

융합연구리뷰

Convergence Research Review



육류 식량안보를 위한 식품과학기술 전쟁
차세대 대체 식품기술

-

나노물질, 환경문제 해결에 뛰어들다
환경 나노기술

-

기술 중심의 R&D, 인문과의 융합을 통합 인간 중심의 R&D로 변화해 가다
인문개방형 R&D 분야

목차

융합연구리뷰 | Convergence Research Review
2016 April vol.2 no.4

03 편집자주

육류 식량안보를 위한 식품과학기술 전쟁

04 (리뷰) 차세대 대체 식품기술

나노물질, 환경문제 해결에 뛰어들다

40 (리뷰) 환경 나노기술

기술 중심의 R&D, 인문과의 융합을 통한 인간 중심의 R&D로 변화해 가다

78 (위클리팁) 디지털 교육 기술 동향

88 (위클리팁) 가상현실 기술시장 및 투자 동향



발행일 2016년 4월 4일

발행인 하성도

발행처 한국과학기술연구원 융합연구정책센터
02792 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5
tel. 02-958-4984 | <http://crpc.kist.re.kr>

편집 (주)디자인플럼 tel. 051-202-9201



| 편집자주 |

육류 식량안보를 위한 식품과학기술 전쟁 차세대 육류 대체 식품 기술

과학기술이 발달해 나감으로 인해 인간의 수명이 증가되고, 그러한 과학기술이 전세계적으로 보급되기 시작하면서 인구는 급속하게 증가하고 있다. 현재 70억명인 전세계 인구가 20년 내에는 90억명에 이를 것이라는 전망이 여러 기관에서 보고되고 있다. 이에 주요 국가들은 식량안보를 국가의 핵심 아젠다로 삼고 연구개발 및 정책 연구에 많은 노력을 쏟고 있다. 이러한 시대적 흐름과 함께 육류 식품 가공에서 발생하는 온난화 가스 발생량이 상당하다는 연구결과들로 인하여 기후변화 대책 마련의 움직임으로 새로운 방식의 육류 식품 가공에 대한 연구개발이 이루어지기 시작하였다. 그 결과 줄기세포 기반의 쇠고기 패티, 계란과 같은 성분과 맛을 내는 인공 식품, 곤충을 활용한 육류 대체 식품 개발이 우리 나라를 제외한 전세계 주요 국가에서는 활발히 이루어지고 있다.

이에 이번 호의 1부에서는 현재의 육류 식품을 대체할 수 있는 차세대 육류 대체 식품 개발의 필요성과 연구 동향, 연구 방향 등을 소개하며, 큰 시장규모에 비하여 있지만 상대적으로는 국내에서 관심을 덜 받고 있는 육류 대체 식품 분야에서의 활발한 융합연구가 이루어져, 향후 미래 식품 분야에서 우리나라가 주도권을 잡아갈 수 있는 기를 기대해 본다.

나노물질, 환경문제 해결에 뛰어든다 환경 나노물질

21세기 사회의 급변화에는 나노기술의 발전이 있다. 나노기술의 발전에 의해 ICT의 급속한 발전이 이루어졌고, 이제는 환경 분야에도 적용이 되고 있다. 다양한 방식의 나노 물질은 환경 오염 문제를 해결하는 데에 활용될 수 있다는 보고들이 이어지고 있기 때문이다. 하지만 아직 나노 물질이 인체나 전체 환경에는 어떠한 영향을 끼치는지에 대한 영향 분석은 미미한 상황이라 추가적인 연구개발이 필요하다.

이번 호의 2부에서는 환경분야의 새로운 해법으로 많은 연구가 이루어지고 있는 나노물질과 관련된 연구 동향 및 연구 방향, 향후 활용 분야 등에 대해 알아봄으로써, 나노-환경 분야의 융합연구가 활발히 이루어짐과 함께 다른 분야와 나노 물질간의 융합연구의 활성화가 이루어져 나노기술 분야에서의 대한민국의 위상이 확고해 지는 기회가 되기를 기대해 본다.

기술 중심의 R&D, 인문과 융합을 통한 인간 중심의 R&D로 변화해 가다 디지털 교육 기술, 스마트 인터랙션 기술

기술간의 융합이 당연시 되는 시대로 접어들면서, 융합의 방향은 이제 과학기술을 넘어 인문사회 분야로 그 범위를 넓혀가고 있다. 실제로 날로 복잡해져가는 사회적 문제를 해결을 위해서는 분야간의 융합이 점점 필요해지고 있고, 특히 기술과 인문사회분야와의 융합이 점점 더 중요해 질것이라는 데 있어 많은 이들이 동의하고 있다. 이에 정부차원에서도 인문사회분야와 과학기술분야간의 융복합을 통해 사회의 문제를 해결하거나 새로운 사회 원동력을 발굴하고자 하는 연구개발사업이 기획 추진 중에 있다.

이에 이번 호의 3부에서는 인문사회분야와 과학기술분야의 융합이 이미 시도되고 있는 디지털교육 기술과 스마트 인터랙션 기술에 대한 연구 동향 및 향후 방향에 대해 살펴보고, 향후 추진되는 과학기술 인문 융합형 연구개발사업에 많은 연구자들이 적극적으로 참여하기를 기대해 본다.

미래 식품의 대체 기술 동향: 배양육, 인공계란과 식용곤충을 중심으로

✉ 한국식품연구원 바이오공정연구단장 맹진수 (maengjs@kfri.re.kr)



서론

국제연합식량농업기구(FAO)의 보고에 의하면 세계 인구는 2016년 현재 74억명에서 2050년에 92억명으로 증가할 것으로 전망하고 있으나 온난화와 같은 지구의 이상기후로 인해 작물의 수확량이 감소될 것으로 예상하고 있어 식량안보(food security)가 중요한 이슈로 대두되고 있다. 아울러 그림 1에서와 보는 바와 같이, 이 보고서에서는 2050년의 동물유래 식품의 수요가 5.5억톤으로 지금의 2배에 도달할 것이라 예측하고 있다.

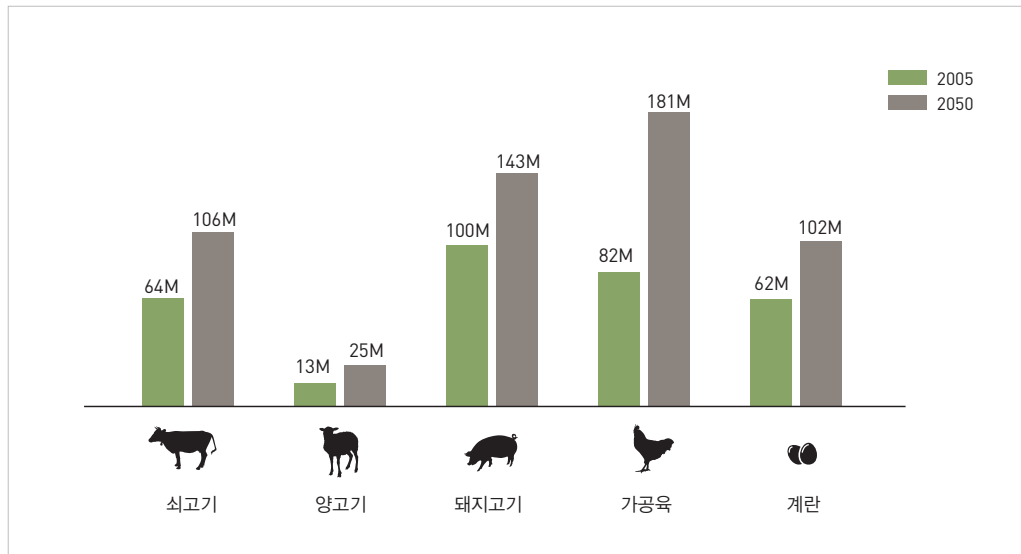


그림 1. 세계 육류 소비량의 2005년 대비 2050년 육류별 증가 예상치 비교 (출처 : FAO, Agricultural Development Economics Division, ESA Working paper No. 12-03, p. 131, (2012))

또한 사료용 곡물의 수요가 늘어 생산비가 오르게 되며 생산면적이 줄어들게 되어(그림 2) 축산물이 식량자원으로는 고가의 먹거리가 될 것으로 보고 있어서 미래의 식량 확보를 위한 미래 식품 대체기술 개발의 중요성이 부각되고 있다.

