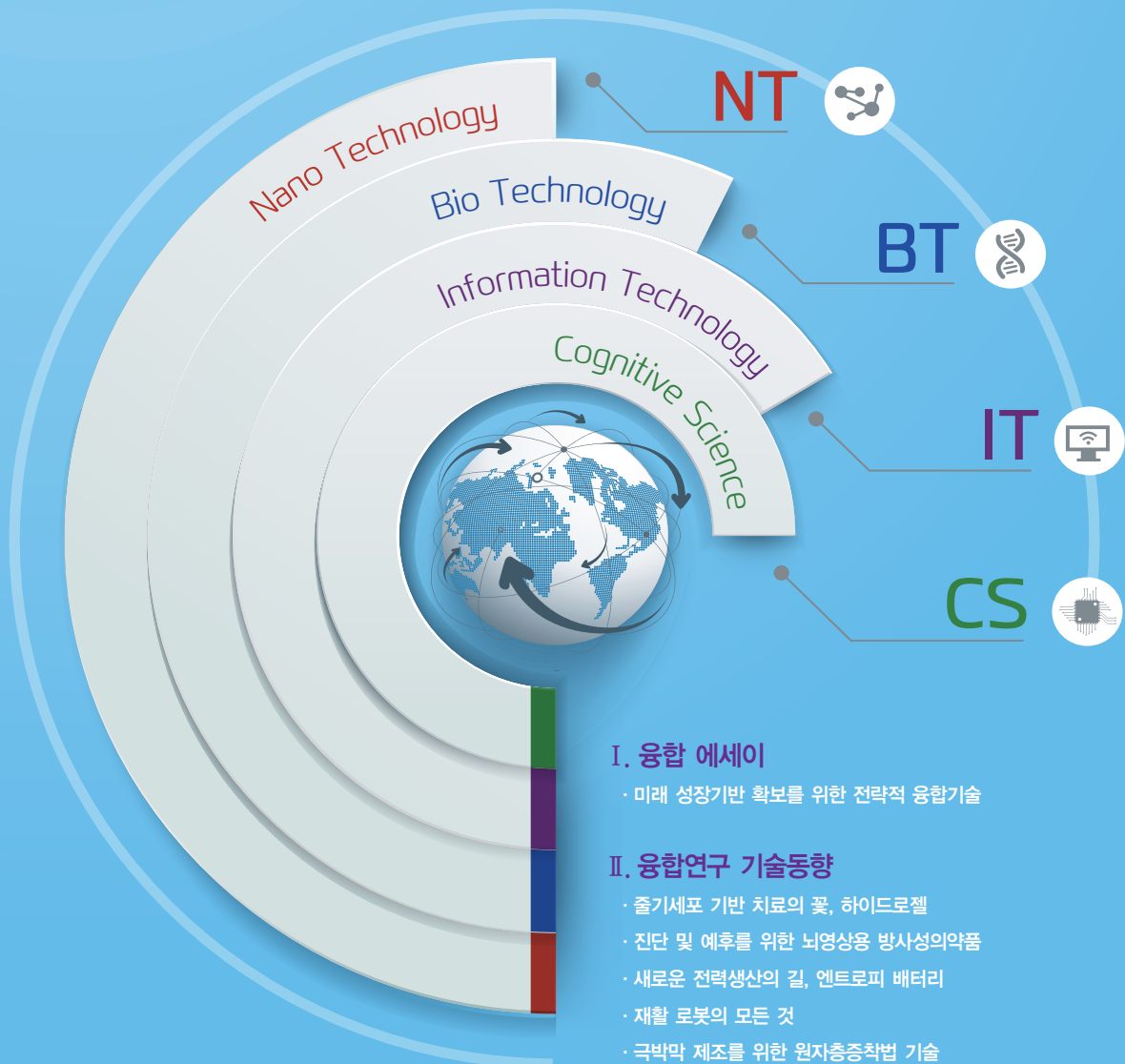




## I. 융합 에세이

- 미래 성장기반 확보를 위한 전략적 융합기술

## II. 융합연구 기술동향

- 줄기세포 기반 치료의 꽃, 하이드로젤
- 진단 및 예후를 위한 뇌영상용 방사성의약품
- 새로운 전력생산의 길, 엔트로피 배터리
- 재활 로봇의 모든 것
- 극박막 제조를 위한 원자층증착법 기술
- 차세대 태양전지기술, 유무기 하이브리드 태양전지
- 폐기물 매립장의 대안, 해상폐기물처분장

Appendix. 쉽게 읽는 융합기술





# 융합 4casting

## CONTENTS

|               |    |                            |
|---------------|----|----------------------------|
| I. 융합 에세이     | 02 | 미래 성장기반 확보를 위한 전략적 융합기술    |
| II. 융합연구 기술동향 | 07 | 줄기세포 기반 치료의 꽃, 하이드로젤       |
|               | 12 | 진단 및 예후를 위한 뇌영상용 방사성의약품    |
|               | 18 | 새로운 전력생산의 길, 엔트로피 배터리      |
|               | 21 | 재활 로봇의 모든 것                |
|               | 27 | 극박막 제조를 위한 원자층증착법 기술       |
|               | 29 | 차세대 태양전지기술, 유무기 하이브리드 태양전지 |
|               | 32 | 폐기물 매립장의 대안, 해상폐기물처분장      |
| Appendix.     | 34 | 쉽게 읽는 융합기술 - 지능형 서비스 로봇 기술 |

### 융합 4casting

융합의 대표적 4가지 분야(NT, BT, IT, CS)와 미래예측(Forecasting)의 합성어로서 인류의 행복과 사회적 성과의 향상을 위해 미래 창조적 가치를 창출할 수 있는 융합기술을 전망하고 관련 종합 정보를 제공하는 동향지

# 미래 성장기반 확보를 위한 전략적 융합기술 융합은 진화하고 신뢰와 원칙이 토양이다

박구선 한국과학기술연구원 연구위원

많은 전문가들은 접근방식이나 해석에서의 차이는 조금씩 있으나 미래사회의 핵심 성장동력은 융합(融合, fusion · convergence · consilience)을 통한 창조(創造, Creation)에서 이루어질 것이라고 확신하고 있고 실제로 글로벌 경쟁제품 대부분의 기술들이 이러한 형태로 나타나고 있다. 융합은 갑자기 나타난 변화이고 완전히 다른 새로운 전략일까? 아니면 사회와 기술이 분화하고 합쳐지는 발전의 과정일까? 우리는 오랜 역사와 삶을 통하여 융합은 새로운 것이 아니라는 것을 알 수 있다. 시대가 바뀌고 역사가 만들어지는 과정은 반드시 서로 다른 문화, 사람, 기술 등의 융합이 있었다. 구석기, 석기, 철기, 청동기 등의 구분은 물론 16C 르네상스도 융합을 통한 새로운 발견과 발명이 과학기술과 시대변화의 변곡점이었고 새로운 장을 여는 시작점이었다. 그런데 우리는 융합을 논하는데 너무 많은 시간을 할애하고 있다.

## ● 얼마나 융합해야 충분한 융합인가? How fusion is fusion enough?<sup>1)</sup>

국어사전적 정의로 융합은 ‘다른 종류의 것이 녹아 서로 구별없이 하나로 합하여 지거나 그렇게 만듦’으로 되어 있다. 다른 종류, 녹아, 구별없이, 하나로 이렇게 네가지 필요충분조건이 담겨져 있다. 서로 다른 것들이 한 곳으로 집중하여 또 다른 하나의 창조물로 변화하는 현상으로 해석해 볼 수 있을 것이다. 홍정욱 교수(서울대학교)는 ‘모순의 정도가 크고 이질성이 높아 고도의 창의성이 요구되는 서로 다른 전문성이 신뢰를 토양으로 각각을 구분했던 경계를 허물고 새로운 것을 만들어가는 과정’이라고 설명하고 있다. 융합은 새로운 것을 하는 창조(創造)만이 아니라 새롭게 하는 창신(創新)에 가깝다고 보아야 한다는 의미로 풀이된다.

우리 가까이에서 24시간 함께하는 스마트폰(Smartphone)을 보자. 새로운 기술보다는 다양한 기술과 기술의 융합, 기술과 콘텐츠의 결합을 통한 새롭게 한 대표적 산물이다. 만약 모바일폰(Mobilephone)이 기술집약적으로만 발전을 이루었다면 즉, 가볍고 작고 가격이 저렴한 효율(Efficiency)을 추구하는 경쟁이었다면 시장은 통신의 수단을 크게 넘지 못하였을 것이다. 그러나 스마트폰은 기술을 넘어서는 새로운 융합을 실현함으로써 제품이 아니라 하나의 문화적

아이콘(icon)으로 자리 잡고 새로운 시장을 만들어 내는 효과(Effectiveness · Attractiveness)를 창출했다. 최재천 교수(이화여자대학교)가 융합을 통섭(統攝, Consilience)이라는 용어를 사용하여 ‘인문 · 사회 · 자연과학과 기술을 통합해 새로운 것을 만들어내는 범 학문적 연구’로 해석한 것에 가까운 사례이다. 미래사회는 극도로 분화하는 사회가 될 것이라고 예측되면서 발전의 패러다임은 과학기술과 인문사회 그리고 혁신과 전통, 디지털과 아날로그, 이성과 감성의 통합 즉 융합시대가 될 것이라고 미래예측가들이 주장하고 있는 것으로 볼 때 시대적 대세임에는 분명해 보인다.

융합은 일시적인 물리적, 화학적, 생물학적 합침도 아니요 나타났다 없어지는 현상도 아니다. 당면한 시대적 문제를 해결하는 도전(Challenge)이고 변화(Change)이며 기회(Chance)이다. 패러다임(Paradigm)을 전환시켜 문제해결방식에 대한 접근과 인식을 다르게 하여 흐름을 바꾸는 혁신(Innovation)을 넘은 진화(Evolution)이다. 새로운 가치의 창출이고 그 시대와 흐름에 맞는 더 나은 좋은 일자리를 만드는 것이다. 융합은 과거형이고 진행형일 뿐만 아니라 진화형이다. 과거형과 진행형에서 우리는 추격자였다는 진화형에서는 빠른 변신으로 선도자가 될 수 있는 기회로 삼아야 한다. 융합이 강조되고 있는 이유도 여기에 있을 것이다.

그냥 한번 해본 이야기, 상상으로만 해본 생각이 바로 현실이 되어가고 있는 세상이다. 사물인터넷(IoT, Internet of Thing) 이야기다. 3D프린터 이야기다. 클라우드펀딩 사이트 킥스타터(www.kickstarter.com) 이야기다. 아이디어만 있으면 제품을 만들어 주는 퀵키(www.quirky.com)라는 사이트도 있다. 이러한 기술들을 기술을 위한 기술, 메타기술(Meta Technology)이라고 하고 기술 구현을 보다 쉽게 효과적으로 할 수 있게 하고 있다. 다양하고 창의적인 아이디어를 촉진하고 각자의 창의력을 바로 현실화시키는 개방형 플랫폼(Open platform)이다. 우리가 흔히 해보는 상상을 현실로, 기술과 자본, 아이디어와 기술, 창의와 도전의 결합을 가능하게 하는 우리 주변의 현재 이야기다.

지금 이루어지고 있는 엄청난 속도의 기술변화에 대한 대응은 느긋한 정책의 문제가 아니라 신속한 실천의 문제이다. 철저한 계획의 수립보다는 빠른 대책과 변화관리를 요구한다. 한강의 기적을 완성한 우리의 경험적 가치가 충분한 경쟁력이 될수 있다. 그 환경적 변화의 중심이 바로 융합이다. 융합은 완성형이 아니고 변화형이다.

왜 창조경제를 주요 국정과제로 채택하여 국력을 집중하고 있는 우리에게 융합은 어떤 의미일까? 기술집약적 대량생산으로 이룩한 2만불을 10여 년 동안 벗어나지 못하고 있다. 이제 현재의 생산기술로는 한계에 있는 것이다. 따라서 이를 뛰어 넘을 기회가 필요하고 융합에서 그 답을 찾고자 하는 것이다. 아이디어가 글로벌 경쟁력을 갖춘 우리의 과학기술과 ICT를 만나 새로운 가치와 일자리를 창출하는 즉, 나눠먹는 파이가 아니라 키워서 나누는 파이를 만들어 내는 전략이 필요하다.

예를 들어 스마트기술을 바탕으로 하는 원격진료시스템은 정보(IT, 情報), 의료(HT, 醫療) 뿐만 아니라 언어학, 심리학, 인지과학 등 인문학의 도움이 꼭 필요하며 사회 관습의 변화와 제도장치도 수반되어야 한다. 분할된 전문지식(Specialist)이 통합된 거대지식(Multi Specialist, Consilience)이 요구되는 복합(複合) · 결합(結合) · 총합(總合) · 통합(統合)적 융합(融合)이다. 한계를 극복하는 혁신적 돌파(Breakthrough)와 상승적 결합(Synergistic Collaboration)이 이 시대와 앞으로의 시대에 절실히 요청되기 때문이다.

1) “얼마나 안전해야 안전한가?(How safe is safe enough?)” 이 명제는 1978년 Policy Science에 게재된 논문제목으로 36년전 Baruch Fischhoff등이 내놓은 이 명제 그간 발전해 온 눈부신 과학기술과 그로 인한 풍요로운 삶에서도 여전히 확실한 대답을 할수 없다(KISTEP Inl 제2호 p53-65 재인용) 최근 새삼 화두가 되고 있다. 융합도 마찬가지로 계속 진화하고 그 답은 시대에 따라 달리 할 것이며 항상 답을 찾아야 하는 명제일 것이다.

## ● 충분한 융합은 없으나 융합을 양성하게 하는 충분한 여건조성은 필수

국가연구개발사업도 문제해결을 위해 개별분야가 이용되고 문제해결 후 다시 재 자리로 돌아가는 것<sup>Multidisciplinary R&D</sup>을 넘어 문제해결과정에서 새로운 분야가 만들어지는 것<sup>Interdisciplinary R&D</sup>이 진정한 의미의 융합적 창조가 중심이 되어야 한다. 융합을 위한 인적·물적·자본의 교류와 결합, 융합을 위한 협업에 대한 인식의 전환, 융합을 통한 창출물의 이전, 융합 촉진 등에 걸림돌이나 장애물은 없는지 또는 무엇이 이를 위한 제도이고 지속가능한 활동을 위한 안정장치인지를 만들건 만들고 없어야 할 것은 과감히 뽑아야 할 것이다.

이제 융합의 개념으로 R&D를 하도록 환경을 조성해 주는 것이 시급하다. 많은 과학자나 연구자 또는 기업가가 융합을 모르는 것이 아니라 융합을 위한 여건이 부족한 것이다. 다양한 융합과 새로운 가치 창출은 위험을 감수하고 도전하며 실패를 두려워하지 않고 상호간의 협력이 Win-win이라는 인식이 확산되어야 하며 융합의 산물이 경제사회로 이어지는 과정과 지식재산에 보호가 충분히 갖춰지거나 이루어져야 한다. 자율과 책임의 선진적 연구 환경과 연구자 친화적 연구관리 시스템은 필수조건이다.

지난 50년 각각의 경계선에서 첨단기술 수출국가의 첨병 역할을 해 온 출연연구기관이 최근 국가과학기술 연구회로 통합하여 융합을 바탕으로 새로운 국가적 역할을 모색한다는 반가운 소식이 있었다. 통합이 필요했던 중요한 사유 중의 하나가 융합연구이며 이를 위해 연구회 내에 융합연구단을 두고 체계적으로 추진하겠다는 내용이 담겨져 있다. 핵심은 컨트를 타워로서 역할을 할 수 있는 당근과 채찍이다. 연구회에 소속 출연연구기관의 예산배분조정의 자율을 주되 결과에 대한 책임을 묻는 선진적 연구회 운영체제를 보장해야 진정한 융합을 이끌 수 있을 것이다.

