저 무기인 LaWS. 아직 충분한 성능은 아니지만 로켓 요격시험에 성공하는 성과를 올렸다. © US Navy

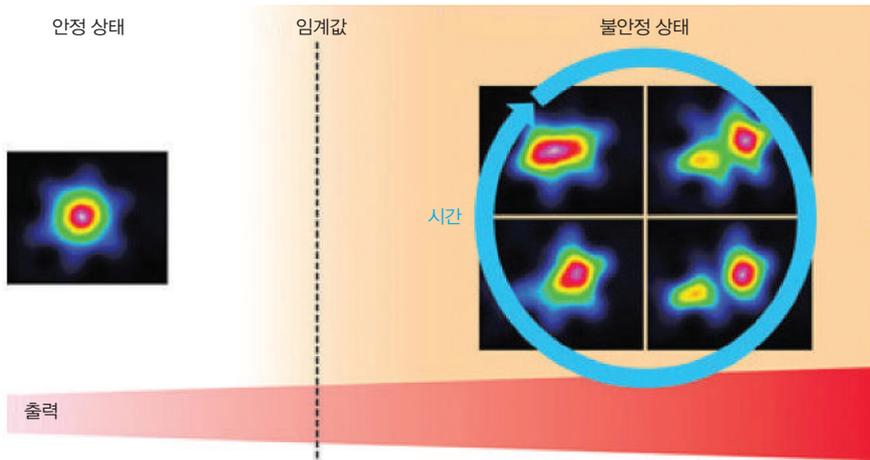
계에서 레이저가 활약할 가능성이 높다. 현재 기술수준으로도 관련 장비의 부피가 크고 소비전력이 많아 문제가 될 뿐, 레이저로 로켓을 파괴하는 일은 가능하다.

최근에는 수십 kW급의 고출력 레이저를 무기에 활용하려는 연구가 진행 중이다. 미 해군은 2015년 가을 중동 걸프지역의 수송 상륙함 ‘폰스함USS Ponce’에 레이저포를 배치해 성공적으로 시험 발사를 마쳤다. 이 레이저포는 미사일을 요격할 정도로 출력이 크지 않고 유효 사정거리도 2km 이내로 짧지만, 1회 발사 비용이 커피 한 잔 값인 1달러 정도로 저렴하다는 장점이 있다. 포탄이나 미사일의 발사 비용이 수천만 원에서 수억 원을 넘어가는 것을 고려하면 매우 경쟁력이 있을 것으로 생각되며 향후 레이저의 출력이 커지면 미사일이나 전투기도 요격할 수 있을 것으로 보인다.

모드불안정성 해결이 숙제

이렇듯 광섬유는 여러 분야에서 활용할 수 있는 기술이지만, 더욱 활성화되기 위해서는 반드시 풀어야 할 숙제가 있다. 출력 한계값을 키우는 일이다. 광섬유의 기하학적인 구조는 고출력에 의한 열을 효율적으로 발산하게 하지만 출력을 제한하는 요인이 되기도 한다. 좁은 광섬유 코어에 비해 상대적으로 긴 경로의 광섬유에 갇힌 빛은 유도브릴루앙산란(stimulated brillouin scattering, SBS), 유도라만산란(stimulated raman scattering, SRS), 자기위상변조(self-phase modulation), 자기집속(self-focusing) 등의 비선형 효과를 일으킨다. 현재 많은 연구자들의 노력으로 빛을 변조하는 방법, 코어 크기를 키우면서 고차모드를 효율적으로 억제하는 방법, 동작파장을 장파장으로 이동시키는 방법, 초고속 펄스레이저에서의 처프펄스증폭기술(chirped pulse amplification) 등 많은 방법들이 제시됐다.

문제는 펄스레이저에서 평균출력과 펄스에너지 간의 트레이드오프(trade-off) 관계가 있어 한계를 뛰어넘으려고 하면 모드불안정성(mode instabilities)이라는 새로운 어려움이 생긴다는 것이다. 모드불안정성은 광섬유 레이저의 평균출력의 최고값을 제



광섬유 레이저의 출력이 특정한 임계값(threshold) 이상이 되면 안정적인 고품질의 빔(원쪽)이 시간에 따라 모드가 변하는 불안정한 상태로 저하된다.

한하며, 이는 비선형문제를 풀이하는 데 최적화된 기존 방법으로는 해결이 어렵다. 최근 몇 가지 방법들이 개발돼 모드불안정이 나타나는 출력 임계값을 서너 배 증가시킬 수 있게 됐지만 여전히 광섬유 레이저 분야의 주요한 도전 과제로 남아 있다. 국내외 레이저 연구자들의 도전적인 연구와 혁신적인 아이디어로 빠른 시일 내에 해결돼 광섬유 레이저의 평균 출력이 더욱 증가하기를 기대한다.

꾸준한 수요 증가 예상돼

현재 가장 많이 사용되는 레이저는 저출력 다이오드 레이저 LP 다이오드다. 통신이나 DVD 등에 광범위하게 사용되기 때문이다. 시장에 본격적으로 나온 지 10여 년밖에 되지 않은 광섬유 레이저는 가공용 CO₂ 레이저나 마킹용 Nd-YAG 레이저의 시장을 급속하게 대체하며 시장을 확보해 나가고 있다. 장기적 전망에서 광섬유 레이저는 가장 높은 성장률이 예상된다. 높은 신뢰성, 긴 수명, 단가의 하

락 등으로 인해 마킹, 얇은 금속판 및 다른 재료들의 커팅에 매우 좋기 때문이다. 2017년까지 광섬유 레이저의 응용분야에 따른 매출 예상치를 보면, 센서와 킬로와트 소재 가공분야에서는 연평균 17.5%의 성장률이 예측된다. 상세한 분야별 시장 전망은 다음 표와 그래프에서 확인할 수 있다.

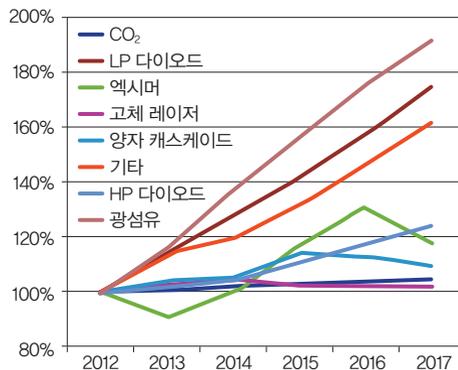
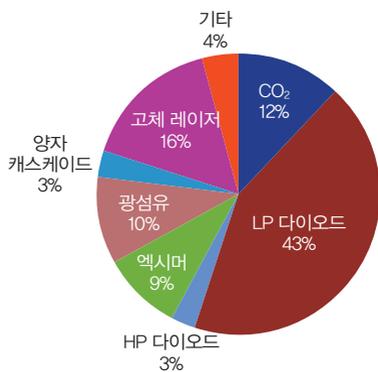
광섬유 레이저는 현재 주로 물질가공분야에서 사용되고 있지만 의료나 3D 프린터 등 새로운 분야로의 응용이 점차 커질 것으로 예상된다. 특히 산업 공정이나 대기환경을 모니터링하기 위한 물질 분석에도 광섬유 레이저의 활용이 늘어날 것으로 전망된다. 지금까지 물질의 지문대역(finger print region)이라 불리는 2~5 μm 중적외선 파장대역의 광원을 얻기 위해 주로 반도체 레이저와 고체레이저를 사용했으나, 최근 튠블, 홀뮴 이온을 첨가한 광섬유 기술과 펌핑 레이저다이오드 기술이 발전함



금속을 정교하게 절단할 수 있는 레이저 가공은 현대의 금속 가공에서 빼놓을 수 없는 공정이다. 절단용 레이저에 광섬유 레이저 활용이 늘어나면서, 물질 분석부터 모니터링에 이르기까지 적용분야도 다양해지고 있다. © RAUCH SPEKTRUM s.r.o.

으로써 광섬유 기반의 고출력 증적외선 레이저도 많이 연구 중이다.

광섬유 레이저는 산업 전반에 걸쳐 활용되고 있으나 국내에서는 아직 널리 활용되지 않고 있다. 주로 광섬유 레이저 광원은 수입에 의존하고 이를 활용한 시스템에 대한 연구와 개발에 치우쳐 있는 실정이다. 따라서 학교나 연구소에서 광섬유 레이저 광원 분야를 더 활발하게 연구할 필요가 있다. KIST 광섬유 연구실에서는



Revenues US\$M	2012	2013	2014	2015	2016	2017	CAGR 2012-2017
Sensors	\$36.2	\$42.8	\$49.8	\$58.4	\$69.8	\$81.3	17.5%
R&D	\$17.9	\$16.5	\$16.9	\$18.1	\$19.1	\$18.9	1.1%
Military	\$73.8	\$62.5	\$59.0	\$58.9	\$59.3	\$60.4	-3.9%
Medical	\$27.4	\$32.7	\$37.8	\$42.6	\$47.9	\$52.4	13.9%
Printing	\$8.6	\$10.0	\$10.3	\$9.8	\$8.8	\$8.0	-1.4%
Marking	\$201.0	\$227.1	\$256.7	\$284.9	\$316.2	\$338.4	11.0%
Micro Materials	\$111.7	\$127.2	\$154.3	\$172.5	\$191.8	\$215.8	14.1%
KW Materials	\$348.7	\$432.4	\$536.2	\$627.3	\$715.1	\$779.5	17.5%

Source : Strategies Unlimited

레이저 산업의 시장 전망

이터븀 및 틀륨 첨가 광섬유, kW급 연속광 광섬유 레이저, 펨토초 광섬유 레이저, 레이저 공진기용 광섬유격자 등에 관한 연구를 국내 대학 및 연구소들과 연계해 활발히 진행하고 있다.

참고문헌

- Charles J. Koester, Elias Snitzer | "Amplification in a Fiber Laser", *Applied Optics* | 1964
- J.E.Twonsend, et al. | *Electron. Lett.* | 1987
- R.J.Mears, L.Reekie, S.B.Poole, and D.N.Payne | "Neodymium-doped silica fibre laser", *Electron. Lett.* | 1985
- E.Snitzer, et al. | "Double clad, offset core Nd fiber laser", OFS | 1988
- Cesar Jauregui, et al. | "High-Power fibre lasers", *Nature Photonics* | 2013
- Johan Nilsson, et al. | "High-Power fiber lasers", *Science* | 2011
- 이관일 | "광섬유 레이저의 개발 현황 및 새로운 응용분야", 『광학과 기술』 | 2013
- A. V. Smith, et al. | "Increasing mode instability thresholds of fibre amplifiers by gain saturation", *Opt. Express* | 2013



김성규 | KIST 영상미디어연구단

현실만큼 생생한 영상, 3차원 디스플레이 기술





3차원 디스플레이 기술의 미래

2009년 말 개봉된 영화 ‘아바타’는 3차원 디스플레이의 가능성을 검증한 역사적인 영화라 할 수 있다. 이 영화의 영향으로 2010년부터 국내외 디스플레이 제작사들이 3차원 TV를 본격적으로 개발하기 시작했다. 영화 제작사에서도 많은 입체영화를 제작했다.

이러한 변화를 이끈 주역은 안경 방식의 3차원 디스플레이 기술이다. 그러나 안경을 이용하는 방법은 번거롭고 거주장스러운 면이 있었다. 이를 해결하기 위해 현재는 특수안경을 착용하지 않는 무안경 방식의 3차원 디스플레이에 대한 요구가 커지고 있다.

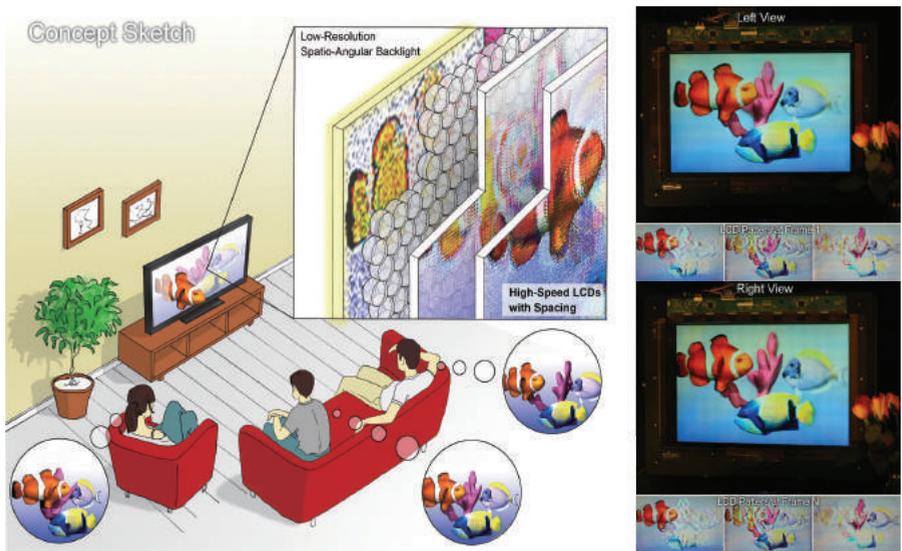
무안경 방식의 3차원 디스플레이가 상용화될 미래에는 영화 ‘스타워즈’, ‘토탈리콜’, ‘아바타’ 등에서와 같이 현재까지의 평면 영상과는 차원이 다른 새로운 영상의 세계가 펼쳐질 것으로 보인다. 더 나아가 3차원 영상과 실제 사용자가 유기적, 입체적으로 상호작용함으로써 새로운 산업이 창출될 수도 있을 것이다.

무안경식^{autostereoscopic} 3차원 디스플레이 기술이 발전하면 불편한 특수안경을 착용하지 않고도 TV, 모니터, 휴대용 표시기기 등을 입체로 즐길 수 있다. 더 나아가 무안경식 3차원 표시 기술은 기존의 평면 표시기술이 제공하지 못했던 ‘사실감’을

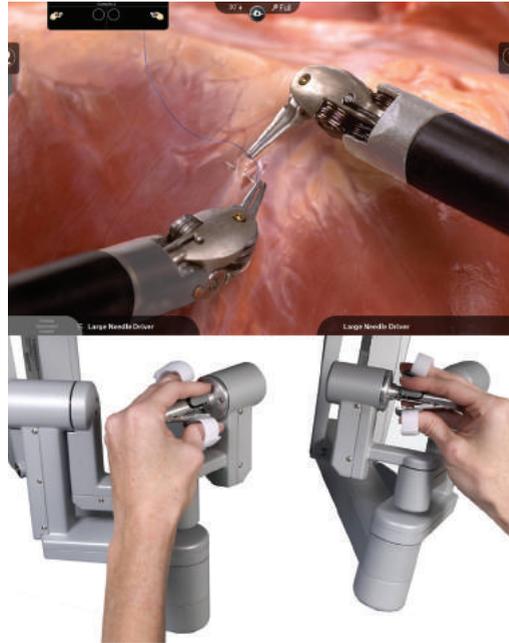
증가시킨다. 원격 3차원 영상회의나 교육 등은 현장에 참가하지 않고서도 마치 현장에 있는 것 같은 사실감을 제공해 이동에 필요한 시간을 없앨 수 있을 것이다.

의료의 경우 '다빈치 로봇' 수술 시스템에서 보듯 의료에 필요한 입체적이고 정밀한 정보를 인간이 인식할 수 있게 함으로써 정보의 이해도와 정밀도를 높일 수 있다. 더 나아가 상당 부분 원격 의료 및 진료가 가능해진다. 자동차 운전과 비행, 모터보트 면허 교습 등과 같은 교육과 전투 시뮬레이션 등의 분야에서도 입체적으로 시각정보를 제공함으로써 실제 상황과 다름없는 교육 시뮬레이션이 가능해진다.

궁극적으로는 사람과 직접 얼굴을 대면하지 않고서도 실제처럼 대화하고, 회의하고, 교육하고, 의사와 상담하고, 여행하는 것들이 가능해질 것이다. 결국 3차원 영상의 사실감이 증가할수록 이동의 필요성이 감소하고 더 많은 시간을 더욱 유용하고 가치 있는 목적에 사용할 수 있을 것으로 보인다.



2012년부터 전자산업계에서는 안경 없이 보는 3D 디스플레이가 중요한 화두였다. MIT는 '텐서 디스플레이'를 이용해 안경이 필요 없는 3D 디스플레이 기술을 선보였으며, KIST 역시 독자적인 기술을 개발했다. © MIT



로봇 수술 시스템인 '다빈치'의 의사용 콘솔(왼쪽)과 수술장면(오른쪽 위) 및 조작부(오른쪽 아래). 콘솔의 디스플레이에 3D 기술이 적용되면 수술대상과 로봇팔의 위치를 정확하게 측정할 수 있어 이전보다 정교하고 안전하게 수술할 수 있다. © Da Vinci

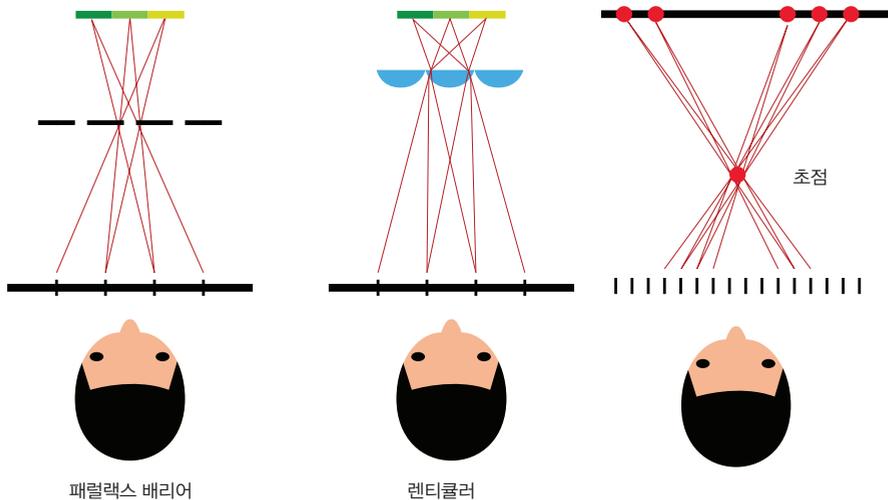
3D 디스플레이 주도할 핵심 기술은?

3차원 디스플레이는 우리가 양 눈을 이용해 실제 사물을 입체적으로 보는 것과 같은 상황을 제공하는 영상 표시 장치를 말한다. 3차원 디스플레이는 동일한 물체에 대해 양 눈이 보는 다른 영상을 통합해 제시한다. 이를 통해 사물의 두께를 인식하도록 해 영상이 튀어나와 보이거나 들어가 보이게 한다. 3차원 영상 표시 기술의 궁극적인 목표는 영상 매체를 통해서도 현실 세계와 다름없는 현실감을 제시하는 것이다.

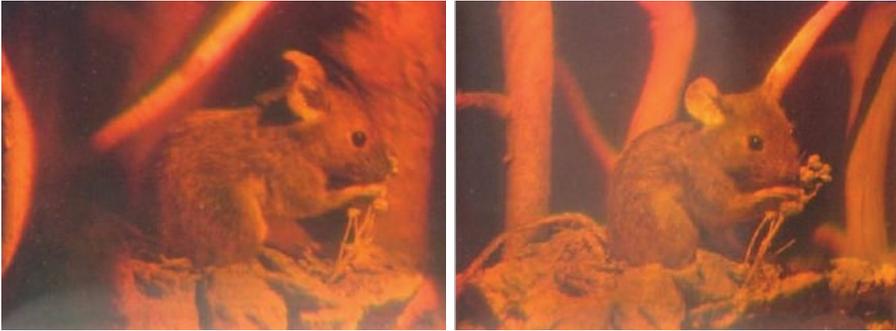
따라서 3차원 디스플레이는 기본적으로 사람의 양 눈에 각각 다른 영상을 제공해야 한다. 이 때문에 광학적 기술의 적용이 필수적이다. 안경 방식의 경우는 광학

적 편광 현상과 컬러필터 기술을, 무안경 방식의 경우 빛의 차단 방식인 시차장벽과 렌즈 방식인 렌티큘러lenticular와 집적영상 기술들을 주로 사용하고 있다. 미래에는 회절 광학에 기반하는 홀로그램 방식의 3D 디스플레이로 발전될 것으로 예상되고 있다.

이러한 기술들 중 현재 가장 완성도가 높은 것이 특수안경을 이용한 방식이다. 3D 디스플레이용 안경에는 적청안경, 편광안경, 셔터안경 등이 있다. 안경 방식의 기술은 거의 완벽한 수준의 실제감을 선사하지만 특수안경을 부가로 착용해야 하므로 극장, 가정 등 제한된 환경 이외에 평소에 사용하기에는 불편하다는 문제가 있다. 무안경 방식의 3차원 디스플레이 기술은 이러한 특수안경 착용의 불편함을 제거하는 기술이다.



다양한 무안경 3D 디스플레이 방식. 현재 가장 일반적으로 사용되는 기술은 다시점 3D로 크게 두 가지 방식이 있다. 패널 앞에 일정한 간격을 두고 장벽을 설치하는 패럴랙스 배리어(Parallax Barrier) 방식과 패널에 반원통 모양의 렌즈를 붙여 렌즈의 굴절현상을 이용하는 렌티큘러(Lenticular) 방식이다. 패럴랙스 배리어 방식은 눈에 도착하는 빛의 양이 적어지기 때문에 어둡다는 단점이 있고, 렌티큘러 방식은 렌즈의 특성상 화각이 좁다는 단점이 있다. 최근에는 이를 개량한 초다시점 기술이 개발됐는데, 하나의 눈에서도 여러 개의 시점을 만드는 방식이다. 양쪽 눈에 각각 여러 시점이 존재하기 때문에 이 둘이 만나는 초점이 생긴다. 특정 물체에 만 초점을 맞출 수 있기 때문에 눈의 피로도를 덜 수 있다. © 과학동아



서로 다른 두 방향에서 바라본 홀로그램 영상. 홀로그램은 완전한 입체 영상을 만들 수 있지만 아직 해상도가 낮고 정확한 조절이 어려워서 단기간 내 상용화될 가능성은 낮다. © Georg-Johann Lay

무안경 방식의 대표적 기술에는 다시점 방식, 초다시점 방식, 집적영상 방식, 체적형 방식, 홀로그램 방식 등이 있다. 그중 영화 등에서 가장 많이 소개된 방식이 홀로그램 방식이다. 홀로그램 방식은 가장 완벽한 무안경식 3차원 표시기술이며 궁극적 기술이라 할 수 있다. 그러나 홀로그램 기술은 빛의 여러 특성 중에서 가장 조절하기 어려운 회절 특성을 이용하기 때문에 단기간에 상용화될 가능성은 낮다.

다시점 방식은 3차원 디스플레이 기술 중 가장 대중화가 빠를 것으로 예상되는 기술이다. 다시점 방식은 일정 개수의 위치에 다른 영상을 볼 수 있게 해 특수안경 없이 입체 영상을 볼 수 있게 하는 방식으로 현재 기술로도 어느 정도 제품화가 가능하다. 그러나 다시점 방식의 무안경식 3D 디스플레이의 상용화는 아직 이뤄지지 않고 있다. 특수안경 없이 3D 영상을 볼 수 있는 영역이 상당히 제한돼 동시에 볼 수 있는 사람의 수가 극히 제한적이기 때문이다. 3D 영상을 볼 수 있는 영역을 넓히기 위해서는 입체 영상의 해상도가 낮아져서 고해상도에 익숙한 현재의 소비자들에게 해상도에 대한 불만이 발생한다. 또 안경 방식에 비해 3D 영상의 화질이 매우 나쁜 점도 상용화에 어려움을 주는 요인이다. 크로스토크(crosstalk)라고 하는 입체 영상 간의 간섭현상이 크게 발생해 입체감을 떨어뜨리고 심지어는 어지럼증 등

을 유발한다.

최근 이런 문제들 중 3D 화질과 같은 핵심 요소 부분만 해결해 상용화를 시도한 제품들이 출시된 바 있다. 이러한 시도는 사용자의 얼굴을 실시간 추적해 그 위치에 따라 최적의 3D 영상을 보여주는 기술을 적용한 것이다. 이는 1인용 3차원 표시 장치를 개발하는 데 상당한 가능성을 제시했다.

하지만 다시점 기술은 또 하나의 중요 해결 과제를 가지고 있다. 시청자가 움직일 때 보는 입체 영상이 자연스럽게 변화되지 못한다는 점으로, 광학 노이즈와 시점수가 적기 때문에 발생하는 문제다. 이러한 문제를 다시점 기술을 발전시켜 해결하고자 하는 것이 초다시점 기술이다. 초다시점 기술은 홀로그램에서 보여지는 입체 영상에 근접할 수 있는 기술로 향후 만족도가 높은 무안경 3D 디스플레이로 발전할 가능성이 있다.



일본은 무안경 3D 디스플레이 분야에서 전자강국의 입지를 회복하려 노력하고 있다. 2012년 국제가전박람회(CES)에서는 TAO에서 개발한 기술을 적용한 무안경 3D TV의 프로토타입을 선보여 주목을 끌기도 했다. © D. Klein for What's New Dr. Frank?

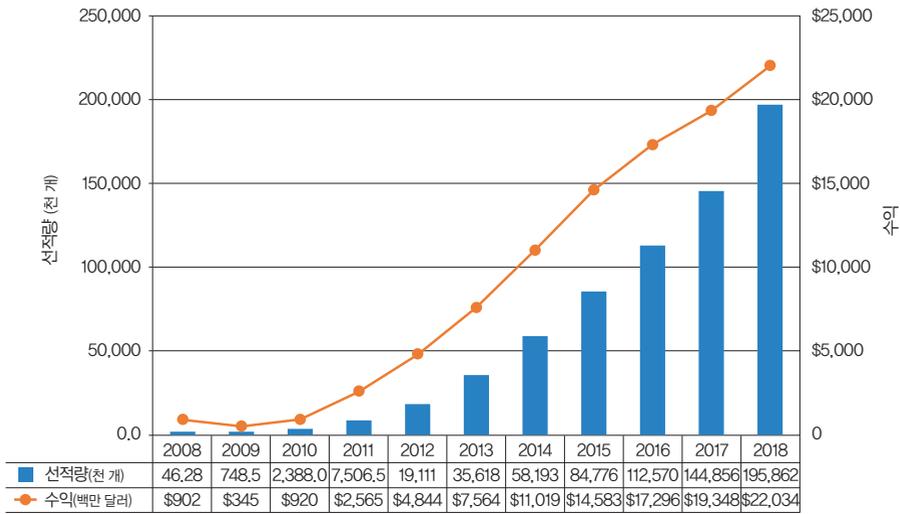
이렇게 기술이 발전하고 있음에도 불구하고 완벽하게 홀로그램을 대체할 원리적 3차원 표시 기술은 나타나지 않고 있다. 홀로그램 기술 또한 많은 추가적 연구와 기술의 발달이 필요하다. 현재는 홀로그램의 상용화가 이뤄질지 또 다른 신기술이 3차원 표시 기술로 등장할지 누구도 장담할 수 없는 시기다. 이는 미래 시장성이 방대한 3차원 디스플레이 기술 시장을 누가 주도할지 알 수 없는 상황이라는 뜻이다. 연구자와 개발자에게는 미답지를 탐사하는 것과 같은, 매우 흥분되는 도전이 기다리는 셈이다.

3D 디스플레이 기술 선도하려면

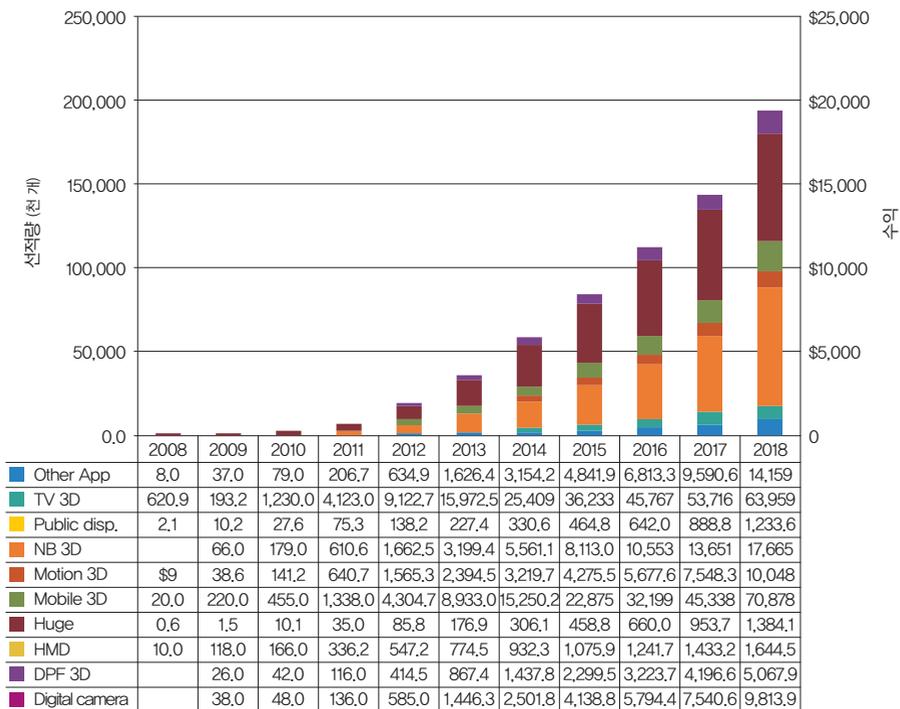
무안경식 3차원 디스플레이 기술을 선도하는 나라는 일본이다. 일본은 우정성 산하 연구소TAO에서 홀로그램 기술을 대체하는 것을 목표로 하는 초다시점 기술을 개발하고 있다. 일본 도쿄농공대東京農工大에서도 관련 기술을 지속적으로 연구 중이며, 정보통신연구소NICT에서도 홀로그램 기술에 관심을 쏟고 있다. 정보통신연구소에서 개발한 다시점 기술은 200인치라는 대형 사이즈를 바탕으로 높은 입장감과 입체감을 제공한다. 헝가리 홀로그라피카Holografika사에서도 다시점 방식의 상용 제품을 개발해 입체감이 우수한 무안경 3D 디스플레이를 출시했다.