이러한 이유로 미래식품으로서 여러 가지 다양한 먹거리를 발굴하거나 경제성이 있는 생산방법을 모색하여야 하는데 현재까지 우유, 육류, 계란, 즉, 동물유래 식품은 영양학적으로나 농업 생산 구조에서 도외시할 수 없는 다음과 같은 중요한 이유가 있었다. 가축은 인간이 먹을 수

없거나 먹기 불편한 생물에너지 자원을 우유, 육류, 계란과 같은 식량자원으로 전환하는 역할을 하지만 돼지나 가금류를 위한 곡물 사료와 같이 인류를 위한 식량을 두고 경쟁 관계에 있다는 문제점이 있다. 현재 가축 자체가 세계의 식량 에너지의 13%를 조달하지만 세계 곡물 생산의 절반을 소비하기도 한다. 그러나 동물유래 식품이 영양확보(nutrition security)에 직접적으로 공헌하고 있다고 말할 수 있다. 동물유래 식품은 에너지와 생산 측면에서는 고가이긴 하나, 인간의 정상적인 성장과 건강에 필수적인 양질의 단백질과 미량영양소의 최상 공급원이기 때문이다². 따라서 식량으로서 이를 완전히 대신할 수 있는 작물과 같은 대체식량보다는 동물유래 식품에 기반을 둔 미래식품 대체식량을 개발하여야 할 필요가 있으며 이러한 이유로 동물유래 식품을 모방한 배양육이나 곤충식량의 미래식품 대체기술이 주목받고 있고 이 글에서는 이에 대한 내용으로 주로 기술하고자 한다.

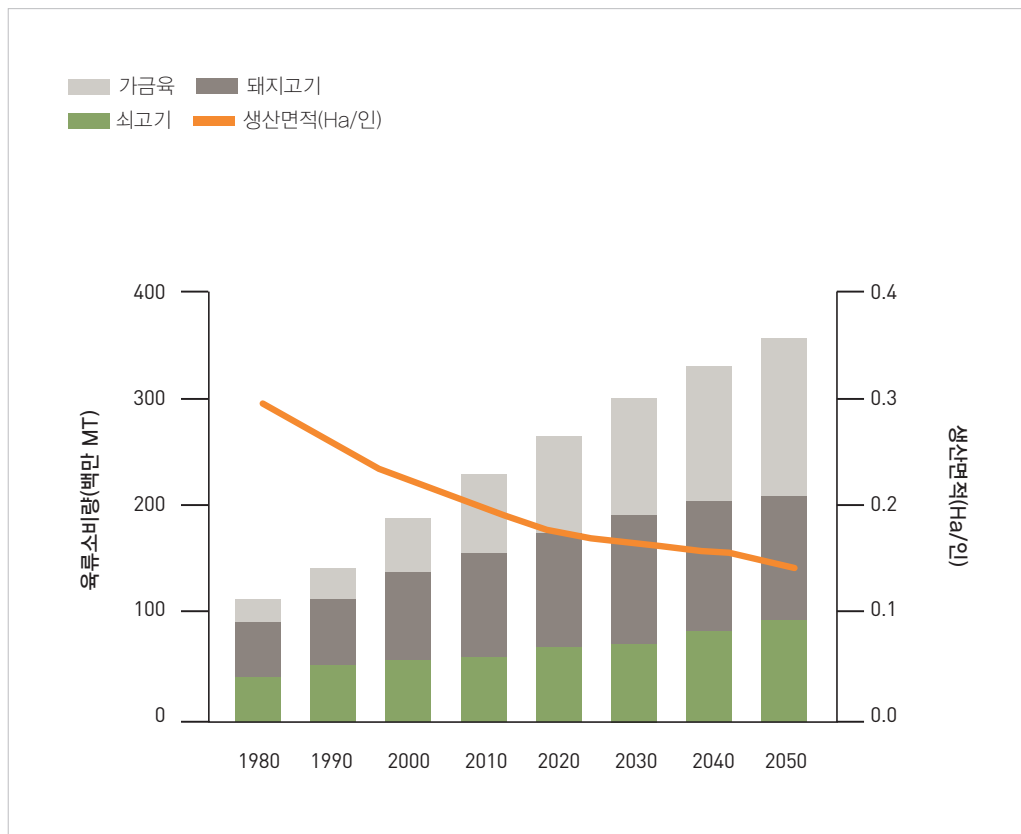


그림 2. 세계 육류 소비량의 2050년까지 증가와 생산면적 감소 (출처 : Global Insight Demand Analysis to 2050; Bauman and Capper (2011) Southwest Nutrition and Management Conference, Tempe, AZ)



미래식량 확보를 위한 대체기술

1) 배양육: 첨단 생명공학기술과 생명 중시 정서가 결합된 이상적인 미래식량?

(1) 배양육의 정의

미래의 육류 부족 문제를 해결하기 위한 방안으로 최근 ‘배양육(培養肉, In vitro meat, In vitro caro, cultured meat, victimless meat, tubesteak, frankenmeat, shmeat 또는 test-tube meat)’ 이 주목 받고 있다. 배양육이란 가축을 사육하는 과정을 거치지 않고, 연구실에서 살아 있는 동물의 세포를 배양하여 세포공학기술로 세포증식을 통해 얻게 되는 식용고기를 의미한다. 배양육은 아직은 본격적인 상업적 생산을 하지 않으며 현재 몇몇 연구와 프로젝트에서 실험적으로 체외 고기 생산기술을 개발하고 있다. 배양육은 세포공학기술을 이용하여 가축의 세포를 배양함으로써 사육을 하지 않고 고기를 생산하는 기술이며 동물애호가들의 염원이면서 환경오염을 줄이는 이상적인 식량생산을 위한 대체기술이다.



그림 3. 배양육의 제조 과정 모식도 (출처 : Lab-grown burgers will be on the menu by 2020, 16 October 2015, <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-3275913>)

배양육 생산은 세포공학기술 중에서 조직배양기술(tissue engineering)을 이용하는데 세포는 살아있는 동물로부터 얻지만 고통 없이 확보한 후, 줄기세포를 배양하는 방법을 이용한다(그림 3). 이 세포는 동물의 성체가 없이 적절한 조건 속에서 배양되어 증식하고 안전이 확보되는 통제가 가능한 조건에서 신속히 자란다. 이론적으로 이 과정은 에너지만 있으면 지구촌 인구를 다 먹일 수 있을 정도의 대량 배양이 가능하다. 이러한 과정은 세포의 유전자를 조작하지 않고도 배양이 가능하다. 햄버거 고기는 앞으로 가장 먼저 배양육으로 사용될 것으로 보인다³. 2013년 초기 개발 당시에는 햄버거 패티 1개를 만드는 데 무려 32만 5천 달러가 투입되었다. 하지만 현재는 100g에 8달러 수준으로 생산비용이 크게 낮아졌다. 또한 근육질, 기름, 뼈 등을 배양육과 혼합하면서 실제 고기와 같은 맛을 내기 위한 연구도 활발히 진행 중이다. 배양육은 인류의 식량 부족 문제뿐만 아니라 축산업이 낳는 각종 환경오염 문제도 해결해 줄 것으로 기대된다. 에너지 소비 측면에서 기존의 사육의 경우에 비해 55%의 에너지를 소비하여 동일한 크기의 배양육을 얻을 수 있으며 온실가스 배출량은 4%, 토지 사용량은 1% 수준까지 낮출 수 있다(그림 4).