정부R&D의 기술료 문제도 해결과제이다. 연구성과에 대한 시장가치가 반영되지 않는 시스템은 창의적 활동에 도움이 되지 않는다. 정부투자가 오히려 민간의 연구투자 구축효과<sup>Crowding out effect, 驅逐效果</sup>만 양산하고 적극적인 연구 활동의 장애가 될 소지도 있다. 시장에 충분한 가치를 평가받고 이에 대한 보상이 이루어질 때 활발히 일어난다. 기술혁신기업 육성을 위한 감면과 면제는 또 다른 차원에서 접근하여야 할 것이다.

융합연구 시 나타날 수 있는 산·학·연 간 기술지분에 대한 문제도 짚고 가야한다. 지식재산<sup>IP, Intellectual Property</sup>이란 특정 프로젝트를 통하여 그 결과물로 나오는 것이 아니다. 오랜 경험과 지식의 축적 그리고 참여하는 다양한 주체들의 역량과 투자가 함께 어우러져 나오는 것이다. 참여하는 주체나 사람들에게 각각 위치에서의 특성에 맞는 보상이 이루어져야 할 것이다. 실리콘 벨리의 성공요인 중 하나는 지식재산에 대한 공정한 거래와 철저한 보장이다.

## ● From good to great를 지향

이제 적당히 괜찮은 것은 경쟁이 되지 않는 시대다. 연구는 최고의 성과를 지향<sup>Great R&D Lab</sup>.하고 연구는 시대가 원하는 좋은 일자리<sup>Good Work Place</sup>를 만들고 연구는 글로벌 이슈와 사회적 문제를 해결<sup>Global Problem Solving</sup>하여 국격<sup>國格</sup>을 높여 한강의 기적을 뛰어 넘는 한국의 기적을 만들어 다음 반세기를 준비하는 초석을 만드는데 융합이 그 새로운 전기를 마련하게 될 것이다.

다시 홍성욱 교수 <sup>서울대학교</sup>의 글로 마무리 한다. ‘융합은 자신의 목적을 위하여 이것저것 섞어서 돈을 금으로 바꾸려는 연금술사의 오만한 태도가 아니라 내가 아는 것을 가지고 세상의 복잡한 문제를 푸는데 한계가 있으므로 다른 사람의 지식과 지혜를 빌리기를 피하는 겸손한 탐구로 신뢰와 전문성이 그 토양이다.’라고 강조하고 있다. 융합도 원칙이 통하는 사회가 기반이라는 것이다.

이 에세이를 쓰는 시점에 원칙을 지키지 못해 온 국민의 가슴을 저미게 하는 안타까운 일이 있었다. 이 자리를 빌어 세월호 참사로 인해 아직도 찾지 못한 실종자분들의 무사귀환과 희생한 여러분들에게 머리 숙여 삼가명복을 빈다.



글로벌 금융위기 이후 세계 경제가 침체 국면에 접어들면서 세계 각국은 이에 대응하기 위한 하나의 방안으로 미래전략산업에 대한 육성정책을 적극적으로 강화하고 있다. 이에, 우리나라 또한 새로운 성장을 견인할 수 있는 핵심기술을 발굴하는 등 지속적인 성장역량을 확보할 수 있는 구체적인 전략 마련이 필요하다. 현재 제3차 과학기술기본계획에 의해 다양한 연구개발 정책이 수립되고 있으며, 2017년까지 총 92조 4천억 원이 투자될 예정이다.

이번 호 Ⅱ. 융합연구 기술동향에서는 ‘미래성장기반 확충분야 전략기술’을 다루고자 한다.

- ‘**줄기세포 기반 치료의 꽃, 하이드로젤**’에서는 최근 조직공학에서 각광받고 있는 줄기세포 치료용 하이드로젤의 종류와 특성에 대해 소개하고, 여러 분야 적용에 있어 동 기술의 중요성을 강조하고 있다.
- ‘**진단 및 예후를 위한 뇌영상용 방사성의약품**’에서는 인체영상 진단법으로 새롭게 떠오르는 SPECT, PET 영상용 방사성의약품을 소개하고 국내 독자적 기술 개발을 통한 분자영상기술의 경쟁력 확보를 강조하고 있다.
- ‘**새로운 전력생산의 길, 엔트로피 배터리**’에서는 강물과 바닷물의 염분 농도 차에 따른 엔트로피 변화를 전기에너지로 활용하는 엔트로피 배터리의 원리와 동 기술을 통한 무한한 응용 가능성을 설명하고 있다.
- ‘**재활 로봇의 모든 것**’에서는 국내외 로봇 사업과 상용화된 재활 로봇을 소개하고 있다. 고령화 사회에 대비한 재활치료 로봇의 기술 개발을 위하여 장기적 관점에서 정부지원의 필요성을 강조하고 있다.
- ‘**극박막 제조를 위한 원자층 증착법 기술**’에서는 기술의 원리와 이를 적용한 다양한 원자층 증착법 연구를 설명하고 있다. 기존에 수요가 높은 반도체 분야뿐만 아니라 다양한 산업으로의 적용 가능성을 보여주고 있다.
- ‘**차세대 태양전지기술, 유기 하이브리드 태양전지**’에서는 태양전지 분야의 R&D 투자방향을 제시하고 유기 하이브리드 태양전지의 상업화를 위한 과제발굴과 투자의 필요성을 강조하고 있다.
- ‘**폐기물 매립장의 대안, 해상폐기물처분장**’에서는 폐기물 처리를 위한 해양공간으로 해상폐기물처분장을 소개하고 있다.

## 줄기세포 기반 치료의 꽃, 하이드로젤

김우준 · 송보아 석사과정, 이강원 박사 BT-NT 융합전문위원

하이드로젤은 젤리같은 성질의 물질로서 생체 적합성이 매우 우수하여 약학 및 의학 산업에 활용도가 매우 높아 최근 10년 동안 하이드로젤에 관한 연구가 급증하고 있다. 하이드로젤은 다량의 물을 함유할 수 있고 부드럽고 탄성이 있는 물성을 가지고 있기 때문에 살아있는 인체조직을 모방할 수 있다. 또한 생체에 거부 반응을 일으키지 않으며 다양하게 제작 및 합성이 가능하다. 특히, 최근에 조직공학분야에서는 하이드로젤이 손상된 조직에 줄기세포와 같이 이식되어 손상된 조직의 재생능력을 향상시키는 물리적 버팀목으로 쓰인다. 또한 하이드로젤 안에 약물이나 유전자를 넣은 다음 체내로 이동시키는 약물 전달 매개체로 사용되기도 한다.

### ● 줄기세포 치료용 하이드로젤의 특성

하이드로젤 기술개발 중에서 전통적으로 가장 각광받고 있는 분야는 주입 가능한 온도 감응성 하이드로젤 개발이다. 하이드로젤은 원래 젤리상태가 되기 전에는 물과 같은 상태이다가 특별한 조건(온도, pH, 화학적 반응)에 의해 젤리 상태로 변하는데, 이런 성질을 이용하여 체내에는 젤화 또는 교화 상태가 되기 전에 주사기로 약물이나 줄기세포가 삽입된 하이드로젤을 주입한 다음, 체내에서 교화 상태로 변하도록 유도하는 기술이 주입 가능한 하이드로젤 기술이다. 체내 주입 전에는 액체상태의 졸(sol)상태에서 체온에 의한 온도상승으로 겔(gel)로 변환하는 원리로서 손상된 부위까지 도달할 때까지 다른 조직들을 손상시키지 않고 비수술적 방법으로 시술이 가능하다는 장점이 있다. 교화된 하이드로젤이 지지대 역할을 하는 동안 하이드로젤 안에 있던 약물이나 줄기세포들이 서서히 하이드로젤에서 빠져나와 손상된 조직을 재생하는데 참여한다.

하이드로젤이 체내에서 줄기세포가 잘 분화될 수 있는 적합한 환경을 제공하기 위해서는 몇 가지 조건이 필요하다. 첫째, 하이드로젤은 생체적합성 고분자로 이루어져야 하며, 분해되었을 때 또한 생체친화적인 물질이어야 한다. 둘째, 하이드로젤이 주사기에서 체내로 들어갔을 때의 적당한 점성을 갖추어야 한다. 최근 연구에 따르면 하이드로젤 매트릭스의 물리적, 기계적 성질이 줄기세포의 분화에 큰 영향을 미친다는 보고가 이루어지고 있다. 따라서 하이드로젤은 전달된 줄기세포를 적절하게 하이드로젤 안에 적절한 유지 및 분화를 꾀할 수 있는 물성이 필요하다. 마지막 조건으로는 하이드로젤이 교화가 되었을 때 젤의 내부는 세포의 거동, 증식 및 분화에 필요한 적절한 다공성이어야 한다. 그 외에도 하이드로젤의 다공성 구조는 산소나 영양분 공급에 유리하기 때문에 하이드로젤이 다공성 구조로 형성되어야 세포의 생존율을 극대화시킬 수 있다.

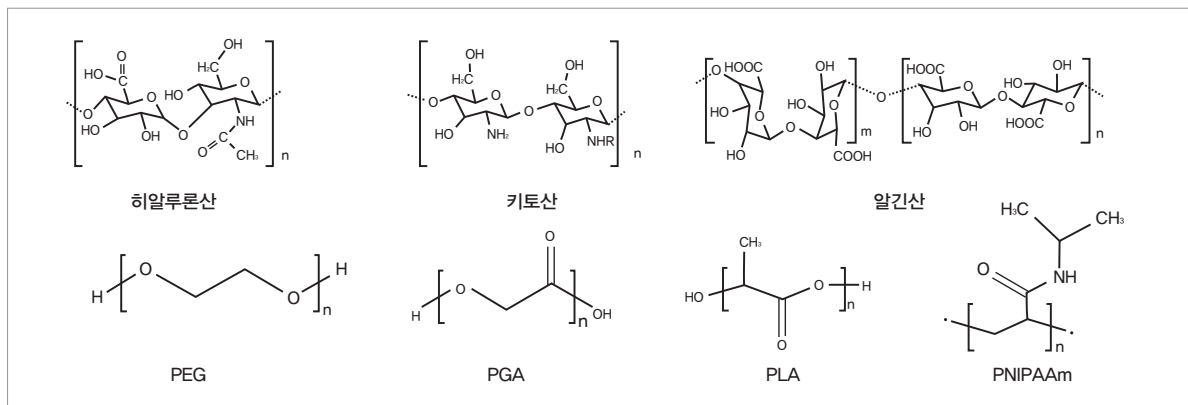


그림1 조직재생에 많이 사용되는 고분자 하이드로젤

## ● 천연 고분자 하이드로젤

하이드로젤의 종류는 천연고분자를 기반으로 하는 천연 하이드로젤과 화학적 가교를 필요로 하는 합성고분자 하이드로젤로 구분된다. 히알루론산은 인체 유래물질로서 체내 저항에 영향을 받지 않으며 체내에서 염증반응도 일으키지 않는 대표적인 생체 친화적 하이드로젤이다. 히알루론산은 보통 상처치료, 혈관 형성이나 세포외기질 형성에 중요한 역할을 하고 또는 세포표면의 수용기와 같이 상호작용을 하여 세포의 이동과 증식을 촉진시키는 직접적인 역할을 하기도 한다. 이러한 특징들 때문에 히알루론산은 조직공학이나 약물 또는 유전자 수송 매개체 및 줄기세포 전달체로 많이 이용되고 있다. 중간엽 줄기세포(mesenchymal stem cell)와 재형성된 뼈 형성 단백질-2(recombinant human bone morphogenetic protein-2)를 히알루론산에 압축한 다음 손상된 뼈 주위에 주입하게 되면 골 재생을 유도하며, 골 밀도를 높이는 연구는 활발히 진행되고 있다. 최근 연구로는 세포 성장과 분화, 조절하는 다양한 성장인자들과 지방유래줄기세포를 히알루론산안에 담지하여 조직재생에 이용하는 논문들이 많이 발표되고 있는데, 히알루론산은 골 및 연골재생에 많이 이용되고 있다.<sup>1)</sup>

알긴산은 다당류이며 해조류에서 추출된 천연재료 기반의 하이드로젤이다. 보통 알긴산은 해조류의 골격을 이루는 성분으로서 β-D-마뉴론산과 α-L-글루론산의 선형배열의 구조를 갖고 있다. 여러 개의 선형배열된 알긴산과 금속이온과의 결합으로 교화가 이루어진다. 알긴산은 미국의 식약청(FDA)의 안전승인을 받았다는 점과 쉬운 교화과정 및 생분해성 특징 때문에 이미 의공학 분야에서 널리 쓰이고 있다. 알긴산 하이드로젤은 특히 약물전달체로 많이 쓰이고 있으며 전달하는 개체로는 단백질, 유전자, 약물 등이 있다. 또한 알긴산 하이드로젤은 여러가지 살아있는 세포를 캡슐화 시켜 운반하는 전달체로 의학치료나 조직공학에 사용되기도 한다. 예를 들면 중간엽 줄기세포(mesenchymal stem cell)를 캡슐화한 작은 구슬 모양의 알긴산 하이드로젤을 심근경색이 있는 쥐의 심장에 주입하면 알긴산 하이드로젤이 분해되면서 안에 있는 중간엽 줄기세포가 심근경색된 심장부위를 재생시킨다는 연구결과가 있다.<sup>2)</sup> 또한 알긴산과 마그네틱 나노입자를 사용하여 자기장 하에서 선택적, 능동적으로 약물을 전달하는 시스템 또한 개발되었다.<sup>3)</sup>

1) Jung, H.H., K. Park, and D.K. Han(2010), Preparation of TGF-β1-conjugated biodegradable pluronic F127 hydrogel and its application with adipose-derived stem cells, J Control Release, 147(1), p84-91  
2) Yu, J., et al.(2010), The use of human mesenchymal stem cells encapsulated in RGD modified alginate microspheres in the repair of myocardial infarction in the rat, Biomaterials, 31(27), p7012-20  
3) Xuanhe Zhao, et al.(2011), Active scaffolds for on-demand drug and cell delivery, PNAS, 108, p67

그 외에 많이 쓰이는 천연 고분자 하이드로젤은 젤라틴과 키토산이 있다. 젤라틴은 3차 나선구조의 콜라겐을 하나의 외가닥으로 나누어 추출한 물질로서 생분해성과 생체친화성 특징 때문에 의공학 분야에서 다양하게 응용되고 있다. 젤라틴은 약물전달체로 많이 쓰이고 있다. 예를 들면 내피세포의 증식에 혈관생성에 깊은 영향을 끼치는 FGF-2와 G-CSF 같은 성장인자를 캡슐화한 젤라틴 하이드로젤을 허혈성 질환의 치료 연구목적으로 쓰인다.<sup>4)</sup> 키토산은 게나 가재, 새우 껍데기에 들어 있는 키틴으로부터 탈아세틸화해서 얻어진다. 키토산은 매우 뛰어난 생체친화성을 갖고 있어 체내에 독성을 유발하지 않고 체내의 면역체계에서 거부반응을 일으키지 않는 특징을 가지고 있다. 키토산 하이드로젤은 화학적 결합과 물리적 결합 하이드로젤로 나눌 수 있다. 공유결합에 의한 화학적인 교화를 통해 하이드로젤의 물성 강도를 향상시킬 수 있다. 키토산과 글리세로포스페이트 염을 가교시키면 열이나 pH 변화를 통해 물리적인 교화를 할 수 있으며, 물리적 결합을 하게 되면 화학적 결합과는 달리 키토산의 분해는 효소에 의해 쉽게 일어난다. 따라서 물리적 결합은 분해가 가능한 가역적인 교화를 할 수 있기 때문에 주사용지체로서 응용되고 있다. 키토산과 β-glycerophosphate(Ch/β-GP)를 합성한 하이드로젤에 암치료 및 억제효과가 뛰어난 ellagic acid(EA)를 주입한 다음 체내의 암 조직에 주사하면 키토산과 β-glycerophosphate(Ch/β-GP)를 합성한 하이드로젤이 체내온도와 pH 농도에 반응해 교화가 되어 서서히 그 안에 있는 ellagic acid(EA)를 내보내면서 암세포의 치료 및 억제에 도움을 주게 된다.<sup>5)</sup>

## ● 합성 고분자 하이드로젤

천연 고분자는 생물 적합성을 가진다거나 상대적으로 독성이 적다는 이점을 가지고 있지만 그 특성을 조절하기에는 용이하지 않다. 기본적으로 고유의 구조식을 갖기 때문에 하이드로젤을 형성할 때의 보조제 혹은 조건에 따라서 변화를 주거나 높은 에너지를 가해 사슬을 끊는 방법 정도 밖에는 특성에 변화를 줄 수 있는 방법이 없다. 하지만 합성 고분자는 다양한 성질을 갖는 단위체들을 적절한 비율로 섞어 중합체를 형성하는 방법으로 다양한 환경에 민감한 고분자를 합성할 수 있다.