한편 일본 도시바Toshiba Corporation사와 국내 LG 전자에서는 안면 추적 방식을 적용한 무안경식 상용 3D 노트북을 개발해 판매한 바 있다. 이는 과거 무안경식 3D 디스플레이에 비해 상당부분 개선된 모델이다. 하지만 아직 광학적 노이즈인 크로스토크가 안경 방식 수준에는 미치지 못하고 있다.

KIST에서 도시바-LG 전자의 안면추적 방식 상용 3D 노트북과 유사한 형태로 안구추적 방식을 적용해 연구를 진행했다. 그 결과 안경식 3D 디스플레이에 준하는 우수한 3D 화질의 무안경 3D 디스플레이를 개발해 관련 원천 특허를 다수 출원하고 등록했다. KIST에서는 또한 고밀도 다시점 시스템을 개발해 광고 등의 용



2008~2018년 세계 3D 디스플레이 시장 전망(2010 DisplaySearch)



2008~2018년 응용제품별 3D 디스플레이 시장 전망(2010 DisplaySearch)



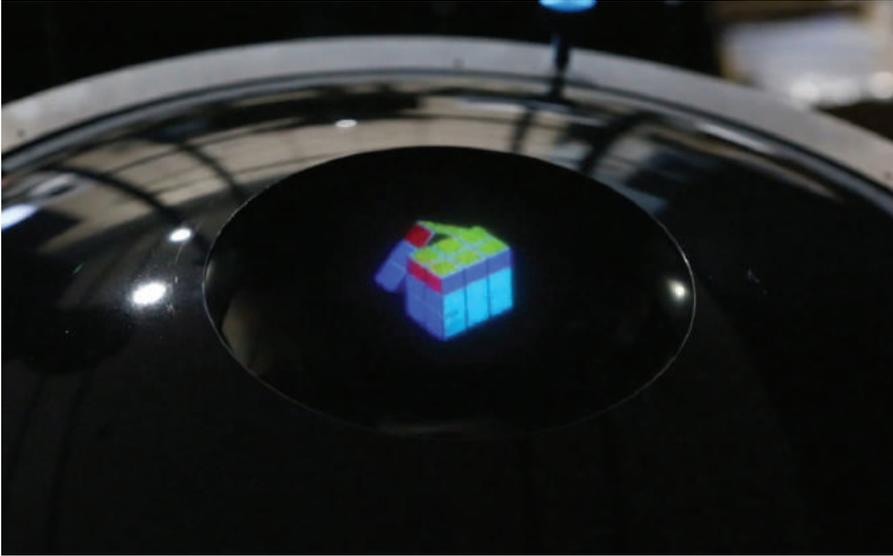
3D 영상 시장은 확대 일로에 있다. 최근의 주요 상업영화들은 3D 버전을 당연하게 내놓을 정도다. 촬영현장의 카메라 역시 3D에 대응하도록 변하고 있다. 사진은 아이맥스 영화인 '히든 유니버스'의 촬영 현장으로 아이맥스용 3D 카메라를 사용 중이다. © Malcolm Ludgate/ESO

도에 상업적으로 활용할 수 있는 정도의 타일형 대형 시스템으로 발전시킨 후 상용화를 준비하고 있다.

이 밖에도 인하대에서는 미국 MIT에서 개념화한 라이트필드 디스플레이(light field display) 기술을 개선해 더 우수한 방식의 디스플레이를 개발하고 있다. 한국전자통신연구원ETRI, 전자부품연구원KETI, 서울대, 광운대 등에서도 상용화를 목표로 홀로그램 원천 기술을 연구하고 있다.

시장 성장 예상되나 무안경 기술이 관건

3D 디스플레이의 시장 전망은 낙관적이다. 디스플레이 전문 시장조사기관인 디스



국내에서도 3D 디스플레이 관련 연구가 활발하다. 사진은 한국전자통신연구원(ETRI)에서 세계 최초로 개발한 전방위 컬러 홀로그램. © ETRI

플레이서치DisplaySearch에 따르면 선적량이 매년 75%에 이르는 평균성장률을 보여 2013년 3561만 8,000개에서 2018년에는 1억 9600만 개까지 증가할 것으로 예측된다. 수익 면에서도 매년 38%의 평균성장률을 바탕으로 2013년 75.6억 달러에서 2018년 220억 달러로 증가될 것으로 보인다.

3D 디스플레이가 적용되는 제품에는 TV, 모니터, 노트북, 휴대전화, HMD, 디지털사진액자, 공공전시용 디스플레이, 디지털 카메라 및 캠코더 등이 있다. 이 중 3D TV는 2018년에 170억 달러의 수익으로 가장 큰 응용분야가 될 것으로 예상된다. 두 번째 응용분야는 40인치 이상 모니터, 공공전시용 디스플레이가 그 다음을 차지할 전망이다.

디스플레이 기술은 미래를 주도할 실감형 기술의 핵심이 될 것이다. 영화 아바타의 예에서 보았듯이 기술적 완성도가 향상되고 적절한 콘텐츠가 결합되면 3D 디

스플레이의 영역확대가 예상된다. 따라서 국내외 디스플레이 기업들은 미래의 생존을 위해 3D 디스플레이 개발을 지속할 것이다. 하지만 특수안경의 불편함은 3D 디스플레이의 매출을 감소시키고 있다.

이 때문에 우수한 품질의 3D 콘텐츠 시장이 축소되고 안경 방식의 3D 영역의 전체 시장이 활성화되지 못하고 있다. 기업 입장에서도 3D 디스플레이 시장이 속히 활성화되어야 하는 만큼 향후 무안경 3D 디스플레이의 기술 개발 속도가 빨라질 수밖에 없다.

그러나 앞서 언급했듯이 무안경 방식의 기술에는 광학적 노이즈인 크로스토크 문제, 다시점 형성 시 해상도 저하 문제 그리고 이와 관련된 시청 영역의 축소 및 시청자 수의 제한 등의 문제가 복합적으로 얽혀 있다. 이러한 문제들을 최소화시키는, 완성도 높은 원천 기술의 개발이 선행되어야 무안경식 3D 디스플레이의 상용화가 본격적으로 시작될 수 있다.

참고문헌

- 김성규 | “차세대 3차원 디스플레이 기술”, 『Display Focus』 | 2009
- 김성규 | “다시점 3D 디스플레이 기술”, 『방송공학회지』 | 2010
- 김성규 | “KISTEP 10대 유망기술 시리즈 1, 3차원 디스플레이 기술”, 『Science & Technology Focus』 | 2010
- 김성규 | “3차원 디스플레이 환경에서의 단안 초점 조절 정보”, 『광학과기술』 | 2010
- 강훈중, 김성규 외 | “디지털 홀로그래픽 기술 동향”, 『인포메이션 디스플레이』 | 2011
- 김성규 | “반응형 무안경식 3D 디스플레이 기술”, 『인포메이션디스플레이』 | 2013
- 김성규 | “초다시점(SMV) 3D 디스플레이의 소개”, 『정보와 통신』 | 2014
- 2010 DisplaySearch



김법민 | 고려대학교 바이오의공학부

빛으로 사람의 뇌를 들여다보다





뇌 혈류 측정해 뇌졸중 재발 관리한다

C씨가 뇌졸중을 겪은 지도 벌써 3년이 지났다. 다행히 꾸준한 재활 훈련의 결과로 대부분의 기능을 회복했고 재발의 걱정도 전혀 없이 지내고 있다. 안경테에 부착된 근적외선 분광기 fNIRS라는 장비가 뇌의 혈류가 좌우 대칭적으로 문제없이 흐르고 있는지 항상 관찰해 주는 덕분이다. 뇌를 드나드는 혈액의 흐름에 무슨 문제라도 생기면 이 장비가 미리 경고를 해 골든타임 안에 재빨리 조치를 취할 수 있는 것이다. 마치 든든한 비서를 몸에 붙이고 다니는 것과 비슷하다.

위의 사례에서 등장한 장비인 fNIRS는 뇌혈류영상을 얻는 것으로 확산광 영상법 DOT 중 하나다. 이 기술은 최근 주의력 결핍 과잉행동장애 ADHD, 자폐 autism 등 대뇌질환의 진단과 재활에 큰 도움을 주는 기술로 각광받고 있다. fNIRS는 뉴로피드백 neurofeedback이라는 기술과 접목되어 집중력 향상에 도움을 주기도 한다.

미국 SF 드라마나 영화를 보면 빛으로 몸을 스캔하며 진단하는 장면을 흔히 볼 수 있다. 실제 자기공명영상 MRI, 컴퓨터단층촬영 CT 처럼 현대사회에서 사용되는 대형 진단장비도 빛이 우리 몸을 십자가 형태로 비추며 진단한다. 하지만 이 빛은 단순히 어디를 집중적으로 영상화해야 할지 시술자에게 알려주는 가이드 역할을 할 뿐 실제로 진단이나 영상화에 직접 사용되는 것은 아니다. 우리가 볼 수 있는 빛



미국 메이오 클리닉(Mayo Clinic)에서 사용 중인, 뇌졸중 환자를 대상으로 하는 fNIRS 장비(왼쪽)와 미국 유타주립대(Utah State University)에서 DOT를 활용해 청소년 인지 실험을 하는 장면 © MayoClinic, Utah State University

인 가시광선을 포함해 적외선과 자외선은 우리 몸을 뚫고 지나가지 못한다.

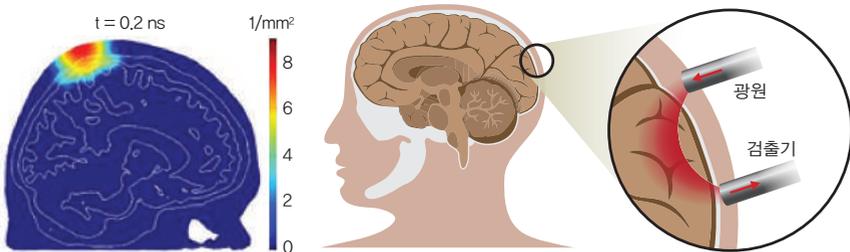
광학적인 측면에서 볼 때 우리 몸은 빛의 진행을 방해하는 수많은 산란체(scatterer)와 흡수체(absorber)의 조합으로 정의할 수 있다. 산란체의 크기도 매우 다양하다. 세포막, 미토콘드리아, 세포핵, 세포외 기질 등이 있어 빛의 진행을 방해하며 혈액, 멜라닌, 지방, 근육 등은 빛의 파장에 따라 각각 서로 다른 정도로 흡수한다. 따라서 엑스선(X-ray) 촬영과 같은 방식으로 우리 몸을 일직선으로 뚫고 지나가는 빛을 이용해 영상화하는 일은 불가능하다.

대뇌 혈류영상 얻을 수 있는 fNIRS와 DOT 기술

인체의 뇌를 대상으로 빛이 얼마나 투과되는지를 직접 컴퓨터 시뮬레이션해보면 두피와 두개골, 그리고 대뇌피질까지는 퍼져서 도달할 수 있지만 더 깊은 지역에는 접근하지 못한다. 하지만 빛을 보내주는 광원과 빛을 감지하는 검출기를 특정 지역에 고정시키면 바나나 형태로 빛이 지나가는 길이 발생한다. 여기서 빛이 지나가는 대뇌피질에 혈류변화처럼 빛의 진로를 방해하는 요인이 발생하면 검출기에 도달하는 빛의 양이 영향을 받는다.

이와 같은 방식으로 특정 지역의 동적인 혈류변화를 실시간으로 검출하는 기법이 fNIRS이다. 우리 몸에 가장 깊숙이 투과하는 파장의 빛이 근적외선이어서 이를 사용하다 보니 붙은 이름이다. 주로 800nm 주변의 파장을 사용하며 산화 헤모글로빈(oxymoglobin), 탈산화 헤모글로빈(deoxyhemoglobin), 총혈류량(total hemoglobin)과 같은 정보를 얻을 수 있다.

이러한 광원-광검출기 조합을 다수 사용해 뇌의 일부분이나 뇌 전체까지도 영상화하는 기술이 DOT이다. 한편 대뇌의 혈류영상을 획득하는 데 사용하는 또 다른 기술로 기능성 자기공명영상(fMRI)을 들 수 있다. DOT와 달리 피질 외 깊은 지역까지도 영상화가 가능하지만 매우 고가이고 동적인 상태에서는 사용이 불가능



미국 하버드대(Harvard University)에서 수행한, 두개골을 투과하는 근적외선 빛 시뮬레이션(왼쪽)과 광원(source)과 빛 검출기(detector)를 지정한 경우의 빛 이동경로.



DOT 장비는 ADHD와 같은 신경정신질환 검사에 활용된다.

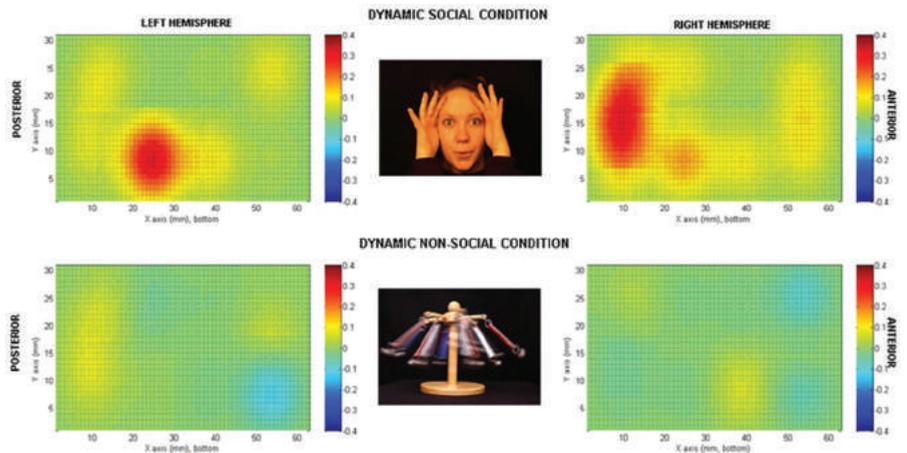
하며 시간해상도가 매우 떨어지는 단점이 있다. DOT는 피질지역만이 대상이기는 하지만 fMRI의 이러한 단점들을 보완할 수 있는 새로운 기술로 각광받고 있다.

fNIRS, DOT의 적용 분야는 신경발생학, 인지 및 재활, 운동제어, 소아뇌질환 진단 분야 등으로 나눌 수 있다. 대뇌 피질 영역은 기능적으로 크게 네 부분으로 나뉘는데 각 영역이 완전히 독립적으로 기능하는 것은 아니다. 일반적으로 전두엽(prefrontal area)은 사고와 기억 혹은 인지 처리와 관련된 기능을 담당하며 두정엽(parietal lobe)은 감각기능 및 공간인식을 담당하고 운동을 기획하는 통합중추다. 측두엽(temporal lobe)은 청각정보가 일차적으로 전달되는 영역이고 후두엽(occipital lobe)은 주로 시각과 직간접적으로 연결돼 있다. 최근 다년간의 연구는 이러한 일차적인 기능을 확인하는 한편 관련 질병을 진단하는 데 fNIRS 또는 DOT가 매우 효과적으로 사용될 수 있음을 증명한다.

마케팅에서 신경발생학까지... DOT의 다양한 활용

DOT 기술은 영유아들에게 특히 효과적이다. 성인의 뇌보다 두개골 두께가 얇고 크기 자체가 작기 때문에 성인의 대뇌에 비해 상대적으로 깊은 영역까지 혈류의 역학적 변화를 측정할 수 있기 때문이다. 영유아의 주의력결핍과잉행동장애(attention deficit hyperactivity disorder, ADHD), 자폐(autism), 정신분열증(schizophrenia) 등을 대상으로 전두엽 또는 두정엽의 지역적인 활성도가 정상인과 차이가 있음을 보여주는 많은 연구가 있으며, 또한 이를 극복하기 위한 재활과정에서도 fNIRS 또는 DOT 장비가 사용되고 있다.

영유아의 신경발생학적 측면에서도 DOT는 활발하게 사용된다. 한 예로 이탈리아 파도바대(University of Padua)에서는 생후 1~5일 된 영아들이 실제 역동적인 사람의 영상과 기계의 움직임을 볼 때 대뇌 혈류변화의 차이가 보인다는 실험을 진행했다. 파도바대 연구팀은 이를 근거로 생후 수일간의 시간 동안에도 충분히 사회적



DOT로 관측한 생후 1~5일 정도 된 신생아의 혈류영상. 자극이 시작되자 7초 후에 뇌의 각 반구에서 산화헤모글로빈의 농도가 증가했다. 비사회적인 기계적 영상자극에는 혈류변화가 일어나지 않으며 사회적 자극인 역동적인 얼굴 영상을 접할 때만 혈류변화가 일어났다.

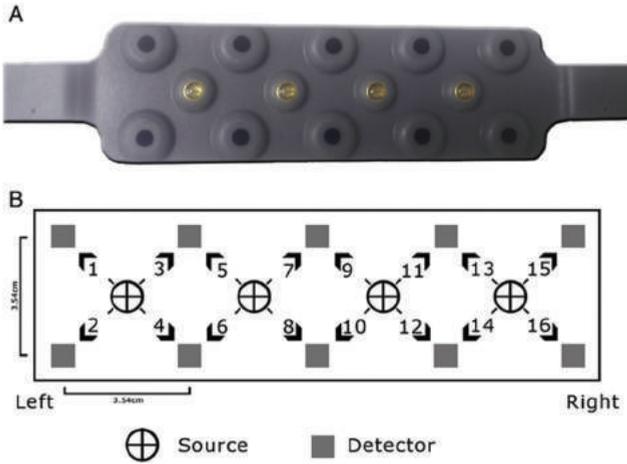
자극에 대한 활성을 이끌어 낼 수 있다는 결론을 도출했다.

DOT는 또한 성인에게도 유용하다. 영유아뿐 아니라 성인 뇌질환 환자를 대상으로 많은 DOT 연구가 발표되고 있다. DOT는 특히 다른 뇌 영상 장비들보다 움직임에 덜 취약하기 때문에 움직임이 많은 피실험자들에게 적용 시 매우 유용하다. 한 예로, 최근 일본의 7개 병원 약 1000여 명을 대상으로 수행한 실험에서, DOT를 이용하여 심한 우울증과 조울증 또는 정신분열증을 구분할 수 있다는 결과를 도출한 바 있다. 결국 DOT가 표면적으로 유사하게 보이는 정신질환 진단에도 효과적으로 사용될 수 있음이 밝혀졌다.

DOT는 사람의 인지 및 재할, 감성 등과 관련된 연구에도 성공적으로 적용되고 있다. 캐나다의 한 연구진은 DOT를 이용해 음료수의 선호도에 따라 다르게 나타나는 혈류 신호를 해석하는 실험을 수행했다. 연구진이 여러 가지 통계 기법을 사



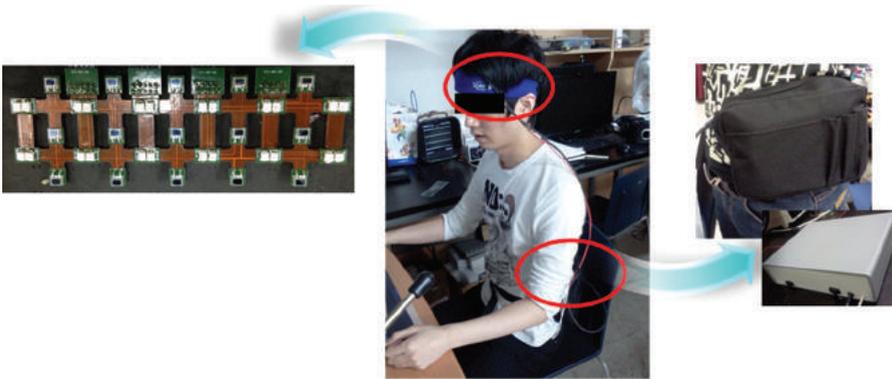
fNIRS는 약한 출력의 빛만을 사용하여 안전성이 매우 높다. 이 때문에 어린이나 영아의 뇌도 실시간으로 관찰할 수 있는 길이 열렸다. 사진은 fNIRS 장비를 장착하고 뇌 활동을 측정중인 어린이. © University of Michigan



마취심도와 혈류변화와의 상관관계를 알기 위한 실험에 사용된 fNIRS 장비. 4개의 광원과 10개의 검출기로 구성됐다.

용해 분석한 결과, 사전 설문조사로 행해진 피실험자의 선호도를 80%에 가까운 정확도로 예측할 수 있었다. 매력적인 얼굴에 대한 판단이 판정 직전의 경험에 의해 좌우된다는 재미있는 연구결과도 DOT를 이용해 관측됐다. 실험은 보통의 얼굴 사진과 이를 줄이거나 늘인 얼굴 사진을 보게 하면서 대뇌의 혈류변화를 관찰하는 방식으로 이뤄졌다. 연구진은 측정 결과 줄어든 얼굴 사진과 늘인 얼굴 사진을 볼 때 산화헤모글로빈의 농도 감소가 이루어지는 지역이 서로 다름을 확인할 수 있었다. 심하게 줄인 사진을 본 직후에는 정상 사진보다 조금 줄인 사진을 더 매력적이라고 반응한다는 결과가 나타났다.

뉴로피드백 및 뉴로마케팅 분야에서도 DOT 장비가 각광받고 있는 추세다. 이동성이 편리하고 움직임에 의한 방해가 덜 받을 수 있으며 실험이 비교적 간단하기 때문이다. 최근 주목받는 이슈 중 하나인 기업의 사회적 책임CSR에 있어서 일반제품과 CSR 제품에 대한 구매결정자의 두뇌 활성도를 DOT를 활용해 비교한 연구도 있다.



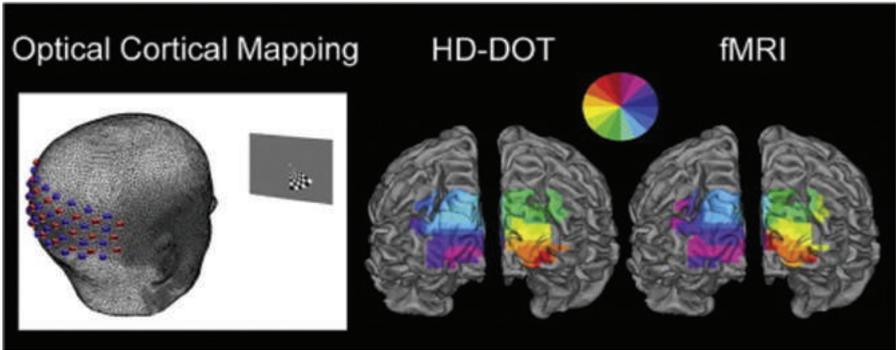
고려대에서 제작해 사용 중인 무선 fNIRS 시스템 착용 사진. fNIRS 프로브는 이마에, 제어부는 허리에 차고 움직이는 상태에서도 혈류측정이 용이하도록 했다. 특히 실시간 움직임 제거 필터를 사용해 동적 잡음 없는 깨끗한 신호 검출이 가능하다. © 김법민 / 고려대

수면심도, 마취심도 구분에 사용하는 fNIRS

fNIRS 장비는 수면심도나 마취심도 등을 구분하는 분야에 주로 사용된다. 최근 고려대에서 수면 시 주기적 사지 떨림(PLMS)이 있는 환자들의 수면의 깊이를 fNIRS를 이용해 구분할 수 있었다. 덕분에 고려대 연구팀은 PLMS 때문에 수면의 질이 떨어질 수 있다는 내용을 발표할 수 있었다. 미국 드렉셀대(Drexel University) 연구팀은 마취약인 프로포폴의 투입 정도에 반응해 달라지는 혈류변화를 관찰했으며 fNIRS를 사용하면 마취심도를 측정하는 것이 가능하다는 결과를 발표한 바 있다.

최근에는 무선통신 기술을 이용해 무구속으로 착용 가능한 프로브 개발에 관한 연구들이 활발하다. 이를 이용해 움직임에 취약하지 않도록 설계된 fNIRS 또는 DOT 관련 연구들이 속속 발표되고 있다. 최근 고려대에서 제작한 전두엽용 다채널 fNIRS 시스템은 움직임에 의한 잡음에 영향을 받지 않으며 무선으로 신호를 주고받을 수 있다.

fNIRS는 기본적으로 작은 부위에 대한 혈류의 시간적 변화를 검출하는 장비다. 그런데 이를 영상화하기 위해 DOT로 넘어가면 풀어야 할 많은 과제들이 존재한다.



고밀도(high-density) DOT 시스템을 활용해 시각자극에 대한 대뇌혈류 정보를 fMRI와 유사한 정도로 획득한 영상. 워싱턴대의 연구결과다. © Washington University at St. Louis

다. 우선 공간분해능이 fMRI에 비해 다소 떨어지는 단점이 있다. 이를 해결하기 위한 방법들 중 한 가지로 DOT의 채널 수를 늘리는 방법이 있다. 미국 워싱턴대 Washington University at St. Louis에서는 DOT의 채널 수가 증가할수록 fMRI와 유사한 정도로 공간해상도가 좋아진다는 결과를 발표한 바 있고 실제로 같은 시각자극에 대해서 fMRI 영상과 차이가 없는 DOT 영상을 획득할 수 있음을 보였다.

DOT 시스템은 다른 뇌 영상 장비들에 비해 휴대 및 이동이 용이하고, 쉽게 착용할 수 있도록 소형제작이 가능하며, 움직임에 의한 오차가 비교적 적다는 장점이 있다. 또한 제어부를 초소형으로 하고 무선 기술을 접목시킬 경우 피실험자가 움직이는 상태에서도 뇌 영상을 획득할 수 있다. 덕분에 DOT는 움직임이 많고 실험 수행이 어려운 영유아, 특히 주의력결핍과잉행동장애나 자폐를 앓는 인지 장애 환자에게 절대적으로 유용한 뇌 영상 기기가 될 것으로 보인다.

DOT는 또한 다양한 뇌 질병 연구에 있어서도 가장 간편한 영상 장비가 될 것이다. 이를 위해서는 현재 개발돼 있거나 상용화된 기기를 더 작고 간편하게 만들 수 있는 집적회로, 무선 통신 기술 등이 적용돼야 한다. 또한 DOT 영상은 아직까지는 실시간 획득이 어렵고 복잡한 영상재구성(image reconstruction) 과정을 통해야만 얻을

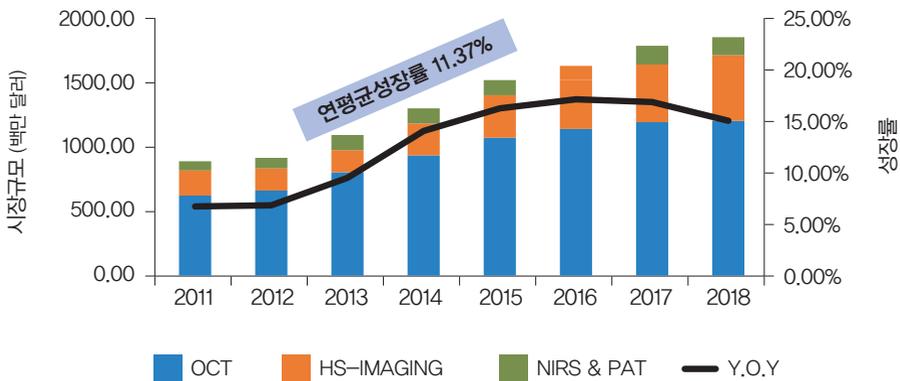
수 있다. 그렇기 때문에 이를 극복하기 위한 다양한 기술들이 개발되고 있다.

fNIRS, 광학 영상 시장의 대세 될까

세계적으로 광학 영상 분야의 시장은 증가추세에 있다. 권위있는 마켓 리서치 회사인 마켓앤마켓Markets and Markets 자료에 의하면 2011년부터 2018년까지 약 9700억 원(915만 7,500달러)에서 2조 원(19억 달러)까지 시장 확대가 예상되며, 연평균성장률은 11.37%로 매우 높은 수치를 나타내고 있다.

이러한 광학 영상 시장은 공간섭 단층촬영OCT, 근적외선 분광기fNIRS, 초분광영상 분광분해기hyper spectral-imaging, 광음향 의료영상PAT 등으로 분류된다. 이 중에서 가장 규모가 큰 것이 OCT다. OCT는 이전부터 개발 및 응용이 활발히 이뤄져 전체 광학 영상 분야의 70% 정도를 차지한다. 다만, 연평균 성장률은 4%에 그치고 있다.

최근에는 Hyper Spectral-Imaging, fNIRS, PAT 등의 분야에서 선진국들을 중심으로 새로운 회사들이 다수 생겨나고 있는 상황이며, 초기 시장은 작았지만 높은 성장 기대치를 가지고 매년 성장률이 두드러지게 높아지고 있다. 특히 fNIRS는 fMRI를 대신해 편리하게 뇌의 혈액학적 변화를 알 수 있고, 가격이 저렴하고 간편



세계 광학 영상 시장 현황.