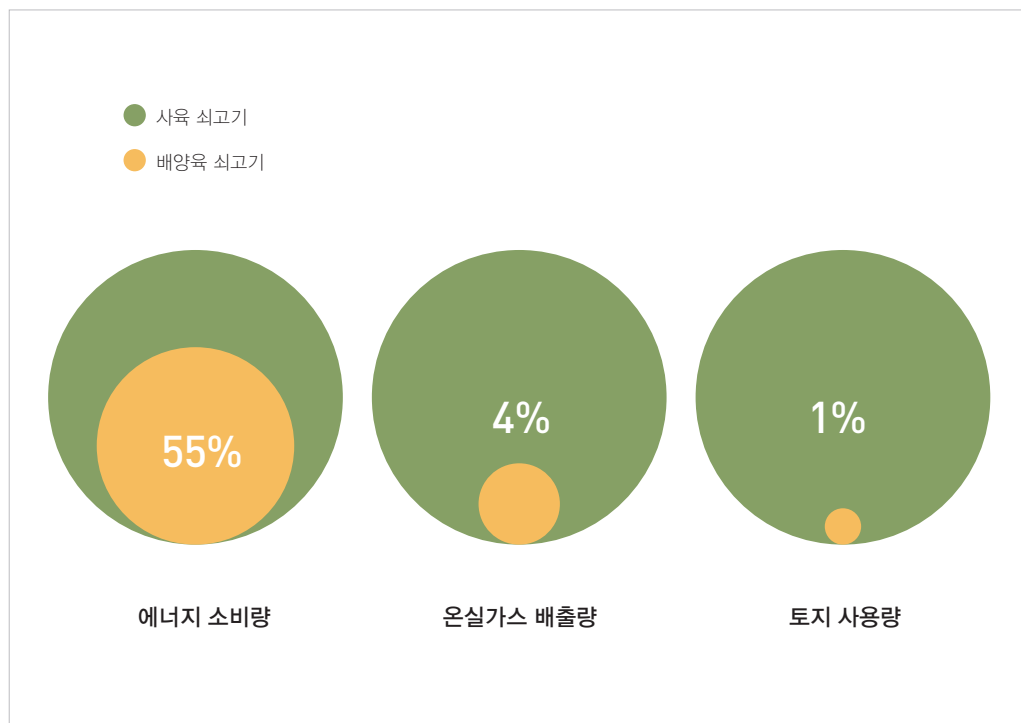


그림 4. 배양육 생산에서 경제성 비교 (출처: Environmental Impacts of Cultured Meat Production, Tuomisto H. L., Environ. Sci. Technol. 2011, 45(14): 6117-23)

(2) 배양육의 역사

배양육에 대한 아이디어는 상당히 오래전에 제기됐다. 1932년 영국의 윈스턴 처칠(Winston Churchill) 총리는 '50년 후의 세계(Fifty Years Hence)' 라는 책에서 '50년 후에는 닭의 가슴살이나 날개만을 먹기 위해 닭을 기르지 않아도 될 것이다. 대신 우리는 적절한 조건에서 닭의 한 부위만 별도로 배양할 수 있는 능력을 가지게 될 것이다' 라고 하였다. 1999년 '배양육의 대부' 로 불리는 네덜란드 암스테르담 대학교의 빌렘 반 엘런(Willem van Eelen) 박사가 배양육에 대한 이론으로 국제 특허를 획득한 후, 2002년 금붕어에서 유래한 근육조직을 실험실의 펠트리접시에서 배양시키는 것을 성공하였다.

미항공우주국(NASA)은 우주선에서의 장기 식품 개선책을 마련하고 우주비행사에게 단백질을 공급하기 위하여 연구를 시작했으며, 미국 배양육 연구자들은 미국 식품의약품안전청인 FDA로부터 1995년에 배양육 사용을 승인받기도 하였다. NASA는 2001년부터 우주선에서 칠면조 고기를 배양, 실험하였고 식용이 가능한 첫 번째 배양육은 2002년에 NSR/Touro Applied BioScience Research Consortium에 의해 생산된 것으로 여기에 사용된 금붕어 세포는 생선 필레와 유사한 크기만큼 키웠다.

2001년 네덜란드 암스테르담(Amsterdam) 대학교의 피부과 의사 비테 베스터호프(Wiete Westerhof)는 의사 빌렘 반 엘런, 사업가 빌렘 반 쿠텐(Willem van Kooten)과 공동으로 배양육 특허를 신청해서 획득하였다. 이들은 2007년, 근육세포를 접종하여 콜라겐 매트릭스를 형성하고 영양성분 용액으로 배양하여 세포분열을 유도하는 기술을 개발하였으며 암스테르담의 연구팀은 배양을 위한 배지를, 네덜란드의 위트레흐트(Utrecht) 대학교 연구팀은 근육세포 증식 기술을, 아인트호벤대학교(Eindhoven University of Technology) 연구팀은 바이오리액터를 이용하는 연구를 수행하였다. 2003년 미국의 하바드 의과대학의 오론 카츠(Oron Catts)와 이오나트 주르(Ionat Zurr)는 개구리 줄기세포로부터 배양한 요리하여 시식 가능한 몇 센티미터 넓이의 배양육 스테이크를 선보였다(그림 5). 2005년에 실험실 배양육을 주제로 한 학술논문이 조직배양학술지(Tissue Engineering)에 최초로 게재되었다.

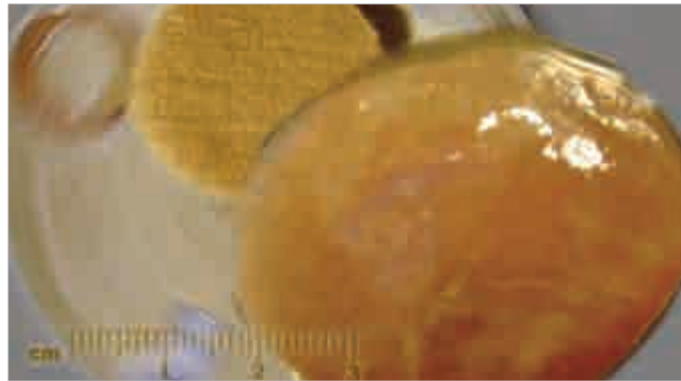


그림 5. 인공 스테이크: Oron Catts의 조직배양기술로 생산된 배양육 (출처: In-vitro meat unlikely to become reliable food source, Andrew Masterson, July 2, 2014 (<http://www.smh.com.au/technology>))

2008년 세계동물보호단체(PETA, People for the Ethical Treatment of Animals)는 2012년까지 소비자용 배양육 닭고기를 만들면 그 회사에 1백만 달러 상을 제공한다고 발표하였다. 네덜란드 정부는 배양육 연구에 4백만 달러 예산을 지원하였다. 세계 배양육 컨소시엄은 노르웨이 식품연구소 후원으로 2008년 4월에 첫 번째 국제회의를 개최하였다. 타임 잡지는 배양육 생산을 2009년의 혁명적 아이디어 50개중 하나로 선정하였다. 2009년 11월 네덜란드의 과학자들은 살아있는 돼지로부터 세포를 추출하여 배양육의 생산이 가능했다고 발표하였다. 2012년에는 전 세계의 30개 연구실이 배양육 연구를 수행한다고 발표하였다.

2013년 8월 마스트리트(Maastricht) 대학교의 마크 포스트(Mark Post) 교수팀은 네덜란드 정부의 4백만 달러 규모의 연구지원금을 받아서 런던의 학회에서 소의 줄기세포에서 근육조직을 배양하여 세계 최초의 실험실 배양 버거를 만들고 요리와 시식을 함으로써 본격적으로 일반 대중에게 알려지기 시작했다(그림 6). 네덜란드 정부의 지원금이 소진되고 나자 구글의 공동 설립자인 세르게이 브린(Sergei Brin)과 같은 민간인들의 기부로 프로젝트 자금이 마련됐다. 세르게이 브린은 ‘가축이 사육되는 환경에 불편함을 느낀다’며 25만 유로를 기부했다.