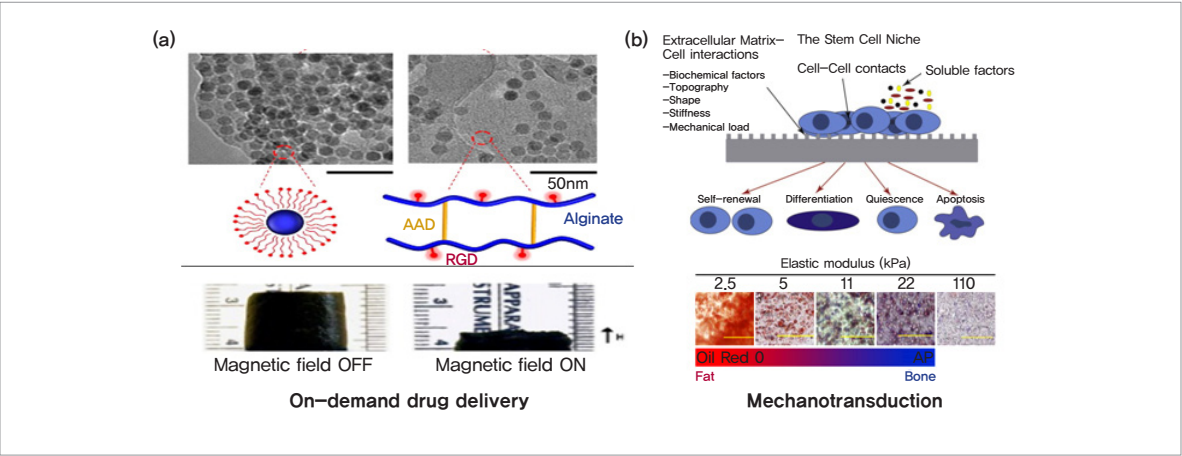
합성 고분자 중에서도 PEG는 scaffold fabrication에 가장 널리 연구되어 온 합성 고분자로, 소수성의 polyester 블록과 PEG 블록의 길이 조정으로 온도-가변성이 있는 하이드로젤을 형성한다. 온도 반응성으로 하이드로젤을 형성할뿐 아니라 화학적인 교차결합으로도 하이드로젤을 형성할 수 있다. 높은 친수성으로 소수성의 약물과 결합시켜 계면활성제와 같은 역할로 화학적으로나 물리적으로 세포 및 약물 등의 전달체를 안정화시키는 현상을 보인다. 최근의 PEG 하이드로젤은 직선 모양과 가지 모양의 고분자가 모두 사용되고, 개질을 통해 acetylene, acrylate, amine, azide, carboxyl, thiol 등 다양한 작용기를 도입하여 사용되고 있다.<sup>6)</sup> 최근에는 injectable scaffold로서 4개, 그리고 8개의 결가지를 가진 PEG 하이드로젤을 이용하여 genipin을 매개로 한 교차결합을 함에있어 8개의 결가지보다 4개의 결가지를 가진 PEG가 더 빠른 시간 내에 젤을 형성하며 구멍이 뚫린 형태로 형성이 되어 세포를 싣고 체내로 전달하는 데 사용하였다.<sup>7)</sup> 삼차원 상태에서 더욱 단단한 물성을 갖도록 하기 위해 화학적으로 변형된 PEG도

4) Layman, H. et al.(2009), Co-delivery of FGF-2 and G-CSF from gelatin-based hydrogels as angiogenic therapy in a murine critical limb ischemic model, Acta Biomater, 5(1), p230-9  
5) Kim, S., et al.(2010), A chitosan/beta-glycerophosphate thermo-sensitive gel for the delivery of ellagic acid for the treatment of brain cancer, Biomaterials, 31(14), p4157-66  
6) Yukie Aizawa et al.(2012), Polymer used to influence cell fate in 3D geometry: New trends, Prog Polymer Sci, 37, 645  
7) Hauping Tan et al.(2010), Novel multiarm PEG-based hydrogels for tissue engineering, J Biomed Mater Res A, 92, 979

사용되었는데, 특히 빛에 의해 분해되는 PEG 합성 거대 단위체를 형성해 세포가 어떻게 주변환경으로부터 영향을 받아 변화하는지 알아볼 수 있는 전망을 보였다.<sup>8)</sup>

한편으로, 생체적합성을 가지면서 생체 내에서 안전하게 분해되는 성질을 갖는 합성 고분자를 연구하는 일이 많다. 재생의학에서는 조직에 따라서 줄기세포를 실은 하이드로젤이 생체 내에서 분해되는 속도가 환자의 완치에 많은 영향을 미치므로 줄기세포의 분화가 빠르게 이루어진다고 하더라도 분해속도가 이에 미치지 못하면 재생능력이 떨어진다. 또한 정교한 구조를 가져야만 하는 혈관과 같은 조직은 이식된 생체재료가 새로운 혈관조직이 잘 자리잡을 시간 동안 체내에서 천천히 분해되어 나가는 것이 좋은 경우가 있다. 반대로, 혈관조직과 달리 분화가 빠른 조직에서의 삽입된 생체재료는 빨리 분해되어 나가는 것이 용이하다. Polyglycolic acid(PGA)와 Poly(L-lactic) acid(PLLA) 둘 다 축매반응으로 인해 단위체의 고리가 열리는 방향으로 중합이 일어나지만 그 성질은 아주 상이하다. 결정성이 높아서 녹는 점이 높고 친수성 성격을 띄는 PGA와 달리 PLLA는 중간 정도의 결정성과 약 175℃의 녹는 점을 가지며 PGA보다 소수성 성격을 가진다. 이러한 친수성, 소수성의 성질 때문에 PGA는 유기용매에서 빠르게 분해되는 반면 PLLA는 비교적 늦게 분해된다. 최근에는 이러한 PGA와 PLLA를 비율별로 섞어 사용하는 PLGA가 약물 전달 캐리어로 많이 사용되고 있다. 유기용매에 잘 녹으며 PGA와 PLLA의 비율에 따라 분해되는 속도를 조절할 수 있는 고분자로서 많이 사용되고 있다. 또한 porous한 구조물을 만들어 세포를 3차원적으로 배양하는데 이용되기도 한다.

Poly(N-isopropylacrylamide)(PNIPAAm)는 대표적인 온도 감응성 합성 고분자로, 체온 근처의 lower critical solution temperature(LCST)는 생체재료로서 활용도를 높인다. 이를 물리적 또는 화학적으로 단백질, DNA, 그리고 재조합된 단백질과 결합할 수 있으며 실온에서 단백질 약물 용액과 쉽게 섞여 원하는 부위에 주사할 수 있다. 그러나 일반적으로 하이드로젤로 변하며 구조물을 형성하는 PNIPAAm는 매끄러운 표면을 가지고 있어 약물 전달에는 용이하게 사용되었지만 세포를 키우는 실험에서는 적합하지 않지만 최근 연구에서는 이러한 PNIPAAm에 single-wall 카본나노튜브를 도입하여 지방줄기세포와 같이 하이드로젤 상태로 주입해 심혈관 질환 치료의 가능성을 보여주었다.<sup>9)</sup>



8) April M. Kloxin et al.(2009), Photodegradable hydrogels for dynamic tuning of physical and chemical properties, Science, 324, 59  
9) Xia Li et al.(2014), A PNIPAAm-based thermosensitive hydrogel containing SWCNTs for stem cell transplantation in myocardial repair, Biomaterials, 35, 5697

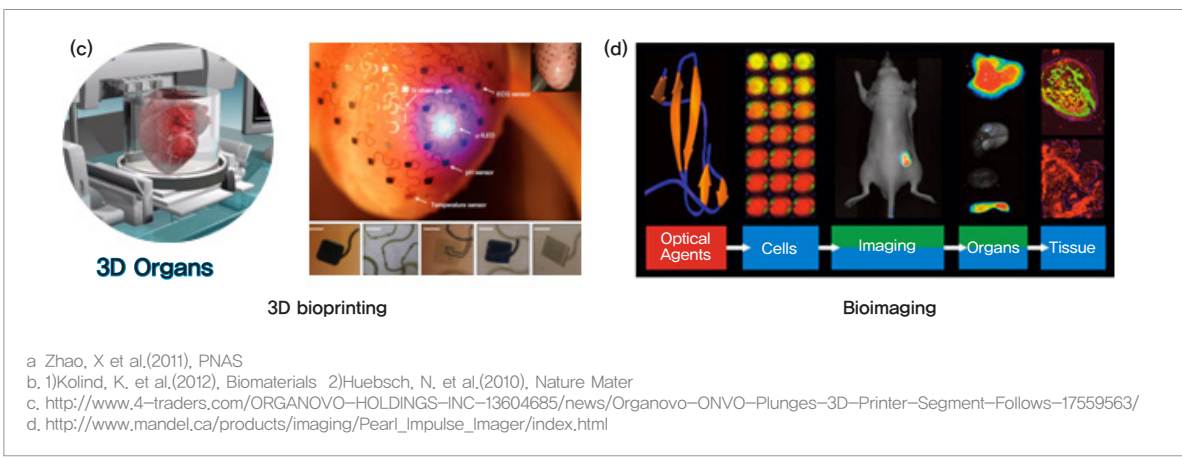


그림2 최근 재생의학에서 하이드로젤을 기반으로 하는 연구 응용분야

최근 들어 줄기세포는 그 뛰어난 분화능력으로 여러 질환을 치료할 수 있는 만능 열쇠로 각광받고 있다. 하지만 줄기세포의 재생의학적 이용을 위해서는 줄기세포의 가장 기본적인 거동제어, 즉 세포의 증식, 부착, 생존, 그리고 분화를 잘 조절할 수 있는 지지체의 연구가 우선이라 할 수 있다. 이를 위해서는 줄기세포의 거동제어가 가능하고 생체적합성이 우수한 하이드로젤 기반 스마트 생체재료의 개발이 향후 재생의학 및 조직공학 연구에 중요하다. 특히 하이드로젤의 상태를 조절할 수 있는 합성고분자와 생체적합성을 가진 천연고분자에 접목시켜 개조하여 하이브리드 하이드로젤의 개발은 매우 중요하다. 더불어 줄기세포의 거동을 면밀하게 제어하는 스캐폴드의 나노형태학 그리고 인체에서 가장 중요하며 복잡한 특이성을 지닌 심장, 간 등의 장기 모사를 위한 하이드로젤의 개발은 줄기세포 기반 치료 연구를 위해서 반드시 계속 진행되어야 한다



# 진단 및 예후를 위한 뇌영상용 방사성의약품

김동진 박사, 김영수 박사 BT-CS 융합전문위원

## ● 인체영상의 배경

- 임상의학에서 영상진단법(diagnostic imaging)이 환자 진단에 절대적으로 중요하게 이용되고 있으며 현재 가장 흔히 사용하고 있는 엑스선, 초음파, 컴퓨터 단층촬영법 등은 질병의 해부학적 변화를 영상화하는 것이다. 질병의 해부학적 변화에 앞서 생화학적 변화, 분자유전자의 변화가 먼저 나타나며 이를 영상화할 수 있다면 질병을 조기에 영상 진단할 수 있다.
- 세포 내 분자 유전자 수준의 변화를 영상화하는 첨단 기법으로 분자생물학의 발전에 힘입어 유전자 치료 · 유전자 복제 기술이 발달하였고, 1990년 이후 리포터 유전자 기술이 도입되어 생체 내에서 분자 수준, 세포 수준의 변화를 영상화할 수 있게 되었다.
- 영상기법이 발달하여 자기공명영상(MRI), 감마 카메라나 양전자방출 단층촬영(PET)을 이용한 핵의학적 방법, 광학영상(optical imaging)을 이용한 방법이 분자영상에 쓰인다. 기존 영상검사에서는 비특이적인 물리적, 화학적 성상의 차이를 이용하여 영상 신호를 만드는데 비해 분자영상은 특이적인 분자 수준, 유전자 차원의 차이를 영상화한다.
- 실시간 분자영상은 각 질환에 특징적인 목적물질(target)에 대한 수용체를 이용해 영상화하는 것이며 수용체에 특이적으로 결합하는 기질에 영상이 가능한 물질을 붙여 결과적으로 목적물질을 영상화한다. 이처럼 목적물질을 생체 내에서 영상화할 수 있게 하는 물질을 분자 표식자(molecular probe)라고 하며, 이를 영상분야에 이용한 것이 smart probe이다. 즉, 생체에 투여한 smart probe는 목적물질을 찾아 결합하게 되고, 이를 영상기기로 촬영하면 체내에서 목적물질의 분포와 양을 알 수 있다.
- 상기에서 언급한 각종 smart probe를 개발하여 실시간 분자영상을 얻더라도 얻어진 정보의 정확한 해석이 없으면 분자영상은 단지 한 장의 사진에 불과하다. 실시간 영상의 정량화는 얻어진 분자영상을 분석 또는 영상 재처리 과정을 통해 약물 또는 질병 조직이 동물 혹은 인체의 어디에 얼마만큼 존재하는지 평가하는 기술로서, 실시간 영상용 smart probe와 더불어 실과 바늘의 관계라고 할 수 있다.