하게 다를 수 있다는 점에서 많은 소비자들과 연구자들에게 인정받고 있다. 또한 임상 의료뿐만 아니라 인지, 뉴로피드백처럼 일반인을 대상으로 하는 다양한 분야에서도 널리 쓰일 수 있기 때문에 새로운 시장 창출 및 시장 확대 가능성이 매우 높다.

참고문헌

- Ehlis, et al. | "Application of functional near-infrared spectroscopy in psychiatry", *Neuroimage* | 2014
- Monden et al. | "Clinically-oriented monitoring of acute effects of methylphenidate on cerebral hemodynamics in ADHD children using fNIRS", *Clinical Neurophysiology* | 2012
- Farroni et al. | "Infant cortex responds to other humans from shortly after birth", *Scientific reports* | 2013
- Takizawa et al. | "Neuroimaging-aided differential diagnosis of the depressive state", *Neuroimage* | 2014
- Luu et al. | "Decoding subjective preference from single-trial near-infrared spectroscopy signals", *Journal of neural engineering* | 2009
- Fu et al. | "The neural correlates of the face attractiveness aftereffect: A functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) study", *NeuroImage* | 2014
- Curtin et al. | "Functional near-infrared spectroscopy for the measurement of propofol effects in conscious sedation during outpatient elective colonoscopy", *NeuroImage* | 2014
- Piper et al. | "A wearable multi-channel fNIRS system for brain imaging in freely moving subjects", *NeuroImage* | 2014
- Eggebrecht et al | "A quantitative spatial comparison of high-density diffuse optical tomography and fMRI cortical mapping", *Neuroimage* | 2012







K I S T 과학기술전망 2016

Chapter 6

깨끗한 에너지

저탄소 녹색성장을 향한 에너지 전략

안병성 | KIST 청정에너지연구센터



2015년 6월 30일, 우리 정부는 온실가스 감축목표를 2030년 배출전망치BAU 대비 37%로 결정했다. 이는 2030년 배출전망치인 8억 5060톤의 37%에 해당하는 3억 1,470톤의 이산화탄소 배출량을 줄이겠다는 뜻이다. 미국 오바마 정부 또한 2030년까지 미국 내 발전소의 온실가스 배출량을 2005년 대비 32% 감축하는 ‘청정전력 계획Clean Power Plan’을 발표하고 세계 각국이 참여하도록 독려하고 있다.

탄소배출을 줄이는 한편으로 정부는 저탄소 녹색성장을 통해 새로운 일자리를 창출하려는 노력도 병행 중이다. 이를 뒷받침하고자 에너지 신산업을 육성하기 위한 특별법을 제정하는 한편, 전기차와 제로에너지 빌딩, 에너지 자립섬, 온실가스 포집 및 저장기술에 이르기까지 다양한 신·재생에너지 기술에 투자하고 있다.

신·재생에너지를 사용하고 에너지사용량을 감축하는 것은 저탄소 녹색성장의 기본이다. 우리나라는 신에너지로 수소에너지, 연료전지, 석탄 액화·가스화, 재생에너지로 태양광, 태양열, 풍력, 수력, 해양, 지열, 바이오, 폐기물을 지정하



2015년 12월 프랑스 파리에서 열린 제21차 UN 기후변화협약 당사국총회(COP21)에서 기념촬영중인 회원국 정상들. COP21에서 타결된 파리협약을 계기로 이른바 '신기후체제'가 출범함에 따라 각국은 온실가스 감축에 적극적으로 나서고 있다. ©Presidencia de la Republica Mexicana

고 있다. 국제에너지기구(IEA) 자료를 인용한 '2014년 신·재생에너지 백서산업통상자원부, 신·재생에너지센터'에 의하면 세계에너지 수요는 2030년 147억 toe 석유환산톤에 달할 것으로 전망된다. 에너지원별로는 석유는 13%, 석탄은 17%, 천연가스는 48%, 원자력은 66%, 재생에너지는 77%가 증가하고 이에 따라 CO₂ 배출도 27% 증가해 37.2 Gt에 이른다. 우리나라는 제4차 기본계획을 통해 1차에너지 대비 신·재생에너지 비중을 2020년 5.0%, 2025년 7.7%, 2030년 9.7%, 2035년 11.0% 달성키로 했다. 이에 따라 신·재생에너지 실용화를 위한 연구가 시급하다.

신·재생에너지 중 수소에너지는 이산화탄소를 배출하지 않아 에너지 고갈 문제와 이산화탄소 배출문제를 동시에 해결할 수 있는 꿈의 에너지다. 그러나 아직까지는 수소를 자연 상태에서 직접 얻지 못해 화석연료를 사용해 생산하고 있다. 그 과정에서 이산화탄소가 배출돼 청정성 논란이 일고 있으나 풍력이나 태양광발전에서 나오는 전력으로 물(H₂O)을 전기분해하면 순수한 수소(H₂)를 얻을 수 있고 이를 다시 산소와 결합시켜 에너지를 얻을 수 있다. 최근에는 다양한 천연원료로부



수소가 미래의 유망 에너지원으로 부상함에 따라 주요 국가들은 인공광합성 연구에 많은 투자를 하고 있다. 사진은 미국 캘리포니아공대에 설치된 인공광합성공동연구센터의 연구진. © JCAP

터 수소를 얻기 위한 여러 방법이 시도되고 있다. 특히 태양광으로부터 직접 수소를 생산하는 인공광합성 연구도 활발하다. 미국은 이미 2002년에 수소연료전지 선도계획Hydrogen Fuel Initiative을 발표했으며 독일은 수소연료를 사용하는 수소자동차, 가정용 난방시스템 등 모든 산업과 생활에 수소를 응용하는 데 앞장서고 있다.

그러나 태양열, 풍력, 바이오 에너지처럼 재생 가능한 무공해 대체에너지원을 사용해 물로부터 수소를 얻는 방법은 아직 경제성이 낮아 개선이 필요하다. 따라서 현재는 석유, 천연가스, 석탄 등과 같은 화석연료로부터 수소를 생산하는 방법이 경제적이다. 이 경우 에너지변환 장치로 기존의 내연기관보다 연료전지를 사용하면 변환 효율이 높아져 수소를 생산하는 과정에서 야기되는 에너지효율 저하를 극복할 수 있다.

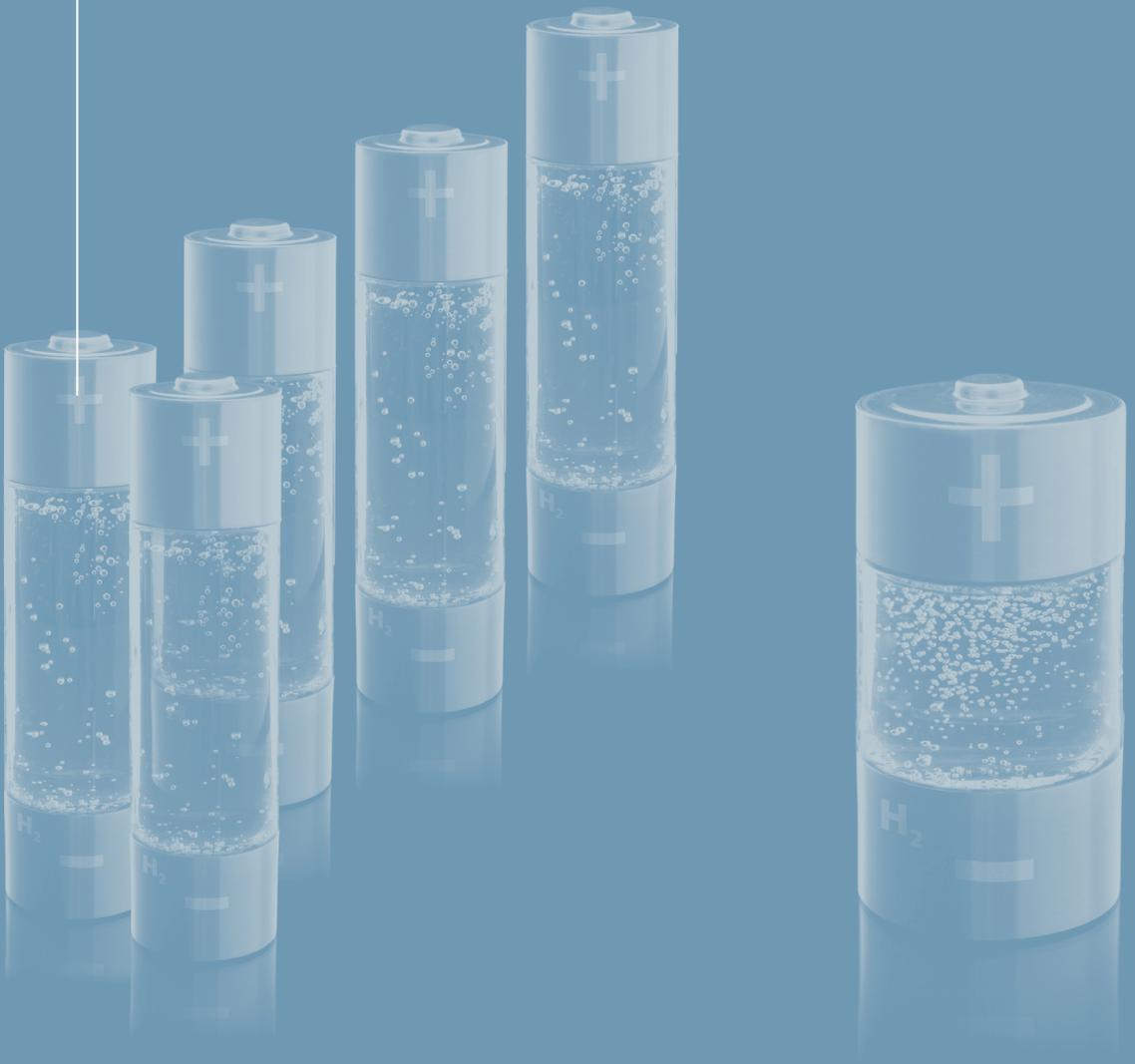
저탄소 녹색성장의 또 다른 목적은 에너지 사용량을 줄이는 것이다. 소비를 줄임으로써 전력 생산과 이에 따른 온실가스 배출 부담을 줄일 수 있기 때문이다. 발전이나 수송, 건물 등의 에너지 사용량 감축에는 종합적인 계획과 이를 뒷받침할 기술이 필요하다. 특히 도시 건물의 에너지 절약은 전력공급과 동시에 고려되어야 한다.

건물이 사용하는 에너지의 상당부분은 온도조절에 사용된다. 특히 하절기 빌딩의 냉방은 전국적인 전력수급을 불안정하게 할 정도로 많은 에너지를 소모하므로 이에 대처하는 방안이 마련되어야 한다. 그 중 하나가 바로 삼중 열병합발전이다. 삼중 열병합발전의 핵심기술인 제습냉방기술은 열병합발전소에서 공급되는 70℃ 정도의 배출열을 이용한 기술로서 매우 효과적인 전력수요 감축수단이다.

2016년도 과학기술전망에서는 저탄소 녹색성장을 향한 중요한 에너지전략 과제 중에서 수소경제사회를 준비하는 ‘연료전지기술’, 완벽한 청정에너지원을 만드는 ‘태양광-수소 제조기술’과 함께, 도시의 냉방전력수급방안 중 하나인 ‘제습 냉방기술’의 현황과 향후 전망을 알아보려 한다.

윤성필 | KIST 연료전지연구센터

수소경제사회를 준비하는 연료전지기술





석유 시대의 종말

2030년 어느 여름날, 아침 뉴스에 사우디아라비아 유전 몇 곳이 폐쇄됐다는 방송이 보도되자 휘발유 가격이 폭등하기 시작해 리터당 10만 원을 넘어선다. 이에 정부와 언론에서는 시장의 동요를 멈추기 위해 석유자원의 고갈을 염려할 단계는 아니라고 발표한다. 그러나 석유 공급이 급격히 줄어들 것을 걱정하는 사람들은 가격 폭등을 당연시하는 분위기다.

극단적인 예측처럼 보이겠지만, 현재 화석연료의 전망을 보면 그리 무리한 상상이 아니다. 사실 석유 공급의 문제는 어제 오늘 일이 아니었다. 이미 중국, 인도의 산업화와 경제성장에 따라 에너지 수요가 폭등하면서 예고된 사태다. 그 시기가 2030년이 될지 혹은 그 이전이 될지 아니면 훨씬 후인 100년 이후가 될지는 아무도 모른다. 다만 석유의 고갈은 분명히 다가올 미래이며 이에 대한 대비는 반드시 필요하는 점은 확실하다.

몇몇 학자들은 지구온난화와 온실가스가 직접적인 관련이 없다면 이 문제에 대한 연관성을 부인하고 있다. 그러나 온실가스가 지구의 평균기온에 중요한 영향을 준다는 증거가 속속 드러나고 있어, 신·재생에너지 확대는 지구온난화 문제를 해결하는 데 반드시 필요하다. 여기서 한발 더 나아가 신·재생에너지는 궁극적으



한때 기후변화가 실제로 일어나는가에 대한 논란이 있었지만, 21세기 들어 기후변화와 온실가스의 영향은 기정 사실로 받아들여지고 있다. 세계적으로 관찰되는 이상기후 현상과 최근 급증한 대기 중 탄소 농도와의 관계가 이를 입증한다. 남극대륙 동부 케이프 데니스에서 촬영된 사진에서는 두 마리의 아델리 펭귄이 올라가 있는 빙하가 심각한 수준으로 녹은 모습을 확인할 수 있다. © Pauline Askin / REUTERS

로 인류의 에너지 패러다임을 바꿈으로써 인류가 환경친화적이고 지속가능한 에너지 체계를 갖게 하는데 주도적인 역할을 할 것이다.

이에 우리나라와 몇몇 선진국들은 신·재생에너지 확대 및 에너지 다변화 정책을 통해 사회 및 산업 전반에 미치는 충격을 최소화할 수 있었다. 선진국들은 태양광, 풍력, 바이오에너지 등 재생에너지가 갖고 있는 시공간적인 제약을 극복하기 위한 기술을 선도적으로 도입했다. 그 중 하나가 재생에너지를 수소로 변환해 저장하고, 이를 다시 연료전지라는 효율적인 에너지 변환장치를 통해 전기 및 열로 사용하는 기술이다.

특히 신·재생에너지에서 신에너지로 분류돼 있는 수소와 연료전지는 기존 내연기관의 연료인 화석연료로부터 수소를 분리해 사용할 수 있다. 이는 기존 화석연료 인프라를 바꾸지 않고 에너지 시장에 진입해 점차 재생에너지에 의한 수소 인



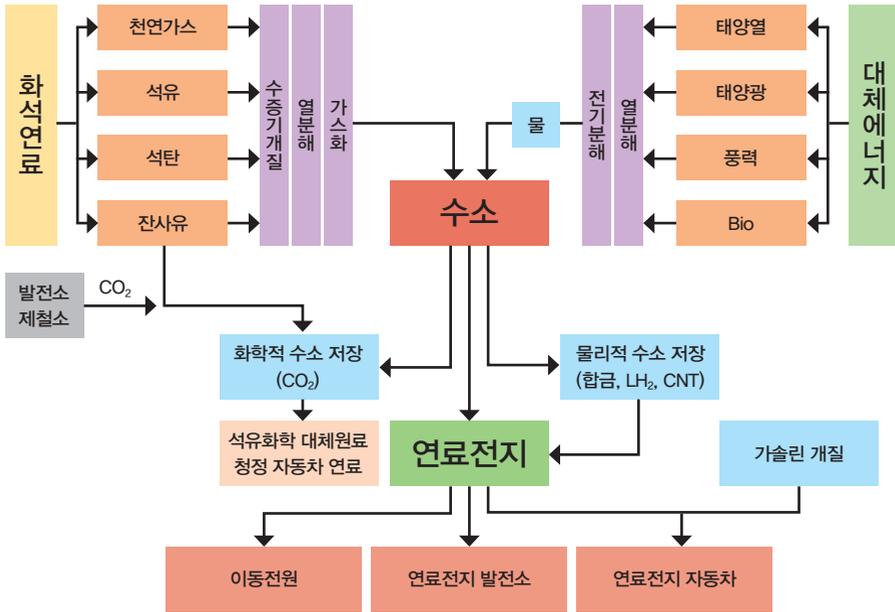
연료전지 기술 발전에 따라 주요 자동차 기업들은 수소연료전지 자동차를 양산하는 데 나섰다. 현대자동차 역시 최근 투싼의 수소연료전지 모델을 발표하고 전 세계 판매에 돌입했다. © 현대자동차

프라로 옮겨갈 수 있도록 시간적, 비용적인 문제들을 해결해줄 수 있을 것이다.

실제로 고체산화물 연료전지SOFC와 용융탄산염 연료전지MCFC는 세일가스를 연료로 이용함에 있어 기존 내연기관보다 월등한 환경친화성과 발전효율을 보였다. 덕분에 기존 석유 관련 발전장치를 대체함으로써 에너지 다변화에 크게 기여했다. 또한 전기차와 수소연료전지차의 도입으로 휘발유와 디젤에만 의존하던 자동차 시장은 중동발 석유 가격 변화에 비교적 안정적으로 대처할 수 있게 됐다.

수소 생산의 단기적 관점과 장기적 관점

수소에너지는 인류가 당면해 있는 에너지와 환경 문제를 궁극적으로 해결할 수 있는 꿈의 에너지원으로 평가받는다. 수소는 물에서 추출할 수 있어 자원의 제약이 거의 없고, 연소생성물 역시 물뿐인 청정연료기 때문이다. 따라서 수소연료는 화석연료의 한계인 부존자원 고갈과 환경오염 문제를 극복할 수 있는 유력한 대안이라 할 수 있다.



수소 제조기술 및 연료전지 기술의 계통도

그러나 수소는 자연 상태에서 독립적으로 존재하지 않는다. 대부분의 수소가 다 른 원소와 화합물 형태로 존재하기 때문에 수소를 생산하려면 추가로 에너지를 투 입해야 한다. 따라서 제조방법에 따라 생산된 수소에너지보다 투입된 에너지가 더 많아져 경제성이 떨어지는 문제가 나타나기도 한다. 수소를 생산하는 방법은 화석 연료를 이용하는 방법과 대체에너지로부터 얻는 방법, 두 가지로 구분할 수 있다.

즉 화석원료로부터 생산하는 방법과 재생에너지대체에너지로부터 생산하는 방법 이다. 태양열, 풍력, 바이오에너지 등과 같이 재생 가능한 무공해 대체에너지원을 사용하는 것이 이상적이지만, 아직까지는 경제성이 낮기 때문에 크게 활용되지 못 하고 있는 실정이다.

따라서 현재는 석유, 천연가스, 석탄 등과 같은 화석연료로부터 수소를 생산하

는 방법을 주로 쓰고 있다. 이때 기존 내연기관을 에너지 변환 장치로 사용하면 화석원료를 직접 사용하는 경우보다 수소를 사용하는 것이 에너지효율이 낮을 수 있다. 그러나 연료전지를 에너지 변환 장치로 사용하면 에너지 변환 효율이 증가하기 때문에 수소를 생산하는 과정에서 생기는 에너지효율 저하를 극복할 수 있다.

물론 비용과 시간의 문제 때문에 당장은 화석연료 인프라를 사용하는 방식으로 수소를 생산할 가능성이 크다. 이 중 에너지원 다변화 관점에서 셰일가스 또는 천연가스를 통한 수소 생산과 이를 이용하는 고온연료전지 시스템에 주목할 필요가 있다. 장기적 관점에서는 태양에너지 혹은 인공태양^{핵융합}을 사용한 수소생산을 고려할 수 있다.

단기적 관점: 셰일가스 효과적으로 활용하기

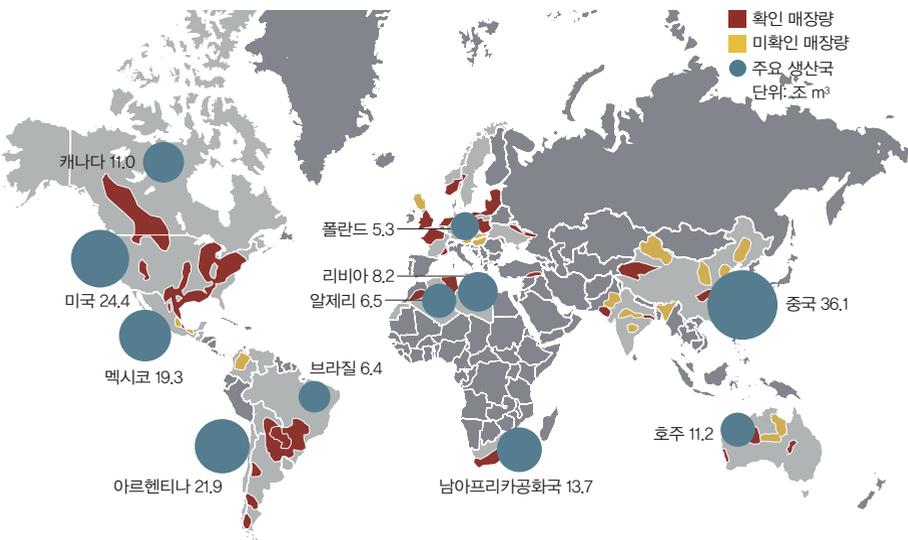
셰일가스는 메탄을 주성분으로 하는 천연가스로 고온 입자의 흡으로 이루어진 퇴적암인 셰일층에 매장돼 있다. 셰일가스는 암석에 뒤섞여서 존재하여 한동안 이를 채취할 기술이 없었지만 최근 수평시추법, 수압파쇄법이 등장하여 미국을 중심으로 적극적으로 개발되고 있다. 미국 이외에도 캐나다, 중국 등에 많은 매장량이 있는 것으로 알려져 있으나 지역마다 다른 채취방법을 적용해야 하는데, 현재의 채굴 기술은 환경오염이 심한 편이라 전세계적인 셰일가스 개발은 아직 걸음마 단계다. 그러나 석유가 그랬듯이 에너지 수요가 증가하고 가격이 올라가면 전세계적인 셰일가스 개발 붐은 조만간 현실화될 가능성이 크다.

셰일가스가 주목받는 이유는 수증기 개질^{steam reforming}이라는 기술을 통해 수소를 값싸게 효율적으로 생산할 수 있기 때문이다. 또한 내부 개질^{internal reforming} 기술을 이용해 고체산화물연료전지^{SOFC}, 용융탄산염연료전지^{MCFC}와 같은 고온 연료 스택 내부에서 메탄을 수소로 변환시킴으로써 전체 시스템 효율을 극대화할 수도 있다. 이에 따라 확보할 수 있는 발전효율은 47~60%에 달한다. 내부 개질 방식은 고

온연료전지 스택 내에서 발생하는 열에너지를 흡열반응인 수증기 개질을 통해 효과적으로 제어할 수 있게 도와준다. 여기에 전기화학반응에 의해 생성되는 부산물인 물을 수증기 개질 반응에 공급할 수 있어 개질공정수소생산에 대한 효율을 극대화시킬 수 있다.

물론 셰일가스를 직접 가스터빈과 같은 내연기관의 연료로 사용해 전기를 만들 수도 있다. 그러나 내연기관의 효율이 연료전지에 비해 낮을뿐 아니라 연료전지 45~60%, 내연기관 30~35% 연료전지가 환경오염물질을 덜 배출하기 때문에 고온연료전지를 이용한 발전이 가장 바람직하다.

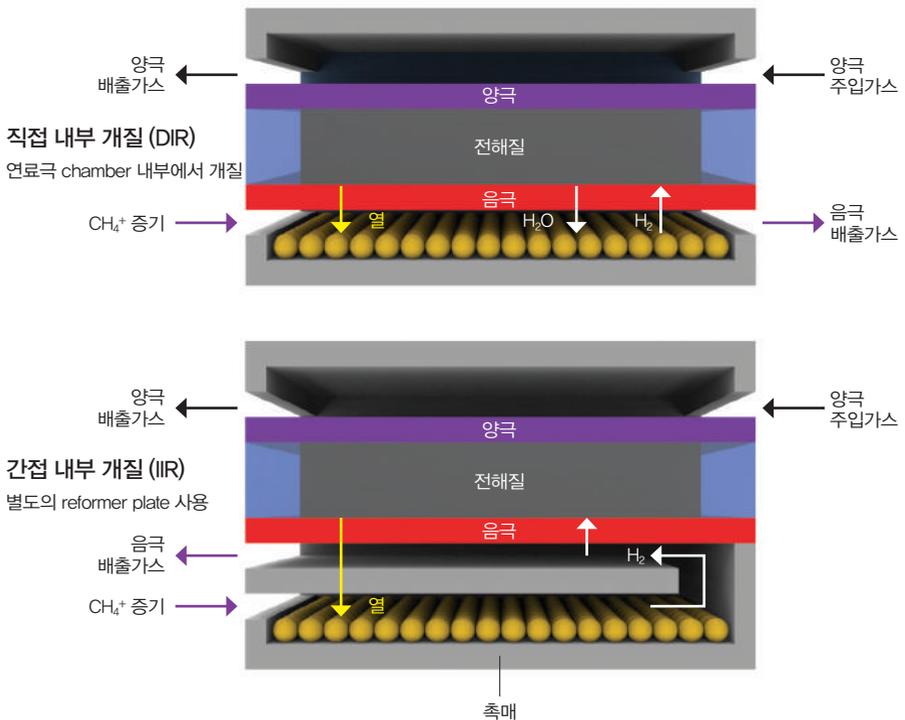
우리나라에서는 포스코에너지에서 2.5MW MCFC 시스템을 국산화해 경기도 화성에 세계 최대인 60MW 연료전지 시스템을 운전 중이다. 또한 KIST에서는 1989년부터 MCFC 개발연구를 진행해오고 있다. 최근에는 포스코에너지로부터 7만 시간 운전 가능현 수준 3만 시간한 구성요소 개발을 의뢰받아 연구를 수행하고 있다.



전세계 셰일가스 매장량 분포

이와 같이 셰일가스를 효율적으로 사용할 수 있는 대용량 고온연료전지 관련 산업이 국내에 존재하므로 셰일가스 도입을 적극적으로 하는 데 필요한 여건은 갖추었다고 할 수 있다. 그러나 최근 일부 정책입안자와 학자로부터 메탄을 연료로 사용하는 고온연료전지를 신·재생에너지 분야에서 제외시키려는 움직임이 일고 있다.

고온연료전지를 신·재생에너지로부터 제외하는 것은 주 연료인 메탄이 탄소가 주성분인 탄화수소이므로 일견 타당해 보인다. 하지만 이는 나무만 보고 숲을 보지 못하는 처사다. 메탄은 수소가 아닌 탄화수소 연료지만 셰일가스의 주성분으로 에너지 다변화 정책에 일조할 수 있다. 재생에너지인 바이오 연료 중 폐수가스



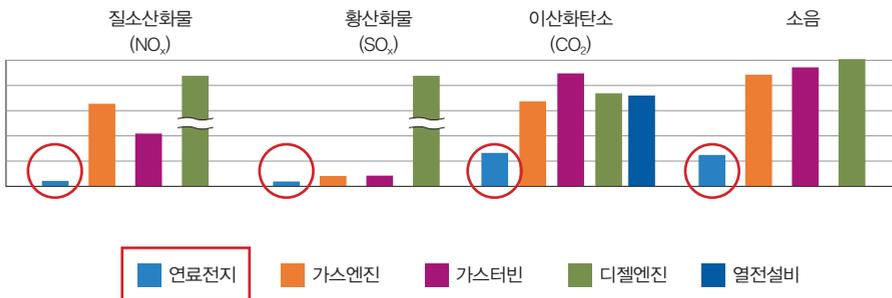
고온연료전지 내 메탄 연료 개질 방법

sewage gas, 매립 쓰레기 landfill gas 등의 주성분 역시 메탄으로 이를 연료로 하는 고온 연료전지를 배척해서는 안 된다. 오히려 이러한 고효율·청정 고온연료전지 시스템의 보급을 확대하여 기존 연료체계에서 수소연료 체계로 자연스럽게 넘어갈 수 있도록 장려하는 것이 에너지 안보를 지키고 이산화탄소 감축과 같은 환경보호 문제에 적극적으로 대처하는 지름길이 될 것이다.

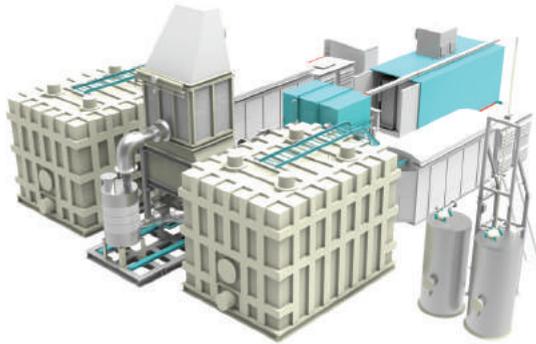
우리나라 실정에 맞는 분산형 전원

현재 시점에서 장기적 관점의 시장예측은 큰 의미가 없다. 단기적인 예측도 불확실성이 크기 때문이다. 따라서 관점을 단기로 한정하고 에너지원 다변화와 수소·연료전지 기술 연계의 핵심이 될 분산전원 및 자동차용 연료전지 시장을 살펴보자.

우선 분산전원 시장을 살펴보면, 우리나라는 2011년 대규모 정전사태 이후 최근에도 크고 작은 정전사태가 끊이지 않으며 전력 공급 체계에 대한 관심이 증가하고 있다. 에너지 수요는 지속적으로 증가하는데 비해 그 수요에 대한 전망은 불확실하기 때문이다. 이의 근본적 해결책은 전력 공급 체계를 변화시키는 것이다. 최근 요구되는 분산발전 방식의 도입은 이런 시대적 요구에 따른 것이다.