그림 6. 2013년 런던에서 마크 포스트 교수가 제시한 세계 최초의 실험실 배양육 (출처: The Problem with Making Meat in a Factory, Carolyn Mattick et al, Sep 28, 2015, <http://www.slate.com/articles/technology>)

(3) 배양육의 특성과 기술

배양육이 갖는 장점은 다음과 같이 정리할 수 있다. (1) 건강기능성이 우수한 육류 생산 가능 (healthier and functional by manipulating); 배지 조성 and 배양조건을 조절하여 지방이나 지방산의 함량을 조절하거나 건강에 해로운 포화지방산을 오메가-3와 같은 좋은 지방으로 교체하는 것이 가능(그림 7), (2) 동물의 생명과 생육 환경 보호(animal welfare); 가축 집단 사육으로 인한 열악한 생존 환경의 감소와 도살이 줄어들어 동물의 삶의 질 향상, (3) 생산 소요 자원과 생태 점유면적 감소(reduction in resource use & ecological footprint), (4) 생산기간 단축(quick production); 실험실 조건에서 6주 내에 육류 제조 가능, (5) 영양분과 에너지의 효율적 전환(efficient nutrient and energy conversion); 인위적인 배양 환경 조절에 의해 동물의 자체 활동으로 소모되는 영양분과 에너지의 소실이 없어짐, (6) 채식주의의 식단(vegan meat)으로 배양육의 수요가 확장될 가능성이 있음, (7) 희귀하거나 이국적인 육류 생산(availability of exotic meat) 가능; 희귀하거나 일반적으로 알려지지 않은 육류에 대한 소비 창출이 가능, (8) 삼림과 생태계 회복(reforestation and wild life); 가축 사육에 소요되는 대지의 감소로 야생으로의 삼림회복이 가능, (9) 종교적 제한 식품으로 적용(minimizes the religious taboos in food); 도살된 육류가 아니어서 시크교(Jhatka), 유대인 그리고 할랄(Halal)과 같은 종교적 기피 조건이 적용되지 않는 육류식품에 적용 가능, (10) 독성물질 오염이나 식중독 감소(reduction of meat contamination and incidence of food borne disease); 배양생산 과정 제어가 가능하여 독소나 병원균의 접촉을 차단하여 안전한 육류 생산 가능.

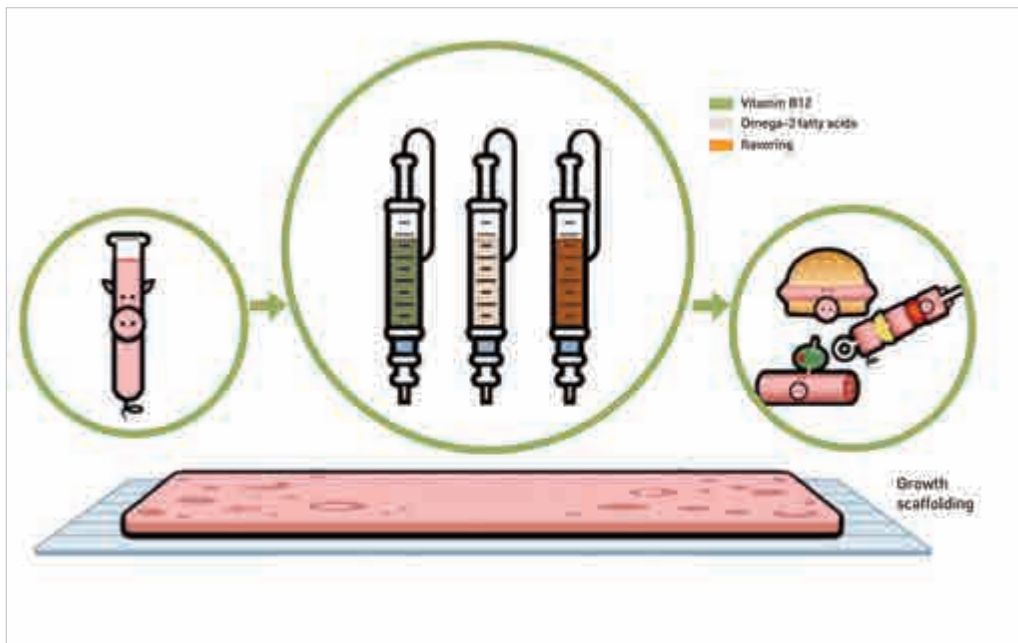


그림 7. 소량의 돼지 줄기세포(좌)로부터 배양하면서 비타민, 지방산, 향미 등을 첨가하여 배양육을 생산하는 모식도 (출처: Stem-Cell Fast Food: From NASA to Nourish, Ian Christie, Sep 30, 2009, <http://www.popularmechanics.com/science/health>)

이러한 장점과 더불어 예상되는 것은 앞으로 10년 이내에 소시지는 축산 육류로부터 보다는 배양육으로부터 만들어질 것이며 아울러 배양육이 상용화되었을 때, 또한 두 가지 관점이 대두될 것이다. 인간은 식량자원으로서 가축의 열악한 생육환경 문제가 바람직하게 개선되는 것과 가축 그 자신이 인간의 소유와 간섭으로부터 해방되어야 하는 당위성에 대한 것이다.

배양육의 극복해야 할 한계와 문제점으로 들 수 있는 것으로는, (1) 육류에 대한 사실감 결여(reality of meat), (2) 개인에 따른 맛과 질감의 차이(taste and texture can be different), (3) 가공물에 대한 심리적 혐오감(yuck factor; psychological no acceptance), (4) 이물질의 오염 우려(danger; contamination), (5) 그릇된 도덕적 선입견(wrong moral motivations; moral permissibility), (6) 비자연스러움(unnaturalness)과 신뢰성(animal integrity)의 결여, (7) 식용동물의 생명에 대한 가치 논란(the lives of food animals are better than nothing); 도축되는 가축이라도 탄생되는 생명이 나은 것인지 아니면 번식의 감소로 가축의 생명 탄생이 억제되는 것이 나은 지에 대한 생명윤리에 관련된 논란의 여지 등이 있다.

이상으로부터 배양육의 장점과 특징은 (1) 지속가능하며 안전한 시스템(sustainable and safer system), (2) 질감, 조성 그리고 향미의 조절이 가능, (3) 식중독 질병의 제어가 가능, (4) 가축의 열악한 생존 조건의 감소, (5) 배양육 생산은 상업적으로 아직 가능한 수준에 도달하지는 못함으로 요약할 수 있다.

배양육 생산기술로는 식용육의 대부분은 골격근으로 구성되어 있어서 골격근 조직배양(skeletal muscle tissue engineering)을 위한 기술들로부터 발전되어 왔으며, 반 엘른(van Eelen), 반 쿠텐(van Kooten) 그리고 베스트호프(Westerhof)가 개발한 '지지체 기반 기술(scaffold based techniques)(그림 8)' 과 벤자민슨(Benjaminson), 길크리스트(Gilchrist) 그리고 로렌즈(Lorenz)에 의해 개발된 '자기 조직 기술(self organizing techniques)' 의 두 가지가 있다.

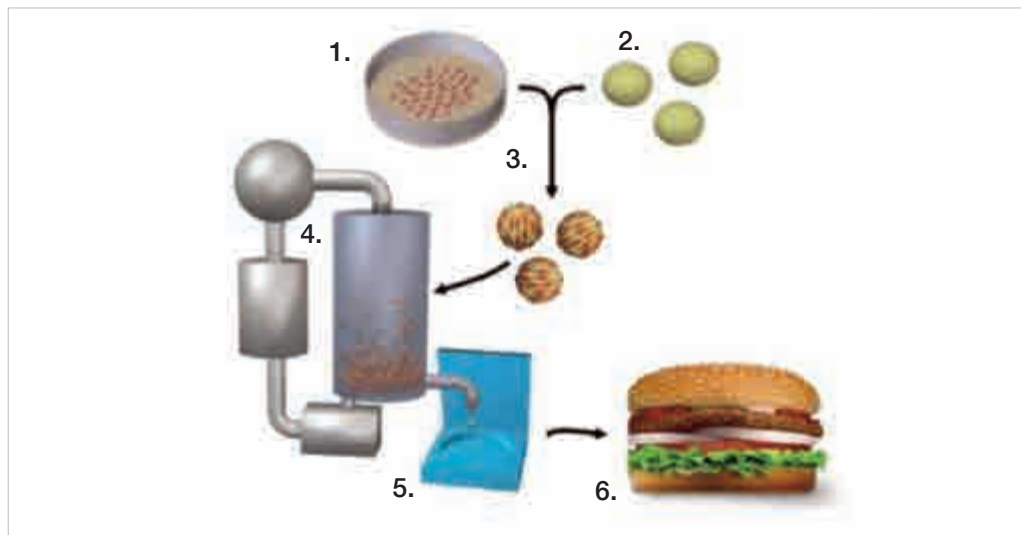


그림 8. 지지체 기반 배양육 생산. 1. 페트리 접시 내의 근아세포; 2. 다공질의 콜라겐 미세구; 3. 콜라겐 미세구 상에 근관세포를 형성하는 근아세포; 4. 바이오리액터; 5. 초음파 처리; 6. 햄버거 (출처: In vitro cultured meat production, Edelman PD et al, Tissue Eng. 2005, 11(5-6): 659-62)

배양육은 최근 주목받고 있는 혁신기술의 하나인 3D 프린팅 기술과 결합하는 경향을 보이고 있다⁶. 영양성분 뿐만 아니라 모양과 질감을 기존 육류와 유사하게 제조하여 완벽에 가까운 인공 육류를 만들고자 하는 목적이 부합된 조합이라고 할 수 있다. 그래서 인공 육류를 포함한 인조 식품 제조용 식품3D프린팅 기술에 대하여 간략히 기술하고자 한다.

