

Biotechnology
Human Computer Interaction
BioMicrosystem
Nanomaterial
Energy
Environment



2013년

KIST

가
바라본
과학기술
전망

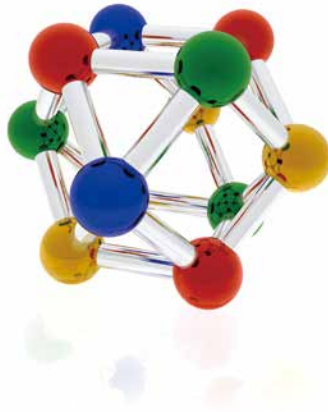


2013년

KIST
가
바라본
과학기술
전망

2013년

KIST
가
바라본
과학기술
전망





KIST

Korea Institute of
Science and Technology

2013년 KIST가 바라본 과학기술 전망

세계 각국은 경제불황 타개와 지속가능한 성장을 위한 동력으로서 과학기술에 새삼 주목하고 있습니다. 과학기술은 더 이상 경제발전의 단편적 수단이 아니라, 고령화와 질병, 기후변화, 자연재해, 에너지 물부족 등 인류가 공동으로 직면하고 있는 광범위한 사회경제적 정책적 과제 해결과 함께 국민의 삶의 질 향상, 창의성과 아이디어를 중심으로 한 창조산업에 적극 기여할 것으로 기대되고 있습니다.

최근에는 경제와 사회, 문화, 예술, 환경, 정보통신, 과학기술 등 모든 영역간의 경계가 허물어지고 있으며, 이들에 대한 융합 연구는 인류 사회가 직면하고 있는 문제 해결과 국민행복 및 창조경제의 기반이 될 것으로 주목받고 있습니다.

1966년 설립 이래 KIST가 걸어온 길은 대한민국 과학기술의 역사였습니다. KIST는 에너지, 환경, 건강, 정보·전자 등 각종 연구 분야의 창의적 연구성과를 학계와 산업계 등에 보급하고, 과학기술 인재 배출과 함께 여러 이공계 연구소를 탄생시키는 등 국가 과학기술 선도기관으로서 역할을 충실히 수행해왔습니다.

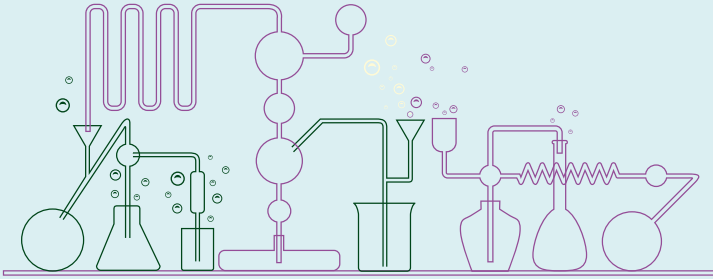
과거 우리가 선진국을 추격하기 위한 과학기술에 집중해왔다면 이제는 선진국들과 어깨를 함께 하고, 선도형·창조형·융합형 R&D 추진이 시급한 시점입니다. 이러한 시점에서 KIST 연구 분야에 대한 종합적인 조망을 통해 향후 어떤 방향으로 발전해 나갈 것인지 예측하고, 어떤 장애요인들을 극복해 나가야할 것인지 가늠해보는 것은 매우 의미있는 일이 될 것입니다.

끝으로 본 보고서는 연구원들이 공동집필한 것으로 집필진의 노고에 깊은 감사의 뜻을 전합니다.

한국과학기술연구원

원장 문길주

Contents



Part 1 Biotechnology

생리활성물질

- Intro 고령화 사회의 행복하고 안전한 삶을 위한 발걸음 • 10
- 전망 1 암 정복을 위한 최고의 바이오마커를 찾아서 • 14
- 전망 2 유전자가 생각을 움직인다? • 22
- 전망 3 광유전학, 뇌 속을 밝히다 • 32
- 전망 4 건강수명 연장의 핵심, 건강기능식품 • 40

Part 2 HumanComputer Interaction

컴퓨터와 인간생활, HCI

- Intro 컴퓨터와 인간생활의 융합 • 50
- 전망 5 사람과 컴퓨터의 2인 3각, HCI 기술 • 54
- 전망 6 정교한 외과의사, 컴퓨터 • 58
- 전망 7 로봇이 되찾아 준 다리 • 68
- 전망 8 스포츠 과학과 가상현실 • 78
- 전망 9 현실과 가상의 상생, 휴먼 인터랙션 • 86
- 전망 10 생물과 로봇, 서로에게 배운다 • 94
- 전망 11 안전한 삶을 위한 스마트 광센서 • 104

Part 3 BioMicrosystem

바이오마이크로시스템

- Intro **생명을 대신하는 첨단과학** • 116
- 전망 12 **칩 속에 온몸 장기 담으면 열리는 멋진 신세계** • 120
- 전망 13 **난치병을 극복하는 가장 작은 방법** • 130
- 전망 14 **혈액 속 암 세포를 잡아낸다** • 138
- 전망 15 **생체 정보의 바다에 던지는 마이크로 그물, 다중센서** • 146

Part 4 Nanomaterial

나노재료 · 소자

- Intro **가장 작은 곳에서 찾은 멋진 신세계** • 164
- 전망 16 **가볍고 잘 휘어지는 유기반도체 소재** • 168
- 전망 17 **사람 같은 근육을 가진 로봇을 만들 수 있을까?** • 176
- 전망 18 **태양빛을 모아 깨끗한 에너지 만드는 유기물질** • 182
- 전망 19 **내 몸보다 더 편안한 의료기구 만들기** • 192
- 전망 20 **움직이기만 하면 충전이 된다?** • 200
- 전망 21 **흙이 만드는 지속가능한 미래사회** • 212

Part 5 Energy

에너지

- Intro **미래 책임지는 신 · 재생 에너지** • 222
- 전망 22 **깨끗하고 무한한 화학연료** • 226
- 전망 23 **촉망받는 2세대 태양전지, CIGS** • 232
- 전망 24 **가장 현실적인 대안, 바이오연료** • 238
- 전망 25 **깨끗하고 힘센 차세대 동력장치, '연료전지'가 온다** • 246
- 전망 26 **전기에너지의 변신 돕는 이차전지** • 256

Part 6 Environment

환경

- Intro **전체를 생각하면서 부분을 바꾸는 과학, 환경과학** • 268
- 전망 27 **깨끗한 물을 체크하는 친환경 나노기술** • 272
- 전망 28 **폐수 정화하면서 에너지 얻는다** • 282
- 전망 29 **실내 공기질(AQ : Indoor Air Quality) 개선 기술** • 296

Biotechnology

Part 1

생리활성물질





전망 1 암 정복을 위한 최고의 바이오마커를 찾아서


전망 2 유전자가 생각을 움직인다?

전망 3 광유전학, 뇌 속을 밝히다

전망 4 건강수명 연장의 핵심, 건강기능식품

Intro **고령화 사회의
행복하고 안전한 삶을 위한
발걸음**

사람의 평균수명은 몇 살일까? 현대인은 근대인에 비해 대략 1.5~2배 정도 더 오래 산다고 한다. 사망률까지 따져보면 평균수명의 차이는 이보다 더 클 것이다. 심지어는 현재 인류의 평균 수명이 자연적인 수명 한계를 넘어섰다는 이야기까지 나오고 있다. 이러한 와중에도 평균수명은 계속 늘어나고 있다.



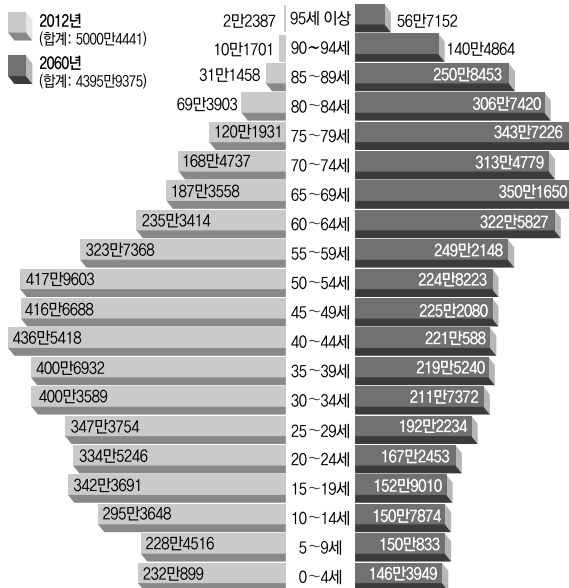
평균수명이 늘어나면서 은퇴 후의 삶의 질이 중요한 이슈로 부각되기 시작했다. 경제활동을 마치고도 한동안 활발히 활동할 수 있다는 점에서 노인에게 대한 복지와 일자리 문제는 중요한 사회적 이슈다. 사진은 59세 이상의 노인들로 구성된 구로시니어팝스오케스트라의 공연 장면.

수명 연장의 주역은 바로 현대 의학과 환경 개선이다. 의학은 질병과 사고에 의한 사망률을 현저히 낮추었고 보건 및 위생 환경이 크게 개선되면서 병원체에 감염되거나 독성 물질에 노출될 가능성이 크게 낮아졌다.

덕분에 수명은 연장됐지만 평균수명이 늘어나면서 새로운 문제가 생겼다. 바로 고령화다. 특히 한국은 고령화가 가장 빨리 진행되는 국가 중 하나로 꼽히고 있어, 2030년 초에는 한국이 초 고령화 사회로 진입할 것으로 예측된다.

고령화는 너무나도 갑작스러운 변화라 국가적 의제(National Agenda)로까지 대두되었다. 고령화 사회에서 가장 큰 과제는 국민

한국 인구 구조, 2060년에 어떻게 바뀌나(단위: 명) 자료: 통계청



들의 건강수명 연장과 함께 늘어난 노령인구의 삶의 질을 향상시킬 수 있는 국가적 공공 의료 복지 시스템을 체계화하는 것이다. 고령화에 따라 생산가능 인구 비율이 줄어들면서 보건의료에 대한 개인의 경제적 부담이 늘어나기 마련인데, 그만큼 복지에 대한 국가의 역할은 더 커지는 셈이다. 사회적으로 소외된 노약자들의 삶의 질 향상이나 사회적 참여기회 부여 등의 요구도 점진적으로 증가할 것으로 예상된다. 이러한 경제, 사회적 환경변화에 따라 진일보한 신개념 진단 및 치료 시스템의 필요성이 커지고 있다.

생명공학은 신체의 기능과 구조를 근본적인 수준에서 이해함으로써 질병이 생기는 메커니즘을 규명하고 치료법을 개발하는 길을 열어놓았다. 최근 눈부신 발전을 거듭한 생명공학기술은 과거 난치성으로 알려진 암, 척추마비, 뇌, 심장, 관절 질환 등에 대한 근본적 치유가 가능한 수준까지 발전했고, 특히 뇌를 이해하기 위한 많은 연구가 이루어질 것으로 기대된다.

2013년은 왓슨과 크릭이 DNA 이중나선구조를 발견한 지 60년이 되는 해다. 인간게놈프로젝트(Human genome project)가 공식적으로 완성된 지 10년이 되는 해기도 하다. 그 상징성이 큰 만큼 2013년은 유전체학이 미래에 어떤 영향을 미칠지 규정하는 중요한 분수령이 될 것이다. 한국 정부도 유전체 기술 개발에 2014년부터 8년 동안 5,788억원을 투입할 계획이며 맞춤의료와 생명자원 개발을 목표로 두고 있다.

또한 시스템생물정보학을 통해 난치성 질환의 진단, 치료, 예후예측이 가능한 바이오마커를 발굴하고 이를 타깃으로 하여 살아있는 세포와 인체 내에서 비침습, 실시간 분자영상과 치료가 동시에 가능한

방법을 개발하는 등 궁극적으로 효과적인 개인별 맞춤의료를 위한 신개념 원천기술의 개발도 예상된다. 유전체학 연구는 이러한 연구에서도 중요한 역할을 할 것이다.

• 미래의 신약 개발을 위한 유전체학 연구 패러다임

구분	목표
Genome	세포에 있는 모든 유전정보 규명
Transcriptome	인체내 모든 RNA 전사체 규명
Proteome	생성되는 모든 단백질 규명
Metabolome	세포대사에 의해 생성되는 모든 화학물질 추적
Connectome	뇌의 신경회로 지도 완성

본 장에서는 인간의 삶의 질 증진을 위한 질환의 조기 진단 및 치료와 뇌의 기능, 그리고 생명 현상 규명 등에 관한 연구와 기술을 유전체학을 중심으로 소개하고 건강기능식품 소재 개발에 대해서도 간략히 언급하고자 한다.

암 정복을 위한 최고의 바이오마커를 찾아서

양은경(테라그노시스 연구단)

지난해 9월 13일, 통계청은 2011년 한 해 동안 우리나라 사람들의 사망 원인을 조사해 그 결과를 발표했다. 사망 원인 1위는 역시 암이었다. 2011년 한 해 암으로 사망한 사람의 수는 무려 7만 명을 넘는 것으로 나타났다. 이는 비단 2011년의 결과만이 아니다. 해마다 암은 국내 사망 원인 1위와 2위를 번갈아 차지하며 국민의 건강을 위협하는 존재로 자리 잡은 지 오래다.

암을 치료하기 위한 가장 좋은 방법은 무엇일까? 전문가들은 암을 최대한 빨리 발견하는 것이라고 입을 모은다. 암을 조기에 진단하는 가장 좋은 방법 중 하나는 검사자의 혈액 속에 종양표지자, 다시 말해 암에 대한 '바이오마커'가 있는지 알아보는 것이다.

바이오마커란 이름 그대로 특정 생명 현상을 표시하는 물질을 말한다. 암 세포가 빠르게 성장하는 과정 중에 혈액으로 흘러나오는 암세포 유래 단백질이나 암세포가 분비하는 단백질처럼 암에 걸렸을 때

만 나타나는 물질의 농도를 측정하면 발병여부를 쉽게 알 수 있다.

암 바이오마커 검사는 해마다 받는 건강검진에 포함되어 있다. 간암은 AFP, 대장암과 직장암, 폐암은 CEA, 전립선암은 PSA, 난소암은 CA125, 췌장암과 간담도계암은 CA19-9, 백혈병과 다발성골수증은 β 2-MG, 유방암은 CA15-3, 폐암은 Cyfra 같은 바이오마커 검사를 쓰고 있다.

그러나 현재 이용하는 암 바이오마커 검사 역시 한계가 있다. 암 바이오마커는 정상세포에서도 분비될 뿐 아니라 단순 양성 종양일 경우에도 종종 높은 농도로 검출된다. 또 아직까지는 암을 조기에 찾을 수 있는 바이오마커도 존재하지 않는다. 결국 특정 암을 정확하게 조기에 발견할 수 있는 바이오마커를 발견하는 것이 암을 연구하는 과학자들에게 가장 중요한 과제 중 하나인 셈이다.

바이오마커, 어떻게 찾을까?

어떤 물질이 획기적인 바이오마커가 될 수 있을까? 사람을 구성하는 수많은 생분자 중에서 이런 바이오마커를 찾는 것은 그야말로 드넓은 사막에서 바늘 찾기와 같은 일이다. 하지만 인간 유전자의 기능을 본격적으로 연구하는 ‘유전학 이후’ 시대가 열리면서 좀 더 효율적인 연구법이 등장했다. 바로 생명체를 구성하는 생분자를 총체적으로 이해하려는 ‘오믹스 연구’가 그것이다.

1 단백질 마커를 찾아라, ‘프로테오믹스’

수많은 생분자 중에서도 생명현상에 필요한 세포 기능을 직접 수행하는 주체는 바로 단백질이다. 기존 특정 단백질의 기능을 알려는 단

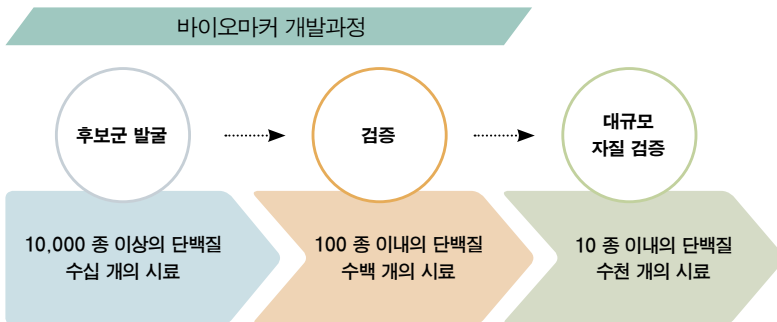
편적인 연구를 뛰어넘어 세포나 조직에서 발견되는 전체 단백질의 양상별인 프로테오미를 분석하는 프로테오믹스의 도입은 단백질 마커를 찾기 위한 연구에 활력을 불어넣었다. 프로테오미를 분석하는 프로테오믹스의 전략은 전형적으로 질량분석기로 여러 단백질과 그들의 수식화(PTM: Post-Translational Modification)를 동정하고 정량하

프로테오미(Proteome) 세포 속에 있는 단백질의 총합

는 특성 분석 능력을 입증했다. 따라서 암의 분자적 발병요인을 판독하고 잠재적인 진단 바이오마커의 발굴에 계속 이용하고 있다.

또 정상과 질병 상태에서 단백질 발현이 각각 어떻게 달라지는지, 수식화 수준은 어떻게 변하는지를 연구하는 표현형 차이 프로테오믹스 연구를 통해 그 질병과 관련된 단백질 바이오마커 후보군을 동정하고, 질병의 진행 정도를 모니터링할 수 있게 되었다. 한편 임상(Clinical) 프로테오믹스 분야에서는 단백질 경로와 신호전달 기반의 생분자시그너처 발굴에 사용하는 선진 생물정보학과 결합한 새로운 형태의 프로테오믹스 기술을 의학 분야에 적용하였다.

최근에는 암 진단용 단백질 바이오마커의 도출을 위한 후보군 발굴(Discovery), 임상시료에서의 검증(Verification), 대규모 시료에서의



자질검증(Qualification) 단계로 구성된 바이오마커 개발 파이프라인 전략이 확립된 바 있다. 우선 후보군 발굴 단계에서는 암 조직에서 혈액과 같은 체액으로 빠져나오는 단백질을 가능한 많이 발굴해야 한다. 반면에 임상 검증 단계에서는 대상 질환군과 정상 대조군에 대한 많은 인체시료를 확보해 고속으로 분석하는 것이 중요하다. 초기에 발굴한 수많은 후보군 중에서 어떤 것을 선택하여 검증할 지도 결정해야 한다. 분석적 유효성, 임상적 유효성, 임상적 활용도 등을 모두 만족시키는지를 알아보는 것이다. 결국 이런 과정을 통해 이루고자 하는 목표는 현재 임상에서 쓰는 암 단백질 바이오마커보다 민감도와 특이도 면에서 향상된 결과를 보일 수 있는 바이오마커 패널이나 생분자시그니처를 개발하는 것이다.

생분자시그니처 병 유무를 판단할 수 있게 하는 유전자 및 단백질들의 특징의 집합.

2 생분자 마커 찾기, '프로테오지노믹스'

암은 유전자의 변이, 염색체 재배열, 증폭과 결손 같은 유전자의 변형에 의한 유전질환이다. 그러나 결국 유전자를 이렇게 변형시켜 암



을 유발하는 인자 역시 단백질이다. 결국 암의 게놈 변화가 프로테오믹스 수준에서 어떠한 기능적인 차이로 나타나는지에 대한 이해가 선행되어야 진정한 의미의 암 바이오마커를 개발할 수 있는 것이다. 따라서 유전체학과 프로테오믹스 기술이 융합된 '프로테오지노믹스' 기술이 새롭게 부상했다.

프로테오지노믹스는 게놈-프로테오믹스-정보기술을 통합한 연구 분야로, DNA/mRNA 변이와 차이, 스플라이싱과 같은 게놈 정보와 단백질 서열과 정량 및 수식화 같은 프로테오믹스 정보를 체계적으로 통합하여 질병과 관련된 생분자시그니처를 발굴하고 검증하는 것이다. 암생물학과 종양학의 다학제간 연구로도 잘 알려진 암 프로테오지노믹스는 암 게놈 변화와 이와 관련된 단백질을 확인하고 질병의 진단과 치료 및 기전연구에 바탕이 되는 정보를 제공하게 된다.

프로테오지노믹스를 이용한 바이오마커 발굴단계에서 유전체학과 프로테오믹스 정보를 통합하는 방법으로 두 가지 접근법이 있다. 우선 게놈을 프로테오믹스로 타깃팅하는 방법(Genome-to-proteome targeting)이다. 이 방법은 게놈 데이터 세트로부터 프로테오믹스 측정으로 표적화되는 단백질 후보군을 결정한다. 따라서 게놈 수준에서 측정할 수 있는 스플라이스 변이, 돌연변이, 증폭, 결손, 염색체 재배열, 복제개수 이상(Copy number aberrations), 후성유전적 변화에 대응하는 단백질들을 정량 측정할 수 있다. 두 번째 방법은 프로테오믹스를 게놈으로 맵핑하는 방법(Proteome-to-genome mapping)이다. 일단 게놈과 프로테오믹스의 측정을 끝낸 후에 두 데이터 세트의 통합이 이루어진다. 이 방법은 종양 세포의 신호전달 경로와 네트워크에 결정적인 수식화 동정을 포함하여 더욱 폭 넓은 단백질 목록이 생

산된다. 또 단백질을 만드는 유전자의 확인이 가능하여 게놈 주석(Annotation)의 질을 향상시키는데 사용될 수도 있다. 이 두 방법의 융합으로 훨씬 더 포괄적인 단백질 목록이 생산될 것이고, 여기서 발굴된 단백질 후보군은 다음 단계에서 적절한 바이오시료 집단에 대해 다중 검증 에세이 기반 시험을 거쳐 대량 임상검증 단계로 들어가 최종적인 진단용 생분자시그너처로 확정될 것이다.

암 조기 진단 바이오마커의 미래는?

지난 10년 간 KIST의 프로테오믹스이용기술개발사업단이 프로테오믹스에 필수적인 질량분석 기술과 단백질 분리 기술을 개발하고, 실제 임상 시료를 이용해 바이오마커 발굴 연구를 계속 진행하는 동안 국내 프로테오믹스 기술은 크게 발전했다. 사업단은 특히 단백질 시료를 조그마한 펩티드 절편으로 절단하고, 질량분석기를 통해 프로테오믹스 프로파일을 만들어내는 소위 상향법(Bottom-up) 프로테오믹스 방법을 비약적으로 발전시켰다.

하지만 게놈 분석 기술과 비교해 보면 프로테오믹스는 여전히 분석 능력을 더 개선해야 하는 상황이다. 아직 프로테오믹스 분석을 통해서만 인간유전자의 1/3 정도만을 검출할 수 있기 때문이다. 또 프로테오믹스가 해결해야 할 과제도 많이 남아있다. 단백질 수식화와 단백질 간 상호작용, 단백질 복합체에 존재하는 요소단백질 동정, 특정 단백질의 다양한 수식화 확인, 생리적 환경에 따른 단백질 복합체 구성요소와 수식화 모니터링 등 유전체학으로는 절대 해결할 수 없는 것이다.

아직 부족한 점이 있지만 앞으로의 연구는 점점 나아질 것으로 전

망된다. 프로테오지노믹스 같은 다중오믹스 신기술 개발을 통해 바이오마커를 발굴하려는 프로그램이 세계적으로 증가하고 있기 때문이다. 미국에서는 암 유전체 지도(TCGA: The Cancer Genome Atlas) 사업으로 대규모 게놈 시퀀싱 분석 기술을 응용해 암의 분자적 근거에 대한 이해를 촉진하려는 노력을 하고 있다. 이는 임상시료의 단백질체 다중 정량 기술 개발을 위한 NCI/FDA 공동프로그램과 연계한 것인데, 의료프로테오믹스 종양분석 컨소시엄(CPTAC: Clinical Proteomic Tumor Analysis Consortium)을 중심으로 TCGA에서 분석한 게놈 데이터를 이용한 프로테오지노믹스 연구가 이미 지난 2011년에 시작되었다. 인간 프로테오믹스의 절대 정량을 위한 대규모 프로젝트도 진행되고 있어서 바이오마커 개발 파이프라인에서의 검증단계를 촉진시킬 것으로 예상된다. 국내에서는 프로테오믹스 기반 바이오마커 발굴 및 검증 기반 기술의 축적과 국가 유전체

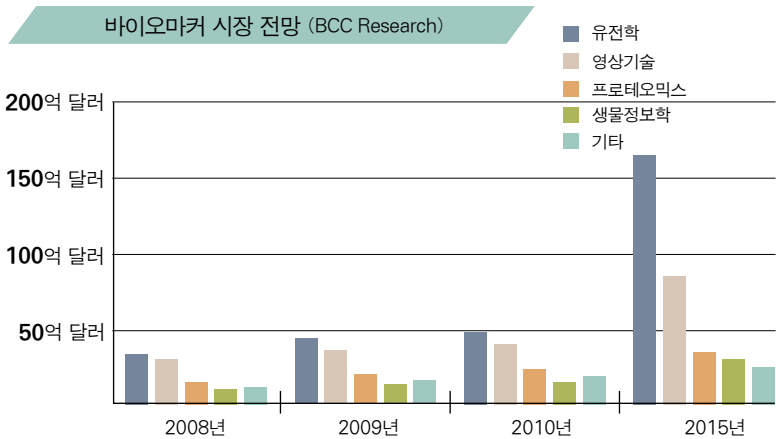


암 바이오마커 개발기술은 한국과학기술정보연구원(KISTI)에서 선정한 10대 미래유망기술로 포함되기도 했다. 산업적 응용가능성이 높아 향후 중견기업들의 선전이 기대된다.

사업 및 생명정보 기반센터 중심으로 게놈 정보 분석 기반이 확립됨에 따라 KIST를 중심으로 TCGA, CPTAC과 연계된 프로테오지노믹스 연구 사업을 2012년에 시작해, 우선적으로 위암 생분자시그니처를 발굴하려는 노력을 경주하고 있다.

지금은 약 135억 달러 정도 되는 세계 바이오마커 시장은 유전학과 영상기술이 주도하고 있다. 하지만 프로테오지노믹스 기술이 확립된다면 현재 예상되는 연간 26.9% 성장률을 훨씬 넘어설 것으로 보이며, 조기 진단 시장의 새로운 주역으로 자리매김할 것이다. 프로테오지노믹스는 향후 개인별 맞춤형료 활성화에도 기여할 것이다.

프로테오지노믹스의 결과가 임상적으로 이용되지 않는 경우에도 단백질 바이오마커 후보들은 생물학적으로 소중한 정보를 제공할 것이다. 특히 단백질 변이체와 수식화의 정확한 정량은 게놈 정보와 시스템즈 생물학적으로 위여서 신호전달 경로, 단백질 네트워크 조절과 기능적인 프로테오믹스와 같은 질병의 생물학이나 병리학에 대한 이해를 높이는데 크게 기여할 수 있을 것이다.



유전자가 생각을 움직인다?

김기선(신경과학 연구단)

“두뇌가 우리가 이해할 수 있을 만큼 단순했다면, 우리는 너무 단순해서 두뇌를 이해할 수 없었을 것이다.”

남아프리카의 생물학자인 라이얼 왓슨의 말이다. 이 말은 두뇌가 얼마나 복잡한 기관인지 설명할 때 종종 인용된다. 우리의 생각, 행동부터 맛, 냄새, 소리까지, 나아가서는 심장 박동과 호흡까지 생존에 필요한 모든 것을 관장하는 기관이지만 우리가 아는 게 가장 적은 기관이 뇌다. 과학의 주요 난제 중 하나인 ‘마음’을 만들어내는 곳이라 생각되지만 아직도 기본적인 물리화학적 메커니즘조차 명확히 규명되지 않았다. 뇌는 인간 자신만큼이나 다양하고 복잡한 것이다.

인류는 지금까지 다양한 방법으로 뇌를 이해하기 위해 노력했다. 생리학에서는 신경세포를 작동원리를 통해 뇌에서 신호가 전달되는 메커니즘을 밝혀내고 생화학에서는 다양한 화합물들이 뇌의 기능에 미치는 영향을 탐구하는가 하면, 심리학에서는 뇌 기능의 산물인 마음

의 정체성을 규명하려는 시도가 이어졌다. 21세기 들어서는 다양한 분야에서 축적된 성과를 종합하여 뇌의 기능을 복합적으로 규명하려는 움직임도 본격적으로 활발해졌다. 최근에는 유전자를 통해 뇌를 이해하려는 새로운 방법론이 등장하여 뇌의 신비에 한 걸음 다가서는 길을 열고 있다.

뇌를 이해하는 새로운 열쇠, 유전자

생물의 각 개체가 나타내는 형질들은 유전자에 따라 좌우된다. 생명 현상을 유지하는 다양한 생리작용들도 유전자가 발현된 결과다. 그렇다면 유전자가 행동도 결정할 수 있을까?

이에 대한 해답은 꿀벌을 이용한 연구 사례에서 찾을 수 있다. 지금까지의 연구에 따르면 벌의 행동은 유전자와 밀접한 연관이 있다고 한다. 같은 일벌이라도 벌집 안에서 일하느냐, 혹은 밖에서 활동하느냐에 따라서 뇌의 유전자 발현이 다르다는 뜻이다. 식량을 수집하는 일벌 중에도 꽃을 찾는 벌과 꿀을 수집하는 벌은 발현되는 유전자에 분명하게 식별할 수 있는 차이가 있다.

꿀벌의 사례와 마찬가지로 사람 역시 여러 행동이 유전자와 밀접한 연관이 있다. 이는 행동이나 판단에 장애가 있는 질병을 유전자 연구를 통해 극복할 수 있음을 뜻한다. 그러나 그 과정은 결코 단순하지 않다. 단순하고 간단해 보이는 행동 하나에도 수많은 유전자가 복잡한 경로를 거쳐 작용한다. 최근 발달한 염기서열분석에 의하면 한 개 유전자와 연결된 질환도 있지만, 여러 유전자가 연관된 경우가 더 많다. 대표적인 예가 알츠하이머, 파킨슨씨병이나 정신분열증이다. 연구 성과가 쌓이면서 이들 질병에 관련된 유전자가 많이 보고되고 있

다. 따라서 뇌질환을 정확히 이해하거나 치료하려면 수많은 유전자가 형성하는 신호전달 체계, 혹은 네트워크 수준에서 뇌질환을 이해해야 한다. 뇌기능에 관련된 유전자의 역할과 작동 메커니즘을 규명하면, 뇌기능 이상에서 오는 장애와 질환을 예방하거나 치료할 수 있을 것이다. 세계적으로는 생쥐의 유전자를 조작하여 뇌기능에 어떤 변화가 일어나는지 규명하는 연구가 매우 활발하다. 과학자들은 생쥐에서 특정 유전자를 삭제(Knock-out)하거나 삽입(Knock-in)하여, 이에 따른 변화를 다양한 수준에서 조사함으로써 유전자가 생쥐의 행동에 어떻게 영향을 주는지 연구하고 있다.

유전자에서 행동에 이르기까지

유전자로부터 행동이 결정되는 과정은 유전자 발현, 이에 따른 단백질의 작용으로 신경신호 조절, 신경신호에 따른 행동 조절의 세 단계로 이루어진다. 따라서 유전자가 행동에 미치는 영향을 분석하려면 이 세 단계를 각각 연구해야 한다.

1 유전자, 마음대로 주무르기

특정 유전자가 발현됐을 때 어떤 일이 일어나는지 알아보려면 우선 원하는 유전자만 발현되도록 조절할 수 있어야 한다. 이와 함께 정확성과 실험결과 검증을 위해 동일한 유전자를 지닌 실험대상이 여럿 필요하다. 인위적으로 특정 유전자를 보유한 '형질전환동물'을 생산함으로써 이러한 연구가 가능하다.

외래의 유전자를 인위적으로 원하는 동물의 염색체에 삽입하거나 삭제한 동물을 형질전환동물(Transgenic animal)이라고 한다. 형질

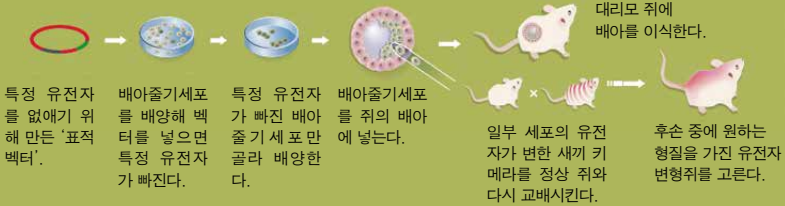
유전자변형쥐 만드는 법

유전자변형쥐는 만드는 법에 따라 종류가 나뉜다. 수정란을 이용해 유전자를 넣는 '트랜스제닉 마우스(transgenic mouse)'와 배아줄기세포로 특정 유전자를 뺀 '녹아웃 마우스(knock-out mouse)'가 있다.

① 트랜스제닉 마우스



② 녹아웃 마우스



전환동물은 주로 미세 주입법(Microinjection)과 배아줄기세포법(Embryonic stem cell)으로 만들어진다.

미세 주입법은 말 그대로 DNA를 수정란 내부로 직접 주입하는 방법이다. 직접 원하는 유전자를 주입하기 때문에 유전자 삽입 효율이 좋고, 염색체에 넣은 유전자는 외부에서 온 유전자로 인식되지 않아 다음 세대로 유전되는 장점이 있다.

배아줄기세포법은 배아줄기세포에 원하는 유전자를 제거할 수 있는 '적중벡터'를 제작하여 투입하는 방법이다. 이렇게 적중벡터 처리한 줄기세포를 대리모의 자궁에 이식하여 특정 유전자가 결손된 형질전환생쥐를 생산한다. 현재 10,000여 종류의 유전자 결손생쥐가 존재하며 이 기술을 개발한 연구자들에게는 2007년 노벨 생리의학상이 수여되었다(Mario Capecchi, Oliver Smithies, Martin Evans).

제작 방법에서 볼 수 있듯이 미세 주입법으로 제작된 생쥐는 특정 유전자를 발현시켜서 삽입된 유전자의 기능을 연구하는 데 활용하고, 적중백터를 이용하여 만들어진 녹아웃(Knockout) 생쥐는 생물체에 서 특정 유전자를 제거하여 결손된 유전자의 기능을 유추하는 데 사용한다. 다만 위의 두 방법으로 돌연변이 생쥐를 얻는 데는 시간과 비용이 많이 소요된다는 단점이 있다. 또한 수정란에 조작을 가하는 방법이기 때문에 신체의 모든 부위에서 특정 유전자가 발현되거나 결손되므로 유전자가 신체의 특정 부위에서 어떤 변화를 일으키는 지 알기는 어렵다. 뇌의 전두엽에 문제가 있을 때 어떤 이상이 생기는지와 같은 구체적 변화를 관찰하기 어렵다는 얘기도 있다. 이를 보완하기 위해 특정 조직에서만 유전자 결손이 일어나도록 한 조건부 삭제(Conditional knockout) 방법이 개발되기도 했다.

최근에 개발된 RNAi(RNA inhibition) 기법은 비교적 짧은 시간과 적은 비용으로 발현장소와 발현시기를 더 구체적으로 조작할 수 있어 각광받는 기술이다. RNAi는 세포내에서 일반적으로 일어나는 현상이다. siRNA라고도 불리는 12~21개 염기로 이루어진 단위체가 결합한 dsRNA가 유전자의 특정 부위가 발현되지 않도록 억제한다. 쉽게 말해 유전자 자체를 삭제하기보다 원하는 유전자가 제 기능을 하지 못하도록 방해하는 방법이다. KIST에는 이러한 기술을 효율적으로 활용하기 위하여 바이러스 시설을 구축하여 운영하고 있다.

2 뇌 깊숙이 들여다보기

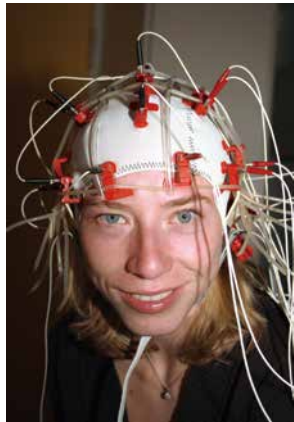
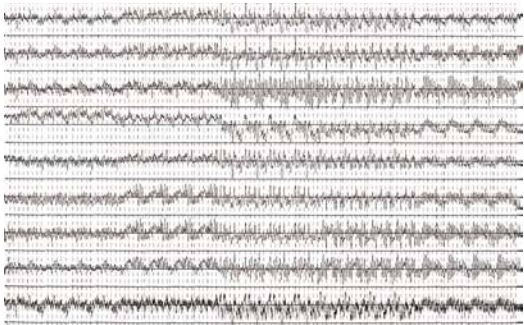
뇌의 기능이나 행동은 다양한 부위에 분포한 수많은 신경세포들의 활동이 조합되어 이루어진다. 따라서 이들 신경세포가 어떻게 활동하

고, 어디로 신호를 보내며, 서로 어떻게 정보를 교환하는가를 이해하는 것이야말로 뇌가 어떻게 작용하는지를 이해하는 근간이 된다. 신경신호 분석에는 신경세포의 고유한 성질과 신경세포에 존재하는 다양한 이온 통로의 역할을 측정할 수 있는 방법, 이러한 이온통로들의 역할들이 모두 통합된 신경세포의 신경신호를 측정하는 방법, 그리고 수많은 신경세포의 신호를 집합적으로 측정하는 다양한 방법들이 있다.

단일 신경세포 측정(Single unit recording)이라는 기법은 뇌에 삽입된 전극을 통하여 의식이 있는 동물이 특정 행동을 할 때 하나하나의 신경세포가 어떻게 반응하고 활동하는지 실시간으로 측정하는 방법이다. 신경세포의 활동을 하나하나 측정할 수 있기 때문에 상세하고 정확한 데이터를 얻을 수 있다. 그러나 뇌에 전극을 삽입해야 하기 때문에 살아있는 생물을 대상으로 한 임상연구에서는 사용하기 어렵다.

이와 비교되는 방법이 EEG(ElectroEncephaloGram)인데, 수많은

뇌 활동이 종합적으로 표현되는 EEG. 흔히 뇌파라고도 부른다. 자기공명영상법(MRI)과 함께 살아있는 뇌를 연구하는 게 가장 중요한 방법이다(좌). EEG 측정에는 수많은 전극이 필요하다(우).





미로 등 다양한 장치에서 흰쥐가 보이는 행동은 행동학의 가장 기본적인 연구방법이다.

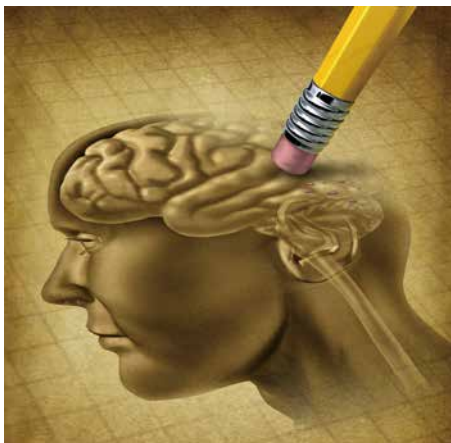
신경세포들이 상호작용하여 형성된 신호를 전극의 삽입 없이 측정하는 방법이다. 흔히 말하는 ‘뇌파’다. 머리 표면에 전극을 부착하는 것만으로 신체에 부담을 주지 않고 뇌 활동을 측정할 수 있기 때문에 살아있는 생물, 특히 사람에게 많이 사용하는 방법이다. 그러나 실험에 흔히 사용하는 쥐와 같은 소형동물들은 뇌의 크기가 너무 작아 많은 수의 전극을 활용하기 어렵다. 전극의 수가 적을수록 뇌 곳

곳에서 일어나는 데이터를 일일이 수집하기 어려워진다.

최근 KIST에서 개발한 생쥐용 박막형 미세전극은 EEG의 단점을 해결했다. 생쥐에게 부착하여 40개의 다채널 뇌전도 측정이 가능해짐으로써 뇌의 다양한 영역에서 발생하는 활동을 동시에 측정할 수 있게 됐다. EEG신호의 발원지를 밝히면 자극에 의한 뇌 속의 정보흐름을 읽어 내거나 상황에 따른 뇌 영역간의 기능적 연결을 추론해 내는 것도 가능할 것이다.

개체의 행동을 어떻게 분석하는가?

다양한 뇌 연구의 궁극적인 목적은 우리의 행동을 더 잘 이해하고 설명하는 것이다. 나아가서는 정상이 아닌 행동의 원인을 찾고, 그것을



‘내 머리 속의 지우개’, 알츠하이머 질환은 고령화 사회가 해결해야 할 가장 중요한 이슈 중 하나다. 유전학적 접근을 통해 알츠하이머와 치매 등 노인성 정신질환을 예방하거나 치료할 수 있는 길이 열릴지도 모른다.

치료하는 것 또한 중요한 목적이다. 현재 이를 위해 다양한 동물모델과 행동분석 방법들이 개발되었으며, 지난 수십 년 간 수많은 시행착오와 이론 검증을 통해 인간의 행동들을 상당 수준 설명하는 것이 가능해졌다.

대표적인 사례가 쥐를 이용한 미로 실험이다. 다양한 미로 시험방법들은 설치류를 이용하여 뇌 해마의 학습과 기억기능을 시험할 수 있게 했다. 해마 부분이 어떻게 경험을 기억하고 학습을 하는지 그 과정을 연구하는 데는 물론, 치매 등과 같은 학습·기억장애 질병 치료제의 효능을 검사하는 데도 널리 사용되고 있다. 일례로 학습된 무기력(Learned helplessness) 이론을 활용한 포졸트 테스트(Porzolt test) 및 TST(Tail Suspension test) 등은 우울증의 연구와 치료제 개발에 필수적으로 사용된다. 이러한 분석방법은 생물의 행동을 관찰하고 해석하는 것이기 때문에 수많은 반복 수행을 통해 객관성을 확보해야 한다. 따라서 행동학적 분석에는 많은 시간과 노력의 투자가 필요할 뿐 아니라, 특정한 노하우와 섬세한 분석장치가 필요하다.

뇌 질환을 극복하기 위한 첫 걸음

뇌기능에 관여하는 유전자를 밝히고 이들이 작용하는 방식을 규명할 수 있다면 뇌기능 이상에서 비롯된 수많은 난치성 질환들을 예방하고 치료하는 데 도움이 될 것이다. 또한 개인의 유전정보를 바탕으로 맞춤형 치료를 통해 이들 질병들을 회피할 수 있는 길도 열릴 것이다.

뇌기능은 수많은 유전자와 신경 네트워크가 관여된 복잡한 과정을 거쳐서 이루어진다. 그러므로 주요 유전자의 발현조절 및 이에 따른 신경신호, 행동분석에 따라 뇌기능을 연구하거나, 뇌질환 환자의 유전자나 단백질의 발현분석을 통하여 뇌기능을 연구하는 방법이 가장 효율적이다.

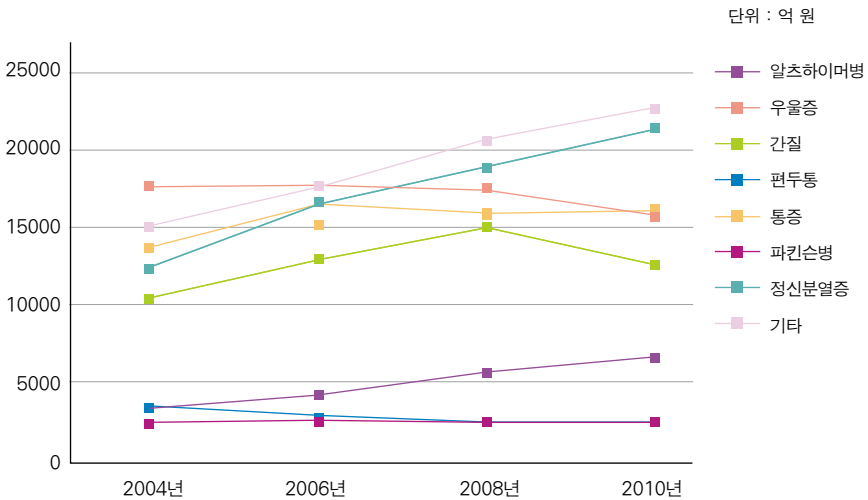
알츠하이머 질환의 경우 현재까지 695개의 유전자가 관여한다고 알려져 있으며, 관련성이 가장 많은 것으로 분석된 10개 유전자가 APOE_e2/3/4, BIN1, CLU, ABCA7, CR1, PICALM, MS4A6A, CD33, MS4A4E와 CD2AP이다. 이들 유전자 중 일부에 이상이 발생하면 질환에 걸릴 확률이 높아지나 반드시 발병하는 것은 아니다. 대표적인 예로, 유전적으로 질환에 취약한 일란성 쌍둥이가 같은 발병률을 가질 확률이 약 50% 정도라고 한다.

유전자가 완전히 동일한 두 개체가 질병에 걸릴 확률에 큰 차이가 있다는 사실은 결국 유전자 외에도 환경적 요인이 질병의 발병여부를 결정함을 보여준다. 이를 반영하여 최근에는 환경적인 요인으로 유전자 서열이 바뀌지 않아도 유전자의 발현이 조절되는 기전을 연구하는 후성유전학(Epigenetics)이 최근 인기를 얻고 있다. 궁극적으로

유전자의 발현과 뇌기능의 관계는 단편적으로 모인 수많은 결과들을 시스템적인 분석을 통해 유추할 수 있을 것이다.

뇌기능의 이상으로 발병한 뇌질환은 사망률은 낮고 생존기간이 길어 국가경제 및 건강한 사회 구현에 큰 장애로 여겨지고 있는 선진국형 질환이다. 뇌질환은 시간이 갈수록 증가하는 추세인데다 미래사회에서 과학이 수행할 중요한 역할로 '건강하고 안전한 사회 구현'이 있는 만큼 뇌 관련 연구의 중요성은 지속적으로 커질 것이다. 따라서 뇌기능 연구에 대한 투자를 늘린다면 뇌질환의 예방과 치료에 필요한 원천기술을 선점함으로써 국가성장동력을 창출할 수도 있을 것이다.

뇌질환 의약품 산업 · 시장분석



정신질환 치료와 관련된 시장 규모는 전체적으로 점점 커지고 있다. 특히 알츠하이머, 편두통 등 고령령화에 따른 노인성 질환에 대한 수요는 지속적으로 증가하고 있다. 한국은 노령화가 급속히 진행되는 편인 만큼 해당 질환에 대한 수요가 폭발적으로 증가할 것으로 예측된다.

The CNS (Central Nervous System) Market Outlook to 2010, Heath ('05)

광유전학, 뇌 속을 밝히다

이창준(기능커넥톰믹스 연구단)

아름답게 별이 빛나는 밤하늘. 우리는 별들이 저마다 반짝이는 빛으로 제 위치를 알려주는 덕분에 별이 총총한 밤하늘을 볼 수 있다. 별빛은 위치만 알려주는 것이 아니다. 별빛을 분석하면 별이 어디에 있고 온도가 어느 정도인지, 다른 별이 옆에 있는지 수많은 정보를 알 수 있다.

먼 우주의 별 뿐 아니라 생명체의 몸 속을 들여다보는 데도 빛은 쓰임새가 많다. 빛 자극의 파장에 따라 각각 다른 신경세포가 반응하기 때문이다. 이 성질을 반대로 이용하면 특정 파장의 빛을 이용하여 신경세포 활동을 조절함으로써 뇌의 기능을 살펴볼 수 있다. 이를 응용한 연구분야를 '광유전학'이라고 한다.

광유전학은 2005년 미국 스탠포드 대학의 칼 다이서로스(Karl Deisseroth) 교수가 개발한 분야다. 이어 KIST WCI(World Class Institute)의 센터장을 맡고 있는 조지 어거스틴(George



사람의 두뇌활동은 빛에 큰 영향을 받는다. 대표적인 예가 가을이나 겨울마다 찾아오는 불청객, 계절성 우울증이다. 계절성 우울증은 일조량과 밀접한 연관이 있다고 알려졌다.

Augustine) 박사는 광유전적 탐침 유전자가 들어있는 형질전환 생쥐(Optogenetic mouse)를 제작하는데 성공했다.

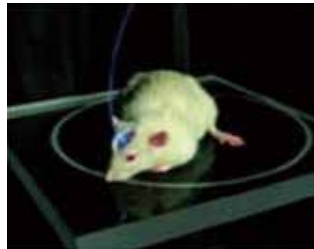
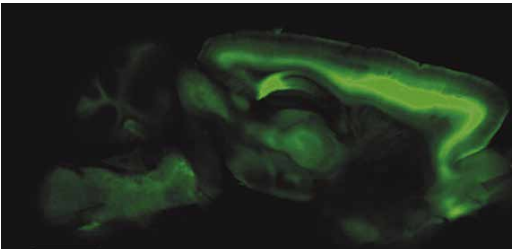
하지만 뇌 기능을 밝히기에 알맞은 형질전환 생쥐를 개발하는 것은 만만치 않은 일이다. 생쥐를 비롯한 다른 동물의 신경세포는 뇌 속 깊은 곳에서 나오는 빛에만 반응하는 특성이 있기 때문이다. 그렇다고 뇌 속에 뇌세포가 반응할 정도로 강력한 전구를 넣는 것도 곤란하다. 따라서 다른 방법이 필요하다.

어거스틴 박사가 생각해 낸 것은, 보통 빛에도 잘 반응하는 다른 단백질 유전자를 실험동물의 신경세포에 넣는 방법이었다. 어거스틴 박사는 ‘채널로돕신2(Channelrhodopsin2)’이라는 단백질의 유전자를 선택했다. 채널로돕신2는 빛에 따라 문을 열고 닫아 이온들이 세포 안으로 이동하는 것을 조절하는 역할을 한다. 이 유전자를 이용한 형질전환 생쥐를 이용하면 동물의 운동과 행동을 조절할 수 있다. 뇌의 회로를 분석하는 연구도 수월해졌다.

광유전학이 KIST를 만났을 때

KIST 기능커넥토믹스 연구단에서는 이런 광유전학을 이용해 뇌 기

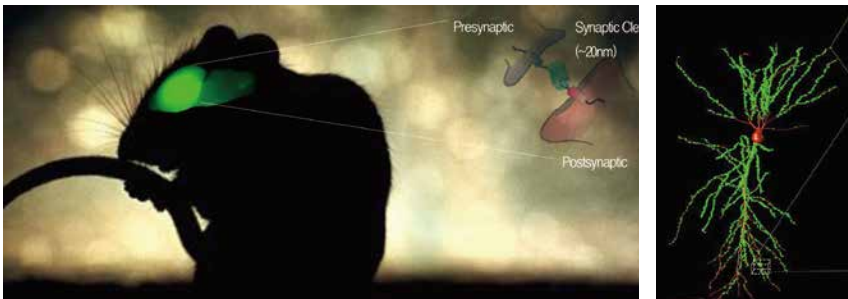
광유전 형질전환 생쥐의 뇌절편(좌). 광자극을 이용하여 생쥐의 행동을 조절할 수 있다(우).

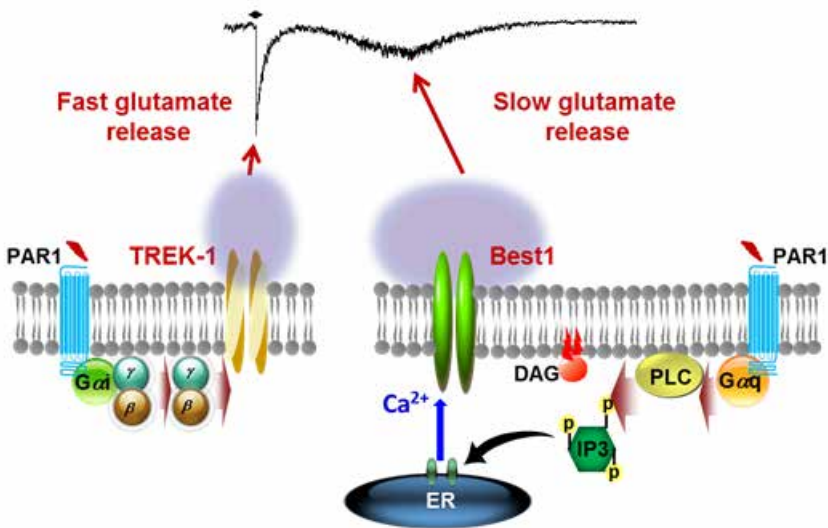


능의 비밀을 하나 둘씩 풀어가는 일을 하고 있다. 최근에는 뇌가 공간에 관한 정보를 얻는 원리를 밝혀냈다. 이 연구가 있기 전에 과학자들은 뇌가 어떻게 공간에 관한 정보를 얻는지 잘 알지 못했다. 과학자들이 아는 사실은 뇌의 해마에 '장소세포(Place cell)'라는 신경세포가 존재하고, 이 세포를 통해서 공간정보를 얻을 수 있다는 것 정도였다. 그리고 이 장소세포의 활성을 다양한 억제성 신경세포들이 억누르고 있다는 것까지도 알았지만, 이 억제성 신경세포가 각각 어떤 방법으로 장소세포의 활성을 막을 수 있는지에 대한 구체적인 역할과 조절 방법은 전혀 밝혀지지 않았다.

과학자들은 이 억제성 신경세포의 역할을 알아내고자 노력해왔다. KIST의 세바스찬 로이어(Sebastien Royer) 박사와 김진현 박사도 그들 중 하나였다. 세바스찬 로이어 박사와 김진현 박사는 하위드휴즈의학연구소와 공동으로 연구를 진행했다. 공동 연구팀은 실험동물 훈련장치인 '트레드밀'과 이 광유전학 기법을 이용한 결과, 억제성 신경세포의 역할을 규명하는데 성공했고 뇌가 공간정보를 습득하는 원리를 찾을 수 있었다. 연구 결과는 지난해 5월 25일 과학학술지 '네

mGRASP를 이용하여 시냅스구조를 쉽게 찾아낼 수 있었다.





성상교세포의 글루타메이트 분비 기전

이치뉴로사이언스'에 발표했다.

또 KIST WCI센터의 김진현 박사팀은 광학현미경으로 살아있는 시냅스 구조를 쉽게 찾아낼 수 있는 획기적인 방법인 'mGRASP (mammalian GFP Reconstitution Across Synaptic Partners)' 기술을 개발해냈다. 시냅스의 간격은 약 20nm 정도밖에 되지 않는다. 그래서 지금까지는 시냅스 구조 간의 연결 가능성과 통계학적 특성을 고해상도 전자현미경 데이터로 연구해 왔다. 하지만 최첨단 전자현미경을 사용하더라도 이런 방법은 시간이 많이 걸린다. 또 한 번 측정할 수 있는 양도 적다는 문제가 있다.

김진현 박사팀이 이런 문제를 해결하기 위해 선택한 방법 역시 광유전학이었다. 김진현 박사팀은 생명공학계에서 널리 쓰이는 녹색형광물질(GFP)을 두 분자로 쪼개서 나눈 것을 이용했다. 녹색형광물질

을 반으로 쪼개면 평소에는 형광빛을 내지 않는다. 하지만 이 물질끼리 가까워지면 신기하게도 다시 형광빛을 내뿜는 성질이 있다. 형광빛이 나는지를 보면 어떤 신경세포가 신호를 내고, 어떤 신경세포와 신호를 받는지 쉽게 찾을 수 있는 것이다. 특히 두 세포 사이의 간격이 20nm로 될 때만 형광빛을 뿜는 신기한 분자를 만들어내 시냅스 구조를 더욱 쉽게 찾을 수 있게 되었다.

광유전학은 비단 신경세포 사이의 상호작용을 알아내는 것에 그치지 않는다. 위에서 설명한 mGRASP 방법으로 신경세포(Neuron)와 신경세포가 아닌 다른 뇌 세포(아교세포, Glia)의 관계를 찾아낸 연구 결과도 있다. 지난 1990년대부터 신경세포와 아교세포가 서로 상호작용을 한다는 것은 공공연한 사실이다. 또 최근에는 뇌의 기능이 신경세포와 아교세포 간의 공동활동 때문에 생긴다는 연구 결과도 속속 발표되고 있다.

그렇다면 신경세포와 아교세포는 어떻게 상호작용할 수 있는 것일까? 지금 알려진 바로는 시냅스에서 신경전달물질(Nt: Neurotransmitters)이 나올 때 칼슘이온(Ca^{2+})의 농도가 높아지는데, 이 농도 변화에 아교세포가 반응한다는 것이다. 이때 아교세포는 별도의 신경전달물질(Gt: Gliotransmitters)을 내보내 다시 신경세포의 흥분과 신호전달을 통제할 수 있다.

놀랍게도 최근 개발된 mGRASP 방법을 이용하면 이런 모든 화학작용을 영상으로 보여줄 수 있다. 그동안의 뇌 연구는 신경세포에만 머물러 왔는데 아교세포로 연구의 지평이 넓어졌다는데 이 연구의 의의가 있다. 이들 세포는 각각 흥분성물질과 억제성물질을 분비해 인체의 기능을 조절한다. 만약 이들 신경전달물질의 조화와 균형이 깨진

다면 인체는 여러 신경관련 증상이나 질환에 시달리게 된다.

억제성물질의 대표적인 예로 '가바(GABA)'라는 것이 있다. KIST의 이창준 박사팀은 가바 중에서도 지속성 가바(Tonic GABA)가 분비되는 근원이 소뇌에 있는 아교세포 중 하나인 버그만글리아(Bergmann glia) 세포라는 것을 알아냈다. 또 이 세포에 존재하는 특정 음이온 채널인 베스트로핀(Bestrophin)을 통해 가바가 분비된다는 사실도 추가로 밝혔다.

뿐만 아니라 아교세포 중 성상교세포(Astrocyte)의 글루타메이트가 서로 다른 두 가지 이온통로인 트렉1(TREK-1)과 베스트로핀을 통해서 각각 빠르고 느린 형태로 분비된다는 사실도 전기생리학적 실험(Electrophysiology)과 면역조직화학적 방법을 통해 찾아냈다.

위에서 설명한 연구 결과에서 알 수 있듯이, KIST 기능커넥토믹스 연구단의 현재 기술 수준은 세계의 어느 연구그룹보다 뛰어나다. 내년에는 아교세포에다 빛에 반응하는 단백질 유전자를 넣은 형질전환 생쥐를 개발하는 것이 목표다. 이 또한 세계수준을 앞서는 연구결과일 것이다.

광유전학, 뇌의 신비를 넘어서

광유전학의 역할은 뇌의 기능을 밝히는 것에 그치지 않는다. 광유전학을 이용하면 근육의 수축을 조절할 수도 있다. 근육은 두 종류의 근섬유로 구성된다. 한 근섬유는 작고 느리며 피로에 내성이 있고, 다른 하나는 크고 빠르다. 힘을 주면 작은 근섬유가 먼저 활성화되고, 큰 근섬유는 순간적인 힘과 속도를 위해 기다린다. 즉, 작은 근섬유에서 큰 근섬유 순서로 반응이 일어나는 것이다.

광유전학 기술을 적용할 때도 근섬유는 이런 정상적인 활성을 보인다. 작은 섬유가 먼저 활성화되고, 다음 긴 섬유가 반응하는 것이다. 이 연구를 주도한 미국 스탠포드대의 스콧 델프(Scott Delp) 교수는 “적절한 자극으로 운동신경섬유의 자연적인 작동순서를 복구할 수 있었는데, 이는 매우 중요한 진전”이라고 연구의 의의를 말했다.

지금까지는 운동기능이 손상되면 전기 자극을 이용해 복구하려는 연구들이 주를 이루었다. 하지만 전기 자극을 이용하는 경우에는 큰 섬유가 작은 섬유보다 먼저 반응해 문제를 일으켰던 것이다. 이 광기술은 손상된 근육의 능력을 복구하는 데도 쓰일 수 있을 것으로 기대된다.

또 빛의 강도를 바꾸면 작은 섬유만을 활성화 시킬 수도 있다. 이를 통해 빛으로 신경세포를 조절한다면, 신경세포 손상으로 장애를 겪고 있는 중풍, 척추손상 등의 환자에게 적용할 수 있을 것으로 기대하고 있다. 만약 장기적으로 빛에 민감한 단백질 유전자를 안전하게 삽입할 수 있는 기술이 개발되면, 임상적용의 가능성도 그만큼 높아질 것이다.

광유전학 기술은 시력장애인들의 시력 회복에도 응용될 수 있다. 미국 웨일 코넬 의대의 셰일라 니렌버그(Sheila Nirenberg) 박사팀은 2010년 11월 인공망막을 개발하는 데 성공했다. 눈 먼 쥐에게 이 인공망막을 이식하자, 쥐가 이미지를 볼 수 있게 된 것이다. 사람이나 동물의 얼굴에서부터 센트럴파크의 복잡한 파노라마까지 이미지의 크기나 종류에도 한계가 없었다. 이 인공망막은 외과수술이 필요하지 않다는 장점도 있다. 미래에는 이 기술을 사람에게도 적용해, 시력을 찾아 줄 수 있을 것으로 기대한다.

건강수명 연장의 핵심, 건강기능식품

노주원(기능성 천연물센터)

세계적인 불황 속에서도 높은 성장률을 자랑하는 시장이 있다. 바로 건강기능식품 시장이다. 건강기능식품이란 인체에 이로운 기능을 지닌 원료나 성분을 정제나 캡슐, 분말, 과립, 액상, 환 등의 형태로 제조 가공한 식품을 말한다. 국내에서는 식품의약품안전처가 기능성과 안전성을 인증한 제품만 ‘건강기능식품’이라는 문구와 마크를 허용하고 있으며, 이는 나라마다 규정이 조금씩 달라 기능성식품(Functional food), 영양보조식품(Dietary supplement), 뉴트라슈티컬(Nutraceutical) 등의 여러 용어로 불리고 있다.

2010년 NBJ(Nutrition Business Journal)의 보고에 따르면, 세계 건강기능식품 시장은 지난 2000년에는 1,435억 달러 규모였지만 2008년에는 2,697억 달러 시장 규모로 성장했다. 불과 8년 사이에 시장 규모가 2배 이상 늘어난 것이다. 이런 추세라면 세계 건강기능식품 시장은 2014년도에는 그 규모가 3,973억 달러 정도일 것이다.

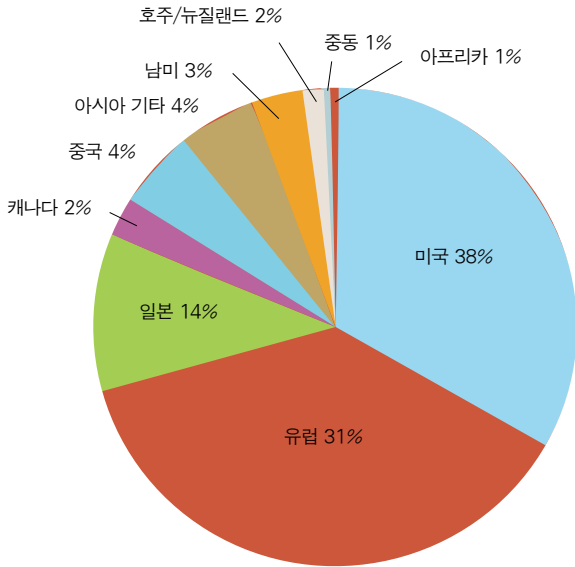


백화점 건강기능식품 매장에서 소비자들이 상품을 비교해보고 있다. 식품의약품안전청에서 2012년 분석한 결과에 따르면, 건강기능식품 시장은 2004년 2,506억 원에서 2011년 1조3,682억 원 규모로 4.5배 성장했다.

국내 시장도 세계적 추세와 크게 다르지 않다. 국내 건강기능식품 시장은 해가 갈수록 그 규모가 커져서 지금은 우리 주위에서 건강기능식품을 흔히 볼 수 있을 정도다. 건강기능식품은 명절 선물로 갈비, 굴비의 뒤를 이을 정도로 큰 인기를 얻고 있다.

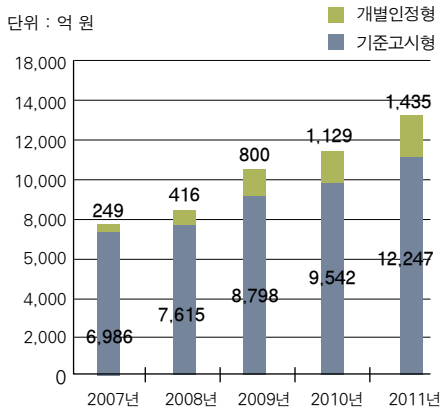
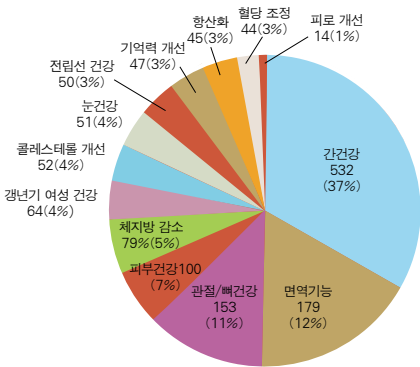
이렇게 건강기능식품이 인기를 끄는 이유는 무엇일까. 아마도 건강기능식품이 건강을 향상시키고, 질병의 발생 위험을 줄일 것이라고 생각하기 때문일 것이다. 우리 사회가 초고령화 시대에 접어들면서 노인성 만성질환 등이 날이 갈수록 증가하고 있다. 이에 따라 의료비 부담도 높아지고 있어, 사람들은 아예 질병이 발생하기 전에 질병을 예방하는 데 더 신경을 쓰고 있는 것이다.