각 에너지변환장치에 따른 환경오염 배출물의 양. 연료전지는 전반적으로 가장 낮은 수준을 유지한다.



포스코에너지가 개발한 2.5 MW
MCFC 시스템
© 포스코에너지

분산형 전원이란 수요지 또는 그 근처에 설치돼 있는 소형 발전설비 30MW 이내를 기존의 전력계통에 연결하거나 독립적으로 운용해 수요자 요구에 맞는 경제적 운전을 하는 발전장치를 말한다. 최근 기술 진보에 따라 연료전지 fuel cell , 마이크로터빈 micro gas turbine 등 새로운 발전 방식과 태양광, 풍력 등 재생에너지가 분산발전의 전원으로 보급되고 있다.

이들 중 도심 및 인구밀집 지역이 많은 우리나라에서는 청정하면서도 시공간적인 제약이 심하지 않은 연료전지 전원 방식이 적합하다. 태양광과 풍력은 청정하지만 면적당 발전효율이 낮기 때문이다. 연료전지는 연료가 가지고 있는 화학에너지를 전기화학 반응에 의해 직접 발전하는 방식이다. 발전효율이 높고 원천적으로 소음이 없으며 대기오염 물질을 전혀 배출하지 않고 배열을 이용한 열병합 복합 발전이 가능한 신기술이다. 이와 같은 이유로 도심 근방에 연료전지 분산전원을 설치해 운전할 때 전력 계통 신뢰성 확보, 송배전 설비비 저감, 에너지의 합리적 이용 및 공해저감 등의 효과를 얻을 수 있다. 이 뿐만 아니라 모듈화가 가능한 연료전지는 정전사태와 같은 전력 수요예측의 어려움 및 불확실성을 극복할 수 있는 최상의 방안으로도 평가받고 있다.

전 세계 분산발전형 연료전지 시장은 2019년 약 10조 원 규모에 이를 것으로 보

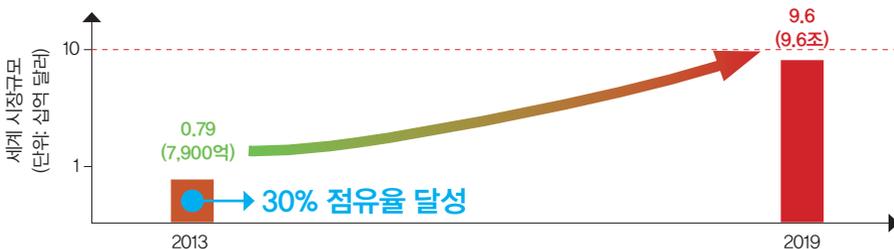
이다. 우리나라가 지금과 같은 공격적 투자를 유지할 경우 세계 시장의 30% 이상을 점유할 수 있을 것으로 기대된다.

전기차 vs 연료전지차, 승자는 누구?

최근 자동차 시장은 하이브리드 차에서 전기자동차로 옮겨가는 양상이다. 전기차의 경우 오염물 및 이산화탄소의 배출이 도심에서 일어나지 않는다는 장점이 있다. 그러나 동력원인 전기 자체가 기존 화력발전으로 만드는 것이라면 큰 틀에서 볼 때 환경친화적이라고 말할 수 없다. 반면 연료전지차는 부생수소 및 신·재생에너지로부터 생성되는 수소를 사용할 경우 궁극적으로 요구되는 환경친화성을 갖출 수 있다. 다만 수소생산이 기존 탄화수소연료로 이뤄질 경우에는 반쪽짜리 환경친화성에 그칠 것이다.

물론 탄화수소 연료로부터 기존 화력발전을 통해 전기를 생산해 전기차를 운전하는 것보다 수소·연료전지차가 효율적이어서 그만큼의 환경친화성을 확보할 수는 있겠다. 하지만 신·재생에너지로부터 수소를 확보하지 않는다면 연료전지차 역시 전기차보다 그다지 매력적이지 않다.

전기차와 연료전지차는 환경친화성보다는 차량 성능 측면에서 시장에서 경쟁할 가능성이 크다. 두 차량이 모두 전기모터를 엔진으로 사용하기 때문에 주행성능에



출처: "Stationary Fuel Cells: Market Shares, Strategies and Forecast, Worldwide" DEC, 2013 Wintergreen Research
 분산발전 연료전지 국내외 시장 전망



마이크로그리드의 개요. 마이크로그리드는 지역 단위로 사용할 수준의 소규모 전력원 여럿을 다양한 수요처와 연결하고 생산량과 소비량, 전력배분을 실시간으로 제어하는 것이다. 이를 이용하면 송전 손실을 줄이고 과도한 전력과 에너지 소비를 방지함으로써 지속가능한 에너지 시스템을 구축할 수 있다.

서의 차이보다는 주행거리에서 차별화될 것이다. 배터리를 연료로 사용하는 전기차는 주행거리를 늘리기 위해 배터리를 더 실어야 하고 이 경우 효율이 떨어져 배터리 증가량만큼 원하는 주행거리를 확보하기 어렵다. 반면 연료전지차는 수소 충전량이 차량 효율에 미치는 영향이 미미해 수소 탱크용량에 따라 장거리 주행이 가능한 차량을 제조할 수 있다. 따라서 전문가들은 전기차량이 도심 근거리 출퇴근 용에 적합한 한편, 연료전지차량은 장거리 혹은 레저 등을 위한 SUV 차량에 적합하다고 평가하고 있다. 그 외 전기차의 단점으로는 차량 충전에 소요되는 시간이 길다는 점과 전기 충전소 설치 문제가 있다. 연료전지차량의 단점으로는 역시 수소 충전소 설치 문제가 있다.

연료전지차량의 선적은 1997년 6대로 시작해 2015년 약 300대로 증가했다. 최근 현대·기아와 일본 도요타는 각각 ix 35와 미라이라는 연료전지 상용차를 판매하기 시작했다. 미국의 경우 2013년 기준으로 연료전지 자동차용 수소 충전소를 67개소 설치해 운영 중에 있다.

국내에서는 환경부를 중심으로 수소 충전소 설치계획안이 진행 중이며 수소 충전소 설치 확대에 의해 연료전지 자동차의 상용화는 가속화될 것으로 기대된다.

가격과 내구성이 시장 진입의 열쇠

연료전지를 상용화하기 위해 해결해야 할 가장 중요한 과제는 가격을 낮추는 것이다. 분산전원용 용융탄산염 연료전지의 경우, 현재 kW당 5,000달러 수준이나 향후



GS칼텍스에서 설치한 수소연료전지차용 수소 충전소. 수소연료전지자동차의 성패는 자동차 자체의 성능보다 수소연료 공급망을 얼마나 확충하느냐에 달려 있다. 현재도 자동차 연료가 유류와 LPG로 사실상 이원화돼 있어 새로운 연료 도입이 가능하긴 하지만 편리하게 사용할 수 있을 만큼 많은 수의 충전소를 확보하기는 쉽지 않다. 전기차 역시 동일한 문제를 안고 있다. © 서울시

kWh당 1,500달러로 시스템 가격을 낮춰야 시장 경쟁력을 확보할 수 있다. 또한 연료 다변화 차원에서 석탄가스화와 연계한 연료전지IGFC 개발이 필수적이다. 현재는 메탄을 연료로 사용하는 내부 개질형 MCFC 개발이 주를 이루고 있으나 값싼 에너지원인 석탄 활용 측면에서 외부개질형 MCFC와 SOFC 개발이 기술적 불확실성을 해소할 수 있다. KIST에서는 MCFC와 SOFC 기술 모두 연구하고 있다. 특히 장수명, 고내구성 그리고 연료다변화에 관한 연구가 주요 관심사다.

자동차용 연료전지의 경우 50만 대 양산 시 대당 3,000달러를 목표로 하고 있으나, 현재는 만 달러 수준이다. 가격을 낮추기 위해서는 현재 대당 50~80g 정도 사용되고 있는 백금 사용량을 20g 이하로 낮추고 고가의 불소계 전해질막을 탄화수소계로 대체해야 한다. KIST에서는 백금사용량을 줄이기 위해 새로운 촉매와 전극 제조기술을 개발 중이며 장수명 저가 탄화수소계막을 개발해 2012년 기업에 기술을 이전한 바 있다.

가격 저감과 함께 해결할 과제가 수명이다. 발전용 및 건물용 연료전지의 경우, 수명 4만 시간을 목표로 하고 있으나 현재는 2만 시간 정도에 불과하다. 자동차용 연료전지의 경우 10만 km를 목표로 하고 있으나 현재 6만 km 정도다. 수명을 늘리려면 소재의 내구성을 향상시켜야 한다. KIST에서는 내구성 향상을 목표로 MCFC 및 SOFC용 신 구성요소를 개발하고 있다. 다행히 자동차용 연료전지의 경우 촉매 및 전해질 개발, 제어·운전기술 개발을 통한 수명 향상에 성공해 현재 연료전지차량에 적용하고 있다.

장기적 관점: 태양에너지로부터 수소생산

태양에너지, 풍력 등 재생에너지로 수소를 생산한 후 연료전지를 이용한 발전은 에너지 저장 및 분배 관점에서 설득력이 있다. 최근에는 에너지 저장장치ESS, 특히 전기에너지 저장장치의 한 방법으로 배터리를 이용하는 스마트 그리드에 대한 연



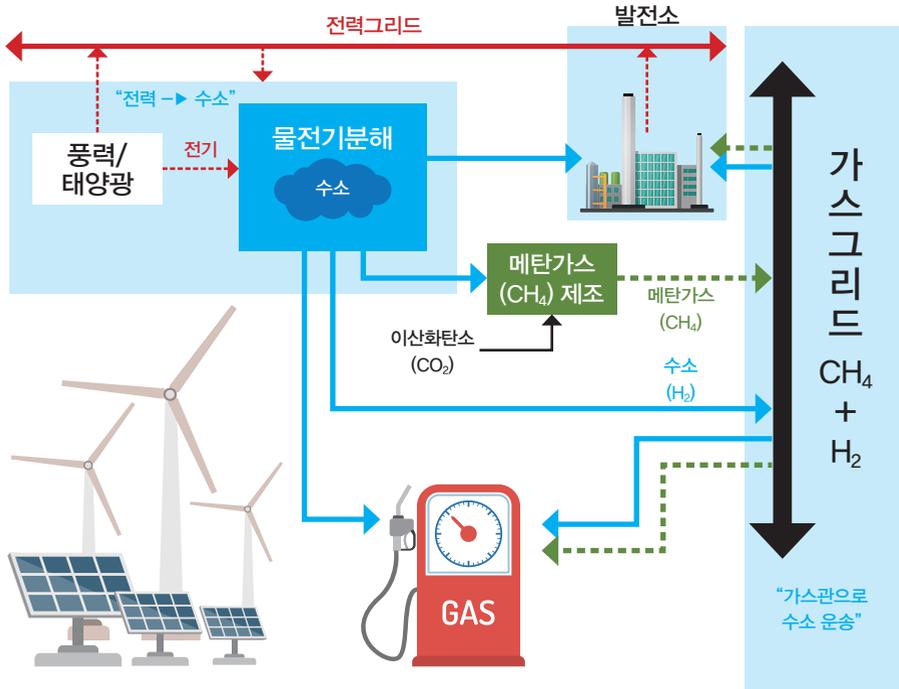
연료전지 발전기의 단가를 낮추고 크기를 줄일 수 있다면 가정에서 사용하는 것도 어려운 일은 아닐 것이다. 실제로 미국 메릴랜드주립대는 연료전지 기업인 레독스 파워 시스템스사와 공동으로 연구해 소형 연료전지 시스템 PowerSERG 2-80를 개발했다. '큐브'라는 별명답게 아담한 이 발전기는 하나의 모듈이 최대 80kW의 출력을 낼 수 있고 여러 모듈을 연결할 수 있어 가정이나 소규모 건물에서 사용하기에 부족함이 없다. © Redox Power Systems LLC

구가 활발하다. 이는 재생에너지의 특징에서 기인한다. 재생에너지 대부분은 변화 무쌍한 자연의 힘을 이용하기 때문에 시간대나 장소에 따라 발전량이 천차만별로 달라진다. 이를 수요처로 그대로 보내면 전력 공급이 불안정해지므로 전력 공급량을 유연하게 조절할 수 있는 중간저장장치가 반드시 필요하며, ESS가 바로 이 역할을 담당한다. ESS는 크게 두 가지 방식으로 나뉘는데, 여분의 전기에너지를 수소로 변환해서 수소 연료가 필요한 곳에 배분했다가 전기가 필요할 때 이를 활용하여 연료전지로 다시 발전하는 것(power-to-gas)이고, 다른 방법은 스마트그리드처럼 배터리에 여분의 전력을 저장했다가 필요할 때 필요한 곳에 송배전하는 방법이다.

결론적으로 말하자면 어느 방법이 시장을 독식하지는 못할 것으로 예상된다. 배터리는 대용량 에너지 저장시스템과 송배전선 확보 등이 걸림돌이고, 연료전지는 수소 변환 후 저장 및 이송 등이 문제점이다. 여러 가지 에너지망 확충 관점에서 배터리와 연료전지는 상호보완 관계에 있게 될 가능성이 크다.

일단 ESS의 한 축인 수소생산을 살펴보면 장기적 관점에서는 태양광 또는 풍력 등으로 발생한 전기를 이용한 저온 수전해^{low temp. water electrolysis}가 유력하다. 이 경우 태양전지의 발전 정도에 따라 배터리와 연료전지의 중요도 비율이 바뀌게 된다. 태양전지의 비약적 발전으로 일반 가정 및 산업체에서 태양전지 설치만으로 모든 에너지가 해결된다면 ESS로 배터리가 유리하게 된다.

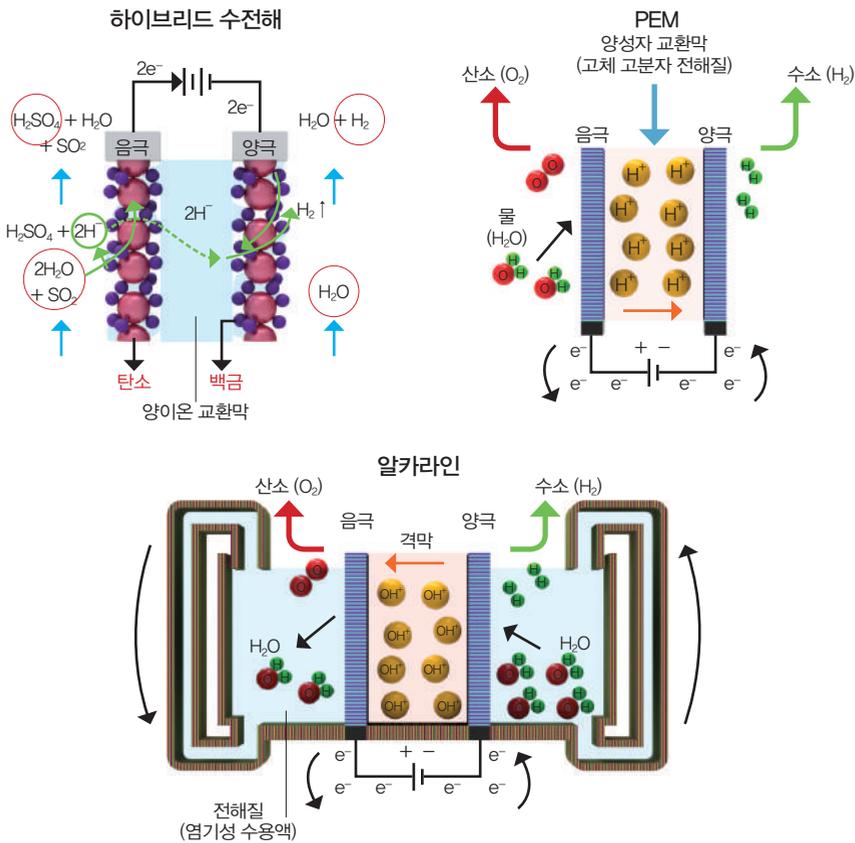
하지만 태양전지의 효율 및 지역·계절·시간적 제약으로 인해 충분한 에너지 확보가 어렵다면 다른 재생에너지, 즉 풍력, 수력, 바이오연료 등으로부터 추가적인 도움을 받아야 한다. 이때 전기저장 및 송전보다는 모든 재생에너지의 공통분모가 될 수 있는 수소로 변환해 연료전지에 공급하는 것이 바람직할 것이다. 전기, 열



수소를 기반으로 한 전력그리드 구성의 기본 개요

등 모든 에너지를 전력망 하나에만 의존하는 것은 불확실하며 추가로 공급될 에너지는 현재와 같이 가스라인이 적합하기 때문이다.

조금 더 장기적인 관점에서 생각해보자. 만약 인류가 꿈의 에너지원인 핵융합 기술, 즉 인공태양 기술을 개발한다면 수소 및 연료전지 기술은 더 이상 필요하지 않을까? 아니다. 수소 및 연료전지 기술이 오히려 더 중요해질 가능성이 크다. 인공태양 기술은 대용량 발전 장치이고 이러한 장치를 도심 내 분산발전 개념으로 도입



저온 하이브리드, PEM, 알카라인 수전해 개념도

할 수는 없기 때문이다. 또한 1억 ℃가 넘는 고온의 열에너지 등 막대한 에너지를 다른 형태의 에너지로 변환시켜 저장하거나 수요처로 보내줘야 하는 문제도 있다.

현재 가장 널리 사용되는 발전 방법은 증기 터빈을 이용하는 것이다. 그러나 발전효율과 고압 송배전과 같은 문제를 고려할 때 이는 바람직하지 않다. 오히려 열에너지로 수소를 생산하고 이를 이용해 수요처에서 연료전지를 통해 발전하는 것이 효율적이다. 이 경우 수소생산 공정 중 열분해, 열화학 순환 사이클, 그리고 고온연료전지를 이용한 수전해^{SOEC} 기술들이 핵융합 기술 확보 후에도 수소경제사회를 유지시킬 핵심기술들이 될 것이다.

단기적, 장기적 관점에서 수소연료와 연료전지 기술을 고찰해 보았을 때, 석유시대에서 수소경제사회로의 전환은 선택과 가능성의 문제가 아니다. 석유를 대체함으로써 에너지 패러다임의 대변환을 불러올 유력한 대안인 것이다.

참고문헌

- 홍성안 | 수소·연료전지 기술의 개발현황 및 보급정책 | 2004
- 권성욱, 이정민 | 수소에너지 인프라 관련 기술 혁신 방향 | 2014
- “수소제조 및 저장”, 녹색기술 심층 분석
- IEA | Technology Roadmap: Energy Storage | 2014
- US DOE | Hydrogen program progress reports | <http://energy.gov>
- EU commission CORDIS | cordis.europa.eu
- 김창희 등 | 고효율 수소에너지 제조·저장·이용 기술 개발 사업 기획 연구 | 2013
- 수소에너지사업단 | 수소연료전지-현황과 비전 | 2013
- Royal Society of Chemistry | www.rsc.org/solar-fuels
- TROJANUV | www.trojanuv.com
- Sunita Satyapal | Hydrogen & Fuel Cell: Program Overview | 2012
- www.hydrogenandfuelcells.energy.gov.
- National Hydrogen Association | Hydrogen and Fuel Cells: The U.S. market report | 2010
- SBC Energy Institute | Hydrogen-based Energy Conversion: more than storage, system flexibility | 2014
- “Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications”, *Progress in Energy and Combustion Science* | 2010
- “A comprehensive review on PEM water electrolysis”, *International Journal of Hydrogen Energy* | 2013



황윤정 | KIST 청정에너지연구센터

완벽한 청정 에너지원 만드는 태양광-수소 제조 기술





화석연료 대체할 미래의 에너지원

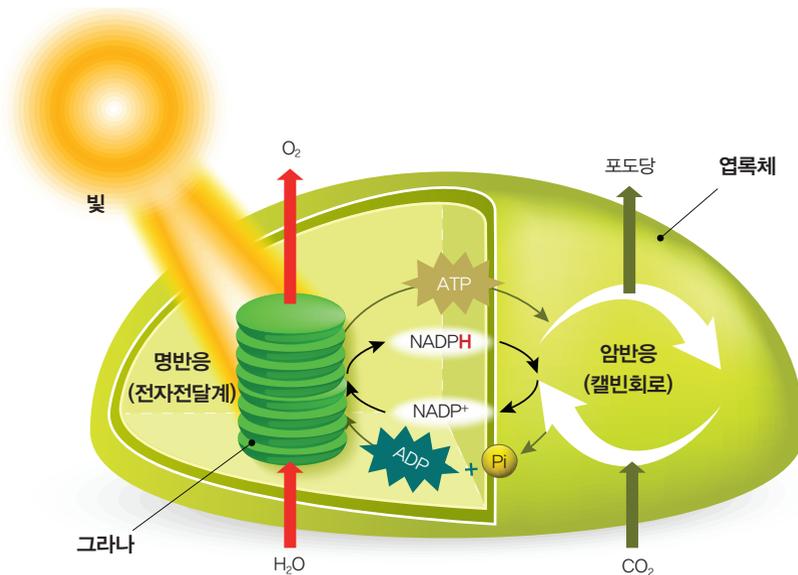
현대 문명은 석유나 천연가스와 같은 화석연료에 그 기반을 두고 있다. 화석연료는 인류의 문명에 큰 기여를 했지만 동시에 큰 약점이기도 하다. 셰일가스 발굴, 해저유전 개발처럼 화석연료를 확충하기 위한 노력에도 불구하고 언젠가는 그 양이 바닥날 것이기 때문이다. 게다가 화석연료 사용은 미세분진을 발생시키거나 온실가스를 배출하여 기후변화의 원인이 되는 등 환경에 악영향을 끼치기도 한다. 따라서 화석연료를 대체해 지속가능한 청정 에너지원을 개발하는 것은 인류에게 반드시 필요한 일이다.

화석연료를 대신할 미래 에너지원으로 가장 주목받는 것 중 하나가 바로 수소 H_2 다. 우주에서 가장 흔한 원소인 수소는 연소시 물 이외에는 부산물을 내지 않기 때문에 대표적인 청정 에너지원으로 손꼽힌다. 또한 연료전지와 연계해 전기에너지로 전환될 수 있기 때문에 수소 연료의 저장, 수송, 전환 등에 대해 다양한 연구들이 진행돼 왔다. 하지만 그 자체로는 청정 화학연료인 수소도 생산과정에서 일산화탄소 CO 나 이산화탄소 CO_2 가 발생하므로 완벽한 청정 에너지원이라고 하기 어렵다. 실제로 현재 사용되는 수소의 95% 이상은 화석연료로부터 얻는다.

이에 태양에너지를 이용한 수소 생산이 대안으로 떠오르고 있다. 태양에너지는

바이오에너지, 풍력, 조력 등의 다른 신·재생에너지원에 비해 그 양이 방대하고 단위 면적당 에너지 생산 밀도도 3~20배 정도 높다는 확실한 비교 우위를 가지고 있다. 그러나 태양에너지는 시간, 날씨, 지역에 따른 일조량에 큰 영향을 받으므로 에너지 수급이 불안정하다는 것이 약점이다. 이 때문에 최근에는 태양에너지를 저장하는 기술에 대한 관심이 점차 높아지고 있다. 태양광을 활용 가능한 화학에너지, 즉 연료로 전환하면 필요할 때 쓸 수 있을 뿐만 아니라 다양한 화학 물질의 원료로 활용할 수 있어 관련 연구가 활발하다.

지구상에서 수소는 주로 물의 형태로 존재한다. 지구상에 풍부한 물을 분해해 수소를 제조한다면 어디에서나 쉽게 에너지 자원을 얻을 수 있어 자원 불균형의 문제를 해결할 수 있을 것이다. 물을 분해해 수소와 산소를 생성하는 반응은 열역학적으로 흡열 반응 $\Delta G = 237 \text{ kJ/mol}$ 이므로 물분해 반응이 일어나기 위해서는 외부에서 에



광합성의 전 과정 개요도. 광합성은 명반응과 암반응으로 나뉘는데, 명반응에서 물을 분해해 수소 이온을 암반응으로 보낸다. 태양광을 이용한 수소 생산은 바로 이 과정에서 발생한 수소를 회수하는 것이다.

너지가 공급돼야 한다. 여기에 필요한 에너지로 막대한 양이 꾸준히 들어오는 태양광을 사용하면 가장 친환경적인 방법으로 수소를 생성할 수 있다.

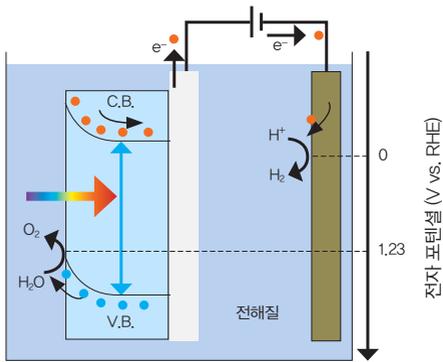
우리는 이미 이러한 반응을 알고 있다. 바로 광합성이다. 이 때문에 태양광 물분해 반응을 미생물이나 식물에서의 광합성 작용과 비교해 인공광합성이라고 부른다. 자연의 광합성 반응은 태양에너지를 흡수하고 활용해 물로부터 산소와 생물학적 에너지 저장체인 아데노신 삼인산ATP이나 생물 내 조효소NADPH를 생성한다. 또한 광합성 작용의 암반응에서는 이산화탄소를 고정해 당sugar이 생성된다. 마찬가지로 태양광 물분해 반응이 이산화탄소 환원 반응과 연계 된다면 다양한 탄화수소 연료와 화학물 원료를 생산할 수 있을 것으로 기대된다.

현재 미국, 일본, 유럽 등 선진국에서는 태양광을 기반으로 하는 인공광합성 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 이미 상용화에 접어든 태양광 발전 산업에 비해 아직까지는 원천 기술 개발 단계에 머무르는 것이 사실이다. 향후 전 세계적인 수요가 많을 것으로 전망되는 만큼 우리나라에서 태양광 수소 제조 원천기술을 확보한다면 그 파급 효과가 클 것이다.

빛 흡수 좋은 반도체 물질 개발이 중요

태양광 물분해 반응을 위해서는 먼저 반도체가 빛을 흡수해야 한다. 이 과정에서 생성된 전자electron, e^- 와 정공hole, h^+ 의 전하가 분리되고 각각 환원, 산화 반응에 사용돼 수소와 산소를 생성한다.

반도체가 빛을 흡수하면 전도대conduction band, CB에는 여기된 전자가 생긴다. CB의 전위가 수소의 환원전위보다 높으면 전자가 반도체의 CB에서 물로 전달되면서 수소 환원 반응이 일어날 수 있다. 반대로 빛을 흡수해 여기된 정공은 가전자대valence band, VB에 생기는데, VB의 전위가 물산화 반응의 산화전위보다 낮으면 정공이 전달돼 산화 반응이 일어날 수 있다. 따라서 물분해가 자발적으로 일어나려면



광전기화학적 물분해 반응의 개념도.

반도체의 밴드갭 E_g , 즉 CB와 VB의 에너지 준위 차이가 물분해 전위인 1.23eV보다 커야 한다.

산화와 환원 반응의 과전압을 모두 고려하면, 물분해 수소제조에 이상적인 반도체 물질의 밴드갭은 1.8 ~ 2.0eV 정도가 된다. 밴드갭이 이보다 큰 경우에는 태양광을 효율적으로 흡수할 수 없기 때문에 가시광 영역의 빛을 잘 흡수할 수 있는 반도체 물질을 개발해야 한다. 이에 지난 40여 년간 활성이 높은 반도체 물질을 개발하기 위한 연구가 꾸준히 진행돼 왔다.

태양광 효율 높이기 위한 다양한 노력

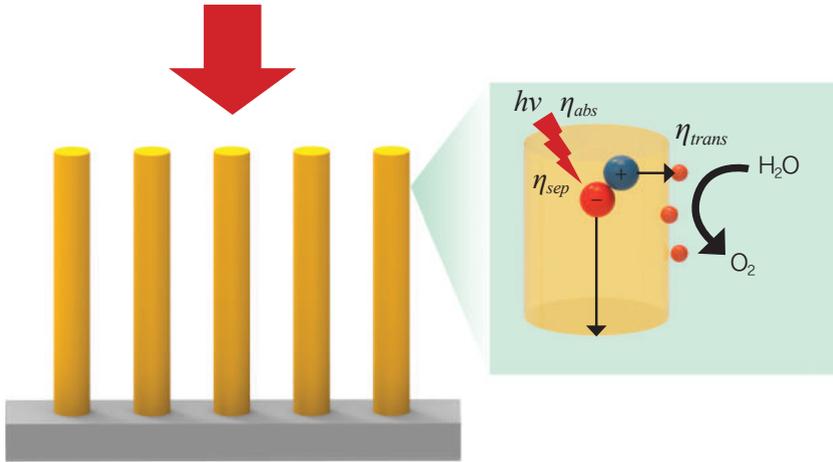
반도체 광촉매를 이용한 수소 제조는 반응시스템에 따라 입자형과 전극형으로 나눌 수 있다. 입자형은 광촉매 물질을 물속에 분산시킨 후 빛을 쬐어주고 발생하는 기체를 포집해 수소를 얻는다. 시스템이 간단하다는 장점은 있으나 물분해 반응이 반드시 자발적으로 일어나야 하고 광촉매 표면에서 산화와 환원 반응이 동시에 일어나기 때문에 높은 효율을 얻기 힘들다. 반면 전극형은 광촉매 물질을 전극으로 만들고 전기화학전지를 갖추어야 하는 번거로움은 있으나 산화 반응과 환원 반응을 분리할 수 있는 장점이 있다. 또한 필요에 따라 외부에서 전압을 인가할 수 있

며, 태양전지와 같은 신·재생에너지와 연계할 수 있기 때문에 높은 태양광-수소 전환 효율을 달성하기에는 더욱 적합하다.