독일의 Biozoon社は 식품3D프린터로 출력한 젤리 형태의 일명 ‘Smoothfood’ 라고 불리는 제품들을 소개하였다. 일견, 레스토랑에서 나오는 스테이크, 브로콜리, 으깬 감자 같아 보이지만 이들은 모두 3D프린터로 제작한 제품이다. 관상용이 아니며 실제로 먹을 수 있고 영양소도 충분히 들어 있다. 다만 다른 점은 실제 식감과는 다른 ‘젤리’ 형태라는 것이다. 이 제품들은 사실 음식이 식도를 통과하다가 지체되거나 중간에 걸려 더 이상 내려가지 않는 종류의 식사 장애가 있는 연하장애(嚥下障礙, dysphagia) 증상의 환자, 그리고 치아가 약해 음식을 씹기 힘든 저작장애(咀嚼障礙, masticatory disturbance dysmascsis, Kaustörung)가 있는 노령층을 위해 만들어진 특수 식품이다. 기존에는 액체 형태나 분말가루 형식으로 영양소만을 주입하는 형식의 치료가 이루어졌지만 먹음직스러운 음식 외형과 식감을 살리지 못했고 환자들은 식사 즐거움을 느끼지 못하는 부작용이 있었다. 하지만 해당 제품들은 완벽하지는 않지만 가능한 식감을 살렸고 먹음직스러운 외형을 갖추어 환자들에게 거부감이 낮은 효과가 있다. 특히 젤리 형태로 부드러운 음식을 씹거나 소화함에 있어서 큰 문제를 야기하지 않는다. 유럽의 일류 셰프인 Markus Biedermann과 Herbert Thills가 참여한 Smoothfood는 각종 영양소가 함유된 채소, 찜 음식을 잘게 썬 다음 합치는 방식으로 제조된다. 그리고 이 합성 음식을 프린터에 주입해 출력해 낸다(그림 9).

이 제품들은 식품3D프린터로 출력 직후 즉시 냉동 보관하며 필요 시 전자렌지로 해동하여 바로 섭취할 수 있다. Biozoon사의 해당 제품들은 EU로부터 300만 유로(약 43억원)의 개발지원금을 받아 진행된 ‘노년층을 위한 개인 영양식’ 프로젝트의 결과물이다.

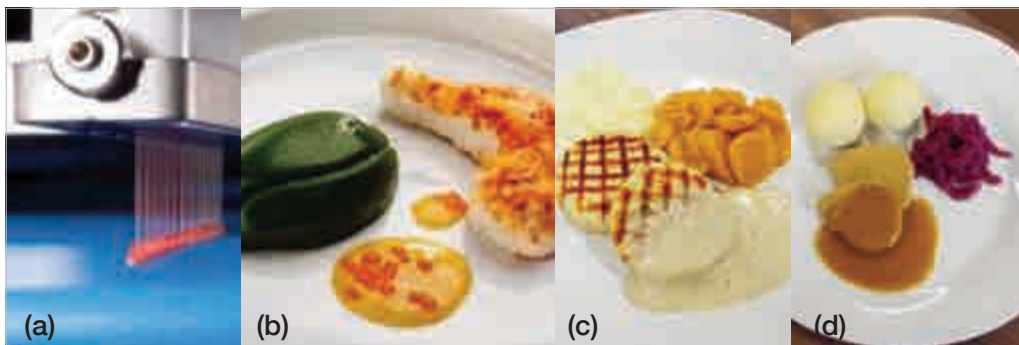


그림 9. Biozoon사 식품3D프린터의 노즐(a)과 Smoothfood 제품들(b,c,d) (출처: New Details Emerge On Biozoon's 3D Printed SmoothFood. May 29, 2014, <http://3dprint.com>)

(4) 배양육의 기술 개발과 산업 동향

배양육 기술은 친환경적이며 열악한 동물 사육 환경과 도축 없이 인류의 육류 소비를 담당할 수 있고 또한 축산 농가를 부유하게 만들 수 있다. 2050년까지 25억명의 인구 증가에 육류 소비가 2배 이상 증가하게 되고 이를 충족시키기 위해서는 현재의 지구 땅 75%를 사용하여야만 한다고 예측되고 있다. 또한 축산 산업 역시 경제성이 낮아지고 있는 추세인데 15% 육류 생산을 위해서는 100g의 채소 단백질을 소비하여야 해서 경제적이지 못하다.

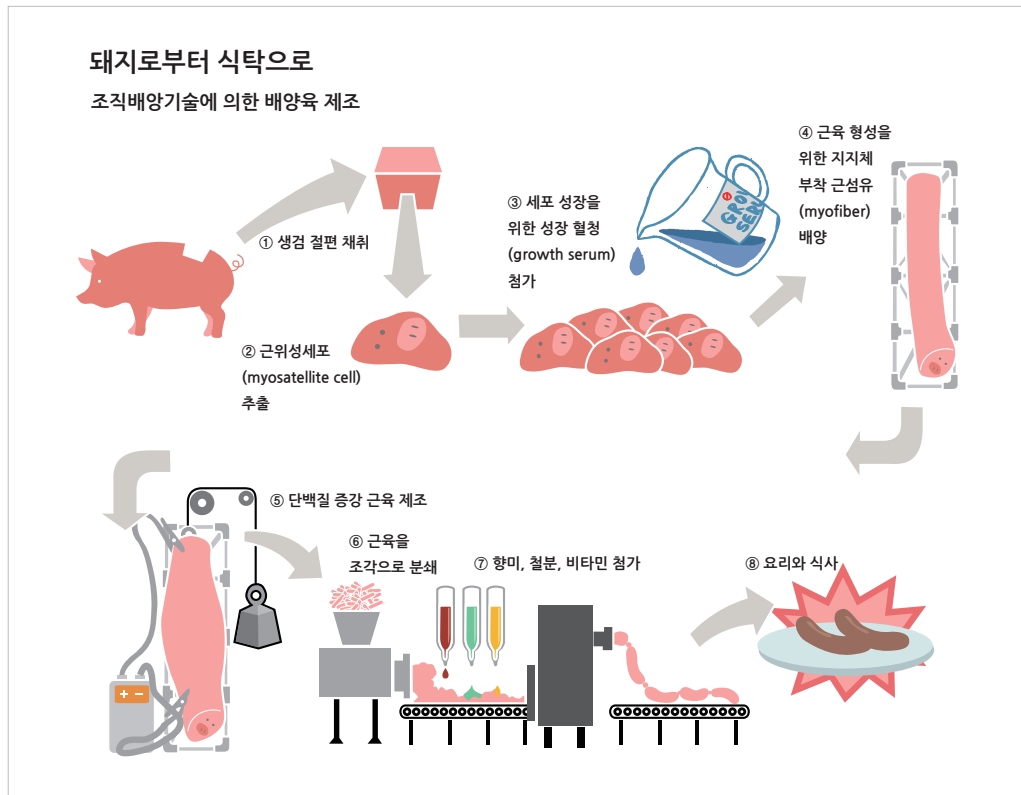


그림 10. 돼지로부터 배양육 음식을 제조하는 과정 (출처: Food: A taste of things to come? Nicola Jones, 2010, Nature 468: 752-3)

이러한 관점에서 배양육 생산은 산업적으로 경제성이 있어 미래 식량 대체 기술의 유망한 후보이다. 첨단 생명공학기술인 줄기세포 기술의 발전으로 줄기세포에 단순히 당분, 단백질 등 영양분으로 첨가하여 육류 세포를 대량 배양하여 생산할 수 있다. 이렇게 1개의 줄기세포로 수천만 톤의 배양육을 만들 수 있고, 배양육의 제조 시 특별히 더 영양분이 많도록 하거나 특정 비타민을 더 섞을 수 있고 맛이 향상된 육류를 만들 수도 있다(그림 10). 배양육 배양을 위한 배지

성분의 원료로 스피룰리나(Spirulina)와 같은 미세조류(微細藻類)를 주로 사용하는데 이 미세조류는 단백질이 70%여서 영양분으로서 줄기세포를 배양하는 데 효율적인 역할을 한다.