2010년 국가별 건강기능식품 시장현황 (전체 2,697억 달러 규모)



건강기능식품 분류별 생산현황

건강기능식품 세부품목별 생산현황



건강기능식품 생산실적 분석, 식품의약품안전청, 2012

어떤 건강기능식품이 가장 인기 있을까?

건강기능식품 시장의 규모가 커지며 점점 다양한 기능을 가진 제품을 개발하려는 움직임이 활발하다. 일본, 미국, 유럽 등에서는 노화억제, 장수, 안전, 건강수명 연장과 관련된 식품을 만들기 위해 식품생명공학 기술을 새로 개발하고 있다. 생명공학의 첨단 기술을 식품분야와 연관시키는 것은 물론 식품나노기술도 적극적으로 이용하고 있다.

최근 국내에서는 개별인정형 제품이 많이 나오고 있다. 2012년의 식약청 조사에 따르면, 2011년도에 개별인정형 제품의 시장 규모는 전년보다 27.1% 성장한 1,435억 원인데, 이중 생산액 1위는 간 건강제품(532억 원)인 것으로 나타났다. 면역기능에 도움을 주는 제품(179억 원)과 관절, 뼈 건강 제품(153억 원)이 그 뒤를 이었다.

또 국내 대기업들은 색다른 원료를 개발해 이런 개별인정형 제품을 만들려는 노력도 하고 있다. 만일 기존에 존재하는 원료가 가지고 있지 않은 치료효능을 가진 새 원료가 발견된다면 신규 시장을 창출할 수 있기 때문이다.

건강기능식품의 원료를 발굴하기 위해서는 보통 천연물을 대상으로 연구한다. 건강기능식품은 의약품과는 달리 환자를 대상으로 개발하는 것이 아니고, 보통 사람이 질병예방 목적으로 섭취하게 되므로 상대적으로 독성이 낮고 부작용이 없어야 하는 특성이 있어서다.

KIST, 새 건강기능식품을 개발하다

KIST 기능성천연물센터에서도 새 원료를 찾아 개별인정형 제품을 개발하기 위해 노력하고 있다. 그중 대표적인 성과는 간 기능개선 원

료로 이고들빼기를 새로 찾은 것이다. KIST 기능성천연물센터에서는 우선 전통 산채류 200여 종을 대상으로 간 기능개선 원료를 찾아보기로 했다. 앞에서 설명한 것처럼, 여러 건강기능식품 중 간 기능개선과 관련된 건강기능식품이 가장 큰 인기를 끌고 있기 때문이다.

여러 실험을 거친 결과, 200여 종 중 이고들빼기, 곰취, 참쑥, 벌개미취가 각각 간 기능 개선에 효과가 있는 것으로 나타났다. 1차로 선발한 네 종을 다시 만성 알콜성 간 손상 동물모델을 이용해 수차례의 검증을 거쳤다. 그 결과 이고들빼기를 간 기능개선 원료로 최종 선정하였다. 이고들빼기 추출물(75mg/kg)을 만성 알콜성 간손상을 앓고 있는 동물모델에게 4주 동안 투여한 뒤 간 기능 지표들과 항산화 지표들을 알아본 결과 간 기능 회복에 탁월한 효과를 나타낸 것이다.

KIST 기능성천연물센터에서 발굴한 이고들빼기 기능성원료는 2010년 국내 기업인 알리코제약(주)에 1억 5천만 원에 기술이 이전되었다. 현재는 이고들빼기를 이용해 임상시험이 진행 중이며, 임상시험을 마치면 식품의약품안전처에 간 기능개선용 개별인정형 기능성원료로 신청할 예정이다.

국내 건강기능식품의 미래를 위한 노력

이런 노력에도 불구하고 현재 국내 건강기능식품 개발 기술은 아직 미국, 일본 등이 보유한 기술에 미치지 못한다. 현재 최고기술을 가진 선진국과 대비했을 때 60~70% 정도되는 수준으로, 기술 격차가 무려 6년 정도 난다.

농림축산수산식품부 기술기획평가원에서는 이런 기술격차를 좁히기 위한 노력을 계속 기울이고 있다. 하지만 정부의 육성 정책 및 연구비

투자와 맞물려 있어 단기간에 극복하기는 어려울 것으로 보인다.
 또 국내 건강기능식품 산업의 시장성도 선진국과 비교하면 열악하다
 는 문제도 있다. 국내 건강기능식품산업은 매출 상위 10개사의 시장
 점유율이 전체시장의 약 90%를 차지하고, 나머지 중소기업이 차지
 하는 비중은 매우 작다. 이는 제도적인 문제에서 비롯된 것이다. 우
 리나라의 경우 정부의 철저한 검증절차를 통과해서 승인을 받아야만
 산업화가 가능한 '기능성원료 허가제'를 채택하고 있다. 반면 미국과
 같은 선진국에서는 개발 및 생산주체인 기업이 정부에 신고만 하면
 시장에 제품을 출시할 수 있는 '기능성원료 신고제'를 채택하고 있다.

④ 식품기능성 탐색 및 발굴 기술별 기술수준과 격차 (단위 :%, 년)

핵심요소기술	현 재		5년 후	
	기술수준	기술격차	기술수준	기술격차
유용성분의 안정성 및 생체이용률 증진 기술	59.3	6.7	80.4	3.4
화학 식품첨가물 대체용 천연 식품소재 개발	64.7	6.4	83.8	2.9
일반식품 내에서의 생리활성 성분변화 및 화학작용 연구	62.4	5.8	82.9	3.0
유전체에 따른 체내 대사조절 및 질병과 관련성 규명	60.4	6.6	81.9	3.5
기능성식품 종합정보센터 및 식품성분 자료은행 구축	60.9	6.0	99.2	3.0
친환경 유기가공 식품 개발	63.3	6.5	84.5	3.2
질병예방 식품 개발	60.8	6.8	82.1	3.5
향산화 식품 개발	66.7	5.8	85.8	2.6
노화방지 식품 개발	62.5	6.4	81.5	3.3
디톡스 식품 개발	64.2	5.5	85.4	2.8
식사대용 소형 간편식 초고압축 식품 개발	66.5	5.2	85.7	2.5



미국 등 선진국과 한국의 건강기능식품 기술은 격차가 크다. GNC와 같은 브랜드는 개인에 따라 맞춤형 서비스를 제공할 정도로 기술력과 노하우를 축적했다.

우리나라의 경우, 국민건강의 안전성을 지킬 수 있다는 측면에서는 바람직하다고 볼 수도 있지만, 건강기능식품을 연구개발하고 산업화시키는 데는 장애 요인으로 작용하고 있다.

대신 정부는 국내 연구결과와 활용도를 높이고, 조기에 시장에 진입할 수 있도록 지원을 아끼지 않고 있다. 이 지원의 예로, 2009년부터 시작한 '건강기능식품 제품화 기술컨설팅 사업'이 있다. 이 사업은 기술단계분석 협의체를 운영하여 소재탐색부터 제품화까지 기관별, 원료별로 건강기능식품 인정에 필요한 핵심기술을 맞춤형으로 컨설팅 해주는 것으로, 건강기능식품 개발의 길라잡이 역할을 톡톡히 해내고 있다.

또한 최근 농림수산식품부는 건강기능식품을 미래 식품산업의 꽃으

로 만들기 위하여 새로운 식품산업진흥계획을 발표하였다. 2010년 2조 원이던 시장을 2017년까지 4조 원의 시장으로 육성시키겠다는 계획이다. 이를 현실로 만들기 위해 우선 2015년까지 전라북도 익산에 239만m²나 되는 수출지향형 국가식품전문산업단지를 조성하기로 했다. 여기에 든 비용이 총 5,535억 원이나 된다. 이런 노력이 계속 이어진다면 언젠가는 우리 건강기능식품 관련 기술과 시장도 크게 성장할 수 있을 것이다.

Human Computer Interaction



Part 2

컴퓨터와 인간생활, HCI



전망 5 사람과 컴퓨터의 2인 3각, HCI 기술

전망 6 정교한 외과의사, 컴퓨터

전망 7 로봇이 되찾아 준 다리

전망 8 스포츠 과학과 가상현실

전망 9 현실과 가상의 상생, 휴먼 인터랙션

전망 10 바이오로보틱스

전망 11 안전한 삶을 위한 스마트 광센서

Intro 컴퓨터와 인간생활의 융합

HCI(Human Computer Interaction)기술이란 컴퓨터와 이를 사용하는 사람이 어떻게 상호작용하는지를 연구하고, 이를 구현하기 위한 시스템을 설계하고 제작하여 실생활에 적용하는 기술을 말한다.

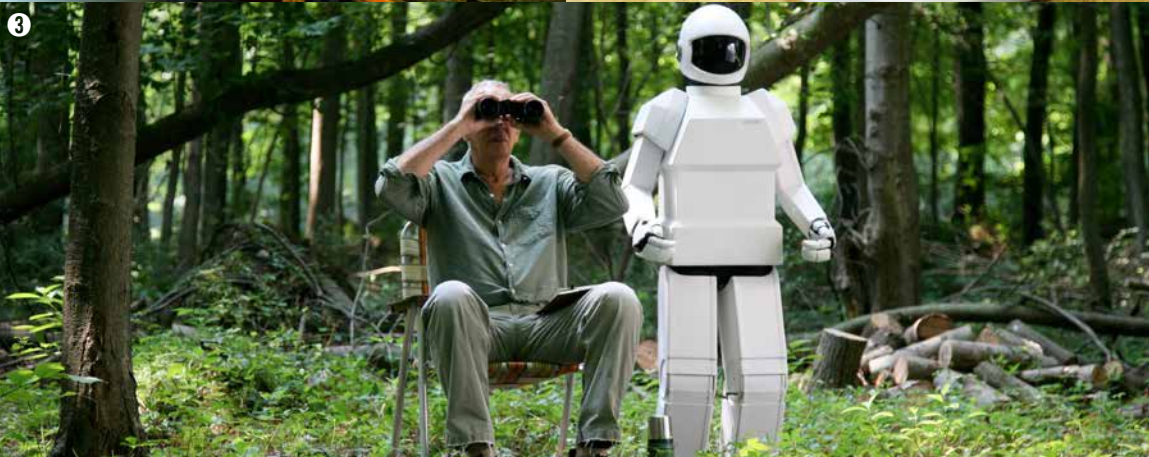


기술 발전에 따라 인간과 기계는 점점 더 가까워지고 있다.

초기의 HCI 기술은 키보드, 모니터, 마우스, 스피커 등 컴퓨터와 인간이 1대1로 상호작용하는 기술에 초점이 맞추어졌다. 초소형 프로세서 및 센서가 개발되고, 초고속 무선 네트워크 기술이 발전하고, 모든 사물에 컴퓨터 기술이 적용되어 언제 어디서나 인간과 컴퓨터가 교류할 수 있는 유비쿼터스 컴퓨팅이란 개념이 나오면서, HCI기술은 생활의 모든 분야에서 적용되는 기술로 발전하고 있다. 이 경우, HCI 기술의 대상은 단순한 컴퓨터 뿐 아니라 유비쿼터스 환경, 생활기기, 인간형 로봇 등으로 확대되어야 한다.

KIST는 1990년대 말부터 HCI기술을 5대중점연구분야 중 하나로 정하고 다양한 연구를 진행해 왔다. 그 결과로 2010년부터는 교과부의 글로벌프론티어 사업인 “현실과 가상의 통합을 위한 인체감응솔루션”과제를 주관하여 추진하게 되었다. HCI의 기술을 우리의 일상생활에 적용하여 일상생활을 더욱 편리하게 하려는 과제로, 현실과 가상세계가 결합되어 우리의 일상생활을 어떻게 변화시킬지를 예측하고, 이를 위한 서비스를 개발하고, 이에 대비한 핵심원천기술을 확보하기 위한 과제이다. 이 과제 이외에 HCI의 기술을 의료분야와 스포츠과학분야에 적용하는 연구도 추진중이다. 의료분야에서의 HCI 기술 적용은 최근 10여년간 괄목할 만한 성장을 해왔다. 컴퓨터를 이용한 수술지원기술, 재활로봇기술, 바이오로봇기술이 대표적이다.

HCI기술을 스포츠과학에 접목하는 기술은 스크린 골프에서 보듯이 이미 보편화되었다. KIST에서는 이를 더욱 발전시켜 전문적인 스포츠 선수들을 훈련시킬 수 있는 시스템으로 발전시키려는 노력을 하고 있다. KIST에서는 또한 HCI기술의 기반이 되는 지능형 센서 시스템에 대한 연구도 진행하고 있다. 센싱소자와 지능형 신호처리기능



로봇을 이해하는 서로 다른 키워드. 예전의 로봇은 묵묵히 작업을 수행하는 산업현장의 일꾼 이미지가 강했다. ❶ 그러나 최근에는 로봇의 기능이 다양해지고 사람과의 상호작용도 강화되면서 노인요양, 자폐증 치료 등에도 로봇이 활용되기 시작하고 있다. ❷ 로봇을 바라보는 시선 역시 <로봇 앤 프랭크> 등의 영화에서와 같이 일상 생활에서 사람과 교감하는 동반자라는 묘사가 점차 늘어나고 있다. ❸ 사람들이 친숙하게 느낄 수 있을 정도로 로봇 기술이 발전했기 때문일 것이다.

이 결합되어 데이터 처리가 자동으로 되고 의사결정까지 가능하게 하는 기술로, 전자정보기기, 자동차, 로봇, 의료기기, 스마트 인프라 등 융·복합 제품의 경쟁력 확보를 위한 핵심 기술로 평가되고 있다. 삶의 질 향상에 대한 사회적 요구가 더욱 커지고, IT 기술이 지속적으로 발전하면 인간의 생활 형태를 바꾸는 새로운 기술이 개발되고, 이에 따른 HCI기술의 새로운 시장이 확대될 것이다. KIST에서는 이에 대비한 원천기술을 개발하고, 국가 연구개발의 거점으로서의 역할을 수행하며, 공공성이 높은 기술을 개발하여 국가의 다양한 계층의 요구에 부응하는 연구를 수행할 것이다.

사람과 컴퓨터의 2인 3각, HCI 기술

박세형(바이오닉스 연구단)

HCI(Human Computer Interaction) 기술이란 컴퓨터와 이를 사용하는 사람이 어떻게 상호작용하는지를 연구하고, 이를 구현하기 위한 시스템을 설계·제작해 실생활에 적용하는 기술을 말한다.

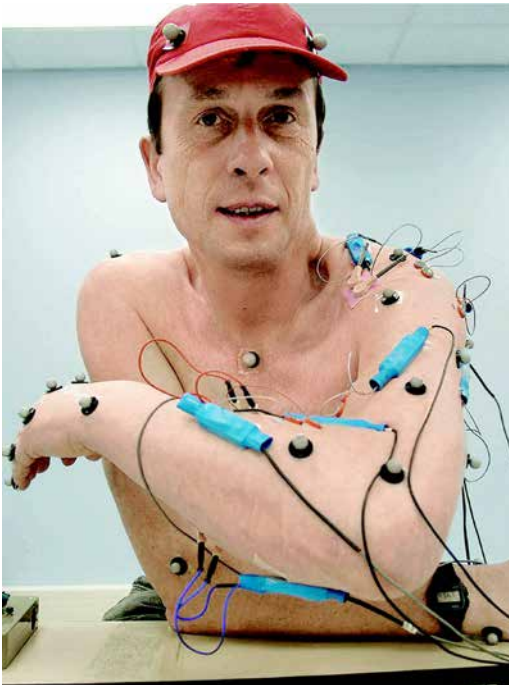
초기의 HCI 기술은 키보드, 모니터 등 컴퓨터와 인간이 1대1로 상호작용하는 주변장치 개발에 초점이 맞추어졌다. 그러나 초고속 무선 네트워크 기술이 발전하고, 모든 사물에 컴퓨터 기술이 적용돼 언제 어디서나 인간과 컴퓨터가 교류할 수 있는 '유비쿼터스' 개념이 등장하며 HCI는 생활 전반으로 확대됐다.

HCI 기술은 컴퓨터 및 주변장치, 임베디드 시스템(Imbedded system), 통신, 네트워크, 인터페이스 방법, 인간공학, 가상현실, 디지털콘텐츠 등 상당히 넓은 범위를 포함한다. 이러한 요소기술들은 그 하나하나가 커다란 기술 분야이기 때문에, HCI 기술은 이러한 요소기술들을 활용한 거대한 시스템으로 접근하는 것이 바람직하다.

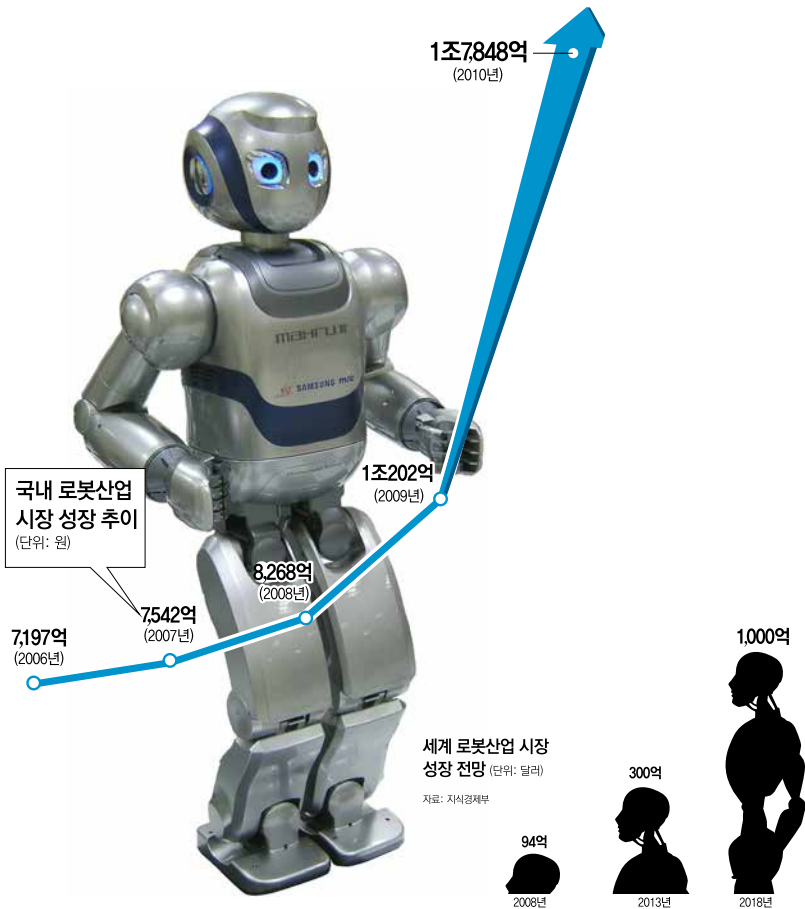
향후에는 앞으로의 요소기술 발전과 IT환경의 패러다임 변화를 예측하여 새로운 응용방안을 모색하는 것이 핵심이 될 것이다.

지난 수십 년간 그러했듯이, 향후 10년간 IT환경은 양적으로 더 크게 확대될 것으로 예측되고 있다. 인터넷 사용자는 2010년 17억 명에서 2020년 50억 명(NSF), 휴대폰 이용자는 2010년 46억 명에서 2020년 75억 명으로 증가하며 휴대폰 보급률은 64%에서 94%로 증가할 것으로 예측된다(Portio Research). 1인당 평균 보유 데이터 양도 2010년 128GB에서 2020년 130TB로 상상을 초월하게 늘어날 것으로 보인다 (Cisco IBSG).

스마트폰, 인터넷과 마찬가지로 개인용 로봇의 시장도 활성화될 전

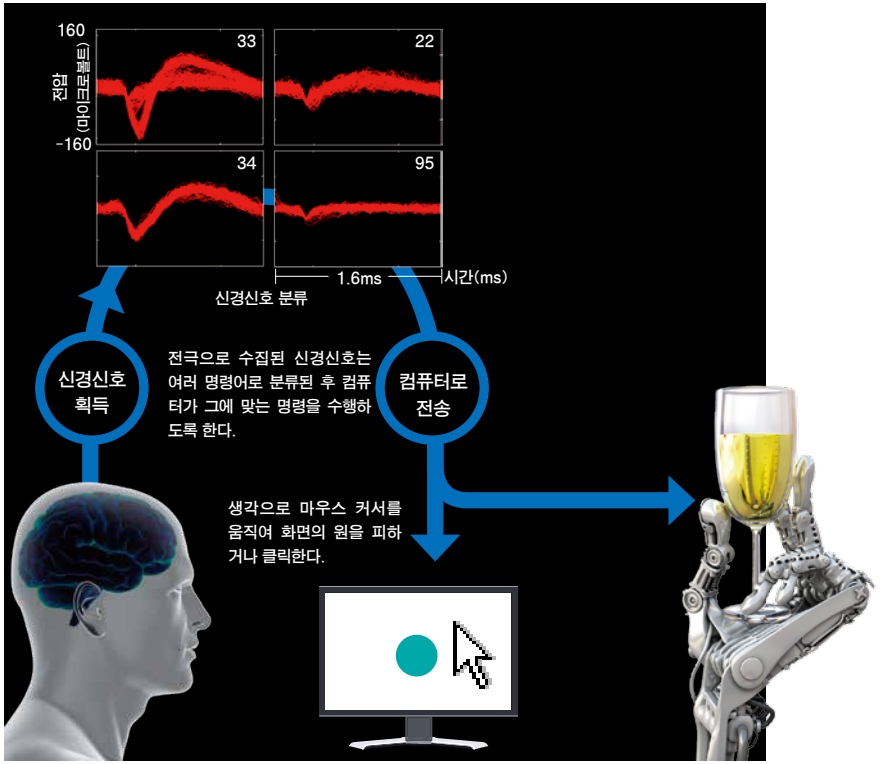


인간은 단순히 도구를 이용하는 수준에 그치지 않을 것이다. 인간은 기계를 몸의 일부로 자유로이 다룰 수 있게 될 것이다. 자기 팔의 신경에 칩을 이식해 사이보그 실험을 한 영국 레딩대의 케빈 워릭 교수.



망이다. 리서치 기관인 '넥스젠(Nextgen)'이 발표한 보고서에 따르면, 개인 로봇은 2008년 전 세계적으로 883만 대 이상이 판매된 바 있다. 또 2015년까지 2,500만 대를 넘어설 것으로 전망된다.

앞으로 HCI 기술은 가사, 여가, 의료, 국방, 환경 등 우리 일상생활의 모든 분야에서 활용될 것이다. 단순한 인터페이스 기술의 개발을 넘어서, IT기술이 앞으로 우리의 생활을 어떻게 바꿀지를 예측하고, 이에 따른 새로운 패러다임의 서비스와 인터랙션 기술을 동시에 개발하



생각으로 로봇을 움직이는 메커니즘

여야한다. 애플의 아이폰과 아이패드가 단기간에 성공한 것은 이러한 IT 수요의 변화를 예측하고, 인간이 편리하게 사용할 수 있도록 인터랙션 기술과 서비스를 개발했기 때문이다.

HCI 기술이 궁극적으로는 인간을 편리하고 안전하게 해주는데 쓰이는 기술이라는 관점에서, 새로운 기술이 인간에게 육체적으로나 정서적으로 미치는 영향에 대한 연구도 필요하다. 소셜네트워크를 통한 교감과 함께, 정보보안, 윤리적인 문제들도 검토가 되어야할 것이다.

정교한 외과의사, 컴퓨터

이득희 · 권규현(바이오닉스 연구단)

현대의 수술실은 첨단 과학 기술과 의학 지식의 집합체이다. 새로운 수술도구, 모니터링 시스템, 영상장비, 정보시스템, 통신시스템 등 첨단 기술이 속속 도입되고 있으며, 정보기술의 발달 덕분에 그 속도도 더욱 빨라지고 있다. 미국에서는 원격시스템 및 수술 로봇 등을 통하여 수술실의 개념을 원격지까지 확대하는 연구가 활발히 진행 중이다. 또 일본, 유럽 등에서는 복잡한 수술 과정을 쉽게 통제할 수 있도록 도와주는 환경 구축 및 의료 로봇과 관련된 연구들을 진행하고 있다. 이러한 연구 분야를 ‘컴퓨터를 이용한 수술지원 기술(Computer aided surgery 또는 Computer assisted surgical system)’이라 한다.

컴퓨터를 이용한 수술지원 기술은 크게 의료진의 손발이 되어 주는 수술로봇기술, 수술을 가이드하는 내비게이션 기술, 수술의 흐름을 통제하고 의료진의 의사결정을 도와주는 정보화 기술, 로봇과 사람



컴퓨터와 로봇은 이미 수술실에서 광범위하게 이용되고 있다. 극도로 정밀하고 정확한 조작이 가능하여 수술 위험과 부작용을 최소화할 수 있기 때문이다. 연세대학교 세브란스 병원의 경우, 로봇팔 수술을 2005년 시작한 후 2012년까지 8,000건의 수술을 수행했을 정도다.

· 사람과 사람의 협업을 가능하게 하는 원격 협업기술로 나눌 수 있다. 이러한 기술과 기존에 사용하던 시스템 및 수술 도구들이 유기적으로 엮여져서 미래의 새로운 수술환경이 구축된다. 수술지원 기술 연구는 수술의 효과를 극대화하며 환자의 안전을 보장하고 의료진의 수술 스트레스를 줄이는 것뿐 아니라, 병원 전반에 걸친 경영 효율까지 제고하는 것을 지향하고 있다.

수술로봇, '정교한 외과의사'로 거듭날 수 있을까

외과적 수술은 19세기 초반에 들어서야 본격적으로 시행될 수 있었다. 출혈, 고통, 감염의 문제를 해결할 소작술, 수혈법, 마취법, 소독 및 멸균법 등이 그 때서야 개발됐기 때문이다. 20세기 말에는 소형

수술방법의 발전

The diagram illustrates the evolution of surgical methods through four stages, each represented by a human torso showing the surgical approach:

- 1 일반 수술 (Open Surgery):** Shows a large vertical incision on the chest.
- 2 복강경 수술 (Thoracoscopic Surgery):** Shows four small circular incisions on the chest.
- 3 싱글포트 복강경 수술 (Single-port Laparoscopic Surgery):** Shows a single small circular incision on the chest.
- 4 노트 수술 (NOTES - Natural Orifice Transluminal Endoscopic Surgery):** Shows a long, thin tube inserted through the mouth into the abdominal cavity, with internal organs like the stomach and liver visible.

1 일반 수술
환자의 몸 정중앙을 길게 자른다. 흉골과 복근 근육 등을 연 다음, 장기에 접근해 수술한다. 수술 후 장기 입원이 필요하다.

2 복강경 수술
다빈치 로봇 수술 방식과 같다. 몸에 4~6개의 구멍을 뚫고, 여기로 다양한 도구를 집어넣어 수술한다. 일반 수술방식에 비해 몸에 부담이 적다. 2~3주면 퇴원이 가능하다.

3 싱글포트 복강경 수술
배꼽아래 하나의 구멍만 뚫어 치료한다. 싱글포트 수술을 할 수 있는 로봇은 아직 없어 사람이 손재주로 해결해야 한다. 수술에 성공하면 배꼽아래 흉터 하나만 남는다. 봉합에 신경을 쓴다면 흉터가 눈에 거의 띄지 않는 수술을 할 수 있다.

4 노트 수술
내시경을 목구멍, 항문 등에 집어넣고 수술한다. 길으로 상처가 전혀 생기지 않는다. 복강경 수술과 비교해도 회복속도가 2배 빠르다. 간, 소장, 췌장 등 내시경이 닿지 않는 장기를 수술할 때는 위나 대장을 또 한번 뚫고 나와 수술해야 하므로 특실을 고려해야 한다.

카메라 기술이 개발되면서, 피부에 3~4개의 작은 구멍을 뚫는 것으로 끝나는 최소 침습수술이 가능해졌다. 피부절개에 따른 환자의 출혈, 고통, 감염 문제를 획기적으로 줄인 순간이다. 하지만 최소 침습 수술 역시 많은 문제를 안고 있다. 시야가 제한적이고 간접적이며 긴 수술 도구의 지렛대 효과 등으로 인해 시행하는 의사들에게 직관적이지 못하며, 수술의 효율을 떨어뜨리는 문제가 그것이다.

최근 등장한 수술로봇은 이러한 문제들을 해결하고자 개발됐다. 현재 임상에서는 정형외과의 인공관절치환로봇인 우리나라의 ROBODOC과 미국의 MAKOpasty, 복강경 수술로봇으로 쓰이는 미국의 da Vinci System, 역시 미국에서 개발돼 방사선 수술에 나선 CyberKnife 등이 활약 중이다. 수술로봇은 의사의 피로를 줄여주고 정교한 조작이 가능하다는 점에서 앞으로의 시장 전망도 밝다.

그러나 현재의 수술로봇은 단순히 의사를 보조하는 수단에 머물러 있다. 높은 비용에 비해 휴대성과 이동성이 턱없이 부족한 한계점도 무시할 수 없다. 심지어 로봇수술이 수기로 행하는 최소 침습수술에 비해 효과적인가 하는 논쟁도 이어지는 실정이다. 이러한 논쟁을 피하기 위해서는 수술로봇이 의사의 손으로는 할 수 없는 별개의 작업을 수행할 수 있을 정도로 발전해야 한다. 로봇만이 가질 수 있는 정밀함, 정확성, 강인함, 좁은 영역에서의 높은 조작성, 재현 반복성 등을 살려야함은 물론이다.

이를 위해서는 정밀한 로봇 조작 기술과 함께 고해상도 영상 가이드 기술, 최적 수술 계획 기술, 안전성 향상 기술의 개발이 뒷받침돼야 한다. KIST에서는 직경 3mm이하로 가늘면서도 충분한 강성을 가지는 능동 조향형 바늘 로봇 기술과, 다중 모달리티 의료 영상 가이드

● 수술로봇의 이점 및 한계점

이점	한계점
<ul style="list-style-type: none"> • 의사의 손떨림 제거 • 비디오카메라를 통한 3차원 스테레오 영상 표시 • 손동작 확대/축소 기능을 통한 정밀 시술 가능 • 피로 감소 • 정밀 반복성 • 수술의 어려움 감소 • 최소 침습수술에 있어서 도구 조작의 정교함 향상 • x-ray나 MRI 장치 내에서의 조작이 가능함. 	<ul style="list-style-type: none"> • 다루기 어려움 • 비용 과다 • 휴대성, 이동성이 나쁨 • 특정 도구들만 사용할 수 있음

기술, 그리고 시뮬레이션 기반 수술계획 기술을 연구하는 한편 이를 통합한 정밀 미세수술 지원 로봇 시스템을 개발하고 있다.

“다음 혈관에서 우회전하세요”, 수술실에도 내비게이터가?

최소 침습수술 시 의사가 카메라 좌표계를 기준으로 수술도구를 조작하는 것은 직관적이지 못하다. 이를 해결하기 위하여 등장한 기술이 환자의 병변에 대한 수술도구의 상대적인 위치 및 자세를 추적하여 의사에게 알려주는 수술 내비게이션 기술이다. ‘내비게이션’이라는 이름 그대로, 자동차 안에 필수로 장착된 카 내비게이션과 역할뿐 아니라 담고 있는 콘텐츠마저 비슷하다.

카 내비게이션에서는 우선 자동차가 다닐 공간의 지리 정보와 지도가 필요하다. 수술 내비게이션의 경우, 환자의 인체 내부 정보를 알 수 있는 수술 전 의료영상이 이에 해당한다. 자동차가 다니게 되는 실제 공간은 수술 도구를 삽입하게 되는 환자와, 실공간상에서 현재

자동차의 실시간 위치를 추적하는 일은 수술도구의 위치를 실시간 추적하는 것과 같다. 결국 카 내비게이션이 자동차를 목적지까지 최적경로로 도달할 수 있게 가이드하는 것을 목적으로 한다면 수술 내비게이션은 수술 도구가 목표 병변까지 최적의 경로로 접근할 수 있도록 가이드하는 것이 목적이라고 할 수 있다.

현재 임상에 쓰이는 수술 내비게이션 시스템은 크게 뇌수술을 위한 ‘스테레오 택틱 프레임(Stereo-tactic frames)’과 정형외과용 ‘CAOS (Computer-Assisted Orthopedic Surgery) 시스템’이 있다. 수술 내비게이션은 의사의 눈을 대신해 좀 더 명확하고 직관적인 수술 경로를 안내하지만, 부가 침습 장치를 부착하는 과정에서 환자에게 신체적 부담을 지우고 이 과정에서 수술 시간도 늘어나는 단점이 있다. 환자를 시술 전 영상에 등록하는 과정에서 윈트겐을 사용하기 때문에 방사선 피폭 문제도 야기한다.

수술 내비게이션이 임상적으로 의미를 갖고 제대로 사용되려면 침습을 줄여 환자의 부담을 줄이는 한편 방사선 이용을 없애고 더욱 정밀한 가이드가 가능한 방향으로 발전해야 한다. KIST는 현재 환자 얼굴의 3차원 스캔 데이터와 수술 전 영상 사이의 위치 정합을 이용하는 비침습 무마커 환자-영상 등록 방법을 개발하고 있다. 수술 도구의 끝 점을 실시간으로 추적하기 위하여 2차원으로 이뤄진 내시경 영상을 통해 끝 점의 3차원 자세를 감지하는 기술도 함께 개발중이다.

표준과 소통이 우선, 그 다음은 통제

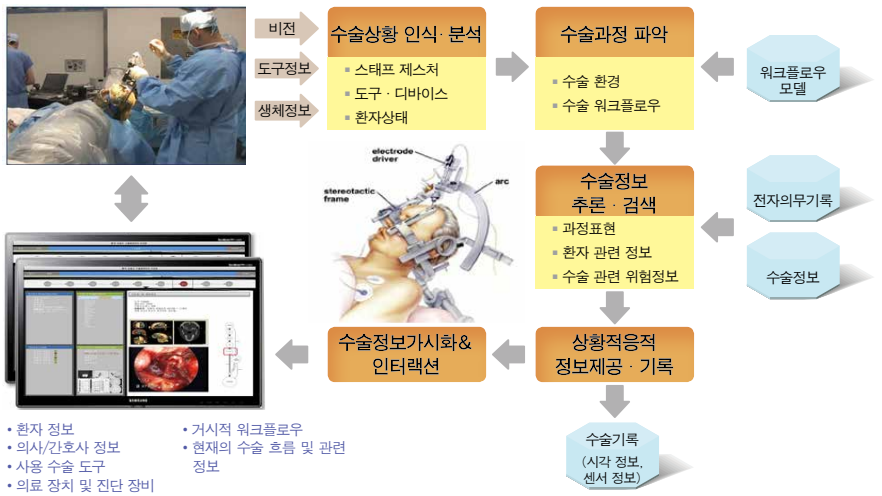
위험한 수술 상황에서의 정보 제공은 환자의 안전을 위협하는 극단적인 상황을 피할 수 있도록 해주며, 수술 관계자의 스트레스를 줄

여 올바른 상황판단을 할 수 있게 하는 중요한 요소이다. 정보기술의 발전으로 복잡하고 평행적인 수술의 전 과정을 모델링할 수 있을 뿐만 아니라 컴퓨터 비전 등을 통해 수술 과정을 실시간으로 파악하고 수술의 전후 변화를 유추할 수 있게 됐다. 독일 뮌헨공대에서는 수술 부위의 영상을 추적하여 수술의 단계를 자동으로 예측하고 증강현실 기술 등을 이용하여 수술가이드를 제공해 주는 연구를 진행 중이다. 또 일본 도쿄여자대에서는 사회 기술적 관점에서 수술통제실을 구축하는 연구를 서두르고 있다.

거시적 차원의 수술상황통제는 여러 개의 수술실을 운용하는 병원에서 특히 중요하다. 주요 관계자의 이동 여부, 수술 도구 및 측정 도구의 자원 관리, 수술실의 스케줄링 등 효율적 자원배치를 통해 병원 경영효율을 극대화하고 환자의 대기시간을 줄임으로써 만족도도 높일 수 있다. KIST에서도 상황의 인식을 통한 수술지원 시스템 기술 등을 특허로 출원중이다.

수술과정을 효과적으로 통제하기 위해서는 수술 프로세스에 대한 모델링이 선행되어야 한다. 수술 프로세스 모델링은 수술의 정확한 과정을 파악하고 환경으로부터 오는 동적 정보를 축적하여 지식으로 변환해 수술 위험을 예측·예방하는 과정을 포함한다. 이런 정보를 구조, 표준화해 의미 있는 지식으로 만들어 가는 과정을 ‘수술정보학’이라 부른다.

기존의 의료시스템에서 정보학은 환자 중심의 EMR(Electric Medical Records)에 초점이 맞추어져 있었다. 그러나 수술실에서는 기존 EMR의 의료적 속성과 더불어 수술 중 일어날 수 있는 비상상황에 대비한 정보가 필수 요소다. 즉 재난통제나 군사작전 등과 같이



KIST CASE(Context Aware Surgical Environment) 기본 개요

유사한 비상상황과 이 때 이루어지는 대처 작업을 분석해, 이들이 사용하는 태스크적 속성을 고려한 형태로 정보가 확장되어야 한다. 또 수술실 고유의 용어 및 언어를 표준화하고 각 기기들 사이의 통신 프로토콜 역시 규격으로 맞춰 조직과 기기 사이의 소통을 원활하게 이뤄갈 필요가 있다. 사용하고 있는 데이터의 표준화를 통하여 수술 기기들 사이의 정보호환이 가능해야함은 물론이다. 수술실의 정보화는 시스템 구축뿐만 아니라 협업과 원격 수술의 전제조건 중 하나이기도 하다.

연구에서 맞춘 호흡, 수술에서도 척척

로봇 기술이 무르익으면 원격 진료는 물론, 원격 치료도 가능해질 것이다. 장소에 구애받지 않고 안전하게 수술할 수 있는 환경이야말로

수술지원기술의 최종 목표다.

컴퓨터기반 수술지원의 궁극적 목표는 의사와 환자가 서로 떨어져 있더라도, 환자와 같이 있는 로봇이나 간호사 등과 협업해 함께 수술할 수 있는 원격 환경의 구현이다. 원격지에서의 협업은 수술정보 학이 베이스가 되어야 함은 물론, 움직임의 정합이나 이미지 전송 등 ‘호흡을 맞추는’ 방법에 대한 선행 연구가 필요하다. 제한된 채널과 미디어에서 공존감 향상, 인지적 제한이나 편향 극복 등 정보기술을 넘은 방대하고 융합적인 연구 역시 해결해야 할 우선과제다.

컴퓨터기반 수술환경에서는 로봇틱스, 인공지능, 컴퓨터 그래픽스, 컴퓨터 비전기술 등 현재 존재하는 거의 모든 IT 관련 기술들을 활용하고 있다. 최근 들어서는 새로운 로봇 매커니즘의 개발 및 클라우드 컴퓨팅을 포함한 새로운 환경의 활용을 통하여 기존의 영역을 확



로봇 기술이 무르익으면 원격 진료뿐 아니라 원격 치료도 가능해질 것이다. 장소에 구애받지 않고 안전하게 수술할 수 있는 환경이야말로 수술지원기술의 최종 목표다.

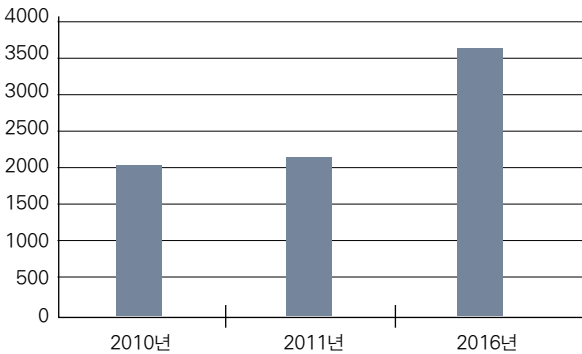
장하고 있다. 대상 수술의 종류도 더욱 다양해지고 있으며, 더 높은 정밀도와 더 정확한 정보의 이용을 통하여 환자 안전성을 높이고 수술 효율도 극대화하는 것이 목표다. 이에 따라 보다 다양한 형태의 컴퓨터 기반 수술 지원시스템에 대한 시장의 요구가 커지는 한편 의료장비 시장에서의 비중 역시 늘어나고 있다. 지식경제부의 연구 자료에 의하면 앞으로 의료장비 산업의 약 50% 이상이 의료로봇 및 의료정보 관련이 될 것으로 추정된다. 또 영국 국영방송 BBC의 리서치 결과에 따르면 향후 관련시장 성장률은 약 11.1%에 달한다.

단 '목숨'을 다루는 분야라는 점에서 걸림돌 아닌 걸림돌은 존재한다. 의료기기는 식약청 등 각 정부 기관에서 승인 및 허가가 필요하다. 특히 수술 등의 위험한 상황에서 사용되는 의료기기는 시장에서 보수적으로 받아들이는 경향이 있다. 그러므로 연구의 시작 단계에서부터 의료기관과의 유기적 협력이 필수적이며, 의학계의 요구사항에 대한 철저한 사전 분석이 요구된다.

수술로봇 및 컴퓨터 지원 수술환경 시장 전망

BBC Research , September, 2011

단위 : 백만 달러



로봇이 되찾아 준 다리

김창환 · 박성기(바이오톨닉스 연구단)

2012년 봄, 런던마라톤에 참여한 선수 중 유난히 많은 박수를 받은 이가 있다. 땀방울을 흘리면서 달리는 그녀의 얼굴은 여느 선수와 다를 바가 없었으나, 목 아래의 몸은 남들과 다른 점이 뚜렷했다. 허리 아래부터 다리 전체를 지탱하는 보조 기구와 양팔에서부터 손끝까지 연결된 ‘지팡이’가 그것이다. 등쪽에 달린 거대한 ‘컴퓨터’도 눈길을 끌었다. 당시 32세였던 그녀의 이름은 클레어 로마스(Claire Lomas). 2007년 승마 사고로 하지 마비 판정을 받은 후, 보행보조 로봇을 착용하고 기어이 결승점을 통과한 그녀는 가족의 환호 속에 얼굴 가득 환한 웃음을 띠뜨렸다. 같은 상황에 처한 장애인 동료들에게 헛살 같은 희망이 내리쬐는 순간이었다.

출신은 다르지만 마음은 하나, “장애인을 도와라”

클레어가 착용한 로봇은 이스라엘의 아르고 사가 제작한 ‘리워크



클레어 로머스 씨가 로봇다리를 장착하고 16일 동안의 힘겨운 레이스를 펼친 끝에 8일 영국 런던 마라톤대회 결승선을 통과하며 환하게 웃고 있다. 뒤에 선 이는 남편 댄 스파이서 씨.

(ReWalk™). 리워크는 2000년대부터 본격적으로 개발되기 시작한 장애인용 보행보조 로봇의 대표적인 상용화 가능 모델이다. 리워크 외에도 미국의 ‘엑소(Ekso™)’와 일본의 ‘할(HAL™)’이 상용화에 가장 근접한 보행보조 로봇으로 알려져 있다.

이들의 기본 사양은 상당히 유사하다. 보행보조 로봇은 하지측면 외부에서 지지하는 지지대, 엉덩이와 무릎 관절의 구동기, 그리고 등 혹은 허리에 장착된 배터리 및 운동제어용 컴퓨터 모듈로 구성된다. 20kg 내외의 무게가 사용자에게 부담을 주지 않도록 발목과 신발까지 구조적으로 연결돼 있다. 세 제품 다 구동관절의 운동 정보를 얻기 위한 부호기(Encoder)와 지면과의 반력을 측정해 발 디딤 여부를 판단하는 센서(Foot force sensor)가 공통으로 달려 있다.

다른 점은 상체의 움직임을 측정하는 방법이다. 리워크는 상체의 기울기를 측정하는 틸트 센서를 사용하는 반면 엑소는 무게 중심 이동까지 함께 알 수 있는 IMU 센서를 사용한다. 할은 여기에 피부 표면의 미세 전기신호를 측정할 수 있는 센서를 추가해 사용자의 의도까지 알아낼 수 있다. 보행 속도는 세 로봇 모두 정상인의 평균 속도인 3km/h 수준이며, 150~190cm 키에 100kg 이내의 성인용으로 개발됐다.

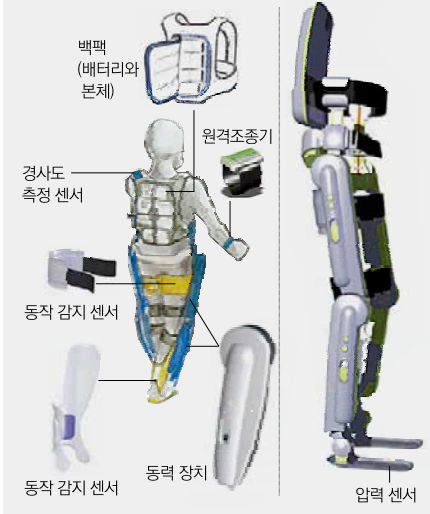
근육과 전기신호로 움직임 미리 읽는다

공통점이 많지만 세세한 부분까지 들여다 보면 세 로봇 다 개성이 뚜렷하다. 리워크의 사용자는 손목에 착용하는 무선통신제어기로 보행, 앉기, 계단 오르내리기 모드를 선택할 수 있다. 엉덩이와 무릎 관절에 장착된 네 개의 서브 모터는 백팩형 운동제어기로 제어된다. 가

로봇 기본 사양 비교

항목			
모델명	ReWalk™	Ekso™	HAL™
제조사(국가)	Argo Medical Technologies (이스라엘)	Ekso Bionics(미국)	Cyberdyne(일본)
적용 대상	상지기능을 가진 하지마비 장애인	상지기능을 가진 하지마비 장애인	뇌졸중/SCI 환자 근력저하 고령자
무게	18kg	20kg	15kg
목발 등 사용여부	사용	사용	사용
보행 최대속도	3km/h	3.2km/h	1.8km/h(평균속도)
센서 종류	Tilt sensor Foot force sensor Encoder	Encoder IMU Force sensor	Encoder Foot force sensor EMG
자유도	4개(골반 2, 무릎 2)	8개(골반 4, 무릎 2, 발목 2)	10개(골반 6, 무릎 2, 발목 2)
모터수	4개(골반 2, 무릎 2)	4개(골반 2, 무릎 2)	4개(골반 2, 무릎 2)
작동시간	8시간	6시간	2시간 40분
가능 동작	직선보행, 의자 앉기/일어서기, 계단 오르내리기, 경사로보행	직선보행, 의자 앉기/일어서기	의자 앉기/일어서기, 계단 오르내리기
미 FDA 승인	승인(재활용으로 반드시 물리치료사 동행 조건)	승인(재활용으로 반드시 물리치료사 동행 조건)	미승인(미국FDA 미신청, 네덜란드·스웨덴 진출 진행 중)
판매(대여)가격	\$71,000(판매)	\$100,000(판매)	\$2,200/월(대여)
기타	ReWalk-P(임상용) ReWalk-I(개인용)	임상용, 개인용	정상인용, 임상용(HAL 5-C)

로봇다리 '리워크'



ReWalk 기본 구조

장 큰 특징은 어깨끈에 부착된 틸트 센서다. 틸트 센서는 사용자가 윗몸을 어떻게 움직이는지를 파악해 이동하려는 방향으로 몸의 균형을 잡을 수 있도록 돕는다. 센서가 감지한 움직임은 관절 구동기로 전달돼 제대로 발을 내딛을 수 있게 된다. 상체를 다시 앞으로 이동할 경우 마찬가지로 센서가 움직임을 파악해 반대쪽 관절 모터를 움직인다. 이 과정이 이어지면 연속 보행이 가능하다.

엑소는 단계별 보행 훈련을 위해 세 가지 모드를 제공하는 점이 특징이다. 퍼스트스텝(FirstStep) 모드를 선택할 경우, 물리치료사가 휴대용 제어기의 버튼을 눌러 사용자의 발 디딤을 제어한다. 의자에서 일어나서 목발을 사용하여 한 발씩 걷는 연습을 위한 최초 사용 모드다. 액티브 스텝(ActiveStep) 모드는 사용자가 목발에 있는 버튼을 누르고 모터를 작동시켜 스스로 걸을 수 있다. 마지막으로 프로 스텝(ProStep) 모드는 사용자의 몸이 앞과 옆으로 이동하는 움직임을 IMU센서가 읽어 다음 발을 디딜 수 있도록 한다.

셋 중 가장 '유니크'하다고 할 수 있는 제품은 할이다. 할은 사용자가 '걷겠다'는 마음을 먹을 경우, 뇌에서 신경을 통해 다리로 내려 보내는 미세한 전기신호의 변동을 파악한다. 골격근조직으로 흐른 전기신호는 피부 표면에 부착된 전극을 통해 측정된다. 뇌파를 측정하는

것과 유사한 방식이다. 할의 제어기는 측정된 전기신호의 변동량을 관절 모터의 움직임으로 변환해 사용자가 원하는 시점에 근력을 보조한다. 연속 보행의 경우 발 각 부분의 동작 의도를 파악하기 위해 발바닥에 장착된 센서로 지면 반력도 함께 측정한다.



HAL의 기본 구조

서로 다른 곳에서 출발해 한 점에서 만나다

각자의 특색처럼 보행로봇의 최초 개발 목표 역시 서로 다르다. 엑소의 시작은 UC버클리대의 카제루니 교수가 개발한 근력증강 로봇 ‘블릭스’다. 블릭스는 웨어러블 로봇으로 착용자의 모든 동작을 추적하고 근력을 높여 무거운 짐을 짊어지고도 장거리를 거뜰히 걸을 수 있게 해 준다. 블릭스가 하지마비 장애인의 걸음을 보조하는 로봇으로 탈바꿈한 형태가 엑소인 것이다. 장애인의 경우 엑소만이 아니라 보행 중 균형과 안정감을 유지하고 안전사고 예방을 위하여 목발이나 보행지지대를 함께 사용한다.

엑소는 2012년 2월 상용화 제품이 출시된 이후 미국 여러 재활병원에서 ‘베타테스트’가 진행 중이다. 단 적용 대상이 상체를 원활히 사용할 수 있는 하지마비 장애인으로 제한돼 실험 범위가 한정적인 것이 단점으로 꼽힌다.

할 역시 정상인의 근력 증강이 목표였다가 방향을 전환한 케이스다. 2000년대 초반 개발이 시작된 할은 2009년부터 하지마비 장애인과 고령자의 보행 재활용으로 사용됐다. 엑소와 마찬가지로 목발 등의 보조기를 사용하여 균형을 유지하며 상체를 어느 정도 움직일 수 있는 장애인에게 제한적으로 적용된다. 2012년부터 대형 병원에서 상용화 초기 모델의 테스트를 받고 있지만 아직 체계적인 임상 결과는 나오지 않은 상태이다. 할의 제작사는 상용화가 완료되면 북유럽 시장에 진출할 뜻을 밝힌 바 있다.

리워크는 다른 두 로봇과 달리 처음부터 ‘걸을 수 있는 휠체어’를 표방하며 하지마비 장애인용으로 개발됐다. 다른 로봇들보다 빠른 2006년에 시제품이 나왔으며 2010년부터는 이미 시장에서 판매 중

이다. 2012년에는 병원 내에서만 사용하되 사용 중 반드시 물리치료사나 운용자가 옆에 있는 조건으로 미국의 FDA승인까지 받았다. 리워크 역시 목발 등의 보조기가 반드시 필요하며, 상체를 움직일 수 있는 장애인으로 적용 대상이 제한돼 있다.

로봇이 걸어가는 길, 기술과 제도가 받쳐줘야

장애인용 편의설비를 아무리 확충한다고 하더라도 직접 걷는 것만 못할 것이다. 휠체어를 개선한다 한들 바퀴로 움직인다는 한계를 벗어날 수 없기 때문이다. 보행로봇은 휠체어의 자리를 훌륭하게 대체할 수 있을 것이다.

신경계 질환이나 사고가 늘어남에 따라 장애인 수 역시 과거에 비해 늘어나고 있다. 특히 항상 앉아서 생활해야하는 하지마비 장애인에게 보행보조 로봇은 휠체어를 대체할 획기적인 시스템이다. 하지마비 장애인이라면 누구나 품는 희망 사항은 상대방과 시선을 똑바로 맞추고 대화하는 것이다. 이 간절한 소망을 이루어줄 수 있는 방법은 현재로서는 보행보조 로봇밖에 없다. 병원에만 국한되어 있는 시장이 이후 개인용으로 이동할 것이라는 사실은 어찌 보면 자명한 일이다. 이를 지탱할 수 있는 지속적이고 장기적인 기술개발 역시 따라야 한다.

그렇다면 보행보조 로봇 시장의 전망은 어떠할까? 아직 정확한 보고서로 발표된 사례가 없어서 의료용 로봇이나 다른 보조로봇 시장을 바탕으로 추측할 수밖에 없다. 현재 약 1,000만 명으로 추산되는 휠체어 사용 환자가 모두 보행보조 로봇의 힘을 빌릴 것이라는 가정한다면 예상 시장 규모는 최소 약 10억 달러에서 최대 500억 달러에 이

른다.

이제 막 열리려는 시장이라는 점에서, 보행보조 로봇 제작사의 최우선 과제는 시장 선점과 초기 시장 확대다. 위에서 설명한 로봇 모두 병원 내에서의 사용 확대를 우선 순위로 삼고 있다. 높은 가격과 각 나라의료보건담당기관의 승인이 필수라는 현실적인 이유에서 비롯된 전략으로 볼 수 있다.

우리나라에서도 보행보조 로봇 시장에 조금씩 발을 디디고 있다. KIST에서는 뇌졸중으로 몸의 한쪽을 사용하기 어려운 반신마비 환자를 대상으로 보행보조 로봇을 개발 중이다. 신경이 살아있는 다리의 움직임은 측정해 마비된 다리의 움직임을 보조하는 외골격, 또는 웨어러블 형태 로봇이라는 점은 앞서 언급한 세 종과 유사하다.

그러나 KIST의 로봇은 리워크나 할과 달리 보행할 때 소모되는 기계 에너지의 일부를 회수, 저장할 수 있는 기능을 갖고 있다. 사람은 보행 중에 몸의 무게중심을 위아래로 움직이며 에너지를 소모하는데, 이 때 낭비되는 에너지의 일부를 회수했다가 다시 사용함으로써 에너지 효율을 높이는 것. 이를 위해 보행 패턴을 분석해 사용자의 움직임을 방해하지 않으면서 낭비되는 기계에너지만을 회수하는 기술도 함께 개발 중이다. 높은 에너지 효율과 함께 신경 마비 환자까지 사용할 수 있다는 점에서, KIST의 로봇은 다른 보행보조 로봇과는 또 다른 새로운 시장을 개척할 가능성이 높다.

리워크, 엑소, 할, 그리고 KIST 로봇 등이 생활 속에서 사용 가능한 개인용 보행보조 로봇으로 발전하기 위해서는 먼저 몇 가지 기술 문제를 해결해야한다. 어떤 경우에도 균형을 보장할 수 있는 균형 유지 기술, 상체를 사용하기 힘든 장애인에게도 적용 가능한 센서와 모터,



KIST에서 개발 중인 뇌졸중 환자를 위한 보행보조 로봇

더 작고 가벼운 하드웨어 등 넘어야 할 산은 많다. 개인이 사용하기에는 너무나 고가라는 점도 걸림돌이다. 가격 절감을 위한 개발사의 노력뿐 아니라 구매 혹은 임대 비용을 지원할 수 있는 제도적 뒷받침도 당연히 병행되어야 할 것이다. 기술과 제도가 제자리에서 서로 손을 맞잡았을 때, 수많은 ‘클레어’가 우리와 눈을 똑바로 맞추고 웃을 수 있으리라. 이제 장애인에게 새로운 길을 열어 줄 보행보조 로봇의 걸음걸음에 다시 한 번 주목할 차례다.

스포츠 과학과 가상현실

김진욱(영상미디어연구센터)

2012년 런던 올림픽 당시 우리나라 양궁 선수들의 활시위 하나하나를 가슴 졸이며 바라보던 기억이 생생하다. 선수들의 화려한 기술과 경쟁에 환호했고, 이후 기사를 통해 본 훈련 과정에 다시 한 번 놀랐다. 극도의 평정심을 유지하기 위해 무선 심박 측정기를 착용하고 가상현실을 이용한 프로그램으로 훈련했다는 것. 과학기술과의 접목을 통해 산업화한 현대 스포츠의 단면을 생생히 볼 수 있는 대목이다. 현재 스포츠는 단순한 체력 증진과 기술 습득을 넘어섰다. 현재의 핵심 키워드는 스포츠 과학, 스포츠 산업이며 양궁 선수들의 예시에서 보듯 가상현실이 핵심 역할을 하고 있고 그 트렌드를 이끌고 있다. 이 가운데 몰입형 디스플레이 기술, 휴먼 인터랙션 기술, 센서 입출력 기술, 가상 코칭 콘텐츠 등 몇 가지 사례는 특히 주목할 만하다.

가상 코칭 시스템으로 골프 기술 습득도 자유자재

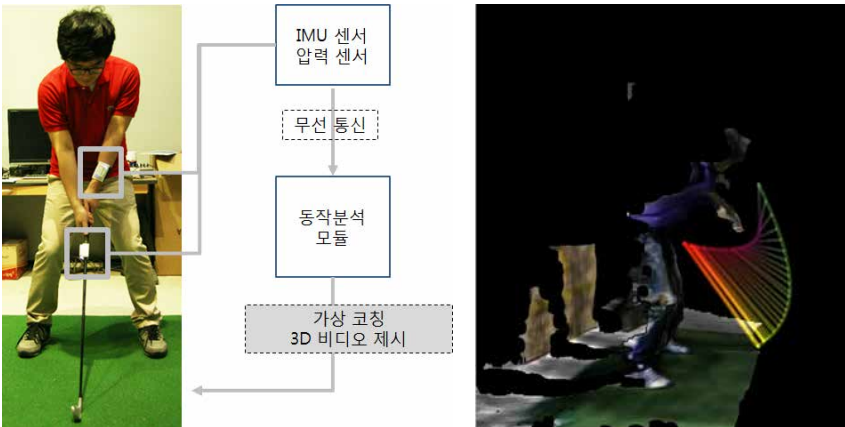
요즘 골프장에 가지 않아도 손쉽게 골프를 즐길 수 있는 '실내 골프장'이 큰 인기다. 실내 골프장에서 쓰이는 가상현실 골프 시뮬레이터는 골프공의 탄도를 측정하기 위한 센서 시스템, 게임 콘텐츠, 몰입형 디스플레이 기술 등의 총 집합체다. 가상현실 스포츠계의 대표 선수라고 해도 과언이 아니다. 우리나라 골프 선수들의 선전과 레저 문화의 확산이라는 시기적 호재, 관련 가상현실 기술의 성숙이 잘 맞아 떨어진 사례라 볼 수 있다. 앞으로의 가상골프 시뮬레이터는 골프공의 회전량까지 정밀하게 측정할 수 있는 센서, 무안경식 3D 디스플레이, 정교한 물리 시뮬레이션에 대한 기술 개발로 이어질 가능성이 높다.

가상 골프 시뮬레이터의 발전 방향을 제시하는 대표적인 예시가 최근 KIST에서 개발한 가상 코칭 시스템이다. 이 시스템은 크게 IMU(Inertial Measurement Unit)센서를 신체 주요 부위에 부착해 빠른 동작을 인식하는 센서 모듈, 사용자의 골프 스윙 기술을 계량화하고 잘못된 동작을 찾아내는 동작 분석 모듈, 효율적 코칭을 위한 레슨 콘텐츠 생성 모듈, 스윙 동작을 임의 각도에서 재생할 수 있는 3D 비디오 모듈로 구성돼 있다. 골프 선수의 동작을 분석하여 가상 코치(Virtual coach)가 원 포인트 레슨을 해주고 스윙 영상을 자유 시점 비디오로 제공해 고난도의 스포츠 기술을 더욱 효율적으로 습득할 수 있는 길을 제시하는 신개념 서비스다. 또 서비스가 상용화될 경우 골프를 넘어 전 스포츠 영역에 가상 코칭 시스템이라는 새로운 제품 및 시장을 창출할 가능성도 높다.

양방향 인터랙션으로 언제나 실감나는 계절 스포츠를

스노보드는 동절기 스키장에서만 즐길 수 있는 스포츠 종목이다. 계절과 장소의 제약이 있다는 점에서 골프와 마찬가지로 훈련, 레저 분야에서 가상현실 기술을 이용한 체험 시스템이 효과를 거둘 수 있다. 최근 KIST에서 개발한 체감형 스노보드 시뮬레이터의 핵심적 특징은 시스템과 사용자가 물리적 에너지를 주고받는 점이다. 이는 사용자가 일방적으로 시스템에 명령을 내리거나, 시스템이 일방적으로 사용자에게 운동감을 제시하는 기존 게임 및 영상 콘텐츠에서의 일방향 인터랙션(One-way interaction)방식에서 벗어난 것이다.

사용자가 자신의 동작을 기반으로 콘텐츠를 즐기면 시스템이 콘텐츠를 통해 다시 시각적 피드백과 운동감을 사용자에게 전달한다. 사용자와 시스템 간의 의도, 반응 및 동작이 폐루프(Closed loop)를 형성하는 양방향 인터랙션(Bidirectional interaction)이 완성되는 구조다. 휴대 가능한 모션 플랫폼을 기반으로 하고 있기 때문에 가정, 과





과천과학관에 전시중인
스노보드 시뮬레이터

학관 등 다양한 공간에 보급하기도 편리하다.

스노보드와 마찬가지로 스키 또한 동절기에만 즐길 수 있는 야외 스포츠다. 최근 미국의 '스카이테크스포츠(SkyTechSport)'에서는 다양한 센서를 이용해 사용자의 움직임을 분석하고 이를 가상 환경에 실시간으로 적용하는 스키 시뮬레이터를 개발했다. 이 시뮬레이터는 가상현실의 장점을 최대한 살린 무한 슬로프를 제공함으로써 실제 스키장보다 더욱 짜릿한 스포츠를 즐길 수 있게 한다. 또 최신 컴퓨터 그래픽으로 만들어 낸 현실감 넘치는 화면을 통해 사용자의 이질감을 최소화하고 콘텐츠에 몰입할 수 있게 했다. 가상 슬로프 위에 설치된 기문의 위치, 눈의 상태 등을 사용자가 정할 수 있는 등 스키를 더욱 실감나게 즐기기 위한 장치를 고루 갖춘 점도 특징이다. 하지만 좌우 양방향으로 고정된 트랙으로부터 발생하는 움직임에 대한 제약은 이 시스템이 극복해야 할 문제점이다.



SkyTechSport에서 개발된 스키 시뮬레이터

현장을 실제로 걷는 듯..., 전방위 트레드밀 시스템

골프, 스노보드, 스키 외에도 다양한 가상현실 기반 스포츠 콘텐츠가 연구, 개발되고 있다. 장소, 시간의 제약으로 인해 현실 세계에서 접하기 힘든 스포츠를 자신의 생각대로 무한히 즐기고 싶은 요구와 이를 구현할 수 있는 가상현실이라는 공간의 특성이 필연적으로 이루어낸 만남이다. 하지만 최근 연구되고 있는 가상 스포츠 시스템은 공통적으로 운동 범위의 제약으로 인해 사용자가 이질감을 느끼게 한다는 문제점을 안고 있다. 앞서 언급한 스카이테크스포츠의 스키 시뮬레이터가 대표적인 예다.