한편 광촉매 물분해의 태양광 효율(quantum yield)은 크게 3가지로 나눌 수 있다. 빛을 흡수하는 효율 η_{abs} , 흡수한 빛에 의해 생성된 전하가 재결합되지 않고 분리되는 효율 η_{sep} , 그리고 분리된 전하가 표면에서 촉매 반응에 사용되는 효율 η_{mms} 이 그것이다. 따라서 전환 효율을 높이기 위한 연구 방향도 각각의 효율을 증가시킬 수 있는 방향으로 연구한다.

이 중 η_{abs} 를 높이기 위한 연구를 먼저 살펴보자. 초기에는 안정성 등의 이유로 이산화티타늄(TiO_2), 산화아연(ZnO)처럼 밴드갭이 큰 금속 산화물이 주로 개발됐으나 태양광에서 자외선이 차지하는 비율이 5% 미만이므로 높은 전환 효율을 달성하기에는 부족했다. 따라서 최근에는 밴드갭을 줄여 가시광 영역의 빛을 흡수할 수 있는 반도체 물질을 개발하고 있다. 대표적으로 유망한 물산화 광촉매 물질에는 산화텅스텐(WO_3 , $E_g=2.6$ eV), 산화비스무트바나듐(BiVO_4 , $E_g=2.5$ eV), 산화철(Fe_2O_3 , $E_g=2.3$ eV), 질화탄탈럼(Ta_3N_5 , $E_g=2.1$ eV) 등이 있다.

η_{sep} 을 높일 목적으로 물질 내 전하의 이동, 전기 전도도, 전하의 확산 거리, 전하의 수명 등 전기적, 물리적 특성을 높이는 연구들이 있다. 물질에 다른 원소를 넣고 도핑해 전기 전도도를 향상시키거나 모양을 나노 구조로 다양하게 조절해 표면적을 넓혀 전하가 전극 표면으로 이동하기 쉽게 해 효율을 높일 수 있는 것이다. 특히 일차원의 특징을 가지는 나노선, 나노튜브 등의 구조는 빛을 효율적으로 흡수하고 전하 분리를 도우면서도 전기적 특성을 유지하는 장점이 있어 다른 구조에 비해 각광 받는다. 실제로 많은 경우, 광촉매 물질이 일차원 나노 구조를 가질 때 높은 효율을 보인다. 여기에 더해 서로 다른 두 종류의 반도체 물질을 이종접합(heterojunction)해 각 물질의 장점을 살려 빛을 효율적으로 흡수하면서도 전하분리 효율을 높이는 방향으로 연구가 진행되고 있다.



광촉매 물분해 산화전극의 모식도(왼쪽)와 전극에서의 세 가지 효율(오른쪽).

마지막으로 η_{trans} 를 향상시키기 위해서는 조촉매를 증착하는 방법, 표면적을 넓혀 촉매 작용 자리를 늘리고 물분해 반응의 속도를 증가시키려는 노력이 있다. 특히 조촉매 증착의 경우 광촉매 물질의 빛 흡수를 방해하지 않으면서 광촉매 물질과 조촉매 물질 사이의 전하 흐름을 원활하게 해야 하므로 광촉매 전극 물질에 따라 최적의 조촉매를 개발하는 연구들이 활발하다. 조촉매는 광촉매 물질의 내구성을 증가시키는 데도 기여한다. 광촉매 표면의 여기 전하는 촉매 물질 자체를 공격하거나 물과 함께 반응해 촉매 물질의 부식을 일으키기도 해 내구성에 문제가 생길 수 있는데, 표면에 조촉매를 증착시키면 이러한 부반응의 경로를 차단하고 물분해 반응을 촉진하기 때문이다.

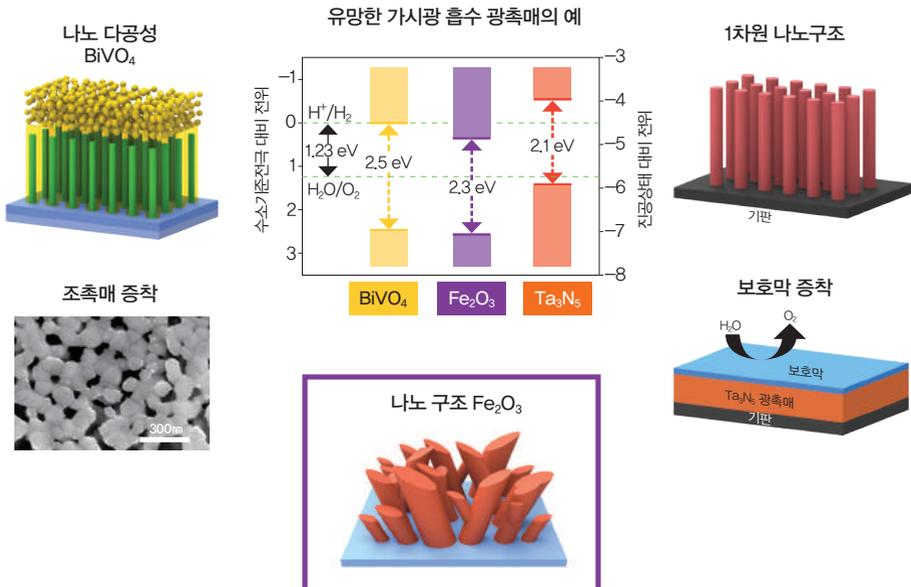
앞서 언급한 다양한 연구에 힘입어 광촉매 물분해의 전류가 최근 5년간 급속도로 증가해 최고 $5\text{mA}/\text{cm}^2$ 이상의 광전류를 달성했다. 이러한 광전류의 증가 덕분에 높은 태양광-수소 전환 효율로 이어지려면 외부에서 인가하는 전압 없이도 높은 광전류를 얻을 수 있지만, 현재 대부분의 광촉매는 CB나 VB의 위치가 이상적인

위치에서 벗어나면서 외부에서 부족한 전압만큼 인가해 주어야 한다. 따라서 아직 광촉매 전극만으로는 산업화 단계에 이를 만한 높은 전환 효율을 얻기 힘들다.

태양광-수소 전환 효율 15% 기대

한편 촉매 전극과 태양전지를 접합해 일체형 시스템을 구현하면 태양전지로부터 제공되는 전압을 받아 촉매 전극의 전위가 이동되므로 자발적인 물분해 반응이 가능해지고 효율을 증가시킬 수 있다. 또한 태양전지에 기반한 광전기화학적 물분해 전지는 촉매 전극 물질의 CB나 VB의 전위 제한을 줄일 수 있다. 이 때문에 사용할 수 있는 물질의 후보군이 더 다양해질 수 있고 빛을 흡수할 수 없는 일반 전기화학적 촉매를 사용할 수도 있다.

이 경우 촉매 전극의 개발 못지않게 빛을 흡수하는 태양전지의 개발이 중요하다.

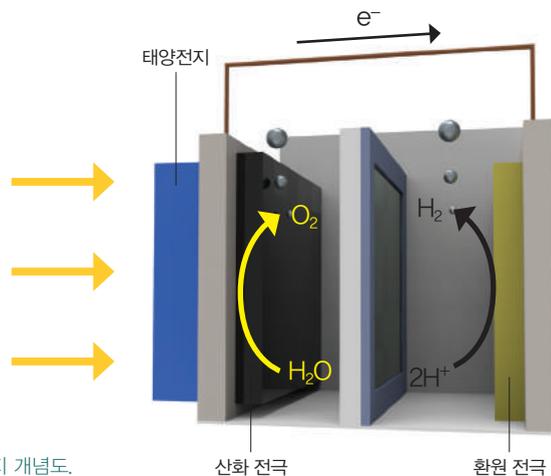


유망한 가시광 흡수 물산화 광촉매들. 사용하는 물질에 따라 물분해를 하는 전위와 광전류 양이 다르므로, 소재의 개발이 중요하다.

물분해에서 필요한 전압을 충분히 공급하기 위해서는 일반적으로 0.6~1.0V 수준인 단일 태양전지의 광전압만으로는 부족하기 때문에 태양전지를 탠덤 또는 모듈로 연결해서 높은 과전압을 공급하고자 한다. 탠덤형 태양전지는 빛의 흡수 효율을 최적화하도록 적층 구조로 쌓을 수 있기 때문에 모듈로 연결한 것보다 더 높은 태양광 수소 전환 효율을 기대할 수 있다. 현재 실리콘 태양전지나 유기 태양전지를 탠덤화하거나 모듈화해 촉매 전극과 접합하는 시스템이 연구되고 있다.

광전기화학적 물분해 전지는 태양전지, 산화 전극, 환원 전극, 그리고 분리막 등의 요소 기술이 융합된 장치다. 이 때문에 개별 요소 기술의 개발 못지않게 각 요소 기술의 손실을 최소화해 일체형으로 구현하는 연구도 중요하게 병행돼야 한다. 그러나 융합된 장치 개발 연구는 각 촉매 전극 개발 연구에 비해 상대적으로 부진한 것이 사실이다. 이에 장치 디자인 및 성능 평가에 대한 연구가 많이 요구된다.

KIST에서는 광촉매 전극의 개발뿐만 아니라 용액 공정에 기반한 구리·인듐·갈륨·셀레늄(CIGS) 박막 태양전지를 이용한 저비용, 고효율, 고안정성의 광전기화학 전지 개발에도 힘쓰고 있다. KIST 연구팀은 CIGS 모듈에 나노 금속 산화물 전



태양광 기반 광전기화학적 물분해 전지 개념도.

극을 접합해 4% 이상의 인공광합성 전환 효율을 기록했다. 이는 자연에서 나뭇잎이나 박테리아 등이 내는 것에 버금가는 높은 효율이다. 연구팀은 또한 초기의 모듈형 태양전지 기반 장치에서 빛흡수 효율을 증가시키기 위해 박막 태양전지의 탠덤 구조 또는 박막 태양전지와 가시광 활성 광촉매 전극과의 탠덤 구조를 기반으로 하는 장치를 연구하고 있다. 일련의 요소기술 개발과 이를 접합한 장치 개발을 성공적으로 구현한다면 미국 에너지국DOE 보고서에서 예측하는 산업화 지표인 15%의 태양광-수소 전환 효율을 달성하는 것이 요원하지만은 않을 것이다.

다만 저가의 생산 비용, 높은 효율, 그리고 내구성 등을 중점적으로 확보해 단점을 보완하는 노력이 필요하다. DOE에서는 상업화가 가능한 광전기화학적 수소 생산 목표를 수소 제조가격을 kg당 5달러, 광-수소 전환효율 15% 이상, 안정성 2만 시간 이상으로 설정하고 있다. 현재까지는 III-V족 화합물 반도체의 탠덤 전극을 이용하거나 페로브스카이트 태양전지를 이용한 경우 등의 특별한 시스템에 한해서 12%가 넘는 태양광-수소 전환 효율이 보고된 바 있었다. 그러나 이들 시스템은 수십 시간 이내에 광촉매 전극이나 태양전지의 성능이 떨어져 안정성의 문제가 있다.

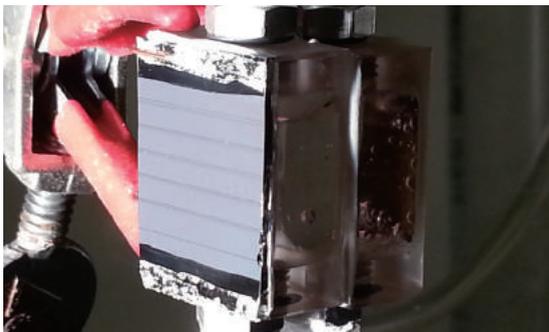
태양전지의 안정성만 문제가 되는 것은 아니다. 산화, 환원의 촉매 반응을 일으키기 위해서 전해질과 접촉해야 하는 물분해 장치는 촉매 반응 대신 광전극 물질의 화학적 부식 반응이 일어나면 내구성이 떨어진다. 특히 태양광이 비추는 동안에는 여기된 광전하에 의한 광부식이 일어난다. 현재 이를 해결하기 위한 산화물 보호막을 비롯하여 여러 연구가 이루어지고 있지만 아직까지는 기대에 못 미치는 수준이다. 태양전지 시장의 경우 보통 20년 이상의 제품 사용을 보장한다는 점을 고려할 때, 태양광-수소 전환 기술도 장기 안정성을 확보해야 할 것이다. 내구성의 확보는 생산 비용과도 연결되므로 시장에서 경쟁력을 갖추는 데 중요하다. 이와 더불어 저비용 대면적 제조가 가능해야 한다. 앞서 언급한 III-V족 화합물 반도체를 이용한 광전극의 경우 효율은 높지만 고가의 소재 및 박막 제조 공정이 사용되기

때문에 향후 대량생산 및 대면적화에 어려움이 있다. 이를 극복하기 위해서 저가 소재 및 제조 공정의 개발이 요구된다.

우리나라 연구진, 세계적 경쟁력 갖춰

이와 같은 점을 감안할 때 인공광합성 기반의 수소 제조기술은 아직 시장에 진출할 정도의 경쟁력을 갖고 있지 않다고 할 수 있다. 특히 가격 경쟁력이 문제다. 현재 태양광-수소 생산 가격은 GJ 당 약 30달러로 일반 수전해 수소 생산 가격이 GJ 당 15~17달러임을 감안하면 거의 두 배 이상임을 알 수 있다. 따라서 촉매 물질 개발, 태양광 활용 요소 기술 개발 등을 통해 생산 가격을 낮춰야 할 것이다.

물론 인공광합성을 기반으로 하는 수소 생산은 생산된 전기에너지를 사용하는 것이 아니라 태양으로부터 직접 부족한 에너지를 사용하기 때문에 최종적으로는 비용 절감의 효과가 기대된다. 또한 기후변화 대응에 가장 적합한 미래 청정화학에너지라는 점에서 기술 개발 전망도 밝은 편이다. 전 세계적으로도 태양광-연료 전환 시장의 성장 가치를 높게 평가해 국가 차원에서의 대형 프로젝트를 지원하며 원천기술을 확보하고 관련 시장에 진출하기 위해 막대한 투자를 하고 있다. 대표적으로 미국의 인공광합성공동연구센터Joint Center for Artificial Photosynthesis, 네덜란드의 바이오솔라 셀Biosolar Cells, 유럽의 솔라에이치투Solar-H₂ 프로그램 외에 일본, 중국, 호



KIST에서 개발해 세계 최고 효율을 달성한 바 있는 인공나뭇잎. 한국은 미국이나 일본에 앞서 인공광합성을 전문적으로 연구하는 센터를 만들어 상당한 연구 경험과 기술력을 확보했다.



주 등의 국가에서도 태양광 물분해에 대한 연구 투자가 계속되고 있다.

향후 인공광합성 연구는 태양광 수소 생산의 기술에서 그치지 않을 것이다. 수소 환원전극을 이산화탄소 환원 전극으로 대체한다면 일산화탄소나 다양한 탄화수소 화합물을 합성할 수 있다. 이를 통해 이산화탄소 배출량을 줄이는 동시에 신·재생 연료나 각종 화합물을 생산하는 데 활용할 수 있다. 다행히 최근 국내 연구진이 태양광 연료 생산 분야에서 세계적 수준의 기술을 보고하고 있다. 앞으로 지속적인 연구를 통해 관련 분야의 원천 기술을 확보하고 실험실 수준을 넘어 상용화가 가능하도록 하는 연구가 매우 중요하다.

참고문헌



- Hydrogen & Fuel Cells Program Review | U. S. DOE | 2013
- "Solar Fuels and Artificial Photosynthesis", *Science and innovation to change our future energy options* | www.rsc.org/solar-fuels | 2012
- A. Ursúa, L. M. Gandía, P. Sanchis | "Hydrogen Production From Water Electrolysis: Current Status and Future Trends", *Proceedings of the IEEE* | 2012
- <http://science.energy.gov/bes/research/doe-energy-innovation-hubs/>

강상우, 이대영 | KIST 도시에너지연구단

여름철 전력대란의 해결책, 제습냉방기술



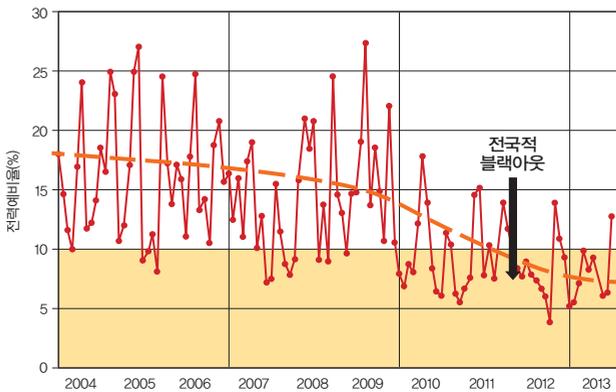
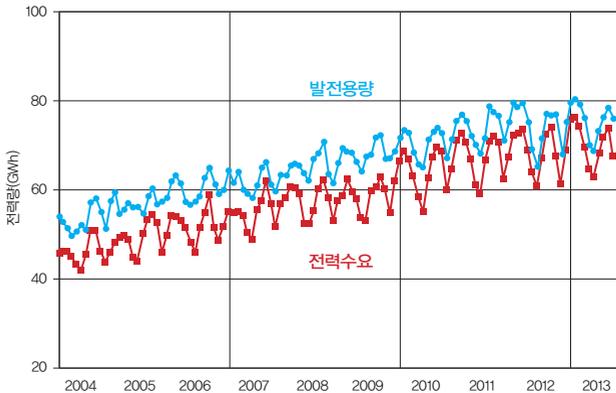


여름철 전력대란의 발생과 원인

2011년 9월 15일 서울을 비롯해 경기, 강원, 충청 등, 제주를 제외한 전국 곳곳이 기습적으로 정전되는 사상 초유의 사태가 발생했다. 이날 오후 3시부터 시작된 정전사태는 약 5시간 뒤에야 해결됐다. 국지적 정전이 아닌 전국 동시 다발적인 블랙아웃이 빚어진 것은 국내에서 처음이었으며, 사전통보 없이 급작스레 발생해 전기를 사용하는 사업체에서 피해가 속출했다. 이 사건은 하절기가 지나 발전기 계획 예정정비가 시행된 후 발생한 기습적인 늦더위로 전력 수요가 급증해 예비전력이 바닥을 드러내면서 발생했다. 1차적 원인은 예측을 크게 상회한 전력 수요의 급증이었지만, 근본적 문제는 예비전력에 여유가 없었던 것이다.

2004년부터 과거 10년간 전력예비율은 지속적으로 줄어들고 있으며, 2010년 이후에는 10% 미만, 5% 내외에 접근해 전력수급의 불안정이 심각한 수준이 됐다. 이러한 상황의 직접 원인은 전력공급이 충분치 않은 것이지만, 과거 10년간 전력공급 용량이 지속적으로 확충돼 왔다는 점을 감안하면 전력공급원을 늘리는 것만으로 전력수급을 안정화하는 데 한계가 있음을 잘 알 수 있다.

송전탑 건설을 둘러싼 마찰도 생각해봐야 할 문제다. 최근 해안가에 새로 들어서는 원자력 발전소와 화력발전소에서 생산된 전기를 수요처가 밀집된 도시지역으



과거 10년간 전력생산 및 소비량 변화(위)와 전력예비율 변화(아래)

로 송전하기 위해서는 송전탑을 설치해야 한다. 하지만 송전탑 건설은 지방자치단체 및 지역 주민들과의 끊임없는 마찰을 발생시키고 있어 전력공급을 어렵게 만드는 한 요인이 되고 있다.

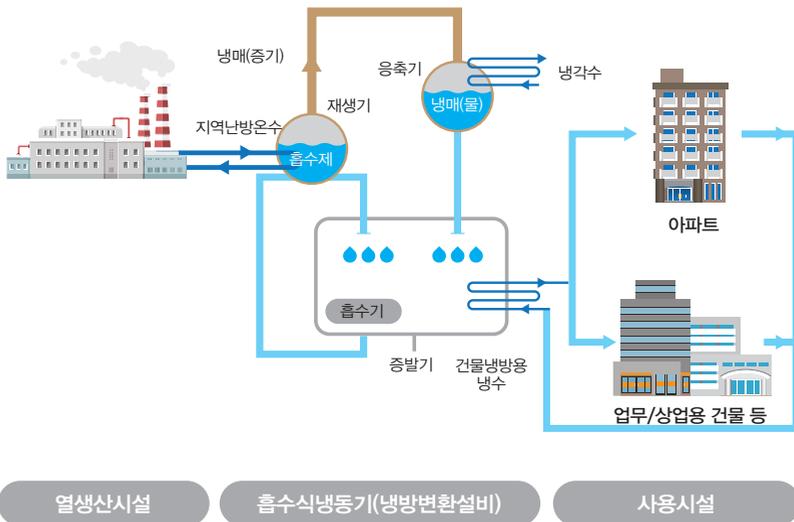
전기에너지 쓸 수밖에 없는 현실...대안은?

이러한 문제들은 기존의 정책을 전력공급 확충 중심에서 수요관리 중심으로 전환시켰다. 2014년 1월 확정된 제2차 국가 에너지기본계획의 큰 중심은 전력 수요의 15%를 감축하고, 분산형 발전 비율을 15%까지 증대하는 것이다.

전기기기의 효율을 향상시키는 동시에 전력수요를 감축하기 위해 가장 먼저 고려할 방안은 전기에너지 사용을 다른 에너지원으로 대체하는 것이다. 특히 하절기 전력수급 불안정의 주요원인인 냉방전력의 대체가 필요하다. 2014년 하절기 냉방 전력은 19GW로 최대전력수요의 26%를 차지했다. 이는 우리나라 발전기 4대 중 1대가 냉방전력 공급용으로 사용되며, 간절기에는 대기상태에 있다는 뜻이다.

이에 열병합발전의 배열을 이용해 냉방을 공급하는 방법은 매우 효과적인 전력 수요 감축수단이 될 수 있다. 열병합발전 배열을 이용한 냉방공급은 하절기 열수요를 확대해 결과적으로 분산발전의 효율과 경제성을 높인다. 특히 전력수요처 인근에 건설되는 분산발전설비의 경우 가스연료를 사용해 발전단가가 높아지므로 열병합발전 건설을 고려해 봐야 한다.

하절기의 열수요를 창출하고 냉방전력 대체효과를 확대하려면 공동주택에 열이용 냉방기술을 보급하는 방안을 추진해야 한다. 열병합발전 배열이나 소각열 등으



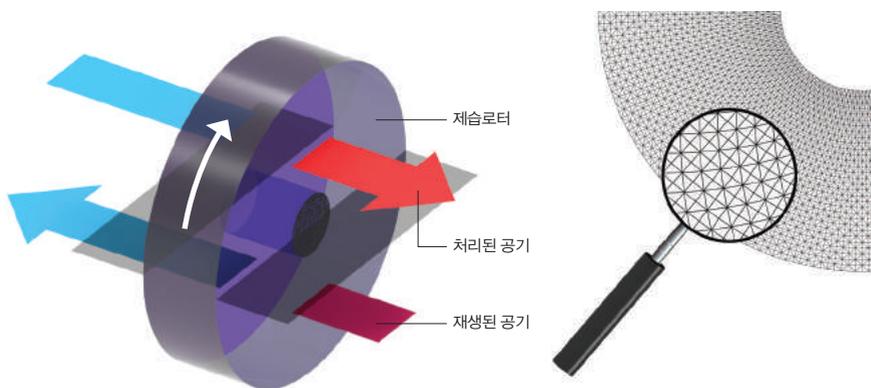
흡수식 냉각기를 이용한 지역냉방의 개요. 발전소의 열에너지를 이용해 냉수를 만들어내고, 이를 건물의 냉방에 사용한다. 발전소의 폐열을 이용하므로 여름철 에너지 절감에 큰 도움이 된다.

로 공급되는 온수를 이용해 냉수를 생산하는 중온수 흡수식 냉동기가 지역난방에 보급되고 있으나, 지역난방 수요의 90%를 차지하고 있는 공동주택에는 거의 보급 실적이 없는 상태다. 다행히 공동주택에 적합한 열이용 냉방기술인 제습냉방기술이 국내에서 개발돼 2013년에 2년간의 실증사업을 통해 기술검증 및 보급 타당성이 확인된 바 있다. 이 기술의 보급 확대가 제2차 국가에너지기본계획의 주요 추진 과제에 포함됐다.

전력수요 감축의 핵심 기술, 제습냉방

제습냉방은 실리카 겔(silica gel), 제올라이트(zeolite) 등의 제습제를 이용해 공기 중의 습기를 제거해 냉방하는 기술이다. 건조한 공기 속에서 물이 증발할 때 주변에서 열을 흡수하는 현상을 이용해 공기 온도를 낮춰 냉방을 공급하는 원리다. 제습기는 회전하는 로터(rotor)의 형태로 만들어 흡착 및 제습이 활발히 일어나게 하고 다른 부분에서는 탈착, 재생이 일어난다.

제습기에 흡착되거나 흡수된 수분을 날려 보내고 제습기를 재생할 때에 열이 필요한데, 근처 주택 단지에 있는 열병합발전소로부터 70℃의 배열을 공급받으면 된



제습냉방시스템의 핵심 부품, 제습로터의 세부 구조.

다. 추가적으로 사용되는 에너지는 제습로터를 돌리는 모터와 바람을 일으키는 팬에 의해 소모되는 전기 정도다. 열병합발전소의 여름철 열수요는 거의 없어 가동을 중지하기 때문에 제습냉방이 보급될수록 열병합발전소의 가동률도 높아져 국가 전체 전기생산량을 늘릴 수 있는 효과도 얻을 수 있다.

국가에너지기구IEA는 1974년 경제협력개발기구OECD 국가 간의 에너지 기술 협력 기구로 발족된 후, 최초의 국제협력 연구로 태양열 냉난방기술 개발을 채택했다. 이 과제의 중요 기술로 진행된 연구가 제습냉방기술이다. 독일, 프랑스, 영국 등 유럽국가들이 주도적으로 진행한 이 연구에서 시작품 개발 및 실증 연구가 이뤄졌다. 이 연구는 EU의 연구개발보급지원 사업인 'EU 프레임워크 프로그램Framework Program'과도 연계돼 진행되고 있으며, 2008년의 ROCOCO(Reduction Of Costs of Solar Cooling Systems) 프로젝트에서는 그동안의 실증 연구를 분석하고 보급을 확대하기 위한 방안이 강구됐다. 이 프로젝트에서는 전 세계에 설치된 태양열 냉방 시스템에 대해 시스템 구성, 설치 및 운전 비용을 조사 분석했다. 그 결과 제습냉방시스템이 흡수식을 비롯한 여타 태양열 냉방기술에 비해 초기비용 및 운전유지 비용 측면에서 가장 경제적인 것으로 평가됐다.

그런 노력들의 결과로 저온열원을 이용하는 제습냉방시스템이 2008년 제습냉방 분야 세계 최고 기업인 문터스Munters에서 상용화됐으며, 태양열이나 폐열 등을 이용한 냉방기술도 보급되고 있다.

미국, 일본, 독일 등에서는 1980년대부터 제습냉방시스템에 대한 연구를 시작해 제습로터 등 주요 부품을 지속적으로 개발하고 있다. 미국에서는 이미 제습냉방시스템이 슈퍼마켓의 대형 냉장 디스플레이 케이스의 습도 조절, 호텔과 모텔 공조 등의 틈새시장에 진입한 상태다. 제습냉방시스템은 제습제 물질개선, 제습로터 형상 및 성능개선, 다양한 재생열원 이용, 시스템 부피 및 비용 감소 등에 관련된 기술이 발전하면서 기존의 냉동시스템에 대한 경쟁력을 높여 가고 있다.



스웨덴의 기업인 문터스는 제습냉방 분야를 선도하는 기업이다. 많은 기업들이 제습냉방시스템을 채용해 비용을 절감하고 있다. 특히 열 발생원이 많고 서늘한 온도를 유지해야 하는 데이터센터나 서버실에서 제습냉방시스템의 활용도가 높다. 사진은 멘터 그래픽스사의 데이터센터에 설치된 제습냉방시스템. © Munters

가정용 제습냉방기 보급 세계 최초로 실시

국내에서는 KIST가 에너지절약기술개발사업으로 1999년부터 3년간 ‘냉동기가 없는 냉방시스템 개발’을 진행한 것이 제습냉방 관련 최초 연구다. 이 과제에서 고분자 제습제 및 재생증발식 냉각과 관련한 기초기술이 개발됐다. 특히 이 과제에서 개발된 고분자 제습재료는 실리카 겔이나 제올라이트 등 기존의 고체 제습제보다 흡습능력이 4~5배 이상 크며, 60℃ 정도의 낮은 온도에서도 재생 가능하다는 장점이 있다. 이 고분자 제습재료는 초흡수성 고분자SAP를 이온변환해 흡습성을 향상시킨 물질이다. 초흡수성 고분자의 생산비용 수준으로 대량생산이 가능하며, 제습 및 재생 반복성 및 인체유해성 시험을 통과했다. 이 고분자 재료는 항균과 탈취 특성도 가지고 있는 것으로 분석돼 공조용 재료로 폭넓게 적용될 수 있는 가능성이 높다. 이 고분자 재료를 적용해 일반 제지공정과 골판지 제조공정으로 제습로터를 생산할 수 있으므로 대량생산에 매우 적합하다.