## ● 인체영상용 Smart Probe

- Smart probe란 질병 또는 세포 대사 및 성장의 변화를 영상 또는 기타 시각적인 방법으로 연구자에게 정보를 제공할 수 있는 의약품 또는 chemical로 볼 수 있다.
- 방사성의약품은 크게 진단용과 치료용으로 나눌 수 있으며 현재 진단용의 종류나 사용량이 압도적으로 많아 일반적으로 방사성의약품을 진단용으로 생각하는 경향이 강하다. 진단용은 인체에 투여 후 특정 장기에 잘 모이는 성질이 있기 때문에 특정 장기에 모인 후 방출하는 방사선을 체외에서 탐지하여 분포를 컴퓨터로 영상화하여 진단한다. 따라서 인체를 잘 투과하고 독성이 적은 감마선과 양전자선을 방출하는 방사성동위원소를 사용한다.
- 치료용은 암과 같은 부위에 투여하여 방사선의 파괴력으로 세포를 죽이는 목적으로 사용한다. 알파선은 파괴력이 매우 강하여 강력한 치료효과를 얻을 수 있으나 정상 조직에 대한 독성도 강할 뿐만 아니라 대체로 구하기 어렵고 화학적으로 방사성의약품을 제조하기에 바람직한 성질을 가지고 있지 않아 실용화는 거의 없고 연구단계에 머물러 있다. 따라서 현재 치료용 방사성의약품은 거의 전부 베타선 또는 베타선과 감마선을 같이 방출하는 방사성동위원소를 주로 사용한다.
- 모든 방사성동위원소는 저절로 없어지는데 그 속도가 방사성동위원소에 따라 정해져 있고 이는 반감기로 나타낼 수 있다. 진단용 방사성의약품은 대체로 반감기가 짧아 수분에서 수십 시간 사이에 분포하고, 치료용 방사성의약품은 대체로 10시간 이상에서 수십 일이 되는 경우가 있다. 이는 진단용의 경우 인체에 투여해 검사 후 재빨리 없어져야 인체의 방사선 피폭을 줄일 수 있고, 치료용은 암 조직 등에 모인 후 충분한 시간이 지나야 치료 효과가 커지기 때문이다.
- 방사성의약품으로 인체에 투여하는 동위원소는 나노그램 단위의 극미량을 투여하는데, 방사성의약품은 방사선을 이용하는 것이므로 대부분 그 정도 양이면 충분한 방사선을 얻을 수 있기 때문이다. 만약 너무 많이 투여하면 탐지 장치의 범위를 넘거나 방사선에 의한 장애를 유발할 수 있으므로 불필요하게 많이 투여할 필요가 없다.
- 방사성의약품을 사용하기 위해 방사성동위원소 취급을 위한 각종 인력, 시설, 장비, 절차 등에 대한 상당한 투자가 필요하므로 대형 종합병원이 아닐 경우 사용이 어렵다. 실제로 방사성의약품을 사용하는 국내 병원은 2002년 현재 약 120곳이다.
- 수용체 혹은 운반체들의 분포도를 측정하기 위한 가장 우수한 방법으로 양전자단층촬영술(Positron Emission Tomography, PET)과 단일광자단층촬영술(Single Photon Emission Computed Tomography, SPECT)이 있다. 이때 사용하는 방사성동위원소는 양전자를 방출하는 원소와 단일광자를 방출하는 원소로 크게 두 가지로 나뉜다. 양전자는 +전하를 갖는 입자( $\beta^+$ )이며 양성자가 중성자보다 많은 핵에서 방출되며 방출되자마자 주위의 전자와 만나 511 KeV를 가지며 180도 방향인 2개의 감마선을 방출하게 된다. 단일광자는 일반적으로 감마선으로 부르며 특정 방향성을 갖고 있지 않다. 이러한 다른 특성을 갖는 방사성 원소를 이용해 영상을 얻으려면 독특한 스캐너가 필요하며 이러한 장치로부터 감마선의 위치와 밀도를 측정할 수 있다.
- 최근 중추신경계의 기능을 평가하기 위해 PET와 SPECT를 이용한 영상기법이 매우 빠른 속도로 발전하고 있으며, 실제로 기초의학 연구와 임상에 있어 유용한 기술이다. 정상상태와 질병의 정도를 구별하기 위하여

모두 유용한데, 일반적으로 PET가 더 좋은 분해능과 특이성을 갖고 있다. 분해능은 FWHM(full width half maximum)으로 표시되는데, SPECT는 7~15 mm인데 비해 PET는 4~7 mm이다. 가장 큰 차이점은 SPECT는 상대적인 방사성동위원소의 비를 알 수 있는데 반해 PET는 절대값을 얻을 수 있다는 점이다. 그러나 PET는 양전자를 방출하는 원소를 현장에서 생산해야 하기 때문에 사이클로트론을 필요로 하는데 반해 상대적으로 값이 저렴하고 쉽게 작동할 수 있는 SPECT의 사용이 보편화되어 있다.

- 사이클로트론에서는 양성자, 중수소핵, 헬륨핵 등 하전입자를 가속하여 타겟을 조사함으로써 방사성동위원소를 생산한다. 또한 감마선을 방출하는 201Tl(탈륨), 123I(요드), 67Ga(갈륨), 111In(인듐) 등과 양전자를 방출하는 18F, 11C, 13N, 15O 등을 생산한다.

## ● 뇌영상 시 방사성의약품의 요건 및 특징

- 뇌의 신경화학적 과정(neurochemical processes)을 SPECT과 PET를 이용해 뇌세포에서 방사성의약품의 시간 경과에 따른 농도의 변화를 측정해 영상화할 수 있다. 이러한 영상을 얻는데 사용되는 방사성의약품은 약리학적 영향이 배제된 아주 적은 농도가 사용된다.
- 유용한 추적자는 뇌까지 현저한 양이 들어가야 하는데, 이때 반드시 blood brain barrier(BBB)를 통과해야 한다. 따라서 추적자는 BBB에 운반체(transporter)를 갖고 있는 글루코스나 아미노산의 운반체 기질이거나 세포막이 확산될 수 있는 충분한 지방친화성을 가져야 한다. 마찬가지로 말초 주변(in the periphery)에 형성된 대사물질은 뇌에 들어가선 안 된다. 따라서 대사물질은 BBB 운반체 기질이 되지 않아야 하며 지방 이중층을 지나갈 수 없도록 충분히 친수성을 가져야 한다.
- 방사성의약품은 검사에 적합한 물질이면서 검출에 적당한 에너지를 갖고며 환자에게 방사선피폭이 적고 쉽게 구할 수 있어야 하며, 다음의 요건과 특징을 갖는 화합물이어야 한다.
  - 쉽게 이용이 가능하고 가격이 저렴할 것
  - 측정하고자 하는 대사를 방해하지 않으면서 생리적인 평가가 가능할 것
  - 화학적 독성이 없을 것
  - 방사성핵종은 감마선만 방출하고 하전입자를 방출하지 않을 것
  - 감마선 에너지는 50~300keV이며 환자에게 주는 방사선량이 낮을 것
  - 유효반감기가 검사 소요시간과 비슷할 것
  - 핵의학적 영상을 얻기 위하여 필수적임
  - 주로 양전자 방출핵종과 감마선 방출핵종으로 표지됨
  - PET가 더 널리 보급될 가능성 있음
  - 양전자 방출핵종으로 표지된 방사성의약품의 개발이 더욱 필요
  - PET에 사용되는 양전자 방출핵종은 반감기가 110분 이하로 짧아 사용 직전 표지를 하여 사용
  - 표지를 위한 반응 공정 확립 및 표지를 위한 전구물질의 개발 등이 필요
  - 새로운 유전자 영상용 방사성의약품 개발도 병행
  - 핵의학 분자영상의 국제적 경쟁력 확보는 방사성의약품 개발을 누가 먼저 성공하느냐에 크게 의존

## ● SPECT용으로 사용되는 영상용 방사성의약품

### 방사성옥소로 표지된 영상용 방사성의약품

- 1940년대에 131I을 갑상선 질환의 진단 및 치료에 사용하면서 방사성의약품이 본격적으로 사용되었다. 핵의학에서 주로 사용되는 방사성옥소로는 131I, 125I, 그리고 123I 등이 있다. 131I은 반감기가 8.0일이고 베타붕괴를 하고 감마선을 방출하며, 131I의 감마선 에너지는 364keV와 637keV로 조직투과를 잘한다.
- 131I로 표지된 화합물로는 사람혈청알부민, 거대응집알부민 등과 같은 고분자화합물, 요오드클레스테롤, 올레인산 등과 같은 저분자물질에 표지된 것이 있으며 종양표지자에 대한 단세포균향체가 제조됨에 따라 이를 131I로 표지해 악성종양의 진단 및 치료에 사용하는 연구가 진행되고 있다.

### 테크네슘으로 표지된 영상용 방사성의약품

- 기업체에서 방사성의약품을 개발하려면 우선 시장 규모가 가장 큰 99mTc 표지방사성의약품을 목표로 설정하게 된다. 앞에서도 언급된 바와 같이 99mTc는 다른 방사성동위원소가 따라올 수 없는 여러 장점이 있어 많은 회사들이 연구개발에 투자를 하고 있다.
- 섬광카메라로 영상을 만들 때 사용되는 여러 방사성동위원소들 중 99mTc는 가장 우수한 물리적 성질을 갖추고 있는 방사성 동위원소이다. 테크네슘은 안정동위원소가 없고 방사성동위원소로만 존재하는데, 98Tc의 반감기가 420만년으로 지구의 나이에 비해 매우 짧다. 따라서 지구 생성시에 있던 테크네슘은 현재 존재하지 않고 238U가 자발적으로 핵분열 시 생기는 극미량의 99Tc만이 자연계에 존재하므로 발견이 늦었다. 현재 지구상에 존재하는 테크네슘은 거의 원자로에 의존한다.
- 99mTc는 반감기가 6시간이며 베타선 방출은 없고 방출하는 140keV의 감마선의 경우 조직을 잘 투과하고 조준이 쉽다. 99mTc는 물리적 성질이 우수할 뿐만 아니라 다른 동위원소에 비해 발생기부터 값싸고 손쉽게 구할 수 있기 때문에 핵의학에서 가장 널리 사용되고 있다.
- 99mTc 표지 방사성의약품 중 개발 경쟁이 가장 치열했던 분야가 심근영상 분야였는데, 심근영상에는 양전하를 띤 201Tl이나 86Rb이 심근에 잘 축적되는 현상이 발견되어 사용하고 있었다. 이들은 K+가 NaK-ATPase에 의해 심근에 축적되는 것과 같은 원리로 축적되어 K- 유사체라고 하는데, 물리적 특성이 99mTc에 비해 매우 나쁘고 경제적인 문제도 있어 99mTc로 표지된 심근 영상용 방사성의약품을 많은 연구자들이 경쟁적으로 개발하게 되었다. 그 결과 듀폰에서 개발한 MIBI가 가장 먼저 실용화 되었다.

## ● PET용으로 사용되는 영상용 방사성의약품

양전자방출핵종은 종류가 매우 많으나 방사성의약품에 사용되는 것은 18F, 11C, 13N, 15O이 대부분인데 반감기가 각각 110분, 20분, 10분, 2분으로 매우 짧다. 따라서 외부에서 사서 사용하기에는 문제가 있고 자체 생산을 해야 하는데 이를 생산하기 위한 사이클로트론이 너무 고가로 어려움이 많다. 양전자방출핵종을 영상화하는 법을 양전자단층촬영(PET)이라고 하는데, 영상의 분해능이 높고 동적정량분석이 가능하다는 점 등의 장점이 있다.



#### 산소-15로 표지된 방사성의약품

- 산소-15는 양전자를 방출하며 2.07분의 반감기를 갖는 방사성핵종이다. 산소-15의 반감기가 매우 짧기 때문에 이 핵종으로 표지된 추적자의 수는 제한되어 있다. 국소뇌혈류 측정에는 산소-15가 표지된 두개의 추적자인 물과 부탄올이 사용된다.

#### 질소-13으로 표지된 방사성의약품

- 질소-13은 양전자를 방출하는 방사성동위원소로 9.96분의 반감기를 갖는다. 질소-13으로 표지된 암모니아는 심장, 뇌와 같은 조직에서 국소혈류를 측정하는데 사용된다.

#### 탄소-11로 표지된 방사성의약품

- 탄소-11은 양전자를 방출하며 20.4분의 반감기를 가지며, 탄소-11 방사성동위원소는 수용체 연구에 많이 사용되고 있으며 많은 수용체의 배위자를 표지하는데  $11\text{CH}_3$ 를 이용한 메틸화반응이 주로 사용된다. 적당한 방사성추적자를 선택하고 적절한 수학적 모델을 적용함으로써 고도의 공간해상력을 갖는 분자-세포 간 작용을 조사할 수 있다.
- 탄소-11로 표지된 추적자들은 높은 비방사능을 가질 수 있기 때문에 생리과정에 변화를 일으키지 않고 연구될 수 있다. 방사성핵종의 선택, 분자 내에서 표지될 위치, 입체화학적 형태, 추적자의 대사과정들은 운반, 결합, 대사와 같은 생리적 매개변수에 비추어 고려되어야 한다. 뇌수용체를 표지하는 추적자는 혈류로부터 빨리 빠져나와 혈뇌장벽(BBB)을 통과하여야 하고, 그수용체에 높은 친화도상수와 특이성을 가지며 대사산물이 없고 비특이 결합(nonspecific binding)을 갖는 조직에서도 표적장기에서 더 천천히 제거되어야 한다.

#### 불소-18로 표지된 방사성의약품

- 약 20년 동안 수백개의 불소-18로 표지된 화합물들이 개발되었다. 그 중 약 10개정도만이 양전자단층촬영술에 의해 인체를 대상으로 연구되었다. 불소-18이 표지된 방사성의약품과 그의 용도를 살펴보면 표지된 포도당의 대사 과정이 매우 복잡해 자가방사기록법을 사용하여 포도당이 소모되는 대사속도를 측정하기 어렵기 때문에 1977년에 2-deoxy-D-glucose(DG)에 대한 연구가 이루어졌다.
- DG는 포도당과 똑같이 인체에 당이 필요한 곳으로 운반되지만, hexokinase에 의해 인산화된 후에 더 이상의 대사가 일어나지 않고 남아 있게 된다. 즉, 인산화된 DG는 더 이상의 대사 기질이 되지 못하고 그 자리에 남아 양전자단층촬영술에 의해 국소적인 포도당의 소모 과정을 연구할 수 있다.

### 향후 전망

- 최근에 두뇌영상용 방사성의약품으로 일산화탄소를 리간드의 일부로 하는 착체 제조 방법이 개발되었고, 알츠하이머병의 특징인 아밀로이드에 결합하는 방사성의약품, 각종 수용체에 결합하는 펩타이드, 인간화항체, 엡타머 등 새로운 기술들이 많이 개발되어 더욱 많은  $99\text{mTc}$  표지 방사성의약품들이 개발될 예정이다.
- 양전자방출핵종은 종류가 매우 많으나 방사성의약품에 사용되는 것은  $18\text{F}$ ,  $11\text{C}$ ,  $13\text{N}$ ,  $15\text{O}$ 이 대부분인데 반감기가

각각 110분, 20분, 10분, 2분으로 매우 짧다. 따라서 대표적 생리활성물질인 신경전달물질, 의약품, 대사물질, 호르몬 등에 표지할 경우 각종 생물현상을 영상화할 수 있다. 그러나 반감기가 너무 짧아 실용성에 약간의 문제가 있어 사용이 제한된다.