이러한 문제점을 극복하기 위한 시도도 끊임없이 이어지고 있다. 유럽연합(EU) 6차 프레임워크의 대형 연구 프로젝트인 '사이버 워크(CyberWalk)'가 좋은 예다. 사이버 워크는 2차원 대형 전방위

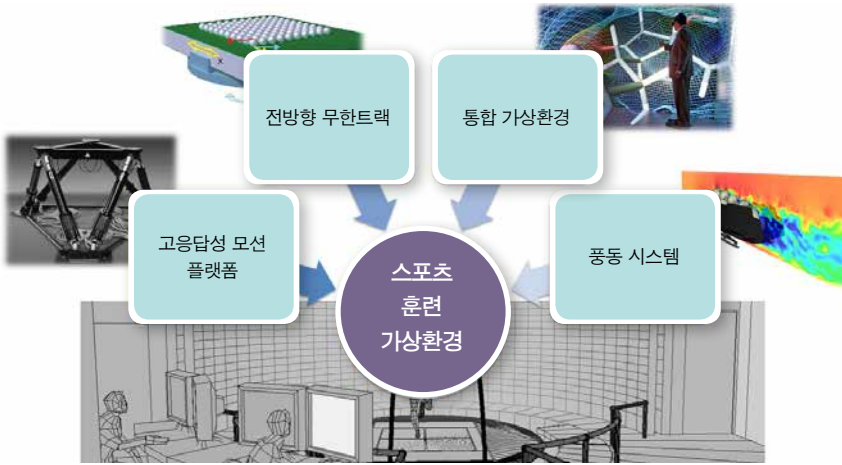


전방위 트레드밀 기반의
CyberWalk 시스템

(Omni-directional) 트레드밀에 기반한 보행 시스템을 통해 사용자 이동에 제약을 없었다. 또한 사용자가 계속 트레드밀의 중심에 있을 수 있도록 사용자의 속도와 방향에 따른 정교한 자동 트랙 조절 기술을 제공한다. 사용자의 안전을 유지하기 위해서다. 이렇게 사용자의 다양한 움직임을 제약 없이 확보할 수 있는 기술과 가상현실 기반 스포츠 콘텐츠가 접목된다면 더욱 다양한 콘텐츠를 제작, 제공할 수 있을 것이다.

선수를 위한 가상 훈련 시스템도 시급해

가상현실 기반 스포츠 콘텐츠가 가장 빛을 발하는 분야는 선수용 전문 훈련 시스템이다. 훈련을 거듭할수록 스포츠 기술이 향상되는 것



스포츠 훈련 가상환경 시스템 개요

은 자명한 이치다. 언제 어디서나 실제와 같은 환경에서 훈련할 수 있는 가상현실 시스템은 선수들의 훈련 시간을 확보하고 신체적 부담을 줄이는 장점을 자랑한다. 특히 평창올림픽이라는 큰 행사를 앞두고 있는 동계 스포츠계에는 도입이 시급하다 할 수 있다.

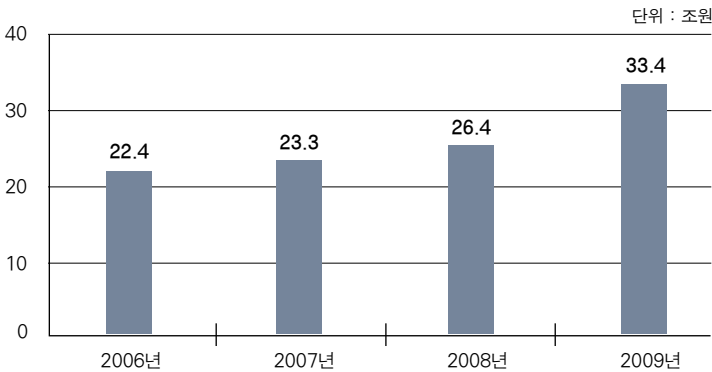
이를 위해서는 운동범위를 무한대로 확장시켜주는 전방향 무한 트랙, 고속 스포츠 동작에 반응하는 고응답성 모션 플랫폼, 정밀한 근 골격계 모션 트래킹 장치, 스포츠 환경을 재현하기 위한 풍동(Wind tunnel) 시스템, 몰입형 입체 디스플레이 등의 기술 획득이 선결 과제이다. 이 밖에도 운동능력 평가, 스포츠 재활 등을 위한 스포츠 콘텐츠 역시 필요하다.

앞으로 노동시간 감소와 삶의 질 향상 추구 트렌드에 발맞추어 스포츠 관련 장비나 서비스 산업이 급속하게 발전할 것으로 예상된다. 스포츠 산업 규모가 1988년 4.6조 원에서 2009년 33.4조 원으로 약

7.3배 성장한 점이 이를 뒷받침한다. 현재는 골프, 스키 등 일부 스포츠에서 활약하고 있는 가상현실 역시 기술 발전과 스포츠 인구 증가에 따라 향후 산업에서 차지하는 비중이 급속히 증가할 것으로 보인다.

그러나 국내 가상현실 스포츠 산업은 중소기업 위주이며 글로벌 브랜드와 경쟁하기에 기술적으로도 매우 취약하다. 정부 R&D 예산 역시 상대적으로 매우 부족한 현실이다. 미래 새로운 먹거리를 창출하고 스포츠 과학 강국으로서의 위상을 높이기 위해서 가상현실 기반의 다양한 스포츠 시뮬레이터를 개발하고 시장을 넓히기 위한 준비를 서둘러야 할 것이다.

국내 스포츠 산업 시장 규모(총매출액)



2011년도 스포츠산업 경영정보, 문화체육관광부, 2011

현실과 가상의 상생, 휴먼 인터랙션

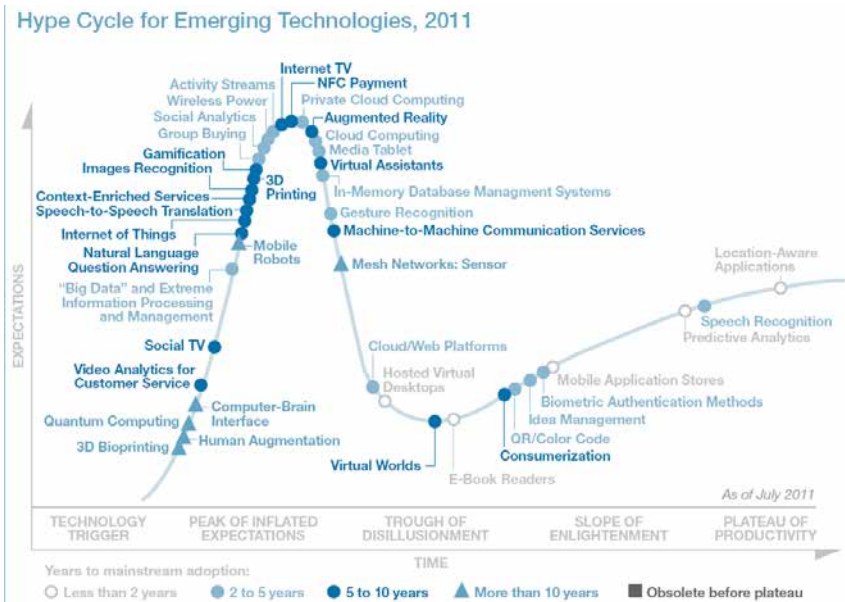
유범재 · 박정민
(실감교류로보틱스 연구센터)

1999년 개봉한 영화 ‘매트릭스’는 지금까지 경험하지 못한 가상현실에 대한 ‘가상체험’을 통해 많은 이들에게 깊은 인상과 화두를 남겼다. 10년이 지난 2009년, 제임스 카메론 감독의 영화 ‘아바타’는 가상현실 속의 ‘실제 인간’이 된 주인공과 이를 스크린 밖에서 지켜보는 사람의 삶을 뒤섞으며 현실과 가상의 구별이 모호해진 미래를 현재로 깊숙이 당겨왔다. 그리고 2013년 현재, 이제 매트릭스나 아바타 속 세상은 더 이상 스크린 속의 일만이 아니게 됐다. 현실과 가상이 한 덩어리가 되어 움직이기 시작한 것이다.

대표적인 예가 스마트폰이다. 스마트폰 사용자라면 현실 속의 가상 정보를 보여주는 앱을 사용하거나 게임이나 SNS를 통해 나를 대신 하는 아바타를 움직여본 경험이 있을 것이다. 현실과 가상이 급속하게 연결되고 있는 사례다.

현실과 가상을 통합하는 기술, 휴먼 인터랙션

시장조사기업 '가트너(Gartner)'는 2012년 발표한 자료를 통해 앞으로 현실과 가상의 상생을 위한 인터랙션 관련 기술이 주류가 될 것으로 예측했다. 구체적으로 향후 2~5년 이내에는 동작 인식, 향후 5~10년 이내에는 증강현실(AR: Augmented Reality)과 가상 도우미(Virtual assistants), 기기간 통신 서비스(M2M: Machine to Machine communication), 가상 세계(Virtual world)가, 10년 후에는 휴먼 증강화(Human augmentation), 컴퓨터-뇌(Computer-brain) 인터페이스, 이동 로봇 등을 주요 기술로 꼽았다.



가트너 그룹이 예측한 IT 분야 트렌드와 각 기술의 위상. 인터랙션 기술들은 조만간 실용화가 머지 않은 것으로 평가된다. (Gartner Group, 2012)

미래학자들은 현실과 가상의 상생이 불과 20~30년 내에 현실로 다가올 것이며 2030년경에는 인간에 필적하는 지능을 갖춘 기계가 출현할 것이라 예측하고 있다. 교육과학기술부의 제4차 과학기술예측조사 역시 2022년 경 인체의 오감을 활용한 가상현실 학습, 가상 물체의 질감이 실시간으로 전달되는 쇼핑, 가상현실 활용 의료 학습 등이 현실화되는 것에 더해 2035년에 가사도우미 로봇, 의사소통, 사고예측, 협업이 가능한 인공지능 로봇을 상용화할 것이라 전망한다. 멀지 않은 미래에는 삶 속에서 현실과 가상이 자연스레 상생할 것이라는 이야기다.

미래학자가 그리는 미래상을 구현하기 위해서는 현실이 그대로 가상에 투영되고 현실과 가상이 실시간으로 교류할 수 있는 기술이 필요하다. 이를 ‘인터랙션’이라 한다. 간단히 정의를 내리자면, 인터랙션 기술은 현실과 가상 사이 상호작용을 더 자연스럽게 편리하게 하기 위한 하드웨어 및 소프트웨어 기술이다. 그러나 현실과 가상을 제대로 통합하기 위해서는 인터랙션 기술에 단순한 기술적 범주에서 벗어나 공존을 지원하는 실감 교류가 더해져야 한다. 이 때 필요한 기술이 ‘공존현실(Coexistent reality)’이다.

공존현실은 기존의 가상현실이나 혼합현실을 넘어 ‘공존’이라는 키워드 위에 구축되는 기술이다. 사용자가 거리에 구애 없이, 현실과 가상의 공존 공간(Coexistent space)이라는 새로운 형태의 미디어로 소통하고 감성을 공유하며 정보 및 작업의 공유를 할 수 있도록 지원한다. 이를 실현하기 위해서는 감각, 감성, 정보, 작업의 실시간 소통 및 공유가 자연스럽게 이루어져야 한다. 서로 다른 공간에 있는 사용자들이 마치 한 공간에 존재하고 있다고 느낄 수 있도록 SNS 속 사회

Coexistent Reality



공존현실 기술 개요

적 네트워크 형성 및 유지를 위한 지원도 포함되어야 함은 물론이다. 단순히 가상과 현실을 오가는 것뿐만 아니라 감성과 감각을 공유하는 공존현실이 구축되면 진정한 의미의 소통을 담보하는 ‘휴먼 인터랙션’이 가능해진다.

다양한 실생활에의 응용

현실과 가상의 통합을 위한 휴먼 인터랙션 기술은 크게 다음과 같은 세 가지 주요 연구 분야로 이루어진다. 첫째는 ‘공존 공간 생성 및 4D+ 실감교류 인터랙션 기술’로, 여러 사용자가 가상 객체나 휴먼 아바타, 원격 존재를 통해 서로 존재감을 느끼고 협업할 수 있는 인터랙션 기술을 개발하는 것이다. 둘째는 ‘4D+ 감각의 소통 및 공유 기술’로 사용자에게 다양한 실감을 전달하는 인간의 감각을 감지하고, 모델링 기술을 통해 실감을 충실하게 생성하여 전달할 수 있

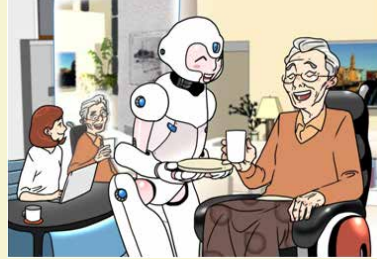
만져보고 두드려 볼 수 있는 원격진단 시스템



질 높은 의료서비스를 받기 어려운 곳에 있는 환자를 의사가 원격존재를 통해 시각, 청각, 촉각, 역감 등 감각을 실제처럼 느끼면서 상태를 파악하고 의료기기 및 장치를 조작하여 진단/치료하고, 응급 상황 시 대응할 수 있는 시스템

고령화 시대에 접어들면서 노인들의 삶의 질 향상을 위하여 집 안에 상주하면서 원격 커뮤니케이션, 간호, 건강 체크, 심부름과 가사일을 도와 줄 수 있는 케어시스템

노인케어 시스템



스마트 원격 실감만남 시스템



원격지에 있는 가족들이 서로의 3D 아바타를 보면서 다양한 감각(청각, 촉각, 역감, 기타 감각)을 느끼면서 소통할 수 있고 정보를 함께 공유하고 조작하며 대화할 수 있는 상호교류 시스템

세계 각지의 여러 사용자들이 직접 혹은 본인의 3D 아바타를 통해 가상 회의장에서 함께 만나 4D(시각, 청각, 역감, 촉감)에 운동이나 진동, 시간 등과 같은 부가 감각들이 결합된 복합감각(4D+)으로 교류하면서 회의할 수 있는 원격실감 회의 시스템

스마트 원격 실감회의 시스템



스마트 원격실감교육 시스템



서로 다른 곳에 있는 학생들이 4D+ 가상 세계에 함께 모여 실제 한 장소에 모인 것처럼 동일한 내용의 학습정보를 공유하고 조작해 보면서 지역에 관계없이 동일한 수준의 교육을 받을 수 있는 신개념 교육 시스템

는 인터페이스 장치와 교류기술을 개발하는 것이다. 세 번째는 '바이오 인터페이스 기반 실감교류 기술'로 바이오 및 뇌과학 분야를 융합하여 사람의 운동의도와 감성을 인식하여 비침습적인 자극을 통해 감각과 감성을 생성하는 기술이다. 이들 기술은 미디어 및 학습, 의료, 업무, 생활 및 레저 등 다양한 분야에서 응용된다. 그 중 중요한 몇 가지 사례를 왼쪽 페이지에 간략하게 소개한다.

수요는 100점, 기술 수준은 70점

휴먼 인터랙션 기술은 그 수요에 힘입어 성장률 역시 매우 높으리라 전망된다. 세계 실감 미디어 시장의 경우 2015년까지 연간 10.82%의 성장을 보일 전망이다. 실감형 인터랙션, 가상 시뮬레이션도 연간 10% 이상의 성장률이 예측되는 분야다 (산업원천기술로드맵 2011, 지식경제부). 세계 휴먼 컴퓨터 시장 역시 2009년 470억 달러에서 2015년 1,634억 달러로 연평균 24%의 높은 성장률을 보일 것으로 예측되고 있다(IT R&D 발전전략 2011, 지식경제부).

국내 시장도 마찬가지다. 실감 미디어 시장의 경우 세계 수준을 넘어 2015년까지 연간 11.88% 성장할 전망이다. 실감형 인터랙션, 가상 시뮬레이션 분야 역시 세계 수준과 비슷한 연간 10% 이상의 성장세를 보이리라 예측된다(산업원천기술로드맵 2011, 지식경제부). 국내 휴먼 컴퓨팅 시장의 경우에도 2009년 1조 822억원에서 2015년 2조 4,377억 원 규모로, 연평균 14.5%의 높은 성장률을 보일 것으로 전망되고 있다(IT R&D 발전전략 2011, 지식경제부).

그러나 늘어나는 수요와 시장 성장률에 비해 국내 휴먼 인터랙션 기술 수준은 아직 미흡하다. 현재 우리나라를 포함, 세계 각국에서 주

목하고 있는 휴먼 인터랙션 기술 분야의 중심은 로봇아바타, 바이오닉스, 가상현실, 오감정보처리 등이다. 다수의 사용자가 상호 존재감을 느끼고 협업할 수 있는 공간을 생성, 4D+로 교류할 수 있는 인터랙션이나 인간의 감각을 모방, 인지해 전달할 수 있는 휴먼 인터페이스 등 세부 분야도 다양하다. 구체적인 기술수준을 비교할 수 있는 정확한 근거자료는 없지만, 유사한 기술의 수준을 비교함으로써 대략적인 수준을 판단해 보면 해당 분야에서 모두 미국이 최고 기술을 보유하고 있는 점을 볼 수 있다. 반면 국내 기술 수준은 100점 만점에 70점 수준으로 상당히 낮은 편이다.

◆ 휴먼 인터랙션 기술 수준 비교 <제4회 과학기술예측조사 : 국가과학기술위원회>

기술명	최고기술보유국	국내 기술수준 (100점 만점)
기계와 인체간 쌍방향 뇌파인식 인터페이스 기술	미국	65점
인간의 오감을 활용한 가상현실 기술	미국	70점
다양한 로봇들이 서로 통신하고 협업하여 공통의 일을 수행할 수 있는 시스템	미국	65점
사용환경과 사용자의 상태에 따라 움직임과 얼굴 표정, 뇌파 등으로 입력방식을 변경할 수 있는 멀티모달 인터페이스 기술	미국	55점
고해상도 뇌지도 영상화 기술을 이용한 뇌 인지, 기억, 지각, 학습, 감각기능 규명 기술	미국	65점

성장률을 따라잡고 수요에 부응하며 제대로 된 휴먼 인터랙션 기술을 구현하기 위해서는 먼 곳에 떨어져 있는 사용자들이 시공간의 한계를 극복하고 상호 공존감을 느끼면서 서로 소통하고 협업할 수 있

는 다양한 인간 - 인공물이나 인간 - 가상사회간 양방향 실감교류 기술 개발이 시급하다. 이를 위해 KIST는 실감교류인체감응솔루션연구단과의 협업을 통해 핵심 연구를 수행하고 있다. 객체 인터랙션이 가능한 4D+ 미러월드 생성 및 표현 기술뿐만 아니라 가상 세계 및 원격존재 제어를 위한 인터페이스 및 인터랙션 기술을 함께 개발하고 있는 중이다. 촉감을 인지하고 실감나는 교류를 위한 인터페이스 개발도 함께 진행되고 있다. 현실과 가상 통합을 위한 휴먼 인터랙션 기술 통합 플랫폼을 구현하는 일 역시 주요 과제다. 70점대에 머무르고 있는 기술을 수요와 걸맞게 100점대로 끌어올렸을 때, 우리가 만나는 가상 세계는 더욱 생생한 현실성을 띄게 될 것이다.

생물과 로봇, 서로에게 배운다

이성운 · 김기훈
(실감교류로보틱스 연구센터)

21세기는 바야흐로 융합의 시대다. 한 분야에만 머물러서는 기존의 틀에서 벗어날 수 없고, 획기적인 돌파구를 기대하기도 어렵다. 이러한 시대 요구에 맞춰, 최근 들어 로봇 분야에서도 새로운 용어가 등장했다. 바로 '바이오로보틱스(Biorobotics)'다.

바이오로보틱스는 이름 그대로 생물(bio)과 로봇(robot)이 결합한 융합 연구 분야를 말한다. 작은 연구 분야로 출발했으나, 지금은 전 세계의 로봇 관련 주요 연구센터나 연구실 가운데 '바이오로보틱스 실험실(biorobotics institute/lab)'이라고 명명하는 곳이 많아졌다. 최근 들어 바이오로보틱스만을 특화한 학회(IEEE BioRob, IEEE Robio)가 생겨났으며, 각종 로봇 저널에서도 많은 부분을 바이오로보틱스 분야에 할애하고 있다. 많은 로봇 학자가 자신의 연구 주제를 바이오로보틱스로 바꾸고 이 분야에 집중하기 시작했다는 이야기다. 로봇뿐만 아니라 생명과학 분야에서도 바이오로보틱스의 중요성이

대두되고 있다. 예를 들어 2010년 바이오로보틱스의 잠재적인 가능성을 인식한 미국 하버드의대 소속 보스톤 어린이 병원은 보스톤대의 바이오로보틱 실험실을 통째로 받아들인 바 있다.

로봇 기술의 한계를 극복하는 바이오로보틱스

최근 국내외 모두 로봇분야에 많은 기대를 걸고 투자를 하고 있다. 하지만 영화 속에 나오는 환상적인 로봇으로 높아진 눈높이와 기대와는 달리, 겨우 걸음마하는 수준인 현실 속 로봇에 실망의 목소리도 높다. 바이오로보틱스는 기존 로봇 기술의 한계점인 비효율성과 응용 분야의 취약성을 극복하려는 시도다. 예를 들어 생체의 모방을 통한 기구 디자인을 통해 기존 메커니즘을 극복하고 효율성을 획기적으로 개선하거나, 고부가가치의 수술용 로봇을 개발하여 실제 분야에 응용할 수 있다.

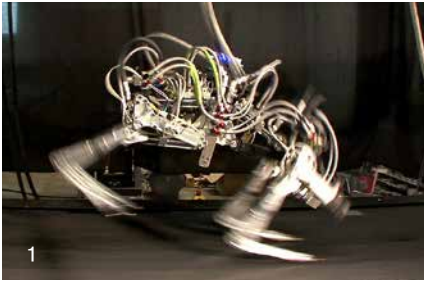
바이오로보틱스는 크게 생체 모방 로봇(Biomimetics), 의료 로봇(Medical robots), 바이오닉스(Bionics)로 나눌 수 있다. 생체 모방 로봇이란 오랜 세월 동안 환경에 맞추어 적응, 진화하면서 최적화된 생명체의 원리를 연구하고 이를 모방해 로봇을 만드는 것이다. 모방의 범위는 센서, 구동기 같은 기기뿐 아니라 행동의 알고리즘, 메커니즘 등까지 포함한다. 의료 로봇은 의료를 목적으로 사용되는 로봇을 말한다. 수술 로봇, 재활 로봇, 의료 보조 로봇 등이 이에 속하며 의사나 재활사 등 기존에 사람이 하던 일을 보다 정교하고 안전하게 보조하는 역할을 담당한다. 바이오닉스는 인간의 생체 신호를 인터페이스해 인간의 능력을 증대시키거나 보조해주는 로봇을 일컫는다. 로봇 의수족, 외골격 형태의 근력 증강 로봇 등이 이에 속한다.

생명체 모방으로 로봇 성능 향상

생명체는 오랜 세월을 거쳐 환경에 적응하며 살아남기 위해 최적화된 시스템이다. 그 원리를 배우고 이해하여 실제 로봇으로 구현하면 최적의 시스템을 만들 수 있으리라는 것이 생체 모방 로봇의 기본 프레임이다. 생체 모방 로봇은 크게 생체 원리를 파악하고 과학적으로 규명하는 분야와 이를 실제 로봇으로 구현하는 분야로 나눌 수 있다.

기존 생체 모방 로봇기술은 단순히 생명체의 원리나 모양 모사에 초점이 맞춰져 있었다. 그러나 최근에는 전통적 접근방식에서 발생하는 근본적 한계점을 극복하기 위한, 적극적인 의미의 생체 모방 기술이 주목을 받고 있다. 생체 모방 기술을 통해 로봇의 가장 중요한 요소인 구동기와 센서, 메커니즘을 획기적으로 발전시키면 비효율성의 상당부분을 극복할 수 있으리라 기대하고 있다. 기계적 요소뿐만 아니라 알고리즘의 측면에서도 연구가 이루어지고 있다. 기존의 인공 지능이 가지는 선형적인 계산방식의 한계를 뛰어넘기 위해서, 생명체가 가진 지능의 원리를 규명하고 구현하기 위한 것이다.

1980년대 MIT의 브룩스(Brooks)가 내세운 ‘행위 기반 로봇(Behavior-based robotics)’은 알고리즘 생체 모방 기술의 대표적인 예시다. 기존 로봇 제어 방식처럼 센서를 기반으로 복잡한 계획을 거쳐 행동을 수행하는 것이 아니라, 센서와 행동을 유기적으로 엮어 즉각 반응하게 함으로써 단순하지만 환경에 최적화된 행동을 유도한다. 비록 단순해 보이지만, 이 원리를 적용한 청소로봇이 상업화에 성공함으로써 생체 모방 로봇의 새로운 관점과 유용성을 제시했다는 평가를 받고 있다. 최근 관심을 끌고 있는 생체 연성 메커니즘(Compliant mechanism) 적용 기법이나, SMA(Shape Memory



다양한 생체모방 로봇들. 위부터 차례대로

- ① MIT의 치타 모방 로봇 치타
- ② KIST의 인간형 로봇 마루
- ③ 스탠포드대학교의 도마뱀 모방 로봇 스티키봇
- ④ 카네기멜론대학교의 소금쟁이 모방로봇 워터 스트라이더
- ⑤ 웨스토(Festo)사의 펭귄 모방 로봇 아쿠아펭귄,
- ⑥ 서울대학교의 벼룩모방 로봇 FLEA

Alloy), EAP(Electroactive Polymer) 등을 이용한 인공 근육 개발도 생체 모방 범주에 속한다.

인간의 한계를 넘는 의료 서비스 구현

로봇을 의료용으로 사용하는 이유는 의사의 경험을 정량화하고 의료 정보를 객관적으로 분석해 환자에게 균일하고 계획적인 의료 서비스를 제공하기 위해서다. 의료용 로봇은 크게 수술 로봇과 재활 로봇으

로 나눌 수 있으며 그밖에도 약물전달이나 진단, 검사, 연구를 돕는 다양한 방식의 의료용 로봇들이 개발되고 있다.

의료용 로봇은 사람에 의존하는 의료를 뛰어넘는 여러 장점을 갖고 있다. 수술용 로봇의 경우, MRI 및 CT 영상장비와 초정밀 위치제어가 가능한 로봇 기술을 융합해 수술 정밀도를 향상시킨다. 그 결과 합병증이 발생할 확률이 비약적으로 줄었을 뿐 아니라 수술 후 회복 시간도 크게 단축됐다. 재활 로봇 역시 의사나 치료사의 경험에 의존하는 것보다 환자 상태를 더 객관적으로 판단할 수 있게 한다. 또한 환자를 들어 올리고 팔 다리를 움직이는 등의 의료 행위도 로봇 도입 후 사람의 힘에 의존했을 때보다 더 효율적으로 이루어지고 있다.

최근 의료용 로봇 분야는 기존의 공학 울타리를 뛰어 넘어 생물학, 약학, 영상의학, 인지과학, 심리학 등의 학문과 결합하며 영역을 넓히고 있다. 마이크로 단위의 로봇을 이용하여 혈관 내 치료를 수행하고 약물을 전달하는 시스템이 좋은 예다. 스위스 ETH는 MRI 영상 장비의 자기장을 이용해 로봇을 제어하는 시스템을 개발했으며, 드레셀대(Drexel university)는 바이러스를 제어해 원하는 위치에서 작업을 수행하는 시스템을 개발하고 있다. 한국과학기술연구원에서 개발된 캡슐형 내시경도 인체 내에서 스스로 행동하거나 외부에서 쉽게 조종할 수 있어 의료 기술을 획기적으로 진보시켰다는 평가를 받는다.

재활 분야에서의 로봇의 역할 또한 기존의 기계적인 단순 반복 활동을 넘어섰다. 현재 개발되는 재활 로봇은 인지심리 치료를 통해 뇌졸중 환자가 실생활이 가능하도록 하는 수준까지 도달했다. 의료 인증 절차가 수술 로봇보다 간단하기 때문에 상품화하기도 쉽다. 2012년 실용화에 성공한 로봇만 보더라도 외골격으로 트레드밀을 걷도



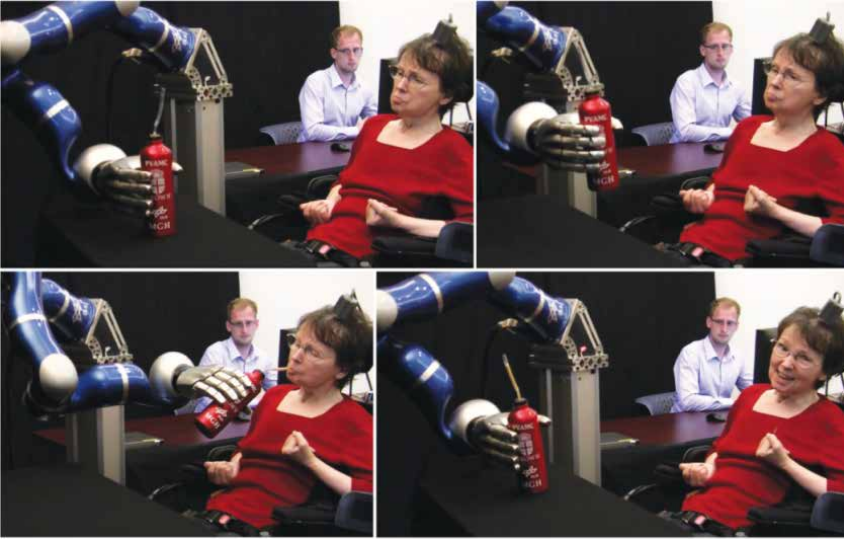
재활용 로봇 Lokomat(좌), Armeo(중), eLEGS(우)

록 하는 ‘로코맷 나노(Lokomat Nano)’, 체중 지지 시스템인 ‘제로지 (ZeroG)’, 치료사와 환자의 인터랙션이 가능한 뇌졸중 환자용 ‘카인 어시스트(KineAssist)’ 등 다양한 분야와 성능을 자랑한다. 사용자의 의도를 파악해 하지 마비 환자의 보행을 돕는 ‘이레그(eLegs)’, 발목의 움직임을 지지하는 ‘안켈로봇(Anklebot)’, 환자의 의도대로 팔 동작을 하게 해 주는 ‘알메오 파워(Armeo Power)’ 등도 주목받고 있다.

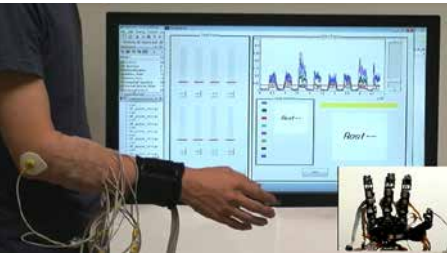
‘600만불의 사나이’가 현실로

의료용 로봇이 진료와 재활에 힘을 써도 인간의 근본적인 생체 기능을 대신할 수는 없다. 이런 문제를 해결할 수 있는 로봇 분야가 바이오닉스다. 바이오닉스 기술은 인간의 육체를 구성하는 사지를 비롯해 눈, 귀, 코, 심장, 신장 등의 장기를 대체하거나 기능을 돕는 목적으로 로봇 기술을 응용하는 것을 의미한다. 텔레비전 드라마 속 ‘600만불의 사나이’를 현실에 재현하는 셈이다.

바이오닉스의 대두는 인류의 고령화와 연결된다. 2008년 기준으로 우리나라는 65세 이상 노인 인구가 501만 여명, 전체인구의 10.3%에 해당하는 고령화 사회다. 2026년에는 노인 인구의 비율이 20.8%



하버드 대학교 연구팀은 최근 침습형 전극을 사람에게 적용하여 BMI를 구현하고, 생각만으로 로봇팔을 제어하여 컵을 들고 커피를 마시는 시연을 성공시켰다. (Brown & Harvard, 2012)



KIST에서도 사용자의 의도를 sEMG를 통해 인식하여 로봇 손을 제어하는 작업을 수행하는 데 성공했다. (KIST, 2012)

에 달해 초고령화 사회로 진입할 예정이다. 고령화 관련 신경계 질환자 수가 기하급수적으로 증가함에 따라 경제적, 사회적 손실이 사회적 문제로 야기되고 있다. 사고 및 질병에 의한 장애인 이 급증하는 것 역시 같은 문제로 연결된다. 이들의 삶의 질

을 높이고 적극적인 사회, 경제적 활동을 유도해 국가 노동 생산성을 유지하는 한편 국가 복지 재정문제의 심화에 대비할 필요가 있다. 고령화한 인류의 신체적 불편을 크게 덜어줄 수 있는 '해결사'로 나선 것이 바이오닉스다.

바이오닉스 연구는 미국이 주도하고 있다. 미국은 상지 장애 환자들의 삶의 질을 회복하게 하는 미국방연구소(DARPA)의 'Revolutionizing Prosthesis 2009' 프로그램에 4년간 7,000만 달러를 투입했다. 이 프로그램에서 성인 남성의 팔의 무게, 힘, 속도, 자유도를 갖고 실제 사람 팔과 구분하기 힘들 정도의 촉감과 외견을 가질 뿐만 아니라 편안함, 내구성, 신뢰도까지 갖춘 의수(義手)를 개발해 2011년 FDA 승인을 받았다. 2010년부터는 프로그램의 후발 연구 과제에 다시 4년간 1억4,000만 달러를 투입하고 있으며, 이 가운데 90% 이상을 두뇌 컴퓨터 인터페이스 'BMI(Brain-Machine Interface)'에 쏟아붓고 있는 상태다.

전망만큼 지속적인 투자 필요해

바이오로보틱스 분야는 기존의 전통적인 로봇 학문과 더불어 인지과학, 생체과학, 기계-사람 인터페이스, 뇌과학, IT산업 및 재활의학 간의 학문 융합을 선두 지휘하는 분야다. 마이크로로봇, 의료 분야 등 상용화할 수 있는 범위도 넓어 잠재적 가능성은 더욱 크다. 그러나 상용화 자체에 사로잡혀 근시안적으로 볼 경우 위험성이 따른다. 현재 로봇의 한계를 극복할 뿐 아니라 적용 분야를 넓히는 것 역시 선결 과제다.

생체 모방 로봇은 매우 흥미로운 기술임에는 틀림없지만 실제 이러한 기술을 잘 적용할 수 있는 분야를 찾을 수 있느냐가 성공의 관건이 될 것이다. 군사용 로봇처럼 고부가가치 상용화에 성공하지 못하면 논문 수준에서 그칠 가능성이 있다. 이를 극복하기 위해 생명체의 작동 기작을 모방하는 한편 좀 더 생명체에 가깝도록 재료를 제조하

는 기술에 초점이 맞춰질 전망이다. 또한 생물을 연구하는 기초 학문과의 융합이 발전의 핵심에 있을 것이다. 향후에는 원리의 이해를 바탕으로 한 메커니즘, 센서, 액추에이터, 재료 및 에너지원 개발 등의 다양한 시도가 이뤄질 것으로 보인다.

의료용 로봇은 연구의 규모 측면이나 경제적인 가치로 볼 때 점점 더 성장할 것이며, 궁극적으로는 세포 단위의 조작이 가능한 의료 로봇이나 상하지 마비 환자의 자연스러운 일상생활이 가능하게 해주는 로봇이 개발될 것으로 보인다. 특히 마이크로 로봇을 이용한 혈관 내 치료 및 약물 이동, MRI 장비 등과의 융합 기술을 통한 초정밀 뇌수술, 흉터를 전혀 남기지 않는 최소 침습 로봇 기술 등이 등장할 것으로 예상된다.

그러나 의료 로봇 기술이 본격적으로 상용화되기까지는 많은 어려움이 있을 것으로 예상된다. 물론 다빈치와 같은 수술용 로봇은 이미 상품화에 성공해 현장에서 널리 쓰이고 있다. 그밖의 의료 로봇 역시 기존의 수술 기법과 재활 치료 기법을 향상시킬 수 있는 수준이다. 그러나 현재와 같이 특정 수술 분야에만 사용이 국한된다면 시장의 확대에 한계가 올 수밖에 없다. 새로운 수술 로봇 장비나 시스템을 수용하기 위해서는 기존 수술실의 열악한 환경에서도 사용할 수 있도록 호환성이 높아야 한다. 또 재활 로봇이 일상생활에 쓰이기 위해서는 경량화가 관건이다. 현재까지의 에너지원이나 액추에이터 수준으로는 사실상 구현이 어려운 상황이라 뒷받침할 수 있는 기술 개발이 시급하다.

반면 바이오닉스는 후천적인 사고와 질병으로 인한 지체장애와 뇌병변 장애인의 수가 급속도로 증가함에 따라 주목도가 더욱 높아질 것

으로 전망된다. 신경과 기기·기계 등을 연계해 인간의 의도대로 동작하고, 본래의 육체와 차이점을 느낄 수 없을 정도로 자연스러운 바이오닉스 기기들이 실생활에 등장할 가능성이 높다. 경제적인 측면에서도 블루오션 시장을 창출할 수 있다는 기대를 갖게 한다. 전 세계적으로 바이오닉 인터페이스 산업 시장이 가파르게 증가하고 있으며, 전체 의료기구 시장과 비교하여도 엄청난 잠재력이 있다고 할 수 있다. 하지만 아직 주요 핵심 기술의 한계로 상용화가 이루어지지 않고 있다. 의료 로봇과 마찬가지로 기술 구현이 선결 과제라 할 수 있다. 결론적으로 바이오로보틱스는 광범위한 응용 분야를 가진 센서 및 구동기부터 상품화가 된 의료용 로봇까지 잠재력이 매우 크다. 효율적인 센서와 구동기 개발은 산업 전반에 영향을 미칠 수 있고, 비효율적인 현재 로봇을 획기적으로 개선한 다양한 서비스 로봇의 상품화를 이끌 수 있다. 현재 바이오로보틱스 분야에서 시장이 형성되어 규모 파악이 가능한 수술용 로봇분야만 보아도 2000년 약 5,000만 달러에서 2015년 예상 약 20억 달러 규모로 성장이 예측돼 매우 전망이 밝다(Global Industry Analysts, Inc 예측 2008). 하지만 2008년 기준으로 수술용 로봇의 95%가 미국과 유럽, 일본에 집중된 점에서 알 수 있듯이 국내의 산업 기반은 매우 약한 편이다. 바이오로보틱스가 지닌 막대한 잠재력과 현 시장의 취약점을 봤을 때 앞으로 관련분야에 지속적인 투자와 연구 지원이 필요하다.

안전한 삶을 위한 스마트 광센서

변영태(센터시스템연구센터)
이관일(광전융합시스템연구단)

스마트 광센서는 센서 소자와 지능형 신호처리가 결합된 고기능 광학 센서다. 단순한 기능과 낮은 정밀도를 갖는 기존 센서들에 비해 데이터 처리가 자동이고 의사결정까지 가능하다는 장점을 갖는다. 향후 스마트 모바일 기기와 연동돼 언제 어디서나 원격 정보 처리를 가능케 할 것으로 보이며 전자정보기기, 자동차, 로봇, 의료기기, 스마트 인프라 등 융·복합 제품의 경쟁력 확보를 위한 핵심 기술로 평가받고 있다.

빛으로 가스 냄새 '쿵쿵'

센서는 외부로부터의 자극이나 신호를 선택적으로 감지하는 기능과 함께 감지된 신호를 유용한 전기신호로 변환하는 기기다. 이에 더해 우수한 감도(Sensitivity), 선택도(Selectivity), 안정도(Stability), 복귀도(Reversibility)가 필수다. 예를 들어 용액이나 기체 중의 특정



광센서는 생활 곳곳에 이용된다. 아주 간단한 세면대의 수도꼭지에도 광센서 기술이 들어있다.



굴뚝에서 나오는 여러 가지 연기들. 연기 속 입자들의 특성에 따라 색깔이나 성상 등이 달라지며, 이를 이용하여 거꾸로 시각 정보로부터 연기 속 입자들의 조성을 알아낼 수 있다.

이온이나 가스 분자를 검출하고자 할 때, 함께 있는 다른 이온이나 분자의 간섭 효과를 최대한 피하기 위해서는 센서의 선택도가 매우 중요하다. 여기서 스마트 광센서의 우수함을 엿볼 수 있다. 일반적으로 사용하는 반도체, 고체전해질, 전기화학 방식의 접촉식 가스 센서는 여러 종류의 가스 분자가 한꺼번에 흡착되기 때문에 선택도가 없는 반면 광학식 센서는 가스 분자별로 특정 파장의 광(光)을 흡수하는 특성을 이용하기 때문에 선택성이 매우 우수한 것뿐만 아니라 접촉식 센서의 단점인 수명과 정확도도 광학식 센서로 해결할 수 있다. 환경 유해가스 모니터링 시스템은 가스농도가 일정한 수준에 도달하면 가스밸브가 자동으로 차단되고 환기팬이 가동되며, 프로세스가 종료되거나 음성 또는 영상으로 경보 및 대피신호를 발해 폭발을 막

④ 접촉식 가스센서와 광학식 가스센서의 동작원리, 종류 및 장단점 비교.

	접촉식 가스 센서	광학식 가스 센서
원리	가스 분자가 검지 물질에 흡착시 발생하는 물성변화를 측정하여 농도로 환산하는 방식	가스 분자의 광 흡수도를 측정하여 농도로 환산하는 방식
장점	<ul style="list-style-type: none"> • 전기화학식 • 고체 전해질 방식 • 접촉 연소식 • 반도체 방식 등 	<ul style="list-style-type: none"> • 비분산 적외선 방식 (NDIR, Non-Dispersive Infrared)
종류	<ul style="list-style-type: none"> • 측정 가능한 가스 종류가 많음 • 빠른 응답속도 • 저가, 경량화 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 높은 측정 정확성 및 가스 선택성 • 10년 이상의 긴 수명 • 연기감지기(광학식)+가스센서(광학식)
단점	<ul style="list-style-type: none"> • 낮은 가스 선택성 및 측정 정확성 • 짧은 수명 	<ul style="list-style-type: none"> • 단원자 분자 가스 측정 불가 • 부품원가 상대적으로 높음

거나 작업자가 유독가스에 노출되는 것을 방지한다.

실내외 환경 유해가스를 측정하는 방법 중 '비분산 적외선(NDIR: Non-Dispersive InfraRed) 흡수법'은 적외선 광원에서 나온 넓은 파장대의 적외선을 이용해 측정하는 방식이다. 가스 종류에 따른 선택성과 신뢰성이 높아 최근 미국과 유럽에서 상용화되고 있으며, 국내에서도 핵심 기술을 국산화하려는 움직임이 활발하다. 일산화탄소 검출 및 유해 공기질 모니터링, 자동차 배기가스 모니터링, 가스 누설 감지기 등 일반 유해가스 측정뿐만 아니라 가정용 식품 변질이나 석유 품질까지 모니터링할 수 있어 적용 범위도 넓다. 그러나 기존 접촉식 센서에 비해 센서 사이즈가 크고 가격이 비싸다는 문제가 있다.

현재까지 상용화된 비분산 적외선 방식의 광센서는 대부분 이산화탄

소 맞춤형이다. 최근에는 일산화탄소 맞춤형, 또는 두 종류의 가스를 모두 모니터링할 수 있는 듀얼 타입이 새로이 등장했다. 국내에서는 KIST, KAIST, (주)가우스텍, (주)소하테크 등에서 직접 개발 중이다. 안타깝게도 그 외의 회사들은 주로 적외선 광원과 적외선 검출기를 외국에서 수입하고 ‘광공동(Optical cavity)’만을 설계, 제작하여 조립하는 수준에 머물러 있다.

센서의 크기를 줄이기 위한 노력도 활발하다. ‘아이온 옵틱스(Ion Optics)사’가 최근 내어놓은 센서칩은 방출기, 필터, 검출기 등 핵심 부품을 단일 실리콘칩에 모아 비분산 적외선 이산화탄소 광센서의 크기를 획기적으로 줄이는 데 기여했다. 이 센서칩의 핵심은 MEMS 기반의 마이크로 브릿지 파장가변 방출기 및 검출기다. 마이크로 브릿지는 광밴드갭 기술을 이용함으로써 측정 대상가스의 흡수파장에 중심을 둔 좁은 파장대역의 적외선을 효과적으로 방출, 흡수한다.

녹조, 빛으로 게 섰거라!

2012년 여름, 전국의 강이 ‘녹색 라떼’로 변했다. 팔당호, 낙동강, 대청호 등 국민의 삶을 책임지고 있는 주요 수원이 이상 기온과 무리한 공사로 인해 녹조로 뒤덮인 것이다. 이 때문에 각 수원의 생태계가 차례로 무너지고 안전한 수돗물 공급에도 비상이 걸렸다. 녹조 현상을 측정하고 상시 모니터링할 수 있는 수질 센서의 필요성을 보여주는 사건이었다.

녹조 현상은 부영양화로 인해 과도하게 번식한 식물성 플랑크톤이 일으킨다. 식물성 플랑크톤의 개체수를 파악하기 위해서는 식물에 분포하는 엽록소-a의 양을 측정하는 것이 가장 효과적이다.



적외선 가스센서는 적외선 분광기와 동일한 원리를 이용한다. 적외선 분광기는 기체나 액체의 조성을 알아내는데 유용하다.

엽록소-a는 세균을 제외한 모든 광합성 생물에 존재하며, 파장이 430~460nm에 해당하는 청색광과 640~670nm대의 적색광을 고루 흡수하는 반면 녹색광은 거의 흡수하지 않고 반사한다. 광합성을 하는 생물이 녹색을 띠는 이유다.

식물이 흡수한 빛은 흡수 스펙트럼과 작용 스펙트럼이 일치한다. 다시 말해 엽록소가 많이 흡수하는 빛이 광합성에 효과가 크다는 이야기다. 이 현상을 역으로 이용해, 엽록소가 잘 흡수하는 파장의 빛을 일정량 주고 얼마나 잘 흡수되는가를 측정하면 생물 내에 들어 있는 엽록소의 양을 쉽게 알 수 있다.

이 원리를 이용한 기기가 '클로로필 센서(Chlorophyll sensor)'다. 센서 하단의 창을 통해 엽록소-a가 좋아하는 470nm 파장의 청색광을 물속에 방출하면, 식물성 플랑크톤의 엽록소-a가 이 빛을 흡수한 뒤 반대로 적색광을 방출한다. 이 때 방출된 적색광의 파장은 663nm. 센서 하단의 창으로 다시 돌아온 적색광은 광도파로와 필터를 차례로 통과한 뒤 검출기에 걸려 전기 신호로 측정된다. 특정 파장의 빛을 찾아 식물성 플랑크톤을 '잡아내는' 것이다.

그러나 현재 국내의 휴대형 클로로필 센서 기술은 전무하다. 이 때문에 외국의 스펙트럼 분석기를 이용하거나, 엽록소-a를 비롯하여 다양한 물질을 찾을 수 있는 통합형 수질 분석 장치를 수입해 사용하는 것이 전부다. 그나마 한국과학기술연구원에서 부분적으로 연구가 시도되고 있는 실정이다. 플랑크톤의 부영양화는 녹조뿐만 아니라 바다의 적조도 일으켜 주변 어장을 망가뜨리는 주요 역할을 한다. 2012년의 예에서 볼 수 있듯이 이상 기온과 수질 오염 등으로 인해 녹조와 적조 현상은 이제 더욱 자주, 대규모로 일어날 확률이 높다. 클로로필 센서를 포함한 새로운 방법의 수질센서 개발이 시급한 이유다.



YSI 6025 클로로필 센서와 구조도

광섬유로 건물 속 진단까지

이제 시선을 도시로 돌려 보자. 현재 산업 설비나 기계 장치 등 수많은 구조물은 대형화, 정밀화된 지 오래다. 이런 대형 구조물이 붕괴할 경우 막대한 경제적 손실뿐만 아니라 수많은 인명 피해를 가져올 수 있기 때문에 피해 방지를 위한 구조물의 안전 진단 기술은 매우 중요하다.

지금까지는 구조물에 미소 변위 검출 센서(Strain gauge)나 가속도계 등과 같은 센서를 부착해 변형률, 하중, 변위, 진동 등을 측정하고 구조물의 건전성을 감시하는 방식을 사용해 왔다. 그러나 이 방식은 전자기적 간섭이나 부식 등으로 인한 열악한 측정 환경, 고가의 측정 장비 등의 현실적인 문제를 안고 있다. 이런 문제를 해결하기 위해 광센서가 또 한 번 나섰다. 구조물에 맞춤형으로 개발된 대표적인 광센서는 광섬유 브래그 격자(FBG: Fiber Bragg Grating) 센서다. 고속, 고정밀도를 자랑할 뿐만 아니라 가격도 저렴한 편이라 널리 보급된 바 있지만, 근본적으로 격자가 위치한 곳의 정보만 얻을 수 있는 단점도 안고 있다. 그런데 최근 이 문제를 해결할 수 있는 새로운 일꾼이 나섰다. 분포형 광섬유 센서다.

분포형 광섬유 센서는 펄스 또는 연속파 광원을 통해 센서 내부의 후방산란광의 특성을 분석하는 방식을 이용한다. 이 방식으로는 광섬유가 위치한 전 구역의 물리량을 측정할 수 있을 뿐더러 장거리 포착도 가능하다. 분포형 광섬유 센서는 후방산란광의 종류에 따라 레일레이(Rayleigh) 산란형 광섬유 센서, 라만(Raman) 산란형 광섬유 센서, 브릴루앙(Brillouin) 산란형 광섬유 센서 등으로 다시 세분화된다.



광섬유 분포형 센서는 다양한 분야에 활용된다.

세 가지 방식 가운데 세계적으로 주목받는 부분은 다종다양한 응용이 가능한 브릴루앙 산란형 광섬유 센서다. 캐나다 오타와대, 스위스 연방공대 등에서 활발한 연구가 이뤄지고 있으며 일본 도쿄대에서도 비행기의 날개에 센서를 적용하는 기술을 개발 중이다. 국내에서는 KIST가 중앙대와 함께 노이즈 감소, 측정거리 확대, 공간분해능 개선 등 원천 연구에 중점을 두며 연구를 진행하고 있다. 또 한국표준과학연구원과 철도기술연구원에서도 각각 원천기술과 응용화를 모색하고 있다.

미 상무성 조사 자료에 따르면 2017년, 무선유해 환경 모니터링 세계시장 규모는 약 70억 달러다. 이 중 수질, 가스를 포함한 환경감시센서 시장은 무려 26억 달러에 달한다. 광섬유 센서 등 분포형 센서 시장의 성장세도 만만치 않다. OIDA의 시장예측자료에 의하면 2009~2020년에 걸쳐 매년 평균 11.8% 씩 성장하여 2020년 15조 달러에 달할 것으로 예상된다. 특히 보안, 스마트구조물, 원유 시추, 관정 등 네 분야가 2010년 시장전체의 64%를 차지하고 있다. 전문가들은 이 가운데 스마트구조물 분야가 향후 시장을 선도할 것으로 보고 있다.

발빠르게 움직이는 세계에 비해 국내 시장의 움직임은 아직 미미하다. 전자산업 진흥회 조사 발표 자료에 의하면 무선 유해환경 시스템의 국내시장은 점유도가 낮을 뿐만 아니라, 2017년까지 성장속도도 매우 느린 것으로 나타났다. 그러나 전문가들은 광센서 원천기술은 광섬유, 광부품, 광소자, 시스템 등에 널리 적용될 수 있으며 국내 관련 산업의 발전에 크게 기여할 수 있는 고부가가치 산업이라는 점을 지적한다. 현재 드러난 세계 시장뿐만 아니라 잠재 시장까지 공략, 점유할 수 있도록 전략적인 면에서 투자가 시급하다는 것. 대부분 수입에 의존하고 있는 고부가가치 광센서의 국내 원천기술 개발과 함께 체계적인 중장기 개발 전략 수립이 필요한 이유다.



BioMicrosystem

Part 3

바이오마이크로시스템



전망 12 칩 속에 온몸 장기 담으면 열리는 멋진 신세계

전망 13 난치병을 극복하는 가장 작은 방법

전망 14 혈액 속 암 세포를 잡아낸다

전망 15 생체 정보의 바다에 던지는 마이크로 그물, 다중센서

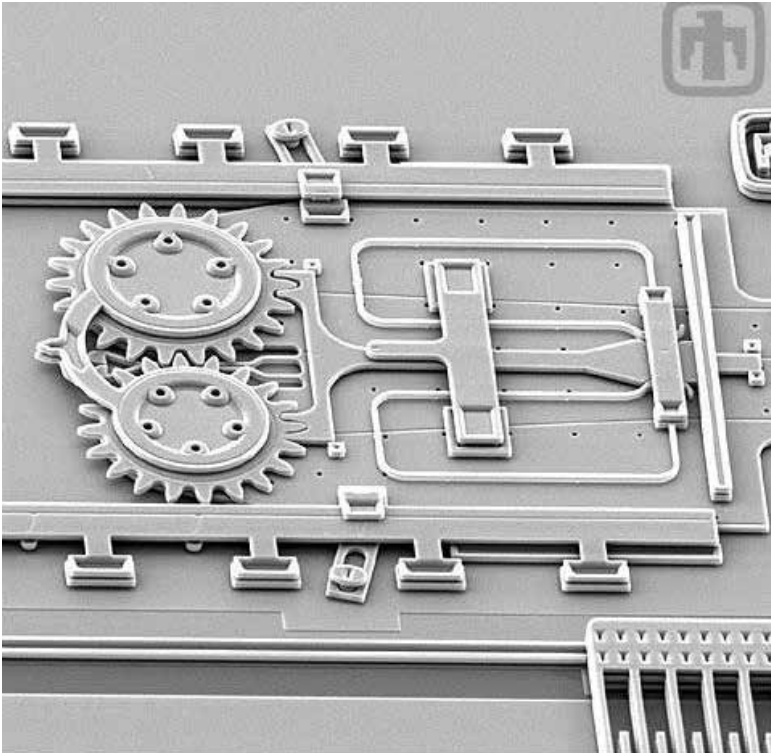
Intro **생명을 대신하는** **첨단과학**

사람은 얼마나 작은 것까지 볼 수 있을까? 인류는 원자의 구조를 이해한 지 채 150년도 지나지 않아 원자 안쪽의 세계를 직접 들여다보고 조작까지 하는 시대를 맞이했다. 최근 마이크로를 넘어서서 나노 단위 크기의 물체를 분석하여 지금까지 몰랐던 현상들을 이해하고 이를 응용하려는 시도가 이루어지고 있는 것이다.



바이오멤스 기술이 발전하면서 동물실험에 따르는 번인통제의 복잡함이나 윤리적 문제를 온전히 피해갈 수 있는 길이 열렸다.

과학자들이 1980년대부터 본격적으로 연구하기 시작한 마이크로시스템 기술(Microsystem technology 혹은 MEMS)은 단순한 가공 기술에서 출발하여 지금은 독립된 시스템을 구성하여 작동시키는 데 응용되는 수준에 이르렀다. 멤스 기술은 나노 단위의 미세 공간을 3차원적으로 가공하는 방법에 기반을 둔 소형화(Miniaturization)기술이 그 핵심으로, 우리가 늘 사용하는 스마트폰에서도 찾아볼 수 있다. 나날이 다양한 기능이 추가되고 성능이 좋아지는데도 오히려 점점 얇아지고 가벼워지는 스마트폰의 혁신이 바로 MEMS 기술 덕분



MEMS 기술은 미세 기계를 만드는 데 종종 응용된다. 사진의 톱니바퀴는 현미경으로 보아야 간신히 볼 수 있을 정도로 작지만 커다란 톱니바퀴만큼이나 정확하게 작동한다.

이다.

MEMS 기술의 가장 기대되는 분야 중 하나가 의료 분야이며, 이들 분야를 바이오마이크로시스템기술이라 부르고 바이오마이크로시스템 기술은 다른 말로 바이오멤스(BioMEMS: Bio Micro Electro Mechanical System)라고도 한다. MEMS 기술은 단순한 반도체 제조 공정을 기초로 발전한 가공기술부터 다양한 물리 화학적 현상을 이용한 능동구동(Actuation)기능, 물리 화학적 현상을 감지(Sensing)하는 기능을 기반으로 바이오, 화학, 의학 등 다양한 학제와 융합되어 지금까지 이루지 못했던 새로운 기능과 영역을 다룰 수 있게 한다.

이들 바이오멤스 기술은 폴리머 재료를 기반으로 한 소프트 리소그래피(Soft lithography)기술 개발과 함께 발전하여 기존의 실리콘 재료를 탈피하여 소재의 폭을 넓힘으로써 혁신을 이끌었다. 또한 다양한 생체 재료를 바이오멤스 기술에 적용하면 생체에 가까운 환경을 구현할 수 있으므로, 이를 이용하면 생체 내에서와 조건이 거의 동일하면서도 조작이 간편한 실험실 환경에서 연구할 수 있다. 생물학이나 약품 연구에서는 임상 환경과 동일한 조건을 만들기 위해 생체실험이 가장 이상적이지만 생체 내에서는 수많은 요인들이 상호작용하므로 변인통제가 극히 어렵지만 생체 그대로 특정 기관을 모방한다면 변인을 적절히 통제하면서도 임상 조건과 동일한 환경을 만들 수 있는 것이다.

바이오멤스 기술이 실험실에 적용되면 이처럼 생체 조직이 집적된 바이오멤스칩을 사용하여 기존의 동물 실험을 대체할 수 있다. 바이오마이크로시스템 기술은 극미세유체(Microfluidics)기술



바이오멤스 기술 발전에 따라 신약이나 치료법 개발도 빨라질 것이다.

을 기반으로 분자 생물학 연구에 활용하기 위한 분자생명체온어칩 (Molecular biology on a Chip), 한 개의 단위 세포나 이를 조작하는 기술을 기반으로 한 세포기반칩(Cell based chip), 마이크로 환경에서 세포의 증식이나 조직 연구를 위한 조직미세엔지니어링(Tissue microengineering) 기술, 그리고 뇌신경 회로망 연구와 재활을 위한 극미세 신경프로브(Neural probe), 또는 신경칩(Neural chip) 등이 있다.

바이오마이크로시스템 기술은 생명현상의 규명에 꼭 필요한 도구로 극미세 영역에서 무언가를 찾을 수 있는 기회를 제공한다. 또한 인체에 삽입하거나 부착함으로써 만성 질환이나 신체의 재활 기능을 도울 수 있는 혁신적인 기술로 발전할 수 있을 것이다.

칩 속에 온몸 장기 담으면 열리는 멋진 신세계

최낙원
(바이오마이크로시스템 연구단)

공상과학 소설이나 영화에 나올 법한 이야기를 상상해보자. 다치거나 병에 걸려 손상된 조직이나 장기를 인공 조직이나 장기로 대체하는 장면이다. 인공 조직이나 장기는 우리 몸 안에 것과 거의 같아 면역 거부 반응이 나타나지 않으면서도 건강한 상태라 더 이상 정상적으로 작동하지 않는 신체 일부를 효과적으로 대신할 것이다. 이런 일은 상상 속에만 있다고 생각할 수 있겠지만 완전히 실현 불가능한 것만은 아니다.

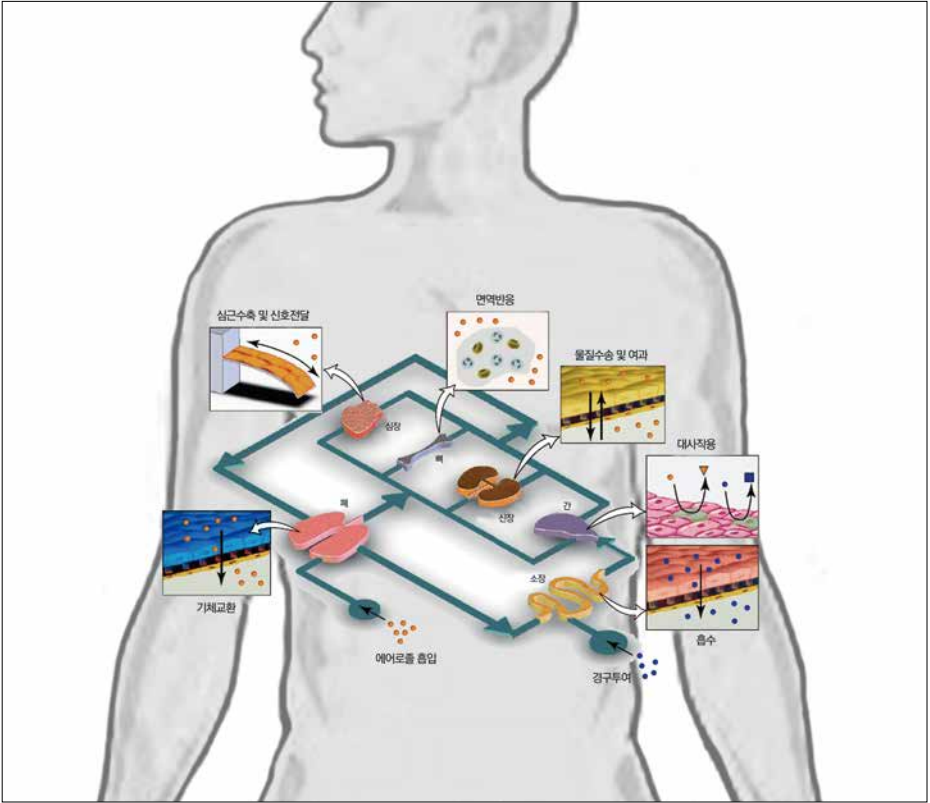
사실 인간의 유전자를 밝혀 질병이나 장애를 진단하고 치료, 예방하는 데 활용하려는 계획도 원래는 꿈만 같은 이야기였다. 그런데 2003년경 인간게놈프로젝트(Human genome project)가 완료돼 이 계획이 조금씩 현실로 다가오고 있다. 인공 조직이나 장기에 관한 연구도 이런 연구처럼 꾸준히 발전해 왔다. 지난 100년 이상의 시간 동안 임상의사들이 손상된 조직이나 장기를 대체하려는 노력을 해온

덕분이다.

1993년 처음 학계에 소개된 ‘조직공학’은 의과학과 공학이 어우러진 융합 기술이다. 이 기술의 최종 목표는 생체재료로 구성된 3차원 구조체(Scaffold) 안에 세포를 심고, 생체 바깥에서 배양해 ‘이식 가능한 조직’으로 키우는 것이다. 이런 개념을 실제로 성공시킨 사례는 2006년에 처음 나왔다. 웨이크포레스트(Wake Forest)대 의대 아탈라(Anthony Atala) 교수 연구팀이 방광을 실험실에서 배양해 사람에게 이식한 것이다. 참고로 방광은 얇은 막으로 형성된 주머니 형태의 장기라 우리 몸 안에 있는 다른 조직이나 장기보다 훨씬 덜 복잡한 구조를 갖고 있다.

조직공학 기술의 핵심은 인공 구조체 안에 심은 세포가 몸 밖에서도 산소와 양분을 충분히 공급받으며 자라 조직 세포에 맞는 고유한 형태를 나타내야 한다는 점이다. 따라서 2000년대 중반부터는 새로운 조직이나 장기를 생체 바깥에서 만들어 임상적으로 이식하려는 연구 뿐만 아니라 우리 몸속 다양한 조직과 장기가 어떻게 형성되고 기능하는지 살피는 노력도 진행됐다. 그 덕분에 인공 조직이나 장기로 생리학·병리학적 모델을 만들고 생리현상이나 병의 진행 과정을 알아내고, 새로운 약물의 안전성과 효과를 검증하는 전임상 단계에서 시간과 비용을 줄일 수 있는 약물 스크리닝 기술로도 활용되고 있다.

특히 2011년 9월 미국 국립보건원(NIH: National Institute of Health)은 국방첨단연구원(DARPA: Defense Advanced Research Projects Agency), 식품약물관리원(FDA: Food and Drug Administration)과 공동으로 5년 동안 7천 만 달러 규모의 ‘조직 칩 프로젝트(Tissue chip project)’를 시작한다는 계획을 밝혔다.



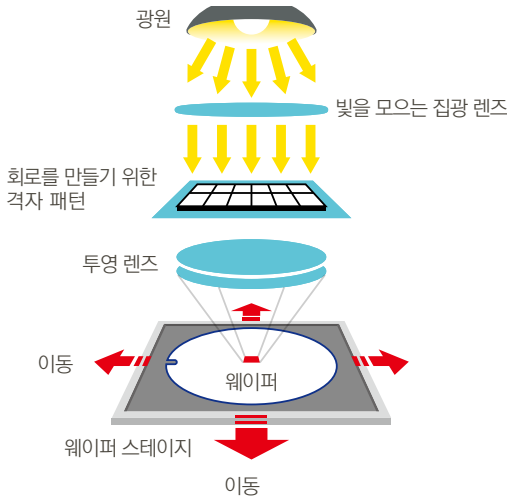
인간의 여러 가지 장기 및 조직을 모사하는 생체 조직 칩 기술의 개념도

이 프로젝트는 인간 생리를 모사하는 3차원 인간 조직 칩을 개발하고, 생물공학적 조직 모델을 만들어 약물 후보군의 안전과 효율성에 대해 효과적으로 예측하는 게 목표다. 2012년 중반 미국 내 총 19개 대학과 병원 연구팀들이 선정돼 연구를 진행하고 있다. 이에 따라 기존에 개발된 세포·조직 칩 기술을 포함한 이 분야가 더욱 발전할 것으로 보인다.