KIST는 이후 2002년부터 2005년까지 고분자 제습제와 재생증발식 냉각기술의

내구성을 향상하기 위한 기술개발을 지속했다. 이를 바탕으로 2006년부터 한국지역난방공사의 지원으로 '공동주택의 세대별 제습냉방시스템 시작품 개발 및 성능평가 연구'를 수행해 2007년 고체 제습식 냉방시스템 시작품을 개발했다. 이후 이 기술은 고분자 제습제와 재생증발식 냉각 관련 소재 및 부품 기술은 (주)특영과 (주)원진 등 관련 전문 중소기업에, 전체 냉방시스템 기술은 관련 대기업인 (주)귀뚜라미에 기술이전돼 생산 및 제품 개발이 진행됐다.

2010년부터는 축적된 기술을 바탕으로 한국지역난방공사가 주관하고 KIST, (주)귀뚜라미 등이 참여한 에너지자원기술개발사업이 수행됐다. 국내 관련 기관 및 업체가 총출동한 '열병합 발전 배열을 이용한 다실 제어 하이브리드 제습냉방시스템 개발' 과제에서 연구팀은 기본적인 제습냉방시스템에 전기식 히트펌프를 추가해 에너지 효율과 냉방출력을 크게 향상시킨 하이브리드 제습냉방시스템 시제품을 개발했다. 연구팀은 이를 신축 공동주택 40세대에 적용해 실증시험을 실시해 기술 검증 및 보급 타당성을 확인했다. 실증시험을 통해 전기식 에어컨에 비해 48%의 전력사용량 절감효과가 입증됐으며, 냉방기 가동 2시간 내에 휘발성 유기 화합물, 알데하이드, 부유세균 등 실내 오염물질이 40% 이상 감소되는 것이 확인됐다. 이 결과에 근거해 지역난방 공급온수를 열원으로 하는 제습냉방기를 공동주택에 보급 확대하는 계획이 2014년 1월에 확정된 제2차 국가에너지기본계획의 주요 과제에 포함돼 시범보급이 추진되고 있다.

비싼 가격이 상용화 걸림돌

제습냉방시스템은 냉동기를 필요로 하지 않아 송풍기의 전기 입력을 제외하면 전기에너지를 전혀 필요로 하지 않는다. 또한 온도와 습도의 독립적인 제어가 가능하고 잠열부하 처리가 용이하므로 외기 도입량이 큰 경우에도 충분한 성능을 발휘할 수 있다. 더군다나 제습냉방시스템은 냉매를 사용하지 않으므로 염화불화탄소 계



(a) 제습로터 시제품



(b) 재생증발식 냉각기 시제품



(c) 하이브리드 제습냉방 1차 시제품



(d) 2010년의 현장 설치



(e) 하이브리드 제습냉방기 2차 시제품



(f) 2012년의 현장 설치

하이브리드 제습냉방기 시제품 개발 및 실증시험 과정

열 냉매에 의한 오존층 파괴 및 온실효과 등이 전혀 없어 환경친화적이기도 하다. 구동에너지로 전기에너지 대신 열에너지를 사용하므로 하절기 냉방기 가동에 의한 전력수급 불균형 문제를 해결하는 데 기여할 수 있다는 장점도 있다.

그러나 이런 장점에도 불구하고 제습냉방기술의 시장은 아직 작다. 제습냉방시스템의 설비가격이 기존의 냉방시스템에 비해 고가이고 부피가 상대적으로 크기 때문이다. 따라서 저습도가 필요하거나 잠열부하가 매우 큰 특별한 경우에만 한정적으로 적용됐다. 제습냉방이 기존 시스템과 경쟁 가능한 수준으로 실용화되려면 제습로터의 성능을 향상시키고 생산가격을 낮추는 노력이 필요하다.

국내에서 최근 고분자 제습제와 재생증발식 냉각기 기술 등 독창적 원천기술을 바탕으로 하이브리드 제습냉방시스템 기술을 개발했다. 기존 제습냉방시스템의 크기를 획기적으로 소형화하고 에너지 효율도 향상시켰으며 가정용 보급을 추진하고 있다. 그러나 소용량 제습냉방시스템의 가정용 보급은 세계 최초로 시도되는 것으로 기업이 단독으로 부담하기에는 사업 리스크가 상당히 크다. 제습냉방기가 보급되면 하절기 전력피크가 완화되고 분산발전의 수익성이 향상돼 국가적인 편익이 큰 만큼 사업초기에 제습냉방기의 시장진입 장벽을 낮추기 위한 정부의 지원이 요구된다.

참고문헌

- "Reduction of costs of solar cooling systems", *Final report of the 6th Framework programme* | Arsenal Research | 2008
- 이대영 등 | 냉동기가 없는 냉방시스템기술 개발 최종보고서 | 에너지관리공단 | 2002
- 이대영 등 | 공동주택의 세대별 제습냉방시스템 시제품 개발 및 성능평가 연구보고서 | 한국지역난방공사 | 2007
- 김연홍 등 | 열병합발전배열을 이용한 다실 제어하이브리드 제습냉방시스템개발 최종보고서 | 한국에너지기술평가원 | 2013
- Lee, J., Lee, D.-Y. | "Sorptions characteristics of a novel polymeric desiccant", *Int. J. Refrigeration* | 2012
- 임영욱 등 | 제습냉방시스템의 건강영향에 대한 경제적 효과 분석연구 최종보고서 | 한국지역난방공사 | 2015







K I S T 과학기술전망 2016

Chapter 7

미래의 컴퓨터 혁명

실리콘과 나노기술, 그리고 그 너머

한석희 | KIST 스피닝융합연구단



현대인들이 아침에 일어나서 가장 먼저 보는 것은 무엇일까? 바로 스마트폰이다. 사람들은 스마트폰으로 시간을 확인하고 그 날의 일정과 뉴스를 검색하는 것으로 하루를 시작한다. 출근길에도, 회사에서도, 집에서도, 심지어는 잠들기 바로 전까지도 스마트폰은 사람들의 손에서 떠나지 않는다. 우리의 일상은 이제 인터넷, 컴퓨터, 스마트폰과 떼려야 뗄 수 없다.

앞으로는 빅데이터, 소셜네트워크, 사물인터넷, 클라우드 컴퓨팅 등 유비쿼터스 모바일 컴퓨팅이 더욱 활발해질 것이다. 이러한 정보혁명 시대의 도래는 반도체를 비롯한 정보소자 기술이 있었기에 가능한 일이다.

현재 각국의 IT기업들은 실리콘 기반의 메모리반도체 집적 기술을 개발하는 데 심혈을 기울이고 있다. 메모리반도체 선두주자인 삼성전자는 14nm 공정기술을 이용한 소자를 제품화했다. 인텔은 2016년에 10nm 기술 제품을 양산할 예정이다. IBM 역시 삼성전자 등과 함께 7nm 공정기술을 이용한 시제품을 개발했다고 발표했다.

하지만 소자 미세화 일변도의 기술발전은 이미 물리적 한계에 접근했다. 또한 소자의 고집적화에 따른 발열문제도 심각한 상황이다. 반면 향후 유비쿼터스 모바일 컴퓨팅으로 인해 처리해야 하는 정보량은 기하급수적으로 증가할 것으로 전망된다. 따라서 차세대 반도체는 기존 실리콘 반도체의 한계를 극복할 수 있는 초저전력 대용량 초고속 소자여야 한다.

현재 초저전력 대용량 초고속 소자를 개발하기 위한 연구가 국내외적으로 활발하게 진행되고 있다. 방향은 크게 두 가지다. 하나는 실리콘 대신 화합물반도체, 그래핀, 탄소나노튜브 등 다른 재료를 사용하는 방법, 다른 하나는 스핀트로닉스, 뇌신경모방 컴퓨팅, 양자 컴퓨팅 등 새로운 개념의 소자를 개발하는 것이다. 국내에서는 정부 지원하에 화합물반도체 융합소자, 그래핀 소자, 탄소나노튜브 소자, 실리콘 포토닉스, 차세대 저전력 트랜지스터, 뇌신경모방 컴퓨팅, 양자 컴퓨팅 등에 대한 연구가 이뤄지고 있다. KIST는 2002년부터 KIST비전21사업을 통해 스핀트로닉스 기술을 활발히 연구해 왔으며, 최근에는 실리콘-화합물반도체 융합소자, 양자암호 및 양자 컴퓨팅 기술 등에 대한 연구를 중점적으로 수행 중이다.

화합물반도체는 오래전부터 연구돼 왔으나 비용 등의 문제로 실용화가 크게 진전되지 않은 소재다. 하지만 최근 IBM과 인텔에서 초저전력 초고속 소자용 실리콘-화합물반도체 기반의 메모리반도체 집적 기술을 개발하는 데 박차를 가하고 있어 상용화를 앞당기고 있다. 반면 국내 반도체 기업들은 화합물반도체기술 개발을 본격적으로 수행하지 않고 있으며, 국내 대학 및 연구소에서도 Ⅲ-V족 화합물반도체에 대한 소규모 연구를 진행한 정도다. 이에 KIST에서는 2015년부터 플래그십 사업을 통해 본격적인 화합물반도체 연구에 착수했다.

스핀트로닉스 기술은 기존의 반도체와는 달리 전자의 전하와 스핀을 동시에 제어하는 새로운 개념의 전자소자 기술이다. 스핀트로닉스 소자는 초저전력, 초고속이면서도 비휘발성이라는 특징이 있다. 스핀메모리 소자인 스핀전달토크메모리



미국의 그래픽카드 회사인 엔비디아(Nvidia)는 2016년 소비자가전전시회(CES 2016)에서 '자동차용 슈퍼컴퓨터'를 발표했다. 이 컴퓨터는 3D 그래픽과 센서 기술을 조합하여 자동운전기술의 수준을 한 단계 높일 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 이러한 종류의 자동화에는 막대한 양의 연산을 할 수 있는 소형 프로세서가 필요하기 때문에 현재의 실리콘 기반 반도체로는 완벽한 구현이 어려울라 보는 사람들도 많다. © Nvidia

STT-MRAM은 차세대메모리 중 가장 유망한 소자로서 세계적으로 치열한 기술 개발 경쟁이 이뤄지고 있다. 우리나라에서는 삼성전자, SK하이닉스 등의 기업을 중심으로 연구가 진행 중이다. KIST는 STT-MRAM 이후의 스핀트로닉스 기술인 스핀 트랜지스터, 스핀-궤도 토크형 디락 소자 및 스핀통신 소자 등에 대한 연구를 중점적으로 수행해 오고 있으며, 세계적 수준의 성과를 내고 있다.

양자 컴퓨팅 기술은 나노기술의 한계를 뛰어넘는 기술이다. 안전한 통신이 가능한 양자암호통신과 초고속 정보처리가 가능한 양자컴퓨터가 대표적인 기술로 꼽힌다. 국내 기업 중에서는 SK텔레콤에서 양자암호 분배시스템에 대한 연구를 진행하고 있다. 그동안 양자암호시스템 개발을 수행해 온 KIST는 2014년부터는 한국 전자통신연구원ETRI과 공동으로 무선 양자암호통신 기술을 연구하고 있다. 2016

년에는 양자광학 및 원자 기반 양자컴퓨터 기술 및 큐비트 소자기술 연구에 착수할 예정이다.

이 기술들은 미래에 다가올 정보 대혁명 시대에 대응할 수 있는 차세대 반도체 및 컴퓨팅 기술이라 할 수 있다. 세계적으로 치열한 기술 경쟁이 이뤄지고 있으나 국내에서는 본격적인 연구가 거의 이뤄지지 못하고 있다. 이에 KIST는 선제적 연구를 통해 미래 정보시대를 선도할 수 있는 핵심 원천기술을 개발하고자 한다.

김상현 | KIST 광전소재연구단

배터리 오래가는 스마트폰, 저전력 소자기술로 실현





스마트폰 좀 더 오래 쓸 수 있을까?

현대 사회는 바야흐로 스마트폰 시대다. 스마트폰을 이용해 언제 어디에서나 쇼핑이나 은행 업무를 할 수 있다. 예전에는 큰 데스크톱 컴퓨터에서나 가능했던 일들이 손바닥만 한 스마트폰으로 가능하게 된 것이다. 이 모든 변화가 불과 10여 년 만에 일어났다.

발전이 빠른 만큼 해결이 지연된 문제들도 있다. 바로 스마트폰 사용의 가장 큰 스트레스, 배터리다. 누구나 한 번은 아침에 100%였던 스마트폰 배터리가 일과 시간 중에 떨어져 콘센트를 찾아다닌 경험이 있을 것이다. 이런 문제를 해결하기 위해 스마트폰 제조사들은 오래가는 배터리 개발에 열을 올리고 소비자들은 새로운 스마트폰을 평가할 때마다 배터리를 큰 판단 기준으로 삼는다. 인터넷을 뒤져보면 배터리를 오래 쓰는 법을 다룬 신문기사나 칼럼 등을 쉽게 찾을 수 있다. 그런데 여기서 생각을 한번 바꿔보자. 스마트폰의 짧은 사용시간이 배터리만의 문제일까? 반대로 배터리의 전력 소비를 줄일 수 있다면 이러한 문제가 해결될 수 있는 것은 아닐까?

이에 답하려면 먼저 전자기기의 전력 소비가 어디에서 일어나는지에 주목해야 한다. 전자기기는 트랜지스터라는 소자가 무수히 연결돼 우리가 필요한 기능을 하



스마트폰 분해도. 손바닥만 한 스마트폰은 수많은 부품으로 구성된다. 스마트폰의 '두뇌'인 CPU만 해도 수십억 개의 트랜지스터로 이뤄져 있다.

도록 설계됐다. 실제 삼성의 최신 스마트폰 갤럭시 S6 엣지Galaxy S6 Edge에 들어 있는 수 cm 크기의 중앙처리장치CPU는 수십억 개의 트랜지스터로 이뤄졌다. 전력의 소비는 이 하나하나의 트랜지스터가 움직이거나 신호를 주고받으면서 발생한다. 이는 곧 성능이 좋은 트랜지스터를 만들고 이들끼리 효율적으로 신호를 주고받을 수 있게 한다면 소비전력을 줄일 수 있다는 결론을 가져온다. 이렇게만 된다면 한번 충전한 스마트폰을 며칠씩 쓸 수 있는 세상이 올 수도 있다.

천만분의 일의 크기로, 또 삼차원으로

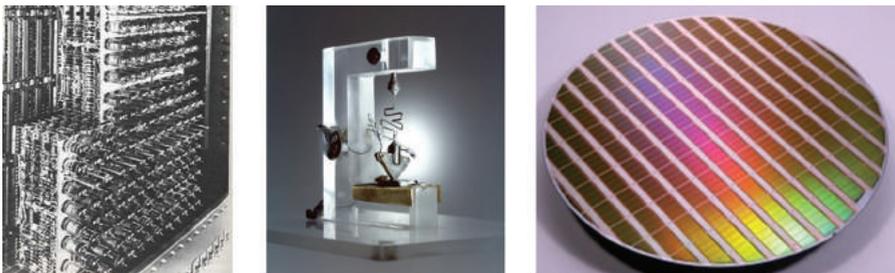
트랜지스터는 일종의 전자 '스위치'로 전자의 흐름을 제어하는 반도체 소자를 말한다. 최초의 전자스위치는 진공관이다. 진공관은 진공에서의 전자 움직임을 제어함으로써 신호를 증폭·변경하는 역할을 했다. 1946년에 개발된 세계 최초의 컴퓨터 에니악ENIAC은 진공관을 수만 개 연결해 계산기로서의 역할을 했다. 당시로는 놀랄

만한 기술적 진보였으나 부피, 전력 소모, 발열 등의 문제로 널리 쓰이지는 못했다.

다행히도 이로부터 불과 1년 뒤인 1947년 미국 벨 연구소Bell Laboratories의 연구팀에 의해 트랜지스터가 탄생했다. 저마늄Ge 소재 반도체를 이용해 초보적이긴 하지만 세계 최초로 반도체를 이용한 트랜지스터를 개발한 것이다. 이 트랜지스터 개발이 집적회로의 발전으로 이어져 오늘날의 비약적인 전자기기 발전을 가져왔다. 역사적인 대발전이라 할 만하다. 이런 공로를 인정받아 트랜지스터를 개발한 연구진은 노벨상을 수상했다.

최초의 트랜지스터는 저마늄으로 이뤄졌지만 수분이나 열에 약하다는 단점 때문에 이후 트랜지스터 주재료의 자리는 실리콘이 차지했다. 실리콘은 지구 전체 질량의 27.7%를 차지할 만큼 많은 원소로 값이 싸며 트랜지스터 제작에 필요한 여러 가지 좋은 특성을 가지고 있다. 실리콘은 원판을 크게 만들기에 충분한 강도, 공정의 용이성과 같은 장점을 바탕으로 50여 년에 걸쳐 사용되며 기술 발전을 거듭해 왔다.

트랜지스터 기술 발전의 방향은 단순했다. 트랜지스터를 계속 작게 만드는 것이다. 작으면 작을수록 같은 면적에 더 많은 트랜지스터를 넣을 수 있다. 이는 전자기기의 크기를 작게 만들며 원가도 줄일 수 있게 한다. 여기에 트랜지스터를 작게



왼쪽부터 순서대로 진공관을 이용한 세계 최초의 컴퓨터 에니악과 세계 최초의 저마늄 트랜지스터. 수십억 개의 트랜지스터가 들어 있는 실리콘 웨이퍼. 웨이퍼 위 사각형 하나하나가 칩이 된다.



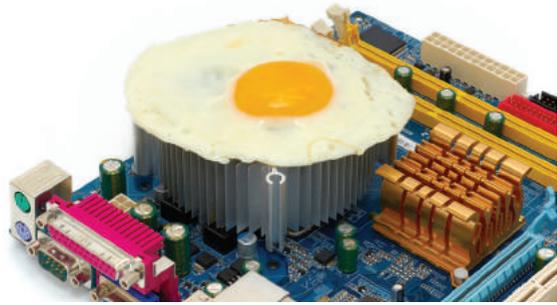
만드는 것만으로 소자의 성능까지 향상되는 일석이조의 효과도 있다.

이러한 성능 향상을 직접 느낄 수 있는 사례가 컴퓨터 CPU의 발전이다. 1970년대에는 수 MHz에 머물렀던 CPU의 속도가 1990년대, 2000년대를 지나오면서 3GHz까지 빨라졌다. 천 배 이상 좋은 성능의 칩을 훨씬 싸게 만들 수 있게 됐다는 걸 생각하면 실로 경이적인 발전이라 할 수 있다.

실제 칩 안에서 움직이는 트랜지스터의 크기를 보면 더 놀랍다. 세계 최초의 트랜지스터는 육안으로도 볼 수 있는 크기였지만 현재 사용되는 트랜지스터의 크기는 전자 현미경으로 봐야 겨우 보이는 정도인 14nm에 불과하다. 최근에는 그냥 작게 만드는 것도 모자라 트랜지스터를 삼차원 형태로 만들어 성능을 높이고 있다. 인텔이 최근 도입한 삼차원 트랜지스터인 핀펫FinFET이 대표적인 예다.

그렇다면 이렇게 트랜지스터를 작게 또 삼차원으로 만드는 것은 어느 수준까지 가능할까? 사실 반도체 업계에서는 이 의문이 현재 기술의 한계이자 장벽이다. 현재의 반도체 산업은 더 이상 작게 만들고 소자 성능을 개선하기 힘들 만큼 발전했다. 또한 작은 면적에 수많은 트랜지스터들이 작동하기 때문에 면적당 소모하는 전

CPU의 열로 달걀을 프라이하는 모습. CPU의 발열을 이용해 여러 가지 요리를 해 먹는 것은 꽤나 인기 있는 장난이다. 그런데 단순히 장난 만은 아닌 것이, 요리가 실제로 될 정도로 CPU의 발열이 심하다.



력량이 어마어마하다. 현재 1cm^2 당 $1,000\text{W}$ 의 전력이 소비되고 있고 현재도 증가하는 추세다. 이는 로켓이 발사될 때 분사구에서 발생하는 열량과 비슷한 수준이다. 이대로 계속 증가한다면 머지않아 태양 표면의 열량과 비슷한 수준에 도달할 것이라는 예상도 있다. 이미 컴퓨터의 발열은 매우 심해 우리가 일반적으로 사용하는 가정용 컴퓨터의 CPU 칩 위에서 계란을 익히는 데 문제가 없을 정도에 이르렀다.

결국 이런 트랜지스터의 전력소비가 스마트폰 배터리를 소모시키는 주범인 것이다. 이를 줄이지 않으면 충전된 배터리를 몇 시간 안에 다 소모할 수도 있다. 다시 말해 트랜지스터의 전력소비를 줄이는 것은 필수적이며 줄이지 못할 경우 스마트폰을 포함한 전자기기의 발전은 불가능하다고 말할 수 있다.

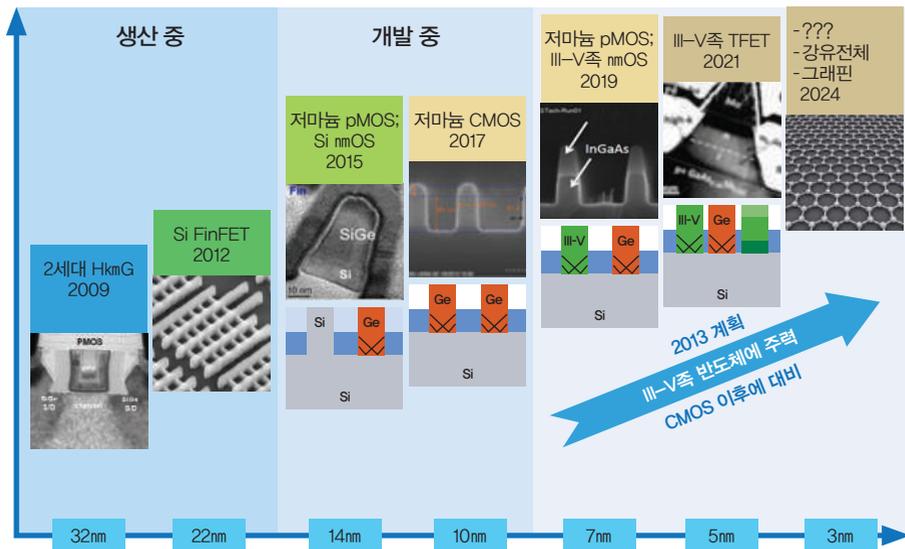
전력소비 해결책, III-V족 화합물반도체

그렇다면 트랜지스터의 전력소비 문제를 해결하기 위한 방법에는 어떤 것들이 있을까? 가장 좋은 방법은 실리콘보다 성능이 좋은 재료를 사용하는 것이다. 그중에서도 유망한 재료가 III족 원소와 V족 원소로 이루어져 있는 III-V족 화합물반도체다. 기존의 실리콘보다 전자가 움직이는 속도가 수십 배 빨라 적은 전력으로 동작하면서도 빠른 트랜지스터를 만들 수 있다. 이는 국제반도체업계로드맵(ITRS)에서

도 명시대 있어 현재 많은 연구가 진행되고 있다.

III-V족 화합물반도체 트랜지스터 연구의 선두를 달리는 곳은 반도체 업계 부동의 1위 인텔이다. 인텔은 이미 2005년 안티몬화인듐 InSb 이라는 III-V족 화합물반도체 소재 트랜지스터를 만들어 국제전자소자학회IEDM에서 발표했다. 미국은 이를 기점으로 정부·산업계의 전폭적인 지원 아래 기업 및 정부 연구소·대학을 중심으로 관련 연구를 진행하고 있다.

유럽 또한 벨기에 아이맥IMEC, 프랑스 전자정보기술연구소CEA-Leti 등의 연구를 중심으로 관련 연구를 주도하고 있다. 가까운 일본에서도 도쿄대, 정부연구소 등이 연구에 매진하고 있다. 덕분에 관련 분야의 기술은 최근 10여 년간 눈부시게 발전했다. 일례로 2014년도 IEDM에서는 실리콘 트랜지스터보다 더 좋은 성능을 내는 트랜지스터가 산타바바라 캘리포니아대University of California Santa Barbara, MIT등



글로벌 반도체 기술 컨소시엄인 세마테크(SEMATECH)의 2013년 로드맵. 실리콘 소재의 다음 대안으로 III-V족 화합물반도체를 유력한 후보로 보고 있다.

의 연구진들에 의해 발표됐다.

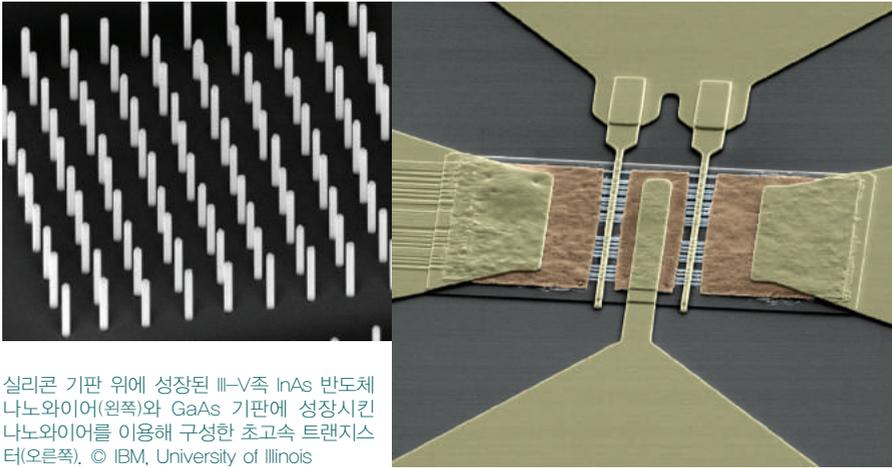
반면 국내 III-V족 화합물반도체 트랜지스터 관련 연구는 2010년 정도부터 조금씩 이뤄져 왔다. 울산과학기술원UNIST과 KIST의 연구팀은 얇은 III-V족 화합물반도체 층을 실리콘 기판에 형성하는 기술을 개발하고 있다. 또한 연세대학교와 한국나노기술원을 중심으로 III-V족 화합물반도체를 실리콘에 성장시키는 기술에 대한 연구도 진행되고 있다. 하지만 트랜지스터 제작은 아직 국내에서는 미비한 실정이다. 관련 분야에 대한 국가의 지원이나 산업계의 지원이 없었던 것이 제한적 발전의 한 원인이었다고 할 수 있다.

트랜지스터를 작게 만드는 것에 치중한 기존의 방식에서 재료를 바꾸려고 하는 이 시점이야말로 흔히 말하는 ‘판’이 바뀌는 시점이다. 패스트 팔로워fast follower에서 퍼스트 무버first mover로 나아가기 위한 적극적인 지원 및 투자가 필요한 때이다. 이러한 중요한 시점에 KIST는 올해부터 적극적으로 관련 분야 연구개발을 주도하기 시작했다. 차세대반도체연구소를 출범시키며 연구소의 대표과제인 플래그십 과제로서 III-V족 화합물반도체 소자의 연구개발에 착수한 것이다.

실리콘 위 III-V족 형성이 핵심

현재의 III-V족 화합물반도체 트랜지스터 기술은 상당한 수준에 이르렀다. 이미 하나하나의 소자 특성은 기존의 실리콘 소자를 추월했다고 볼 수도 있다. 하지만 III-V족 화합물반도체의 실용화는 아직 갈 길이 멀다. 값이 실리콘에 비해 30배나 비싼 단점이 있고 천문학적인 투자로 구축해 온 실리콘 기반 설비를 버릴 수 없기 때문이다. 이 때문에 III-V족 화합물반도체를 실용화하려면 기존의 설비를 활용하면서 저렴하게 III-V족 화합물반도체를 이용할 수 있는 기술이 절실히 필요하다.

이에 최근 활발히 진행되고 있는 연구가 얇은 III-V족 화합물반도체 층을 실리콘 위에 만드는 것이다. 이것이 실현된다면 기존의 설비를 이용해 값이 싸면서도



실리콘 기판 위에 성장된 III-V족 InAs 반도체 나노와이어(왼쪽)와 GaAs 기판에 성장시킨 나노와이어를 이용해 구성한 초고속 트랜지스터(오른쪽). © IBM, University of Illinois

성능이 좋은 소자를 만들 수 있다. 실리콘 위에서 III-V족 화합물반도체를 형성하는 기술은 이 분야의 중요한 원천기술이라고 할 수 있다.

III-V족 화합물반도체 층을 실리콘 기판 위에 형성시키는 방법에는 크게 두 가지가 있다. 첫 번째는 별도의 III-V족 화합물반도체를 실리콘 기판 위에 붙이는 접합법이다. 이는 소자에 필요한 III-V족 화합물반도체 층의 품질은 좋지만 원가가 비싼 단점이 있다. 또 한 가지 방법은 III-V족 화합물반도체를 이루고 있는 원자를 기판 위에 뿌려서 원자를 반도체로 만들어 나가는 성장법이다. 이 방법은 동시에 III-V족 화합물반도체를 대면적의 실리콘 위에 형성할 수 있다는 장점이 있지만 두 물질의 열팽창계수 및 격자상수의 차이로 고품질의 반도체 층을 얻기 어려운 단점이 있다. 이 두 가지 방법 모두 미완성의 기술이기에 원천기술을 확보하는 것이 중요하다.