- 분자영상과 smart probes를 이용한 기술은 신약 개발의 여러 단계에서 약리, 약효 검색을 위한 중요한 수단으로서 활용 가능하다. 즉, 신약 후보 물질 합성 후 동물을 대상으로 한 체내 평가단계, 전임상 시험 후 임상시험 전 인체를 대상으로 한 microdosing 기술, 그리고 최종 신약 개발 후 투여 용량을 결정하기 위한 dose determination까지 분자 영상을 이용한 기술은 신약 개발 전 단계에서 응용 및 평가 수단으로서 활용이 가능하다.
- 체내 병인이 되는 효소, 수용체, 단백질과 같은 특정 물질 또는 조직과 특이하게 상호 작용하는 분자에 대한 실시간 영상으로부터 병의 조기 진단이 가능한 진단의약품을 개발할 수 있다. 특히 치매, 파킨슨병 등과 같은 뇌질환 진단 및 치료제 개발에 획기적인 기술을 제공할 수 있다.
- 분자영상 분야는 핵의학 분야에서도 최신 분야로서 장래의 핵의학적 영상의 중요한 위치를 차지할 것으로 예견된다. 특정 유전자의 발현 여부를 비침습적으로 살아있는 생체 내 영상을 얻는데 가장 실용적이다.
- 국내에서는 외국 표식자의 모방단계에 있어 독자적인 기술로 개발할 수 있는 시스템이 아직 미비한 수준이다. 그러나 분자영상 분야는 우리나라에서도 확장일로에 있으며, 핵의학 분야에서 PET는 1995년 처음 도입되어 임상에 쓰이고 있고 최근에 들어서 그 수요가 확대되어 20대 이상의 PET가 도입되었고 앞으로도 수요는 계속될 전망이다. 또한 PET의 도입으로 야기된 수요 증가와 그 간의 지식축적으로 새로운 sensor의 필요성이 계속 늘어날 전망이다. 대부분의 PET는 여전히 수도권을 중심으로 분포되어 있으며 전국적으로 그 수요가 늘어날 여지가 크다. 우리나라 PET 시장이 커지면서 sensor의 개발과 보급이 더욱 중요해질 것으로 보인다.
- 방사성의약품은 현재의 시장규모는 작지만 성장 가능성이 매우 높은 특수한 분야로  $99\text{mTc}$ 를 이용한 진단용 방사성의약품이 주류를 이루고 있고 연구도 가장 활발하다. 그러나 양전자 방출 방사성의약품의 수요가 급증하고 있고 치료용으로 큰 잠재력을 가진  $188\text{Re}$ -발생기가 개발됨에 따라 앞으로의 판도에 큰 변화가 생길 것이며 특히 치료용 방사성의약품분야가 더 빨리 발전할 것으로 예상된다.
- 아직까지 알츠하이머병의 정확한 원인 규명이 이루어지지 않고 있는 상황에서 앞으로 약 10년은 확실한 치료법을 찾아내기 어려울 전망이다. 하지만 최근 들어 이 질환에 대한 생물학적 근원이 점차 밝혀짐에 따라 새로운 신약개발의 희망이 커지고 있다.
- 현재 알츠하이머병의 약물 시장은 12억 달러로 막대한 규모를 형성하고 있으며, 질환 및 가능한 치료법에 대한 인식이 확산됨에 따라 향후 수년 내에 빠른 속도로 시장이 성장할 전망이다. 이와 맥락을 같이 하여 알츠하이머병의 조기진단을 가능케 하는 분자영상표지자의 개발은 독점적이면서 세계 시장 진출이 가능하다.
- 조기진단의 가능성은 초기상태에서 병의 진행을 억제하여 병의 발병을 저해시키거나 혹은 치료할 수 있다는 큰 장점이 있다. 사이클로트론의 발전으로 인한 양전자를 방출하는 원자의 대량 조달 및 새로운 표지화학의 방법들이 개발됨에 따라 점점 많은 분자영상표지자들이 합성될 것으로 예상된다.

# 새로운 전력생산의 길, 엔트로피 배터리

정두석 박사 IT-NT 융합전문위원

전 세계적으로 신재생 에너지에 대한 필요성이 대두되고 있으며 세계 각국에서 신재생 에너지를 국가적 아젠다로 삼을 만큼 그 필요성과 중요성은 날로 증가하고 있다. 특히 최근 일본 후쿠시마 원전사고 등 일련의 에너지원 관련 사고를 통해 친환경 신재생 에너지원에 대한 필요성은 경제적 측면뿐만 아니라 사회 공공안전의 이유로 배가 되고 있는 추세다. 신재생 에너지를 이용한 전력생산소자의 대표적인 예로 태양광을 이용한 태양전지, 수소 또는 산소의 농도구배를 이용한 연료전지, 양단의 온도구배를 이용한 열전소자 등이 있다. 이들 전력생산소자의 공통점은 전하를 띄고 있는 입자(전자, 이온)의 농도구배를 이용하여 전기에너지를 생산함에 있으며 농도구배는 화학 포텐셜(chemical potential)의 구배를 의미한다.

최근 전기에너지 생산의 동력원으로 화학 포텐셜 구배뿐 아니라 엔트로피 변화를 이용하는 형태의 새로운 전력생산 방식이 제안되고 있다. 대표적인 예로 민물과 바닷물의 염분 농도 차에 기반한 엔트로피 변화를 전기에너지로 전환하는 형태의 전력생산소자인 엔트로피 배터리(entropy battery)가 있다. 강물과 바닷물의 교차점에서 엔트로피 변화에 의해 생성되는 에너지는 단위 민물 1리터 당 대략 2.2 kJ로 현재 이 에너지는 활용되지 못한 채 버려지고 있다. 강물과 바닷물의 섞임 엔트로피에 따른 생산 가능한 에너지량은 그림1에 도식한 바와 같이 국가 혹은 대륙별로 상이하나 대략 수 백 GW에 이르며 엔트로피 배터리를 이용하여 추출 가능한 에너지량은 막대함을 알 수 있다.

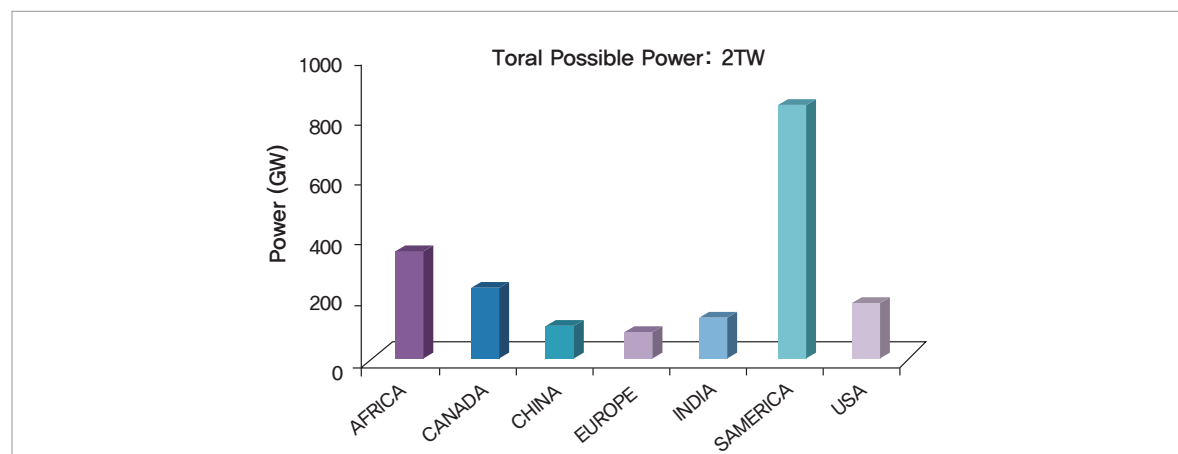


그림1 국가별/대륙별 가용 엔트로피의 양<sup>1)</sup>

1) Nano Letters 11, 1810, 2011

최근 제안된 엔트로피 배터리는 기본적으로 커패시터의 형태를 갖는다. 크게 불활성전극을 사용하는 EDL(Electric double layer)형 엔트로피 배터리와 전기화학적 활성전극을 사용하는 형태의 배터리로 구분이 가능하다. EDL형 엔트로피 배터리의 구조는 그림2에 도식화하였다. 불활성전극으로 넓은 표면적을 갖는 활성화 탄소(activated carbon)를 사용하였으며 활성화 탄소전극 사이를 통과하여 흐르는 염분 농도가 상이한 물에 의해 전극에 대전되는 전압차가 발생한다. 이는 물의 흐름에 해당하는 기계적인 에너지가 커패시터의 전기에너지 형태로 변환됨을 의미한다. 염분농도가 상이한 물을 교대로 주입함으로써 교류형태의 전압을 발생시킬 수 있으며 교류전압의 주파수는 물 주입주기에 의해 결정된다. 본 엔트로피 배터리는 계면 전기화학반응의 이용을 배제하므로 배터리의 수명이 매우 긴 장점이 있으며 대면적의 기계적, 화학적 안정성이 우수한 활성화탄소 전극 제작이 연구의 관건으로 사료된다. 특히 물의 연속적인 흐름으로 발생 가능한 기계적인 스트레스에 대한 충분한 내구성을 갖는 전극의 제작은 매우 중요한 연구개발의 초점에 해당할 것으로 사료된다. EDL형 슈퍼커패시터의 예에서 알 수 있듯이 EDL형 엔트로피 배터리는 매우 우수한 화학적 내구성을 가질 것으로 예상할 수 있다.

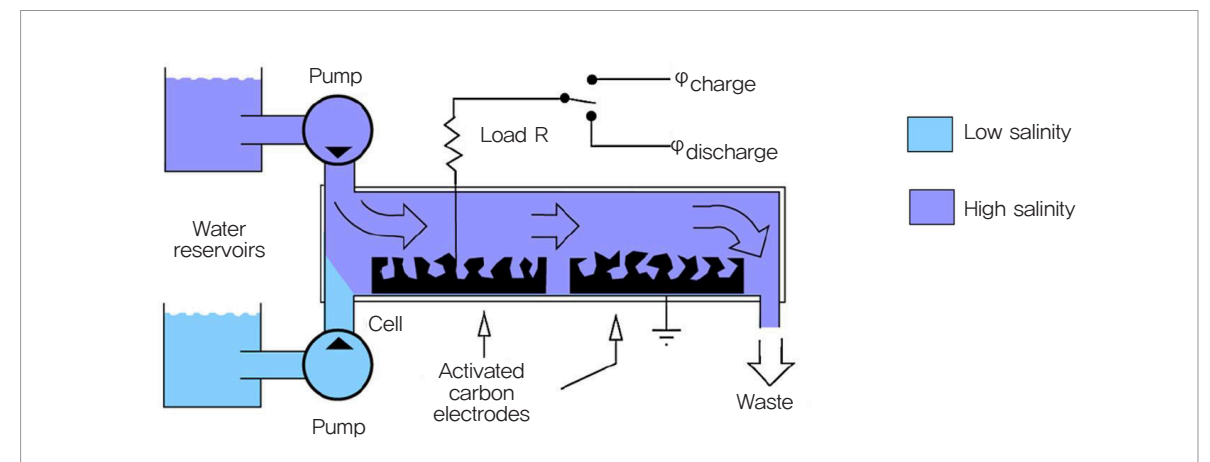


그림2 EDL형 엔트로피 배터리의 모식도<sup>2)</sup>

반면 전기화학적 활성화 전극을 사용한 엔트로피 배터리의 모식도는 그림2에 도식화하였다. EDL형 배터리와 달리 양이온과 음이온에 각각 선택적으로 반응을 하는 전극을 사용하여 전극은 각각 Na이온과 Cl이온을 흡수하며 염도가 높은 물에 전극을 둘 경우 Na양이온과 Cl음이온의 선택적 흡착으로 인해 커패시터는 대전되게 되며 엔트로피는 커패시터에 전기에너지 형태로 저장된다. 대전된 커패시터는 염도가 낮은 물 내에서 흡착된 이온을 잃게 되며 따라서 방전과정을 겪게 되며 이를 반복하여 엔트로피 배터리 동작 사이클을 완성한다. 양이온 흡착전극으로  $\text{Na}_{2-x}\text{Mn}_5\text{O}_{10}$  재료를 사용할 수 있으며 음이온 흡착전극으로 Ag 전극을 사용할 수 있다. 전기화학적 활성전극을 사용하며 화학반응이 배터리 동작과정 중 발생한다는 점에서 EDL형 배터리에 비해 내구성이 떨어짐을 예상할 수 있으므로 화학적으로 내구성이 우수하며 이온 흡착이 용이한 표면적이 넓은 전극의 제작이 필수적이다. 뿐만 아니라 기계적 내구성 역시 중요한 특성 평가요소이다.

2) Physical Review Letters 103, 058501, 2009

# 재활 로봇의 모든 것

김익재 박사 IT 융합전문위원

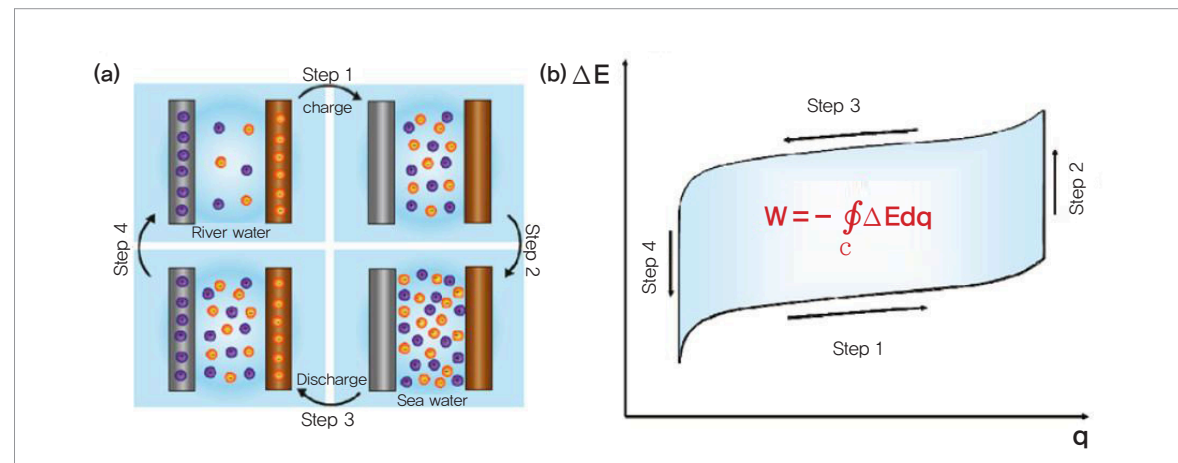


그림3 (a) 엔트로피 배터리의 동작 모식도 (b) 각 스텝에 해당하는 전기에너지의 변화 그래프<sup>2)</sup>

삼면이 바다로 둘러싸인 한국의 지형 특성 그리고 비교적 풍부한 수자원을 고려할 때 엔트로피 배터리의 응용 가치는 높을 것으로 예상된다. 본 기술은 전기화학, 재료공학, 기상학, 해양학, 기계공학 등 다방면의 기술접목이 필요하므로 융합연구를 통해 시너지를 창출할 수 있는 연구분야라고 할 수 있다.

지능형 서비스 로봇은 서비스 로봇과 산업용 로봇으로, 서비스 로봇은 가정용 로봇과 사회복지용 로봇으로 분류할 수 있다.

가정용 로봇은 가사 로봇과 여가지원 로봇으로, 사회복지용 로봇은 생활지원 로봇과 공공복지 로봇으로 분류할 수 있는데, 생활지원 로봇은 실내이동 보조 로봇, 보행훈련 보조 로봇, 생활 보조 로봇 등으로, 공공복지 로봇은 복지시설용 로봇, 안내 로봇, 경비 로봇, 의료용 로봇, 빌딩 도우미 로봇 등으로 나눌 수 있다. 이 중 공공복지 로봇의 일환으로 의료용 로봇이 있다.