네덜란드 마스트리트대학교 마크 포스트 교수는 배양육의 맛을 증진시키기 위해 근섬유 이외에 기름, 뼈, 피, 등을 생산하는 연구도 병행하고 있다. 이렇게 하여 실제 육류처럼 만들 수 있지만 생산비가 많이 들기 때문에 현재로서는 근섬유질만 생산하는 방식이 일반적이다. 마크 포스트 교수는 2012-3년경에 햄버거와 소시지를 대량 생산할 것이라고 밝혔고 실제 25만 유로 짜리 햄버거를 만든다고 하였다. 배양육은 현재 비싸지만 비용이 점차 저렴해지면서 생산성이 있어지는 해를 2020년으로 보고 있다. 그 이유는 지구의 인구가 20억명 증가하고 육류소비는 2-4배 이상 증가하기 때문이다. 땅의 75%를 이미 축산업 분야가 사용하고 있으며 기후변화 원인인 CO₂의 38%가 축산업 분야에서 배출되고 있기 때문이다. 배양육은 1% 땅에 2%의 물만 사용하고 98% CO₂ 배출이 절감된다(그림 11). 39%의 축산 농가가 차지하는 온실가스를 제거하고, 친환경적이며 실험실에서 줄기세포를 가지고 고기를 배양하여 단백질을 제공할 수 있다.

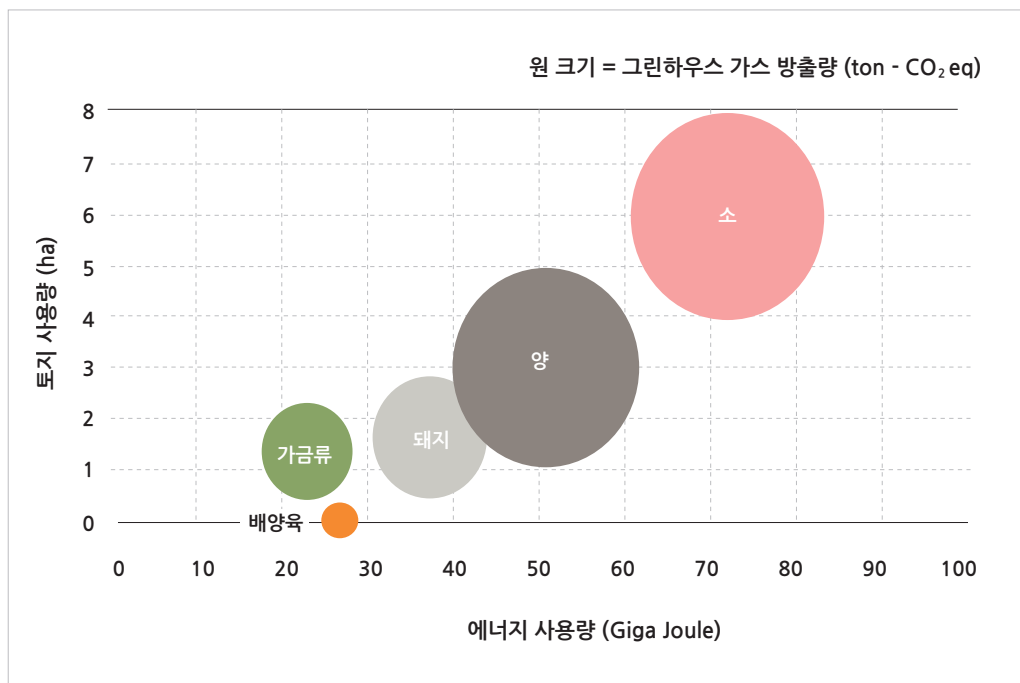


그림 11. 배양육과 축산 육류 1톤 생산 시 환경 영향 (출처: Life cycle assessment of cultured meat production, Tuomisto H. L, et al. 7th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector, 22-24 Sep 2010.)

가축들이 인간의 식탁에 오르게 되는 대신 지구촌에서 다른 역할을 할 수 있게 해주어야 한다. 즉 해충과 같은 천적 먹이를 더 많이 먹어치워서 살충제 소비가 줄어든다거나 하는 잇점을 기대할 수도 있다. 마크 포스트 교수는 우리가 슈퍼마켓에 가서 가축 고기와 배양육을 선택하게 되는 경우, 현재는 배양육에 대한 거부감(yuck)이 존재하지만, 20년 후에는 배양육은 동물을 도축한 고기가 아니고 친환경 조건에서 배양한 것이며 환경오염 감소 등의 정보를 제공하면 맛과 가격이 동일한 경우에는 신세대들은 대부분 배양육을 선택할 것이라고 주장하고 있다.

미래에 이 배양육으로부터 쇠고기, 돼지고기, 닭고기 등을 대량 생산할 수 있고 이들을 슈퍼마켓 등에서 판매할 수 있다. 이렇게 되면 우유, 치즈, 계란도 더 이상 필요가 없어지며 단백질은 대부분 이 배양육으로 대체될 것이라는 예측하고 있다. 햄버거가 처음 나왔을 때 사람들은 거부감으로 소비가 많지 않았다. 고기를 그냥 먹기보다 여러 가지 고기를 갈아서 섞은 것을 먹지 않으려 했다. 그러나 세월이 지나면서 신세대들이 햄버거 고기에 맛 들여지면서 식생활은 바뀌기 시작하였다. 이처럼 신세대들이 동물을 도축한 고기를 거부하면서 동물세포를 키워 배양시킨 고기를 먹기 시작하면 도축된 동물을 먹는 사람들이 오히려 비문명인 취급을 받는 현상이 생길 수 있다⁵.



그림 12. Bistro in Vitro 가상 레스토랑 웹사이트. (a) 홈페이지, (b) meat-fruit, (c) meat-oyster, (d) 투명한 스시, (e) meat-paint, (f) 돼지 배양육 (출처: World's First Lab-Grown Meat Restaurant, Koert van Mensvoort, Next Nature Network and Submarine Channel, www.bistro-invitro.com)

2015년 5월 네덜란드에서 Bistro in Vitro라는 가상 레스토랑 웹사이트가 개설되었는데 여기서는 육류, 생선, 육류 혼합 과일 등 여러 가지 미래형 배양육과 식품3D프린팅, 미출시된 육류 합성기(meat synthsizer), 육류 페인트(meat-paint) 등의 미래식품기술을 적용한 다양한 메

뉴를 제시하고 네티즌이 식단을 선택하면 가상으로 체험해 보게 하여 미래에 출현할 식품에 대한 선호도 데이터를 구축하고 동시에 가상 식단의 동영상으로 네티즌에게 관심을 보이게 하고 있다⁶(그림 12).

미국 LA의 Beyond Meat社나 네덜란드의 Het Planeet社는 실제 육류의 질과 유사한 식물성 단백질 원료로부터 대체 육류를 생산하고 있다. New York Times의 푸드 컬럼니스트인 마크 비트만(Mark Bittman)은 Beyond Meat사의 식물 단백질로 제조한 ‘Beyond Chicken’ 과 ‘Chicken-Free Strips’ 는 실제 닭고기와 90-95% 유사하다고 평하였다.