동전만한 칩 안에 세포를 키워라

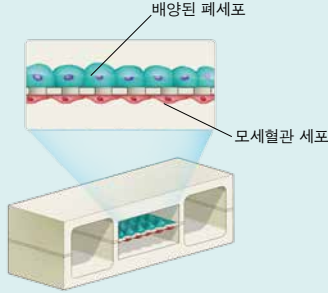
1990년대 말부터 크게 발전한 미세공학(Microengineering)과 미세유체(Microfluidic) 기술은 생체 바깥에서 세포나 조직을 배양 시스템을 개발하는 데 도움을 줬다. 그러나 배양 환경이 미세유체채널 안에 갇혀 있는 대부분의 미세유체 시스템에서는 완벽한 기능을 갖춘 조직을 만들기 어려웠다. 이런 한계는 기본적으로 조직의 기능과 성장 원리를 아직 완벽히 이해하지 못했기 때문에 나타난다. 또 세포 주위 미세환경을 제어할 수 있는 공학적 도구가 부족하기 때문이기도 하다.

‘생체 조직 칩 기술’은 이런 한계를 극복하고 세포 주위 미세환경과 조직 형성과 기능에 필요한 여러 용해성 인자(Soluble factor)들을 시

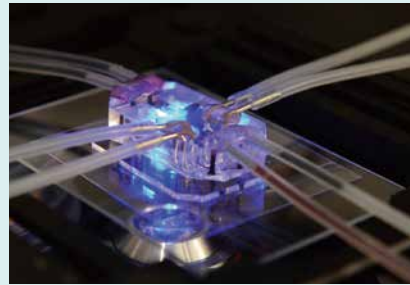


조직온칩이나 장기온칩에는 반도체를 만드는 데 이용하는 마이크로엔지니어링 기술이 적용된다. 설계한 회로를 포토리소그래피로 실리콘 베이스에 옮긴 후, 각인된 회로에 세포를 배양하여 생체칩을 만든다.

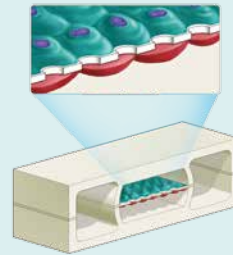
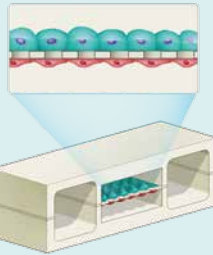
허파파리 조직 생체 칩의 탄생



합성수지(PDMS)를 이용해 허파파리 조직 일부를 만들고 한쪽에는 폐세포를, 다른 한쪽에는 모세혈관 세포를 배양해 칩으로 만들었다.



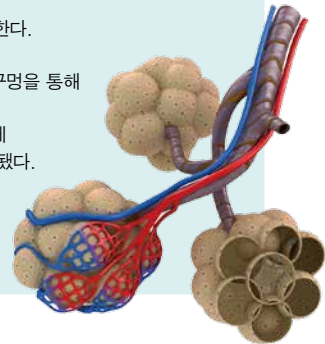
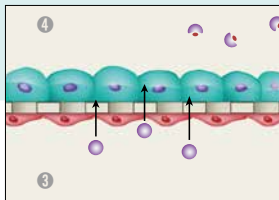
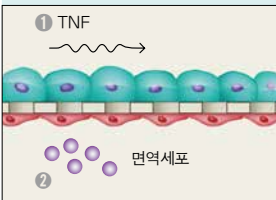
허파파리 생체 칩의 실제 모습. 8시에서 2시 방향으로 연결된 투명관은 진공 펌프를 연결하고 10시에서 4시 방향으로 연결된 관은 세포배양액이 흘러들어가는 장치다.



컴퓨터로 제어하는 진공펌프를 이용해 세포가 배양된 양쪽의 공간을 진공 상태로 만들면 폐세포가 일시적으로 팽창한다.

허파파리 조직 생체 칩의 생리적 기능 모방 실험

- ❶ 염증유발물질(TNF)이나 박테리아를 폐세포 쪽에 배양액을 통해 투여한다.
- ❷ 백혈구의 면역세포를 모세혈관 내피 쪽에 투입한다.
- ❸ TNF에 의해 수용체가 발현하면 면역세포가 생체칩의 세포막에 있는 구멍을 통해 폐세포 쪽으로 올라간다.
- ❹ 폐세포에 투입된 TNF를 면역세포가 잡아먹는다. 실제 허파파리 조직에 TNF가 생겼을 때 면역세포가 하는 역할이 생체 칩에서도 똑같이 구현됐다.



간적·공간적으로 제어할 수 있다. 더 나아가서는 우리 몸에 더 가까운 3D 환경에서 세포-세포, 세포-세포 외 기질(ECM: ExtraCellular Matrix) 간 상호작용이 가능하게 세포나 조직을 배양할 수 있는 플랫폼 기술이다.

여기에 마이크로 수준에서 유체 흐름을 조절하는 방법을 연구하고 장치, 시스템 등을 제작하는 미세유체기술을 적용하면 다양한 생명 현상에 대한 연구에도 응용할 수 있다. 이는 우리 몸 안에서 '심장-동맥-조직, 장기-정맥-심장'으로 이어지는 중앙 순환 시스템과 상당 부분 유사하다고 할 수 있다. 미세유체채널을 통해 산소와 영양분을 공급하고, 세포 대사 과정에서 생성되는 부산물을 제거할 수도 있다. 또 소형화된 소자를 제작하므로 사용되는 배양액, 각종 생화학적 시료와 용해성 인자의 양도 줄일 수 있다.

생체 조직 칩은 반도체 공정에서 사용되는 포토리소그래피(Photolithography) 등의 마이크로엔지니어링 기술을 이용해 제작할 수 있다. 우선 실리콘 기판 위에 감광제(PR: PhotoResist)를 코팅하고 포토마스크(Photomask)를 통해 자외선(UV)을 쬐어 패턴을 형성해 원하는 미세구조를 만든다. 이후 PDMS와 같은 투명한 열경화성 고분자에 미세구조를 찍어낸 다음, 유리 기판과 플라즈마를 접합하면 칩을 만들 수 있다. 이 안에 세포를 배양하면 된다. 세포가 심어진 하이드로젤을 주입해 굳히고, 하이드로젤 내에 직접 집적된 미세유체채널을 넣어 3D 환경에서 세포를 배양할 수도 있다.

미세유체 칩을 제작하는 기술이 발달하고, 여기에 생체에 적합한 여러 하이드로젤을 구체체 재료로 활용하기 시작하면서 생체 조직 칩은 본격적으로 발전했다. 그 덕분에 2000년대 중반부터 미국에 있는

대학 연구팀들을 중심으로 연구결과도 많이 나왔다.

대표적인 사례가 2010년 하버드대 위스(Wyss) 연구소에 잉버(Donald E. Ingber) 교수팀이 개발한 ‘렁온어칩(Lung-on-a chip)’이다. 신축성이 있는 PDMS 다공성 막을 집적시킨 미세유체 칩 안에서 폐 기능을 모사하는 령온어칩은 호흡해서 폐 안으로 들어오는 유해물질의 독성을 평가할 뿐 아니라 향후 약물 후보군 스크리닝 플랫폼으로도 쓰일 전망이다. 생체 조직 칩 제작 기술이 동물 세포의 배양뿐 아니라 전임상 단계에서 약물 후보군의 효과와 독성을 평가하는 데도 쓰일 수 있다는 걸 보여준다.

국내에서는 코넬대 스트룩 교수팀 출신으로 현재 KIST 바이오마이크로시스템연구단 소속의 최낙원 박사가 알긴산(Alginate), 콜라겐(Collagen), 폴리에틸렌글리콜(PEG: PolyEthylene Glycol) 등 하이드로젤을 이용한 마이크로플루이딕 3D 세포·조직 배양 칩 제작 기술을 보유하고 있다. 최 박사팀은 뇌-혈관 장벽, 신경회로망에 응용할 수 있는 생체 외 3D 배양 플랫폼을 개발하기 위한 연구를 진행 중이다. KIST 바이오마이크로시스템연구단 소속 강지윤 박사팀은 고려대 기계공학부 정석 교수팀과 공동으로 척수 손상에 관한 생체 외 모델을 구축하는 연구를 수행 중이다.

코넬대 술러 교수팀 출신의 홍익대 화학공학과 소속 성종환 교수는 간, 장, 혈관 등 각종 장기의 구조와 기능을 재현할 수 있는 멀티-인공 장기 시스템을 개발 중이다. 하버드대 위스연구소 잉버 교수팀 출신의 허동은 교수는 현재 서울대학교 의과대학 의공학과 소속으로 령온어칩을 고속, 고효율 약물 스크리닝 플랫폼으로 발전시키기 위한 후속 연구를 진행하고 있다.

서울대 기계항공공학부 전누리 교수팀은 신경세포 배양과 축색돌기의 성장에 관한 PDMS 기반 미세유체 칩을 개발했고, 이를 신경계 약물 스크리닝을 위한 배양 플랫폼으로도 응용했다. 고려대 정석 교수팀에서는 PDMS 기반 미세유체 칩을 이용해 신경줄기세포 분화 등에 관련된 새로운 기전을 규명하는 연구를 활발히 수행하고 있다.

5~10년 내 상용화될 것..., 한국이 앞설 수 있는 분야

지난 10년간 다양한 생체재료로 여러 조직과 장기를 모사해 온 생체 조직 칩 기술은 개념 증명 수준의 연구 성과를 많이 발표하고 있다. 그러나 여전히 해결해야 할 과제는 남았다. 우선 생체 외 배양 플랫폼을 활용해 생리학·병리학 현상에서 새로운 원리를 발견하는 등의 연구가 상대적으로 미비하다. 또 미세유체 용기(Chamber) 사이에서 배양액이나 생화학 물질이 순환하는 과정에서 세포에 미치는 전단응력(Shear stress), 기포 생성 영향 등에 대한 정량적인 해석도 필요하다. 생체 조직 칩을 약물 스크리닝 플랫폼으로 응용하려면 수용성이 낮은 약물 후보 물질을 다룰 수 있는 미세유체 세포 배양 칩도 개발돼야 한다. 이는 기술적으로 해결해야 할 과제로 향후 5년에서 10년 사이에 더 구체적으로 발전할 가능성을 보여줘야 한다.

생체 조직 칩 제작 기술을 개발하는 인력이 대부분 기계공학, 화학공학, 재료공학 등 공학계를 중심으로 이뤄진 것도 한계다. 생물학이나 의학 분야에서 더 많은 연구자들이 사용하기 어려운 경우가 생기는 것이다. 사용자 편의성까지 고려한 장치나 소자를 개발해 편리성과 안정성이 향상돼야 할 것이다. 이는 아직까지 생물학이나 의학 분야와 학제간 벽을 허물고 긴밀하게 소통하는 공동연구 체계가 부족하

다는 걸 방증한다고 볼 수 있다.

이 분야는 아직 학문적으로나 기술적으로 넘어야 할 과제가 많은 초·중반기다. 이 때문에 생체 조직 칩을 만드는 기술에 대한 시장 전망은 불투명하다. 하지만 신약 개발과 연계된 바이오산업에서는 생체 조직 칩이 새로운 패러다임을 가져올 플랫폼으로 성장할 수도 있어 잠재적인 시장 규모는 대단히 크다고 볼 수 있다.

이미 미국 NIH에서는 전임상 단계에서 약물 효과 검증을 위한 '조직 칩(Tissue chip) 프로젝트'가 시작됐다. 앞으로 5년 정도 이내에 제약 회사 연구소 등에서 활용할 수 있는 상용화된 제품들이 나올 것으로 예상된다. 이와 더불어 일반 생물학 연구자가 더 편리하게 생리학·병리학적 메커니즘을 밝혀낼 때 이용할만한 생체 조직 칩 기술은 5년에서 10년 사이에 상용화될 것으로 보인다.

참고로 산업연구원에서 발표한 '바이오산업의 2020 비전과 전략'에 따르면 바이오 장기, 바이오 칩 분야의 세계 시장 규모(생산 규모)는 2000년대 중반부터 꾸준히 증가했다. 장기 칩과 바이오 칩에 대한 시장 규모는 2015년 각각 44,890만 달러와 2,664만 달러에서, 2020년 7,152만 달러, 3,956만 달러로 연평균 약 10%의 증가세를 보이는 것으로 나타났다. 또 이 분야는 선진국과 우리나라의 기술 격차가 상대적으로 적어 우리가 선도해 나갈 수 있는 분야라고 판단된다. 바이오 장기의 경우 2018년, 바이오 칩의 경우 2015년 정도가 되면 본격 산업화의 시기가 도래할 것으로 예측된다.

환자 세포로 약물 시험하는 날 머지 않았다

움직이는 유체와 살아있는 세포, 세포의 기질 등 다양한 요소를 함께

고려하는 만큼 이 분야에서 해결해야 할 기술적 어려움은 아직 많이 남아있다. 최근까지 보고된 장기 온 어 칩(Organ-on-a chip) 기술이 아직 개념 정립이나 확인 단계에 머무르고 있는 까닭이 바로 여기에 있다. 따라서 생체 조직 칩이 실제 의학 분야나 산업 현장에 적용되기까지는 시간이 걸릴 것으로 예상된다.

그러나 최근 5년 동안 세계적으로도 수준이 높고 제반 환경이 잘 갖춰진 연구팀에서 괄목할만한 연구 성과를 낸 한국 연구자들이 상당수 귀국해 대학과 연구소, 기업 연구소에서 활발한 활동을 하고 있다. 또 ‘화학과 생물학을 위한 미니어처 시스템(MTAS: Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences)’ 국제 학회에서 발표되는 연구 성과 중에서 3분의 2 정도는 한국과 일본, 중국에서 나오고 있다. 이는 앞으로 우리가 이 분야를 선도할 기반을 다지고 있다는 면에서 낙관적이라고 할 수 있다.

생체 조직 칩 내에서 배양할 수 있는 세포의 종류와 관련 테크닉이 점점 늘어나고, 줄기세포의 생체 조직 칩 내 배양도 고려할 수 있다. 이는 쥐 같은 동물 세포가 아니라 실제 사람, 즉 환자에 대한 맞춤형 연구로 생체 내(In vivo) 시험에 걸리는 시간과 비용을 줄일 가능성을 보여준다. 또한 약물 스크리닝의 경우 휴먼 온 어 칩(Human-on-a chip) 기반의 예측 독성 평가도 가능해질 것으로 기대된다.

KIST는 이미 뇌과학연구소와 의공학연구소 등 목적 지향형 연구소 체제로 개편해 다양한 전공 분야의 연구자들이 같은 연구단이나 연구소에 속해 있다. 이에 따라 이종 학문 간의 교류가 시작됐고 이를 통해 실제로 뇌신경과학과 공학의 융합 분야에서 국책연구과제를 수주하는 등 발전 가능성이 클 것으로 기대를 모으고 있다.

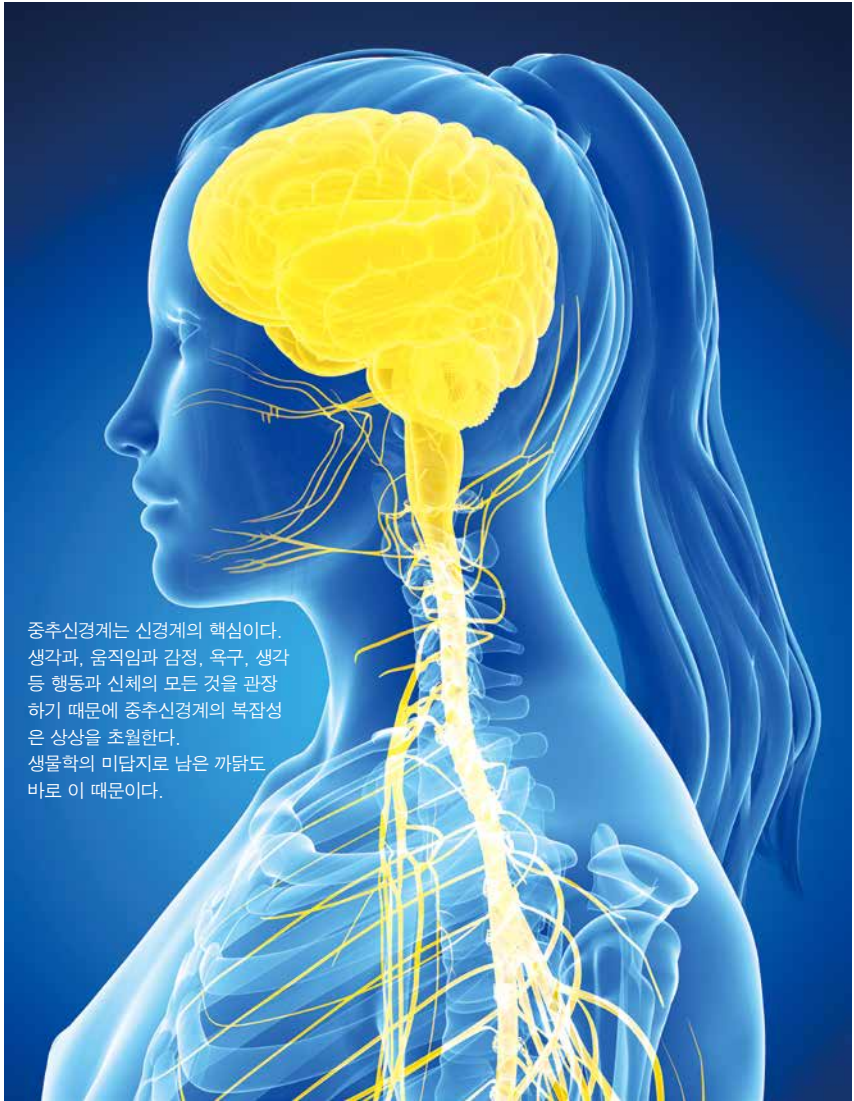
난치병을 극복하는 가장 작은 방법

김진석(바이오톨스연구단)

신경계는 생물학과 의학의 마지막 프론티어라고도 한다. 가장 간단한 신경계조차 엄청난 복잡성을 자랑하기에 아직 아는 것보다 모르는 것이 많기 때문이다. 그러나 근래 신경과학은 눈부신 발전을 거듭하면서 중추신경계 연구가 혁신적으로 변화했다.

새롭게 알아낸 사실 중 가장 놀라운 사실은 중추신경계가 재생할 수 있다는 것이었다. 이전에는 중추신경계가 한 번 손상을 받으면 회복되지 않아 영구적인 장애를 겪는다고 생각했다. 당연히 중추신경계 이상은 의학적인 치료도 불가능하다고 생각했다. 그러나 중추신경계의 재생 현상이 알려지는 것과 함께, 조직화학(Histochemistry), 패치 클램프(Patch clamp), 신경 전극(Neural electrode) 등과 같은 측정 기술이 개발되고 생화학 지식이 축적되면서 중추신경 치료의 높은 장벽이 점차 허물어지고 있다.

특히 초미세 소자를 만들어내는 데 이용되는 MEMS 기술이 등장하



중추신경계는 신경계의 핵심이다. 생각과, 움직임과 감정, 욕구, 생각 등 행동과 신체의 모든 것을 관장하기 때문에 중추신경계의 복잡성은 상상을 초월한다. 생물학의 미답지로 남은 까닭도 바로 이 때문이다.

면서 이전에는 불가능했던 이식형 신경 시스템을 실현 가능하게 하고 있다. 뇌에 화학, 빛 등 다양한 자극을 주어 알츠하이머, 우울증과

같은 뇌질환을 치료하는가 하면, 뇌의 신경 신호를 분석할 수 있는 삽입형 초정밀 탐침이 개발됐다. 통증을 완화하기 위해 척수에 전기 자극을 가하기도 하고 척수에 이식하여 영구적으로 손상된 척수를 회복시키거나 신경 신호를 읽어 인공 신경 네트워크를 만드는 등 과거에는 꿈에 불과했던 기술들이 이식형 MEMS 소자로 가능해졌다. 이식형 MEMS 신경 소자 기술이 급속히 발전하면서 조만간 불치성, 난치성 신경 질환을 치료하는 길이 열릴 것이다. 나아가 인공물을 이용하여 신체의 능력을 향상시키는 사이버네틱스(Cybernetics) 시대도 한걸음 다가설 것이다.

뇌를 자극하는 전류가 난치병 치료

중추 신경 이식형 MEMS 신경 소자는 그 목적에 따라 뇌 이식용과 척수 이식용이 있으며, 신경 재생용 및 신호 자극용, 신호 획득용 또

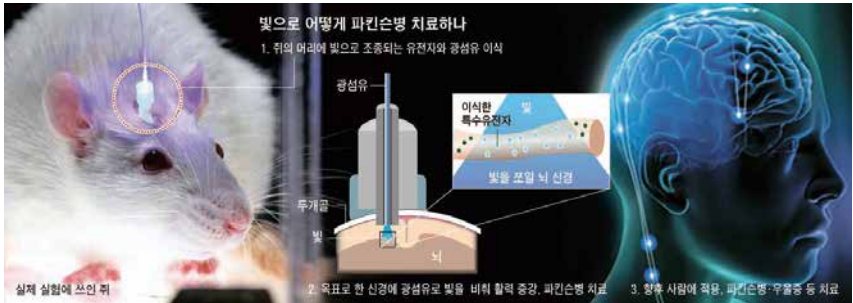
는 복합 기능용으로 분류될 수 있다. 신경을 따라 전달되는 신경 신호는 수백 μV 수준의 전기 신호 형태이므로 전기적 접촉을 통해 신경 신호를 측정하는 것이 가능하다. 또한 역으로 전기적, 화학적 자극을 가하여 임의의 신경 신호를 일으킬 수도 있다.

뇌 질환은 초기단계는 약물을 이

대표적인 뇌 심부자극기 솔레트라. 뇌에 전기 자극을 주어 비정상적인 운동신호를 차단한다.



Medtronic, Inc.



용하여 치료가 가능하나 증상이 심해지면 약물에 의한 치료 효과가 매우 낮아진다. 이로 인해 뇌 질환의 치료 및 접근을 위한 방법으로 뇌 심부 자극술(DBS: Deep Brain Stimulation)이 제안되었다. 이 방법은 간접적으로 접근하기 어려운 뇌에 직접적으로 접근하여 자극을 주는 방법이다.

뇌심부 자극기는 전극의 전원 공급을 위한 전원장치를 가슴 부분에 삽입하고, 전기 자극용 전극을 운동을 담당하는 뇌 심부 영역에 직접적으로 삽입하여 전기자극을 준다. 이 자극을 통해 뇌에서 발생하는 비정상적인 운동 신경신호를 차단하여 운동신경을 정상적으로 조절할 수 있다. 파킨슨병, 수전증, 근긴장 이상증 등의 다양한 뇌 질환에 이용된다.

그러나 기존의 전기자극을 이용한 뇌 심부 자극은 전기 신호가 생체 내부로 퍼져나가면서 목표하는 신경 세포가 아닌 부분에도 자극이 된다. 또한, 지속적 전기 자극으로 인해 신경조직의 손상이 발생하여 접촉저항이 증가하는 단점이 있다. 최근 전기 자극의 한계점을 극복하기 위해 최근 광유전학을 이용한 광 자극 신경탐침이 개발되고 있다. 위 그림처럼 광 유전학은 특정한 빛에 반응하는 유전자를 생체

내 목표 부위에 삽입하고, 목표 부위를 특정 파장대역의 빛으로 자극하여 목표부위를 선택적으로 자극하는 방법이다. 빛에 의해 자극된 부위만 전기 자극이 일어나기 때문에 전기 자극술보다 더욱 정확한 자극이 가능한 장점이 있다.

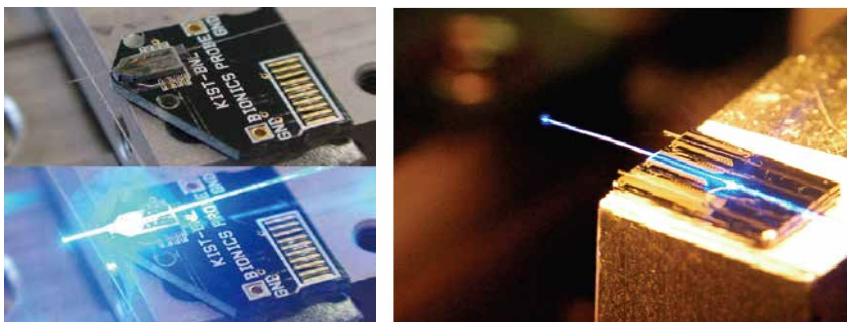
길목 막아서 통증 차단

척수자극술(SCS: Spinal Cord Stimulation)은 척수를 전기 자극하여 척수를 따라 전달되는 통증 신호를 경감시켜 통증을 치료하는 대표적인 방법이다. 척수의 뒤쪽에 있는 굵은 신경 섬유는 지속적인 외부 전기 자극에 대해 역치가 낮은 편이라서 선택적 자극이 가능하다. 따라서 척수를 따라 다수의 전극이 형성되어 있는 도선을 부착하고, 펄스 생성기에서 발생시킨 전기 자극 신호로 통증 신호를 상쇄시킴으로써 사지 통증을 완화할 수 있다.

중추 신경의 신경 신호는 아래의 그림과 같이 삽입된 미세 전극을 통해 획득할 수 있다. 이를 활용하면 척수에 금속 전극을 접촉시켜 신경 신호를 획득한 후 이를 분석하여 인공보철물에 적용하여 환자가 원하는 운동을 수행하도록 도울 수 있다. 현재 척수의 신경을 획득하기 위한 방법으로, 탐침형 전극을 척수 속에 삽입하는 방법, 평판형 전극 배열을 척수의 표면에 접촉하는 방법, 시브형(Sieve type) 전극을 손상된 척수의 절단면에 접착하는 방법 등이 사용되고 있다.

신경을 제어하는 새로운 방법, 빛

빛으로 신경세포 활성화와 억제를 유도하는 광 유전학(Optogenetics)은 2005년에 스탠포드대학교에서 발명되어, 이를 이용한 전기 자극



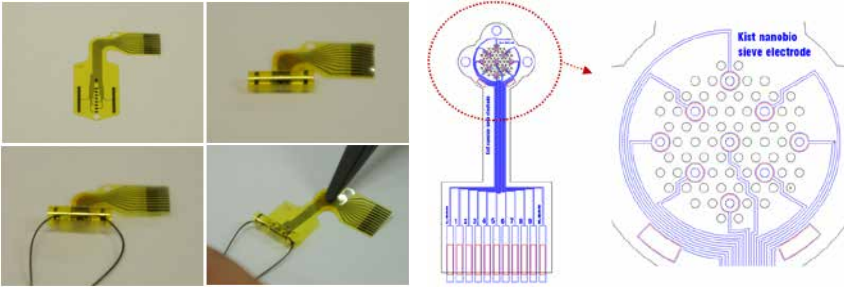
미시건대학교의 실리콘 기반 광 자극용 신경전극과 KIST에서 개발한 폴리머 기반의 광 자극용 신경전극

뿐만 아니라 빛으로 자극을 하여 전기 자극이 가지는 한계점을 극복하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 현재 광 자극에 의한 실험동물의 행동 변화 실험을 통해 운동 기능과 관련된 뇌 질환의 치료 연구가 활발히 진행되고 있다.

MEMS 기술로 제작한 초소형 전극을 이용하면 광자극에 대한 생체 내부의 변화를 실시간으로 확인할 수 있다. 종래에 개발된 광 자극용 신경 전극은 실리콘 기반으로 제작되었으며 광섬유 및 광도파로를 활용한 광 자극과 금속전극을 통한 생체 신호 획득이 가능하고, 실험용 소형 동물에 연구용으로 사용되고 있다.

최근 KIST는 뇌 신경전극을 생체 내에 삽입할 때 뇌손상을 최소화하기 위한 연구를 하고 있다. 폴리머 공정 기술을 통해 기존의 실리콘 기반 신경전극을 대체한 폴리머 기반 신경전극이 제작되고 있으며 전기 자극, 광 자극, 약물 전달 등 다양한 기능을 탑재하는 연구도 추진 중이다.

KIST는 최근 토끼의 좌골 신경에 감아서 신호를 얻을 수 있는 커



KIST에서 개발한 토끼 좌골 신경 신호 획득용 커프 전극과 척수신경 자극 및 재생용 시브 전극

프 전극(Cuff electrode)을 발표하는 등 신경신호를 얻는 방법에 대한 연구가 주목받고 있다. 척수용 이식형 신경 소자에 대한 연구도 2010년부터 교육과학기술부의 미래유망파이오니어사업으로 지정되어 경희대학교, 아산병원과 협력 연구를 추진중이다. 특히 개발되고 있는 소자는 척수 재생을 돕는 지지체와 신경전극이 일체화되어 있어, 손상된 신경의 재생을 돕는 한편 신경 신호의 획득을 돕는 신개념의 신경소자다.

신경 기술 산업은 최근 큰 성장세를 보이고 있는 바이오기술(BT)로서 아직까지는 발전 초기 단계이나, 시장의 성장 가능성이 매우 크다. 현재 알츠하이머, 청각상실, 우울증, 사지마비 등 신경 시스템 손상으로 인한 질병과 장애로 인한 경제적 손실은 전 세계적으로 연간 1조 달러에 이르는 것으로 추정된다. 아직까지는 기술적 수준이 미성숙하여 시신경, 심혈관, 뇌, 비만, 신경재생 등의 신경 소자 시장은 전체 시장에서 차지하는 비중은 미미하지만 매년 20% 이상의 빠른 성장을 보이고 있다. 전문가들은 이 분야가 향후 연평균 100% 이상의 성장률로 급성장할 것으로 예측한다. 척수신경자극장치만 하더라도

‘뉴로인사이트(NeuroInsights)’가 발표한 2011년 신경기술 산업보고서에 따르면 향후 10년 이내에 시장규모가 100억 달러에 이를 정도다.

이식형 신경 소자 시장을 조기에 확대하기 위해서는 주요 기술 과제가 선결되어야 한다. 먼저 신경 조직에 이식되는 신경 소자의 특성상, 경질의 이식형 소자에 의해 연질의 신경 조직이 받는 손상이 최소화되어야 한다. 신경 신호 측정용 전극의 분해능과 밀도도 인공보철 장치의 입력 신호로 활용 가능한 수준으로 향상되어야 하며, 생체 전극 물질로 사용되는 백금 또는 이리듐 박막의 수명이 각종 염증 반응 및 생체 부식으로 인해 수개월 수준에 불과한 문제도 개선이 필요하다. 광 유전학을 이용한 뇌 심부 자극술의 경우 토끼, 원숭이 등과 같은 대동물의 목표 부위를 광자극에 반응하도록 유전적으로 안전하게 변화시키는 기술의 개발이 관건이다.

혈액 속 암 세포를 잡아낸다

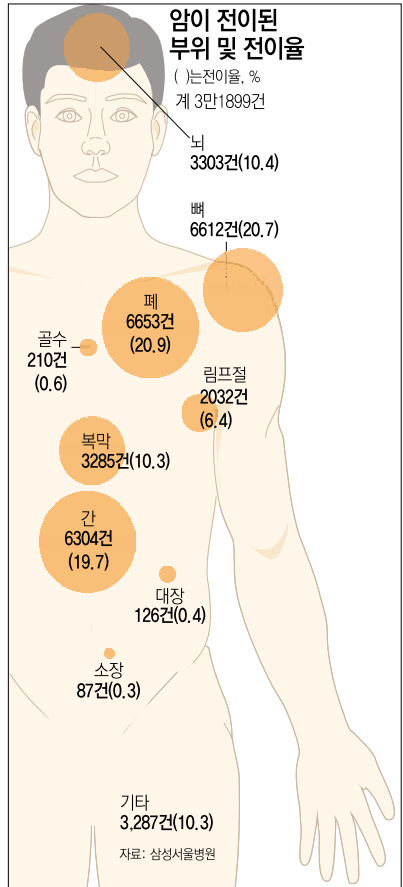
강지윤
(바이오마이크로시스템연구원)

수십 년간 암 치료를 위한 많은 연구가 진행됐고, 암에 대해 상당한 지식이 확보됐음에도 불구하고 암 사망률은 10년 전과 거의 비슷하다. 암에 걸려 사망하는 원인의 90% 이상이 암 전이에 있기 때문이다. 말기에 암이 발견되는 경우가 아니라면, '원발성 암'은 효과적인 항암제, 외과적 수술, 조기진단 등의 최근 의료기술로 거의 치료할 수 있다. 하지만 원발성 암에서 파생하는 '전이암'은 치명적이고 치료가 어렵다.

원발성 종양의 암세포는 그림과 같이 혈관 안으로 침투해 혈관 안을 돌아다닌다. 그러다가 다시 혈관 밖으로 나가는 과정을 거쳐 미세전이조직을 만들고, 이것이 점점 커져서 전이종양조직으로 발전한다. 결국 혈관 내를 돌아다니는 '혈중암세포(CTC: Circulating Tumor Cell)'는 암을 전이시키는 주요 인자로 암이 전이됐는지 진단하기 위한 마커로 임상에서 사용된다. 또 암 연구 측면에서는 전이를 막기

위한 목표로 중요한 의미를 가진다. 따라서 환자의 혈액에서 얻는 혈중 암세포는 신약개발, 질병진단, 발병예측, 개인별 맞춤형의료 등을 위한 모든 생물정보가 내재된 세포 단위의 바이오마커로 사용된다. 면역염색, FISH(Fluorescence In-Situ Hybridization), 염기서열분석, RNA 분석 등 각종 분자진단으로 혈중암세포를 분석해 특성을 파악하는 게 중요한 이유도 바로 여기에 있다. 그러나 불행하게도 혈액 1mL당 존재하는 혈액 세포는 약 10억 개인데 비해 혈중암세포는 겨우 수 개~ 수 백 개만 존재한다. 혈액에서 순수한 혈중암세포만 분리하는 게 기술적으로 매우 어려운 것이다.

최근 세유체 기술을 기반으로 혈중암 세포를 효과적으로 분리할 수 있는 기술이 개발돼 암전이 연구가 한결 수월해졌다. 일부 기기는 이미 상용화됐고, 많은 연구그룹들이 각자 독특한 방식의 분리방법을 개발했다. 민감도와 선택도가 모두 90% 이상인 분리기기가 개발됨에 따라 전이암에 대한 연구가 더욱 활발할 것으로 예상된다. 따라서 첨단 기술을 이용한 연구가 계속된다면 암 전이를 막을 수 있는 신약 개발



한국인의 암 전이 지도. 전이암은 치료가 어렵다.



영남대 의료원에 설치된 암 진단기. 50대 이상 한국인의 사망원인 1위가 암으로 조사된 만큼 암 예방과 치료 연구는 중요하다.

도 가능할 것으로 기대된다.

혈액 속 암세포만 잡으면 암 여부 알 수 있다

혈중암세포를 효율적으로 분리하는 기술은 세포표면에 있는 바이오마커를 이용하는 방법과 혈중암세포의 밀도나 크기 같은 물리적 특징을 이용하는 방법이 있다.

세포표면 바이오마커는 주로 EpCAM(Epithelial Cell Adhesion Molecule)을 사용한다. 매우 작은 자성 구슬(Magnetic bead)에 EpCAM 항체를 고정하고 항원항체 반응으로 혈중암세포를 분리하는 면역자기분리법이다. 이 방법은 베리덱스(Veridex)사의 셀서치™(CellSearch™)라는 제품으로 시판되고 있는데, 혈액 세포와 분

리되는 혈중암세포의 숫자를 암전이진단의 보조지표로 활용한다. 이 제품은 약 7.5mL의 혈액을 이용하며, 유방암의 경우 분리된 혈중암세포의 개수가 3개 이상일 경우 암전이가 일어날 가능성이 있다고 진단한다.

평균적으로 1mL 당 수십억 개의 적혈구가 존재하고 혈중암세포와 구별이 어려운 백혈구도 100만 개 정도 존재한다. 거의 100만 대 1의 확률로 혈중암세포를 찾아야 하므로 분리하고 숫자를 세는 게 기술적으로 매우 어려운 일이다. 따라서 밀도나 크기 같은 단순한 물리적 성질로 혈중암세포를 분리하는 경우 백혈구와 뒤섞여 혈중암세포의 순도가 상당히 낮을 수밖에 없다.

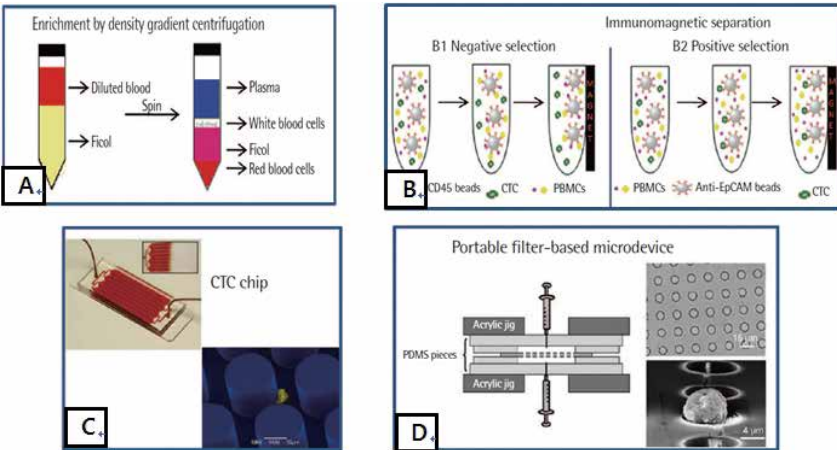
실제로 분리된 혈중암세포의 순도는 셀서치의 경우 0.01% 정도인 것으로 알려져 있다. 이를 보완한 기술이 하바드대 토너(Mehmet Toner) 교수팀에서 미세유체기술을 이용해 개발한 혈중암세포 칩이다. 이 칩은 직경 약 50 μ m 정도의 미세한 기둥이 바닥면에 있고 EpCAM 항체가 표면에 고정돼 있다. 미세기둥을 유체역학적으로 배열해 세포가 유체 내에서 이송될 때 기둥의 항체와 반응이 효과적으로 일어날 수 있도록 설계해 암세포를 잘 검출할 수 있다. 유방암, 대장암, 폐암 환자를 대상으로 실험한 결과 민감도와 선택성이 모두 90% 이상을 달성했으며 혈중암세포의 순도 역시 50% 이상으로 기존 기기에 비해 비약적인 성능을 보였다.

그러나 이 기술은 EpCAM 항체가 충분히 발현되는 암세포에 대해서만 효과적이다. 다른 암세포의 경우나 혹은 같은 암이라 할지라도 암세포 성질에 따라 EpCAM이 세포 표면에 충분히 발현되지 않는 것으로 알려졌다. 결국 이 방법으로는 전이를 일으키는 모든 암세포를

분리하는 데는 한계가 있다는 것이다. 그래서 최근에는 물리적 성질과 다중 마커를 이용해 혈중암세포를 분리하는 기술이 더욱 각광받고 있다. 분리된 mRNA나 단백질 수준에서 다양한 바이오마커를 개발하려는 노력들이 가속화되고 있는 것이다.

칩 속에 혈액 떨어뜨리고 암세포만 잡아라

국내외에서 혈중암세포를 분리하려는 연구그룹은 최근 3~4년 동안 급격히 늘어났고, 중소기업체를 비롯한 기업도 많아졌다. 특히 미세유체 관련 연구에 관한 연구논문도 꾸준히 발표되고 있다. 그러나 혈중암세포 분리의 주된 원리는 항체나 앵타머 같은 친화성을 가진 분자를 사용하는 방법과 밀도나 크기, 광학성질 등의 물리적인 특성의 차이를 이용하는 방법으로 크게 구분된다.



혈중종양세포(혈중암세포)의 분리기술

- (a) 밀도차이에 의한 분리기술 (b) 면역자성비드를 이용한 분리법
- (c) 미세기둥을 이용하여 분리하는 혈중암세포 칩 (d) 크기 차이를 이용한 필터 분리기술

항체를 이용해 분리하는 방법으로 가장 빨리 상업화되고 있는 혈중 암세포 칩은 생선 뼈 모양의 특수 구조(Herringbone)를 이용해 유동을 회전시켜서 바닥면에 미세구조물과 반응이 많이 일어나도록 하는 기술을 이용한다. 이 기술은 더 효율을 높인 제품으로 발전하고 있으며, 구조물의 배치를 수정해 큰 크기의 입자가 미세구조물과 효율적으로 반응하도록 하는 기술도 개발됐다. 이런 노력으로 인해 시료 안에 들어 있는 암세포를 분리하는 민감도는 80~90% 정도에 이르렀고 최근에는 순도도 60% 이상을 보여 주고 있다.

그러나 혈중암세포 칩은 EpCAM 항체로서 암세포를 분리하는데 한계가 있어 최근에는 앵타머(Aptamer)를 이용해 한계를 극복하려는 시도가 이뤄지고 있다. 앵타머는 다양한 종류의 표적물질을 스크리닝할 수 있으므로 암세포를 분리하는 효율을 높일 가능성이 있다. 게다가 바닥에 분리된 암세포를 손상 없이 정확히 분석하고자 할 때 앵타머와 친화력이 좋은 상보앵타머를 반응시켜 떼어낼 수 있으므로 세포의 활성도를 유지할 수 있는 장점이 있다.

물리적인 방법으로 세포를 분리하는 방법은 대부분 세포의 크기 차이를 이용한다. 따라서 크기를 분리하는 체(Sieve) 형태를 사용하거나 유동에서의 관성을 이용해 분리하는 방법이 주로 많이 발표되고 있다. UCLA 디 카를로(Dino Di Carlo) 교수의 레이놀즈수가 높은 빠른 유동을 이용해 암세포를 분리하는 기술, 연세대 정효일 교수팀의 MOFF(Multi-Orifice Flow Fractionation) 기법, 곡면채널에서의 관성을 이용하는 기법, 원형채널과 관성유동을 동시에 이용한 분리방법 등이 이용되고 있다.

자성체를 이용한 세포의 분리방법은 셀서치사에서 이미 상용화했으

나, 미세유체칩에서 구현하면 자기장을 접속해서 민감도와 선택성을 모두 향상시킬 수 있음을 보여 주는 연구결과가 발표된 바 있다. 자성나노입자를 혈중암세포의 EpCAM에 반응시키고 미세 홀센서(Hall detector)에서 혈중암세포를 정확하게 셀 수 있는 기술이 개발돼 임상에서도 쉽게 적용할 수 있게 됐다.

암세포의 표면특성을 이용한 방법으로는 나노벨크로가 있다. 채널 바닥에 나노선을 뿔뿔하게 성장시키고 그 위를 암세포와 정상세포가 지나갈 때 암세포만 나노구조물에 포획되는 것이다. 특정한 바이오마커를 이용하지 않아 혈중암세포 칩의 한계를 극복할 수 있는 대안으로 제시됐으나 아직 임상결과가 제시되지 않았다. 최근에는 광에 대한 특성을 이용하는 방법도 제시되고 있어 불균질한(Heterogeneous) 혈중암세포를 혈액세포 중에서 찾는 방법이 더 발전해 가까운 미래에 임상에서 사용될 것으로 기대된다.

혈중암세포 진단 정확성 확보해야

다양한 방법으로 분리된 혈중암세포를 실제로 이용하려면 혈액 내의 혈중암세포 수를 정확히 세야 한다. 이 자료는 암 전이에 대해 판정을 내리는 데 도움을 줄 수 있으며, 더 나아가 각 환자의 암에 대한 정확한 특성도 파악함으로써 암 전이도 막을 수 있다. 이런 노력은 지금도 계속되고 있으나 분리방법에 따라 암세포의 종류가 달라져서 환자의 암 상태를 대변할 수 있는지에 대해서는 아직 논란이 있다. 따라서 향후에도 분리방법과 임상적 의미와의 상관관계를 파악하는 연구가 계속돼야 할 것이다.

암 전이에 대한 검진은 모든 암 환자가 정기적으로 검사를 받아야 하

므로 검진 시장만 해도 수천 억 원에 달한다. 그러므로 혈중암세포를 이용한 진단이 암 전이에 대해 얼마나 정확한 정보를 줄 수 있는지가 가장 중요한 변수다. 2~3년 전만 해도 혈중암세포를 정확히 분리만 한다면 환자별 암에 대한 표적물질을 찾을 수 있을 것으로 예상했다. 하지만 생각보다 암세포의 특성이 복잡하고 예상치 못했던 다양한 표현형이 존재해 아직 전이진단에 사용할 수 있을 정도로 완성도는 높이지 못했다. 향후 5~10년 정도의 검증시간이 더 필요할 것으로 예상된다.

혈중암세포를 이용해 암에 대한 다양한 정보를 찾아내는 작업은 유전자 서열분석과 단백질 분석방법 등에 힘입어 크게 발전할 전망이다. 최근 들어 눈부시게 발달한 유전자 서열분석 등의 생명공학기술은 단일세포 수준에서 특성을 파악할 수 있는 수준까지 왔기 때문이다. 환자 맞춤형으로 치료에 필요한 생물학적 정보를 신속하고 정확하게 알아낼 것으로 예상되는 만큼 암 전이를 상당부분 지연시키거나 방지할 수도 있을 전망이다.

그러나 혈중암세포는 세포 수준에서 관찰하기 때문에 매우 다양한 수준에서 변화를 일으킬 수 있다. 분리된 세포의 다양성이 존재하는 경우에는 분석하더라도 잘못된 정보를 얻거나 불균질성이 생겨 정보라고 볼 수 없고 진단에도 이용할 수 없는 경우가 생길 수 있다. 이렇게 되면 혈중암세포가 가지는 생물학적 의미 자체가 부정되고 혈중암세포가 가상의 생물학적 모델로만 남게 될 가능성도 있다. 최근 나노소낭(Vesicle)을 이용한 암 진단 방법이 개발되고 있는데, 이것이 더 효율적이고 수치화가 쉬운 바이오마커로 개발되면 혈중암세포를 세는 분석방법이 비효율적일 수 있는 것이다.

생체 정보의 바다에 던지는 마이크로 그물, 다중센서

김상경
(바이오마이크로시스템연구단)

애플사의 성공신화를 이끌던 스티브 잡스는 2011년 10월 5일 많은 사람들의 안타까움 속에 56세를 일기로 사망하였다. 그의 삶이 IT 분야 곳곳에 뚜렷한 족적을 남긴 것은 두말할 필요도 없지만, 희귀한 췌장암과의 전투 끝에 맞이한 죽음 역시 생명공학 분야에서 예사롭지 않은 기록을 남겼다.

새로운 기술로의 항해를 즐긴 탐험가로서, 그는 인류가 가장 최근에 이룩해낸 단백질체학의 성과, 데이터베이스 기술, 그리고 고속 시퀀싱 기법을 통하여 암과 싸웠기 때문이다. 암을 극복하려는 전략으로, 그는 자신의 유전자 정보를 모두 읽고, 그 생물학적 특이성을 찾아, 자신에게 맞는 치료법을 만들어 적용하고자 했다. 아쉽게도 잡스가 자신의 병을 치료하는 데 성공하진 못했지만, 그의 유전정보는 이듬해 암환자 2명의 치료에 도움이 되었다고 전해진다.

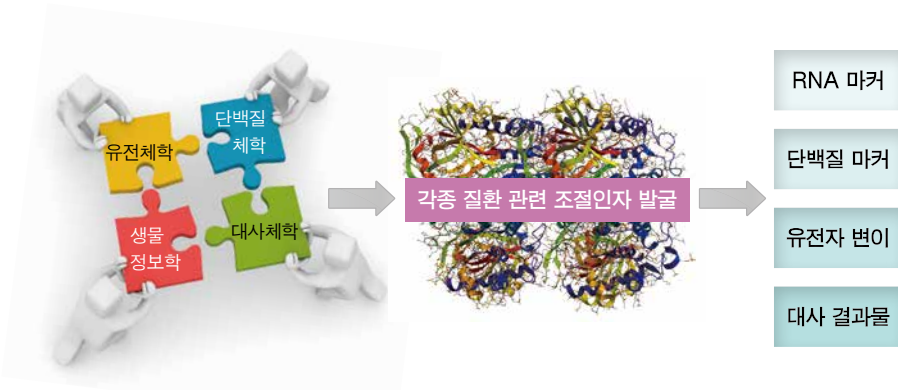
인간 게놈의 모든 기능을 규명하는 것을 목표로 컨소시엄을 구성



인간게놈프로젝트는 우리 유전자의 크기가 생각보다는 작다는 사실을, 유용한 정보는 유전자와 1대 1 대응을 통해서가 아니라 복잡한 조절을 통해 나온다는 사실을 알려주었다. 유전은 단순히 정보를 읽어내는 과정이 아니라 끊임없이 암호와 뜻이 상호작용하는 역동적인 작용이었던 것이다.

한 세계 30여 개 연구소 442명의 과학자가 미 국립 인간게놈연구소 (NHGRI: National Human Genome Research Institute)의 지원 하에 2003년부터 10년간 엔코드(ENCODE: ENCyclopedia Of DNA Elements)란 이름의 프로젝트를 진행했다. 2012년 9월에 발표된 이 프로젝트의 결과에 따르면, 인간 유전자의 5%까지 그 기능을 해독하였고, 존재 이유를 알 수 없던 98%에 해당하는 유전체 염기서열(Genomic sequence)이 결국 생체 내 주요 메커니즘을 조절한다는 사실이 확인됐다.

이에 따라 세포의 신호조절체계 역시 네트워크 수준까지 빠르게 밝혀



생물정보학의 발전에 따른 질환 표지물질(마커)의 다양화

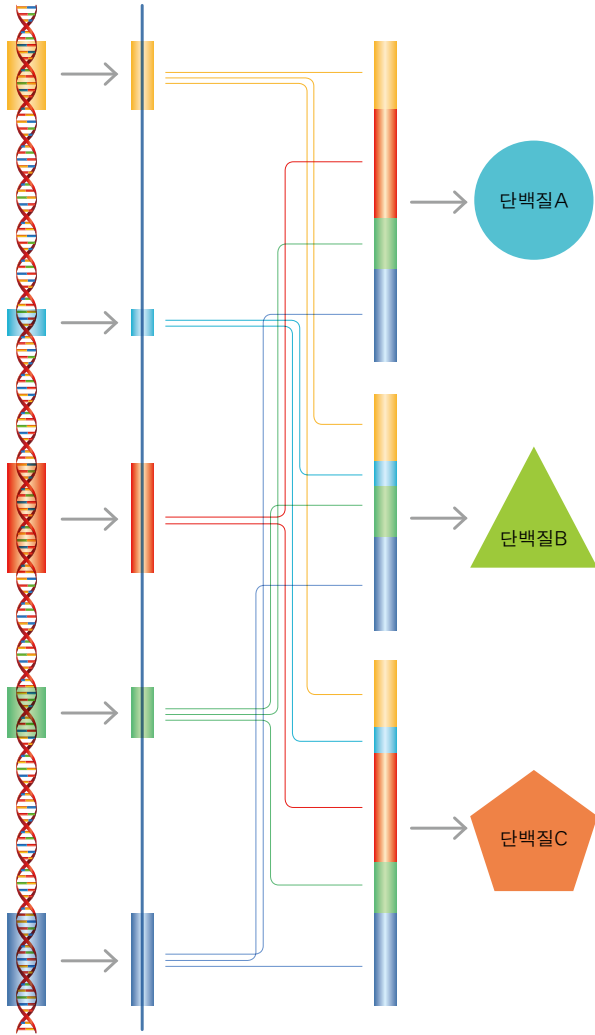
지고 있으며, 그런 토대 위에 질환에 관련된 단백질 마커의 정보 역시 더 빠르게 축적되고 있다. 잡스의 체장암이 3년 혹은 5년쯤 뒤에 발병했다면 어땠을까? 우리는 좀 더 오래 잡스의 상상력을 즐길 수 있었을지도 모르겠다. 물론 그의 라이벌에게는 재앙이 되었을 수도 있겠지만.

질병을 진단하는 새로운 방법

기대 수명이 증가하면서 고령의 인구 비율이 높아지고 의료비용이 사회적 지출에서 차지하는 비중도 지속적으로 상승한다. 치료에 드는 비용은 질병의 초기에 개입할수록 감소하며 환자의 삶의 질도 높아진다. 따라서 주기적인 검진을 통하여 조기에 질병을 찾아내는 기술은 일반적인 복지 향상에 핵심적이다. 질병 지도를 구성할 바이오마커는 이미 빠르게 확충되고 있다. 이에 대응하는 새로운 진단기술은 아직 정해지지 않았지만, 적은 양의 시료에서 다종의 동시 분석을 수행하는 것이 핵심적인 기능이 될 것이다.

하나의 DNA로 여러 단백질 만든다

단백질을 만들지 않는 부위(인트론)를 제거하는 과정에서 서로 다른 단백질이 만들어진다.



DNA로부터 단백질이 발현되는 과정에 대한 정보가 쌓일수록 특정 질병의 유전적 요인에 대한 정보도 풍성해진다. 이를 바탕으로 바이오마커를 이용한 진단과 치료 기술을 확보할 수 있다.

최근의 생물정보학은 하루가 다르게 진화하여, 앞으로의 진단기술도 획기적으로 변화시킬 것으로 전망된다. 질환에 관련된 유전자 변이 혹은 단백질 변화에 대한 정보가 기하급수적으로 밝혀지고, 개인의 유전형질에 따른 치료방법의 성공 여부도 폭넓게 보고된다. 이대로 간다면 우리는 수년 내에 특정 질환의 발병 여부뿐 아니라 각자에게 최적화된 치료방법을 제시하는 수백 종의 바이오 마커를 확보하게 될 것이다.

한 가지 바이오 마커보다 다종의 마커를 종합적으로 측정할 때 질병을 진단하기에 더 정확하다는 것은 여러 연구를 통하여 보고된 바 있다. 유방암의 경우 수십 종의 유전자 프로파일을 측정하는 키트가 이미 상용화되어 전이, 재발 혹은 화학요법의 감수성을 판별하는 데 새로운 기준이 되고 있다. 예를 들어 게놈 헬스 사(Genomic Health Inc.)의 Oncotype DX는 21개 유전자 패널을, 아젠디아 사(Agenzia Inc.)의 MammaPrint는 70종의 유전자 패턴을 이용한다.

대조군을 두고 진행한 다양한 연구(코호트 연구, 요인 대조 연구)에서도 단백질 마커의 개수를 수십 종으로 넓히면 진단의 정확도가 높아졌다. 최근 브리검-영 여성병원의 심혈관질환 연구는 35가지 지표를 이용하여 40~50%에 이르던 판별불가영역의 환자를 분류하였으며, 피츠버그 대학에서는 뇌암을 표적으로 60개 지표를 평가한 결과 25종 단백질 마커의 종합적인 분석이 가장 유리하다고 보고하였다.

그러면 미래의 건강검진 결과서는 지금보다 훨씬 정확하고 세밀하게 자신의 질환을 보여줄 수 있을까? 만일 우리가 잘 검증된 수백 종의 마커를 확보하고 이들을 통하여 건강검진을 하려한다면, 지금의 진단기술은 혈액 등의 시료를 환자로부터 수십 mL 이상 얻어야 하며



스웨덴 스톡홀름에 위치한 생명과학실험실의 모습. 생명과학실험실은 2015년까지 단백질 지도 초안을 완성할 계획이다. 단백질 지도는 인간 게놈 지도보다 의학적 가치가 훨씬 크다.

분석비용이 수십 배 증가하는 어려움에 부딪힐 것이다. 따라서 소량 시료를 이용하고 한 번에 다종의 마커를 검출할 수 있는 다중동시분석(Multiplex) 센서 및 시스템 기술에 대한 수요가 조만간 다가올 것이다. 연구단계의 몇 가지 플랫폼이 이미 상용화되었다.

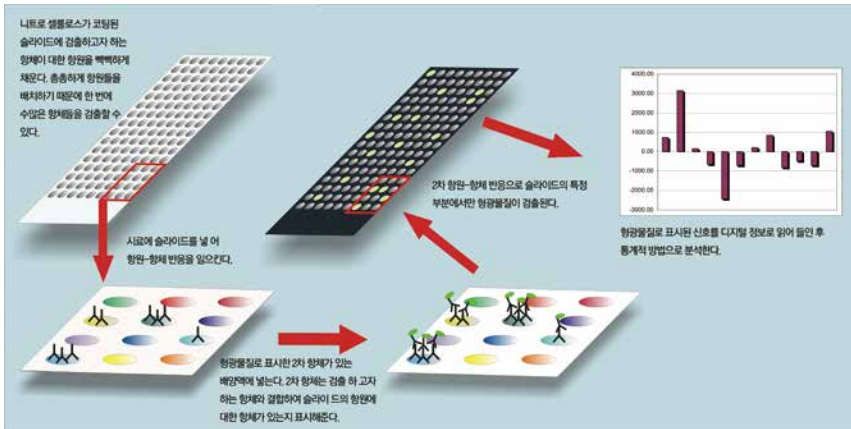
동시에 수백 종을 분석한다

전통적인 센서는 단일 시료에서 특정 화학종 한 가지를 측정할 수 있도록 단일한 수용체가 고정화되었다. 다중동시분석형 센서라면 하나의 시료에 대한 한 번의 분석으로 여러 종의 표적을 한꺼번에 알아내는 것을 말한다. 분석 기술로는 크로마토그래피 등의 분리 분석, 또는 레이저로 생체분자를 이온화시켜 분자량을 측정하는 방법(LDI-

MS)과 같은 질량 분석법으로 수십 종의 화학종을 동시에 분석할 수 있으나, 시스템이 크고 시료의 전처리와 구동이 까다로운 편이라 진단에는 매우 제한적으로 적용되고 있다.

그 외에도 화학적인 복합법(Multiplexing)을 활용한 다중 분석은 광범위하게 쓰였다. 주로 발광하는 형광 영역이 다른 여러 표지분자를 이용하여 각 색에 해당하는 표적물질의 농도를 확인하였다. 최근에는 양자점(Quantum dot)을 이용하여 동시에 6가지의 색을 측정할 수 있어서 이론적으로 6종의 표적 화학종을 단일 시료로 동시에 검출할 수 있다. 2000년대 초반까지는 마이크로어레이를 제외하고, 다중 동시 분석의 개수는 10여 종 내외에 머물렀다. 하지만 2005년도 이후, 기관 자체를 입자형으로 바꾸어 동시 다중 분석의 개수를 기하급수적으로 높이는 접근이 시작되었다. 수십 ~ 100여 종 정도의 표적 분자를 일시에 검출하기 위하여 개발된 이 기관은 서스펜션 마이크로어레이(Suspension microarray)라고도 불린다. 대체로 광학적 특성으로 구분되는 구형 입자, 비등방성 입자(Anisotropic microparticle)라고 불리는 바코드 입자를 비롯한 다양한 코딩방식을 적용한 예가 보고되었다.

입자형 기관을 이용하는 멀티플렉스 기술은 대체로 입자를 구분하기(Identification) 위한 인코딩 기술과, 입자를 정렬하거나 코드와 신호를 빠르게 읽는 기술로 구성된다. 입자의 동정(同定)에는 주로 형광 발색제의 조성을 달리하거나 라만 신호분자를 달리하는 분광학적 방법, 또는 바코드와 같은 이미지 프로세스를 통한 구분법이 쓰인다. 각 입자에는 각기 다른 종류의 표적을 선택적으로 잡아내는 수용체가 고정화되어 있다. 그 표적분자에는 또한 선택적인 형광 표지자

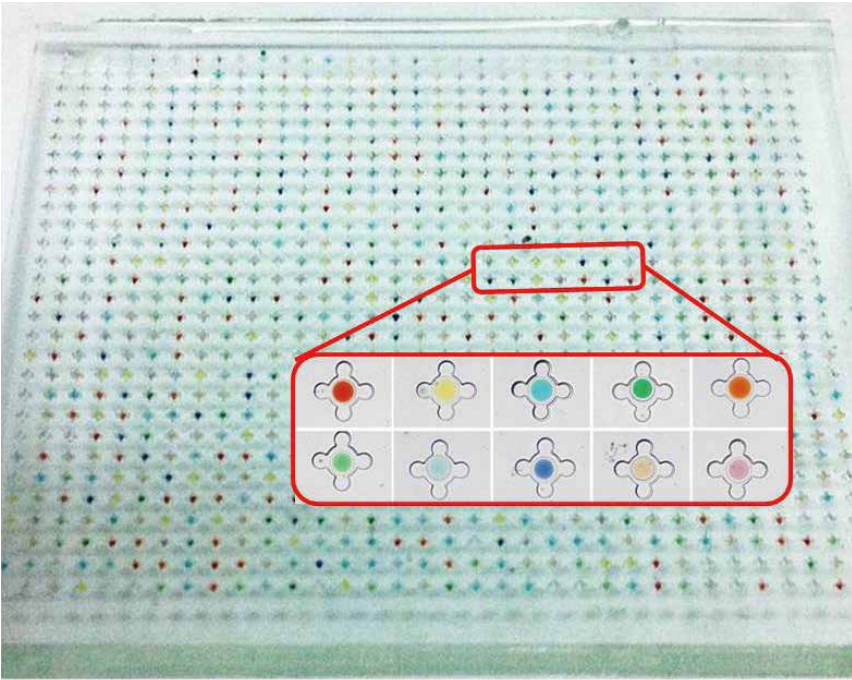


단백질 미세분석방법의 기본 개요도

가 결합하여 표적분자의 양적인 정보를 표시하게 된다. 이 경우 구분할 수 있는 입자의 종류가 동시에 분석할 수 있는 개수가 되며, 입자의 크기가 대체로 수십 마이크로미터, 즉 부피로는 수십 pL(10~12 L) 수준이므로 한 방울(약 50 μ L)의 시료로도 수백 종의 표적을 동시에 분석할 수 있다.

형광 입히거나 레이저 쏘다

입자형 기관(Suspended array)을 이용하는 경우 각 입자에 표현되는 신호가 어느 표적에 대한 것인지가 인코딩되어야 한다. 구형 입자를 이용할 때는 주로 광 스펙트럼으로 다중 입자를 구분할 수 있다. 어레이형 플랫폼에 비하여 유효 면적이 넓고 용액상(Homogeneous/Solution phase reaction) 반응과 같이 반응속도가 높고 선택성이 유지되며 표면반응에 의해 수용체를 고정화하는 다양한 방법을 활용할 수 있다. 그러면서 대량 제작하는 경우 비용이 저렴하고, 최근에 발전



미세입자가 조립된 바이오칩. 이를 이용하여 원하는 단백질을 정확히 분리해낼 수 있다. 서울대학교 권성훈 교수의 관련 연구가 2011년 주요 성과로 선정된 바 있다.

된 다양한 미세유로형 플랫폼을 이용하면 농축하거나 빠르게 측정하는 것이 모두 가능하다.

특히 광 스펙트럼을 이용한 경우 이미 안정적으로 개발된 광학 측정 기술을 활용하기 쉽고 코드 정보가 입자의 표면처리 과정에서 변질되지 않도록 안정된 것이 장점이다. 흔히 형광이나 표면증폭 라만 스펙트럼(라만 레이저)을 사용한다.

입자형 기관으로 현재 시장에 성공적으로 진입한 제품이 형광을 이용하는 루미넥스(Luminex)이다. 최근에는 루미넥스 플랫폼에 기반을 두고 다양한 질환을 진단하는 키트 기술에 대한 연구가 활발하게 보

고되고 있다. 3가지 파장 영역의 형광염료를 몇 단계의 농도로 구분하여 100여 종의 코딩이 가능한 플랫폼이다. 루미넥스의 경우 입자당 약 106개의 수용체 분자를 보유한 것으로 알려져 있는데, 유동 세포 측정(Flow cytometry) 기술을 이용하여 표적분자 결합에 따른 신호를 읽을 경우 신뢰성이나 감도의 측면에서는 손해를 보게 된다. 따라서 신호를 강화하고 측정의 신뢰성을 높이는 방향으로 후속 연구들이 집중되어 있다.

디지털 신호를 카운트한다

입자형 기판을 이용한 기존 측정방식이 유동 세포 기술을 기반으로 한 것인데 반하여, 미세유체기법으로 단일 입자를 배열하여 측정의 안정성과 배경신호 필터링을 통해 고감도 분석법을 구현하는 방법도 있다. 현재까지는 디지털 효소결합면역분석법(ELISA: Enzyme-Linked ImmunoSorbent Assay 또는 Enzyme-Linked ImmunoSpecific Assay, 항원-항체 반응을 이용하여 항원이나 항체의 양을 측정하는 방법)과 디지털 중합효소연쇄반응(PCR: Polymerase Chain Reaction, 핵산의 자기복제 기능을 활용하여 그 수를 기하급수적으로 증폭시키는 방법)의 두 가지 플랫폼이 보고되었다.