의료용 로봇의 연구개발 분야는 크게 네 분야로 나누어 진행되고 있다. 수술실에서 집도의사의 명령에 따라 수술을 보조하는 수술보조 로봇, 의사를 대신해 수술의 전체 혹은 일부를 의사를 대신하거나 의사와 함께 수술을 하는 수술 로봇, MRI나 CT 등을 이용해 가상의 환자와 촉감장치를 이용한 수술 시뮬레이터, 장애인이나 노인층의 독립적인 활동을 가능하게 하는 재활 로봇의 분야로 분류할 수 있다.<sup>1)</sup>

이 중 재활 치료 로봇은 신체 기능 회복 및 향상을 위하여 환자와의 물리적인 접촉을 통해 재활치료를 돕는 것을 목적으로 물리 치료사의 치료와 유사하게 환자에게 적절한 운동을 보조해 주는 역할을 하며 상지, 하지, 손 재활 로봇이 있다.<sup>2)</sup>

전문가들은 재활치료 로봇의 도입을 계기로 환자 상태에 맞춰 치료의 정도를 정량적으로 조절하여 제공 가능하며 치료의 효율성을 획기적으로 향상시킬 수 있다고 평가한다. 실제로 미국 뇌졸중학회(American Stroke Association)는 치료사와 한번에 60~80번 수행하던 재활동작과 연습을 로봇을 활용하게 되면 800~1,000번까지 증가시킬 수 있고, 로봇의 보급이 확대되는 경우 한 명의 재활치료사가 여러 환자를 동시에 치료할 수 있을 것이라고 언급했다.<sup>3)</sup>

## ● 재활 로봇의 필요성

세계적 추세인 고령화시대를 맞아 뇌졸중, 치매 등 노인성 질환이 함께 증가하고 있으며 이들의 재활치료는 인력 손실, 국가복지, 간병관련 사회비용 등의 관점에서 매우 중요하다.

- 뇌졸중은 뇌혈관이 막히거나(뇌경색) 파열되어(뇌출혈) 뇌 손상을 일으키는 질병으로, 사망(18%), 정상회복(9%), 만성장애(73%) 등의 결과를 초래하였고,

1) 의료용 로봇의 기술 개발 동향, Machinery Industry, 2005년 9월  
2) KEIT PD 이슈 리포트, 생체신호 인터페이스 및 재활보행로봇에의 적용 기술, 2013년 4호  
3) 국내외 로봇 동향: 재활치료로봇, 한국로봇융합연구원, 제3호, 2013년 6월

3) Nano Letters 11, 1810, 2011

- 2012년도 건강보험심사평가원이 발표한 심뇌혈관 질환 평가 결과에 따르면 최근 5년 사이 연도별로 뇌졸중을 진단을 받은 사람의 수는 11.2%(555,323명) 증가하였고 이에 따른 진료비는 26.7%(1조 200억 원) 증가하였다.
- 뇌졸중 환자의 경우 발병 후 병원 치료 및 회복기(급성기, 1-2주)를 거쳐 재활치료가 시작되며(아급성기, 약 6개월) 재활에 차도가 없으면 일상생활로 복귀한다. (만성기) 재활로봇 적용을 통해 크게 향상된 재활효과(재활시점, 회복정도, 만성기 재활효과 등)에 대한 임상결과는 발표되지 않고 있으나, 다음과 같은 이유로 재활 로봇의 필요성은 높다고 할 수 있다.<sup>4)5)</sup>
  - 물리치료사의 인력부족, 인건비 상승 등에 대한 대책 및 강도 높은 재활치료 수단
  - 재활치료처방 및 재활 효과의 정량화를 통한 의료 발전
  - Wearable Device 개발을 통한 만성기 가정치료 등 새로운 치료법 제공

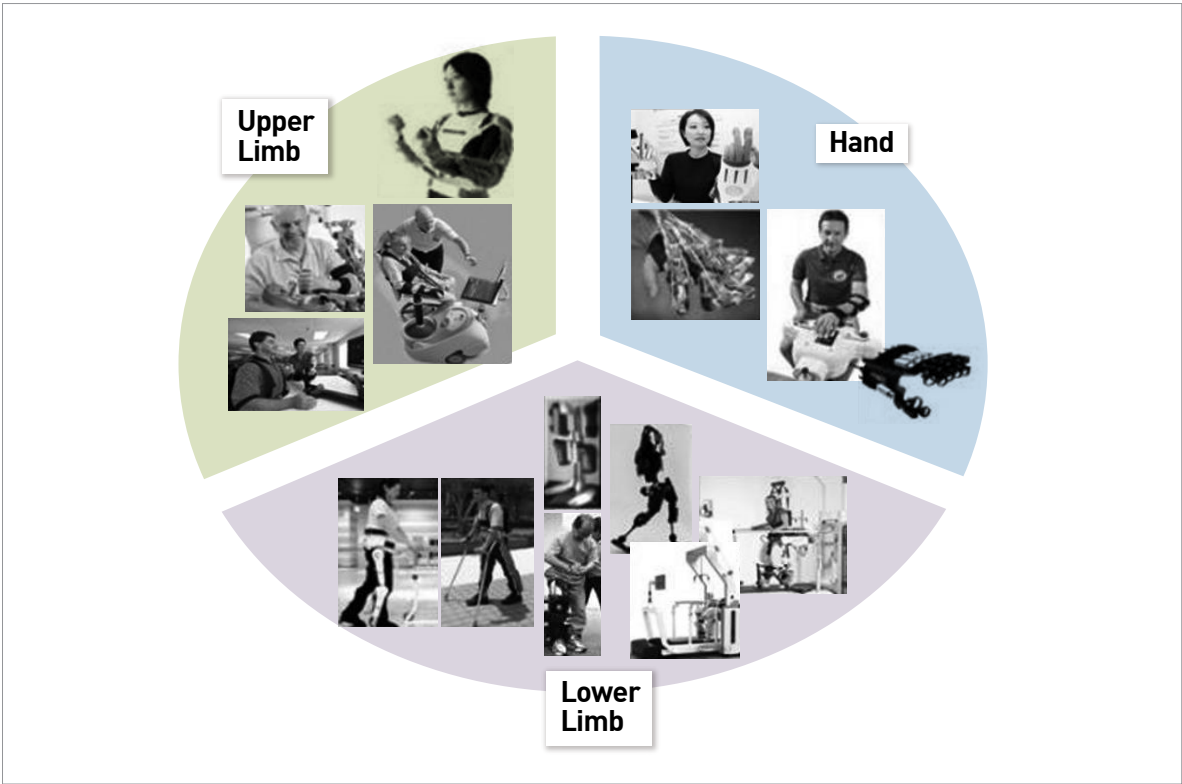


그림1 재활 로봇의 종류(상지, 하지, 손)

4) KET PD 이슈 리포트, 생체신호 인터페이스 및 재활보행로봇에의 적용 기술, 2013년 4호  
5) A Roadmap of Biomedical Engineers and Milestones(2011), Rehabilitation Technologies: Biomechatronics Point of View

재활 로봇의 분류

재활 로봇은 목적에 따라 일상생활 보조, 신체 기능 대체, 재활 치료, 사회 심리 재활 로봇으로 분류될 수 있다.<sup>6)7)</sup>

| 구분                                                            | 설명                                           | 예시                   |
|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------|
| 일상생활 보조로봇<br>(Assistive Robot-for activities of daily living) | 환자가 독립적으로 일상생활을 영위하기 위해 보조해 주는 로봇            | 이동 보조로봇<br>식사 보조로봇   |
| 신체기능 대체로봇<br>(Robotic prosthetics and orthotics)              | 절단되거나 손상되어 제 기능을 하지 못하는 신체를 대신하는 로봇          | 로봇 의수 · 의지<br>보행보조로봇 |
| 재활치료로봇<br>(Therapeutic exercise robot)                        | 뇌졸중 등으로 저하된 신체의 기능을 향상시키기 위한 재활치료를 수행하는 로봇   | 상 · 하지 재활로봇          |
| 사회심리 재활로봇<br>(Socially assistive robot)                       | 인간과 로봇사이의 사회적인 교감을 통해 삶의 질을 향상시키는데 도움을 주는 로봇 | 감성로봇                 |

표 1 재활 로봇의 분류

재활 로봇의 연구개발 동향

재활 치료의 효과는 재활 훈련의 강도와 환자 집중도에 의한 영향이 크며 이를 로봇시스템에 구현하였으나, 최근에는 유럽을 중심으로 의도감지에 의한 재활 효과 규명에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

즉, 보행재활로봇 기술은 보행 의도와 무관한 단순 반복 중심의 재활운동 치료인 bottom-up 방식에서 환자의 보행의도에 응답하는 top-down 방식으로 패러다임이 변화하고 있으며 Brain-Computer Interface(BCI) 기술 접목과 착용형 재활로봇을 활용한 지상보행(overground) 타입의 로봇 시스템을 특징으로 하고 있다.<sup>8)</sup>

유럽에서 진행 중인 대표적인 생체신호 인터페이스 적용 재활로봇 과제는 다음과 같다.

- BETTER(2010.01~2013.01): BCI 기술을 활용하여 하지 운동신호 훈련의 재활효과 규명<sup>9)</sup>
- CORBYS(2011.02~2015.01): BCI 기반 환자의 상태에 따른 재활훈련 기술 개발<sup>10)</sup>
- MIND WALKER(2009.12~2013.05): BCI 기반 착용형 외골격 로봇 제어기술 개발<sup>11)</sup>
- BALANCE(ICT)(2013.01~2017.02): 외골격의 움직임 예측, 자연스러운 제어를 통한 움직임 밸런스 제어 기술 개발<sup>12)</sup>

일본에서는 정부주도의 ‘생활 지원 로봇 실용화 프로젝트-간병 로봇 기기개발 · 도입 촉진 사업’을 통해 간호 및 재활치료에 활용될 수 있는 로봇 플랫폼을 개발하고, 인증 · 보급을 위해 후생노동성과 범부처 사업으로 진행하고 있다.<sup>13)</sup>

6) 국내외 로봇 동향: 재활치료로봇, 한국로봇융합연구원, 제3호, 2013년 6월  
7) A Roadmap of Biomedical Engineers and Milestones(2011), Rehabilitation Technologies: Biomechatronics Point of View  
8) KET PD 이슈 리포트, 생체신호 인터페이스 및 재활보행로봇에의 적용 기술, 2013년 4호  
9) <http://www.iai.csic.es/better/>  
10) <http://www.corbys.eu/>  
11) <https://mindwalker-project.eu/>  
12) [http://cordis.europa.eu/projects/rcn/106854\\_en.html](http://cordis.europa.eu/projects/rcn/106854_en.html)  
13) 국내외 로봇 동향: 재활치료로봇, 한국로봇융합연구원, 제3호, 2013년 6월



- 제품화를 위한 안전 인증 체계 구축, 국제 표준 수립을 위한 적극적인 지원 및 공적 보험 적용을 위한 제도 개선 방안 발표('12.07)
- 2015년부터 현행 공적보험 적용 대상을 간병과 복지 등을 돕는 첨단 기기인 '간병 로봇'까지 확대 · 시행방안 발표, 로봇 사용료의 최대 90% 정도 보조 예상
- 간병로봇은 환자의 간병을 위한 이동, 식사, 목욕, 배설 보조로봇과, 재활치료를 돕는 로봇을 포함
- 생활지원 로봇 실용화 프로젝트에 참여 중인 기업이 제품개발을 동시에 진행하여 재활치료 로봇의 시장진출 기회 모색
- 도요타: 재활치료 로봇인 Balance Training Assist, Independent Walk Assist, Walk Training Assist 출시 예정('13)
- 사이버다인: 입는 로봇 HAL(Hybrid Assistive Limb)은 현재 150여개 복지시설에서 사용 중이며, HAL 5의 의료기관 임대료는 2천불 수준이다. 최근 일본 정부의 승인으로 세계 시장 출시 예정

국내에서는 아래 표와 같이 재활치료 로봇에 대한 연구 지원이 2010년 이후 본격화 되었다.<sup>14)</sup>

단위: 억원

| 구분                               | 과제명                                                              |                                          | 사업기간    | 사업비** |
|----------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|---------|-------|
| 산업융합원천기술<br>개발사업<br>(로봇·차세대의료기기) | 뇌졸중 환자의 보행재활을 위한 보행의도 검출률 90% 이상의 생체신호 인터페이스 기술 및 재활훈련로봇 적용기술 개발 |                                          | '13~'18 | 50    |
|                                  | 노약자/장애인을 위한 근력보조 시스템 개발                                          |                                          | '10~'14 | 80    |
| 로봇산업<br>클러스터<br>조성사업             | 3차원 리얼모션 플랫폼을 활용한 감성통합 기반의 다목적 지능형 로봇개발                          |                                          | '10~'13 | 14.4  |
|                                  | 센서 네트워크 기반의 스마트형 복합 근재활 로봇 개발                                    |                                          | '12~'15 | 11.16 |
|                                  | 상·하지 재활운동이 가능한 보행 보조 휠체어 로봇 개발                                   |                                          | '12~'15 | 12    |
| 대경광역<br>경제권 선도산업<br>육성사업         | 생체정보를 이용한 지능형 운동기기 및 재활운동기기 개발                                   |                                          | '10~'12 | 9.1   |
|                                  | 근육경직이 있는 편마비환자를 위한 능동현 부분상지 6자유도 재활로봇 개발                         |                                          | '12~'15 | 10.5  |
| 국민편의증진<br>기술개발                   | 지체 부자유성 맞춤형 헬스 운동 시스템 개발                                         |                                          | '10~'14 | 8.55  |
|                                  | 중증장애인을 QoLT기반 휠체어 결합형 하지 운동/재활훈련 시스템 개발                          |                                          | '10~'14 | 14.6  |
| 지역전략산업육성                         | 노인/장애인 상하지 근력회복 및 강화를 위한 지능형 로봇 재활 훈련 시스템 개발                     |                                          | '10~'13 | 14.44 |
| 보건복지부                            | 재활로봇 중개연구사업(6개 과제 수행)                                            |                                          | '13~'14 | 30    |
| 의료·재활용 로봇<br>시범보급사업              | 부처주도형                                                            | 재활 보조·관절 운동 보조·보행 보조 로봇<br>병원 및 요양원 시범보급 | '12~'13 | 18    |
|                                  | 아이디어 발굴형                                                         | 노약자용 보행보조로봇                              | '12~'13 | 5     |
|                                  |                                                                  | 무릎관절기능 복원 휴대용 보조로봇                       | '12~'13 | 7.71  |

표2 국내 재활 치료 로봇 사업

현재 상용화된 재활 치료 로봇은 크게 보행 재활 치료 로봇, 외골격형 보행 보조/치료 로봇, 팔 재활 치료 로봇으로 분류할 수 있다. 현재는 병원에서 재활 치료사의 도움을 받아 훈련하는 재활 치료 로봇이 대부분이지만 향후 가정에서 치료사의 도움없이 직접 활용 가능한 로봇이 등장할 것으로 기대하고 있다.

14) 국내외 로봇 동향: 재활치료로봇, 한국로봇융합연구원, 제3호, 2013년 6월

대표적인 보행 재활치료 로봇으로는 스위스 Hocoma사의 Lokomat<sup>15)</sup>, 미국 REHA Technology사의 G-Eo System<sup>16)</sup>, 미국 Motorika사의 ReoAmbulator<sup>17)</sup> 등이 있으며 국내에는 피앤에스미캐닉스사의 Walkbot<sup>18)</sup>이 있다.