과학자들은 고기를 배양해서 먹는 산업이 2020년부터 부상한다고 본다. 고기를 대체할 수밖에 없는 상황이 오는 이유는 지구촌 토지사용 25%가 동물사료로 사용되고 있으며, 미국에서 재배 곡물과 곡물의 70%는 현재 농장의 동물사료로 사용되고 있기 때문이다. 빈곤 국가에서는 아사자가 늘어가고 있는데 동물에게 먹이기 위해 곡물을 사용한다는 것은 인류사회에서 모순으로 비칠 것이기 때문이다⁵.



그림 13. 식물성 단백질로 육류를 생산하는 Beyond Meat, Het Planeet와 제품들. (a), (b) Beyond Meat사의 식물성 단백질 닭고기 스트립 제품, (c) Beyond Meat사의 로고, (d) Beyond Meat사의 식물성 쇠고기 제품 ‘Beyond Beef’, (e) 네덜란드의 식물성 육류 제조사인 Het Planeet사의 로고, (f) 네덜란드의 잡초 유래 단백질로 햄버거육을 제조하는 Dutch Weedburger사의 상표와 햄버거 (출처: 100% Plant-Protein, Beyond Meat (<http://beyondmeat.com/products>), Platform Duurzame Eiwitten, Pet Planeet (<http://www.hetplaneet.nl/>))

(5) 배양육에 대한 윤리적 쟁점

배양육에 관련된 윤리적 문제는 신세대들은 동물애호가로서 동물을 도축하는 것을 반대하는 경향을 보이는 것과 연관이 있다. 네덜란드 와게닝겐(Wageningen)대학교 윤리학과와 반 데르 윌리(Cor van der Weele) 교수는 인구증가로 인해 배양육의 도래를 확신한다. '사람들은 배양육을 만들어 동물을 사육하는 비윤리적인 행태를 벗어나고 돼지를 수백만 마리 죽이는 것보다 돼지에서 줄기세포를 얻어서 배양하는 것을 더 선호할 것이며 소비자들에게 더 매력적으로 다가갈 것이다' 고 말한다.

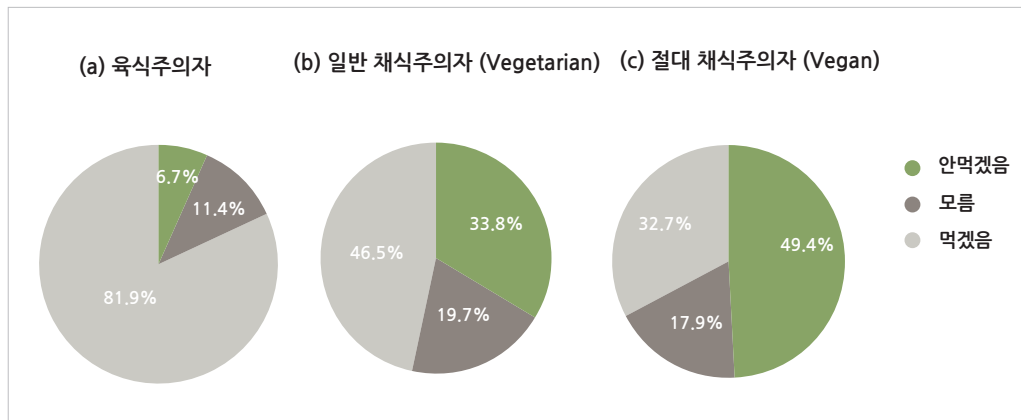


그림 14. 배양육에 대한 소비자의 선호도 분석 (출처: Would you eat lab-grown meat? The Vegan Scholar, 10 Jan 2016, <http://www.theveganscholar.com>)

채식주의자 중 일부는 이상적으로 가축과 같은 동물의 생육환경과 생존에 위협이 되는 고민거리가 배제된 배양육을 맛보고 싶어 할 것이지만 다른 일부는 익숙하지 않은 또 다른 창조물을 먹는다는 단순한 생각으로 거부감을 가지기도 한다(그림 14). 인간이 만들어낸 육류에 대한 주제에는, 과학의 창조물이 시장에서 성공하기까지는 넘어야 하는 장벽이 많다는 경험적 인식이 있는가 하면, 실험실에서 창조된 육류가 전통적 농업에 비해 에너지 효율이 높고 환경오염이 적으며 기후변화나 지구온난화를 줄일 수 있다는 낙관적이고 긍정적인 기대감이 있는 것과 같이 복잡하면서도 수많은 찬반 논리가 존재한다. 그리고 친환경주의자의 일부는 유기농 식품의 혜택을 오히려 중시하여 인공적으로 만들어진 배양육을 회의적으로 보기도 한다. 버거나 소시지 고기가 가축 육류로부터 유래한 동일한 부류의 축산식품으로 이제는 익숙하게 받아들여지고 있는 것에 반해, 실험실에서 제조된 배양육은 신선육과 색이 다르다는 점 때문에 신선미나 식욕이 적게 느껴진다는 주장도 있다. 좀더 부정적인 시각으로는, 영국의 전국농민연대(National Farmers Union)는, 인간은 이미 익숙한 육류소비 성향에 의해 앞으로도 인공 배양육보다는 육우산업에서 유래한 기존의 육류를 미래에도 소비하게 될 것이라 장담하고 있으며, 과학 자체는 유망할지는 모르지만 전통적인 쇠고기 농업은 농촌 환경과 경제에 지속적인 혜택을 제공하고 탄소배출도 줄이며 인구증가를 감당할 수 있는, 지속가능하면서도 효율적인 잠재력이 있다는 믿음을 갖고 있다.

(6) 배양육 기술의 현안문제와 미래

배양육 기술이 극복해야 할 반대 논리는 다음과 같다. 첫째, 세계에는 이미 저가 단백질이 다량 존재함: 동물의 육류에는 근육 외에도 혈액, 힘줄, 지방, 결합조직 등이 있어서 육질에 특이한 향을 내게 한다. 배양육은 육즙이 있는 와규 스테이크나 참다랑어 살의 지방 덩어리를 먹을 때 느껴지는 특이한 풍미를 결코 모사하지 못할 것이다. 그 대신 배양육은 현재 공장식 축산 농장에서 사육되어 생산된 저급 돈육이나 풍미가 없는 가금류육을 대체하는 수준이다. 만약 친환경적이며 무난한 특성의 단백질을 생산하기에는 충분하다고 할 수 있다. 또한 지구상에는 밀가루, 콩, 아마란스 같은 곡류, 전복, 소라, 고등과 같은 복족류 조개, 식용곤충 등의 다양하고 다량의 단백질 자원이 존재한다. 그러나 머지않아 생명공학과 조직배양기술의 발달로 특수한 육류도 재현이 가능하고 상대적으로 경제적인 단백질 생산을 위한 배양육 기술의 발전이 이루어질 것으로 보아 이것은 극복될 것으로 본다.

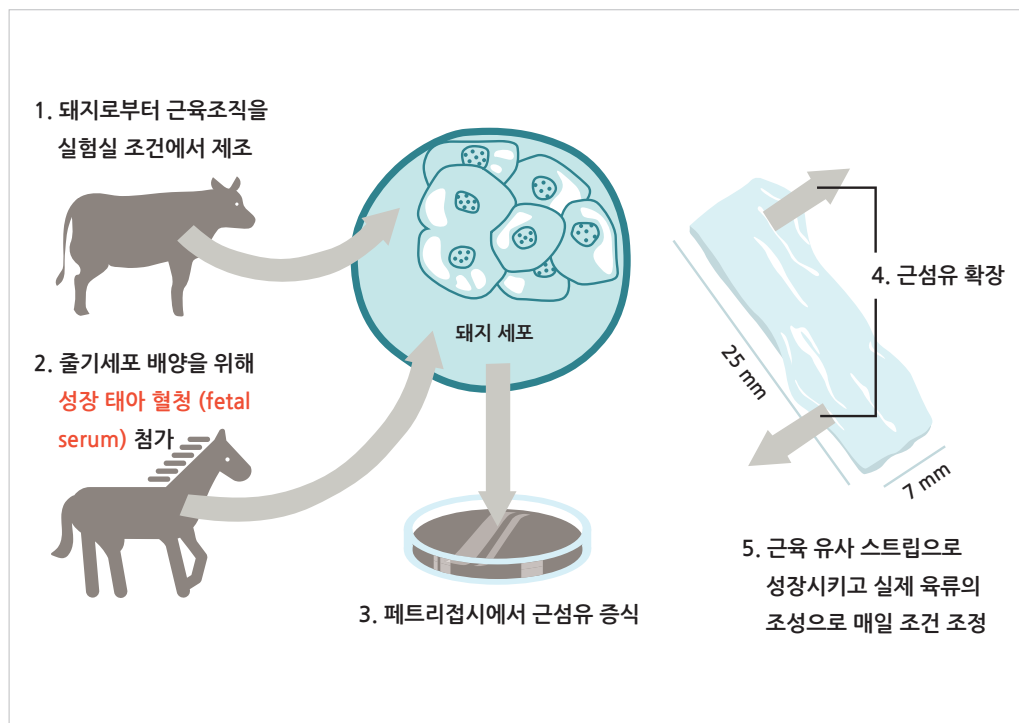


그림 15. 배양육의 성장을 위한 태아 혈청의 첨가하는 모식도. (출처: First artificial burger to cost £250,000, Nick Collins, The Telegraph (<http://www.telegraph.co.uk>) Sep 1, (2011)).