디지털 ELISA는 기판으로 이용되는 수 μm 크기의 입자에 검출하려는 물질과 결합하는 일차 항체를 붙이고 시료에 넣은 후, 다시 형광 물질로 표시한 항체를 넣어 특정 단백질을 검출하는 방법이다.

퀀터릭스(Quanterix) 사에서는 시모아(Simoa)라는 관련 제품이 개발되어 상품화되었다. fL(10~15L) 용량의 독립된 ELISA 신호를



루미넥스에서 출시한 호흡기 질환의 바이러스를 검출하는 시스템

카운트하여 정량적인 정보를 구한다. 기존 방식에 비하여 1,000배 정도 감도를 높이며 특히 신호의 재현성이 높은 것이 장점이다.

또한 디지털 PCR은 핵산의 단백질에 비하여 화학적 성질이 유사하고 용액의 조성이나 온도 등에 대하여 비교적 안정하여 다중 분석이 상대적으로 쉽다. 그러나 감염성 질환이나 유전자 변이 등을 검출할 때 표적이 되는 농도가 매우 낮아서 PCR 과정을 거치는 것이 일반적이다.

디지털 PCR은 디지털 ELISA보다 이른 1992년에 처음 제안되었으나 연구 수준에 머무르다 2002년에 미세유로를 이용한 플랫폼의 개발이 시작되면서 광범위한 관심을 얻게 되었다. 챔버 어레이에 희석된 핵산 시료를 넣고 형광측정 방식으로 핵산의 증폭을 검출하며 신호를 나타내는 챔버의 개수를 세면 핵산의 개수를 매우 적은 양부터 측정할 수 있으며, 단일염기서열의 변이도 매우 낮은 단계부터 측정

이 가능하다. 최근 캐나다 브리티시컬럼비아 대학은 메가픽셀 디지털 PCR에 대한 라이선스를 플루이딤(Fluidigm)사에 판매하여 상품화를 앞두고 있다.

바코드 입자를 동원한다

형상 코드를 이용한 입자의 인코딩 방식은 입자형 기판의 코드 종류를 수만 개 수준까지 확장하였고 재료도 매우 다양화시켰다. 이 기술들은 다시 나노미터 수준의 1D 인코딩, 수십 μm 이상의 크기를 가진 2D 형상을 이용한 인코딩, 그리고 미세유로를 이용한 동시동작(In-situ) 인코딩 방식으로 나뉜다.

코드를 읽는 시간이 어세이 속도를 결정하고 각각의 입자가 다중 분석을 위한 독립된 챔버로서 기능을 고려하면, 주로 수십 μm 이상의 크기를 가지는 입자가 적당한 크기이다. 나노바코드들이 주로 금속 혹은 금속산화물을 이용하는데 비해, 재료의 선택이 비교적 자유로운 마이크로 비드는 수용체의 고정화 반응에 유리한 폴리머나 유리로 구성되어 있다.

입자형 기판 기술의 선두주자인 루미넥스사와 경쟁하기 위하여 일루미나(Illumina)사는 베라코드(VeraCode)라는 둥근 막대 형태($24\mu\text{m} \times 280\mu\text{m}$)의 유리 입자에 홀로그래픽 인코딩을 도입한 제품을 출시하였다. 현재 1,000종까지 동시분석이 가능하여 단백질이나 핵산 분석에 적용되고 있다.

또한 어플라이드 바이오코드(Applied BioCode)사에서는 자성재료를 도입한 인코딩을 이용하여 BMD라는 사각 막대 형태($25\mu\text{m} \times 75\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$)의 입자를 개발하고 현재 4,000여 종의 동시분석이 가능한

수준이다. 이러한 바코드 형태의 인코딩 방식은 동시분석 범위를 확대하는 데 성공하였으나 검출 감도는 루미넥스와 유사하거나 그보다 미흡한 수준으로 알려져 있다.

다양한 코드입자를 빠르게 제조하는 방식으로 미세유로형 동시동작 인코딩 기술 역시 잠재력이 높다. 플렉시블 마스크를 이용하여 하이드로젤 입자에 수만 종 이상의 정보를 인코딩할 수 있어 정보량에서는 가장 우수한 플랫폼으로 보인다. 최근에는 이 기술을 이용하여 약의 상세한 정보를 담아 복제약이나 비인가 약품으로부터 소비자를 보호할 수 있도록 하는 아이디어도 발표된 바 있다.

멀티플렉스 센서 시장 공략하려면

유전체, 단백질체 등의 정보가 폭발적으로 증가하며 질환 관련 마커는 더 다양해지고, 다중동시분석에 대한 시장의 수요는 더 높아질 것이다. 특히 미국이 건강보험체계를 대폭 강화하여 공중의 복지에 기여하는 저가형 의료기술이 더 중요한 주제가 될 것으로 보인다. 다중동시분석을 통한 광범위진단, 조기진단은 건강보험의 건실한 운영에도 현실적인 기여를 할 것이므로 앞으로의 전망이 더 밝다.

또 이 분야의 기술적 토대라고 할 수 있는 나노재료 분야와 랩온어칩(Lab-on-a-chip) 등은 신생기술 영역인데, 전통기술 분야에 비하여 한국의 연구역량이 세계적인 경쟁력을 보유한 영역이다. KIST 역시 두터운 연구기반을 이미 확보하고 있다.

한국이 멀티플렉스 센서 분야에서 경쟁력을 가지려면 현재 시장에 나온 루미넥스, 일루미나의 플랫폼과 차별화된 성능을 구현할 수 있어야 한다. 현재로서 충분한 다중분석기능을 보유한 곳은 일루미나 제



일루미나의 베라코드는 검출하려는 물질마다 특정 코드를 부여하고 이를 읽어들이 분석한다.

품이지만, 반응 후 입자를 배열하고 신호를 읽어야 하는 제한이 있다. 따라서 다양한 타겟의 광범위한 어세이에 적용 가능한 입자 및 인코딩 방식이 개발되어야 한다. 또한 입자를 모으거나 빠르게 반응시키고, 안정적으로 코드 및 정량신호를 읽을 수 있는 미세유체 조절 기술이 함께 개발되어야 원하는 성능에 접근할 수 있다.

동시검출 성능은 현재 십여 종 수준이지만 향후 1,000여 종까지 확장될 수 있는 수요가 뚜렷하다. 특히 정량분석능이 뛰어난 디지털 ELISA와 디지털 PCR은 동시분석 가능한 종이 5개 정도에 머물고 있어, 이들 기술에 적합한 인코딩 방식의 개발이 필요하다. 현재까지는 패혈증 등 급성감염성 질환에 대한 진단에서 동시다종의 핵산 분석기술이 이미 제품으로 시장에 진입하였으나 단백질을 이용한 동시다종 진단기술은 아직 상용화된 예는 없다.

미래의 진단기술보다 가까운 적용 분야로 빅 데이터를 활용하는 대



질량분석기는 유용하고 잠재력도 높은 장비지만 아직 덩치가 크고 비싸서 널리 보급되기 어렵다. 그러나 관련 기술 개발로 차츰 사용처가 넓어질 것으로 보인다. 한국기초과학지원연구원에서도 주목할만한 성과를 내고 있다.

표적인 예인 코호트 연구는 질병관리본부에서 이미 시작하여 수년째 진행 중이다. 한국은 특히 단일한 건강보험체계를 안정적으로 구축하여 경쟁력이 높은 환경을 이미 보유한 것으로 평가된다. 이때 분석에 필요한 비용이 높으면 분석대상의 개체 수나 통합정보를 위한 분석항목을 키우는 데 한계가 있다. 따라서 연구용 플랫폼으로서 멀티플렉스 센서 역시, 분석 비용을 획기적으로 줄이는 방식이어야 한다. 또한 측정기술에서는 적용분야에 따라 안정성과 감도가 아직 불완전하다. 그러므로 나노재료 기반을 이용하여 다종 동시 분석을 빠르게 개선해 나갈 것이다. 2000년대 중반에 본격적으로 등장한 입자형 기판은 비교적 짧은 기간 내에 미세유체기술을 이용한 멀티플렉스 센서

등 몇 가지가 이미 제품화되었으며 빠르게 진단시장에 접근해가고 있다.

단백질 다중동시분석의 경우, 경쟁기술인 질량분석기반(MRM, Affinity based MALDI-MS) 어세이는 다중 분석에 잠재력이 높은 기술이나 현재까지는 진단에 필요한 안정적 정량분석을 구현하지 못하였고 질량분석기 자체도 고가여서 진단기술로의 진입은 지체되었다. 그러나 질량분석을 이용한 어세이를 안정화하려는 노력도 계속되고 장비가격은 기술 발전과 함께 하락하고 있다. 따라서 수십 종 수준의 다중분석의 경우 질량분석법과 멀티플렉스 센서 기술이 경쟁하게 될 것으로 보인다.

또한 핵산 분석 분야의 경우, 현재 빠르게 발전하고 있는 NGS(Next Generation Sequencing: 유전체 전체의 염기서열을 읽어내는 고집적 분석기술) 기술과 경쟁하여 비용, 정확도, 정보량 등에서 각각 특화된 분야로 변모해 갈 것으로 예상된다.

세계 각국에서 질병 진단을 위해 생체 정보의 바다에 '멀티플렉스 센서(다중센서)'라는 '마이크로 그물'을 던지는 경쟁은 이제 막 시작된 셈이다.

Nanomaterial

Part 4

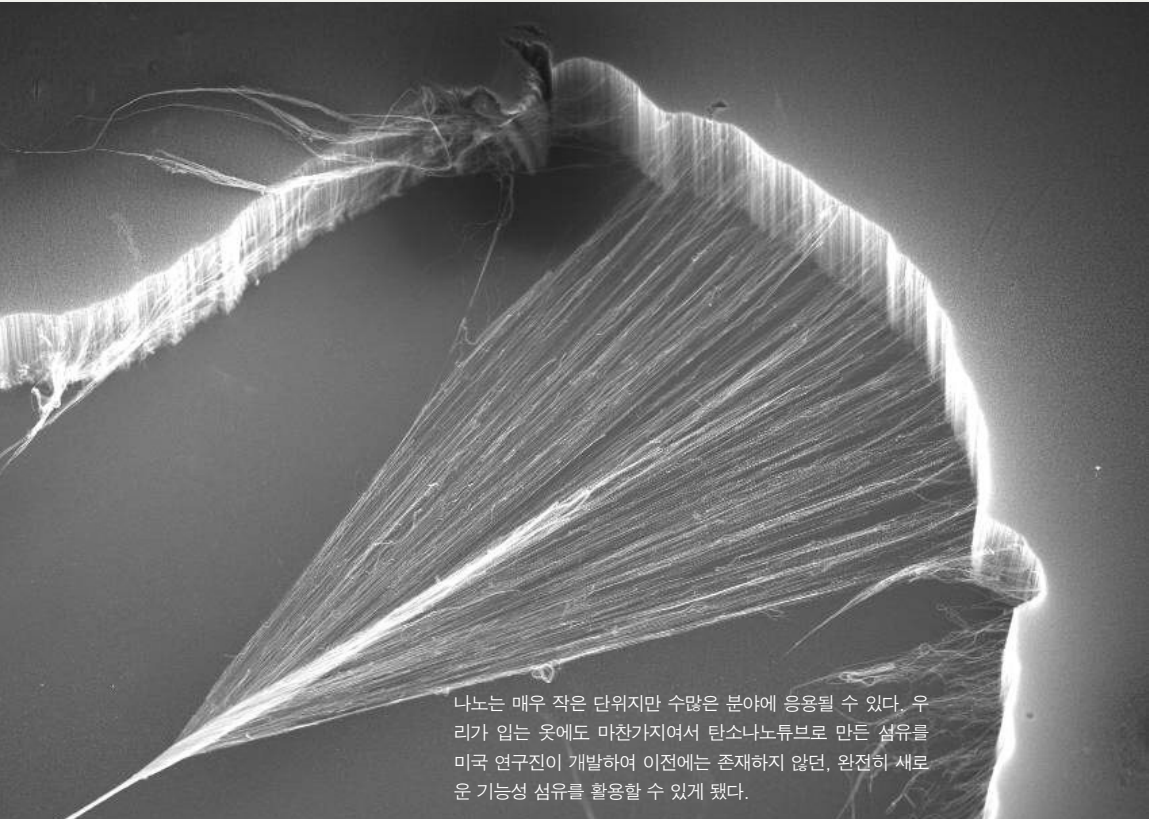
나노재료 · 소자



- 전망 16 가볍고 잘 휘어지는 유기반도체 소재
- 전망 17 사람 같은 근육을 가진 로봇을 만들 수 있을까?
- 전망 18 태양빛을 모아 깨끗한 에너지 만드는 유기물질
- 전망 19 내 몸보다 더 편안한 의료기구 만들기
- 전망 20 움직이기만 하면 충전이 된다?
- 전망 21 흙이 만드는 지속가능한 미래사회

Intro 가장 작은 곳에서 찾은 멋진 신세계

나노기술은 나노미터 수준에서 물체를 만들고 조작하는 기술을 통칭하는 말이다. 보는 시각에 따라 차이는 있지만 '100nm 이하의 극미세 물질을 조작하는데 이용되는 기술과 공정'으로 정의할 수 있다. 나노기술의 극한은 원자 또는 분자를 하나씩 인위적으로 제어하는 것이며 생명이나 물질을 근원적으로 창출하는 방법을 찾아내는 것이기도 하다.



나노는 매우 작은 단위지만 수많은 분야에 응용될 수 있다. 우리가 입는 옷에도 마찬가지로 탄소나노튜브로 만든 섬유를 미국 연구진이 개발하여 이전에는 존재하지 않던, 완전히 새로운 기능성 섬유를 활용할 수 있게 됐다.

나노기술은 단순히 기존 기술의 연장선상이 아니다. 과학기술적 한계를 뛰어넘을 수 있는 혁신형 기술로서 미래에 새로운 기술과 산업 분야를 창출할 수 있는 잠재력이 큰 기술이다. 또한 나노기술은 기존의 물리, 화학, 생물, 재료, 전자 등과 같은 기술분야들을 횡적으로 연결함으로써 새로운 기술영역을 구축하여 기존 인적자원과 학문분야간 시너지효과를 유도한다. 의료건강, 정보통신, 국가안보, 교육, 신소재, 환경 등에 광범위하게 응용되어 분자소자, 나노튜브소자, 바이오칩, 신약, 형광체 등의 새로운 경계학문 영역을 확장시키기도 한다.

나노기술은 크게 기존의 가공방식인 재료를 나노미터 수준으로 깎고 다듬어서 소형화하는 '하향식'(Top-down)방식과 원자나 분자의 수



나노 소재는 IT 분야에서 특히 주목받고 있다. 지난 2011년 노벨상의 주역인 그래핀은 탄소나노구조를 이용한 신소재로서, 차세대 반도체 소자로 기대를 모으고 있다.

준에서 물질들을 조작하고 만들어 새로운 성질과 기능을 가진 구조체를 형성하는 '상향식'(Bottom-up)방식으로 구분할 수 있다.

나노기술 중에서 나노재료기술은 재료의 결정, 두께, 직경 크기가 나노단위 수준으로 작아지도록 물리, 화학적 방법을 통하여 제조하는 기술이다. 여기에는 그래핀, 탄소나노튜브처럼 새로 등장한 신소재 뿐 아니라 금속, 세라믹스, 고분자 재료들의 결정을 매우 작게 제어한 나노결정재료, 반도체성 등 다양한 전자기능을 발현하는 박막재료 등 많은 재료들이 포함된다.

본 장에서는 다양한 나노재료기술 중 최근 중요성이 높아지고 있는 대표적인 나노재료인 유기반도체소재, 고분자 액추에이터소재, 광전변환 고분자소재, 생체의료용 소재, 압전 세라믹스, 엔지니어링 세라믹스를 선별하여 기술동향 및 전망을 소개하였다.

이 나노재료들은 새로운 전자통신제품, 로봇, 태양에너지 활용제품, 다양한 의료생체제품 등에 응용되어 우리들의 삶을 더욱 풍요롭게 해줄 것이다.

2011년 한국산업기술진흥원이 발표한 나노융합기술 로드맵의 개요. 정부는 나노 분야를 차세대 핵심 전략 기술로 지정하여 체계적으로 육성하고 있다.

비전 **나노융합산업 3대 강국 도약**

- 목표**
- 세계시장 점유율 : 3%('09)⇒10%('14)⇒15%('18)
 - 전문기업 육성 : 200개('09)⇒400개('14)⇒600개('18)
 - 중핵기업 육성 : 3개('09)⇒8개('14)⇒12개('18)
 - 세계 최고 원천융합기술 및 혁신제품 창출 : 11개('09)⇒25개('14)⇒40개('18)
 - 나노융합산업 전문인력 고용 : 7,000명('09)⇒14,000명('14)⇒40,000명('18)

- 전략**
- | | | |
|--|---|---|
| <p>수요지향형 핵심 R&D 추진</p> <ul style="list-style-type: none"> • 쌍방향 기술청사진 운영 • 나노융합 20 프로그램 추진 • 목적지향적 원천 및 기초연구 | <p>산학연 협력 추진 주체 정립</p> <ul style="list-style-type: none"> • 나노융합산업기술센터 설립 • 중간조직 활성화 • 정보인프라 구축 | <p>산업화 촉진시스템 구축</p> <ul style="list-style-type: none"> • 민간인증제 도입 • 안전관리기준 확립 • 표준화 |
|--|---|---|



경제사회의 지속가능 발전을 위한 녹색성장동력 확보

Top Brand

그린융합전원	전자방출소재	투명반도체용 장비	고효율 발광소자	생체이미징용 프로브

가볍고 잘 휘어지는 유기반도체 소재

백경열 · 양희창
(물질구조제어연구단)

현대 정보기술의 핵심이 되는 반도체 산업에서는 무기물인 실리콘 소재가 메모리 및 비메모리 반도체, 디스플레이, 태양전지, RFID(Radio Frequency IDentification) 등 대부분의 제품들에 응용되고 있다. 하지만 실리콘 기반 반도체 소재는 반도체 제작에 복잡한 사진식각 공정이 요구되고, 낮은 내충격성과 고온 공정으로 말미암아 유연성이 요구되는 플라스틱 기판 등 다양한 제품군에 적용이 어려운 단점이 있다.

반면 탄소끼리의 결합으로 이루어진 유기반도체 소재는 가공이 용이하여 생산원가를 절감시킬 수 있다. 또한 유기소재라는 특성상 유연성이 뛰어나고 무게가 가벼워 차세대 반도체 산업에 매우 적합한 소재로 부각되고 있다. 플라스틱 전자소자 기술은 차세대 반도체 기술로서 미국 MIT 선정 10대 유망기술, IDC(International Data Corporation)의 향후 10년 내에 세상을 바꿀 9가지 신기술 가운데



실리콘 소재는 현대 정보기술의 핵심이다. 그러나 실리콘 기반 기술이 한계에 이르면서 새로운 소재에 대한 요구가 커지고 있다.

하나로 선정되었고, IT 융합부품 기술분야의 차세대 유망 기술로 각광받고 있다.

대표적인 유기반도체 소재를 이용한 응용소자가 유기전계발광소자(OLED: Organic Light Emitting Diode), 유기박막트랜지스터(OTFT: Organic Thin Film Transistor), 유기태양전지(OSC: Organic Solar Cell), 전기변색표시소자(ECD: Electro Chromic Device) 및 RFID 등이다. 이들은 현재 다양한 제품에 사용되고 있다. 그러나 아직은 실용화 초기단계에 있어 기존 실리콘 반도체 산업의 대안으로 내세우기에는 부족한 감이 있는 것도 사실이다.

제어가 자유로운 단분자 유기반도체..., 안정성이 속제

◊ 유기반도체 소재를 이용한 기술 적용 가능 분야(House of Commons (Innovation, Universities, Science and Skills Committee), 'Engineering : turning ideas into reality', Fourth Report of Session)

해당 기술	기존 기술 대비 이점	응용분야
유기발광다이오드 (OLED)	<ul style="list-style-type: none"> • LCD대비 : 경량, 얇은 두께, 저전력소비, 광시야각, 넓은 작동 온도 범위, 고속스위칭 • 일반 조명 대비 : 장수명, 내환경성, 저전력소비 	<ul style="list-style-type: none"> • 디스플레이 : 휴대전화, 텔레비전, MP3 플레이어 • 조명 : 기존 형광등 및 백열등의 대체 가능
유기태양전지 (OSC)	<ul style="list-style-type: none"> • 경량, 유연성, 롤투롤 공정 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 재생 가능한 전기에너지의 생산
무선 인식 (RFID)	<ul style="list-style-type: none"> • 전체인쇄 공정 또는 칩리스 태그를 통한 생산원가 절감 	<ul style="list-style-type: none"> • RFID 태그를 이용한 생산 관리체계에서의 제품 인식
비발광식 반사형 디스플레이 (E-Paper)	<ul style="list-style-type: none"> • 유연한 플라스틱, 금속 혹은 종이 기관 위에 디스플레이 제조 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 휴대전화, 태블릿 PC, 이북리더 등 모바일기기에 휘어지는 LCD 디스플레이 적용
센서	<ul style="list-style-type: none"> • 플라스틱 전자회로의 인쇄 공정을 통한 전자칩 및 센서의 원가 절감 	<ul style="list-style-type: none"> • 내용물을 표시하는 인텔리전트 패키징, 의료용 진단센서, 특정 피부암의 광역학적 치료를 위한 유연한 패치

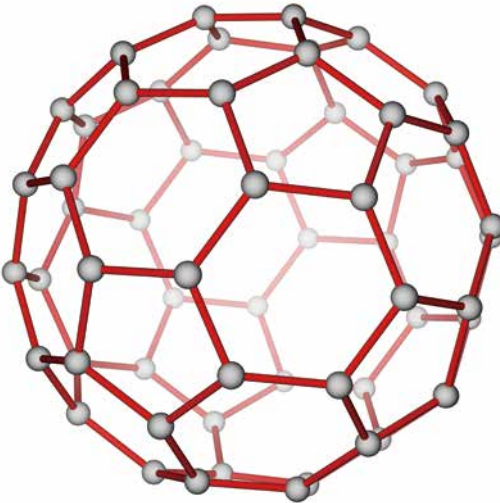
일반적으로 소재 선택의 한계가 있는 무기반도체에 반해 유기반도체는 분자설계를 통해 밴드갭, 용해도 등의 물리화학적 특성을 조건에 만족하도록 제어할 수 있다. 하지만 공유결합을 통해 분자를 이루는 무기반도체와 달리, 유기반도체는 상대적으로 결합력이 약한 반데르발스 결합을 이루고 있다. 따라서 전하이동경로가 불안정하고 구조적 결합이 있기 때문에 전하이동에 제약을 받는다.

유기분자는 파이(π)전자가 원자의 한 쪽으로 치우치는 특성으로부터 반도체 성질을 나타낸다. 따라서 유기분자는 대부분 전자를 제공하는 특성을 갖고 있다. 지금까지 보고된 많은 유기단분자 반도체소재는 전자를 내어놓고 정공을 보유하는 p-형 반도체의 특성을 보였으

며 이들의 전계효과 이동도는 비정질 실리콘의 정공이 이동하는 정도와 비슷하거나 보다 높은 값을 보여주고 있다.

p-형 유기반도체 소재로 가장 활발히 연구되는 것은 펜타센(Pentacene)이다. 이 소재는 상온 진공증착이라는 공정을 거쳐서 얇은 결정성 막을 만들며 전기적 특성이 우수하여 자주 사용된다. 그러나 대기 중에서 안정성이 낮은 편이고 유기용매에 잘 녹지 않아 일반적인 용액 인쇄공정으로 양산하기는 어렵다.

이러한 단점을 극복하기 위해 다양한 펜타센 유도체와 유사체가 개발되고 있다. 이들 가운데 파이센(Picene)은 펜타센의 이성질체로 대기에 안정한 편이다. 펜타센 분자구조 중 하나의 벤젠고리를 티오펜(Thiophene)으로 치환한 유도체들 또한 대기에 안정하고 높은 전하 이동도와 비교적 낮은 문턱전압을 나타내 반도체로서 우수한 성질을 보여준다. 이외에도 새로운 소재 확보와 소자성능 개선을 위한 연구



탄소가 축구공 모양으로 결합한 풀러렌은 반도체로서 우수한 성질을 지녔다. 단분자 유기반도체들은 원래 형태로는 약간씩의 결합이 있어 이를 개선한 유도체를 주로 사용한다. 풀러렌 역시 PCBM이라는 형태로 이용된다.

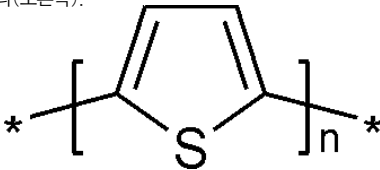
가 활발하게 이루어지고 있다.

n-형 유기반도체 소재에 대한 연구는 미미한 편이다. 현재 n-형 유기반도체 중 가장 많은 연구가 이루어지고 있는 소재는 페릴렌디마이드(Perylenediimide) 유도체가 있다. 이 유도체 중 분자 양단에 옥틸(Octyl)기와 트리데실(Tridecyl)기가 치환된 PTCDI-C₈와 PTCDI-C₁₃은 전하이동도가 높다. 이들은 진공증착뿐 아니라 알킬(Alkyl)기의 치환반응으로 용액공정 역시 가능하여 가공성이 좋다. 이와 함께 풀러렌(Fullerene) C₆₀은 진공증착을 통해서만 고성능 박막을 형성할 수 있지만 기판온도에 따라 결정성과 형태 제어가 가능하다. 또한 C₆₀을 유기용매에 잘 녹도록 개선한 PCBM은 전자와 정공 이동 특성이 모두 뛰어나므로 양쪽성 유기박막트랜지스터, 또는 유기태양전지 연구에 널리 사용된다.

고분자 유기반도체, 전하이동성 향상이 숙제

유기고분자 반도체소재는 일반적으로 단분자 소재와 달리 높은 분자량의 거대분자가 배열되므로 전하가 내부에서 잘 이동하지 않는다.

폴리티오펜 단위체인 티오펜. 오각형은 탄소 다섯 개가 고리 모양으로 결합했음을 뜻한다. 탄소 중 하나가 황으로 대체되어 있다. 티오펜이 여러 개 나란히 결합하면 폴리티오펜이 된다(왼쪽.) 폴리티오펜은 자외선을 비추었을 때 형광성을 나타내어 형광물질로도 종종 이용된다(오른쪽).



Wikimedia Commons

그러나 단분자 소재의 증착공정과 달리 유기용매를 사용한 잉크화가 수월하여 용액 프린팅 공정으로 간단하게 플라스틱 표면에 반도체 소자를 입힐 수 있다.

용액 필름공정에는 용매 선택, 용액 농도, 공정조건, 온도, 기판 표면 성질 등 많은 변수가 존재하며 이에 따라 유기반도체 박막의 결정성과 결정배향, 모양 변화가 일어난다. 이 변화는 소자 내 전하이동에 매우 큰 영향을 주므로 구조 제어를 통해 전하이동도를 향상시키는 연구가 주로 진행되고 있다.

대표적인 고분자기반 p-형 유기반도체 소재에는 폴리티오펜 (Polythiophene) 계열, 폴리페닐렌 비닐렌(Polyphenylene vinylene) 계열, 폴리플루오린(Polyfluorene) 계열, 폴리트리페니아민(Polytriphenylamine) 계열 등이 있다. 폴리티오펜 계열인 P₃HT는 초기에는 입체구조가 규칙적으로 나타나지 않아 전기적 성질이 열악했다. 그러나 P₃HT를 규칙적으로 배열되도록 합성하는 방법이 보고된 이후 많은 연구가 진행되어 전기적 특성은 상당히 개선되었다.

그러나 P₃HT는 외부 가시광선이나 자외선에 노출될 때 산화반응을 통해 쉽게 광표백현상이 일어나는 단점이 있다. 최근에는 이러한 단점을 보완하기 위해 P₃HT를 변형한 고분자 물질이 등장하여, 산화작용에 강하고 전기적 성질도 우수한 소자가 개발되고 있다. 다만 효과적으로 균질적인 결정을 만들려면 100도 이상의 고온 공정이 필요하고 용해도가 기존의 P₃HT보다 떨어져서 용액 프린팅 공정에 이용하기 어렵다. 이에 비해 폴리페닐렌 비닐렌 계열과 폴리플루오린 계열은 산화안정성이 우수하지만 전하이동도가 낮아 주로 유기발광 소재



삼성전자가 최근 발표한 원도8폰. 유기소자를 이용한 플렉서블 디스플레이를 도입했다. 유기반도체소자 기술이 발전하면 향후 플렉서블 디스플레이는 IT 업계의 주요 트렌드로 자리잡을 것으로 전망된다.

로 이용된다.

n-형 유기반도체 고분자소재는 단분자와 마찬가지로 그 연구가 활발히 진행되고 있지 않다. 합성이 비교적 어렵고 특성상 산화 안정성이 매우 떨어지기 때문이다. 최근 NDI(Naphthalene-bis dicarboximide) 중합체가 대기 중 안정성이 우수하고 매우 높은 전하이동도를 나타내서 n-형 유기반도체 고분자소재 연구는 새로운 국면을 맞게 되었다.

거대하게 열릴 미래 시장 준비해야

아직까지 유기반도체 소재를 사용한 유기 전자부품은 효율이나 안

정성 면에서 실리콘 기반 전자부품보다 떨어지기에 당장 제품화하기는 어렵다. 그러나 2007년 니케이 전자에서 보고한 플라스틱 전자기술 로드맵에 따르면, 유기반도체 소자의 전하이동도와 주파수 특성이 크게 향상되는 2020년 이후에는 플라스틱 소자가 대부분의 실리콘 기반 소자를 대체할 것으로 예측된다. 이러한 로드맵을 따라가려면 무엇보다 우수한 소재가 개발되어야 하는데, 그 중 핵심소재인 유기반도체 소재, 특히 가공성과 안정성이 뛰어난 고분자 소재 개발이 가장 중요하다.

그러나 아직까지 열, 습기, 산소와 같은 외부환경에 대한 유기반도체의 저항성이 부족하고 산화에 따른 소자 성능저하 등 해결할 문제가 많다. 따라서 유기반도체 소재와 같은 능동형 소재 개발뿐만 아니라 이를 다양한 외부환경으로부터 보호해줄 수 있는 봉지재와 같은 수동형 소재도 병행되어 개발되어야 한다.

사람 같은 근육을 가진 로봇을 만들 수 있을까?

구종민(물질구조제어연구단)

액추에이터(Actuator)란 기계장치의 ‘근육’을 말한다. 전기를 받아 로봇을 움직이게 만드는 구동장치다. 흔한 전기모터부터 시작해 기름의 압력을 쓰는 유압식, 공기의 압력을 쓰는 공압식 등 다양한 액추에이터가 개발되어 쓰이고 있다.

최근에는 이런 액추에이터를 넘어서서 특수 소재로 액추에이터를 만들려는 연구도 진행되고 있다. 정말로 동물의 근육과 비슷한, 부피가 작고 효율도 높은 액추에이터를 개발하려는 시도다.

고분자 액추에이터 연구는 크게 세 가지 정도로 나눌 수 있다. 전기활성세라믹(EAC: ElectroActive Ceramic), 형상기억합금(SMA: Shape Memory Alloy), 전기활성고분자(EAP: ElectroActive Polymer) 정도다.

물론 저마다 장단점이 있다. 세라믹소재는 보통 ‘압전소자’ 방식을 많이 쓴다. 응답속도가 빠르고, 계산했던 만큼 정확히 움직이며, 힘도



액추에이터는 힘을 전달하여 기계장치를 움직이는 모든 것을 말한다. 흔히 보는 자전거의 체인, 기어, 와이어 등이 모두 액추에이터다.

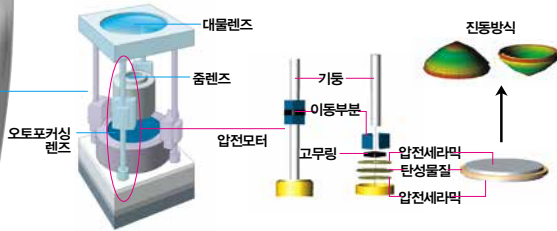
센 편이다. 하지만 ‘작동변위’가 작다는 게 문제다. 큰 동작을 하는 기계장치를 만들 때 불리하다는 것이다. 형상기억합금은 작동변위가 크고 전기를 적게 쓰는 장점은 있지만, 응답속도가 너무 느린 게 단점이다.

최근 가장 주목받는 분야는 전기활성고분자 방식이다. 이 방식은 응답속도도 빠르고, 작동변위도 크며, 전기소모량도 낮다. 특히 이 소재는 가공성이 뛰어나 경량화, 박막화, 소형화 등에도 장점이 있다. 이 전기활성고분자를 응용한 것이 한 때 잘 알려졌던 ‘햅틱 기술’이다. 각종 디지털기기에 진동이나 힘, 충격을 주어 사용자가 촉감을 느낄 수 있게 하는 기술이다. 휴대전화나 마우스, 카메라 등에 많이 쓰인다. 얇은 판 형태로 만들어 평판 스피커 등으로 만들 때도 쓴다. 전기활성고분자 방식은 금속이나 세라믹 등의 재료와는 달리 인체



휴대전화 카메라의 압전모터 작동 원리

일부 휴대전화 카메라에는 압전체가 들어간 선형모터가 4개 장착돼 줌렌즈와 오토포커싱 렌즈를 앞뒤로 이동시킨다. 선형모터 뒤쪽에 있는 압전체들은 전기가 흐를 때 1초에 수천 번씩 제자리에서 진동하며 렌즈가 걸려 있는 양쪽 기둥을 하나씩 앞뒤로 흔든다. 예를 들어 앞으로 느리게, 뒤로는 빠르게 진동시키면 관성에 따라 렌즈는 앞으로 이동한다.



근육과 비슷한 탄성과 강도를 가지고 있는 것도 장점이다. 인공 근육이나 생체 모방 작동기로서 응용성이 높다.

인공근육 움직이는 힘. 전기이온 vs. 전기장 어떤 것이 좋을까

전기활성고분자의 작동방식은 크게 두 가지로 분류된다.

하나는 전기 이온을 이용한다. ‘이온성 전기활성고분자(Ionic EAP)’ 방식이다. 전기 이온의 이동과 확산에 의해 고분자가 수축-팽창 변형을 일으키는 원리다. 외부 전기장을 이용하는 전자성 전기활성고분자(Electronic EAP) 방식도 있다. 이 방법은 전자 분극(Polarization) 현상을 이용한다. 전기장이 가해지면 원자핵 주위를 도는 전자의 움직임이 커져 물질에 변형이 생기는 현상을 이용하는 방식이다.

물론 이 두 가지 방식도 다양한 응용기술이 존재한다. 흔히 ‘탄소

나노튜브(CNT: Carbon NanoTube)'라는 이름으로 불리는 신소재도 이온성 전기활성고분자 중 하나다. 이 밖에 전기유변유체(ERF: ElectroRheological Fluid), 전도성 고분자(CP: Conducting Polymer), 이온성 고분자-금속 복합체(IPMC: Ionic Polymer-Metal Composite), 고분자겔(IPG: Ionic Polymer Gels) 등 다양한 소재가 연구되고 있다.

이 방식은 전기가 통하면 구부러지는 특성이 있다. 로봇 관절 등의 앞뒤로 붙여 둔다면 전기흐름을 조작해 팔다리를 움직일 수 있는 것이다. 그러나 힘이 약하고, 정교한 변위조절이 힘든 것이 단점이다. 하지만 낮은 전압에서도 잘 움직이는 장점이 있으므로 개선방안도 여러 곳에서 연구 중이다. 이온전도도가 높은 전기활성고분자 및 전기화학적 안정성이 우수한 시스템에 대한 개발이 진행되고 있다.

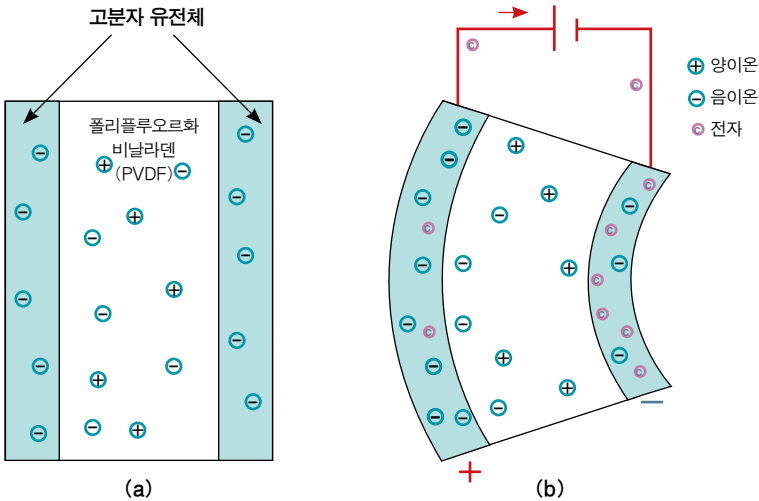
전자성 전기활성고분자는 반대로 많은 전기를 소모한다. 대신 응답속도가 빠르고 정교한 변위조절이 가능한 것이 장점이다. 액정탄성체(LCE: Liquid Crystal Elastomer), 전기-점탄성 탄성체(Electroviscoelastic elastomer), 전기변형종이(Electrostrictive paper), 전기변형탄성체(Electrostrictive graft elastomer), 유전탄성체(Dielectric elastomer), 강유전성 고분자(Ferroelectric polymer) 등이 있다. 이 중에서도 특히 유전탄성체는 다른 전기활성고분자에 비교하여 매우 큰 작동변위 구현이 가능한 소재다. 전력소모량이 매우 낮고 큰 작동력을 가지며 우수한 작동 신뢰성을 가지고 있으므로 산업적 응용성이 우수하여 많은 연구들이 진행되고 있다. 다만 작동전위가 매우 커서 이를 낮추기 위해 많은 연구가 진행 중이다.

신개념 인공근육 소재 '유전탄성체' 각광

유전탄성체 액추에이터에 관한 연구는 최근 들어 매우 활발하게 진행되고 있는 분야 중의 하나이다. 기존의 액추에이터 소재에 비해 높은 전기역학 변환 효율, 빠른 반응속도, 큰 에너지 밀도와 큰 작동변형을 나타내기 때문에 햅틱 기기, 인공 장기 및 조직, 초정밀기계, 센서 등에 응용이 가능하다. 우주항공분야, 의료용 로봇, 개인군사 장비 등과 스마트 기기 등 다양한 응용 분야에 적용하기 위한 많은 연구들이 진행되고 있다.

전기활성고분자에 대한 연구는 많은 곳에서 급속도로 진행되고 있다. 최근에 관련 논문 발표 건수가 급격히 늘고 있다. 다양한 응용 연구도 활발히 진행되고 있는 것을 확인할 수 있다.

유전탄성체는 많은 액추에이터 소재 중에서도 가장 큰 작동 변위 및



3층 구조 유전탄성체 액추에이터의 작동원리. PVDF와 같은 압전소자를 고분자 유전체로 코팅해두고 (a) 양쪽의 유전체에 전압을 걸면 전자의 이동으로 음극에 해당하는 쪽이 수축한다.(b)

작동력, 빠른 응답속도, 저비용, 저전력소모 특성 등 장점이 많다. 이미 해외 기업에서는 햅틱 게임기, 관상용 물고기, 카메라 렌즈 등에 시제품을 출시하고 있으며 많은 대학, 연구소, 기업들의 연구기관들도 연구를 수행하고 있다. 매년 새로운 아이디어와 이를 구현한 사례가 발표되고 있어 가까운 미래에 유전탄성체를 이용한 상용화 제품 출현이 늘어날 전망이다.

하지만 국내에서는 유전탄성체에 관한 연구 및 연구지원이 아직 미흡한 실정이며, 선진국과의 기술격차를 줄이고 유전탄성체분야 기술을 선점하기 위해서는 국가적인 연구사업 지원이 필요한 실정이다. 고분자 액추에이터는 기존의 기계식 액추에이터에 비해 장점이 큰 방식이다. 기존 방식은 전기모터나 실린더의 힘을 기계장치로 전달하는 구동부를 만들어야 하고, 환경도 제한적이다. 고분자 소재를 이용해 이런 문제를 해결한다면 기계장치의 각종 움직임도 지금보다 한층 더 다양해지지 않을까.

미국의 로봇 업체, '아이로봇'이 제작한 '팩봇'. 팩봇은 군용으로 개발되어 협지를 안전하게 정찰하는 데 사용한다. 팩봇 구동부 중 일부에는 유전탄성체가 사용됐다.



태양빛을 모아 깨끗한 에너지 만드는 유기물질

손해정(광전하이브리드 연구센터)

중국과 인도의 부상, 전세계적인 공업화, 개발도상국의 성장. 지금 세계는 유례 없는 에너지 소비 시대에 접어들었다. 미국의 에너지정보청(EIA: Energy Information Administration)의 보고에 따르면, 2035년 세계 에너지 소비량은 2008년 대비 53%가 증가한 약 81경 kJ에 달한다고 전망했다.

kJ 킬로줄. 에너지의 단위로 1,000J이다. 1kJ는 약 0.24kcal에 해당한다.

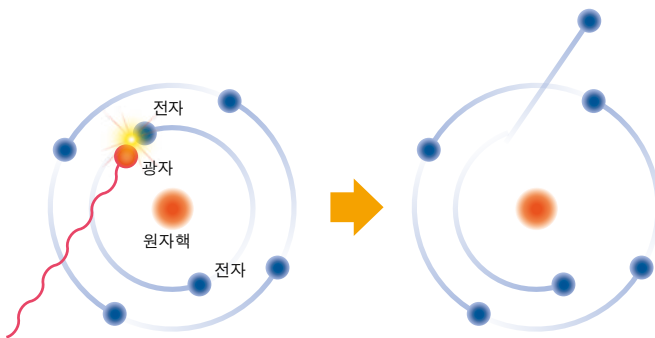
에너지 소비량은 급증하고 있지만 현재 주요 에너지 자원인 석유와 석탄은 경제적으로 채굴 가능한 매장량이 각각 40년과 230년 정도에 불과하다. 무엇보다 화석연료는 지구온난화와 같은 환경 문제를 야기시키는 점이 문제로 꼽힌다. 화석연료의 한계인 에너지 고갈과 환경 문제를 해결하는 방법으로 친환경 재생에너지에 대한 관심이 세계적으로 높아지고 있는데, 대표적인 예가 태양광, 바이오, 풍력, 수력, 지열 등이다.



태양광발전은 에너지위기에 대한 가장 현실적인 대안 중 하나로 꼽힌다. 지구의 자원을 소진하지도, 공해물질을 배출하지도 않기에 가장 깨끗한 에너지기도 하다.

특히 태양에너지는 지구상에 가장 풍부한 에너지원으로 일년간 지구에 도달하는 에너지량이 약 12만 TW(테라와트) 정도로 연간 세계 에너지 소비량의 약 만 배에 해당하는 막대한 양이다. 태양으로부터 나오는 에너지를 효율적으로 이용할 수 있는 방법이 있다면 에너지 문제를 상당 부분 해결할 수 있을 것이다. 태양에너지 활용의 열쇠 중 하나가 바로 광전변환 소재다. 광전변환 소재란 물질이 빛을 흡수하여 광전자를 발생시키고, 이를 다시 전기 에너지로 변환시킬 수 있는 매개체를 말한다.

현재 세계 태양전지 산업계에서 쓰이는 광전변환 소재는 실리콘(Si)계 반도체 화합물이 90% 이상을 차지하고 있다. 하지만 결정형 실리콘 반도체의 경우 실리콘 가격이 불안정하고, 만드는 데 투입되는 비용이 높다는 단점이 있다. 결정형 실리콘 반도체의 대안으로 CdTe(텔루르화 카드뮴)나 CIGS(구리-인듐-갈륨-셀레늄 화합물)와 같은 무기물 화합물을 광전 변환소재로 이용하려는 노력이 꾸준히 진행되어 왔다. 하지만 CdTe는 인체 유해 물질로 분류되어 그 응용



아인슈타인의 광양자설에서 빛은 알갱이(광자)의 형태로 전자와 충돌하기 때문에, 전자를 방출시킬 수 있는(광전효과를 일으킬 수 있는) 양의 에너지를 순식간에 전달할 수 있다.

가능성이 제한적이며, CIGS 태양전지는 소재의 광 흡수도와 안정성이 높다는 장점이 있지만 재료로 쓰이는 인듐(Indium)의 가격이 비싸다는 단점이 있다. 따라서 친환경 대체 에너지 산업분야에서는 저렴하면서도 효율 높은 소재를 개발하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

태양광 발전의 새로운 주역, 전도성 고분자

차세대 광전변환 소재로 주목을 받고 있는 재료는 전도성 고분자다. 고분자 재료는 태양전지와 같은 전자 소자에 도입할 때 간편하고 저렴한 용액 공정을 이용할 수 있기 때문에 공정 프로세스가 간단하고 제조 단가가 저렴하다는 장점이 있다. 또한 유기물이라는 특성상 가벼우며 유연한 소자를 만들 수 있다는 점에서 친환경 재생에너지 핵심 소재 중 하나로 떠오르고 있다. 지난 몇 년간 재료 개발 기술의 발달로 전도성 고분자 소재 광전변환 효율이 10%에 이르는 급속한 성장을 보였다.

전도성 고분자는 전자들이 원자의 핵에서 비교적 강하게 결합되어 있는 시그마 결합과 핵으로부터 상대적으로 약하게 결합되어 있는 파이결합으로 구성된다. 파이 결합에 있는 파이 전자들은 비교적 자유롭게 움직일 수 있기 때문에 파이 오비탈(Orbital)들 사이에 흩어져 있다. 가시광선 영역의 약한 에너지가 고분자에 가해지면 파이 결합 내에 있는 전자는 에너지를 흡수하여 쉽게 바닥상태에서 들뜬(Excitation)상태가 되고, 들뜬 전자와 전자가 들뜬 자리에 남은 홀이 쌍을 이루는 엑시톤(Exciton)이 생긴다. 쉽게 말하면 전자가 에너지를 흡수하여 원래 있던 영역에서 이탈하기 직전의 상태가 되고 이

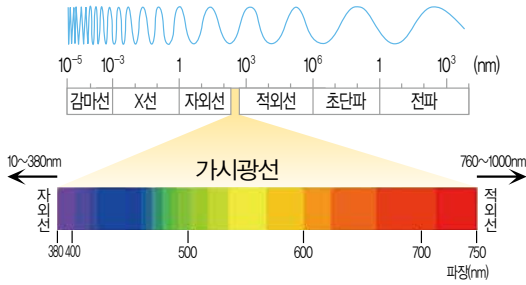
에 따라 전자가 빠져나간 공백이 생긴다는 뜻이다.

전도성 고분자의 광전효과는 빛을 받아 고분자에 생성된 엑시톤이 쪼개져서 각각 자유로운 전자(음전하)와 구멍(양전하)이 되어 전류를 일으킴으로써 빛 에너지가 전기 에너지로 변환된다. 이 때 전자와 구멍 사이에는 서로 반대되는 전하를 지닌 입자끼리 잡아당기는 힘인 쿨롱 결합력(Coulombic binding force)이 작용하기 때문에 이 둘을 분리하기 위해서는 에너지가 필요하다. 이는 전자를 제공하는 전도성 고분자와 고분자 옆에서 전자를 받는 물질간 전자친화력의 차이로부터 나오며, 효과적으로 엑시톤을 분리하려면 이 전자친화력의 차이가 0.3eV 이상이라고 한다. 비탈의 경사가 어느 정도 있어야 공이 굴러 내려가듯, 전자를 받아들이는 정도도 일정한 차이가 있어야지 전자가 어느 한 쪽으로 움직이려는 경향이 생겨서 전류가 생성된다는 뜻이다.

한편 이러한 반응을 일으키려면 우선 빛을 받아들여야 한다. 당연히 빛 에너지를 많이 흡수하여 전도성 고분자 물질에 전달할수록 더 많은 엑시톤이 생성되어 많은 전류가 발생하는 것이다. 전도성 고분자가 광전효과로 전류를 발생시키는 효율인 광전변환효율은 따라서 빛을 흡수하는 정도와 흡수한 빛 에너지를 전기 에너지로 변환하는 정도로 표현된다. 빛을 잘 흡수하고 빛 에너지를 전기 에너지로 잘 바꾸는 성질이야말로 좋은 광전소자의 핵심 조건인 것이다.

우수한 태양광 발전소자를 얻으려면

현대 물리학에서는 빛은 파동의 성질이 있으면서도 광자(Photon)라고 하는 입자로 구성되어 있다고 설명한다. 광전효과를 일으키는 주



파장에 따른 빛. 감마선 → 전파로 가면서
파장은 길어지고 에너지는 적어진다.

광자의 밀도는 적외선 영역에서 가장 높다. 지구에 도달하는 태양 에너지 대부분이 적외선 형태로 전달된다는 점을 생각해보면 왜 광자가 적외선 영역에 많은지 알 수 있다.

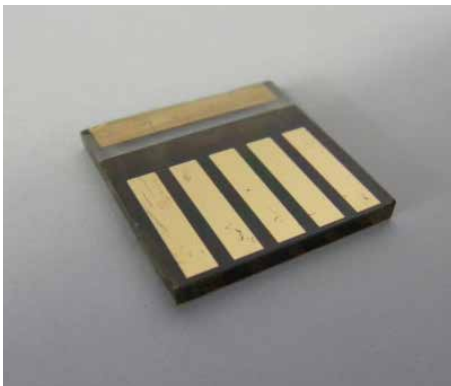
역이 바로 이 광자다. 따라서 광자를 많이 흡수할수록 태양광 발전에 유리하다. 그런데 광자는 빛의 모든 스펙트럼 영역에서 균등하게 존재하지 않는다. 태양광을 분리했을 때, 붉은 색과 적외선 영역에서 광자의 밀도가 가장 높고 자외선 영역으로 갈수록 밀도가 낮아진다. 따라서 전도성 고분자가 적색영역과 적외선영역에서 빛을 효과적으로 흡수하는 것이 중요하며, 이에 따라 ‘낮은 밴드갭 고분자(Low bandgap polymer)’가 주목받기 시작했다.

두 개 이상의 원자가 매우 가까이 있으면 서로 영향을 주고받으면서 원자 내 전자의 궤도도 변화한다. 이 때 원자 안쪽의 궤도들이 서로 상호작용하여 만들어진 곳을 가전자대(Valence band), 원자 바깥쪽 궤도들이 겹쳐 만들어진 곳을 전도대(Conduction band)라고 한다. 가전자대에는 원자핵에서 벗어나지 못하는 전자들이 갇혀 있고 전도대에는 자유전자들이 원자의 구속으로부터 탈출하여 자유롭게 돌아다닐 수 있다. 가전자대와 전도대 사이는 ‘밴드갭(Bandgap)’이라는

에너지 준위의 벽으로 막혀 있어 양쪽에 있는 전자들은 반대편으로 쉽게 옮겨갈 수 없다. 밴드갭에 따라 자유전자의 양과 특성이 달라지며 이에 따라 도체, 부도체, 반도체로 나뉜다.

전도성 고분자의 주요 빛 흡수 파장대는 고분자의 에너지 준위에서 가전자대의 최고 준위인 HOMO(Highest Occupied Molecular Orbital)와 전도대의 최저 준위인 LUMO(Lowest Unoccupied Molecular Orbital) 사이의 에너지 차이인 밴드갭에 의해 결정된다. 적외선처럼 에너지가 적은 빛을 잘 흡수하려면 전자가 적은 양의 에너지로도 쉽게 들뜬 상태로 변할 수 있도록 밴드갭이 낮아야 하고, 낮은 밴드갭 고분자를 개발하기 위해서는 고분자의 HOMO 에너지 준위를 높이고 LUMO를 낮추는 것이 중요하다.

지금까지 전도성 고분자를 이용한 유기물 광전 변환기술은 이들 에너지 준위와의 싸움이었다. 1986년 미국의 기업, 코닥에서 처음으로 약 1%의 광전변환 효율의 물질을 개발하면서 본격적으로 유기물 광전 변환기술 연구가 시작됐다. 1990년 초에는 미국 캘리포니아 대학교 산타바바라 캠퍼스의 히거(Alan J. Heeger) 교수 연구팀이 폴리



렌 유도체(PCBM: Phenyl C₆₁-butyric acid methyl ester)와 전도성 고분자를 혼합하는 벌크 헤테로정션(Bulk heterojunction)이라는 개념을 도입하여 2.9%의

국내에서도 태양광 발전 소재에 대한 연구가 활발하다. 지난해에는 유기물과 무기물을 조합하여 10%의 광전변환 효율을 내는 염료감응형 태양 전지가 개발되기도 했다.

향상된 효율을 보였다. 벌크 헤테로정선은 전하 운반자가 생성될 수 있는 두 유기물 사이의 표면적을 획기적으로 넓힘으로써 태양전지의 광전 변환효율을 크게 향상시키는 방법이다.

여전히 낮은 효율에 머물던 유기 태양전지 연구에 돌파구가 열린 것은 2000년대 중반이었다. 이전에 사용하던 PPV(Poly p-phenylenevinylene) 계열의 공액 고분자에 비해 결정성이 높고 낮은 에너지 밴드갭을 가져 태양광을 효과적으로 흡수할 수 있는 P3HT라는 고분자 재료가 발견된 것이다.

2005년 미국 캘리포니아대학교 로스앤젤레스 캠퍼스의 양(Yang Yang) 교수 연구팀이 P3HT와 PCBM을 광활성층으로 사용하여 고분자 활성층을 형성할 때 용매를 천천히 건조시키는 방법을 도입하여 4.4%의 효율을 발표했다. 같은 재료를 이용하여 히거 교수 연구팀에서는 열처리방법을 추가하여 고분자의 결정성을 높임으로써 약 5%의 광전변환 효율을 달성했다.

2009년에는 PBDTTT-CF라는 고분자가 7.7%의 광전 변환효율을 보임으로써 처음 7%대에 진입했고, 2012년에 비슷한 분자구조의 PTB7이라는 고분자가 9.2%의 광전 변환효율을 보였다. 같은 해 PBDTT-DPP라는 고분자가 개발되어 10.6%의 효율을 달성하는 데 이르러 고분자 태양전지 개발에 청신호가 켜졌다.

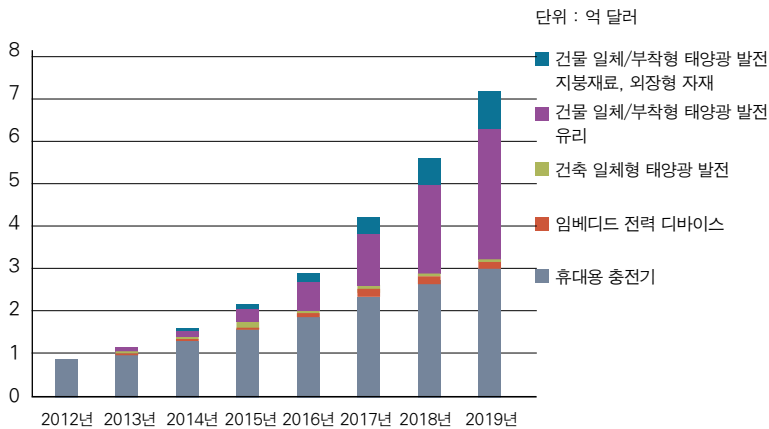
태양에너지를 보다 자유롭게 이용하려면

고분자 광전변환소재의 가장 유망한 응용 분야는 고분자 태양전지이다. 고분자 재료를 이용하면 플라스틱 기판 등에 프린팅 방식으로 인쇄해서 태양전지를 만들 수 있기 때문에 기존의 결정형 태양전지에

비해 소자 공정비용을 대폭 절감할 수 있다. 때문에 기존 태양전지에 비해 생산원가 측면에서 경쟁력이 상당히 높을 수 있다는 전망이다. 현재 화석 연료로 생산하는 전기사용료와 비교해 경쟁력 있는 비용으로 태양전지 전기를 생산하려면, 하루 중 강하게 태양광이 들어올 때 1W(와트)의 전력을 생산하는데 드는 비용이 1달러 미만이어야 한다. 태양전지인 결정질 태양전지는 실리콘 가격에 대한 의존도가 높아서 이 조건을 만족시키기 쉽지 않지만, 무기 박막 태양전지는 0.5~1 달러 정도가 드는 수준으로 발전시킬 수 있을 것으로 보인다. 고분자 태양전지의 경우 학계에서 받아들여지고 있는 고분자를 포함한 유기태양전지의 달성 가능한 최대효율이 약 15% 정도인 점을 고려하면 0.2~0.5 달러의 금액으로도 1W의 전기를 생산할 수 있을 것이다.

또한 가볍고 투명하며 유연성이 우수한 유기물질의 특성상 고분자

고분자를 포함한 유기 태양전지의 예상 시장 규모



건강기능식품 생산실적 분석, 식품의약품안전청, 2012

태양전지는 다양한 응용분야에서 활용될 가능성이 높다. 고분자 태양전지 응용분야로 크게 3가지를 생각해 볼 수 있다. 개인 휴대용 충전기, 소형 전자 기기, 건물의 외벽이나 창호 및 블라인더 등의 BIPV 용이다. 이러한 응용 분야는 모듈의 효율에 따라서 다른 용도로의 시장 개척이 가능할 것으로 예상된다.

현재 고분자 광전변환 소재의 대표 응용 분야인 유기태양전지의 발전 속도를 볼 때 향후 5년 후에는 고분자 소재를 이용한 태양전지 제품이 출시될 것으로 기대된다. 그렇지만 유기 태양전지의 최종 상품화까지 소재의 안정성과 대면적화 등에서 기술향상이 요구되고 있는 상황이다. 또한 지난 몇 년 동안 세계적인 경기 침체와 실리콘재료의 가격인하로 인해서 유기태양전지 개발에 대해 부정적 시각이 있는 것도 사실이다.

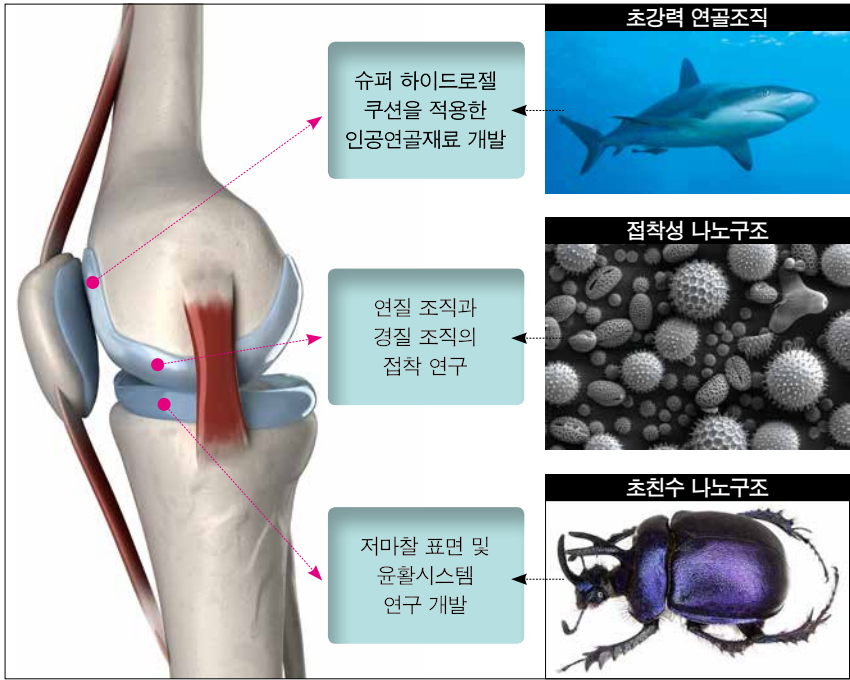
하지만 고분자 소재가 갖는 소재의 용액공정, 저가화, 유연성 등의 장점들은 고분자소재 개발에 대한 지속적인 관심을 갖게 하고 있다. 또한 현재까지 유기태양전지의 빠른 발전 속도는 고분자 광전변환 소재의 상업화에 대한 밝은 미래를 보여준다고 할 수 있다.

내 몸보다 더 편안한 의료기구 만들기

석현광(생체재료연구단)

흔히 다가올 사회를 '100세 시대'라고 부른다. 그렇다면 실제로 우리 국민의 평균수명(0세 기대여명)은 실제로 얼마나 될까? 통계청 자료에 따르면 2011년 국민의 평균수명은 81.2세인 것으로 나타났다. 8년 전인 2003년에는 77.4세였다가, 2009년 처음으로 80세를 넘고 점차 증가한 것이다. 앞으로도 이런 증가세가 계속 이어질 것으로 미루어 보면, '100세 시대'를 맞을 날이 먼 미래가 아니라는 것을 알 수 있다.

하지만 이렇게 긴 수명이 행복을 보장하는 것은 아니다. 노화에 따라 신체의 여러 부분이 손상되며 오히려 삶의 질이 낮아지는 경우가 많기 때문이다. 대표적인 예로 퇴행성관절염이 있다. 퇴행성관절염은 특별한 계기로 걸리는 것이 아니고, 그저 오랫동안 관절을 쓰는 바람에 연골이 마모돼 생기는 질환인 것이다. 이런 퇴행성관절염을 치료하기 위해, 관절을 의료기구인 인공관절로 바꾸는 수술이 있다. 하지



KIST에서 기획 중인 생체모사형 반영구 수명 인공관절

만 안타깝게도 이 인공관절은 기술적인 한계가 많다. 인공관절을 사용하는 경우에도 마모가 발생하기 때문에 인공관절의 수명이 줄어든다는 것이다. 또 인공관절이 마모될 때 나오는 입자 때문에 다시 통증이 생기고, 심하면 골 조직에 괴사가 생기는 경우도 있다. 이런 경우에는 어쩔 수 없이 2차 수술을 해야 한다.

인공관절, 이제 신개념 생체 재료에 맡겨라

이런 문제를 해결하기 위해 현재까지 많은 연구가 진행되고 있다. 우선 금속, 세라믹, 고분자 소재 같은 인공관절의 소재 자체의 질을 개선하려는 노력이 있다. 또 이들 소재를 여러 가지로 조합해 새로운

인공관절을 만들려는 연구도 있다. KIST에서도 성능이 개선된 차세대 인공관절을 개발하고자 하는데, 이때 인공관절에 자연·생체 모방형 소재를 적용하려는 연구를 준비하고 있다.

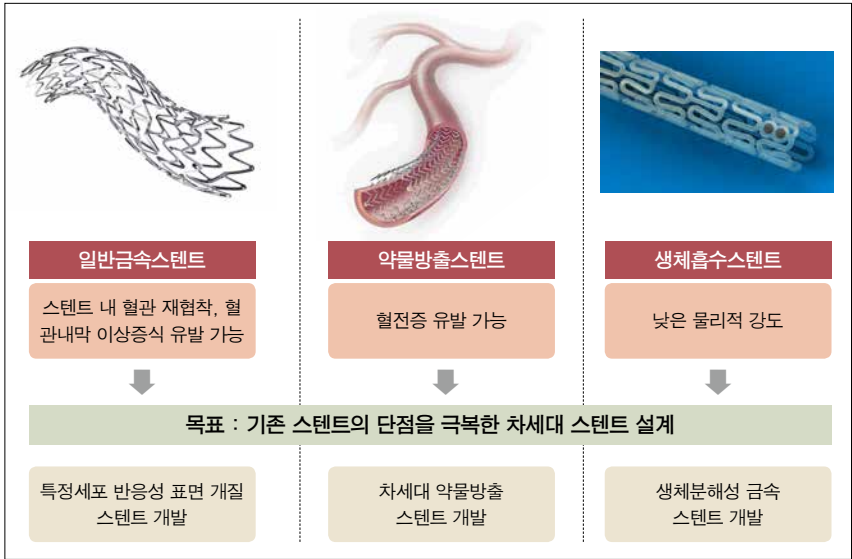
인공관절처럼 몸속에 이식되어 몸의 조직이나 장기의 기능을 보완하거나 대신하는 각종 의료기구와 그 원소재를 '생체재료'라고 한다. 이 생체재료 기술이 점점 발달해 최근 생체재료 기술은 이전과 비교하면 훨씬 다양하고 혁신적인 모습이 되었다.

이런 생체재료 기술의 발전 속도를 가장 잘 볼 수 있는 분야가 바로 스텐트다. 스텐트는 심장을 둘러싸고 있는 심근에 혈액을 공급하는 관상동맥이 좁아지거나 붙었을 때, 이 부분을 다시 넓히거나 뚫어주는 초소형 구조물이다. 스텐트는 보통 넓게 열릴 수 있는 금속 망 형태로 제작해 사용하고 있다. 최근에는 재협착이나 후기 혈전증 같은 부작용을 막기 위해 차세대 약물방출 스텐트와 생체 분해성 스텐트에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.