그림2 미국 REHA Technology사의 G-Eo System<sup>19)</sup>



그림3 미국 Motorika사의 ReoAmbulator System<sup>20)</sup>



그림4 국내 피앤에스미캐닉스사의 Walkbot System<sup>21)</sup>

외골격형 보행 보조 및 치료 로봇으로는 대표적 제품이 일본 Cyberdyne사의 HAL 로봇이 있다. HAL은 'Hybrid Assistive Limb' 이름으로 츠쿠바 대학에서 1991년도부터 개발에 착수하여 1998년에 첫 모델을 선보였고, 이후 2004년에는 Cyberdyne사를 통해 제품 생산에 이르고 있다. HAL은 피부에 붙인 센서로부터 생체 전위 신호를 읽어내 근육 움직임을 예측하고 모터를 이용해 사람이 생각한 대로 몸을 움직이는 일종의 수의제어 시스템이다. HAL은 사람의 동작이 뇌로부터 척수, 운동신경, 근육 순서로 신경 신호가 전달돼 궁극적으로 피부 표면에 동작 의사를 반영한 생체 전위 신호가 나타나게 된다는 점에 착안해 개발되었다. 또한 생체 전위 신호를 충분히 읽어내지 못해도

15) <http://www.hocoma.com/products/lokomat/>

16) [http://www.rehatechnology.com/en/g-eo-system\\_content—1—1027—26.html](http://www.rehatechnology.com/en/g-eo-system_content—1—1027—26.html)

17) <http://www.motorika.com/?categoryId=91612>

18) [http://walkbot.co.kr/xe/kor\\_main](http://walkbot.co.kr/xe/kor_main)

19) <http://www.rehatechnology.com/>

20) <http://www.motorika.com/?categoryid=91612>

21) [http://walkbot.co.kr/xr/kor\\_main](http://walkbot.co.kr/xr/kor_main)

중심 이동 등을 감지해 자연스러운 사람의 움직임을 재현하는 자율 제어 시스템도 갖추고 있다. 향후 사람이 생각하는 대로 움직이게 하는 기능을 위해 연구 개발을 확장하는 것을 계획하고 있다.<sup>22)</sup>

## ● 결론

고령 인구의 증가로 미국, 유럽, 일본 등 선진국에서는 재활치료 로봇 기술 개발에 많은 투자를 하고 있다. 특히 미국, 유럽 등 선진국에서는 정부 지원을 통해 다양한 형태의 재활 로봇 개발에 관한 과제가 진행되고 있으며, 일본은 주로 기업 주도로 로봇 개발이 이루어지고 있다. 현재 전체 로봇 시장 중에 재활 로봇 시장이 차지하고 있는 비율은 매우 낮으나, 향후 고령화 시대를 고려하면 그 비율은 현저히 증가할 것으로 판단된다. 따라서 우리나라도 최근 재활 로봇 분야에의 연구개발 투자를 확대하고 있으나 장기적 관점에서 보다 많은 정부 지원이 요구되는 상황이다.

특히 재활 치료가 필요한 환자 및 고령자를 위한 재활 보조용 헬스 케어 로봇으로 개발하고자 하는 시스템은 사용자의 생활방식과 편리성을 고려한 사용자 인터페이스 방식이 개발되어야 하며, 피로도 경감과 안전성을 고려한 시스템의 개발이 필요하다. 향후 Brain-Computer Interface 기술 접목을 통해 전문 치료사의 도움없이 환자 혹은 노령자가 스스로 제어하고 학습 및 재활 훈련을 할 수 있는 첨단 기능을 갖춘 재활 로봇의 등장을 기대해 본다.



그림5 실제 HAL을 착용한 모습<sup>23)</sup>

22) 사이보그형 로봇 수트 'HAL' 상용화, 로봇신문, 2013년 7월  
23) [http://www.cyberdyne.jp/english/products/LowerLimb\\_medical.html](http://www.cyberdyne.jp/english/products/LowerLimb_medical.html)

# 극박막 제조를 위한 원자층증착법 기술

김성근 박사 NT 융합전문위원

반도체 등 전자 소자의 미세화, 나노 기술의 발달 등에 따라 10nm 이하 두께인 극박막에 대한 중요성이 더욱 증대되고 있다. 박막의 형성법에는 스퍼터링, 증발법, 화학기상증착법 등 여러종류가 있으나 최근 극박막에 대한 요구가 증가하면서 원자층증착법(atomic layer deposition)에 대한 관심이 증대되고 있다. 원자층증착법은 1970년대에 핀란드에서 광전자 소자에 필요한 ZnS 박막을 증착하는 방법으로 제시하면서 처음 소개되었으며, 당시 단결정 박막 성장을 위해 제안되었던 Atomic layer epitaxy 기술은 다결정 및 비정질 박막의 성장을 모두 포괄하면서 1990년대 이래 atomic layer deposition으로 불리게 되었다.

원자층증착법 기술은 반응 원료의 화학 기상 반응을 이용한다는 점에서 화학기상증착법과 동일하지만, 두가지 이상의 반응 원료를 동시에 반응기 내에 주입해 박막을 형성하는 화학기상증착법과 달리 서로 다른 반응 원료를 분리해 독립적으로 반응기에 주입하여 박막으로 형성하는 방법이다. 그림1은 원자층증착법의 원리를 보여주며 반응원료의 주입과 퍼지를 기본 공정단위로 박막 성장이 이루어진다. 그림1처럼 반응원료와 증착 표면 간의 표면 반응에 의해 원자 한 층 단위로 박막이 형성되며, 원자층 단위로 박막이 형성되기 때문에 박막의 두께 조절이 용이하다는 장점을 가진다.

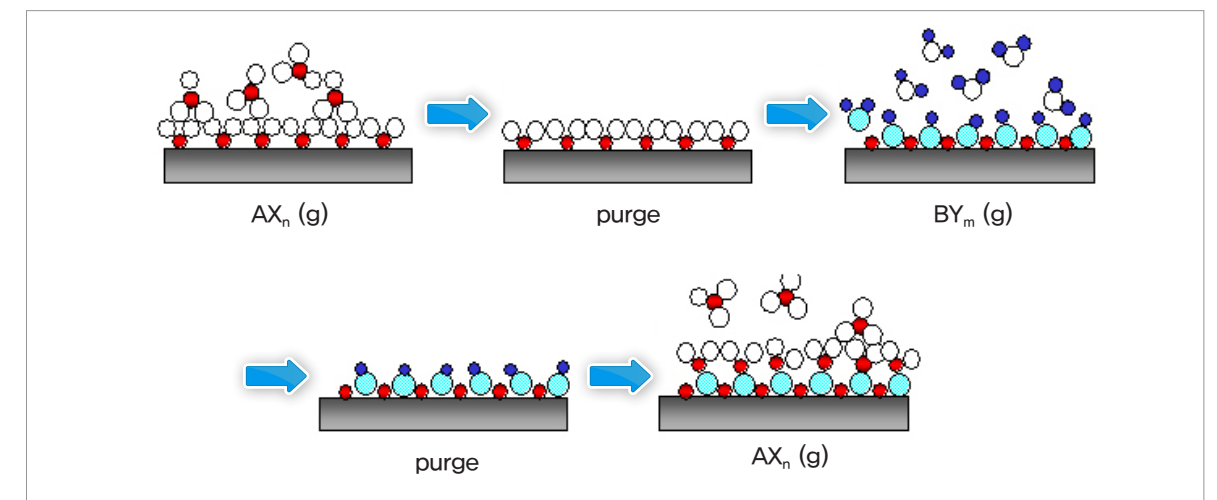


그림1 원자층증착법의 기본원리



# 차세대 태양전지기술, 유무기 하이브리드 태양전지

손해정 박사 NT 융합전문위원

20세기 이후 세계적으로 화석 연료에 대한 수요가 급증하면서 이산화탄소 배출에 의한 환경오염과 지구 온난화 문제가 심각해져 왔다. 무엇보다 20~30년 후 다가올 것으로 보이는 "오일 피크" 이후 시기에 우리는 어떻게 생존에 필요한 에너지를 얻을 것인가에 대한 이슈가 제기되면서 신재생에너지 개발에 대한 관심이 나날이 커지고 있으며 현재까지 풍력, 바이오메스, 지열 등 다양한 신재생에너지 후보군들이 개발되어 왔다. 여러 가능성 중 자연이 보여준 가장 이상적 에너지 시스템인 광합성 원리를 이용하여 태양으로부터의 "무한" 청정에너지를 좀더 적극적으로 활용하는 것이 가장 현실적이며 궁극적인 방법으로 여겨지고 있다. 태양전지는 태양광에너지를 전기에너지로 변환하는 가장 믿을만하고 안정된 미래 에너지 대체기술이며 환경오염이 없고 다른 신재생 에너지원에 비해 연간 에너지 용량이 50배 이상 크다는 큰 장점을 가지고 있다. 또한 오랫동안 연구개발을 거치면서 상용화가 가능한 수준으로 기술검증이 이루어졌다는 이점이 있다.

현재 상용화되어 있는 태양전지의 90% 이상은 실리콘 태양전지가 그 비중을 차지하고 있다. 하지만 2000년 이후 최근 몇년 전까지 실리콘 태양전지의 효율이 한계치에 도달하고 수요 증가로 실리콘 원재료 및 실리콘 기판 수급 문제가 발생하여 태양전지 제조 단가가 상승하게 됨으로써 태양전지는 제조 단가 절감과 원자재 수급 등을 해결해야 하는 문제가 생겼다. 실리콘 태양전지를 이용한 태양광 발전 시스템이 정부 보조금 지급으로 인해 많이 보급되었지만 다른 재생에너지에 비해 발전 단가가 높은 문제점을 보이면서 실리콘 태양전지에 비하여 낮은 가격에 발전을 할 수 있는 대체 기술을 찾기 시작하면서 차세대 태양전지전지기술이 등장하게 되었다. 최근 장기적인 경기 불황으로 인한 시장 위축, 태양광 발전 모듈의 공급량과 설치량의 불균형으로 태양광 모듈 가격이 급격히 하락하는 등의 시장 상황으로 인해 박막 태양전지 기술개발에 대한 투자가 많이 위축되고 있는 실정이다. 하지만 이런 상황에서 아직은 기술이 무르익지 않은 차세대 태양광 기술력의 확보는 우리나라가 그 동안 다른 나라와 태양광 기술 격차를 따라 잡고 원천기술 확보와 차후 차세대 태양전지 시장을 선점할 수 있는 좋은 기회라고 볼 수 있다. 특히 대표적인 미래기술로 급부상하고 있는 유무기 하이브리드(organic-inorganic hybrid) 태양전지기술을 노력볼만 하다.

유무기 하이브리드(organic-inorganic hybrid) 태양전지는 현재 대표적인 차세대태양전지로 꼽히는 염료감응 태양전지와 유기태양전지의 핵심 소재와 작용 원리를 융합하여 장점을 최대한 부각시켜 새롭게 개발된 기술이다.  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  화학식을 갖는 페로브스카이트(perovskite)라는 유무기 하이브리드 반도체 광흡수 물질을 이용하여 기존 유기태양전지에서 유기소재나 양자점을 이용할 때 보다 광전변환 특성을 획기적으로 향상시켰으며, p형 유기반도체 정공이동원리를 도입하여 염료감응태양전지에서 액체 전해질의 산화/환원종에 의한 금속전극의 부식 등 소자 안정성

원자층증착법의 장점은 사이클 단위로 공정이 진행되기 때문에 sub-nm 단위의 박막 두께 조절이 용이할 뿐만 아니라 대면적에서도 두께와 조성 균일성이 매우 우수하다는 장점이 있다. 또한 극단적인 표면화학반응을 통해 박막이 형성되기 때문에 반응원료의 주입량에 관계없이 두께가 일정한 '자기제한적 성장' 거동을 보여 종횡비가 매우 높은 3차원의 복잡한 구조물에도 균일한 두께의 박막 형성이 가능하기 때문에 단차피복특성이 매우 우수한 특징을 가지고 있다. 특히 원자층증착법이 가지는 우수한 단차피복특성은 스퍼터링이나 화학기상증착법 등 기존의 증착법을 통해서서는 확보가 불가능한 특성으로, 이로 인해 표면적이 특히 중요한 여러 응용분야에서 원자층증착법에 대한 관심이 점차 확대되고 있다.

Dynamic random access memory(DRAM) 등의 메모리나 logic 소자 등의 반도체 산업에서 요구되는 고품질의 극박막 형성을 위한 기술로 원자층증착법이 크게 성장해 왔다. 최근 들어서는 유효표면적이 중요한 촉매나 에너지 분야에서도 원자층증착법 기술이 관심을 받고 있으며, 저온 증착이 가능한 특징 때문에 바이오 분야 등에서도 활용 가능성이 높아지고 있다.

원자층증착법 연구는 주로 이성분계 산화물에 집중되어 왔으나, 점차 다양한 물질로 확산되는 추세에 있다. 삼성분계 이상의 산화물이나 질화물, 황화물 등의 성장에 대한 연구도 활발히 진행되고 있으며, 특히 백금 등과 같은 단일 금속 물질도 증착이 가능하여 전극 물질이나 촉매 물질에 대한개발 연구 역시 진행되고 있다.

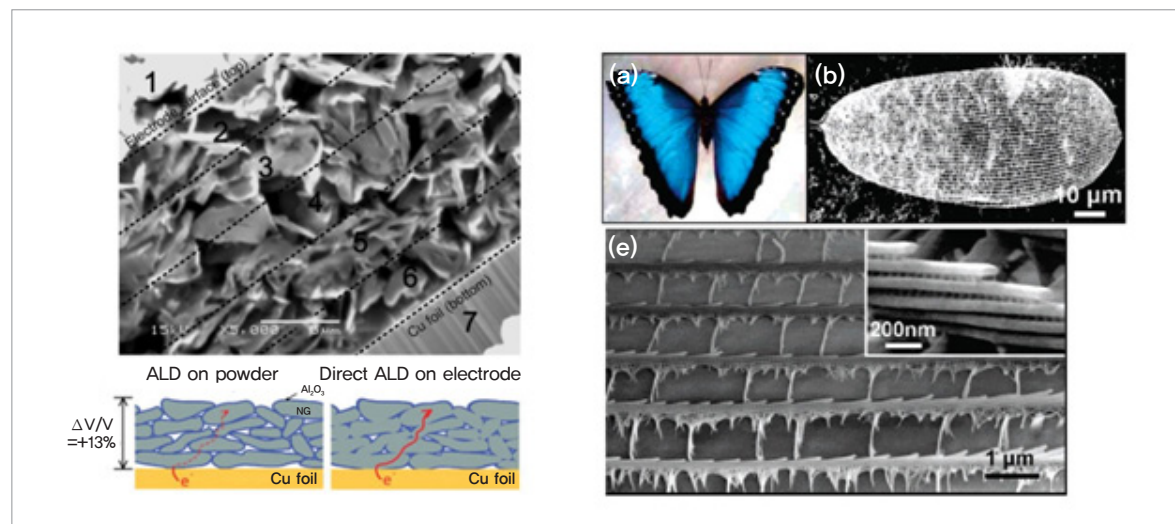


그림2 (좌)원자층증착법을 적용한 리튬 이온 배터리<sup>1)</sup> (우)원자층증착법을 이용하여 복제한 나비 날개<sup>2)</sup>

원자층증착법 기술은 우수한 단차피복특성, 대면적 증착 가능, 우수한 재현성 등 다양한 장점으로 기존에 이용되던 반도체 산업에서 나아가 에너지, 환경, 바이오 기술까지 점차 활용 가능성이 확대되고 있으며, 동시에 다양한 물질의 개발을 통해 기타 산업의 발전에도 크게 기여할 수 있는 기술로 주목받고 있다.

1) I. D. Scott, Y. S. Jung, A. S. Cavanagh, Y. Yan, A. C. Dillon, S. M. George, S. H. Lee(2011), NanoLett., 11, 414  
2) J. Huang, X. Wang, Z. L. Wang(2006), NanoLett., 6, 2325

문제를 해결하였다. 페로브스카이트를 이용한 유무기 복합태양전지는 투명전극(FTO)이 코팅된 유리 기판 위에 600 nm의  $\text{TiO}_2$  박막,  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 의 광흡수 물질, p형 반도체 고분자, Au 전극으로 이루어져 있다. (그림1)

기존에 보고된 태양전지의 원리와 다르게 유무기 하이브리드 태양전지는 광흡수 물질인  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 가 2극성 (ambipolar)의 전기적 특성을 이용하여  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 가 광을 흡수함과 동시에 p형 혹은 n형의 정공 혹은 전자를 전달하는 역할을 하는 특징이 있다.