III-V족 화합물반도체를 이용한 트랜지스터 기술 개발은 국내에서도 관련 연구가 서서히 시작되고 있다. 우선 접합법에 있어서 KIST에서는 III-V족 화합물반도체의 단일 층뿐 아니라 복잡한 소자 구조를 실리콘 위에 접합할 수 있는 기법을 개



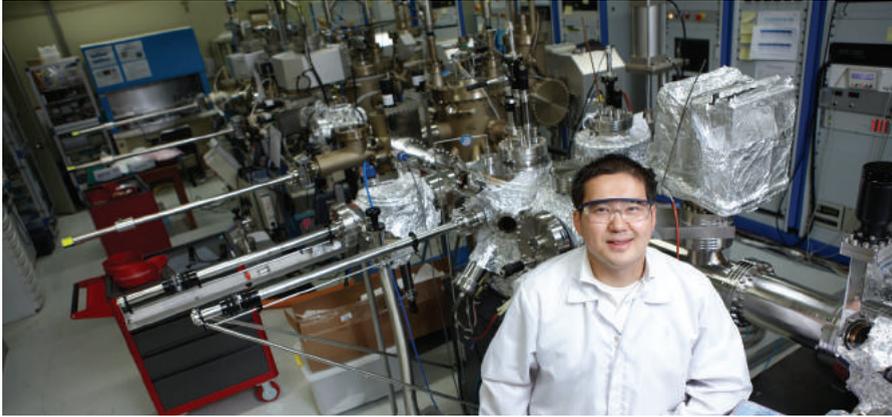
접합법으로 III-V족 화합물반도체를 실리콘 위에 형성한 기판. 청록색 부분이 실리콘 기판, 보라색 부분이 형성된 III-V족 화합물반도체다. 최근 KIST에서 개발한 것이다.

발했으며, 최근 이러한 기술을 응용한 인듐갈륨비소 InGaAs 트랜지스터의 제작기법을 보고한 바 있다. 또한 연세대와 한국나노기술원에서 성장법의 한 종류인 유기금속화학증착법 MOCVD 기술을 이용한 실리콘상 III-V족 성장법을 개발하고 있다.

한편 KIST는 수십 년간 연구했던 초고진공 분자빔성장장비 MBE 기술을 기반으로 실리콘상 III-V족 화합물반도체 성장 분야를 이끌고 있다. 최근에는 실리콘에 성장시키는 방법으로 제작할 수 있는 고효율 갈륨비소 GaAs 태양전지를 보고한 바 있다. 또한 최근 트랜지스터 채널로 각광을 받고 있는 InGaSb 등을 실리콘 위에 성장시키는 연구도 추진 중이다.

실리콘 대체할 0순위 후보

그러나 III-V족 화합물반도체의 상용화에는 여전히 우려의 목소리가 많다. 수율이 엄청난 경제적 손해와 이익을 결정하는 산업계에서는 재료를 바꾸는 것에 대한 거부감이 상당하다. 재료를 하나 바꾸는 것이 다른 공정에 있어서 오염의 원인이 될 수 있어 수율이 낮아질 수밖에 없기 때문이다. 이러한 이유에서 소자 자체의 재료를 변경하고자 하는 지금의 시도는 도전적으로 보일 수밖에 없다. 또한 기존의 실리콘 기반의 고도화된 공정수준을 III-V족 화합물반도체가 바로 따라갈 수 있을지

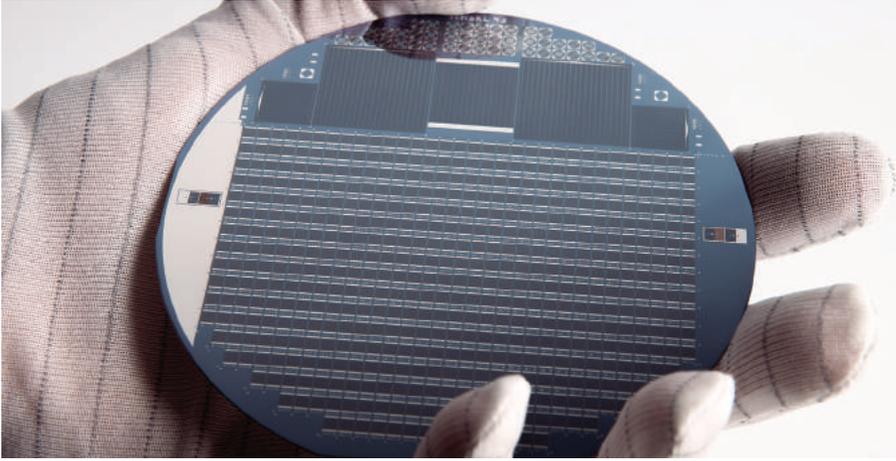


KIST에 설치된 초고진공 분자빔성장장비(MBE)의 모습. 장비 안에 샘플을 넣고 III-V족 화합물반도체를 성장시킨다.

도 미지수다. 현재까지의 III-V족 화합물반도체를 이용한 소자의 양산은 실리콘 소자에 비해 규모도 작고 제한적이기 때문이다. 더불어 소자의 신뢰성에 대한 연구도 아직 미비한 연구수준을 생각하면 상용화까지 필요한 연구는 아직 산재해 있다.

이러한 우려의 목소리도 있지만 긍정적인 시각도 존재한다. 이미 실리콘을 중심으로 한 반도체가 한계에 부딪힌 가운데 새로운 대안 중에서 III-V족 화합물반도체 소자를 실리콘 위에 구현하는 것이 상용화 가능성이 큰 연구 분야라는 데에는 이견이 없다. 실리콘 소자를 지속적으로 사용하는 것은 사실상 한계가 있고 다른 후보 재료들은 III-V족 화합물반도체에 비해 훨씬 더 초기 단계에 머물러 있기 때문이다. 이를 반증하듯 앞서 이야기한 바와 같이 미국, 유럽, 일본 등의 산업계에서는 III-V족 화합물반도체 연구 분야에 대한 투자가 상당하다. 또한 실리콘 포토닉스라고 불리는 또 다른 분야를 비롯해 다중접합 태양전지와 같은 분야에서도 실리콘 위에서의 III-V족 화합물반도체 사용이 늘어나고 있다.

이러한 트렌드를 반영하듯 최근 인텔이 2017~2018년도에 QWFET(quantum well field effect transistor)을 상용화할 것이라고 밝혔다. 이는 III-V족 화합물반도체 트랜지



III-V족 화합물반도체는 태양전지 신소재로도 각광을 받고 있다. 독일의 프라운호퍼 연구소는 III-V족 반도체로 다중접합 태양전지 패널을 개발해 기존에 비해 효율을 크게 높였다. © Fraunhofer ISE

스터를 암시하는 것으로 이 분야가 점점 실용화 연구로 다가가고 있음을 의미한다. 따라서 이를 실현 가능케 해주는 실리콘 상 III-V족 화합물반도체 형성 기술은 향후 중요한 원천기술이 될 것이다. 긍정적인 점은 국내에 축적된 많은 기술적 노하우를 토대로 현재 많은 연구진들이 연구를 진행하고 있다는 점이다. III-V족 화합물반도체를 사용하게 될 비메모리 시스템 반도체 산업은 그 규모가 이미 2000억 달러를 넘어서고 있고 향후 5년간 평균 6.2%의 성장률을 보일 것이라는 예상도 있어 앞으로의 발전이 더욱 기대되는 바이다.

참고문헌



- W. Shockley, et al. | "Circuit element utilizing semiconductive material", US patent 2569347 | 1948
- J. A. del Alamo | "Nanometer-scale electronics with III-V compound semiconductors", *Nature* | 2011
- S. Datta, et al. | "85nm gate length enhancement and depletion mode InSb quantum well transistors for ultra high speed and very low power digital logic applications", *IEDM Technical Digest* | 2005

구현철, 민병철 | KIST 스핀융합연구단

차세대 반도체, 스핀트로닉스에서 길을 찾다



영화 속 생활이 현실로

오늘은 오전에 중요한 약속이 있어 꼭 새벽 6시에 일어나야 한다. 그런데 자명종도 깨울 사람도 필요가 없다. 대형 스크린에 펼쳐지는 아침 햇살과 음악 소리가 나를 기분 좋게 깨워주기 때문이다. 침대에서 일어나니 어제 못 본 야구 경기 스코어와 주요 장면이 스크린에 나타난다. 다른 한쪽에서는 오늘의 일정이 서서히 올라가고 있다. 일정을 확인한 후에는 정비소 네트워크를 통해 정기검사를 마친 자동차에 올라탄다. 운전할 필요가 없는 자동주행시스템 차량을 이용해 오늘 처음 가보는 협력회사에 회의를 하러 간다. 핸들과 기어가 있는 수동 자동차는 일부 마니아들만 구입하는 소량생산 모델뿐이다.

이러한 미래생활에는 초고속 연산이 가능한 최첨단 정보기기와, 전원이 꺼져도 정보를 저장하는 막대한 용량의 비휘발성 메모리가 필요하다. 상상할 수 없을 정도의 많은 전자기기가 우리 주변을 가득 채우면서 지금까지와는 다른 차원의 전력 소모가 생기는 것을 피할 길이 없다. 이러한 문제를 해결하고 영화 속 생활을 현실로 이루기 위해서는 지금까지와는 다른 혁신적인 패러다임의 전환이 필요하다.



마이크로소프트의 증강현실 시스템 홀로렌즈 (위)와 메르세데스-벤츠에서 발표한 자동주행 자동차(아래). 이러한 첨단 기기에는 매우 복잡한 연산이 요구된다. 연산능력은 향상되면서도 부피나 소비전력을 줄일 수 있는 새로운 기술에 대한 수요가 커지고 있다. © Microsoft, Mercedes-Benz

전자의 흐름과 회전을 모두 이용한다

우리가 물리적 현상을 이용할 때는 자연현상을 제어할 수 있는 변수가 있어야 한다. 예를 들어 제어하기 힘든 지구의 중력보다는 건전지를 이용해 전압을 제어하는 것이 훨씬 쉽게 정교한 기기를 작동시킬 수 있다. 반도체를 기반으로 한 현대의 전자소자는 그동안 '전류의 흐름 또는 차단'이라는 간단한 원리를 이용해 급속한 기술적 진보를 이뤘다. 하지만 이러한 반도체 기반 전자소자 기술은 물리적 동작 원리와 나



전자의 전하와 스핀을 동시에 제어하는 스핀트로닉스는 메모리, 트랜지스터, 통신소자 등에 응용될 수 있다. 기존 방식과 달리 전하와 스핀 모두를 정보 전달에 사용할 수 있어 복잡한 연산을 빠르게 처리할 수 있을 것으로 기대된다.

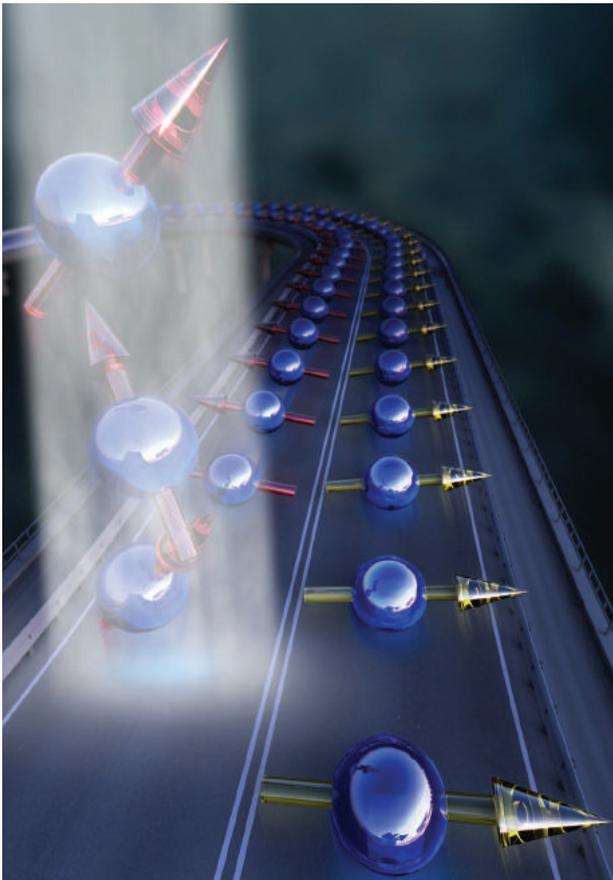
노 공정이라는 두 가지 측면에서 근본적인 기술적 한계에 도달하고 있다. 따라서 이러한 한계를 극복할 수 있는 새로운 기술과 소자의 출현이 강력하게 요구된다.

이에 등장한 것이 바로 스핀트로닉스 *spintronics* 기술이다. 스핀트로닉스는 ‘스핀 *spin*’과 ‘일렉트로닉스 *electronics*’의 합성어다. 기존의 반도체 기반 전자소자 기술은 전자의 두 가지 특성인 전하와 스핀 중 전자의 흐름을 이용하는 전하만을 이용해 왔다. 이에 반해 스핀트로닉스 기술은 전자의 전하와, 전자의 회전 특성인 스핀을 동시에 제어하는 기술이다. 스핀전자 소자는 스핀의 고유특성인 비휘발성 *non-volatility* 뿐만 아니라 초고속, 초저전력 및 초고주파 등의 특성을 가지고 있기 때문에 차세대 전자소자로서 사용될 가능성이 매우 높다.

스핀 메모리는 전자의 스핀을 이용해 정보를 저장한다. 스핀 메모리는 자기 상태에 따라 메모리 소자의 저항이 달라지는 성질을 이용해 정보를 읽기 때문에 계속

전력을 공급하지 않더라도 정보를 저장할 수 있다.

반면 기존의 자기 메모리는 전류에서 발생하는 자기장을 이용해 정보를 기록하기 때문에, 자석을 원하는 방향으로 스위칭시킬 수 있다는 장점도 있지만 인접 셀간에 간섭이 일어나거나 큰 전력소모가 발생하는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 최근 연구되고 있는 것이 전류를 주입시켜 자화방향을 스위칭하는 스핀전달토크 메모리 **STT-MRAM**다. **STT-MRAM**에서는 자장이 발생하지 않아 다른 셀과의 간섭이 없이 원하는 셀만 제어할 수 있을 뿐 아니라 작게 만들수록 전력소

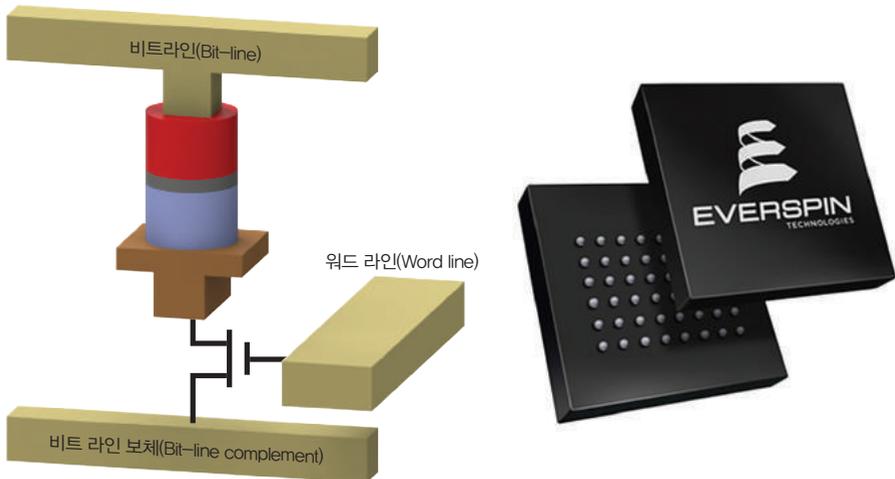


모든 입자는 $+1/2$, 또는 $-1/2$ 의 두 가지 스핀값을 지닌다. 따라서 입자의 스핀 정보를 별도의 이진 정보로 활용할 수 있다. 이는 마치 특정 방향으로 회전하는 전자만을 골라내는 것과 비슷한 방식으로 이루어진다. © MIT

모도 작아져 차세대 메모리로 크게 각광받고 있다.

전류를 이용해 정보를 기록할 수 있는 원리는 스핀전달토크(spin transfer torque)라는 물리현상이다. 이 현상은 아주 얇은 자성층에 이 자성층과는 다른 스핀 방향을 지닌 많은 양의 전도 전자가 주입될 때 일어난다. 이 과정에서 자성층 통과 직전과 직후에 전도 전자의 스핀 방향이 달라지면서 전도 전자의 스핀 각운동량이 변화한다. 토크는 각운동량의 시간변화분이므로 전도 전자의 스핀 각운동량 변화에 해당하는 만큼의 토크가 자성층에 전달돼 자성층의 자화방향 변화를 유도할 수 있는 것이다. 이처럼 스핀전달토크를 이용하면 전류만 흘려주어도 스핀 메모리 단위 셀의 자화방향을 바꿀 수 있다.

최근 국내의 기업 및 연구 기관에서 STT-MRAM 연구를 활발히 수행하고 있다. 미국 에버스핀(Everspin)사는 기존 방식의 16MB급 토글형 스핀 자기메모리(Toggle MRAM)를 개발해 2006년부터 산업 기계, 항공기, 자동차 등의 제어장치에 사용하



전류로 구동하는 STT-MRAM의 구조와 실제로 개발된 스핀 메모리 칩인 '에버스핀'. 여러 분야에 활용돼 그 성능을 인정받고 있다. © Everspin



에버스핀의 스피트로닉스 기술을 적용한 에어버스 350(위)과 BMW의 슈퍼바이크(아래). 비행 및 주행 제어장치에 적용됐다. © Airbus, BMW

고 있다. 독일의 자동차기업인 BMW에서는 슈퍼바이크의 엔진 제어장치에, 민항기 제조사인 에어버스에서는 에어버스 350의 항공제어장치 등에 자기메모리를 사용해 그 안정성을 인정받고 있다. 이러한 수요를 확장하고자 에버스핀은 상용화 수준의 STT-MRAM을 개발해 2012년 64MB급 시제품을 선보였으며 최근 글로벌 파운드리Global Foundries사와 협력해 싱가포르에 STT-MRAM 양산라인을 건설 중이다.

퀄컴Qualcomm사는 모바일용 칩의 캐시cache 용도로 STT-MRAM을 탑재할 계획을 갖고 있으며, 인텔 역시 10nm급 코어core를 STT-MRAM으로 대체하는 방안을 검토 중이다. 일본에서는 도시바Toshiba, 히다치Hitachi, NEC 등 약 20여 개의 반도체 주요기업이 STT-MRAM을 상용화하기 위해 연구 중이며, 일본 정부에서도

스핀을 이용한 초저전력 메모리 소자를 개발하기 위해 5년 동안 400억 원 규모의 예산이 투입되는 프로젝트를 2014년 7월에 출범시켰다.

국내에서는 대표적인 반도체 기업인 삼성전자와 SK하이닉스에서 STT-MRAM을 상용화하는 연구개발을 추진하고 있다. 이를 위해 삼성전자는 미국의 그랜드리스 Grandis를 흡수·합병했고, SK하이닉스는 수직자성재료 분야에 강점을 지닌 일본 도시바와 공동개발 협약을 체결했다.

새로운 영역으로 확장되는 스핀트로닉스 기술

STT-MRAM에 대한 연구 이외에도 스핀트로닉스의 새로운 지평을 열어갈 연구들이 국내외에서 활발히 진행되고 있다. 반도체 안에서의 새로운 스핀 현상에 대한 연구, 전기장을 이용해 스핀을 제어하는 연구, 열과 스핀의 융합영역을 활용하는 연구, 스핀소자를 마이크로파 통신에 응용하고자 하는 연구 등이 그 대표적인 예다.

미국에서는 코넬대Cornell University, MIT, UCLAUniversity of California, Los Angeles 등 여러 대학을 중심으로 새로운 스핀트로닉스 연구가 진행되고 있다. 유럽에서도 다양한 정부 차원의 연구 프로그램을 통해 스핀트로닉스 연구를 지원하고 있으며, 주요 연구기관으로는 프랑스의 스피넵SpinTEC, 국립과학연구소CNRS 및 파리11대The Universit Paris Sud 11, 벨기에 아이멕IMEC, 영국 케임브리지대University of Cambridge, 독일 울리히 연구소Julich Research Center 등이 있다. 일본의 경우에는 도호쿠대東北大, 도쿄대東京大, 교토대京都大, 오사카대大阪大 등이 스핀트로닉스 연구에 있어 선두 연구그룹을 형성하고 있다. 국내에서도 KIST, 한국과학기술원KAIST, 서울대, POSTECH, 고려대, 연세대 등의 주요 연구팀들이 스핀전달토크, 스핀궤도결합토크, 스핀 홀 효과 등에 대한 세계적인 수준의 연구를 진행하고 있다.

이 중 KIST에서는 차세대반도체연구소를 중심으로 초저전력 반도체용 스핀소자기술 관련 연구에 연구 역량을 집중하고 있다. 그 결과 KIST는 정밀한 반도체

박막성장기술을 통해 자성금속과 반도체의 계면을 효과적으로 제어하고 스핀전달에 용이한 초고속 반도체 채널을 제작함으로써 차세대 반도체 산업을 이끌어갈 스핀트로닉스 원천기술을 개발하는 데 성공했다.

또한 KIST 연구진은 세계 최초로 게이트로 스핀의 방향을 조절하는 스핀 트랜지스터 기술을 실현했다. 이에 더해 외부자기장에 따라 전기저항이 민감하게 변하는 안티몬화인듐 InSb 반도체를 이용해 상온에서 동작하는 다기능 스핀 논리소자를 구현했다. 열을 이용해 작동시키는 스핀소자, 전압으로 스핀정보를 제어하고 신호 손실 없이 전기정보로 바꿔주는 스핀 홀 전자소자 등의 성과도 주목할 만하다.

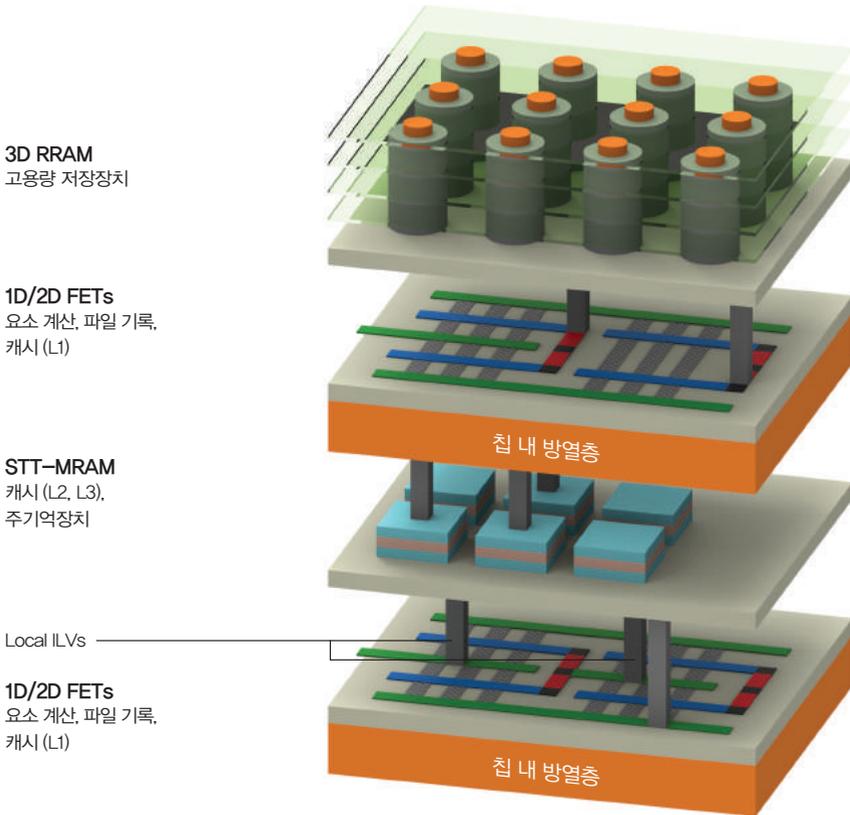
많은 성과가 쌓였지만 스핀트로닉스 소자 연구에는 풀어야 할 문제가 남아 있다. 특히 STT-MRAM에서 구동전류 및 열적 안정성을 개선하는 것이 시급하다. 구동전류는 전력소모나 배터리의 교환 및 충전 주기를 결정하는 중요한 요소로, 현재 상당한 수준으로 개선되었으나 열적 안정성을 동시에 충족하기는 아직 어렵다. 새로운 구조를 설계하거나 신소재를 개발함으로써 이를 극복하기 위한 노력이 산업체나 연구기관 모두에서 진행되고 있다. 그 외에 스핀을 이용한 반도체 소자로 스핀트랜지스터, 스핀로직, 스핀오실레이터 등이 있으나 아직 연구실 수준에서 구현하는 데 그치고 있어 많은 연구가 필요하다.

틈새 시장에서 디지털 혁명의 중심으로

스핀트로닉스 분야는 현대 디지털 혁명의 핵심인 반도체 기반 시스템에 그대로 적용할 수 있다는 장점이 있다. 예를 들어 현재 가장 많이 사용하는 메모리인 디램 DRAM 공정과 STT-MRAM 공정은 그 구성이나 순서가 거의 같을 정도로 매우 유사하다. 대부분의 공정이 같다. 여기에 전하를 저장하는 캐패시터 capacitor 를 자기터널링층으로 바꾸면 기존 설계나 제조기법을 그대로 사용할 수도 있다. 말 그대로 큰 플랫폼 변화 없이 사용할 수 있다는 의미다. 따라서 스핀트로닉스 메모리는

많은 IT 기업에서 관심을 갖고 있을 뿐 아니라 물리적 원리가 잘 규명돼 있고 소재 개발의 체계도 잘 완성된 분야다. 특히 나노기술의 발전으로 반도체 관련 학계와 산업계는 스핀 고유의 특성을 이용할 수 있는 준비가 돼 있다.

하지만 STT-MRAM을 비롯한 스핀트로닉스 소자는 미세 패터닝과 최첨단 반도체 공정을 필요로 해 이를 제작할 수 있는 기업이 제한돼 있다. 가능한 기업들은 현재 다른 종류의 메모리 사업으로 많은 수익을 올리고 있지만 경쟁 역시 심해 새



STT-MRAM이 속도가 요구되는 메인 메모리를 담당하면서 RRAM, 저차원 트랜지스터를 융합한 소자가 가능해졌다. © Nature Nanotechnology

로운 메모리 시스템 개발에 적극적으로 나서기는 매우 큰 위험성을 안고 있다. 이것이 기존 기술의 개량이 새로운 패러다임 적용보다 선호되는 이유이며 스핀트로닉스 연구 분야가 전면에서 나설 수 없는 이유다. 최근 기존 소자의 수명을 조금이라도 연장하기 위해 여러 가지 기법이 개발되고 있는 것도 스핀트로닉스 기술의 시장 진입을 늦추고 있다.

그러나 기존 소자의 분명한 물리적 한계는 피할 수 없는, 분명한 사실이다. 그렇기에 스핀트로닉스 기술은 차세대 반도체의 가장 유력한 대안기술로 그 자리를 유지하고 있다. 이에 미국, 일본, 싱가포르 등은 국가적 대형과제를 통해 스핀트로닉스 과제에 많은 투자를 하고 있다. 우리나라도 스핀트로닉스 연구에 기업뿐만 아니라 국가 차원에서의 지원이 시급한 실정이다.

높아지는 스핀전달토크 메모리 활용도

현재 스핀트로닉스 소자는 장비백업용 메모리 등 일부 분야에서 사용되고 있으며 비휘발성, 초고속, 방사선에 대한 안정성 등의 장점을 활용할 수 있는 특정분야에 우선 응용될 것으로 보인다. 그 대표적 분야가 자기저항메모리MRAM 중 하나인 STT-MRAM이다.

특히 STT-MRAM은 현재 반도체 프로세스와 플랫폼에 적용할 수 있어 기존 전계효과트랜지스터FET나 저차원 트랜지스터, 저항메모리 등과 융합한 소자를 만드는 데 매우 적합하다. 이 외에 스핀트랜지스터나 스핀오실레이터와 같은 소자도 아직은 초기 단계이지만 초고속, 저전력 동작이 가능하므로 로직이나 시스템 반도체로 사용될 충분한 잠재력을 갖고 있다. 기존 메모리의 개량이 한계에 다다르고 STT-MRAM이 제작비용 측면에서 경쟁력이 있다면 이러한 틈새시장을 넘어 미래 디지털 혁명을 이끌어가는 중심 역할을 할 것으로 기대된다.

프랑스의 시장조사회사인 율 디벨롭먼트Yole developpement에 따르면 2016년경부터

STT-MRAM이 스마트카드나 임베디드 프로세서에 쓰이기 시작하면서 수요가 급증해 2020년에는 약 30억 달러의 시장이 형성될 것으로 전망된다.

STT-MRAM이 본격적으로 상용화되면 응용의 폭이 점차 넓어져 휴대용 디지털 정보기기, 생활가전, 산업용 기계, 자동차산업용 소자, 의료 및 건강산업 등 다방면에 활용될 전망이다. STT-MRAM은 매우 빠른 동작속도를 가지고 있어 플래시 메모리보다 기록속도가 월등히 빠르고 전력소모도 현저히 작다는 장점을 지닌다. 다만 NAND 플래시메모리의 경우 저속 대용량의 정보저장 응용분야에 주로 사용되기 때문에 현재의 STT-MRAM의 집적도 수준에서는 NAND 플래시메모리를 대체하는 용도로 사용되지는 않을 것으로 보인다.