KIST도 이런 차세대 스텐트를 연구하고 있다. 스텐트 표면에 나노/마이크로 구조를 형성하여 약물을 넣은 약물방출 스텐트와 완전생분해성 스텐트 등으로 차세대 핵심 스텐트 개발을 선도하고 있으며 일부 분야에서는 세계 최고 수준의 성과를 내고 있다.

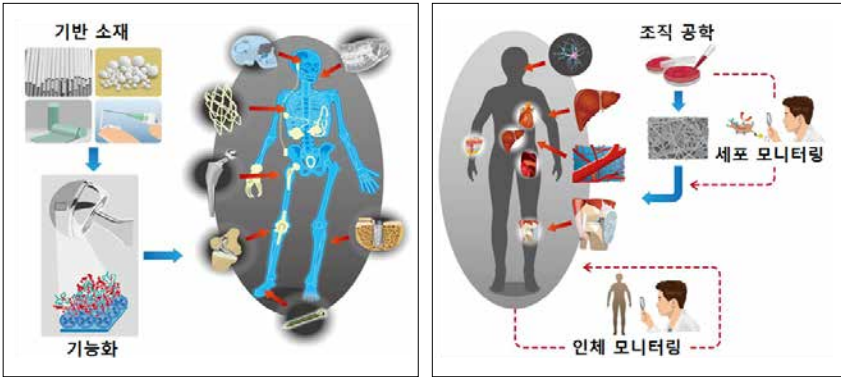
생체재료는 지금 무한 변신 중

한편 기존의 생체재료와는 전혀 다른 개념의 인체동기형(Self-synchronizable) 생체재료에 대한 관심이 높아지고 있다. 기존의 생체재료가 불활성인 반면 인체동기형 생체재료는 몸속에서 변화를 나타내는 것이다. 대표적인 인체동기형 소재 중 하나는 몸속에 이식



차세대 스텐트 연구 동향

된 뒤 인체의 손상부분이 재건되면 알아서 없어지는 생분해성 소재다. 이런 소재 중에서도 생분해성 고분자에 비해 생체적합성이 우수하고 강도가 뛰어난 생분해성 금속에 대한 연구가 2000년대 초반 이후 유럽을 시작으로 미국과 한국 등에서 활발히 진행되고 있다. 이런 생분해성 금속 소재는 뼈와 인대 등의 고정을 위한 정형외과용 임플란트나 심혈관용 스텐트를 포함한 혈관 및 담도, 식도, 요도 등 관형(Tubular) 장기를 확장하는 스텐트용으로 사용되어 의료기술의 혁신을 유도할 것으로 예상된다. KIST도 생체적합성이 검증된 원소로만 구성된 생분해성 금속을 개발하여 관련 특허를 약 20여건 출원/등록하였으며, 각종 정형외과용 임플란트를 개발하여 현재 전임상 실험을 거의 완료하는 등 생분해성 금속 연구를 선도하고 있다.



대표적인 생체재료인 체내이식형 인공 소재(왼쪽)와 줄기세포 및 이를 이용하여 재생된 바이오 소재(오른쪽)

이런 다양한 체내 이식형 생체 재료의 기능을 개선하기 위해 최근에는 분자 단위에서 세포에 자극을 줘 세포의 부착, 이동, 증식, 분화 등을 조절하는 기술도 개발되고 있다. 이 연구는 생체재료 표면에 약물을 탑재하는 기술에 비해 안전성이 높고, 생체재료의 판매 승인 및 장기 보관과 유통이 쉬워 차세대 생체재료 기능화기술로 각광받고 있다.

또 최근에는 공학적으로 조작한 줄기세포와 생체/인체/세포 유래 물질, 그리고 줄기세포를 이용해 재생한 생체조직 등의 바이오 소재에 대한 중요성도 점차 부각되고 있다. 그중에서도 잠재적 치료효과가 큰 성체줄기세포는 윤리적, 안전성 문제에서도 어느 정도 자유롭고, 동시에 채취와 취급이 상대적으로 쉽기 때문에 차세대 최첨단 의약품으로 인식되고 있다. 또 이 중 일부는 임상승인을 받기도 하였다. 지금은 응용 분야를 다양하게 도출하고 치료의 효율을 높이기 위해서 줄기세포의 대량 공급을 위한 원천 기술과 줄기세포의 분화기능 유

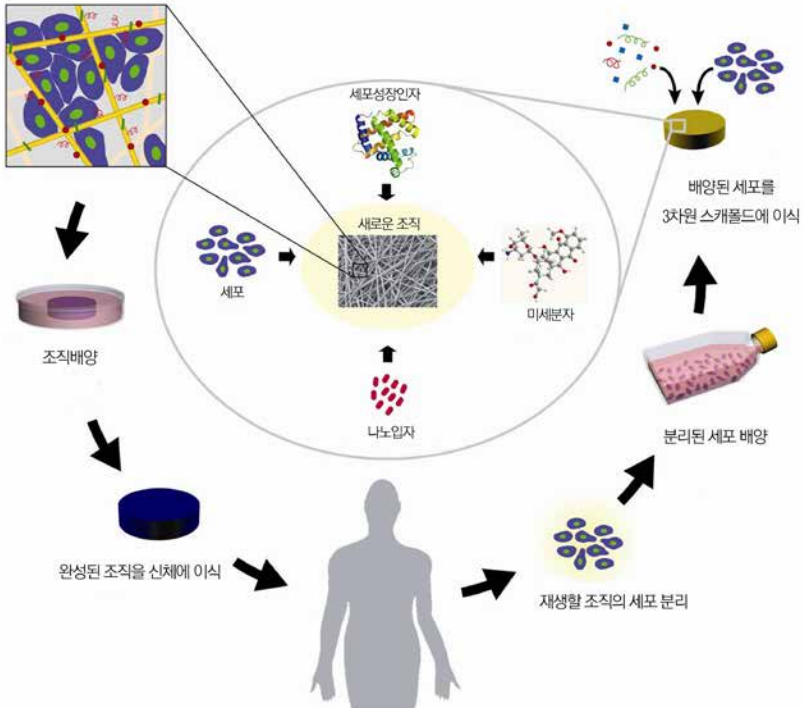
지 및 안정화 기술 개발이 활발하다. KIST에서도 이런 줄기세포 군집체 제조 기술을 개발하기도 했다. 세포-고분자 매트릭스 기술을 이용한 결과로, 줄기세포를 몸속에 이식한 뒤 줄기세포의 생존률이 획기적으로 개선된 것이다. 이 세포-고분자 매트릭스 기술을 이용해서 는 고강도 인공혈관을 성공적으로 만들어 내기도 했다.

줄기세포로는 인체 조직이나 장기 자체를 만들 수도 있다. 이 분야를 ‘조직공학’이라고 한다. 앞으로 기계공학, 재료공학, 생물학 등 이종 학문간 융합이 활발히 이루어지면, 조직공학 기술을 통해 재생조직을 온전히 만들 수 있을 기술도 머지않은 미래에 실현될 수 있으리라 기대한다.

줄기세포를 이용하여 재생한 생체조직은 과학적으로도 큰 의미가 있다. 이 생체조직으로 질환의 메커니즘을 규명할 수 있고, 약물의 효과를 검증하는데 쓸 수도 있다. 암 진단과 치료 기술 개발을 위한 체외 실험장치(Ex vivo device)로 사용하기 위한 연구도 전 세계적으로 관심을 끌고 있다. 이런 연구를 제대로 하기 위해서는 인간의 조직과 장기가 갖는 환경을 제대로 구현하는 것이 중요하다. KIST에서는 조직 공학 기술을 이용하여 재생된 3차원 인체 조직을 실험장치로 사용하기 위한 연구를 최근 시작했다.

신개념 생체 재료가 열 신세계를 기대하며

생체재료 산업은 그동안 미국, 유럽의 다국적 회사가 세계 시장을 배타적으로 독점하는 선진국형 산업으로 인식되어 왔다. 그러나 최근에는 정부, 기업, 학계, 연구계 모두가 대한민국의 지속적 성장을 위해 육성해야 할 전략적 미래 산업으로 인식하고 있다. 이런 변화는 높은



줄기세포를 이용한 인체조직 복원 기술

신뢰성을 가진 핵심기반 기술 때문이다. KIST만 하더라도 위에서 설명한 것처럼 우수한 생체재료 미래기술을 가지고 있다. 이 중에서 차세대 스텐트, 생분해성 임플란트, 세포 반응성 표면제어 기술, 줄기세포 3차원 군집체 제조기술 등은 앞으로 5~10년 안에 임상 적용되거나 실용화가 가능할 것으로 보인다. 또 인간 생체조직 소자의 경우에는 5~10년 안에 질병 메커니즘 규명과 신약 스크리닝 용도로 사용할 수 있을 정도로 완성도를 갖출 것으로 기대하고 있다.

또 자동차, 조선, 철강, 전자산업 같이 전통적인 산업 분야의 고용이

☉ 생체재료 시장 분석. 한국 기업의 점유율이 높은 반도체나 디스플레이에 비해 시장 규모가 크면서도 성장률이 높은 편이다. 그러나 아직 이 분야에 대한 국내기업 진출은 미미하다.

	자동차	반도체 메모리	디스플레이	철강	의료장비	골질환치료용 임플란트소재	심혈관용 생체재료
세계시장 규모	1조 달러	460억 달러	772억 달러	1조 달러	3,000억 달러	500억 달러	700억 달러
연간 성장률	3%(선진국) 10%(신흥국)	10%	13%	5%	8%(평균) 18%(아시아)	8%(평균) 18%(아시아)	8%(평균) 18%(아시아)
국내기업 세계시장 점유율	6~7%	50%(1위)	48% (1~2위)	4.2%	0%	0%	30%

정체되고, 심지어 감소하는 현상을 극복할 신산업을 찾는 사회 분위기도 생체재료 산업 육성에 큰 영향을 미칠 것으로 생각된다. 생체재료 시장규모를 좀 더 구체적으로 살펴보면, 체내 이식형 생체재료의 경우 성장률이 높은 거대 시장을 형성하고 있는 것을 알 수 있다. 게다가 아직 국내 기업의 세계시장 점유율이 거의 0%에 가깝기 때문에 앞으로 무한한 성장 잠재력이 있는 미래성장 동력 산업이라고 할 수 있지 않을까. 그밖에 IMF 금융위기 이후 의학 관련 학과로 진출한 우수한 인력풀의 존재도 생체재료 분야의 발전에 긍정적으로 작용할 것이다.

움직이기만 하면 충전이 된다?

강종윤(전자재료연구센터)

자동차 에어백, 카메라 오토포커싱 장치, 초음파 진단기, 가스레인지의 공통점은? 압력을 가하면 전기가 나오고 전기를 흘리면 진동하는 ‘마법의 돌’ 압전체가 들어 있다는 점이다. 압전체가 일으키는 효과(압전 효과)는 1880년 프랑스의 피에르 퀴리와 자크 퀴리 형제가 발견했다. 전기석에 응력을 가했을 때 표면에 전하가 발생하는 것을 확인했던 것이다.

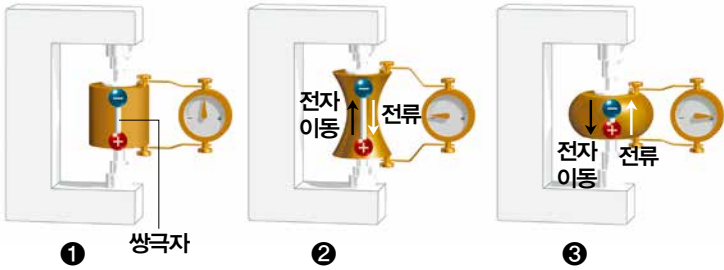
최근 압전효과는 전기를 발생시킬 수 있는 새로운 기술로 떠오르고 있다. 바로 압전 에너지 하베스팅(Harvesting) 기술이다. 즉, 진동 에너지를 전기 에너지로 변환하여 실생활에 유용한 에너지를 얻어내는 기술을 말한다.

하지만 이 기술로 발생하는 전력이 실제로 적용하기에는 아직 제한적이고, 주소재인 압전 세라믹스의 깨지기 쉬운 성질을 극복해야 한다. 그래서 압전 세라믹스와 폴리머의 복합소재, 새로운 압전 단결정 소



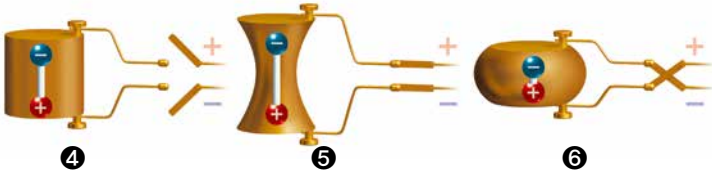
'딸깍'하면 불이 켜지는 가스레인지의 손잡이. 안전소자가 들어있어 순간적으로 높은 전압을 내어 불을 붙인다.

재를 개발해 에너지 하베스팅 분야에 적용하는 노력이 진행 중이다. 또한 환경 문제를 해결할 납 없는 압전 소재의 특성도 크게 향상되고 있다.



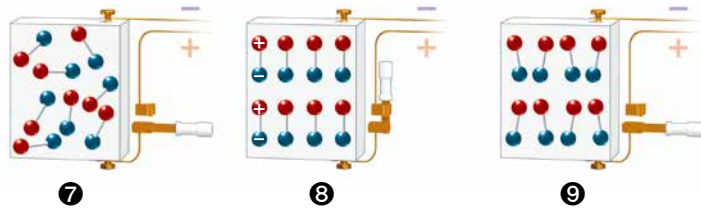
정압전효과

압전체(①)를 잡아당기거나 피그러뜨리면 전위차가 생기는데, 이 효과를 상쇄시키려고 전자가 움직이고 전기가 발생한다. 잡아당기는 경우(②) 전자가 쌍극자의 양극에서 음극으로 이동하며 전류는 반대로 흐른다, 피그러뜨리는 경우(③)는 이와 반대로 전류가 흐른다.



역압전효과

압전체에 전기를 흘릴 때(④) 연결에 따라 압전체의 길이가 늘어나거나 줄어든다. 쌍극자의 음극(또는 양극)과 전원의 양극(또는 음극)이 연결되면(⑤) 서로 잡아당겨 압전체가 늘어나는 반면, 쌍극자와 전원의 같은 극이 연결되면(⑥) 서로 밀쳐 압전체가 줄어든다.



인공 압전체의 분극 메커니즘

인공 압전체를 만들려면 두께 1mm당 3500V의 높은 전압을 걸어줘 무질서하게 흩어져 있던 쌍극자들(⑦)을 한 방향으로 정렬시킨다(분극, ⑧). 분극 후 전압을 끊으면 쌍극자들이 약간 흐트러진다(⑨).

빠른 시일 내에 PZT 세라믹스를 대체할 수 있는 새로운 소재가 등장하고, 기계적 충격이 큰 에너지 하베스팅 기술에 대한 큰 수요가 창출될 것이다. 이에 따라 입고 건기만 해도 휴대전화나 MP3 플레이어가 충전되는 옷이 등장할 날도 머지않았다.

각종 센서에서 에너지 생산까지 무궁무진한 응용 분야

압전 효과란 비대칭 결정 구조를 갖는 재료에 압력이나 진동 같은 기계적 변형이 가해지면 전기가 발생되고(정압전효과), 반대로 전기가 가해지면 직접적으로 압력이나 진동 같은 기계적 변형이 발생하는 현상(역압전효과)을 통칭하는 것이다.

주로 납-지르코늄-티타늄 복합산화물인 PZT, 티탄산바륨(BT) 등의 세라믹 결정체에서 이 현상이 발생된다. 하지만 PVDF(Polyvinylidene fluoride)와 같은 고분자 재료에도 일어난다. 압전 현상에 대한 연구는 1, 2차 세계 대전을 겪으면서 급속히 발전하게 되었다. 1947년 티탄산바륨 세라믹스에서 압전효과가 발견되자 이를 바탕으로 페로브스카이트(Perovskite) 구조의 특성에 착안하여 활발한 연구가 진행되었다. 그 결과 아주 우수한 압전 특성을 갖는 PZT 세라믹스가 개발되어 현재 항공, 군수, 우주, 해양, 전자 등 산업 전반에 걸쳐 폭넓게 사용되고 있다.

하지만 최근에는 환경 문제에 대한 규제가 심해져 납을 사용하지 않은 압전 세라믹 재료를 개발할 필요성이 높아지고 있다. 또한 PVDF라는 고분자계 소재 또는 나무 소재인 셀룰로오스에서도 압전 현상이 나타나므로 이를 이용한 응용 기술 개발도 활발히 진행되고 있다. 압전 재료의 활용 분야는 음파, 초음파, 전력(에너지)을 발생시키는

사람의 정상적인 수축기 혈압은 120mmHg, 확장기 혈압은 80mmHg이며, 평균동맥압은 100mmHg, 맥압은 40mmHg 정도다.

사람의 심장은 휴식상태에서 보통 1분에 60~70회 정도를 뼜다. 하루 평균 약 10만 번, 70세를 기준으로 평생 26억 번을 수축해 적당한 에너지를 만들 수 있다. 호흡을 할 때 움직이는 횡격막이나 폐의 부피변화도 에너지로 쓸 수 있다. 사람의 분당 호흡수는 12회 정도, 1회 호흡량은 대략 0.5L이다

사람마다 차이가 있지만 근육이 수축하는 힘도 에너지로 쓸 수 있다. 캐나다 사이먼프레이저대 막스 도널란 교수팀은 걸을 때 무릎에서 발생하는 에너지로 전기를 일으키는 소형 '파워 브레이크', 일명 '무릎발전기'를 만들었다. 1.6kg 무게의 장치를 무릎에 착용한 뒤 걸으면 전기를 최고 13W까지 만들 수 있다.

사람의 몸에서 발생하는 에너지

심장, 폐, 혈관, 근육의 움직임에서 적지 않은 에너지를 얻을 수 있다. 이런 에너지를 모으면 휴대용 전자제품 정도는 충분히 쓰기도 남는다.

체중을 이용하는 압전 효과는 가장 편리하고 유용한 방식이다. 미국 MIT 건축학부 연구진은 걸을 때 생기는 에너지로 60W 전구 1개를 1초 동안 켤 수 있다고 주장했다. 3만 9000명 정도면 가차들, 8만 4000명 정도면 우주왕복선을 움직일 수 있다.

분야에서부터 각종 액추에이터 및 센서 분야에 이르기까지 매우 다양하다. 대표적으로 압전 재료는 압전 스피커, 수중 통신 및 탐지를 위한 초음파 소나(Sonar), 의료용 초음파 진단장치 등에 쓰이고 있다. 최근 화석연료의 고갈, 이로 인한 지속적인 에너지 가격 상승, 화석연료의 온실가스 배출로 인한 환경 문제가 제기됨에 따라 신재생 에너지 개발과 에너지 효율 향상에 대한 사람들의 관심이 높아지고 있다. 자동차, 정보통신, 환경 등 산업계 전반에 걸쳐 에너지 효율을 높이

압전효과의 다양한 응용 분야



압전 착화기



압전 수중청음기



초음파 발생기



압전 진동자



압전 가속도 센서



압전 광변조 소자



압전 스피커



압전 초음파 모터

정압전효과 (기계 → 전기)를 이용한 응용 분야

역압전효과 (전기 → 기계)를 이용한 응용 분야



SAW 필터 듀플렉서



압전 변압기

전기 → 기계 → 전기 변환 효과를 이용한 응용 분야

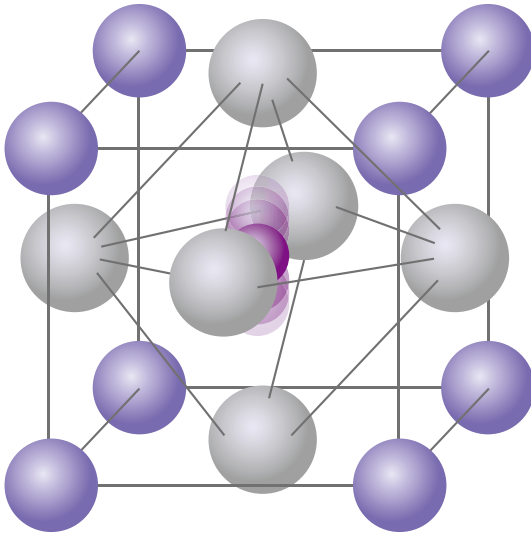
고 에너지를 절약하는 기술을 활발히 개발하고 있다. 특히 환경을 훼손하지 않으면서도 안정적으로 공급이 가능한 미래의 새로운 에너지 자원을 개발하기 위해서 다양한 시도가 이루어지고 있다.

이러한 상황에서 다양한 곳에 흩어져 있는 진동에너지를 전기에너지로 바꾸어 전자제품이나 여러 기기들의 에너지 효율을 향상시키는 연구가 활발하다. 미래지향적으로는 추가적인 에너지 공급 없이 진동에너지를 이용해 독립적으로 구동이 가능하도록 하는 압전 에너지 하베스팅 기술에 대한 연구 개발이 이루어지고 있다. 압전 에너지 하베스팅 기술은 압전 재료를 통해 진동이나 압력을 전기 에너지로 바꿔 실생활에 필요한 에너지를 획득하는 기술이다. 예를 들어 신발 바닥에 압전 장치를 넣으면 사람이 걸어다닐 때마다 전기가 발생해 휴대용 전자기기가 충전될 수 있을 것이다.

압전성 우수한 단결정 세라믹스

압전 소재는 단결정으로 제조될 경우 특정 방향으로 일렬 배향되기 때문에 다결정 압전 세라믹스보다 높은 압전성을 가질 수 있다. 단결정 압전 세라믹스는 다결정 압전 세라믹스에 비해 압전성이 3~5배 이상 우수하다. 그러나 단결정은 제조 방법이 까다롭고 고온에서 장시간 열처리가 필요하여 경제성이 낮다는 단점이 있다.

일반적인 다결정 PZT의 압전 상수(d_{33})가 300~500pC/N인 반면, PZN-PT, PMN-PT와 같은 단결정의 압전 상수는 1,500pC/N 이상으로 상당히 높은 값을 갖는다. PZN-PT는 아연니오브산염($\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$)과 티탄산염(PbTiO_3)의 고용체인 $\text{Pb}[(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0.91}\text{Ti}_{0.09}]\text{O}_3$ 으로 1982년 쿠와타(J. Kuwata) 등이



페로브스카이트 결정구조

현재 쓰이는 대부분의 압전체 내부에 있는 쌍극자는 페로브스카이트라는 결정구조를 갖는 원자블록들 때문에 생성된 것이다. 이 결정구조는 8개의 양이온(A)으로 구성된 직육면체와 산소(O) 음이온 6개로 구성된 팔면체의 공통중심에 또 다른 종류의 작은 양이온(B)이 하나 위치한다. B자리에 있는 양이온은 A자리 양이온이나 산소 이온에 비해 작아 상하좌우의 빈 공간으로 쉽게 움직일 수 있기 때문에 이 결정구조의 극성을 결정한다. 예를 들어 B자리 양이온이 위로 이동하면 위쪽은 양극이 되고 아래쪽은 음극이 되는 반면, 아래로 이동하면 위쪽이 음극, 아래쪽이 양극이 된다.

개발하였으며, PMN-PT는 $Pb[(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_{0.7}Ti_{0.3}]O_3$ 으로 1990년 슈라우트(Thomas R. Shrout) 등이 개발했다. 두 압전단결정은 소형 백금 도가니에 플럭스법으로 제조했는데, 직경이 10mm 정도로 대형으로 제조하기 어렵고 따라서 실용화가 어려웠다.

그 후 대형 백금 도가니를 사용하여 1,000℃ 이상의 고온에서 액체 상태로 만든 뒤 고체 단결정 핵을 넣어 식히면서 동일한 단결정으로

성장시키는 방법(브릿지만 법)이 개발되어 직경 50mm 이상의 단결정을 성장시킬 수 있었다. 하지만 이 방법은 정확한 조성 제어가 어렵고, 성장된 단결정의 상당 부분을 사용하지 못하는 단점이 있어 경제성에 문제가 있다. 최근 들어서는 개량된 브릿지만 법으로 직경 80mm이며 압전상수가 3000pC/N인 압전 단결정이 개발되었다.

이와 별도로 니오븀산 리튬(LiNbO₃), 탄탈산 리튬(LiTaO₃) 등의 단결정 압전 소재도 무선 통신 SAW 필터 소재로 각광받으며 독자적인 시장 영역을 형성하고 있다.

한국의 압전 세라믹스, 세계와 겨루다

세계적으로 압전 소재, 압전 소자 및 압전 시스템을 망라해 관련 기술을 개발하려고 노력하고 있다. 압전 세라믹스는 독일의 세람텍(Ceramtec), 미국의 CTS, 일본의 무라타(Murata) 등을 위시하여 많은 업체에서 생산하고 있다. 그럼에도 불구하고 압전 에너지 하베스팅 기술은 발생하는 전력이 실제 적용하기에는 아직도 제한적이다. 특히 압전 세라믹스는 깨지기 쉬운 성질로 인해 기계적 충격이 큰 에너지 하베스팅 기술에 직접적으로 적용되기 어려운 점이 앞으로 극복해야 할 문제점으로 대두되고 있다. 그리고 성능을 획기적으로 개선시킬 수 있을 것으로 기대되는 압전 나노 구조 소재 또는 단결정 소재의 경우 까다로운 공정, 수율 한계, 높은 제조 단가 등에 의해 아직 대량 생산에 적합하지 않은 문제점이 남아 있다.

국내의 경우 1990년대 초반 삼성전기, LG 전자부품(LG 이노텍의 전신) 등이 압전 세라믹스 개발에 참여하였으나 중단하였고, 현재는 경원훼라이트, 동일기연, 아이에스테크놀로지 등의 중소기업에서 압

전 세라믹스를 개발, 생산하고 있다. 경원훼라이트는 KIST의 압전 세라믹스 조성물 특허권을 기술 이전받아 압전 착화소자, 자동차 노킹센서, 가습기용 초음파 진동자, 초음파 센서 등의 응용 제품을 생산 중에 있다. 동일기연은 적층 압전 변압기 개발에 주력하여 적층 세라믹스 기술력이 우수하다.

단결정 압전 세라믹스의 경우 세라콤과 아이블포토닉스 등에서 생산되고 있다. 특히 세라콤의 경우 독자적인 기술인 고상 단결정성장법에 의해 압전 단결정을 생산함으로써, 제조단가를 낮추고 수율이 높은 제품을 생산 중에 있다. 제품의 단가 및 성능에 있어 세계적 수준에 도달해 있다. 고상 단결정성장법은 고체상태의 다결정 소재 분말 속에 단결정의 결정핵을 넣고 적절한 온도의 열처리를 통해 단결정을 성장시키는 방법이다.

국내 압전 세라믹스의 기술력은 세계 수준에 버금가는데, 특히 학계와 연구계의 연구 성과는 세계적 수준에 도달해 있다. KIST, 한국전기연구원, 한국세라믹기술원 등이 납계 압전 세라믹스 또는 납이 없는 압전 세라믹스에 대한 조성 특허를 확보하고 있다. 최근에는 서울대, 울산대, 고려대 등 학계에서 납이 없는 다양한 압전 세라믹스의 조성 및 공정 기술을 개발하여 특허권을 확보 중에 있다. 그러나 국내 업체의 활동 영역은 일부 응용 제품에 적합한 압전 세라믹스 생산에 국한되어 미국, 일본, 독일과 같은 국가의 세계적인 소재업체의 수준에는 미치지 못하는 실정이다.

MIT 선정 미래 10대 유망기술

압전 세라믹스 시장은 자동차, 무선 통신, 의료 초음파 진단기, 군수

및 민간용 수중 초음파 센서, 산업용 정밀 스테이지 등의 분야에서 독보적 기술로 발전을 거듭하고 있다. 따라서 압전 세라믹스의 수요는 지속적으로 증가할 것으로 예상되는데, 특히 납 없는 압전 세라믹스에 대한 수요는 가까운 시일 내에 크게 증가할 가능성이 높다. 최근에는 압전 세라믹스가 에너지 하베스팅 분야에서 매우 유망한 소재로 각광받고 있으나 아직은 상용화 단계라기보다는 연구 개발 단계이다.

압전 에너지 하베스팅 기술은 약 $1\text{mW}/\text{cm}^2$ 수준으로서 적용 분야가 극히 제한적이다. 센서 네트워크 등에는 바로 적용이 가능한 수준에 도달하였으나 파급효과가 큰 대체 에너지 생산용으로는 발전량이 매우 부족한 실정이다. 따라서 압전 에너지 하베스팅에 적합한 소재와 함께 하베스팅 구조의 개발이 뒤따라야 할 것이다.

시장조사 전문기관 IDTechEx의 최신 시장조사 보고서에 따르면 압전 에너지 하베스팅 소자의 시장 규모는 연평균 38%로 성장해서 2018년에는 1억4,500만 달러까지 확대될 것이며, 그 이후 2022년까지 6억 6,700만 달러에 달할 전망이다.

최근 압전 에너지 하베스팅 기술에 대한 연구는 매우 활발히 이루어져서 매년 수백 편에 달하는 논문이 발표되고 있다. 특히, 압전기술과 나노기술의 접목을 통해 압전 나노 발전기(Piezoelectric nano generator) 분야가 새롭게 형성되고 있는데, 이 기술은 2009년 MIT 선정 미래 10대 유망 기술로 선정되기도 하였다.

학계 및 연구계의 연구 개발뿐 아니라 상용화 관점에서 압전 에너지 하베스터를 적용하고자 하는 연구 개발 또한 활발히 진행되고 있다. 영국, 네덜란드 등의 유럽국가에서는 압전 에너지 하베스터를 댄스

클럽에 도입하여 에너지 소비를 절감하기 위해 노력하고 있다. 이스라엘 이노와텍(Innowattech)은 도로에 압전 에너지 하베스터 모듈을 설치하여 주변에 전기 에너지를 공급하고자 하는 기술을 개발하는 데 도전하고 있다. 일본에서는 지하철 개찰구와 다리에 압전 에너지 하베스터 모듈을 설치하여 전기를 얻어 내는 기술을 개발하는 중이며, 미국과 영국에서는 군화에 압전 에너지 하베스터를 장착하여 스스로 전기를 만들어 낼 수 있도록 '배터리 필요 없는 군인 프로젝트'를 진행 중에 있다.

소재 측면에서는 기존의 단순한 압전 세라믹스 기술에서 탈피하여 산화아연(ZnO) 등 새로운 소재 및 나노 구조 소재에 대한 연구 개발이 이루어지고 있으며 압전 세라믹스와 폴리머의 복합소재에 대한 개발도 관심을 받고 있다. 또한 고출력에 대한 요구로 인해 압전 단결정 소재를 에너지 하베스팅 분야에 적용하고자 하는 노력이 진행 중이다. 납 없는 압전 소재의 특성이 크게 향상되고 있으므로 빠른 시일 내에 PZT 세라믹스를 대체할 수 있는 새로운 소재가 출현할 것으로 기대되고 있다.

흡이 만드는 지속가능한 미래사회

박상현(계면제어연구센터)

우주에서 임무를 마치고 돌아오는 우주왕복선. 비행사들에게는 집으로 돌아갈 때가 가장 가슴 떨리는 시간이다. 지구로 귀환한다는 설레임도 있겠지만 대기권 재돌입이라는 위험천만한 일을 앞두고 있기 때문이다. 조금만 잘못해도 대기와의 마찰이 우주왕복선을 산산조각 내거나 먼 우주로 다시 튕겨버릴 수도 있기 때문이다. 안전한 각도를 찾아 들어갔다고 하더라도 우주왕복선 표면을 수천 도까지 올려놓는 대기와의 마찰이 가슴을 졸이게 만든다. 몇 십m 쯤 되는 운석도 지표면에 닿지 못하고 대기 중에서 몽땅 타버리지 않던가. 이 위험하고 불안한 환경에서 우주비행사들을 지켜주는 것은 다름아닌 도자기, 세라믹스다.

세라믹스라고 하면 흔히 잘 깨져서 도자기처럼 조심스레 다루는 장면이 연상된다. 그러나 사실 흡은 지구상에 존재하는 물질 중 가장 강력한 물질 중 하나다. 금속이 버티지 못하는 고온에도 끄떡없는가



미국의 우주왕복선 엔터프라이즈. 대기권 재돌입시의 열에 견디기 위해 표면을 촘촘하게 세라믹스 소재로 덮었다. 세라믹스는 가혹한 환경을 버텨야 할 때 종종 이용된다.

하면 악조건 속에서도 물리적, 화학적 특성이 변하지 않는다. 마모에도 강하여 무언가를 튼튼하게 보호하는 데도 적합하다. 이처럼 세라믹스는 여러 가지 우수한 특성을 지녀 가혹한 환경 하에서 작동이 요구되는 내열, 내화학, 내마모 부품 등에 걸쳐 광범위하게 사용된다. 이렇게 이용되는 세라믹스 소재를 엔지니어링 세라믹스라고 한다.

산업의 소금, 엔지니어링 세라믹스

산업적으로 활용되는 대표적인 엔지니어링 세라믹스 소재로는 지르코니아(ZrO_2), 알루미늄(Al_2O_3), 이트리아(Y_2O_3), 코디어라이트 등과 같은 산화물계 세라믹스와 탄화규소(SiC), 질화규소(Si_3N_4), 질화알루미늄(AlN) 및 탄화붕소(B_4C) 등이 있다.

엔지니어링 세라믹스 소재는 일반적으로 금속 소재와 비교하여 밀도가 낮으며 내열성, 경도, 내화학 특성과 고온 강도가 우수하다. 그러나 깨지기 쉬운 특성이 있어 금속 소재와 비교하여 신뢰도가 낮으며 제조단가가 높다는 단점이 있다.

엔지니어링 세라믹스는 총 생산량으로는 전체 소재 시장에서 차지하는 비중이 높지 않으나 여러 첨단 산업체에서 반드시 필요한 핵심 소재로 활용되고 있다. 첨단 산업의 소금이라 해도 과언이 아니다.

최근에는 산업 시스템이 고도화하고 에너지 고효율화가 요구되어 시스템 작동 환경이 가혹해지고 있다. 자동화로 인해 사람이 직접 위험한 환경에 들어가야 할 필요가 없어지면서 사람이 일하지 않는 곳의 작업 환경이 이전보다 더 극단적으로 변한 것이다. 이에 따라 엔지니어링 세라믹스로 이루어진 핵심 부품들의 기술 개발이 기술 선진국에서 활발히 전개되고 있다.

특히 지속가능 사회를 위한 에너지 및 환경 친화형 산업체에서는 시스템용 엔지니어링 세라믹스 부품 기술이 개발의 핵심을 이루고 있다. 이처럼 활용도가 급속히 높아지고 있기 때문에 엔지니어링 세라믹스의 깨짐 특성 및 높은 제조 단가와 같은 단점을 보완하고, 세라믹스의 우수한 특성을 최대한 활용할 수 있는 최적화 기술이 개발되고 있다.



고온, 고압 환경이 유지되는 제철기의 노즐은 엔지니어링 세라믹스가 활약하는 대표적인 분야다. 제철공장에서 쇠물을 데우는 도가니 역시 세라믹스가 중요한 소재다.

◎ 엔지니어링 세라믹스 응용 분야 핵심 부품 및 엔지니어링 세라믹스 종류

구분	관련 산업체	핵심부품	소재
대기 환경	자동차 산업	DSC, DPF 필터	SiC, Cordierite
	석탄가스화기 : 발전/액화/LNG 산업	고온 집진 필터	SiC
에너지	발전산업	NAS 전지 전해질/풍력 발전용 베어링	β -Al ₂ O ₃ /Si ₃ N ₄
	제철/제강/고온로 산업	Radiant tube, Burner nozzle, 열교환기	SiC, Cordierite
전자	반도체 산업	척, 반응관, 링, 보트, 치구류, 발열체	SiC, Quartz, Al ₂ O ₃ , Y ₂ O ₃ , AlN
	LCD, LED 산업	정반, 운반체, 치구류	Al ₂ O ₃ , SiC
우주, 항공, 방산	우주 산업	발사체 노즐	SiC 섬유/SiC
	항공 산업	베어링	Si ₃ N ₄
	방위 산업	방탄판 등	SiC, Al ₂ O ₃

대기를 지키는 세라믹스 필터

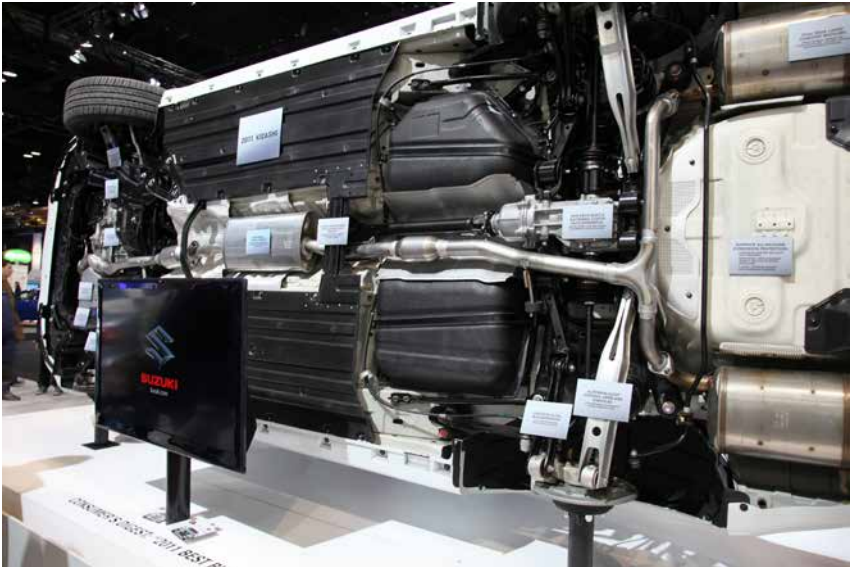
대기 환경오염의 많은 부분은 화석 연료를 사용하는 수송기계류에서 발생하는 배기가스가 원인이다. 이 때문에 세계 각국은 자동차의 배기가스에 기준을 두어 규제하고 있으며 2014년부터는 선박 및 중장비에까지 규제가 확대될 예정이다.

배기가스 규제 기준을 만족하기 위해 꼭 필요한 것이 촉매변환장치 필터인데, 여기에 가장 중요하게 이용되는 재료 중 하나가 엔지니어링 세라믹스다. 디젤 자동차에 있는 배기가스 오염 정화 장치에는 탄화규소 필터를 이용한다. 이에 비해 선박과 중장비기계에는 코디어라이트나 탄화규소로 만든 벌집모양의 다공질 필터가 있다.

국내에서도 벌집 모양의 세라믹 다공체 관련 기반 기술 개발이 이루어져 왔다. KIST에서는 열, 기계적 특성이 30% 이상 향상된 탄화규소 다공체 기술을 개발했으나 국내 신차 제조업체와 공조가 뒷받침되지 않아 본격적인 실용화에는 이르지 못했다. 그러나 국가 산업 경쟁력을 높이려면 세계 시장에 진입하기 위한 차세대 세라믹 다공체와 필터 기술을 전략적으로 개발해야 한다.

세라믹 필터는 자동차뿐 아니라 발전에도 사용된다. 석유나 석탄과는 달리 석탄가스는 환경친화적인 특성이 많아 관련 시장이 확대될 전망이다. 향후 기후 변화 협약 등 환경규제가 강화되고 연이은 원전 사고, 노후 화력발전 설비 대체 수요를 고려하면 2030년경에는 석탄가스화 발전이 약 8,300억 달러의 거대 시장을 형성할 것으로 전망된다.

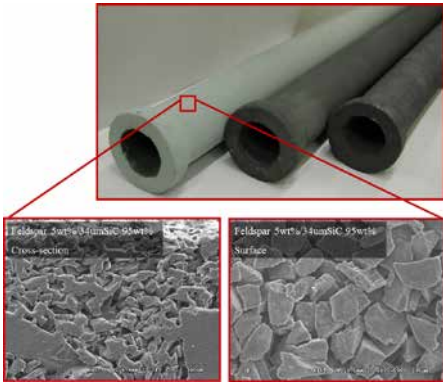
석탄 가스화 발전 설비에서 발생하는 합성가스를 활용할 때 문제되는 것이 분진과 황화수소(H_2S)다. 특히 황화수소가 골칫거리인데,



촉매변환장치는 배기가스 조절을 위해 꼭 필요한 부품이다. 차체 하면의 한가운데 있는 타원형 박스가 촉매변환 장치다.

부식성이 강하여 분진제거용 필터가 금방 상해버리기 때문이다. 따라서 석탄가스화기 시스템에서는 내열, 내부식 특성이 우수한 탄화규소 고온 가스 필터를 반드시 사용해야 한다.

탄화규소 고온 세라믹 필터는 석탄가스화 발전, 석탄가스화기를 이용한 액화공정 및 합성가스 제조 설비의 본격적인 가동이 시작되는 2012년 이후 비약적인 성장이 기대된다. 세라믹 고온 분진 필터의 시장 규모는 2015년까지 1,000억 달러 이상의 시장을 형성할 것이다. 국내에서도 태안 석탄가스화 발전 설비 300MW급 실증 플랜트를 시작으로 2020년까지 장기 전력수급 계획상 두 기의 석탄가스화 발전 플랜트, 1~2기의 SNG 생산용 석탄가스화기 건설이 예상되고 있다. 정유회사에서도 사용되고 있기 때문에 세라믹 고온 분진 필터의 국내



KIST에서 연속 소결공정을 사용하여 개발된 상용급 탄화규소 고온 가스 필터

시장만 해도 연간 200~300억 원에 달할 것으로 예상된다.

KIST에서는 상용 탄화규소 고온 가스 필터와 비교하여 상온 및 고온 파괴강도가 30% 이상 향상된 탄화규소 가스 필터 소재 기술을 개발했다. 이와 함께 경제성이 높은 연속 소결공정을 채용하여 크기에 제한받지 않는 독특한 탄화

규소 필터 제조 공정 기술을 확보하였으며 신뢰성이 확인되는대로 실용화가 이루어질 전망이다.

에너지 효율을 높이는 세라믹스

세라믹스는 오염물질 제어 외에도, 많은 에너지가 필요한 산업의 에너지소비를 줄이는 데도 활용된다. 최근까지 개발되어 실용화된 대표적인 에너지 환경용 세라믹 소재 부품은 고온 세라믹 필터, 제철 및 제강 산업에서 사용되는 전열관(Radiant tube), 고온로 산업에서 사용되는 버너 노즐 등이 있다. 고온 세라믹 열교환기는 일반 금속 소재를 사용할 수 없는 1,200℃ 이상의 고온에서 열 회수를 위해 사용된다. 고온 세라믹 열교환기를 이용하면 최대 65%까지 연료를 절감할 수 있으며, 2017년 경에는 관련 시장이 세계적으로 25조 원에 이를 것으로 전망된다.

국내에는 정부출연연구기관을 중심으로 관련 기술 개발이 이루어졌다. KIST에서는 탄화규소 고온 열교환기의 제조비용을 획기적으로

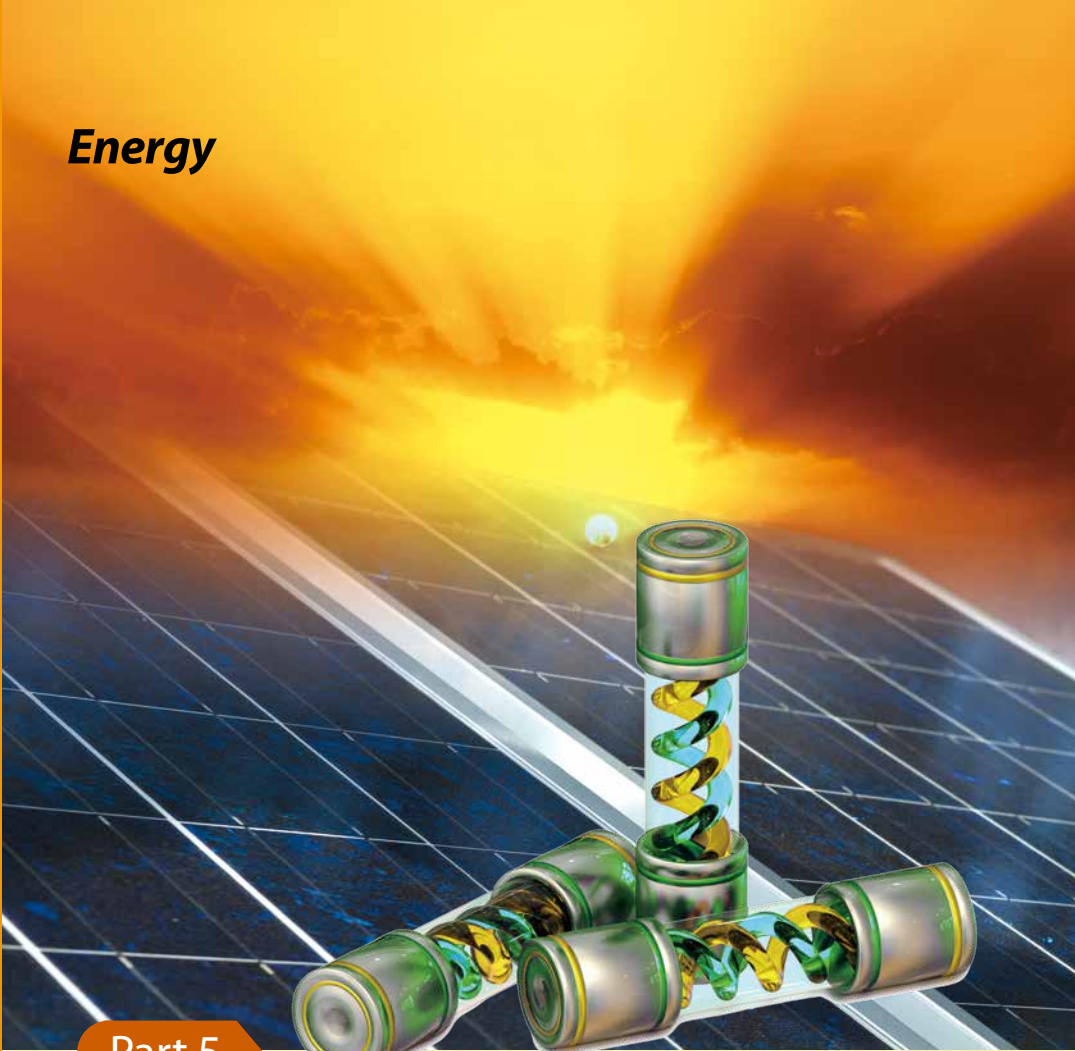


고온 세라믹 탄화규소 판형 열교환기와 제철 및 제강 산업에서 사용되는 전열관

낮출 수 있는 몰드 성형기술과 대형 탄화규소 부품을 경제적으로 생산할 수 있는 연속 반응소결 기술을 개발했다. 이를 통해 산업용 세라믹 부품 시장에서 기술 경쟁력을 확보하려 노력하고 있지만 관련 산업체가 적극적으로 참여하지 않아 아직 실용화는 더딘 편이다.

에너지 환경 산업용 엔지니어링 세라믹 소재는 국가 기간산업을 고도화할 뿐 아니라 지속가능한 미래 사회를 구현하기 위해 반드시 개발해야 하는 핵심 소재다. 세계 10위의 에너지 소비국인 한국에서도 에너지 안보와 국가 산업 경쟁력 확보, 국민의 복지를 위하여 에너지 환경 산업용 엔지니어링 세라믹 소재 기술 개발에 박차를 가해야 한다. 국가적인 차원에서도 수요 산업체에서 활발하게 관련 기술을 적용할 수 있도록 정책적인 배려가 요구된다.

Energy



Part 5

에너지



전망 22 깨끗하고 무한한 화학연료

전망 23 촉망받는 2세대 태양전지, CIGS

전망 24 가장 현실적인 대안, 바이오연료

전망 25 깨끗하고 힘센 차세대 동력장치, '연료전지'가 온다

전망 26 전기에너지의 변신 돕는 이차전지

Intro 미래 책임지는 신 · 재생 에너지

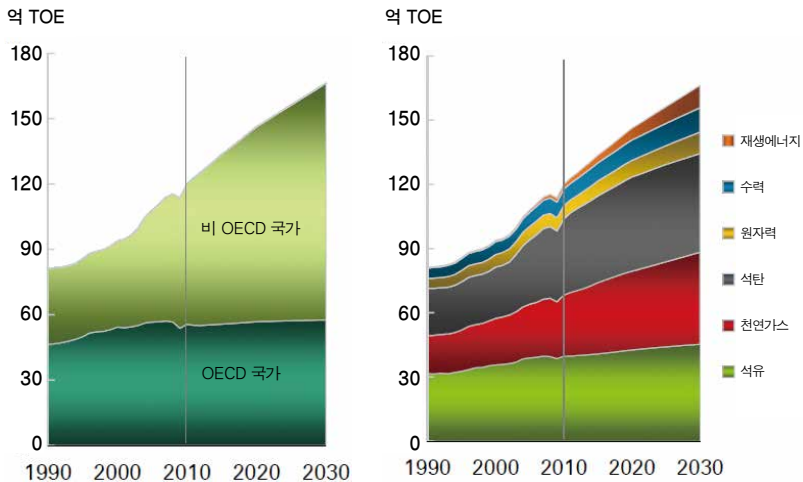
석유, 석탄, 천연가스 같은 화석연료는 많은 양의 탄소를 포함하고 있다. 에너지를 얻기 위해 화석연료를 태우면 탄소와 산소가 결합하면서 다량의 이산화탄소가 발생한다. 이산화탄소는 지구온난화를 촉진하는 대표적인 주범이다. 지구가 태양으로부터 받은 에너지가 빠져 나가지 못하도록 막기 때문에 지구 표면의 온도를 높인다. 지구온난화는 전 세계적인 이상기후현상을 일으키는 원인으로 지목되고 있다.

개발도상국의 경제 발전에 따라 에너지 소비는 폭발적으로 증가하고 있다. 에너지의 핵심인 화석연료도 빠르게 고갈되어 고유가가 지속되고 있다.

개발도상국의 경제 발전에 따라 에너지 소비는 폭발적으로 증가하고, 에너지의 핵심인 화석연료도 빠르게 고갈되어 고유가가 지속되고 있다.

세계 각국이 에너지 절약 정책을 강력하게 펼치고 있지만 불행하게도 증가 추세는 조금도 줄어들지 않고 있다. 영국의 석유회사인 BP가 발표한 보고서에 따르면 현재 에너지 소비량은 120억 TOE(석유환산톤)에 달한다. 10년 마다 약 20억TOE씩 꾸준히 증가하고 있다. 2030년 예상되는 에너지 소비량은 1990년의 2배나 된다.

각국이 에너지 절약에 몰두하는데도 불구하고 에너지 소비가 무섭게 늘는 이유는 비 OECD 국가의 산업화 때문이다. 개발도상국이 많이 포함된 이들 국가에서 산업이 발달하면서 예전보다 많은 에너지를



에너지 소비량 증가 추이. 왼쪽은 국가군별 소비량, 오른쪽은 에너지원별 소비량

쓰게 된 것이다. 2000년 이후 OECD 국가의 에너지 소비는 안정세에 접어들었지만, 비 OECD 국가의 에너지 소비는 폭발적으로 늘고 있다.

지구온난화 문제, 급증하는 에너지 소비 문제를 해결할 수 있는 방법은 무엇일까? 가장 유력한 대안은 신·재생에너지다. 신·재생에너지는 기존 화석연료를 변환시키거나 햇빛, 물, 지열, 생물유기체 등을 포함하는 재생 가능한 에너지를 변환시킨 에너지를 말한다. 우리나라는 현재 태양열, 태양광, 바이오매스, 풍력, 소수력, 지열, 해양에너지, 폐기물에너지 등 8개 재생에너지와 연료전지, 석탄액화가스화, 수소에너지 등 3개 신에너지를 대상으로 정했다.

세계적으로도 신·재생에너지 시장은 급성장하고 있다. 건설 전문지, '건설경제(CNEWS)'가 2012년 2월 7일 발표한 세계에너지 수요전망(IEO: International Energy Outlook)에 따르면 신·재생에너지 시장 규모는 2010년 2,430억 달러로 2004년부터 연평균 32% 성장중이라고 한다. 2015년에는 4,000억 달러까지 성장할 것으로 예상된다. 우리나라의 신·재생에너지 시장도 세계 시장만큼은 아니지만 빠른 속도로 커지고 있다. 신·재생에너지는 국내 보급량이 연평균 7%씩 증가해 2010년 총에너지에서 2.6%를 차지했다. 전체 신·재생에너지 중 폐기물 에너지가 70.9%로 대부분을 차지한다. 수력이 11.6%, 바이오에너지가 11%로 뒤를 잇고, 태양광, 풍력, 지열, 연료전지 등은 6.5%다.

현재 국내 신·재생에너지 시장과 기술 수준이 초기 단계고 폐기물 에너지의 비중이 높지만 실망할 필요는 없다. 미국, 일본, EU, 중국에 비해 신·재생에너지 보급이 다소 늦게 시작됐다고는 하나 향후

신·재생에너지를 대표적인 녹색산업으로 육성해 해외시장을 공략하기 위한 국가적 지원이 이루어지고 있기 때문이다. 국가적으로는 2015년까지 태양광 15%, 풍력 15%의 세계시장 점유율을 달성해 5대 신·재생에너지 강국으로 진입하는 것이 목표다. 또 2030년까지 1차 에너지의 11%를 신·재생에너지로 보급하는 목표를 세워 두었다.

정부는 태양광, 태양열, 지열, 연료전지 등을 사용하는 그린홈 100만호 보급 사업을 추진해 2004년부터 2011년까지 총 11만1,176호 4,610억 원을 지원했다. 이중 태양광이 전체 예산의 73.3%를 차지한다. 또 태양광, 풍력, 연료전지에 대해 총 6개의 테스트베드를 선정하여 국가적 차원의 거점을 마련했다. 서남해에는 2.5GW 해상풍력 종합추진계획을 발표했다.

수송용 연료 부문에서는 2012년 바이오디젤 2% 혼합을 시작으로 수송용 연료 혼합 의무화 제도를 시행할 제도적 기반을 마련했다. 아직 산업으로서의 위상이 부족한 폐기물 및 바이오에너지 분야에서도 비전과 세부 전략을 수립하고 있다. 이 분야는 확대 가능성도 높고, 세계 시장 규모도 큰 편이다.

태양광을 '제2의 반도체 산업', 풍력을 '제2의 조선 산업'으로 육성하려는 정부의 의지는 분명해 보인다. 앞으로 다양한 신·재생에너지가 증가할 것으로 기대된다.

깨끗하고 무한한 화학연료

민병권(청정에너지 연구센터)

전기에너지는 가장 깨끗하고 편리한 에너지로 인정받는다. 그러나 사실 완전히 깨끗한 것은 아니다. 전기를 만드는 과정을 들여다보자. 발전소 중 아직도 가장 비중이 높은 화력 발전은 이산화탄소를 만드는 주범이다. 깨끗한 전기를 만들기 위해 다량의 이산화탄소를 발생시켜 환경을 오염시키는 셈이다.

또 전기에너지가 반드시 편리한 것도 아니다. 전기에너지는 다른 화학에너지에 비해 저장 수단이 취약하다. 충전 기술이 발전되고 있지만, 대용량의 전기를 사용하는 전기자동차를 움직이려면 상당 시간 플러그에 꽂아 두어야 한다. 발전소에서 만든 전기를 저장할 방법도 마땅치 않아 여분의 전기는 그냥 허공에 버려진다.

전기에너지를 더 깨끗하게, 더 편리하게 만들려면 어떻게 해야 할까? 현재 가장 유력한 방법은 태양광에너지와 수소를 이용하는 것이다.



화력발전은 가장 경제적인 전기생산방법 중 하나지만 발전 과정에서 발생하는 공해와 이산화탄소가 만만치 않다. 세계적으로도 화석연료를 이용하는 발전소는 점차 줄여나가는 추세다.

태양광-수소 제조 기술

태양광에너지는 친환경적이고 무한한 에너지다. 지구 표면에 1시간 정도 도달하는 태양광에너지는 인류가 1년 동안 사용하는 에너지와 맞먹는다. 이를 효율적으로 이용하는 것이 우리의 과제다.

수소는 저장과 수송이 용이한 청정 화학연료로, 현재 화석연료를 대체할 수 있는 가장 유망한 에너지다. 수소와 산소가 만나면 에너지를 방출하고 물이 만들어진다. 탄소가 포함돼 있지 않아 이산화탄소를 만들 염려가 없다. 게다가 수소는 전기에너지로 쉽게 바꿀 수 있는 장점을 갖고 있다. 연료전지를 통과하면 수소는 곧바로 전기에너지가 된다.

그러나 현재 쓰이는 수소 생산 공정은 그다지 친환경적이지 않다. 수

소는 석유, 석탄, 천연가스와 같은 화석연료를 사용해 만드는데, 생산 과정에서 필연적으로 이산화탄소를 발생시킨다. 만약 태양광에너지로 수소를 만든다면 이런 문제를 해결할 수 있다. 이런 방법을 '태양광-수소 제조 기술'이라고 한다.

태양광-수소 제조 기술은 현재 바로 적용할 수 있다. 태양전지로 전기를 만든 다음, 물을 전기 분해해 수소를 생산하면 된다. 즉 현재 개발돼 있는 태양전지 기술을 바로 응용하는 것이다. 그러나 태양전지와 물 분해 전해조를 각각 만들어야 하므로 비용이 많이 드는 단점이 있다. 따라서 전기 생산 시스템과 물 분해 시스템을 합친 광전기화학 전지(PEC) 방식이 연구 중이다.

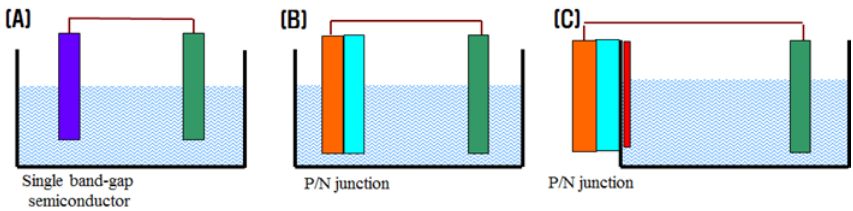
수소는 대표적인 청정에너지원으로 주목받고 있다. 수소전지 자동차는 이미 제한적으로나마 실용화 단계에 있어 관공서 등에서 운용중이다. 사진은 수소자동차로 개조된 미국의 자동차 허머2.



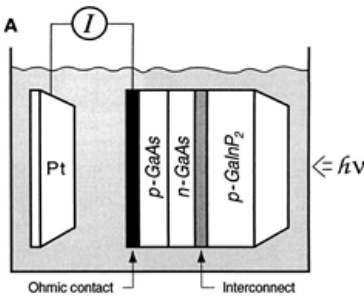
태양광에서 바로 수소를 얻는 PEC

광전기화학전지 방식은 1972년 일본의 후지시마와 혼다가 처음 제안했다. TiO_2 (이산화티타늄)과 같은 산화물 반도체 광전극을 전해질 내에 담근 방식이 가장 많이 연구되고 있다. 이때 산화물 광전극은 빛을 흡수해 전자를 만들고, 물을 산화시키는 반응의 과전압을 낮추는 촉매 역할을 동시에 감당해야 한다.

그런데 이런 특성을 모두 가진 반도체 물질은 극히 드물다. 또 이 방식으로는 태양광 전환 수소 발생 효율이 5%에 불과하고, 대량 생산이 어렵다. 상용화가 가능한 태양광-수소 발생 효율은 15% 이상으로, 아직 많이 부족하다.



광전기화학적 태양광-수소 생산 시스템 모식도. (A)산화물 반도체 광전극을 전해질에 담근 방식. (B)p형과 n형 반도체를 접합한 방식 (C)광전극-촉매막 일체형 구조를 사용한 방식.



p형 반도체와 n형 반도체를 접합한 새로운 광전기화학전지 개념도

이런 저효율 문제를 극복하기 위해 p형과 n형 반도체를 접합한 방식이 등장했다. 미국 터너와 공동 연구자들은 GaAs(갈륨-비소)와 GaInP_2 (갈륨-인듐-인 화합물) 박막을 붙여 광전극을 만들었다. 이를 광전기화학전지에

응용하자 태양광 전환 수소 발생 효율이 12.4%까지 올랐다. 상용화가 가능한 15%에 거의 근접한 수치라고 할 수 있다.

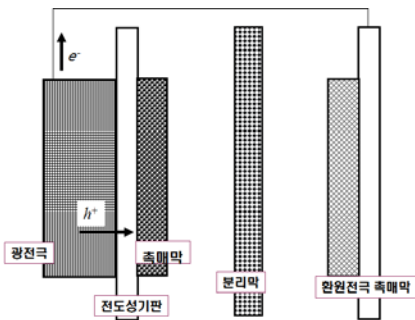
그러나 GsAs 화합물 박막은 원료가 비싸고, 제조 방법에도 비용이 많이 드는 단점이 있다. 또 화합물 반도체가 산성 또는 염기성 용액에서 안정성이 떨어지는 심각한 문제를 갖고 있다.

태양전지 기술을 접목한 KIST 광전기화학전지

최근에는 ‘광전극-촉매막 일체형’ 방식의 광전기화학전지 기술이 연구 중이다. 기본 원리는 전기를 얻은 다음 그 전기로 물을 분해하는 가장 고전적인 방식과 비슷하다. 그러나 광전극이 촉매막과 일체형으로 되어있기 때문에 태양전지와 전해조를 따로 설치할 필요가 없고, 전선을 최소한으로 사용해 손실이 적다는 점에서 차별성이 있다.

기존 산화물 반도체 광전극을 전해질에 담근 방식에서 전극이 빛을 흡수해 전자를 만들고, 물을 산화시키는 반응의 과전압을 낮추는 촉매 역할을 동시에 감당해야 했다면, 이 역할을 각각 분리시켰다. 구체

적으로는 태양광을 흡수해 전자를 만드는 광전극, 물을 분해할 때 전압을 낮추는 역할을 하는 산화전극 촉매막, 수소이온의 환원을 촉진시키는 환원전극 촉매막, 수소이온 또는 수산화이온을 선택적으로 투과시켜 산소와 수소 기체를 분리하는 분리막으로 구성된다.



광전극-촉매막 일체형 전극을 이용한 광전기화학전지 개념도

KIST에서는 광전극-촉매막 일체형

방식으로 저비용, 고효율, 고안정성 광전기화학전지를 개발 중이다. 광전극으로 CIGS(구리-인듐-갈륨-셀레늄 화합물) 박막 태양전지를 사용하고, 촉매막으로 금속 산화물 나노입자를 사용한다. CIGS는 현재 가장 촉망받는 2세대 태양전지로, 에너지 효율이 20%에 달할 정도로 높고, 안정적인 장점이 있다. 단, CIGS 박막 태양전지는 가격이 비싸다.

따라서 KIST는 값비싼 기존 제조 공정을 개선하기 위한 연구를 진행 중이다. CIGS 박막을 제조할 때 값비싼 진공증착법 대신 용액공정을 이용하거나, 나노입자를 프린팅해 촉매막을 제조하는 방식으로 비용을 줄이고 있다.

막대한 투자로 실현 가능성 높아

미국 에너지부(Department of Energy)가 발표한 자료에 따르면, 광전기화학전지가 상용화하려면 태양광-수소 전환 효율이 15% 이상, 안정성이 2만 시간 이상, 제조가격이 수소 kg당 5달러 미만이다. 현재 기술 수준은 이 조건을 충족하기에 많이 부족하다.

그러나 태양광-수소 제조기술은 가장 이상적이고 깨끗하며 무한한 화학연료를 얻는 방법이라는 점에서 가치가 높다. 미국, 유럽, 일본 모두 태양광-수소 기술에 막대한 투자를 아끼지 않고 있다. 우리나라도 수소프론티어사업단과 서강대학교에서 연구 중이다. 2009년 시작한 서강대학교의 '인공광합성' 사업은 연간 50억 원 규모로 10년간 수행되는 대규모 프로젝트다. 각국이 막대한 투자를 하고 있는 만큼 기술이 급속히 개발될 것으로 예상된다.

촉망받는 2세대 태양전지, CIGS

김진영(광전하이브리드 연구센터)

이산화탄소를 발생시켜 지구온난화를 촉진시키는 화석연료의 대안으로 태양광발전이 주목받고 있다. 태양에너지는 지구에 존재하는 모든 에너지의 근원이다. 태양광발전은 태양에너지 중에서 빛에너지를 전기로 바꾸는 것을 말한다. 이산화탄소가 발생하지 않는 깨끗한 에너지이며, 무한한 에너지원인 태양에너지를 사용하므로 지속가능한 것이 장점이다.