페로브스카이트를 이용한 유무기 하이브리드 태양전지는 유기물만을 이용한 유기태양전지에 비해 내구성이 우수하고 고효율이 가능하다. 고가의 유기반도체 대신에 저가의 유무기 하이브리드 소재를 이용하여 광흡수층을 형성하고 용액공정이 가능하므로 낮은 가격에 태양전지 제조가 가능하며, 대면적이나 유연성 기판에도 쉽게 적용이 가능하다. 이러한 장점으로 유무기하이브리드 태양전지는 효율에 있어서 빠른 발전을 이루어 왔으며, 현재 18%에 육박하는 효율로 차세대 태양전지 중 가장 높은 성능을 보이고 있다. 그 활용 분야로는 스마트폰, 노트북 등에 설치가 가능한 디바이스 일체형 태양전지(Device Integrated Photovoltaic, DIPV)이며 특히 웨어러블 전자디바이스는 가장 유망한 응용 분야 중 하나이다. (그림2) 종합적으로 볼때 기존의 에너지 시스템을 뛰어 넘을 수 있는 가장 높은 가능성을 갖는 차세대 에너지시스템으로 기대된다.

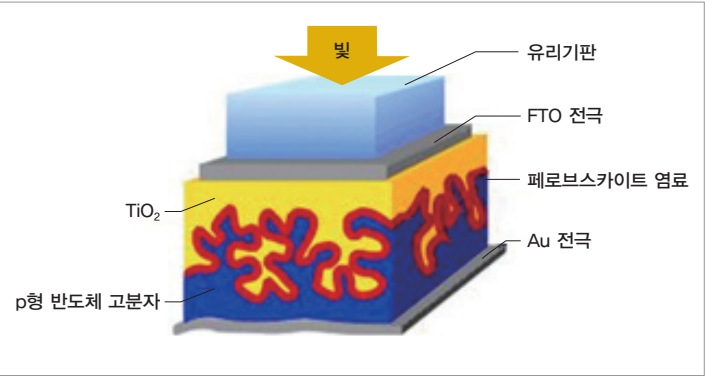


그림1 페로브스카이트를 이용한 유무기 하이브리드 태양전지의 소자 구조<sup>1)</sup>



그림2 유무기 하이브리드 태양전지의 응용 예<sup>2)</sup>

1) <http://juanbisquert.wordpress.com>  
2) <http://techholic.co.kr/archives/12002>

앞으로 유무기 복합 태양전지 기술개발 방향은 첫째, 실제 환경에 적절히 사용하기 위해서 양산성을 갖춘 모듈화 기술이 필요하며 DIPV와 같은 분야에 적용하기 위한 제반 요소 기술의 개발이 요구된다. 또한 전력생산이라는 본래의 기능에 디바이스의 외피 재료로서의 새로운 기능을 추가함으로써 태양전지의 설치비용 절감과 태양전지의 설치공간을 위한 별도의 공간확보가 필요 없도록 하여 경제성을 확보하기 위한 기술개발이 필요하다.

유무기 하이브리드태양전지의 빠른 기술개발의 흐름으로 볼 때 약 5년 후에는 이를 접목한 다양한 태양전지 제품이 출시될 수 있을 것으로 기대된다. 물론 상품화까지 대면적과 신뢰성 확보 등이 과제로 남아있고, 지난 몇 년 간 태양전지 시장의 지체 등이 장애물로 작용하고 있다. 하지만 2014년을 기점으로 태양광 시장이 다시 회복세에 들어서면서 제2의 성수기를 맞이할 것으로 내다보고 있다. 이런 세계 분위기에서 유무기 하이브리드태양전지 기술에 있어 원천 기술을 확보하고 낮은 재료 가격, 소자의 용액공정을 통한 공정 단순화와 유연하고 가벼운 태양전지 구현을 위한 학계와 산업계에서 지속적인 연구개발이 필요하다. 2018년 이후 유무기 하이브리드 태양전지를 대표로 하는 차세대 태양전지 시장이 DIPV 등을 중심으로 확대될 전망이며, 현재 유무기 하이브리드 태양전지의 급속한 발전 속도는 상업화에 대한 밝은 미래를 보여준다.



# 폐기물 매립장의 대안, 해상폐기물처분장

이승학 박사 NT 융합전문위원

인류가 삶을 영위하는 과정에서 폐기물(음식물쓰레기, 생활쓰레기, 건설폐기물 등)의 발생은 불가피하며, 이에 대한 적절하고 안전한 처리는 인류의 지속가능한 발전에 있어 매우 중요한 문제이다. 최근 폐기물의 재활용 기술(유기성 폐자원의 에너지화 기술 등)을 통해 폐기물 발생량을 최소화하려는 노력이 한창이지만, 발생량을 제로화하지 않는 이상 최종처분을 위한 공간은 반드시 필요하다. 우리는 지금까지 육상에 매립지를 건설하여 발생하는 폐기물을 매립해 왔으나, 현재 활용 중인 매립지의 수용량은 가까운 시일 내에 포화될 것으로 예상되며, 새로운 매립지의 건설 역시 님비(NIMBY) 현상으로 쉽지 않은 상황이다. 이에 해상폐기물처분장은 폐기물 처분과 관련된 현안을 한번에 해결하는 대안이 될 수 있다.

사실 해상처분장은 새로운 개념의 구조물이 아니다. 가까운 일본에서는 육상에 더 이상 매립장을 확보하기 어려운 상황을 고려해 1960년대 초반부터 해상폐기물처분장을 건설하기 시작하였으며 현재 동경, 요코하마, 오사카 등과 대도시에서 발생하는 생활 폐기물의 대부분을 해상폐기물처분장에 매립하고 있다. 이러한 해상 처분장은 일본 전체에 약 100개 정도 존재하며, 그 면적은 49.59 km<sup>2</sup>(계획포함)에 이르는 것으로 알려져 있다. 싱가포르에서는 남쪽 8km 해상에 350ha 면적의 처분장을 건설하여 1999년부터 매립을 시작하여 아직까지 운영 중에 있다. 하루 약 2천톤의 소각재와 불연성 폐기물을 매립하고 있으며, 매립이 완료된 후에는 낚시터, 조류관찰, 자전거 도로 및 캠핑장으로 운영할 계획이라고 한다.

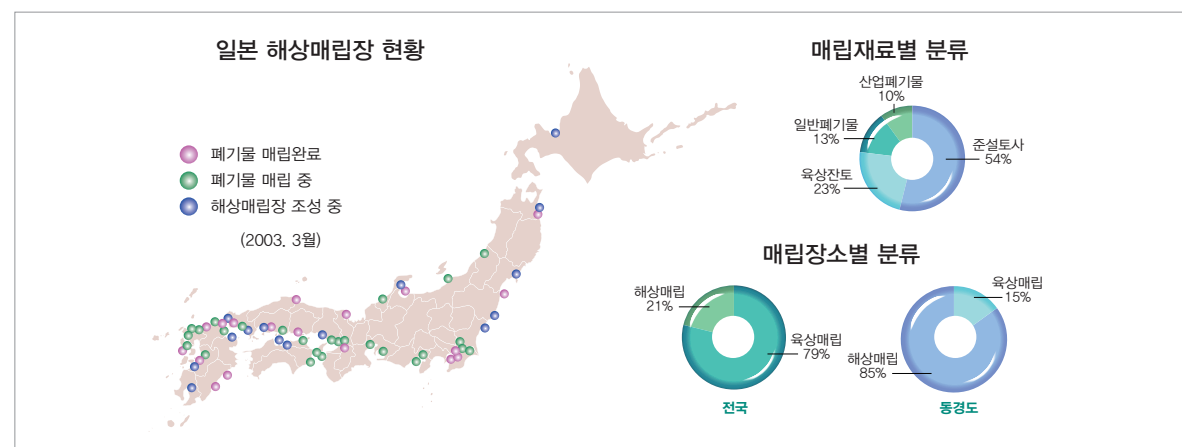


그림1 일본의 해상 폐기물 매립장 현황<sup>1)</sup>

1) 토목섬유학회지, 2011년 10월, p16~24



그림2 싱가포르 세마카우 해상처분장<sup>2)</sup>

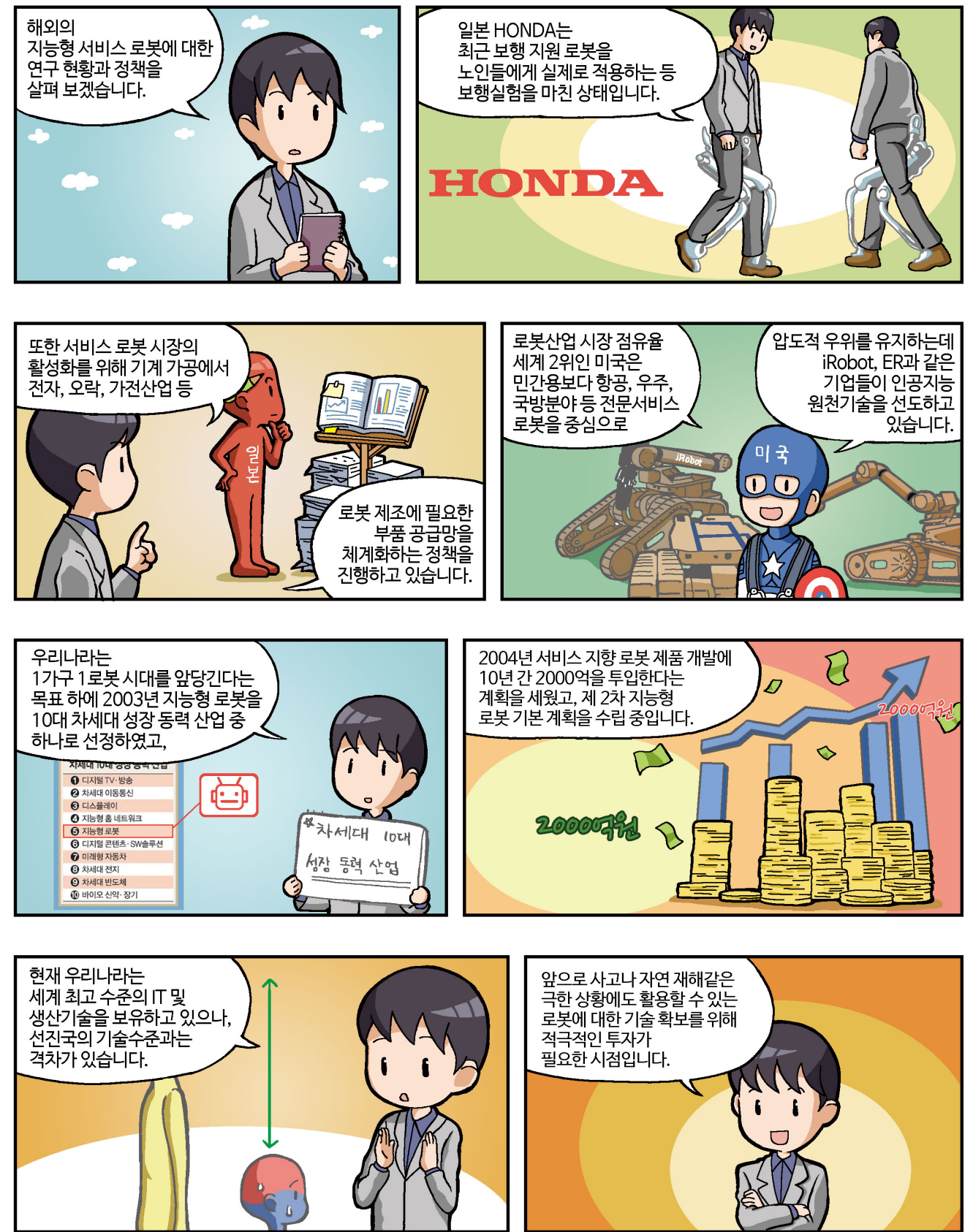
국내에서는 관련법이 체계적으로 정비되지 못한 상황과 해양 환경에 폐기물을 매립하는 행위에 대한 막연한 거부감 등으로 인해 그 필요성이 크게 대두되고 있지만, 해상폐기물처분장 조성을 위한 시도가 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 해상폐기물처분장의 성공적인 건설을 위해서는 높은 수준의 토목시공기술, 해양생태 및 환경영향평가 기술, 해상기후변화(파랑, 파도 등)에 따른 처분장의 구조적 안정성 평가기술, 육상매립대비 경제성 분석 및 매립 완료 후 새로운 해양공간으로의 활용 방안 마련 등 다양한 분야기술의 결집 및 융합이 필요하다. 뿐만 아니라 초기 해상폐기물처분장 조성 당시의 기술력으로는 불가능하였으나, 최근 개발된 재료 및 공정으로는 가능한 새로운 형태의 처분장 설계 및 시공기술 개발 역시 필요하다.

융합기술의 활용처는 늘 새롭고 화려한 산업기술 분야일 것이라는 막연한 기대감이 있었던 것이 사실이다. 하지만, 소위 고전학문으로 분류할 수 있는 토목분야 기술에서도 새로운 도전을 위하여 기술의 융합과 교류가 필요하다.

## 참고문헌

- 1) 채광석, 이상필, 오명학(2011), 해상폐기물매립장의 설계 및 시공기술, 토목섬유학회지, Vol. 10, no. 4, p16~24
- 2) 오명학, 권오순, 김건호, 채광석(2012), 해상 폐기물처분장 도입을 위한 수요 및 건설입지 분석, 대한토목학회지, Vol. 60, no.11, p40~48

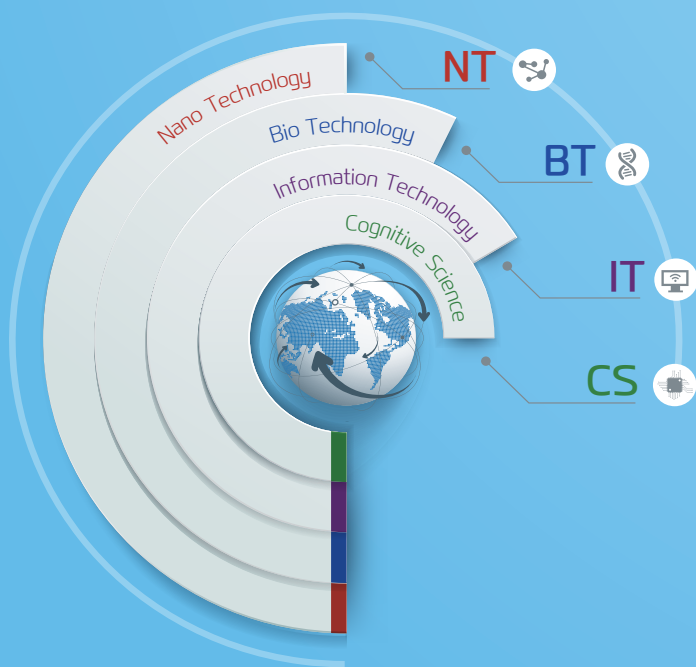
2) 대한토목학회지, 제60권 제11호 p40~48











융합연구정책센터 **CRPC**

136-791 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5 한국과학기술연구원

02-958-4986

<http://www.crpc.kist.re.kr>