향후 30nm 수준의 공정을 통해 5GB급의 STT-MRAM이 개발되면 여러 임베디드 **embedded** 응용분야에서 기존 메모리를 대체할 수 있을 것으로 전망된다. 또 15nm 공정으로 16GB급의 STT-MRAM을 개발하면 독립형 **Stand-Alone** DRAM 시장도 대체할 수 있을 것으로 예상된다.

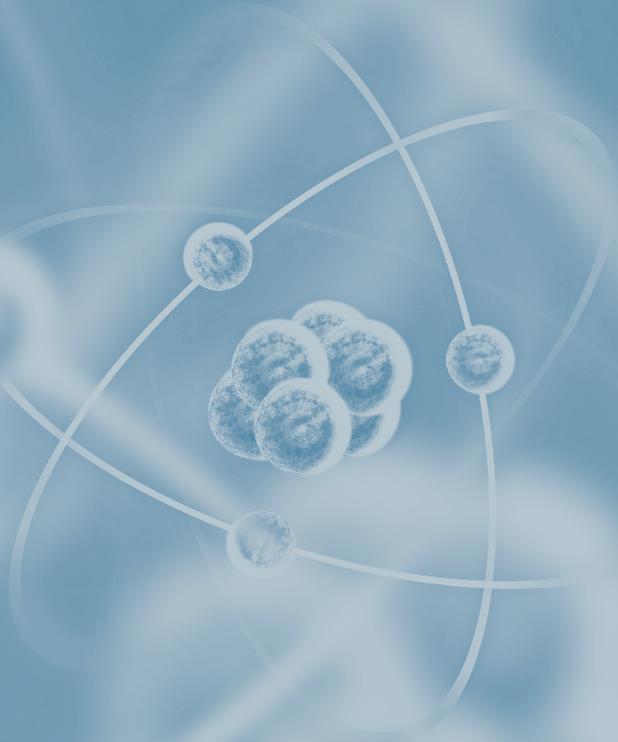


참고문헌

- Kent, et al. | "A new spin on magnetic memories", *Nature Nanotechnology* | 2015
- Wong, et al. | "Memory leads the way to better computing", *Nature Nanotechnology* | 2015

김재완 | 고등과학원 계산과학부

미시세계에서 온 정보혁명, 양자컴퓨터와 양자정보





정보기술의 완결판, 양자컴퓨터

2000년대에 들어선 지도 열 다섯 해가 지났다. 새삼 밀레니엄 버그 공포가 온 세상을 뒤덮었던 기억이 떠오른다. 연도 표시를 하면서 1900년대 앞자리 두 숫자 '19'를 편의상 또는 비용을 아낀다는 이유로 마구 잘라버렸던 것이 모든 정보시스템에 혼란을 일으키는 상황이 됐던 것이다. 소스 코드를 되살릴 수 없게 된 하드웨어는 어디서부터 손을 대야 할지 도무지 대책이 서지 않았다.

다행히 세상이 붕괴되는 엄청난 파국은 없었다. 그런데 이제 다가오는 혼란과 공포는 도무지 피할 길이 없다. 양자컴퓨터의 엄청난 계산능력이 오히려 비밀의 문을 여는 혼란을 일으킬 수 있다. 이미 앞질러진 물이다.

1977년에 발명된 '공개 자물쇠 암호 방식RSA'은 통신 비밀을 안전하게 지켜줄 뿐 아니라 그 편리성으로 인해 너도나도 거의 모든 곳에 활용했다. 큰 수의 소인수 분해가 매우 어렵다는 가설에 근거한 이 방식은 지난 몇십 년 동안 누구나 안전하다고 생각했다. 오로지 답을 알고 있는 사람만이 그 답을 '비밀 열쇠'로 사용해 비밀을 풀어낼 수 있고 세상의 비밀들은 '공개된 자물쇠'들로 잠겼다. 그랬던 믿음이 양자컴퓨터의 등장과 함께 산산이 부서졌다. 양자컴퓨터는 그렇게 어렵다는 문제들을 단 몇 초 내지 몇 시간에 똑딱 풀어낸다.

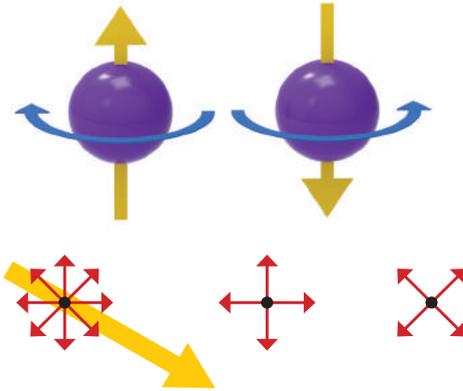
보안의 역사가 창과 방패의 변증법적인 진화의 역사이듯, 다행히도 방법은 있다. 바로 양자암호다. 1984년 등장한 양자암호는 자연의 궁극적 원리인 양자물리학을 이용했기에 아예 원리적으로 풀 수가 없다. 양자컴퓨터의 등장을 고려해 일찌감치 양자암호로 잠근 비밀은 이 우주가 끝나는 날까지 안전할 것이다.

양자컴퓨터가 비밀통신에 몰고 온 혼란은 양자물리학 탓이 아니다. 누군가가 풀어버릴지도 모를 문제를 아무도 풀지 못할 것이라고 믿었던 것이 잘못이다. 오히려 양자컴퓨터는 인류에게 새로운 정보처리기술의 혜택을 제공한다. 디지털컴퓨터로는 불가능하다고 여겨지던 문제들을 똑딱 풀어내고, 어마어마한 빅데이터를 척척 처리해내는 양자컴퓨터는 이제 자연이 허용하는 궁극의 정보처리기술로 자리매김한 것이다.

양자, 나노를 넘어

디지털정보는 0과 1, 비트를 정보의 단위로 사용한다. 정보를 담는 그릇인 하드웨어는 철컹거리는 기계 방식이었던 적도 있었고, 전류의 흐름을 조절하는 진공관 방식이었을 때도 있다. 하지만 이런 방식으로는 한 비트를 담는 그릇의 크기가 센티미터 이하로 작아지기 어렵다. 그러다가 양자물리학으로 물질과 빛의 원리를 이해하게 되자 반도체 트랜지스터와 레이저가 발명됐다. 이제 비트를 담는 트랜지스터는 점점 작아져 수~수십nm에 이르렀고, 수십억 개의 비트를 담을 수십억 개의 트랜지스터를 손가락 한 마디 크기에 집적할 수 있게 됐다. 1년 반마다 집적도가 두 배로 증가한다는 무어의 법칙처럼 ‘작게 더 작게’를 지향하는 나노기술은 언제까지나 지속될 수 있을까.

나노기술이라고 한계가 없는 것은 아니다. 양자물리학은 여태까지 비트를 담는 하드웨어를 만드는 원리로만 쓰여 왔다. 이제 비트 하나를 담는 그릇의 크기가 나노를 지나 원자 크기 정도까지 내려가면 양자물리학과는 무관하던 비트까지도 양



전자의 스핀 또는 원자핵의 스핀이 가진 두 배타적인 상태 업 스핀(up spin)과 다운 스핀(down spin)을 각각 0과 1로 정해 양자비트 또는 큐비트로 활용할 수 있다(위). 빛이 진행하는 방향에 수직인 2차원 평면 내에서 전기장이 진동한다. 이 전기장의 진동방향을 편광방향이라고 한다. 수평 편광과 수직편광을 큐비트 단위로 삼을 수도 있고, 대각(45도) 편광과 역대각(135도) 편광을 큐비트 단위로 삼을 수도 있다(아래).

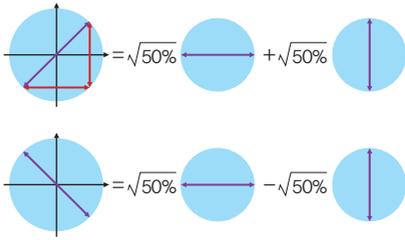
자물리학의 법칙을 따르게 된다. 디지털 정보기술에서 0과 1의 구분은 명확해야 하지만 양자물리학에서 불확정성 원리와 터널링 현상은 이런 명확성을 보장하지 못한다.

양자 중첩

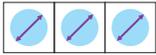
나노기술의 한계를 소극적 대응으로 피하지 않고 양자물리학을 적극적으로 이용해 극복하는 것이 양자정보과학이다. 양자정보의 단위는 양자비트 또는 큐비트 qubit/q-bit라고 한다. q는 양자물리학의 quantum을 나타내고, 비트bit는 이진법 숫자를 뜻하는 'binary digit'의 줄인 표현이다.

양자컴퓨터에 활용하는 특성은 바로 양자중첩quantum superposition이다. 양자중첩은 서로 다른 가능성이 단순히 섞여 있는 것이 아니라, 일정한 위상 관계를 가진 가능성들이 일정한 가중치를 가지고 더해져 있으며, 측정이 이루어지기 전까지 이들 가능성이 중첩된 채로 있게 된다. 따라서 0 또는 1로만 존재하는 비트와 달리, 큐비트는 0과 1이 중첩돼 동시에 0도 되고 1도 될 수 있다.

디지털 컴퓨터의 한 바이트는 여덟 개의 비트로 돼 있어 00000000부터 11111111



대각편광은 수평편광과 수직편광을 더한 중첩상태, 역 대각편광은 수평편광에서 수직편광을 뺀 중첩상태로 나타낼 수 있다.

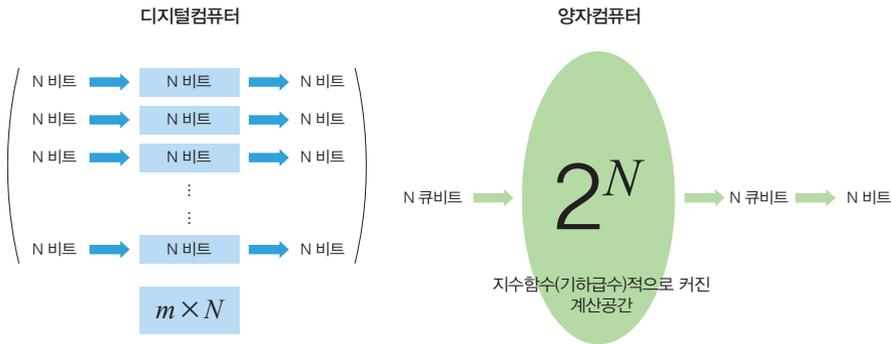


$$\begin{aligned}
 &= (\sqrt{50\%} \text{ (horizontal)} + \sqrt{50\%} \text{ (vertical)}) \times (\sqrt{50\%} \text{ (horizontal)} + \sqrt{50\%} \text{ (vertical)}) \\
 &\quad \times (\sqrt{50\%} \text{ (horizontal)} + \sqrt{50\%} \text{ (vertical)}) \\
 &= \sqrt{12.5\%} \left[\begin{array}{l} \text{(horizontal)} + \text{(horizontal)} + \text{(vertical)} + \text{(vertical)} \\ + \text{(horizontal)} + \text{(vertical)} + \text{(horizontal)} + \text{(vertical)} \\ + \text{(vertical)} + \text{(vertical)} + \text{(horizontal)} + \text{(horizontal)} \end{array} \right]
 \end{aligned}$$

대각편광 셋은 2의 3승, 즉 여덟 가지 상태를 한꺼번에 중첩해 나타낼 수 있다.

까지 모두 2의 8승, 즉 256가지 정보를 표현할 수 있다. 그렇지만 256가지 정보 모두를 처리하려면 한 번에 하나씩 256번 반복 작업을 해야만 한다.

양자컴퓨터의 양자비트 또는 큐비트 여덟 개는 00000000부터 11111111까지 모두 256가지를 중첩해 '한꺼번에 동시에' 나타낼 수 있다. 디지털컴퓨터가 256번 반복해야 할 작업을 단 한 번에 중첩해 끝낼 수 있는 것이다. 디지털컴퓨터를 병렬로 연결해 사용하면 기껏해야 '선형적인' 성능 향상을 보일 수 있다. 10대를 연결하면 기껏해야 10배, 100대를 연결하면 기껏해야 100배 향상을 보인다. 그러나 양자컴퓨터의 경우 큐비트의 개수가 하나 늘어날 때마다 계산공간이 두 배씩 늘어나 '지수함수적인' 또는 '기하급수적인' 성능 향상이 가능하다. 이를 '양자병렬성'이라고 한다.



디지털컴퓨터의 입력이 N비트이면, 계산처리량(throughput)도 N비트, 출력도 N비트이며, m대의 컴퓨터를 병렬로 연결하면 최대 $m \times N$ 비트까지 커질 수 있다. 양자컴퓨터는 입력이 N큐비트이면 계산 중 처리량이 2의 N승으로 되어 지수함수(기하급수)적으로 계산공간을 활용할 수 있다. 그렇지만 양자 계산의 출력은 N개의 큐비트를 측정해 얻는 N비트이므로, 지수함수적으로 커진 계산공간을 잘 활용할 수 있도록 양자알고리즘을 설계하는 것이 중요하다.

양자 측정

디지털비트를 읽을 때에는 0인지 1인지만 따지지만, 큐비트를 측정할 때에는 0과 1을 대비시킬 수도 있고 0과 1이 다양하게 중첩된 상태를 대비시킬 수도 있다. 그렇다면 이처럼 혼란스럽고 모호해 보이는 정보를 어떻게 읽어들이 수 있을까?

큐비트를 읽어들이려면 양자측정(quantum measurement)에 대해 이해해야 한다. 양자물리학 이전의 물리학에서 측정은 이미 정해져 있는 값을 읽어낼 따름이기에 측정 대상에 대해서 영향을 주지 않을 수 있지만, 양자상태는 양자측정 직전의 여러 가지 가능성이 양자측정 이후 하나로 정해져서 양자측정 이전과 달라질 수 있다. 이를 흔히 양자상태의 붕괴(collapse of quantum state)라고 부른다. 또한 양자측정에 의해 하나의 가능성이 발현되는 것은 결정론적이지 않고 확률적으로만 예상되기 때문에 이전의 물리학과 다른 확률적인 과정이다. 아인슈타인처럼 양자물리학 도입에 기여한 물리학자들도 양자상태의 붕괴, 양자측정의 확률적인 면 등을 받아들이지 않았다.

이제 양자 정보를 읽어들이기 위해 0과 1이 같은 방향으로 중첩된 상태를 ‘+

라고 하고, 반대방향으로 중첩된 상태를 ‘-’라고 하자. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$|+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle), |-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)$$

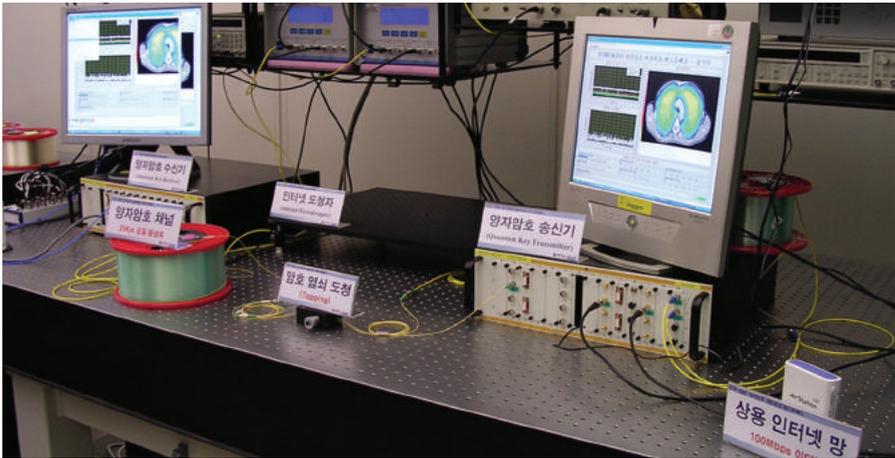
+상태를 측정할 때에 +인지 -인지를 따지면 100% +이지만, 0인지 1인지 따지면 50%는 0, 50%는 1이 되어 완전히 불확실하게 된다. 즉 +상태는 0과 1을 동시에 나타낼 수도 있지만, 어떻게 측정하느냐에 따라 다른 방식으로 결과를 내어 놓는다. 큐비트를 0 또는 1로 대비되는 상태를 준비해 0인지 1인지 따지면 100% 준비된 상태대로 측정되지만, +인지 -인지 따지면 완전히 불확정한 상태로 측정된다.

다시 정리하면, 디지털비트는 한 가지 방식, 즉 0 또는 1로만 준비도 되고 측정도 된다. 큐비트는 여러 가지 방식으로 준비되고 여러 가지 방식으로 측정된다. 준비된 것과 같은 방식으로 측정될 때에만 100% 그대로 측정되고, 다른 방식으로 측정되면 불확정한 결과가 나오게 된다. 양자측정의 이러한 성질은 양자암호의 원리로 쓰여, 절대적인 통신비밀을 보장할 수 있게 된다.

양자 얽힘

큐비트 두 개는 상호작용을 통해 특수한 상관관계를 얻을 수 있다. 이를 양자얽힘(quantum entanglement)이라고 한다. 양자얽힘은 서로 배타적인 자유도들이 상관된 항들과 중첩된 것을 말하며, 얽힘에 따라 한 자유도의 물리량이 측정되면 다른 자유도의 물리량이 정해진다. 따라서 얽힌 큐비트 각각은 특별히 정해진 상태가 없지만 어느 하나가 특정한 상태로 측정되면 다른 큐비트의 측정결과와 일정한 상관관계를 가진다. 마치 직접 연결된 것처럼 하나가 다른 하나에 영향을 받는 것인데, 얽힘에 따른 이 효과는 아무리 멀리 떨어져 있어도 거리에 관계없이 일어난다.

예를 들어 두 큐비트 A와 B가 서로 얽힘 상태에 있다고 하자. A와 B가 항상 반



고등과학원(KAIST)과 한국전자통신연구원(ETRI)은 공동연구를 통해 2005년 12월, 양자암호키를 25km까지 보내는 데 성공하기도 했다. © 고등과학원

대인 상관관계로 얽혀 있다면, A와 B의 비트 정보는 A가 0일 때 B는 $1A_0 \leftrightarrow B_1$, A가 1일 때 B는 $0A_1 \leftrightarrow B_0$ 과 같은 관계를 보인다. A와 B 모두 개별적으로는 어떤 상태로도 측정될 수 있지만, 둘의 측정결과는 항상 반대가 되는 것이다. 양자얽힘의 비국소적 상관성은 고전물리학적으로는 도저히 흉내 낼 수 없는 자원이 될 수 있다. 이를 이용해 양자상태를 순간적으로 멀리 보낼 수 있는 순간이동(quantum teleportation)을 할 수도 있고, 기존 광학이나 계측방식으로는 불가능한 새로운 방식의 양자이미징과 양자계측 등 다양한 양자기술의 원천이 될 것으로 기대된다.

양자컴퓨터의 현재와 미래

양자컴퓨터와 양자암호는 현재 정보기술의 한계를 극복하는 새로운 패러다임의 기술로 평가받고 있다. 미국, 유럽, 일본 등 기술선진국은 물론 중국, 호주 등 신흥국에서도 이에 대한 연구를 매우 활발히 진행 중이다. 이들 국가들은 실용화에 비교적 근접한 것으로 알려진 양자암호뿐만 아니라 양자컴퓨터에 대한 연구도 매우

광범위하게 진행하고 있다. 이러한 적극적인 투자에 힘입어 먼 미래기술로만 여겨지던 양자컴퓨터가 조금씩 그 실체를 드러내고 있다.

상업적인 측면에서는 캐나다의 디웨이브시스템즈D-Wave Systems사가 2007년부터 초전도체를 기반으로 한 세계 최초의 상용 양자컴퓨터를 개발했다고 주장하고 있다. 현재 구글Google, 미항공우주국NASA, 록히드마틴Lockheed Martin Corporation 등에서 이를 구매해 활용 중이라고 알려져 있다. 하지만 디웨이브시스템즈가 개발한 것이 제대로 된 양자컴퓨터의 일종으로 볼 수 있는지에 대해서는 논란이 있으며, 이와 관련한 연구가 여전히 진행 중이다. 이러한 논란에도 불구하고 디웨이브시스템즈는 미국중앙정보국CIA, 아마존Amazon 등으로부터 1,500억 원 가량의 투자를 유치하는 데 성공했다.

연구적인 측면에서는 양자컴퓨터의 효율을 극대화하기 위한 다양한 양자알고리즘을 개발하고, 이러한 양자알고리즘을 실험적으로 구현하고자 하는 노력이 계속되고 있다. 현재까지 알려진 가장 대표적인 양자알고리즘에는 데이터 검색을 매우 빠르게 수행하는 그로버Grover 알고리즘과 큰 수의 소인수분해를 효과적으로 수행하는 쇼어Shor 알고리즘이 있다. 이 중 그로버 알고리즘은 무수히 많은 정보 중에서 필요한 정보만 효율적으로 추출할 수 있다는 점에서 빅데이터 시대를 대비하는 양



캐나다의 디웨이브시스템즈는 세계 최초의 양자컴퓨터를 개발해 구글을 비롯한 주요 기업과 거래하고 있다. 그러나 디웨이브시스템즈의 컴퓨터가 진정한 양자컴퓨터인지에 대해서는 논란이 있다. © D-Wave Systems

자알고리즘으로 각광받고 있다. 한편 쇼어 알고리즘은 기존 RSA 암호체계를 무력화할 수 있다는 점에서 관심을 받고 있다. 쇼어 알고리즘의 경우 2001년 핵자기공명NMR을 이용해 15를 성공적으로 인수분해했다. 이후 선형광학계, 초전도체 등으로 최근 121의 소인수분해에 성공했다.

양자컴퓨터에 대한 연구는 아직 전 세계적으로 기초 수준에 머무르고 있다. 하지만 범국가적인 차원에서 집중적으로 투자하고 있어 기술수준이 매우 빠르게 성숙할 것으로 기대된다. 정보화시대에서 보안통신과 고속정보처리에 대한 요구가 점점 더 커지고 있다는 점에서 양자컴퓨터의 실용화는 현재 정보통신기술의 패러다임을 변화시키고 기술 수준을 한 단계 업그레이드할 것으로 기대된다.

디지털 강국에서 양자 강국으로

우리나라는 정보기술 산업에서 탁월한 능력을 발휘해 왔다. 남들보다 한참 뒤에 시작했지만 반도체 메모리 시장을 석권하고 있고 아무도 감히 시도하지 않던 코드분할다원접속CDMA 기술을 세계 최초로 상업화해 휴대전화 사업에 성공했다. 그런가 하면 선두주자들을 제치고 액정디스플레이LCD 등 평면모니터 시장에서 점유율 1위를 기록했다. 스마트폰의 출현으로 위기를 맞는가 했지만 여기서도 저력을 발휘해 세계 시장을 휩쓸었다. 그러는 사이 정보기술의 트렌드는 마이크로기술에서 나노기술로 옮겨 왔지만, 비트는 여전히 비트였다.

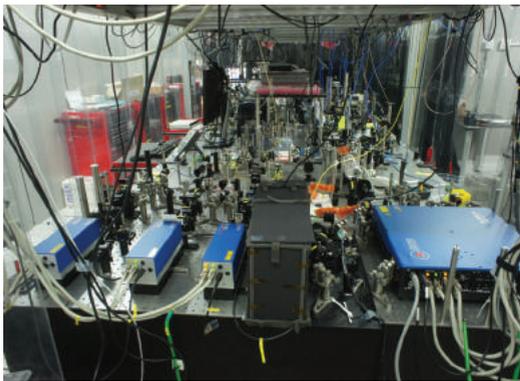
앞으로 열릴 양자기술은 비트에서 큐비트로의 전환이 이뤄져 완전히 다른 게임의 룰을 따르게 된다. 전남대 황원영 교수가 발명한 ‘미끼 방식decoy method’은 두 지점 사이의 양자암호키 전송 거리를 획기적으로 늘리는 데 필요불가결한 방식으로 채용되고 있다. 단일 광자 관련 실험의 선구자들인 홍정기, 노태곤, 김윤호 교수도 우리나라 기술 개발의 선구자다. 그런데도 다른 나라에 비해 양자정보과학 분야 개척이 뒤쳐진 이유는 이 분야 실험에 대한 투자가 미진했기 때문이다. 다른 과학기

술 선진국에 비해 '나노를 넘어 양자'로의 발전이 많이 뒤졌지만, 다행히 최근 들어 KIST, KAIST, 한국전자통신연구원ETRI, 고등과학원KIAS 등에 양자정보과학 연구 기반이 만들어지고 있다. 이미 KIST와 ETRI에서 2005년 실험실 내 양자암호키 분배가 구현됐으며, KIST는 양자광학 및 원자광학 기반의 양자정보기술 연구 토대를 다지고 있고, SK텔레콤은 이온덫ion trap 방식의 양자중계기까지 포함하는 양자암호키 분배 시스템의 연구를 진행하고 있다.

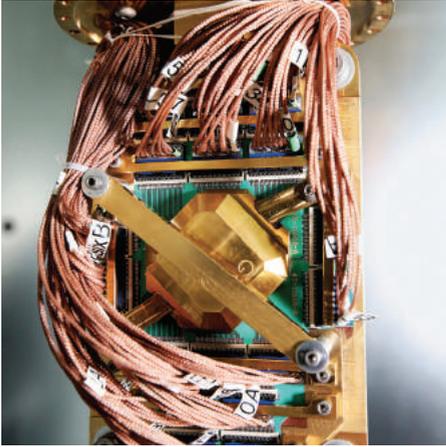
해결과제와 전망

양자컴퓨터와 양자암호로 대표되는 양자정보과학과 기술은 자연의 궁극적 원리로 알려진 양자물리학을 최대한 이용하고자 하는 시도이다. 그렇지만 자연은 그렇게 호락호락하지 않다. 물리계의 양자중첩성을 유지하기 위해서는 주위 환경과의 상호작용을 완전히 차단해야 하는데, 이것이 지극히 어렵기 때문이다. 양자정보처리에 이용하고자 하는 물리계의 양자상태는 제어할 수 없는 주변의 다른 물리계와 상호작용하는 즉시 양자중첩성을 잃어버린다. 이를 양자 결잃음quantum decoherence이라고 한다.

양자컴퓨터를 만들기 위해서는 주변과의 상호작용을 극단적으로 줄여 양자 결잃음 현상이 일어나지 않도록 하는 동시에, 원하는 제어는 할 수 있어야 하는 모순적



국내에서도 여러 곳에서 양자컴퓨터를 연구하고 있다. SKT는 이온트랩을 이용한 양자컴퓨터를 연구 중이다. 이온트랩은 가장 실현가능성이 높은 양자컴퓨팅 방식으로 손꼽힌다. © SK Telecom



첫 상용 양자컴퓨터가 등장한 이래 주요 기업과 연구기관들도 양자컴퓨터 연구에 도전장을 내고 있다. 구글은 NASA와 함께 양자컴퓨터를 이용하여 인공지능을 연구하고 있다. 사진은 구글과 NASA의 인공지능 프로젝트의 핵심인 양자컴퓨터 코어 모듈 부분. © NASA

인 조건을 만족시켜야 한다. 양자컴퓨터로 유망해 보이는 물리계로는 이온덫, 초전도회로superconducting circuit, 선형광학계linear optical system, 다이아몬드의 질소-빈자리 중심NV center 등이 있다. 디지털컴퓨터를 능가할 본격적인 양자컴퓨터는 적어도 100개 이상의 큐비트를 안정적으로 구동할 수 있어야 하지만, 아직은 10개 정도에 그치고 있다. 본격적인 양자암호기 전송을 하려면, 양자 텔레포테이션을 이용한 양자중계기quantum repeater가 있어야 하지만 아직 미진한 상태이다. 양자컴퓨터와 양자암호는 이제 시작에 불과하기에 앞으로도 기존 방식으로는 불가능한 다양한 꿈의 양자기술이 기대된다.

참고문헌

- 이순철 | 양자컴퓨터: 21세기 과학혁명 | 살림지식총서 36 | 2003
- George Johnson | 김재완 역 | 양자컴퓨터(Shortcut through time) | 한승 | 2007
- Los Alamos Science 27 | <http://www.fas.org/sgp/othergov/doe/lanl/pubs/number27.htm> | 2002
- 김재완 | “양자원리와 양자컴퓨터”, 『물리학과 첨단기술』 | <http://kps.or.kr/home/webzine/main.asp> | 2012.12
- “양자광학과 양자정보과학”, 『물리학과 첨단기술』 | <http://kps.or.kr/home/webzine/main.asp> | 2010.10



책임편집

금동화 석좌연구원
신경호 기술정책연구소장
김주희 미래전략팀 선임연구원

분야별 대표 필진

김명수 중소기업지원센터
김태송 바이오마이크로시스템연구단
정윤철 물자원순환연구단
홍경태 물질구조제어연구센터
박세형 바이오닉스연구단
안병성 청정에너지연구센터
한석희 스피닝합연구단

편집자

(주)동아사이언스
이충환 콘텐츠사업팀 편집위원
김택원 콘텐츠사업팀 편집기자

이미지 출처

Shutterstock.com
과학동아

KIST 과학기술전망 2016

초판 1쇄 발행 2016년 2월 4일

지은이 금동화 외
펴낸곳 한국과학기술연구원
펴낸이 이병권
기획 KIST 미래전략팀
편집 (주)동아사이언스
디자인 김진디자인

한국과학기술연구원

Korea Institute of Science and Technology
서울특별시 성북구 화랑로 14길 5
www.kist.re.kr

©한국과학기술연구원 | (주)동아사이언스

이 책은 저작권법에 따라 보호받는 저작물이므로 무단전제와 무단복제를 금합니다.

ISBN 979-11-954396-3-8 03500



9 791195 439638

ISBN 979-11-954396-3-8