2012년 6월에 발표한 'SNE 리서치'에 따르면 태양광발전 시장은 급속히 성장하고 있다. 2011년 전 세계 태양전지 설치 규모는 23.2GW로 18조 원 규모의 시장이다. 4년 뒤인 2015년이면 50GW, 38조 원의 시장이 성장될 것으로 예상된다. 이런 시장의 팽창은 신기술이 개발됐다는 전제 조건에서 예상할 수 있다. 태양광발전이 성공하려면 어떤 기술이 필요할까?



다양한 신재생에너지 중에서도 태양광은 성장가능성이 매우 큰 분야 중 하나다. 국내에서도 많은 기업들이 태양광 발전 산업에 주목하고 있다. 대표적인 사례가 한화그룹. 큐셀을 인수하여 태양광 발전을 그룹의 핵심 역량으로 육성하고 있다.

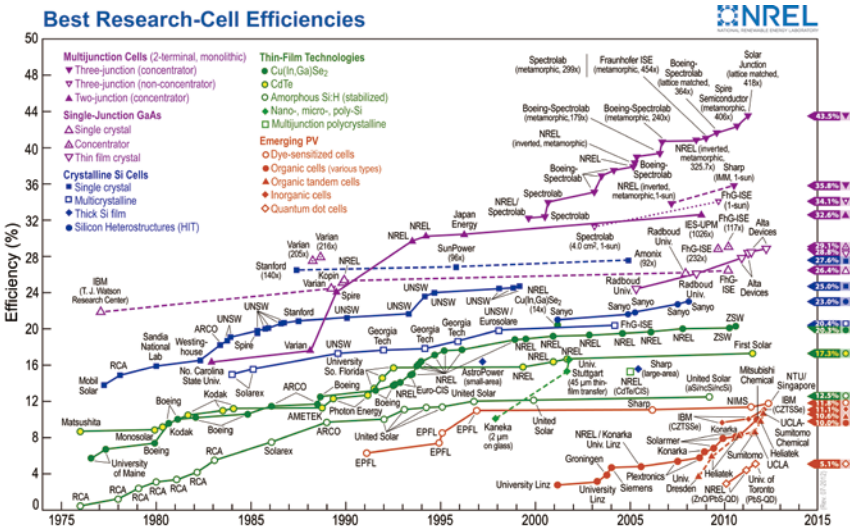
1세대를 넘어 2세대로

어떤 물질은 빛을 비추면 전자를 내놓는 성질이 있다. 빛을 받아 전자를 내놓는 현상을 광전효과라고 하는데, 아인슈타인이 처음 제안했다. 이런 물질을 사용해 태양 빛으로 전기를 만드는 장치를 태양전지라고 부른다. 태양전지는 빛을 흡수한 다음 전자를 만드는데, 빛의 흡수에 의해 발생한 전류 및 전압을 바탕으로 전기에너지가 발생하

는 것이다. 현재까지 알려진 태양전지의 종류는 원료가 되는 재료, 구조, 작동 원리 등에 따라 매우 다양하다.

소위 1세대로 불리는 태양전지는 단결정 실리콘을 두께 0.1 mm 이상의 기판으로 절단하여 사용한다. 1세대 태양전지는 에너지 변환 효율이 높아 25%에 이르지만, 기판 전체 중에서 실제로 빛을 흡수하는 층의 비율이 매우 낮기 때문에 물질의 활용성이 떨어진다는 문제가 있다. 이 때문에 원료물질의 공급 상황에 따라 가격의 변동이 심해 본격적인 상용화가 쉽지 않다.

이에 반해 2세대 태양전지는 수 마이크로미터 두께의 박막물질을 활용하기 때문에 물질의 활용성이 매우 우수하다. 실리콘계, Cu(In, Ga)Se₂나 CdTe 같은 칼코제나이드계, 염료감응계, 유기계 박막태양전지 등이 대표적이다. 이들은 상용화가 막 시작됐거나 준비 단계에 있



다양한 태양전지의 종류와 최고효율. 최근 개발된 기술들은 에너지 변환 효율이 20%를 넘어 높은 전력생산량을 기대할 수 있다. (NREL)

어 빠른 시간 내에 1세대 태양전지를 대체할 것으로 기대된다. 이중 가장 주목받는 2세대 태양전지는 Cu(In, Ga)Se₂(CIGS) 박막 태양전지다. CIGS는 구리(Cu), 인듐(In), 갈륨(Ga), 셀레늄(Se)의 합성 재료로 만든다.

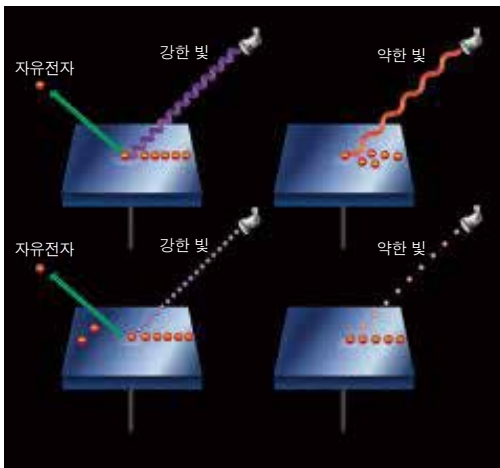
상용화 앞둔 CIGS

차세대 태양전지로 주목받는 CIGS의 가장 큰 장점은 2세대 박막 태양전지 가운데 에너지 변환 효율이 가장 높다는 것이다. CIGS의 에너지 효율은 무려 20% 이상으로, 기존 1세대 실리콘 태양전지와 큰 차이가 없다. 게다가 오랫동안 사용해도 안정적이며, 빛을 흡수하는 성질이 높고, 고용체를 만들기에 용이하다. 고용체란 완전하게 균일한 상을 이룬 고체 혼합물을 뜻하며, 고용체를 형성하면 물질의 다양한 특성을 쉽게 조절할 수 있다.

그러나 아직 비싼 가격을 해결하지 못했다. 우선 CIGS를 만들 때 필

수적으로 들어가야 하

는 재료인 인듐의 가격이 비싸다. 인듐은 대표적인 희소원소로 생산량은 제한적인데, 터치패드 등 쓰이는 곳이 많다. 수요에 따



광전효과의 모식도. 에너지가 특정 수준 이상인 빛을 비추면 광자의 충격으로 자유전자가 튀어나온다. 태양광 발전은 광전효과로 발생하는 자유전자를 이용한다.

라 공급가가 큰 폭으로 변동될 가능성이 높아 상용화에 걸림돌이 되고 있다. 또 제조 공정에서 유리 기판을 사용하는데, 유리 기판의 가격도 높아 전체 비용을 상승시키는 요인이 된다.

또 대면적 기판을 사용한 양산화를 위한 설비투자 비용이 높은 것도 문제다. 현재 '동시증발법'과 '스퍼터링법'이 CIGS 생산에 쓰이는 가장 대표적인 공정인데, 기존 공정 개선 및 새로운 제조 공정 개발을 통해 생산단가를 획기적으로 낮추어야 할 것이다.

CIGS 상용화에 남은 숙제

아직 상용화되지 못했지만 비용을 줄일 수 있는 공정이 연구 중이다. IBM 연구진이 보고한 '스핀코팅법'은 무수 하이dra진을 용매로 사용하는 공정으로 15% 정도의 고효율을 보였다. 그러나 무수 하이dra진이 독성과 폭발성을 가지고 있어 사용하기 어렵다. 새로운 용매를 사용한 공정이 개발되면 상용화될 수 있을 것이다.

ISET에서 개발하고 있는 '프린팅법'은 잉크젯 프린터가 잉크를 쏘아 인쇄하듯, 나노 입자를 증착시켜 만드는 방법이다. 연속 공정이 가능하고, 잉크를 재활용할 수 있어 가격 경쟁력에서 장점이 있다. 그러나 잔류 유기물과 탄소를 효과적으로 제거할 수 있는 기술이 필요하다. 솔로퍼워와 솔라테크닉 등의 기업에서 개발하고 있는 '전기화학증착법'은 전기화학 반응을 이용해 기판에 증착시키는 방법이다. 15% 정도의 셀 효율이 보고 되었고, 다른 두 가지 방법에 비해 문제도 크지 않아 최근 양산화가 시도되고 있다.

그러나 새로운 공정도 가장 근본적인 문제, 원재료인 인듐이 고가라는 문제를 해결해주지는 못한다. 인듐을 대체할 수 있는 새로운 물질



인듐은 다양한 첨단 산업에 이용되는 원소지만 지각 함유량이 많지 않고 순수한 상태로 얻기 어렵다. CIGS도 재료의 비싼 가격을 해결하는 것이 상용화의 열쇠다.

이 필요하다. 가장 주목되는 물질은 $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS)이다. CZTS는 CIGS와 비슷한 높은 흡광계수를 가지고 있지만, 인듐 대신 가격이 싼 아연, 주석이 주원료다.

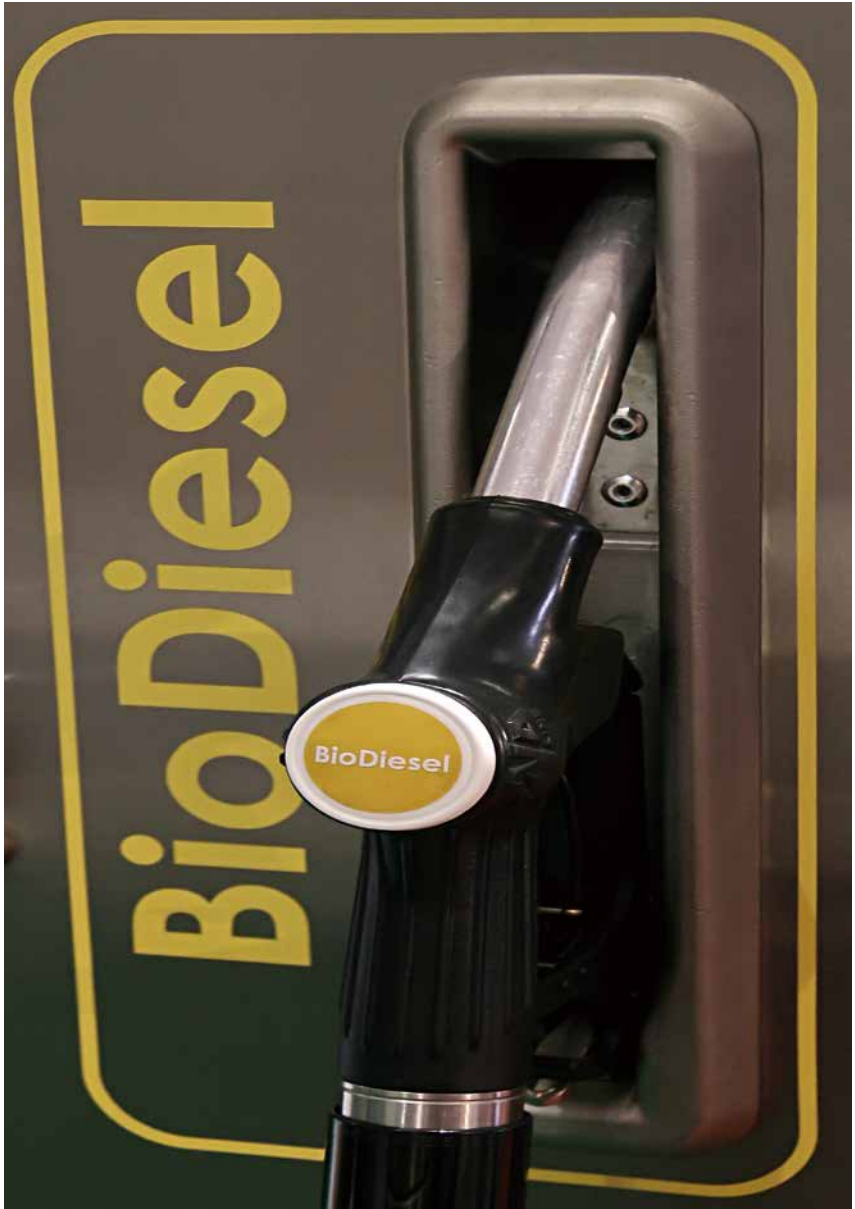
하지만 CIGS보다 파장이 긴 태양광을 흡수하기 어렵다는 단점을 갖고 있다. 최근에는 구성원소인 황을 셀레늄으로 치환해서 이런 단점을 해결할 수 있다는 것이 알려졌다. 이렇게 하면 10% 이상의 고효율을 갖는 태양전지를 만들 수 있다. CZTS 박막 태양전지는 아직 시작 단계다. 원천기술을 확보할 수 있다면 앞으로 10년 후에 상용화가 가능할 것으로 예상된다.

가장 현실적인 대안, 바이오연료

엄영순 · 우한민(청정에너지연구센터)

화석연료인 석유, 석탄의 용도는 크게 두 가지다. 첫 번째는 엔진, 보일러, 발전기 등에서 에너지를 만드는 역할이다. 두 번째는 플라스틱이나 섬유 등 합성제품의 원재료 역할이다. 바이오연료는 이 두 가지 역할을 모두 대체할 수 있는 유일한 대안이다. 게다가 지구상에 풍부하고, 재생 가능하다는 장점도 있다.

이미 바이오에탄올과 바이오디젤은 상용화됐다. 바이오에탄올은 가솔린을, 바이오디젤은 경유를 대신할 수 있으며, 현재 기존 가솔린이나 경유와 혼합해 사용하고 있다. 다양한 대체 에너지가 연구 중이지만, 당장 사용할 수 있는 기술은 드물다. 이런 점에서 바이오연료는 가장 현실적인 대안이라고 말할 수 있다.

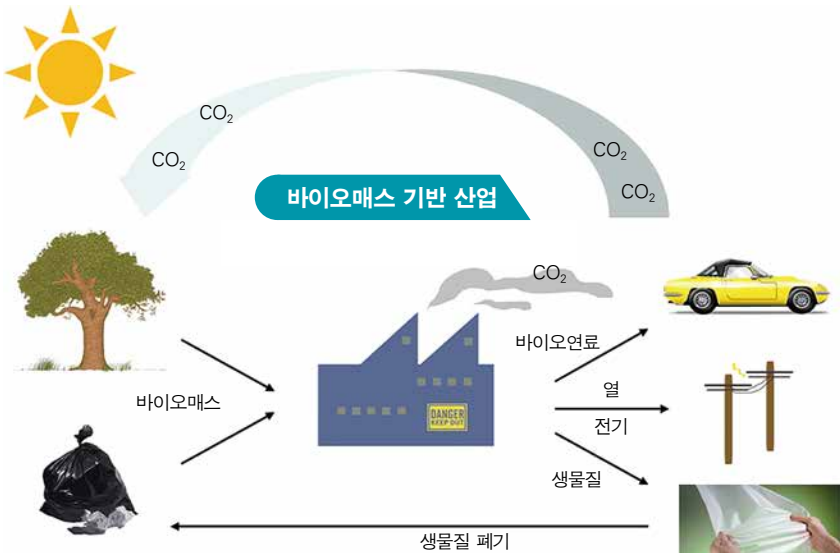


여러 문제점이 있음에도 바이오연료는 당장 활용가능한 현실적 대안이다.

식량이나, 연료나?

태양광을 이용해 광합성을 하는 유기물, 그리고 유기물을 소비해 생성되는 모든 생물 유기체를 바이오매스라고 한다. 그리고 이 바이오매스를 이용해 생산한 연료를 바이오연료라고 부른다. 매우 다양한 물질이 바이오연료가 될 수 있다. 넓은 의미로 나무, 석탄, 석유도 바이오연료다. 그러나 바이오연료는 보통 바이오에탄올, 바이오디젤 같은 액체 연료와 수소와 메탄 같은 기체 연료를 통칭한다. 이들은 수송용, 발전용, 난방용으로 즉시 사용할 수 있다.

바이오연료는 연소되며 이산화탄소를 배출하지만, 이것을 식물이 다시 흡수하는 순환 구조를 이루기 때문에 실질적으로 이산화탄소 증가 효과는 크지 않다.



바이오연료는 이산화탄소를 발생시키지만, 식물이 다시 이산화탄소를 흡수하므로 전체적으로 볼 때 이산화탄소를 증가시키지는 않는다고 말할 수 있다.



세계 바이오연료 시장규모는 2005년 기준 157억 달러 수준이지만, 2015년에는 525억 달러 규모로 230% 이상 성장할 것으로 보고 있다.(U.S. Billion-ton update: Biomass supply for a bioenergy and bioproduct industry, 2011) 미국 농무부와 에너지부가 조사한 보고서에 따르면, 2030년에는 바이오연료가 수입하는 오일의 30%를 대체하고, 100억 갤런의 휘발유를 대체할 것으로 예상된다. 바이오에탄올 사업은 최근 10년간 30% 고성장하고 있다.

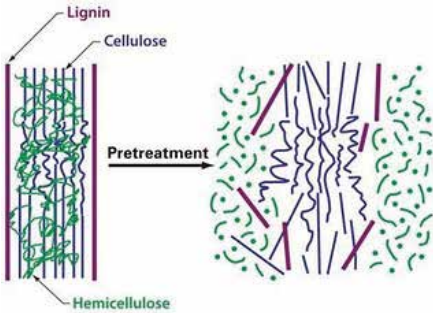
그러나 바이오연료의 생산 방식은 분명 논란의 여지가 있다. 바이오

연료를 식량으로 사용할 수 있는 자원으로 만들기 때문이다. 바이오에탄올은 사탕수수, 사탕무, 옥수수, 밀 같이 탄수화물이 풍부한 작물을 발효시켜서, 바이오디젤은 대두, 유채, 해바라기, 아자수 같이 지방이 풍부한 작물에서 뽑은 기름을 메탄올과 반응시켜서 만든다.

나무에서 석유 뽑는다?

논란이 사라지려면 나무와 풀 같이 식량이 아닌 바이오매스에서 바이오연료를 생산하는 기술이 필요하다. 최근 나무에서 바이오연료를

생산하는 기술이 연구 중이다. 나무는 지구에서 가장 풍부하게 존재하는 바이오매스다. 보통 목질계 바이오매스는 포도당의 결정형 중합체로 구성된 셀룰로오스가 30~50%를, 5탄당과 6탄당의 중합체로 된 헤미셀룰로오스가 15~30%를, 복잡한 방향족 구조 화합물인 리그닌이 10~25%를



목질계 바이오매스의 전처리

차지한다.

목질계 바이오매스로부터 바이오연료를 생산하려면 먼저 수증기, 산, 알칼리 등을 이용해 전처리 과정을 거쳐야 한다. 리그닌 성분을 제거하고, 셀룰로오스를 분해하는 과정이다. 이 전처리 과정을 어떻게 하느냐가 목질계 바이오에탄올의 친환경성과 경제성을 결정한다.

다음에는 '당 처리 과정'을 통해 셀룰로오스를 단당류로 분해해야 한다. 보통 효소를 이용하면 되지만 비용이 많이 들고 리그닌 함량이

높은 원료에는 비효율적인 단점이 있다. 이렇게 분해된 단당류는 에탄올을 만들거나, 단당류 유도체를 만들고, 다른 화학물질을 생산하는데 쓰인다.

효소 대신 열화학적 방법으로 바이오연료를 생산할 수도 있다. 바이오매스를 부분 연소하면 일산화탄소와 수소가 만들어지는데, 수소는 내연기관에서 이용하거나 다른 합성연료의 원료로 쓸 수 있다. 또 산소가 거의 없는 조건에서 낮은 온도로 가열하면 바이오오일, 가스, 차르 등을 만들 수 있다. 추가 촉매 반응을 거치면 고급 연료로 바꿀 수도 있다. 그러나 열화학적 방법은 만들 수 있는 연료의 종류가 제한되며, 부가적으로 공해 물질이 생긴다는 단점이 있다.

목표는 바이오부탄올

바이오에탄올과 바이오디젤이 가장 유명하지만 사실 이들은 완전한 바이오연료라고 부르는 어렵다. 예를 들어 바이오에탄올은 에너지 함량이 낮고 친수성이다. 기름보다 물에 가까우므로 가솔린과 섞었을 때 분리되는 문제가 생기거나, 수송관이나 엔진을 부식시킬 위험이 있다. 따라서 가솔린에 많은 양을 섞지 못한다.

미국 에너지부는 12개의 유망한 단당류 유도체를 제시한 바 있다. 기존의 가솔린을 완벽하게 대체할 수 있는 연료는 바이오부탄올이다. 바이오부탄올은 엔진을 부식시킬 염려가 없고 고농도로 가솔린과 혼합할 수 있다. 또 기존 정유시설의 송유관이나 자동차 엔진의 추가설비 없이 기존 연료를 대체할 수 있다.

화학제품 전문업체인 듀폰과 영국의 석유회사인 BP는 공동 제휴해 바이오부탄올 시제품을 판매할 예정이다. 또한 미국의 환경 보호국



브라질에서 도입한 바이오연료 버스. 바이오연료가 널리 사용되려면 아직 해결해야 할 기술이 많다.

(EPA: Environmental Protection Agency)와 농무부(USDA: U.S. Department of Agriculture)에서도 바이오부탄을 생산 기술 개발을 활발히 진행하고 있다.

식량이 아닌 자원에서, 값싸게

바이오연료가 해결해야 할 과제는 아직도 많다. 원산지에서 바이오매스를 수송하고 저장하는 첫 단계부터 자동차 엔진 연소 반응의 끝 단계까지 전 과정을 연계하려면 채워 넣어야 할 기술이 많다.

핵심은 식량이 아닌 원료에서 바이오연료를 생산하되, 어떻게 비용을 낮추고 환경 오염을 줄이느냐다. 목질계 바이오매스의 경우, 아직 활용하지 않는 헤미셀룰로오스와 리그닌까지 사용한다면 비용을 절감할 수 있을 것이다. 바이오연료를 만드는 과정에는 '생물-화학 융복합 기술'이 주목받는다. 이는 효소를 사용하는 기존의 생물학적 방법과



열을 사용하는 화학적 방법을 융·복합해 생산하는 기술을 말한다. 미국, 유럽, 일본 정부 모두 바이오연료 개발을 위해 막대한 투자를 하고 있다. 미국은 2007년 이후 3조7,000억 달러를 투자했고, 유럽은 2007년 이후 7년 동안 505억 유로를 투자할 계획이다. 미국 대부분 주에서는 2005년부터 바이오에탄올을 10% 혼합하는 것을 의무화하고 있다. 유럽은 2020년까지 바이오연료의 비중을 10%까지 확대할 계획이다.

우리나라도 예외는 아니다. 바이오연료 보급률을 2006년 1.82%에서 2050년 10%로 끌어올릴 계획이다. 이 목표를 달성하려면 2030년까지 에너지 관련 기술 수준을 선진국의 90% 이상으로 높여야 한다.

깨끗하고 힘센 차세대 동력장치, ‘연료전지’가 온다

조은애(연료전지연구센터)

지금까지 인간은 땅속을 파 헤쳐 연료를 얻었다. 석탄, 석유 같은 화석에너지를 중심으로 에너지를 얻어온 것이 현실이다. 최근에는 이런 흐름에서 벗어나 신·재생에너지를 근간으로 하는 에너지 패러다임으로의 전환이 강하게 요구되고 있다. 지난 몇 년간 국내에서도 신·재생에너지 분야에 정부와 기업의 본격적인 기술개발 투자가 이루어지고 있다. 많은 신·재생에너지 관련 기술 중 ‘연료전지’는 현 상황에서 특히 주목받고 있다. 화석연료를 완전히 포기하지 않고, 보다 효율적으로 사용해 에너지 절약과 온실가스 배출 저감을 동시에 꾀할 수 있는 대안이기 때문이다.

최근 연료전지 기술수준은 빠르게 향상되었지만 본격적인 시장진입이 이루어지기 위해서는 내구성, 신뢰성, 경제성 측면에서 한 단계 더 높은 기술수준으로의 도약이 필요하다.

우주선, 잠수함 등 특수 용도의 경우, 이미 상업화 단계에 진입했



독일의 자동차 기업, 메르세데스 벤츠가 2009년 발표한 연료전지 로드스터의 엔진룸. 주요 자동차 기업들은 이차전지 전기자동차와 함께 연료전지 자동차 개발에도 박차를 가하고 있다.

다고 볼 수 있지만, 가정용 연료전지의 경우 아직 초기 상태다. 일본을 선두로 상업화 단계에 진입하였지만 추가연구가 절실한 상황이다. 자동차용 연료전지의 경우 일본, 유럽 및 국내 자동차회사를 중심으로 2015년에 시장 진입이 시작될 것으로 보인다. 일본경제센터(J-economic Center)의 예측에 따르면 2020년 연료전지 시장은 1조 3,582억 엔에 달할 것으로 전망되고 있다. 이밖에 분산 발전용 연료전지는 정부 지원 아래 시장진입 초기 단계에 들어선 것으로 보인다.

친환경 고효율 발전 시스템, 연료전지

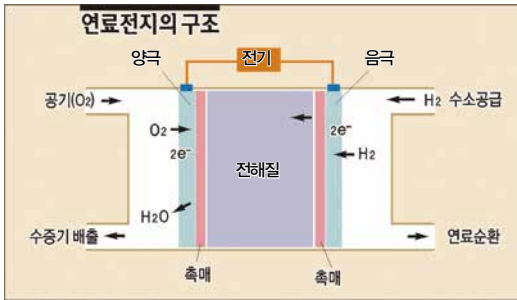
연료전지는 일종의 발전기다. 화학반응을 일으키는 '스택'과 주변장치, 연료변환장치 및 제어기술을 통합제어해 전기를 생산하는 장치

다. 물을 끓여 증기터빈을 돌리는 대형 발전장비와 달리, 전기화학반응에 의해 전기에너지로 직접 변환한다.

연료전지는 기존 발전 방식에 비해 크게 세 가지 장점이 있다. 첫째로 발전효율이 높다. 연료전지의 전기발전 효율은, 운전 장치 사용 전력 또는 열 손실 등을 감안하더라도 40~60% 이상이며, 열병합 발전까지 고려하면 전체 시스템 효율은 80% 이상으로 보고 있다.

둘째로 공해가 적다. 다양한 연료전지가 있지만 최근 많은 연구가 진행되고 있는 분야는 수소를 연료로 쓰는 '수소연료전지'다. 이 연료전지는 수소를 전기화학적으로 반응시켜 전기를 만들지만 물 이외에 어떤 물질도 배출하지 않는다. 수소 이외에 천연가스 등을 쓰는 대규모 연료전지 공정도 다른 발전방식에 비해 상대적으로 공해배출이 낮은 편이다. 현재는 천연가스, 석탄 등의 화석연료로부터 수소를 얻고 있으나 점차 풍력, 태양광, 핵융합발전 등의 신·재생에너지를 사용해 1차 에너지를 얻고, 여기서 물을 전기분해하여 수소를 얻을 것으로 보인다. 이 때가 되면 연료전지는 이산화탄소와 질소산화물(NO_x), 황산화물(SO_x) 배출이 전혀 없는 무공해 2차 에너지 시스템으로 자리잡을 것이다.

마지막으로 발전규모 조절이 용이하고, 설치 장소 제약이 적다는 것도 연료전지의 장점이다. 특히 일반적으로 연료전지는 규모에 따른 에너지 전환 효율의 변화가 크지 않다. 이 때문에 수 W(와트)급에서 수십 MW(메가와트)급까지, 규모에 상관없이 다양한 용도로 전기를 생산하는 것이 가능하다. 소음, 유해가스 배출을 획기적으로 낮출 수 있어 도심 어디에도 설치가 가능하다는 장점도 있다.



연료전지 기본 구조. 공해가 거의 없어 차세대 에너지원으로 각광받고 있다.

대용량 전기 생산도 문제없다

흔히들 연료전지를 자동차나 가정용 소규모 발전장치라고 생각하기 쉽다. 하지만 중소규모 발전소에도 적용할 수 있는 것이 장점이다. 대규모 발전소에 의지하지 않고 공장같은 전력 소비처에서 수백 kW 내지 수십 MW까지의 전력을 직접 생산하는, 중앙집중식 발전에 대응하는 ‘분산발전’ 시스템 구축하는데 최적으로 평가 받고 있다.

일반 화력발전은 건설단가 및 발전효율 측면에서 유리하지만, 연료전지의 경우 분산발전에 보다 적합한 특성을 갖고 있다는 의미다. 분산발전 시스템이 보편화되면 발전소 건설에 따른 님비(NIMBY: Not In My Back Yard) 현상을 최소화할 수 있고, 원거리 송전에 따르는 5~8% 정도의 송전 손실도 막을 수 있다. 또 복잡한 현대사회에서 수요 특성에 맞춘 발전방식을 제공할 수 있는 장점이 있어 향후 보급에 크게 기대된다.

미국에서는 퓨얼셀 에너지(Fuel Cell Energy)나 유틸리티파워(UTC Power) 같은 회사가 분산발전용 연료전지 시스템을 상업적으로 판매 하고 있다. 국내에선 ‘포스코에너지’에서 연료전지 발전시스템을 판매하고 있다. 350kW~2.8MW 등 분산발전형 제품에 주력하고

있는데, 발전차액제 및 신·재생에너지 의무할당제 같은 정부 지원책에 힘입어 현재 전국 17개소에서 총 27기(51.2MW)의 연료전지를 가동 중에 있다. 신·재생에너지 의무할당제가 본격 시행됨에 따라 연료전지 발전의 수요도 증가 추세다. 2013년까지 약 130MW가 추가로 건설될 예정이며, 국내시장 규모는 연 3,000억 원을 상회할 전망이다.

가정용 연료전지 보급 늘려나가야

연료전지는 가정용 전력공급 시스템으로도 쓸 수 있다. 가정용 연료전지는 전기효율이 40%로 상당히 높은 편이며, 전기 생산 과정에서 발생하는 폐열로 난방과 온수까지 해결하는 열병합 시스템을 적용하면 85% 이상으로 효율이 높아진다.

가정용 연료전지는 2009년 상용화가 시작됐다. 최근에는 가격저감, 대량생산설비 구축과 함께 표준화가 진행 중이다. 가정용 연료전지

포스코에너지 연료전지 생산공장, 포스코퓨얼셀 5호기. 연료전지는 자동차뿐 아니라 지역의 전력공급용으로도 유용하다.



의 최대강국은 일본이다. 수소·연료전지 관련 중장기 계획을 통해 기초기술개발과 함께 실용화 기술개발, 상용화를 위한 보급사업, 표준화 사업을 진행 중이다. 2011년엔 1만2,000대의 가정용 연료전지를 판매했으며 2012년에는 2만 대 이상이 팔려 나간 것으로 보인다. 일본은 2020년까지 10GW(누적용량)의 연료전지를 보급할 생각이다. 이를 위해 일본정부는 2013년까지 가정용 연료전지 구입비의 약 40%를 지원하고 있다.

우리나라의 가정용 연료전지 시장은 초기 형성 단계로 규모가 미미하지만 정부 정책 및 기술개발에 따라 2015년 이후 시장규모가 점차 확대될 것으로 보인다. 1kW급의 경우 ‘가정용 연료전지 모니터링 사업’으로 총 210기(1차 40기, 2차 70기, 3차 100기)가 설치·운영 중이다. 그린홈 보급 사업 및 신·재생에너지 시범보급 사업(2010~2011)을 통해 2011년 10월 말 현재 345기가 시범 보급되어 일반 건물 및 시설물 등에서 쓰이고 있다. 향후 그린홈 100만호 보급 사업을 통해 연료전지 보급이 활성화될 전망이다.

수소에너지 시대 여는 자동차용 연료전지

전 세계 주요 자동차 회사들은 연료전지 자동차 개발에 막대한 자금과 인원을 투자하고 있다. 현재 미국, 일본, 유럽, 국내를 중심으로 수백 여대의 연료전지 차량이 실증 운행 중이다. 연료전지자동차 상용화를 위해 가장 큰 노력을 기울이고 있는 나라는 미국이다. 2010년까지의 연료전지 자동차 152대, 수소충전소 24개소를 운영해 왔는데, 총 448만km 주행, 운행시간 11만4,000 시간을 달성했다.

국내 연료전지 자동차의 기술수준은 완성차 수준에서 세계 정상급이

라 할 수 있다. 아직 연료전지 스택에 소요되는 막-전극 접합체, 가스 확산층 등의 소재는 외국에 의존하고 있으나, 연료전지 자동차에 사용되는 대부분의 부품은 이미 국내기업도 공급시스템이 완성단계에 이르렀다. 연료전지 자동차의 성능도 수소 일충전 주행거리 600km, 연비 26km/l(휘발유 환산 에너지), 영하 20도 시동성, 내구성 3,200시간(상용화 최종목표 5,000시간) 이상을 달성했다.

정부는 2015년 1,000대 이상의 규모로 시장진입을 하기 위해 2010년부터 2012년까지 100대 규모의 제 2단계 실증사업을 진행했다. 수도권 70대, 잉여수소가 풍부한 울산지역에 30대가 운영되고 있다. 2013년 시작되는 제 3단계 실증사업에서는 타 지역까지 확장될 예정이다. 현대자동차에서는 약 200대의 승용차와 9대의 버스를 제작하여 실증 운행하였으며, 2013년 세계 최초로 연 1,000대 규모로 '투싼ix' 연료전지자동차 양산을 시작했다.

투싼ix는 독자 개발한 100kW급 연료전지시스템과 2개의 고압탱크 수소저장시스템(700기압)을 탑재했다. 영하 25도 이하에서도 시동을 걸 수 있으며 최대 주행거리 650km, 최고 속도 160km/h까지 낼 수 있다. NEDC 유럽 연비 시험 기준으로 100km를 주행하는데 0.96kg 수소가 사용되는 등 세계 최고 수준의 효율성을 자랑한다.

이런 기술력을 토대로 현대자동차는 2011년 1월 덴마크, 아이슬란드, 노르웨이, 스웨덴 등 북유럽 4개국간 수소연료전지차 시범보급 업무협약(MOU)을, 5월에는 덴마크 코펜하겐시와 수소연료전지차 시범보급 MOU를 체결했다. 현대자동차는 이를 통해 2013년에는 총 200~300 대 규모의 연료전지자동차를 유럽에 수출할 예정이다.

가격문제 해결, 내구성 향상 등이 최우선 과제



현대·기아차 연구원들이 수소연료전지차 차체를 들어올려 연료전지 스택을 장착하고 있다. 최근 국내 기술로 연료전지스택 원천기술이 개발되어 기대를 모으고 있다.

연료전지 상용화를 위해 해결해야 할 가장 중요한 과제는 가격을 낮추는 것이다. 자동차용 연료전지의 경우 50만 대 양산 시 대당 3,000달러를 목표로 하고 있으나, 현재는 1만 달러 수준이다. 현대차가 최초로 양산한 연료전지 차량 가격도 1억 원을 호가한다.

연료전지 차량 가격이 높은 이유는 고가의 백금을 촉매로 쓰고 있기 때문이다. 가격 저감을 위해서는 현재 대당 50~80g 정도 쓰고 있는 백금 사용량을 20g 이하로 낮추고, 고가의 불소계 전해질막을 탄화수소계로 대체하는 노력이 필요하다. KIST는 백금사용량 저감을 위해 새로운 촉매 개발과 전극 제조기술 개발을 수행하고 있으며, 장수명 저가 탄화수소계막을 개발해 2012년 기업에 기술이전을 실시하기도 했다.

연료전지의 수명 향상 역시 고려할 문제다. 발전용 및 건물용 연료전지의 경우 4만 시간을 목표로 하고 있으나 현재는 2만 시간 정도다. 자동차용 연료전지의 경우 10만km 를 목표로 하고 있지만 아직 6만

km 정도만 운행이 가능하다. KIST에서는 촉매 및 전해질 개발을 수행하고 있으며, 자동차용 연료전지의 경우 제어·운전기술 개발을 통해 수명향상에 성공하여 현재 연료전지차량에 적용하고 있다.

이런 문제가 해결된다면 연료전지 시장은 급속도로 커질 것으로 보인다. 일본경제센터(J-economic Center) 예측에 따르면 2020년 연료전지 시장(가정용·휴대기기용·차량용·업무용)은 1조3,582억 엔에 달할 것으로 예측하고 있다. 가정용이 5,200억 엔, 휴대기기용이 280억 엔, 차량용 5,600억 엔, 업무·산업용이 2,422억 엔에 이를 전망이다. 2030년에는 총액이 1조8,460억 엔을 넘어설 전망이다. 국내에서는 주요 발전사업자를 대상으로 신·재생에너지를 일정부분 생산해야 하는 의무할당제(RPS)가 2012년 시작됐다. 이에 따라 한전 등 발전사들의 연료전지 도입도 증가하고 있다. 2013년 우리나라의 연료전지 시장은 1억3,700만 달러 규모로 예상된다. 응용분야로는 발전용이 70% 정도다. 분산발전용이나 건물용 연료전지가 전체 수요의 대부분을 차지할 것으로 전망된다.

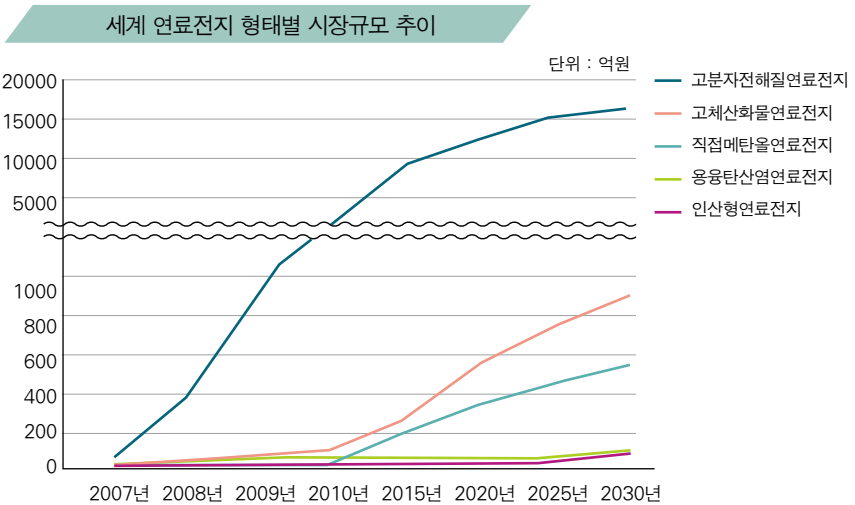
연료전지 자동차는 아직 경제적이라고 말하기는 어렵다. 우선 수소 충전소와 같은 인프라의 건설이 필요하다. 이를 위해 수소 인프라 구축에 550억 달러를 투자해야 하며 그 외에도 연구개발비로 160억 달러 이상이 투자되어야 한다는 미국정부의 보고도 있다.

이 문제를 해결하기 위해 미국, 유럽, 일본 정부 모두 막대한 투자를 하고 있다. 석유 의존도를 줄이기 위해 미국의 경우 2020년까지 자동차들의 연비가 갤런당 35마일 이상이 되도록 강제하는 에너지 법안을 2007년 마련했다. 중국의 경우, 정부가 2010년까지 유럽의 배출가스 규제 기준(Euro II)을 충족시키기 위해 신속한 대응을 강제하

고 있기 때문에 장차 연료전지 자동차 분야를 주도할 수 있으리라 예상된다.

기업의 연구개발도 활발하게 이루어지고 있다. 도요타와 혼다가 2002년 첫 번째 연료전지 자동차를 출시한 이후로, 현대자동차도 2013년 세계 최초로 양산을 시작했다. 독일은 전기분해를 활용한 수소자동차를 최초로 생산해 이 분야를 주도하고 있으며, 특히 다임러 크라이슬러사는 현재의 자동차보다 연료비용을 1/10으로 절감할 수 있는 연료전지 자동차를 곧 출시할 예정이다. 미국의 경우, GM도 수소자동차 개발에 연간 10억 달러의 연구개발비를 투자하고 있으며 연료전지 자동차 1백만 대 판매를 목표로 하고 있다.

GM관계자는 “연료전지야말로 100년간 자동차 체계를 지배해오던 내연기관과 경쟁할 수 있는 기술”이라고 말하는데, 이는 GM을 비롯한 세계 자동차 기업이 연료전지에 거는 기대를 확인할 수 있는 부분이다.



전기에너지의 변신 돕는 이차전지

조병원(에너지융합연구단)

‘친환경’이 시대의 키워드가 되면서 전기를 연료로 하는 전기자동차 시대가 열리고 있다. 전기자동차는 기존 화석연료를 이용한 자동차보다 에너지 효율성이 높아 에너지 소비를 줄일 수 있으며, 온실가스 및 유해가스의 배출량을 줄이고 도시 대기의 질을 좋게 만들어 궁극적으로 국민의 삶의 질을 끌어올릴 수 있다. 또 전기자동차에 쓰이는 고효율 이차전지 기술은 에너지를 대규모로 저장하는 기술에도 활용할 수 있으며, 고효율 이차전지 기술은 다양한 신·재생 에너지의 활용도를 높이고 에너지 공급 시스템을 안정화시켜 에너지 자립화 사회를 가능하게 하는 핵심 요인이 될 수 있다.

이차전지는 전기에너지의 알뜰한 살림꾼

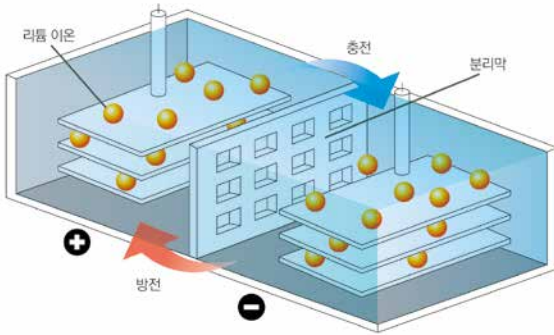
이차전지는 전기화학반응을 이용해 전기에너지를 저장하거나 변환하는 장치를 뜻한다. 이차전지를 충전할 때는 전기에너지를 화학에너지



현대자동차가 2012년 '제네바 모터쇼'에 출품한 콘셉트카 '아이오닉'. 리튬이온배터리를 탑재한 전기자동차다. 전기자동차의 성패 여부는 배터리에 달렸다.

로 저장하고, 방전할 때는 화학에너지를 전기에너지로 변환시켜 사용하는 것이다. 현재 가장 많이 쓰이고 있는 리튬이차전지의 경우, 충전 시에는 양극에서 산화반응이 일어나면서 리튬이온이 소재에서 빠져나오는 탈리현상이 나타나고, 음극에서 리튬이온이 환원돼 소재 속으로 삽입되는 반응이 일어난다. 반대로 방전 시에는 음극에서 산화반응에 따라 리튬이온이 빠져나오고 양극에서 환원반응으로 리튬이온이 삽입된다.

리튬이차전지의 성능과 가격은 양극재, 음극재, 전해질, 분리막 등 4대 핵심 소재가 결정한다. 이 가운데 전기화학반응에 실제로 참여해 용량과 수명 등을 결정짓는 중요한 부품은 양극과 음극이다. 결국 양



대표적인 이차전지인 리튬이온전지는 케이스 내부를 채운 전해질을 통해 리튬 이온이 이동할 때 발생하는 에너지를 이용한다. 리튬 이온이 음극에서 양극으로 이동하며 쌓인 에너지를 방출해 전류를 생산하고, 반대로 양극에서 음극으로 이동하면서 전자와 결합해 에너지를 저장하면서 충전된다.

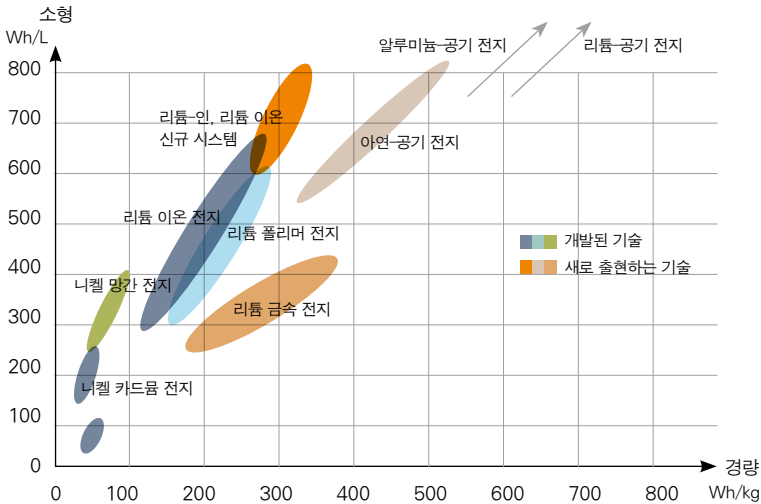
극과 음극 소재에 대한 연구는 리튬이차전지의 용량과 수명, 출력, 안정성 등의 성능에 결정적인 영향을 미친다. 물론 전해질과 분리막도 안전성이나 출력 등에 영향을 주므로 이들에 대한 연구도 중요하다.

충전지 기술, 자동차와 발전소에까지 확대

1991년 일본 소니는 리튬이차전지를 처음으로 상용화하면서 전지의 혁명을 일으켰다. 그 뒤 1990년대 초반 한국의 삼성SDI와 LG화학, 그리고 2000년대 초반 중국의 다수 업체들이 리튬이차전지 산업에 뛰어들면서 리튬이차전지 시장은 한·중·일 삼국의 경쟁 체제로 바뀌었다. 이와 더불어 리튬이차전지 기술도 비약적으로 발전하면서 현재는 자동차나 에너지저장 분야와 같은 대규모 응용처에도 사용되기 시작했다. 세계적으로는 리튬이차전지가 아닌 신형 이차전지에 대한 기술도 꾸준히 개발되고 있다.

리튬이차전지에서 양극재는 전지가 방전할 때 음극에서 나오는 리튬 이온을 받아들여 환원되는 전극 소재로, 단위 부피·질량당 리튬을

이차전지의 개발 방향 (Nexergy)



많이 받아들일 수 있으면서 값싼 소재를 개발하는 것이 중요하다. 또 불이 붙었을 경우 산소를 공급하는 역할을 할 수 있으므로 안전성 측면에서도 연구가 계속되고 있다. 기존 소형 이차전지에는 층 구조로 이뤄져 있는 리튬코발트산화물(LiCoO_2)이 양극재로 주로 쓰인다. 자동차 및 에너지저장용으로는 용량과 안전성을 높이고 가격을 낮추기 위해 층 구조인 $\text{LiCo}_x\text{Ni}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$, 리튬과다 복합체인 Li_2MnO_3 - LiMO_2 , 올리빈 구조인 리튬인산철 양극재(LiFePO_4) 등 다양한 소재가 사용되고 있다.

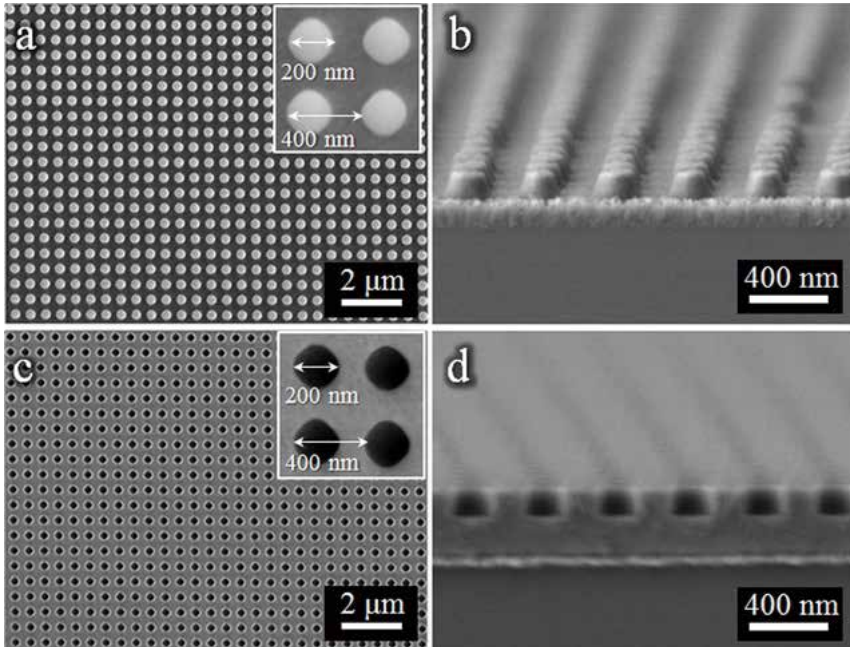
음극재는 전지가 방전할 때 양극에 리튬이온을 공급하고 산화되는 전극 소재로, 양극재와 마찬가지로 단위 부피·질량당 리튬을 많이 받아들일수록 좋다. 따라서 값이 싸고 수명이 긴 소재를 개발하기 위한 연구가 진행되고 있다. 기존 소형 이차전지에는 인조 흑연이 음

극재로 쓰였지만 용량이나 수명 등의 문제점을 개선하기 위해 규소(Si), 천연흑연, 금속산화물(MO_x) 등을 소재로 활용하는 연구가 진행되고 있다. 특히 현재 쓰고 있는 인조흑연이나 천연흑연에 규소나 산화규소(SiO) 등의 소재를 일부 혼합해 음극 소재로 활용하는 연구도 진행되고 있다.

전해질은 리튬이온이 이동하는 매개체로, 수명이 길고 이온전도도가 높으며 높은 전압에서도 튼튼한 내구성을 확보하는 것이 중요하다. 이를 위해 용매 및 용질의 특성을 향상시키고, 첨가제를 이용해 전기화학적 특성을 향상시키는 연구가 진행되고 있다. 분리막은 양극과 음극이 내부에서 단락되지 않고 리튬이온의 이동을 가능하게 하며, 전지가 높은 온도에 노출돼 위험할 때 리튬이온의 이동을 완전히 차단시키는 안전 가동 정지 역할을 한다. 이러한 안전성을 확보하기 위해 분리막의 내구성 및 강도를 높이는 기술이 개발되고 있다.

현재 리튬이차전지는 가장 발달된 이차전지로 꼽히지만, 전기자동차의 성능은 여전히 내연기관 자동차를 따라가지 못하고 있다. 이에 리튬이차전지보다 용량이 크고 출력이 뛰어난 이차전지 연구도 활발히 진행되고 있다. 대표적으로 금속-공기전지 초기단계 연구가 진행되고 있는데, 특히 리튬-공기(Li-Air) 전지는 자동차용으로 활용할 수 있는 지 여부가 탐색 중이다.

KIST는 한국에서 취약한 부품·소재기술 및 원천기술에 대한 연구 개발에 집중적으로 투자하고 있다. 리튬이차전지의 양극 및 음극 소재, 전해질, 분리막 기술, 그리고 새로운 이차전지 시스템으로 금속-공기 전지, 레독스플로우(Redox flow)전지, 리튬-황전지, 마그네슘이차전지, 나트륨-황(NaS)전지, 나트륨이온전지(Natrium ion



국내에서 개발된 리튬이차전지용 양극소재. 실리콘 나노기둥(a, b)과 실리콘 나노우물(c, d)로 나노구조를 변경하여 용량과 성능을 대폭 향상시켰다.

battery) 등에 대한 원천기술개발에 집중하고 있다.

특히 1990년대 초반부터 20년 넘게 이차전지 관련 연구를 수행하면서 연간 과학기술논문인용색인(SCI) 논문 수십 편과 특허를 출원, 등록했을 뿐만 아니라 리튬이차전지용 전이금속산화물 음극소재 제조기술, 리튬이차전지용 인산화물 양극소재 제조기술, 리튬이차전지 음극소재용 천연흑연의 불소처리기술, 리튬이차전지용 불화유기용매 제조기술 및 분리막 표면처리기술, 리튬이차전지용 고용량, 고안정성 양극소재 제조기술 등 총 5건의 기술을 이전하는 성과를 냈다.

최근에는 기관고유사업으로 '전력수요 대비용 대용량 이차전지 원

천기술개발'과 '마그네슘과 소금물을 이용한 군용전지 개발'을 진행하고 있으며, 교육과학기술부 기후변화대응사업인 '리튬이차전지용 신규 양극, 전해질 및 신규 전지시스템 기초·원천기술개발'도 담당하고 있다. 또 미국 브룩헤븐 국립연구소와 진행하고 있는 Global Research Lab 사업인 '방사광 가속기 분석기술을 활용한 리튬이차전지용 고안전성, 고용량 전극소재 연구'와 에너지기술개발사업인 '에너지저장용 마그네슘 전지 소재 및 요소기술개발', 'NaS 단전지의 전기화학적 특성 및 신뢰성 평가', 'Zn-Br Redox Flow Battery용 고성능 Bipolar 탄소전극 개발' 등의 과제를 수행하고 있다. 이들 연구는 앞으로 우리나라의 이차전지산업 발전에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

리튬이차전지 1위 한국, 다른 이차전지 기술에도 투자 필요

한국은 1990년대 후반 소형 리튬이차전지의 개발을 시작한 이후 10여 년간 비약적인 발전을 거듭한 끝에 현재는 일본을 제치고 세계 시장점유율 1위를 기록하고 있다. 하지만 한국은 여러 종류의 이차전지 중에서 리튬이차전지에만 국한돼 있어 글로벌 경쟁력이 제한적이었다. 리튬이차전지 중에서도 모바일IT용 소형 리튬이차전지 시장에서만 경쟁력이 뛰어날 뿐 부품·소재기술 전반은 그렇지 못했다. 부품·소재 전체를 고려할 때 우리나라의 기술력은 일본의 절반 이하, 원천기술력은 30% 이하로 매우 뒤쳐진 것으로 알려져 있다. 따라서 부품·소재기술과 원천기술의 경쟁력을 갖추기 위한 노력과 연구개발 투자가 필요한 실정이다.

중대형 이차전지는 적용 분야 및 사용처에 따라 요구되는 전지의 성



한국은 뒤늦게 출발했지만 리튬이차전지 시장 점유율 1위를 기록하고 있다. 그러나 리튬전지에만 편중된 산업 구조 때문에 국제 경쟁력은 낮은 것으로 분석되고 있다. 사진은 전기차용 배터리에 들어가는 '셀'을 생산하는 오창테크노파크 LG화학 공장

능과 가격대가 다르므로 현재 최고의 성능을 보이는 리튬이차전지뿐만 아니라 금속-공기 전지, 레독스플로우 전지, 리튬-황 전지, 마그네슘 이차전지, 나트륨-황전지, 나트륨 이온전지, 마그네슘 이온전지 등 고유한 장점을 지닌 전지들을 다양하게 개발해야 한다.

이차전지 기술은 전기화학, 재료공학, 화학공학, 화학, 물리 등 다학제간의 공동연구가 필요한 분야다. 또 기초연구부터 상용화연구까지 전주기적으로 이뤄져야 하는 분야여서 최종 수요처를 고려해 산학연이 함께 융합연구를 수행하기 위해 국가 차원의 종합적 기술개발 체제 구축이 필요하다.

중대형 이차전지 시장은 앞으로 대폭적인 시장 확대가 예상되는 만큼 이 시장을 선점하기 위해 선진국은 기초·원천기술력 확보를 위한

국가적인 지원체제를 구축하고 R&D 투자를 늘리며 국제 M&A도 가속화하고 있다. 현재 한국·일본·중국이 세계 시장을 주도하고 있지만 미국과 유럽도 투자를 늘리면서 이차전지 산업에서 선두주자로 나서려는 전략을 펴하고 있다.

리튬이차전지 시장에서 일본은 2010년까지 세계시장 점유율 1위를 지켰지만, 2011년에는 한국의 삼성SDI와 LG화학이 각각 세계 1, 3위로 올라서면서 한국은 시장 점유율 1위로 등극했다. 3위권에 있는 중국도 막대한 자원과 노동력을 바탕으로 거세게 추격하고 있다. 리튬이차전지 시장은 현재까지는 모바일IT용 소형 이차전지 위주로 형성되고 있으나, 앞으로 전기자동차용 및 에너지저장용 시장위주로 급성장할 것으로 예상된다. 특히 전기자동차용 이차전지의 경우 매년 34% 이상 성장할 것으로 예측된다.

이차전지, 전기의 다양한 변신 돕는다

이차전지 기술의 근본적인 문제는 에너지 생성장치가 아닌 에너지 저장장치라는 것이다. 이를 극복하기 위해 더 많은 기술개발이 필요하다. 예를 들어 전기자동차의 경우 한번 충전해 장거리를 주행할수록 유리하지만 이차전지 용량에 한계가 있어 주행거리가 제한되는 단점이 있다. 또한 현재 기술로는 충전시간이 1시간 넘게 걸려 불편하고 충전할 수 있는 인프라도 여전히 부족하다. 이러한 문제점은 전기자동차를 대량 보급하는 데 걸림돌이 되고 있어 이를 극복할 신형 전지에 대한 기술개발이 절실히 요청되고 있다. 또 전지가 대용량화되는 추세에 따라 리튬이차전지의 경우, 폭발 화재 등 안전에 문제가 발생할 가능성이 있어서 응용에 제약을 받지 않도록 해법을 찾기 위한 기



국내의 한 마트에 설치된 전기자동차 충전기. 전기자동차가 대중화되면서 대용량, 고효율 배터리 수요가 커지고 있다. 대용량 이차전지는 전기에너지를 간편하게 저장할 수 있어 다양한 분야에 이용될 것으로 전망된다.

술개발도 필요하다.

전기자동차의 경우, 미국은 자동차산업의 사활을 걸고 기술개발에 임하고 있으며 중국도 환경오염 문제를 해결하고 에너지 효율성을 높이기 위해 심혈을 기울이고 있다. 에너지저장시스템인 경우, 원전 사고를 겪은 일본이 그 필요성을 절실히 느껴 기술개발에 집중하고 있으며, 미국과 중국 등에서도 에너지 효율을 높이고 비상전원용으로 활용하기 위한 기술개발에 노력하고 있다. 특히 신·재생 에너지의 사용이 점점 늘면서 이차전지 시스템은 에너지저장고의 역할을 할 수 있어 시장전망과 기술전망은 매우 높다고 할 수 있다.

결국 이차전지 중 최고 성능을 나타내는 리튬이차전지는 앞으로도 성능과 가격 경쟁력이 더 높아질 것으로 예상된다. 이와 별개로 새로운 이차전지인 금속-공기 전지, 마그네슘이차전지, 나트륨이온전지 등 신형전지의 기술수준도 점차 향상될 것으로 전망된다.

Environment



Part 6

환경



전망 27 깨끗한 물, 그 이상을 위한 환경 나노기술

전망 28 폐수 정화하면서 에너지 얻는다

전망 29 융합기술로 실내 환경을 쾌적하게

Intro 전체를 생각하면서 부분을 바꾸는 과학, 환경과학

환경문제는 다양한 형태로 우리의 삶에 영향을 미친다. 수질과 대기오염은 일상 생활에 직접적인 영향을 미치는 대표적인 환경문제다. 음식물쓰레기와 같은 폐기물처리문제도 최적한 도시환경을 조성하는데 매우 중요한 문제다. 최근의 환경문제는 나노물질과 같은 새로운 물질의 등장으로 다양화 다변화되고 있으며, 기후변화와 같은 지구규모의 에너지이슈와도 밀접한 연관을 맺게 됐다.



기후변화가 지속되면서 극지방의 빙하는 빠른 속도로 줄어들고 있다. 이산화탄소가 주범으로 지목되어 탄소배출량을 감소하고 에너지를 재활용하는 기술이 전세계적으로 주목받고 있다.

환경문제는 지역규모와 지구규모에 미치는 영향정도에 따라서 구분되기도 한다. 하천수질이나 실내공기질을 맑게 유지하는 것은 영향이나 관리 범위가 지역적이라고 할 수 있다. 반면 인간의 활동이 미치지 않는 오지에서도 검출되곤 하는 미량유해물질의 이동은 지구규모의 환경문제라고 할 수 있다. 기후변화에 따른 환경영향도 그 영향 규모가 지구규모에 해당된다.

폐수배출에 따른 물고기의 폐사, 국제환경조약의 발표에 따른 폐기물의 해양배출 금지와 같은 현안 환경문제가 있는가 하면, 지금 배출된 오염물질이 오랜 기간 자연계에 남아 세대를 넘어 영향을 미치는 미래 환경문제도 있다.

현재 세계의 관심은 지구규모의 미래 환경문제로 옮겨가고 있다. 환



2011년 한국을 괴롭혔던 구제역도 환경문제다. 폐사된 가축의 매몰지에서 흘러나온 침출수는 국지적 환경에 큰 영향을 주기 때문이다.

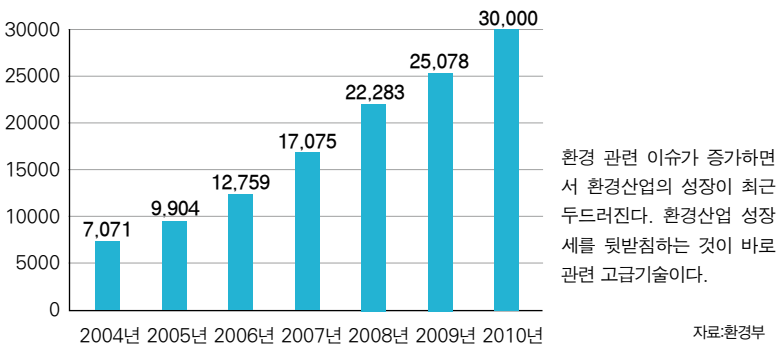
경 문제에 대한 대응을 위해 첨단연구기법과 고도의 과학기술 지식이 요구되며 수많은 연구자들이 연구에 매진한 결과 다양한 성과가 축적되고 있다.

한편 환경문제는 경제적 수준에 따라 다르게 나타나기도 한다. 선진국형의 환경문제가 있는가 하면 개발도상국형의 환경문제가 있다. 지역의 경제 수준에 따라 관련 환경시장의 내용이나 규모, 성장추세에도 큰 차이가 있다. 주목할만한 점은 개발도상국의 환경시장이 연간 10% 이상으로 급성장하고 있다는 점이다. 향후 세계 시장에서 개발도상국의 비중이 커지면 이들의 목소리가 국제 환경 이슈에 적극적으로 반영되는 한편으로 책임도 커질 것으로 보인다.

환경문제를 해결하기 위한 방법은 여러 가지가 있다. 사후처리와 같은 직접적인 대응방안이 있는가 하면, 발생원을 제거하는 사전예방적인 방안도 있다. 규모에 따른 차이도 있다. 매크로스케일의 처리방법이 처리공정과 시스템의 개발을 통해 이루어져 왔다면, 최근에는 나노스케일의 물질과 현상을 이용하려는 연구개발이 주목받고 있다.

국내 환경산업 수출 규모

(2010년은 환경부 추정, 단위: 억원)






환경 분야는 자연과 문명, 인간과 환경의 관계를 종합적으로 고찰해야 하는 분야이다. 따라서 지구 전체의 시스템을 아우르는 융합적 성격을 강하게 띤다.

기후변화문제와 관련된 에너지이슈와 연관된 환경기술은 최근 환경오염문제를 해결하는 동시에 에너지소비를 최소화하거나 아예 생산까지 하는 방향으로 진화하고 있다.

환경문제는 결코 단순한 문제가 아니다. 다양한 요소들이 복잡하게 얽혀서 엄청나게 넓은 스펙트럼의 이슈들을 만들어낸다. 따라서 이에 대한 대응도 다양하고 얼기설기 복잡하게 얽힐 수밖에 없다. 한편으로는 기술과 경제의 발전에 따라 새로운 환경문제가 지속적으로 발생하므로 환경 관련 기술도 끊임없이 새로이 연구되어야 한다. 이 장에서는 다양한 환경 이슈에 과학기술이 어떠한 해답을 제시하는지 살펴보기로 한다.

깨끗한 물, 그 이상을 위한 환경 나노기술



이승학(물자원순환연구단)

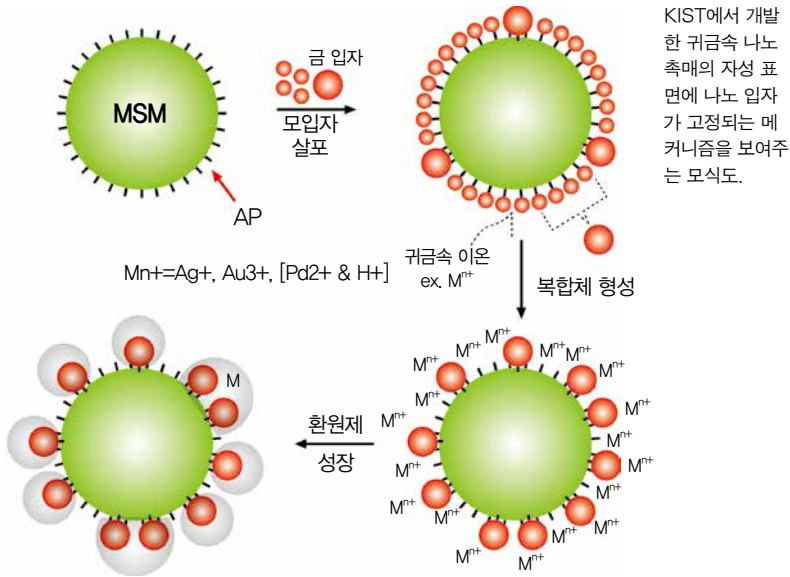
지구온난화로 인한 기후변화는 지구 전체 수자원 분포에 심각한 불균형을 초래하고 있다. 한쪽에서는 홍수로 물이 넘쳐나는데 반대편에서는 심각한 가뭄으로 마실 물조차 부족한 상황이다. 수자원이 풍부한 국가에서도 국민이 사용할 수 있는 깨끗한 물을 안정적으로 확보하는 문제는 중요하며, ‘물 안보’라는 신조어에서도 드러나듯이 국가의 최우선 해결 과제로 인식하고 있다. 특히 인구증가와 도시화, 생활수준의 향상에 따라 물 수요는 양이 아닌 질의 문제로 급격히 변하고 있다. 이러한 요구는 마실 수 있는 음용수나 생활에 쓰이는 생활용수를 생산하는 수처리 시설의 중요도와 함께 수처리 기술 수준을 크게 향상시켰다.

과거에는 수처리 기술 개발의 목표가 물속에 존재하는 오염 물질을 더 빨리 제거하고 단일 공정으로 여러 오염물질을 한꺼번에 처리해



서울시 독섬의 아리수정수센터. 안전한 수자원 확보가 중요한 이유로 부각되면서 수처리 기술 연구도 활발해지고 있다.

공정을 간소화하는 등 처리 효율을 높이는 데 집중됐다. 하지만 물의 질을 높이기 위한 사회적 요구에 따라 수처리 시설 역시 사회 기반 시설로서 기능하는 현재는 기술 개발의 목표 역시 새로운 방향을 잡을 수밖에 없다. 예를 들어 최근 대규모 정전사태로 불거진 에너지 위기 상황은 에너지 소비를 최소화한 수처리 기술 개발을 이끌고 있다. 운전 유지비용을 최소한으로 줄여 어떤 극한 조건에서도 운영할 수 있는 시설을 개발하는 것 역시 목표 전환의 예시라 할 수 있다. 이런 상황에서 수처리의 대표 주자로 떠오른 것이 환경나노소재다. 환경나노소재는 환경 기술 분야에 적용할 것을 목적으로 개발된 나노물질을 말한다. 연구 초기 단계인 1990년대 후반 ~ 2000년대 초반부터 환경나노소재는 매우 넓은 비표면적(단위 무게당 총 표면적)



KIST에서 개발한 귀금속 나노촉매의 자성 표면에 나노 입자가 고정되는 메커니즘을 보여주는 모식도.

과 이로 인한 빠른 오염물질 제거 속도로 주목받았다. 비슷한 크기의 다른 물질보다 훨씬 뛰어난 오염물질과의 제거 반응성 역시 환경나노소재가 손꼽히는 이유다. 단 나노물질이 2차 오염원이 될 수 있기 때문에 사용된 나노물질을 제대로 회수할 수 있는 공정 기술 개발이 뒤따르지 않으면 실용화가 어렵다는 점이 걸림돌이다.

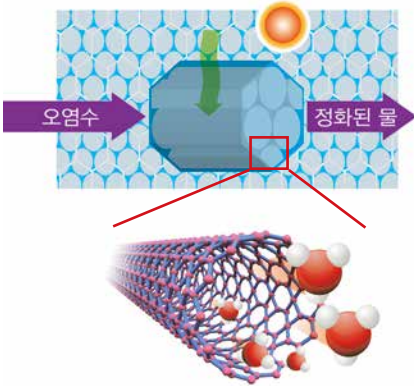
더러운 물을 깨끗하게만 하는 수처리 기술은 옛말

탄소 풀러린 연구로 1996년 노벨 화학상을 수상한 미국 라이스대의 고 리처드 스몰리 교수는 나노기술의 대표적 옹호론자기도 했다. 그는 현재 인류가 겪고 있는 대부분의 심각한 문제를 나노기술을 통해 해결할 수 있는 세상이 오리라 예견한 바 있다. 환경나노소재를 기반으로 한 수처리 기술은 그의 예견을 현실화할 수 있는 무대라고 해

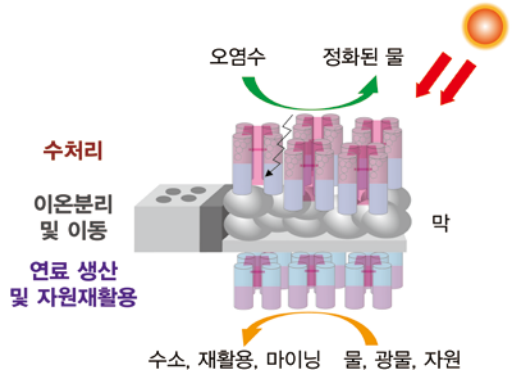
도 과언이 아니다. 수중 오염물질 제거라는 근본적인 목표를 넘어 여러 현실적 문제를 동시에 해결할 수 있는 기술로 패러다임이 이동하고 있는 것이다. 특히 주목해야 할 기술은 에너지 자립형 수처리 기술, 오염물질 타깃형 수처리 기술, 자가 유지 보수형 수처리 기술의 세 가지다.

에너지 고갈은 전 인류가 직면하고 있는 가장 심각한 문제다. 수처리 기술 역시 이 문제로부터 자유로울 수 없다. 현재 국내 수처리 시설이 소비하고 있는 전력은 연간 총 전력사용량의 0.5%로 결코 적은 양이 아니다. 에너지를 효율적으로 운용하는 방안으로서 에너지 자립형 수처리 기술이 등장한 이유다. 이를 위해 빛을 받으면 오염물질을 분해하는 ‘활성 산소종(Reactive oxygen species)’을 만들어 내는 광촉매를 이용해 수처리 공정을 구성하고, 태양전지를 주요 동력원으로 활용하는 전기 분해 장치를 시스템에 넣는 기술이 개발되고 있다. 단순히 오염물질을 제거할 뿐 아니라 시스템을 운용하며 ‘수소’라는 차세대 에너지를 동시에 생산하는 방법도 연구 중이다.

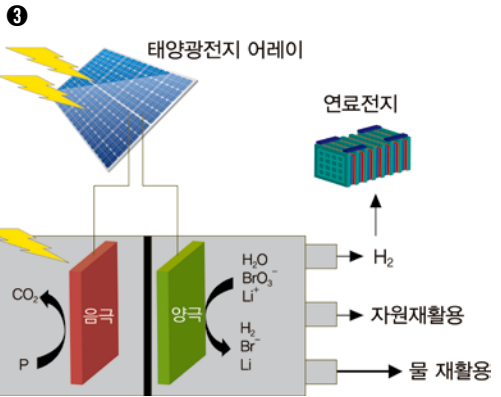
오염물질 타깃형 수처리 기술은 오염 물질과 비 오염 물질이 섞여 있는 상황에서 특정 오염 물질만을 선택적으로 제거, 처리할 수 있는 기술이다. 반응 물질이 물속에 존재하는 여러 물질과 무작위적인 반응을 일으켜 효율이 급격하게 떨어지는 것을 막고, 이를 통해 반응 물질의 수명을 연장하려는 의도에서 제안됐다. 반응 물질 표면에 특정 오염 물질만이 통과할 수 있는 분자 크기 격자를 짜거나 특정 오염 물질의 분자 형상을 입력해 선택적인 흡착, 분해가 가능하도록 한 나노 구조 재료 합성 기술이 대표적인 예다. 이 기술은 최근 사회적 문제가 되고 있는 미량 의약품(Pharmaceutical)이나 환경 호르몬



①



②



③

다양한 환경나노촉매들.

① 가시광에 의한 자가형 수처리 촉매

② 태양광에 의한 수처리 및 동시 연료생산, 자원회수형 복합 촉매

③ 태양광에 의해 구동되는 에너지 독립형 복합 수처리 촉매 시스템

같은 내분비계 교란물질(Endocrine disrupting compounds) 등을 효과적으로 선택해 제거할 수 있는 수단으로도 관심을 모으고 있다. 자가 유지 보수형 수처리 기술은 수처리 공정의 유지보수 비용뿐 아니라 필요성까지 최소한으로 줄이는 기술을 의미한다. 전체 공정 비용을 줄이는 한편, 시스템 관리가 용이하지 않은 오지 및 저개발 국가에서도 손쉽게 설비를 운용할 수 있도록 고안됐다. 시스템의 파손 부위가 스스로 재결성, 치유되는 기술과 함께 유기물이 가라앉아 기

기에 달라붙는 현상을 막는 성분을 나노 구조화한 뒤 기존 재료에 얇게 덮어 소재의 내구성을 높이는 기술을 포함하고 있다.

크기는 나노, 성장 속도는 메가

세 가지 기술을 중심으로 한 환경나노소재 기반 수처리 기술은 2000년대를 기점으로 급속히 성장 중이다. 특히 광촉매를 이용한 수처리 기술이 최근 15년 사이 급격히 발전한 점이 눈길을 끈다. 지속적으로 해당 분야 R&D에 매진해 온 유럽, 미국, 일본 등 선진국을 이어 최근 중국을 중심으로 하는 아시아와 브라질 등의 중남미 국가에서도 차례로 성과를 내고 있다. 태양광으로 수처리를 할 뿐만 아니라 연료도 생산할 수 있는 복합촉매 소재 역시 최근 활발히 연구되고 있는 환경 나노소재 분야 중 하나다.

오염 물질 타깃형 수처리 분야 역시 광촉매와 마찬가지로 국외를 중심으로 연구가 활발히 이루어지고 있다. 관련 기술 중 하나인 MIPs(Molecularly Imprinted Polymers)를 다룬 논문 수가 2000년대 후반을 기점으로 급속히 증가하고 있는 점이 이를 뒷받침한다. 특히 유럽에서는 EC(유럽 위원회)의 지원으로 2009년부터 4년에 걸쳐 집단 연구 프로젝트를 진행한 바 있다. 그러나 국내에서는 체계적인 집단 연구가 이루어진 사례가 없으며 관련 기술 수준 역시 미미한 실정이다.

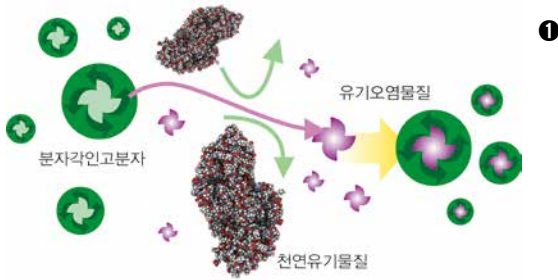
자가 유지 보수형 수처리 기술은 다른 두 분야에 비해 아직은 발걸음이 느린 상태다. 파손 부위가 자가 치유되는 소재는 관련 논문 및 특허가 꾸준히 발표되고 있지만, 상용화가 가능할 만큼 획기적인 소

재는 아직 개발이 미흡한 것이 사실이다. 반면 소재의 내구 연한을 늘릴 수 있는 나노 기술은 어느 정도 상용화가 가능한 상태에 돌입했다는 평가를 받고 있다. 미국 하버드대의 워 연구 그룹은 자연적인 미끄러짐을 유도할 수 있는 생체 모방형 나노 재료를 개발하고 그 메커니즘을 연구하고 있다. 이 재료는 친수성, 친유성 물질 모두에 미끄러짐 현상을 유발하기 때문에 유기물 침착 현상을 원천적으로 봉쇄할 가능성이 높다. 또 영국 버밍엄대의 칼로 그룹은 선박 하부의 코팅물질이 해양 생물의 부착을 억제한다는 점에 착안, 이 물질을 이용한 방안을 제시한 바 있다.

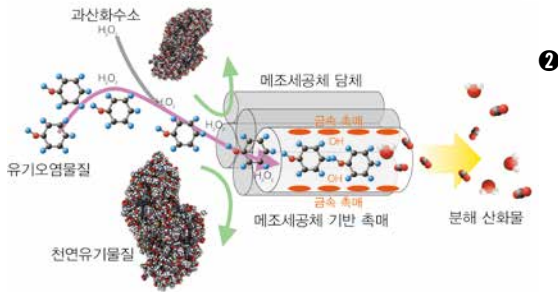
앞에서 국내 연구가 아직 미미한 수준이라 밝힌 바 있으나 미래를 향한 가능성은 결코 낮지 않다. KIST 물자원순환연구단은 수처리 시장의 새로운 부가가치 창출과 국제 경쟁력 확보가 새로운 환경나노소재의 개발에 있다고 판단, 2000년대 중반 이후부터 지금까지 신개념 환경소재에 대해 꾸준히 연구를 진행해 오고 있다. 이를 통해 개발된 대표적인 환경소재로 고갈 자원으로 평가받는 인을 분리 회수할 수 있는 지르코늄 기반 메조 기공 인 흡착제를 들 수 있다. 메조는 마이크로와 나노 사이의 크기를 의미한다. 최근에는 가시광 영역대에서 작동 가능한 이산화티타늄 합성 광촉매, 나노크기 광촉매의 현장 적용성을 높이기 위한 형태 변환, 흡착 성능 자가 재생이 가능한 흡착제 개발 등의 연구가 활발하게 진행 중이다.

양날 검 나노, 어느 쪽을 휘두를까?

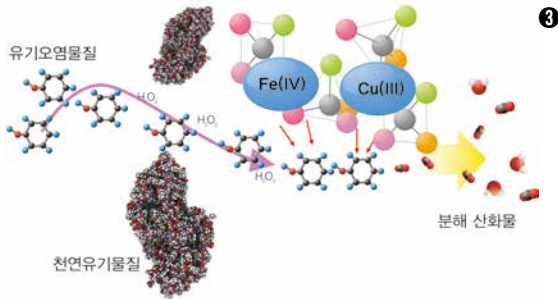
환경나노소재 기술의 미래가 마냥 장밋빛은 아니다. 일단 비용의 벽이 만만치 않다. 환경나노재료의 합성에 소요되는 비용은 기존 수처



1



2



3

오염물질 타깃형 수처리 소재 개념도

- 1 분자각인 고분자 적용 수처리 소재
- 2 메조세공체 담체를 활용한 고도산화 촉매
- 3 선택적 산화제 생성 고도산화촉매

리 소재비용보다 수 배에서 최고 수십 배에 달한다. 아무리 비용대비 효율이 좋은 환경나노재료라 하더라도, 현장에 적용하는 과정에서 비용 측면의 거부감이 발생할 수 있다. 합성 비용의 저감을 위해서는 환경나노재료의 안정적 대량생산을 위한 기술 혁신이 필요하다.

나노물질 자체를 수처리 공정에 그대로 적용할 경우, 처리수로부터

나노물질을 분리하는 별도 추가 공정이 필요하다는 점도 걸림돌이다. 나노물질을 지지체에 고정해 활용하는 방법이 대안으로 제시되고 있지만, 소재 합성이 번거로울 뿐 아니라 나노물질의 반응성 저하를 감수해야 하는 문제가 있다.

무엇보다 가장 중요하고 위험한 문제는 환경나노소재에 포함된 나노물질이 사용과정 중 자연계로 누출되어 2차 환경오염을 유발할 수 있다는 점이다. 제품 내 포함된 나노물질의 환경노출은 생태계를 교란할 수 있고, 생태축적을 통해 인체에도 축적돼 새로운 문제를 일으킬 수도 있다. 나노물질을 포함하는 제품에 대한 'EHS(환경, 건강, 안전)'이 가까운 미래에 무역장벽으로 작용될 전망이다. 환경나노물

◉ 시장분야별 예상 성장률과 연평균 성장률

구분	2007년 수익 (달러)	예상시장규모 (2020년)			주요 성장 예상분야
		규모 (달러)	성장률 (%)	연평균 성장률 (%)	
장비 산업	610억	1,334억	120	6.24	<ul style="list-style-type: none"> • 낮은 기반시설 교체 • 폐수/폐기물 관리 및 회수, 자외선 소독, 점적 관수(drip irrigation), 에너지 사용량 감소, 고급 산화, 계측 및 모니터링, 사용지점/유입지점 처리기(예, 정수기), 담수화 및 재이용기기, 물을 적게 필요로 하는 농작물 개발
화학 제품 산업	78억	92억	18	1.25	<ul style="list-style-type: none"> • 제품간 차이가 크지 않은 재료라는 화학제품의 특성상 소비자들은 이윤이 적고 비용이 더 적게 드는 방법을 찾을 것임 • 화학제품은 앞으로 물리적 공정이나 현장 생성 시설로 대체될 가능성이 높음 • 화학제품은 이미 성숙기 시장으로 판단됨

Water cultivation: The path to profit in meeting water needs, Lux Research Inc., 2008

질의 수처리 기술 적용을 위해서는 나노물질의 환경위해성에 대한 체계적 평가가 선행되어야 한다.

이는 비단 수처리 기술만의 문제가 아니다. 여러 산업 분야에서 나노물질의 사용량이 급격히 증가함에 따라 나노물질의 환경위해성에 대한 사회적 관심이 고조되고 있다. 2010년 전후로 나노물질의 환경위해성에 대한 국제학회가 증가하고 있음이 이를 증명한다. 또 물벼룩 등 원생동물을 이용한 나노물질 독성 연구도 최근 10년 사이 활발히 진행되고 있으며, 최근에는 고등 동물을 이용해 만성 독성을 평가할 방법을 모색하는 중이다. 2000년대 후반 미국, 유럽 등 환경과학 선진국을 중심으로 나노물질의 발생, 환경노출경로, 자연계에서의 거동 및 이동특성, 생물농축현상, 독성발현기작 등을 체계적으로 연구하는 연구센터도 속속 설치되고 있다.

나노소재의 위험성과 비용의 벽에도 불구하고 수처리 기술에 나노소재를 접목하는 일은 시급해 보인다. 이는 가파른 성장세를 보이는 수처리 기술 시장에서 우위를 차지하기 위한 방편이기도 하다. 2008년에서 2016년 사이 세계 수처리 시장의 성장률 예측치는 연평균 5.6%에 달한다. 그에 따른 시장 규모 역시 1,500억 달러('08)에서 2,400억 달러('16)로 대폭 확대될 전망이다. 특히 아시아를 비롯한 후발주자들의 추격세가 숨 가쁘다. 국내 수처리 시장도 마찬가지로 상황이다. 2004년 336조 원, 2006년에는 390조 원을 달성해 제조업 생산액의 42.7%를 차지하고 있는 국내 수처리 관련 부품 및 소재 산업 생산액이 이를 뒷받침한다. 나노물질의 한계를 극복하고 수처리 기술의 성장세를 이어갈 방법을 모색해야 할 때다.

폐수 정화하면서 에너지 얻는다

송경근 · 배효관(물자원순환연구단)

세계 석유 시장은 갈수록 위기에 빠져들고 있다. 산유국은 정치, 안보면의 취약점을 드러내며 말 그대로 불붙기 쉬운 ‘유전’으로 변했다. 러시아, 베네주엘라 등 자원 보유국들은 석유, 가스에 대한 통제를 강화하며 자원이 무기임을 다시 한 번 증명한다. 우리나라는 에너지 소비 세계 10위, 해외 에너지 의존도 96.9%로써 에너지 자립도가 3%가량에 지나지 않기 때문에 에너지 안보가 취약한 상황이다. 반면 중심 산업인 석유화학, 철강, 시멘트 산업은 에너지 소비의 79%를 차지하고 있어서 에너지 수급의 어려움은 산업과 경제에 심각한 영향을 준다. 석유 연료의 사용은 이산화탄소 배출과 이상 기후 현상을 가속화해 인류의 미래에도 악영향을 끼치고 있다. 이러한 어려움을 완화하기 위해 정부는 신·재생 에너지의 비중 제고를 위한 기술개발에 예산을 쏟아 붓고 있는 실정이다.

에너지 자립을 위한 노력은 쾌적한 삶을 뒷받침하는 하수처리시설에



“한국 환경기술 배우자” 한국 물처리 관련기술을 시찰하기 위해 올여름 경기 부천시 굴포천 하수종말처리장을 방문한 개발도상국 환경산업체 관계자들. 한국은 경제발전뿐만 아니라 환경기술에서도 개발도상국들의 롤모델로 인식되고 있다.

서도 눈에 띈다. 우리나라의 하수처리장 시설에서 사용되는 전력은 연간 총전력 사용량의 0.5%를 차지하지만 공공하수처리시설 에너지 자립율은 0.8%에 불과하다. 수처리 시스템의 에너지 자립도를 향상하기 위한 연구개발이 최근 활발한 이유다. 에너지 자원 부족에 대비하고 지속가능한 성장을 뒷받침하기 위해 하수처리기술의 에너지 사용을 보다 효율화하고 처리 과정에서 발생하는 부산물을 사용할 수 있는 기술이 주목을 받고 있다. 환경공학(ET), 나노기술(NT), 생명

공학(BT), 정보기술(IT) 등 다양한 기술 분야가 융합됨은 물론이다.

유기성 폐기물 전환 바이오가스가 해답이다

이런 움직임은 해외에서도 마찬가지다. 미국의 경우 정수 및 하수처리에 필요한 전력량이 전체 소비 전력량의 3%에 달할 정도로 막대한 에너지를 쓰고 있다. 이에 따라 하수처리시설에서의 에너지 절감을 위한 연구 및 활동이 꾸준히 증가하고 있다. 에너지 자립형 하수처리 공정 개발과 함께 처리 후 남은 찌꺼기인 슬러지의 바이오가스화, 하수열 회수, 소수력 발전, 태양광 발전, 풍력 발전 등을 중심으로 하수처리장 내에서 재생에너지를 생산하고 에너지를 절감하는 데 집중하고 있다.

그러나 이 방식들이 안정적인 대안이 되기 위해서는 아직 갈 길이 멀다. 태양광은 일조량에 따라 얻을 수 있는 에너지의 양이 한정되기 때문에 안정적인 에너지 공급원으로서 사용하기 어려운 면이 있다. 특히 하수처리에 사용되는 막대한 에너지 사용량을 상쇄하기에는 역부

폐기물로부터 바이오가스를 생산하는 과정. 국내에서도 음식물쓰레기를 이용하여 자원화하는 시설이 다수 가동 중이다.

바이오가스 생산과정



적이다. 국회예산정책처가 2010년에 내어놓은 ‘신·재생에너지 보급 사업 평가’에 따르면 가정용 태양광 설비의 30.6%가 설치비 회수 기간이 평균 25년 이상 소요되는 것으로 나타났다. 하수처리 과정에서 발생하는 열을 회수하는 방법이나 소수력 발전 또한 생산 가능한 총 에너지량이 매우 제한되어 있고 회수율이 낮기 때문에 에너지 문제를 해결할 수 있는 대안이 되기는 어렵다. 풍력 발전은 도시와 인접한 하수처리장의 입지 때문에 상용화부터 힘들다.

이에 새로이 주목받고 있는 분야가 유기성 폐기물을 전환하여 바이오가스를 얻는 혐기성 처리 공정이다. 혐기성 바이오가스 생산 기술은 이미 대형 하수처리장을 중심으로 전국 231개 하수처리장 중 69개소에 설치되어 있다. 특히 최근 공기가 차단된 환경에서 메탄가스를 생산하는 바이오가스 생산 기술의 수준이 향상되면서 10년 이내에 안정적인 상용화 기술이 선보일 것으로 예상되고 있다.

그러나 바이오가스 역시 전가의 보도는 아니다. 저농도의 유기성 폐기물 유입, 하수처리장 공정 개선으로 인한 슬러지 발생량 감소, 유기성 폐기물의 낮은 생물학적 분해도, 과도한 반응기 용적 산정 등으로 인해 바이오가스 생산 반응기의 설계기준 대비 실제 바이오가스 발생량은 저조한 편이다. 이 때문에 생성된 바이오가스의 대부분이 자체 가열용으로 소모되므로 하수처리장 전 범위에서 사용하고 있는 에너지를 대체할 만한 수준에는 이르지 못하고 있다.

이러한 단점에도 불구하고 혐기성 처리를 통한 바이오가스 생산이 힘을 얻는 이유는 음식물 폐기물과 같은 다른 종류의 유기성 폐기물과 함께 혼합 처리할 수 있는 특성 때문이다. 또한 하수에 이미 가스로 바꿀 수 있는 탄소원이 풍부하게 포함돼 있어 기존의 활성슬러지공



수처리 관련기술은 최근 들어 많은 주목을 받고 있다. 2012년에는 미생물을 촉매로 활용하여 하수 및 폐수로부터 에너지를 생산하는 '미생물연료전지'가 한국과학기술기획평가원(KISTEP)의 10대 미래유망기술의 하나로 선정된 바 있다.

범까지 대체할 수 있다는 점도 빼놓을 수 없다. 처리대상이었던 생활하수가 에너지원으로 탈바꿈한 것이다. 하수처리장의 에너지 자립화를 위해 하수슬러지 바이오가스 전환 효율을 향상하고 하수의 혐기성 처리를 통한 메탄가스 생산에 힘을 쏟는 이유다.

하수처리장은 바이오매스 생산 공장

일반적으로 하수처리장에서는 하수와 함께 섞인 미생물이 부유 상태로 성장하면서 하수 내의 각종 유기물을 효소로 분해하고 이산화탄소와 물을 배출한다. 이렇게 미생물을 하수와 함께 섞고 산소를 공급해서 오염물질 제거를 촉진하는 공법을 활성슬러지 공법라고 하는데,

이 과정에서 많은 양의 바이오매스가 자연적으로 생성된다. 오염물질이 포함된 탄소원 가운데 반은 이산화탄소로 빠져나가지만, 남은 반이 오롯이 미생물의 성장에 사용되기 때문이다. 즉 호기성 하수처리 공정은 탄소계 오염물질의 절반을 이산화탄소, 나머지 절반을 미생물로 전환하는 공정과 다름없다. 그러나 호기성 활성슬러지 공정 과정에서는 처리 과정에서 증가하는 미생물 폐기물, 즉 ‘하수슬러지’를 주기적으로 비용을 소모하여 제거할 뿐이다.

반면 혐기성 처리에서는 용존 유기물과 하수슬러지를 처리 대상이 아닌 이산화탄소와 미생물을 이용하여 바이오가스로 전환할 자원으로 본다. 하수를 처리 초기단계에서 자원화한다면 하수처리장은 ‘하수 발전소’가 된다. 우리나라의 하수처리장 347개소에서 연간 유발되는 하수슬러지를 60% 순도의 메탄으로 전환하고 열병합 발전(효율 30%)으로 전기를 생산하였을 경우, 66만 가구의 연간 소비전력에 해당하는 에너지를 얻을 수 있을 정도다.

바이오매스를 포함한 유기성 폐자원은 혐기성 바이오가스 생산 공법을 통해 연료로 사용 가능한 메탄가스로 전환된다. 혐기성 소화(Anaerobic digestion) 처리라고도 하는 이 기술은 비교적 기온이 따뜻한 지역에서 폐기물을 처리하는 데 사용돼 왔다. 혐기성 소화 처리의 주 목적은 폐수 혹은 폐기물 처리와 동시에 메탄이라는 ‘에너지’를 회수하는 데 있다. 혐기성 소화라는 용어 내에 포함된 것과 같이 산소가 없는 혐기성 상태(Anaerobic)에서 분해 가능한 유기물을 분해(Digestion)해 메탄으로 바꾸며 유기성 오염물질을 감량하는 것이다.

대표적인 예가 미세조류를 활용해 바이오가스를 생산하는 방식이다.

질소와 인이 생태계로 잘못 유입될 경우 부영양화와 함께 미세조류의 과다 번식을 유발, 결국 녹조와 적조가 발생한다. 최근 이들이 수중 생태계를 망가뜨리는 주범으로 손꼽히며 질소와 인 제거를 위한 비용도 점점 높아지고 있다. 만약 미세조류가 과다하게 생성한 지질을 바이오매스 에너지로 사용할 수 있다면 하수처리장 에너지 자립도 향상과 더불어 비용 절감 효과의 두 마리 토끼를 한꺼번에 잡을 수 있다는 이야기다.

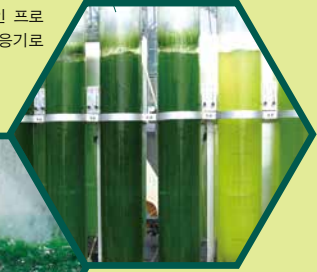
미세조류를 이용한 에너지 생산은 화석연료와는 다르게 공기 중 이산화탄소를 증가시키지 않는 환경 친화적 에너지이다. 공기 중의 이산화탄소를 빛에너지, 질소, 인과 함께 유기물로 합성했다가 에너지로 사용하기 위하여 연소시킬 때에 다시 배출하기 때문이다. ‘제로섬’인 셈이다. 미세조류로부터 직접 바이오디젤을 정제, 추출하는 것보다 바이오가스로 전환하는 것이 경제적이라는 분석도 있다. 질소와 인을 제거한 이후 미세조류를 혐기성 소화조에 투입하는 방식이 가능할 것으로 판단되는 이유다.

하수처리 공정 패러다임의 전환은 이산화탄소 배출이 줄며, 동시에 재생 에너지를 생산할 수 있는 환경 친화적 공정으로 환경문제 해결뿐만 아니라 적지 않은 경제적 혜택을 가져온다. 메탄전환율 고도화를 통해 경제성이 확보되고 고도의 처리수질이 확보되면, 10년 내외에 대단위 하수처리장 혐기성 설비전환 사업이 붐을 이루게 될 것이고 혐기성 소화 기반 하수처리장은 친환경 도시의 발전소의 역할을 하게 될 것으로 보인다. 또 하수처리장에서 생성되는 하수슬러지 단독으로는 에너지비용을 100% 대체하기 어렵기 때문에 외부 유기성 폐자원의 병합 처리가 필요한데, 이러한 방식은 병합 처리 수익과 메

개방형 미세조류 배양 방식인 수로형 연못. 건설비와 운영비는 적게 들지만 다른 생명체에 오염될 수 있고 수확률도 낮다. 사진은 한국해양연구원에 있는 20t급 수로형 연못.



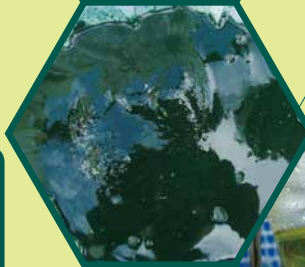
폐쇄형 미세조류 배양 방식인 광생물반응기. 건설비와 운영비는 많이 들지만 오염 가능성이 낮고 빛과 이산화탄소 공급을 쉽게 조절할 수 있어서 생산량이 높다. 사진은 국내 바이오업체인 프로바이오닉에 있는 반응기로 하나가 0.3t 규모다.



배양한 미세조류는 여러 방법으로 분리할 수 있다. 사진은 틸미 미세한 천으로 미세조류를 걸러내는 모습.



수확한 미세조류 덩어리. 이 상태에서 기름을 추출하는 과정도 있고 말린 뒤 추출하는 과정도 있다.



미세조류에서 바이오디젤을 얻는 과정

미세조류를 키워 자동차에 넣을 수 있는 바이오디젤을 얻기까지는 여러 단계를 거쳐야 한다. 기존 화학연료에 대해 가격 경쟁력을 가지려면 이 모든 과정에서 효율을 높이고 비용을 줄일 수 있는 기술개발이 시급하다.



생명공학연구원 오희목 박사팀은 박테리아가 생산하는 응집물질을 써서 미세조류가 서로 엉키면서 바닥에 가라앉아 쉽게 수확할 수 있는 방법을 개발했다.

미세조류 세포를 파괴한 뒤 용매를 넣어 추출하면 기름(지질)을 얻을 수 있다. 위의 녹색 부분이 기름으로 지용성 색소인 엽록소 때문에 녹색을 띤다.

지질에 메탄올을 넣고 에스테르화 반응을 시키면 바이오디젤로 불리는 지방에스테르가 나온다.



탄가스 생산의 수익을 동시에 가져다주는 장점을 지닌다.

실제로 스위스 취리히 주에 위치한 스위스 하수처리장에서는 자체 활성슬러지와 더불어 외부 제빵 공정에서 폐기되는 폐수까지 함께 처리해 메탄생성율을 높일 뿐만 아니라 하수처리장에서 사용하고 있는 전기비용의 100%를 회수하고 있다. 하수처리장에서 사용된 동일한 양의 전기를 되파는 방식이다. 에너지 자립을 이룬 좋은 예시다.

패러다임의 전환과 신기술의 융합이 이끄는 하수자립화

하수처리시설에서 유래하는 유기성 폐자원으로부터 바이오가스를 생산하는 기술은 일부 상업화에 접어들었지만, 기술적으로 보완해야 할 점이 많다. 유기성 폐자원의 가용화(전처리), 유기물의 특성에 따른 투입 부하 결정 시스템, 모니터링 및 운영 자동화, 바이오가스 고품질화, 바이오가스 생산 극대화를 위한 공정 최적화 등이 주요한 해결과제다. 온도차 역시 돌파해야 할 벽이다. 중온 및 고온에서만 운영되어 오던 혐기성 소화공정을 실온 및 저온 환경에서 실현하기 위한 원천기술은 전 세계적으로도 아직 초기단계에 머물러 있다. 저온에서도 활성을 지니는 혐기성 소화 미생물의 균집을 다량 배양하는 한편 발견된 미생물을 고속으로 하수처리장에 공급하는 기술이 필요한 실정이다.

혐기성 소화 공정에서 유기물의 메탄 전환 속도가 비교적 느린 점도 해결과제다. 미생물을 화학, 생물학적 방법으로 단시간 내에 직접화해 느린 혐기성 소화 반응 속도를 상쇄하고 재빠르게 에너지로 전환하는 원천 기술이 필요하다. 또한 엄청난 양의 하수 유입으로 인해 미생물이 반응기를 빠져나가지 않도록 막는 유출 방지대책도 요구된다.



2011년 인천 서구 백석동 수도권매립지에서 열린 바이오가스 자동차연료화시설 준공식. 음식물쓰레기나 폐수로 바이오가스를 만드는 기술은 상용화 단계에 들어섰지만 아직 해결할 과제가 많다.

다. 혐기성 미생물이 하수 조건에 노출되면 일반적인 고농도 폐수 조건과는 생물학적인 특성이 달라지기 때문에, 기존 공정과는 차별되는 설계도 함께 따라야 한다.

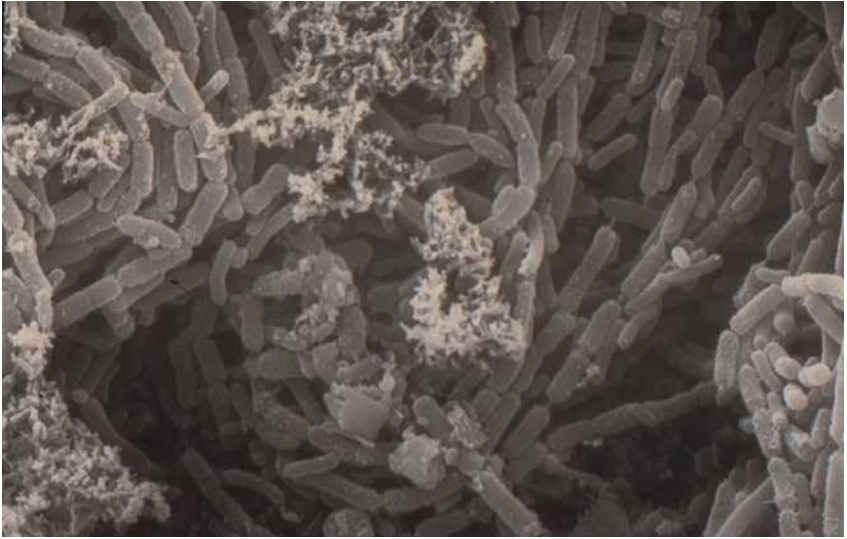
다행히 최근에는 혐기성 처리에 적합한 고효율의 반응기들이 개발돼 처리에 걸리는 시간이 수 일에서 수 시간 내로 줄어들었다. 처리 효율도 기존의 호기성 처리와 거의 대등한 정도다. 또 분리막 오염억제를 위한 신기술들이 개발되면서 혐기성 처리에 분리막을 적용할 수

있는 가능성이 열리고 있다.

막분리 기술은 생산된 바이오가스의 정제에도 사용된다. 바이오가스에는 이산화탄소 및 황화수소 같은 불순물이 포함되어 있어 고효율 발전 설비에 바로 적용하기 어렵다. 기체 분자 크기와 이동(확산) 속도를 이용한 막분리 시스템을 적용하면 불순물을 거르고 고순도의 메탄가스를 생산할 수 있다. 혐기처리 후 후처리 기술로서 미세조류 및 아나목스균을 이용한 생물학적 처리, 나노소재 기반 흡착제 등을 이용한 질소, 인 회수기술 등의 개발로 에너지 자립형 하수처리 시스템 기술의 실용화 가능성 역시 높아지고 있는 상황이다.

KIST는 막기반 분리기술을 이용하여 하수처리장 에너지 자립화 핵심기술을 개발하고 있다. 이를 위해 KIST는 정삼투(Foward osmosis) 공정을 적용하고 있다. 기존의 역삼투(Reverse osmosis) 공정은 폐수에서 물을 분리하기 위해 삼투압 반대 방향으로 압력을 공급해주어야 하므로 에너지 집약적인 단점을 가지고 있다. 그러나 정삼투 공정은 삼투압이 높은 유도용액 방향으로 물을 이동시키는 방식을 이용하므로 추가적인 에너지 투입이 없다.

일반적인 유도용액은 용해도가 높고 삼투압을 효율적으로 발생시킬 수 있는 물질을 녹여서 사용하는데, 유도 용액에서 순수한 물만을 분리하는 과정에서 에너지 소모량이 늘어날 수 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 KIST는 삼투압을 유발하는 나노 자성 소재를 이용하여 삼투압을 만들어낸 뒤, 자성 분리를 통해 소재를 다시 빼내는 방식을 연구 중이다. 자성 나노 소재는 입자의 크기를 나노 스케일로 줄여 삼투압을 극대화 시키는 한편 응집과 산화를 방지하여 사용 연한을 늘리는 특성이 있다. KIST의 목표는 자성 나노 소재의 특성에



하수에서 발견된 혐기성 박테리아. 혐기성 박테리아는 하수 정화 과정에서 매우 중요한 역할을 한다.

초점을 맞춰 정삼투 하수 농축 기술이 조기에 상용화될 수 있게 하는 것이다. 정삼투 공정은 하수의 용존 유기물 함량을 높여서 혐기성 소화 반응기를 안정적으로 운영할 수 있게 한다.

삼투압만이 해결 과제는 아니다. 하수 처리 반응기에서 하수가 체류할 수 있는 시간은 최대 수 시간. 짧은 시간 내에 메탄을 생산해야만 하는 제약조건이 있다는 이야기다. 이러한 조건을 극복하기 위해서는 반응기 내에 높은 농도의 미생물을 유지하는 것이 핵심이다. KIST는 다공성 담체에 혐기성 소화 미생물을 고농도로 가둬 1차 처리를 하고, 정밀여과 분리막이 결합된 생물막 반응기에 부유 미생물이 간헐 있게 하는 방식으로 혐기성 소화 반응 속도를 가속화한다. 또 2차 처리조에 미생물 담체를 투여한 뒤 기계적 힘을 가해 미생물 함량을 한층 높이고 정밀여과 막의 미생물 막힘 현상은 줄이는 방법도 함께

개발 중이다. 이러한 혐기성 생물막 반응기(Anaerobic membrane bioreactor) 핵심 기술이 완성되면 하수처리 에너지 소모량이 획기적으로 줄어들 뿐만 아니라 하수처리장에서 소모하는 에너지를 자체 생산하는 것도 가능하다.

혐기성 소화는 용존 탄소만을 제거하기 때문에 질소와 인과 같은 영양염류는 여전히 남아 있다. 이는 이후 수질오염의 원인이 되고, 질소와 인 제거 공정은 에너지 집약적이기 때문에 하수처리장의 에너지 자립율을 낮추는 역할을 한다. 따라서 효율적인 영양염류 제거 기술은 하수처리장 자립에 필수 요소이다. 이를 위해 KIST에서는 태양광 조사 및 조류의 배양을 통해 질소와 인을 제거하여 에너지를 절감하고 동시에 에너지 자원으로 활용할 수 있는 바이오매스를 생산할 수 있는 핵심기술을 개발하고 있다.

특히 질소를 처리하기 위해서는 호기성 상태에서 암모니아를 아질산과 질산으로 전환한 뒤 다시 혐기성 상태로 아질산과 질산을 질소가스로 환원하는 두 단계의 복잡한 공정이 필요하다. 비용이 두 배 이상 들어감은 물론이다. 이러한 단점을 보완하기 위해 1990년대 후반 유럽에서 등장한 방식이 혐기성 암모늄 산화(Anaerobic ammonium oxidation) 공정이다. 혐기성 암모늄 산화 공정을 이용하면 혐기성 상태와 유기 탄소원이 없이도 질소제거가 가능하여 공정운영 비용도 40~90%까지 줄일 수 있다. 하지만 고농도 폐수에서 미생물의 활성이 가속화되는 특성 때문에 질소 농도가 낮은 하수처리 공정에 적용하기는 어렵다. 이 때문에 KIST는 하수와 같은 저농도 질소원 처리에 적합한 혐기성 암모늄 산화 공정의 핵심기술을 독자적으로 개발하고 있다.

외면하면 폐기물, 애정을 쏟으면 '금덩어리'

EU, 일본, 미국 등 선진국에서는 2020~2050년까지의 온실가스 감축 목표를 설정하고, 신·재생에너지 비중의 확대를 추진하고 있다. 미국은 2009년 6월 온실가스 배출을 규제하는 '미국 청정에너지와 보호에 관한 법률'을 하원에서 통과시켰다. 이 법률은 2020년까지 국가 총 전력 요구량의 12%를 신·재생에너지로 공급하고 에너지효율을 8% 높이는 내용을 담고 있다. 2008년 기준으로 미국의 신·재생에너지 공급비중은 전체의 약 5.3%이며, 이중 폐기물은 7.8%, 바이오에너지가 61%를 차지한다. EU는 2008년 기준으로 총 에너지 공급량의 6.5%를 신·재생에너지에 의존하고 있으며, 이중 폐기물은 10.6%, 바이오에너지가 57.3%를 차지하고 있다. 또한 바이오에너지 생산 확대를 통하여 신·재생에너지 보급률을 2010년까지 12%, 2020년까지 20%를 달성하는 것을 목표로 한다. 이런 상황에서 유기성 폐기물을 통한 바이오에너지 생산은 실용화의 용이성과 함께 풍부한 원료, 환경 문제 해결이라는 부가 효과까지 더해져 세계 각국에서 높은 주목을 받고 있다.

융합기술로 실내 환경을 쾌적하게

정재희 · 배귀남(환경복지연구원)

도시화와 산업구조의 변화로 인해 사무실, 지하역사, 병원 등 밀폐된 공간에서 하루 대부분을 보내는 인구가 증가했다. 2001년도 미국 인간행동패턴조사 연구결과에 따르면, 성인 기준으로 하루 시간의 약 81%를 건물, 사무실, 집, 학교 등에서 보내며, 6% 정도를 대중교통 또는 자동차 안에서 보내는 것으로 조사됐다. 2004년 통계청 조사 결과에 따르면 우리나라도 마찬가지다. 실내 62.9%, 이동수단 7.2%를 더하면 실내에서 보내는 시간이 전체의 70% 이상에 달한다.

근본적인 해결 없이 맑은 공기 못 찾아

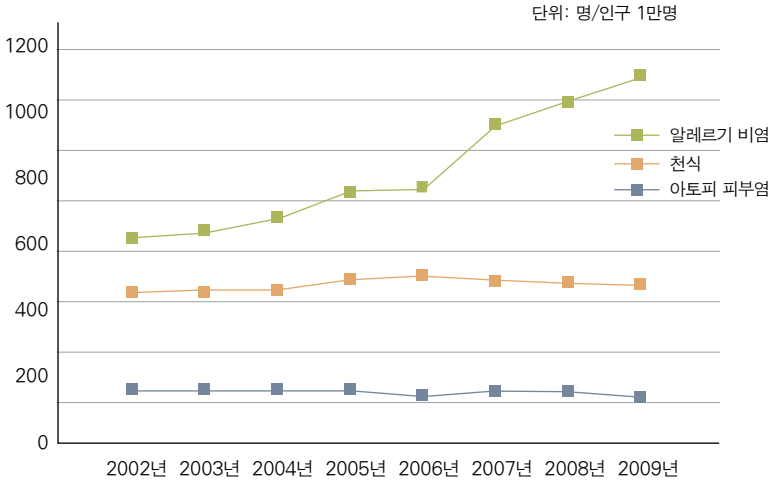
실내에 갇힌 현대인은 함께 갇힌 공기 속에서 살아갈 수밖에 없다. 갇힌 실내 공기는 건축자재, 가구, 벽지, 전자제품 등에서 발생하는 먼지나 유해화학물로 인해 오염되기 십상이다. 특히 천식, 아토피 등 환경성 질환이 증가하고 신종인플루엔자와 같은 공기감염 질환이 꾸



한적한 농촌이었던 경기도 고양시는 20년이 채 안되어 북적거리는 거대 도시로 탈바꿈했다. 인구가 늘어나고 생활수준이 향상되면서 가속화된 도시화는 여러 환경문제를 불러왔다.

준하게 유행함에 따라 실내 공기오염은 사회 문제로까지 커졌다. 건강관리공단 자료(2011)에 의하면 2002년부터 2009년까지 환경성 질환에 의한 환자가 꾸준히 증가하고 있으며 국회 환경노동위원회에서는 지난 2009년부터 2011년까지 환경성질환으로 병원을 찾은 환자가 880만명으로, 진료비가 2조 원에 육박하는 것으로 보고한 바 있다. 유가 상승, 경제 불황과 함께 세계적인 에너지 리스크에 대한 우려는 에너지 절약을 위한 건물 기밀도를 보다 강화시키고, 환기설비 가동을 축소시키는 등 실내 공기질의 관리 여건을 더욱 악화시킬 수 있다는 목소리도 높다.

연도별 인구 1만명당 주요 환경성질환자 추이



거대한 밀폐 공간의 실내 공기질을 바꾸기 위해서는 어떻게 해야 할까? 환기나 공기청정기 등의 대처는 근본적인 해결책이 되지 못한다. 환기와 공기 청정기에 더해 정기적으로 오염을 제거하고 습도를 유지하는 것은 기본이다. 몇년 새 꾸준히 화두가 되고 있는 새집증후군과 석면 문제 등을 해결하기 위해서는 친환경적인 건축자재를 개발함과 동시에 실시간으로 공기질을 감시하고 유해물질을 미리 차단해 공기 오염을 막을 수 있는 기술 또한 필요하다. 이런 다양한 요소를 한꺼번에 관리할 수 있는 통합형 제어 기술 역시 절실하게 요구되고 있는 시점이다.

습도 제어에 미생물 살균까지, '스마트'한 정화 기술

움직임은 정부가 빨랐다. 2004년 '다중이용시설 등의 실내 공기질 관

리범'이 발의되며 각 부처에서 따로 관리하고 있던 실내 공기질을 정부 통합으로 관리하기 시작했다. 2011년에는 영화상영관, 전시관, 학원, PC방 등의 4개 군이 포함된 25개 시설군으로 범위가 확대됐다. 2006년부터 대중교통 공기질 관리 가이드라인을 신설하여 도시 철도와 버스 등의 대중교통수단에 대한 공기질 관리를 수행하는 등 범정부 차원의 실내 공기질 관리정책을 포괄하는 중·장기 종합계획을 수립하여 운영하고 있는 중이다.

그러나 안타깝게도 관련 기술 및 산업이 법을 따라가지 못하고 있다. 다른 기술과 달리 실내 공기질 개선은 실내공기정화 기술, 환기 기술, 오염원 감지 기술, 인간 행동 패턴 예측 기술, 건물 내부 구성체 모두의 오염물질 발생 방지 기술 등 다양한 분야의 학문과 기술이 융·복합적으로 얽혀 있는 분야다. 따라서 각 분야의 전문가들이 유기적으로 상호 융합하기 위한 기반형성이 무엇보다 필요하며, 이러한 연구 결과들이 새로운 성장 동력으로 연결될 수 있는 실내 공기질 개선과 관련한 산업 육성에 대한 지원 또한 필요하다.

우리보다 한 발 앞선 해외의 '트렌드'는 어떠할까. 최근 등장한 공기질 개선 기술 중 가장 주목할 만한 부분은 에어필터를 이용해 공기 중에 떠다니는 오염 물질을 제거하는 집진 기술이다. 집진 효율은 높고 압력은 쉬이 낮아지지 않도록 제어할 수 있는 기술이 반드시 필요하다. 이런 에어필터는 공조기의 부하를 줄일 수 있기 때문에 에너지 절감 효과까지 거둘 수 있다.

필터의 기본적인 특성을 개선할 뿐 아니라 부가 기능까지 구현하고자 하는 노력도 활발하다. 특히 공기 중에 떠다니는 부유 미생물을 미리 차단하고자 하는 연구가 주목받고 있다. 항균 물질을 에어필터



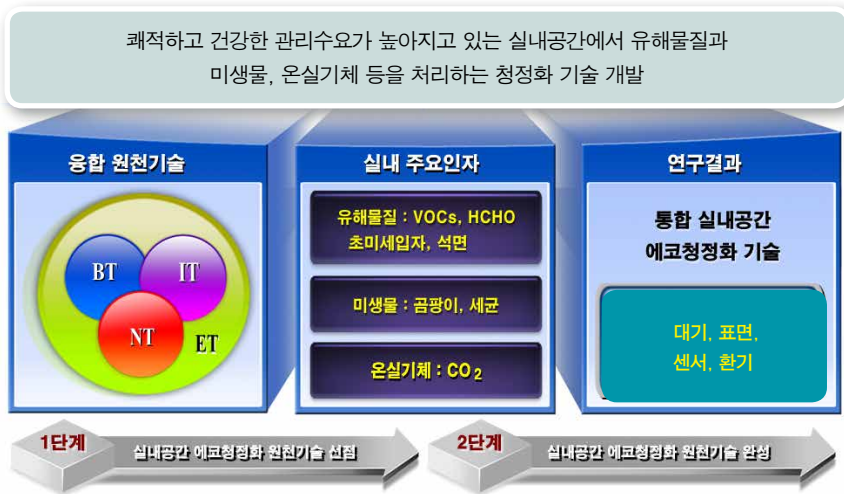
청계천에서 더위를 식히는 시민들. 도심 녹화사업이 활발히 진행되고 하천들이 복원되면서 대기 중 유해물질 정화기능이 살아나고 있다. 그러나 대기환경 개선에도 불구하고 본격적인 관련 기술 발전은 더딘 편이다.

표면에 도포해, 집진된 박테리아나 바이러스를 멸균하는 항균 기술이 대표적인 예다. 자외선을 이용해 미생물을 광멸균하는 방식도 있다. 이 연구는 미국에서 특히 주목받는다. 미국 신시내티대 의과대학의 '건강관련 미세먼지 연구센터'에서는 알레르기를 예방, 치료하기 위한 수단으로써 90년대 초반부터 부유미생물 연구를 지속하고 있다. 캘리포니아공대, 미네소타주립대 등에서도 일반 미세먼지를 연구하던 연구자들이 최근 부유미생물에 큰 관심을 보이기 시작했다.

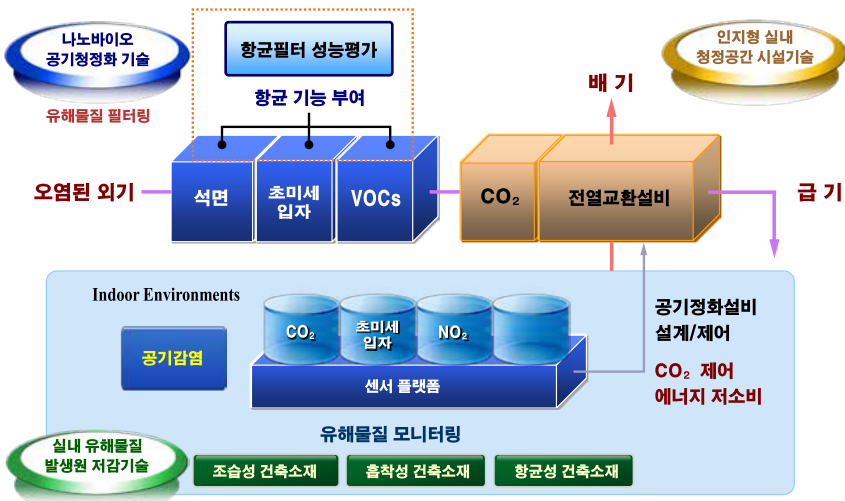
실내 오염물질 감지 기술도 빼놓을 수 없다. 최근에는 기존에 개별적으로 운용되던 실내오염물질 센서를 단일 시스템으로 통합한 것 뿐 아니라 이 시스템을 공기청정, 실내환기 기기와 접목한 센서플랫폼이 등장했다. 실내로 오염물질이 방출되는 것을 방지할 수 있는 친환경 재료 발굴, 실내 오염물질을 흡착하거나 습도까지 제어할 수 있는 '스마트'한 제어 기술 역시 속속 모습을 드러내고 있다.

기술의 심호흡, 느리지만 확실하게

앞서 법이 기술을 추월했다고 밝혔지만 그렇다고 국내 연구진이 마냥 손 놓고 있지만은 않다. 2000년대부터 국내 연구단은 실내 공기에 눈을 돌리고 느리지만 확실한 '심호흡'을 하기 시작했다. 2009년부터 교육과학기술부 신기술융합형 성장동력사업으로 '실내공간 에코청정화 원천기술 개발(연구단장 배귀남 박사)' 연구를 수행하는 KIST 환경복지연구단이 대표적인 예다. KIST는 '실내공기청정 융합연구단'을 발족하고, 쾌적하고 건강한 실내공간을 만들기 위해 유해물질(VOCs, 초미세입자, 석면), 미생물(곰팡이, 세균), 온실기체(CO₂) 등 주요 오염물질을 IT, BT, NT 등을 융합한 원천기술로 처리하는 방안을 연구 중이다. 크게 '나노바이오 공기청정화 기술', '인지형 실내 청정공간 시설기술', '실내 유해물질 발생원 저감 기술'로



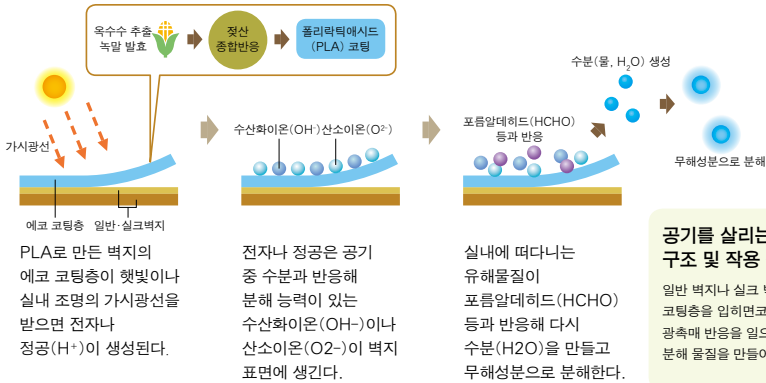
실내공기청정 융합연구의 최종목표



통합형 실내공간 예코정화 기술 개발 개요. 자동제어 시스템과 다양한 유해물질 제거 장치가 결합된 통합 시스템이다.

나년 연구 성과는 이후 의료복지시설, 지능형 객차 환기/정화 시스템, 고기밀 초고층 건물 등에 우선 적용될 예정이다.

KIST 환경복지연구단의 또 다른 목표는 실내공기정화를 위한 항균 에어필터링 기술이다. 특히 KIST 강릉분원 천연물 연구센터에서 찾아낸 천연 항균물질을 사용한다는 점이 눈길을 끈다. 연구진은 천연 항균물질을 나노구조체로 제조하기 위한 원천 기술을 확보하기 위해 관련 분야 국제 SCI급 논문을 발표하고 특허를 등록한 바 있다. 이러한 천연 항균물질을 이용한 항균 에어필터링 기술은 기존 기술에 비해 적은 양으로도 우수한 항균 성능을 보이기 때문에 경제성이 우수하고 인체유해성도 적어 주목받고 있다. 이후 새로운 천연물질을 발굴하기 위한 기능성 작물을 재배하는 등 신성장 동력사업을 부가적으로 발굴할 수 있다는 점도 특기할 만하다.



실내 공기질 시장은 '황금알을 낳는 거위'

맑고 깨끗한 공기를 찾는 목소리가 높아지며 실내 공기 정화 시장은 무서운 성장세를 보이고 있다. 웅진코웨이가 2007년 조사한 자료에 따르면 세계 공기청정기 시장은 2007년 기준 약 765만 대로, 연평균 성장률 8%의 추이를 나타낸다. 2010년도에는 약 1,000만 대 이상을 넘어섰으리라 보인다. 2006년 기준 우리나라의 상업용 건축물은 100만 동을 넘어섰으며, 건설산업 성장률은 다른 선진국에 비해 높은 연간 6%에 달한다. 이들 건물에 사용되는 공기청정설비 역시 연간 시장 규모가 2,200억 원에 달할 것으로 추정된다.

실내 공기정화, 환기, 실내 공기질 센서, 기능성 건축자재 기술은 에너지를 적게 사용하면서 쾌적하고 건강한 실내공간을 구현하는 핵심기술이다. 친환경 건축자재·생활용품, 에너지절약형 환기기술 개발·보급과 같은 다양한 신성장 동력산업의 발굴도 함께 이끌 경우 '황금알을 낳는 거위'가 될 가능성이 높다. 기술이 법과 시장을 앞서가는 순간, 우리의 손에 남는 것은 쾌적한 삶만이 아니라는 이야기다. 실내 공기질 개선 기술에 다시 한 번 주목해야 하는 이유다.

주요 참고문헌

References

Part 1. 생리활성물질

Understanding the Relationship Between Brain Gene Expression and Social Behavior: Lessons from the Honey Bee, Zayed A. and Robinson G.E., *Annu. Rev. Genet.*, 46, pp.589-613, 2012

Potent and specific genetic interference by double stranded RNA in *Caenorhabditis elegans*, Fire, A. et al., *Nature*, 391, pp.806-811, 1998

Duplexes of 21-nucleotide RNAs mediate RNA interference in cultured mammalian cells, Elbadhir, S. M. et al., *Nature*, 411, pp.494-498, 2001

Systematic meta-analyses of Alzheimer disease genetic association studies: the AlzGene database, Bertram L. et al., *Nat Genet* 39(1): pp.17-23, 2007

NBJ (Nutrition Business Journal), 2010

농림수산식품 과학기술 기본계획 수립연구, 농림수산식품기술기획평가원, 2009

Part 2. 컴퓨터와 인간생활, HCI

산업원천기술로드맵, 지식경제부, 2011

IT R&D 발전전략, 지식경제부, 2011

제4회 과학기술예측조사, 국가과학기술위원회, 2012

적외선센서의 원리와 응용, 정용택, 인포더북스, 2012

Optical fiber sensing technology, John Wiley, Lopez-Higuera, 2002

Part 3. 바이오마이크로시스템

Tissue Engineering, Langer R and Vacanti JP, *Science*, 260(5110), 920-926, 1993

Tissue-engineered autologous bladders for patients needing cystoplasty, Atala A. et al., *Lancet*, 367(9518), pp.1241-1246, 2006

Reconstituting Organ-Level Lung Functions on a Chip, Huh D. et al., *Science*, 328(5986), pp.1662-1668, 2010.

From 3D cell culture to organs-on-chips, Huh D and Hamilton G.A. and Ingber D.E., *Trends in Cell Biology*, 21(12), pp.745-754, 2011.

Microtechnology for Mimicking In Vivo Tissue Environment, Sung JH and Shuler ML, *Annals of Biomedical Engineering*, 40(6), pp.1289-1300, 2012.

A 32-Site 4-Channel Cochlear Electrode Array, P. T. Bhatti and Sangwoo Lee and K. D. Wise, *IEEE J. Solid-State Circuits*, pp.2965-2973, 2008.

The bright side of the glial scar in CNS repair, Asya Rolls et al., Nature Reviews Neuroscience, vol.10, pp.235-241, March 2009.

'Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia', Leigh R. Hochberg et al., Nature, vol. 442, no. 13, pp.164-171, July 2006.

Part 4. 나노재료 · 소자

Electroactive polymer[EAP] actuator as artificial muscles: Reality, Potential, and Challenges, Yoseph Bar-Cohen, 2001, SPIE

An experimental investigation of electromechanical responses in a polyurethane elastomer, Zhang, Q. M., Journal of Applied Physics, 81, pp.2770-2776, 1997

High field deformation of elastomeric dielectrics for actuators, Pelrine, R., Materials Science and Engineering, 11, pp.89-100, 2000

Dielectric elastomers as next generation polymeric actuators, Shankar, R., Soft Matter, 3, pp.1116-1129, 2007

Design strategies for organic semiconductors beyond the molecular formula. Zachary B. Henson, Klaus Muellen and Guillermo C. Bazan, Nature Chemistry, Vol.4, pp.699-704, 2013

Small Bandgap Polymers for Organic Solar Cells [Polymer Material Development in the Last 5 Years], Renee Kroon et al., Polymer Reviews, Vol.48, pp.531-582, 2008

에너지 하베스팅용 압전 단결정 기술 개발 동향, 김민수 외, 전기전자재료 23 (9), 2010

압전 세라믹스 소재 개발 동향, 조정호 외, 전기전자재료 25 (4), 2012

Part 5. 에너지

Microbial engineering for the production of advanced biofuels, Pamela P. Peralta-Yahya et al., Nature, 488, pp.320-328, 2012

Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review, P. Alvira et al., Bioresource Technology, 101, pp.4851-4861, 2010

Encyclopedia of electrochemical power sources, Jurgen Garche, Elsevier, 2009

Lithium batteries: Status, prospects and future, Bruno Scrosati and Jurgen Garche, Journal of Power Sources, 195, pp.2419-2430, 2010

Part 6. 환경

에너지 자립화 기본계획, 환경부(생활하수과), 2010

신재생에너지보급사업평가, 국회예산정책처, 2010

공기청정기, 한국과학기술정보연구원, 2007

공기청정기(Air Cleaner)의 시장 기술 보고서, 중소기업진흥공단 마케팅 정보시스템, 2009

실내공기청정 융합연구단, 배귀남, 화학세계, 11호, pp.70-79, 2009

책임편집

금동화 연구위원
하성도 기술정책연구소장
나인욱 기술정책연구소 선임연구원

분야별 대표 필진

김명수 분자인식연구센터 책임연구원
김태송 바이오마이크로시스템연구단 책임연구원
김희중 스펀융합연구센터 책임연구원
박세형 바이오닉스연구단 책임연구원
안병성 청정에너지연구센터 책임연구원
이석현 물자원순환연구단장

편집자

(주)동아사이언스
정영훈 콘텐츠사업팀장
김택원 콘텐츠사업팀 과장

이미지출처

Shutterstock.com
동아일보, 과학동아

2013년 KIST가 바라본 과학기술 전망

2013년 4월 28일 초판 1쇄 발행

지은이 금동화 외 8인

펴낸곳 한국과학기술연구원(KIST)

펴낸이 문길주

편 집 (주)동아사이언스

기 획 기술정책연구소 / Tel. 02 958 5828

주 소 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5

www.KIST.re.kr

© 한국과학기술연구원 · 동아사이언스

이 책은 저작권법에 따라 보호받는 저작물이므로 무단전재와 무단복제를 금지합니다.

사회적 이슈 해결과 건강하고 편리하며 풍요로운 삶을 위해 창의성과 융합의 중요한 동력이 될 과학기술



향후 국내외 환경은 고령화 등 인구구조의 변화, 기후변화 및 환경문제, 자원 고갈, 지식기반 사회, 네트워크의 진화 등이 변화의 화두로 부각될 것이다.

이러한 환경변화로 인해 발생하는 사회적 이슈를 해결해나가면서 일자리 창출에도 기여하는 등 국민의 삶의 질을 높이고 국민 행복을 구현하는 데 과학기술은 중요한 동력이 될 것이다.

이 책에서는 6대 과학기술분야의 29개 기술을 선정하여 현재 우리의 수준과 향후 전망, 그리고 해결해 나가야 할 장애요인들을 살펴본다. 이 책이 국가 과학기술의 나침반 역할을 할 수 있는 유용한 지침서가 되기를 기원한다.