둘째, 배양육 생산에도 동물의 희생이 필요함: 배양육의 세포배양 배지에 당, 아미노산, 비타민, 미네랄을 공급하는 성분으로 말이나 소의 태아혈청(胎兒血清, fetal bovine serum)이 필요한데(그림 15) 이 혈청의 생산은 胎中의 송아지의 혈액으로부터 얻으며 이 때 송아지의 어미 소 역시 도살되어 육류 생산에 소비된다. 이 문제도 역시 조직배양과 생명공학기술의 발전으로 극복될 수 있을 것이다. 셋째, 환경문제가 존재함: 배양육 생산에 전기 에너지가 다량 소요되어 제기되는 문제인데 이것은 가축의 생육과 육류 가공에 들어가는 에너지와 환경오염이 더 크므로 상대적으로는 큰 문제가 아닐 수 있다⁹. 마지막으로 배양육의 생산 비용이 큼: 세포 배양 기술은 현대 생물학에서 가장 비용과 재료가 많이 소요되는 기술이며 대량생산을 위한 바이오텍 회사의 공정에서도 많은 에너지와 노동력이 소요되기 때문에 제기된 문제인데 이 또한 기술 발전으로 극복될 수 있다고 판단된다¹⁰.

현재 미국의 대표적인 벤처캐피탈인 KPCB(Kleiner Perkins Caufield & Byers)와 코슬라 벤처스사는 10개가 넘는 식품기술 스타트업 기업에 투자하고 있다. 코슬라 벤처스(Khosla Ventures)사는 소금-대체품인 Nu-Tek Salt와 인공 육류 회사인 Sand Hill Foods社를 지원하기도 하였으며 PayPal 창립자의 한사람인 피터 티일(Peter Thiel)은 '3D printing meat'에 투자하였다. 이렇게 자본과 두뇌가 지속가능한 대체식품(sustainable alternatives)분야로 집중되고 있어서 인공 대체식품이 시장을 점유하는 주요 필수품목이 되는 것은 시간문제라 보인다¹¹.

위에서 언급한 배양육 기술의 여러 가지 장점과 개선 가능성 때문에 전문가들은 배양육이 10년 내 대중화될 것이라고 예측하고 있다. 그러나 상용화되기까지는 아직도 비용면에서나 해결해야 할 기술적 문제가 남아있다. 특히 인공식품인 배양육에 대한 소비자들의 부정적 인식도 해결해야 할 과제이다. 그러나 이러한 현재의 한계점에도 불구하고 배양육이 가진 안정된 공급 잠재력과 친환경적 지속가능성 등으로 보아 배양육 생산에 관한 대체기술의 미래는 한층 밝다고 할 수 있을 것이다⁵.

2) 인공합성 계란: 식물-유래 '비욘드에그' (Beyond Egg)

(1) '비욘드에그' (Beyond Egg)

계란은 우리에게 가장 친근한 먹거리 중 하나이다. 육류보다 훨씬 저렴하고 요리하는 과정도 비교적 수월하며 영양가도 풍부하기 때문에 그동안 계란은 세계 어디서나 남녀노소 가리지 않고 많은 사람으로부터 완전식품으로 사랑을 받아 왔다. 그러나 최근 들어 계란이 완전식품이라는 데에 이의를 제기하는 목소리가 늘어나고 있다. 콜레스테롤의 함량이 높다거나 알레르기 유발하는 물질을 존재하고 있다는 보고가 있는가 하면, 계란이 양산되는 양계장의 비위생적인 환경으로 인해 조류 독감이나 살모넬라 등에 노출되어 있다는 점 등이 계란에 대한 불신을 야기하는 원인으로 작용하고 있다.

대부분의 동물 대체 식품은 일반 채식주의자(vegetarian)나 절대 채식주의자(vegan) 그리고 고기와 전혀 다른 맛의 소이버거(soy burger) 경험자들을 위한 것이라 말할 수 있다. 그러나 '햄프턴크릭푸드' (Hampton Creek Foods)社의 식물-유래 계란 대체품인 '비욘드에그'는 실제 계란 맛을 기대하는 평범한 잡식주의자(omnivore)를 위한 제품으로 목표를 설정하였고 계란 알레르기가 있는 소비자나 채식주의자에 의한 소비를 기대하고 시작하였다. 아직까지는 이 제품은 형태를 이루지 않는 파우더 형이며 마요네즈 등의 제품으로 출시되고 있다. 앞으로 실제 계란 수준으로 만들기 위해서, 식물체에서 얻은 영양성분을 이용하여 구강촉감(mouthfeel), 조직감(texture), 통기성(aeration) 그리고 향미(flavor)를 조절함으로써 완벽한 대체 식품을 만들고자 하는 것이다(그림 16).



그림 16. 식물-기반 계란 대체품 제조를 위한 특성 분석 (출처: Venture Capital Sees Promise in Lab-Created Eco-Foods, Brad Stone, Bloomberg Business (<http://www.bloomberg.com/>) Jan 25, (2013)).

현재 출시된 제품의 분말을 물에 녹이면 거품 지는 것과 색상까지 계란의 물리적 성질과 질감이 재현된다. 19% 정도 저렴한 가격, 길어진 저장 기간 그리고 안전성이 가장 두드러진 장점이다.

일반적인 대체 식품이 설탕, 소금, 지방에다가 충전제와 방부제를 첨가함으로써 품질이 저하되는데 반해 비욘드에그는 콩, 해바라기 레시틴, 카놀라 그리고 천연 수지 등의 성분으로 제조되었고 또한 글루텐-프리와 콜레스테롤-프리 제품이어서 현재의 주성분으로는 실제 계란보다 이론적으로 건강한 제품이다, 이 달걀을 만들기 위해 전 세계의 1,500 종이 넘는 식물을 테스트했다고 한다. ‘비욘드에그’를 이용해서 만든 쿠키나 머핀과 실제 달걀을 이용해서 만든 것의 차이를 빌 게이츠(Bill Gates)와 토니 블레어(Tony Blair)에게 요청하였는데 전혀 구별할 수 없었다고 한다.

이들은 향후 전 세계의 식량 상황을 바꾸어 놓을지도 모른다. 단지 맛이 좋은 달걀을 만드는 것을 넘어서서 식물의 에너지 효율성과 달걀을 생산하기 위한 닭을 기르고 이들이 배출하는 분뇨 등을 감안할 때 지구의 환경과 지속가능성에도 좋은 영향을 미칠 수 있으므로 미래형 융합산업이라고 말할 수 있다¹². ‘비욘드에그’와 같은 지속가능한 대체식품은 양계의 감축과 동시에 사료로서 옥수수과 콩의 소비를 줄여 탄소발생량을 감축시킬 수 있다. 테트릭(Josh Tetric) 대표는 또한 에그-프리 마요네즈(제품명: Just Mayo)와 스크램블에그 제조법을 개발하여 출시하고 있다¹⁴(그림 17).



그림 17. ‘햄프턴크리크푸드’의 식물-기반 계란 대체 상품인 ‘비욘드에그’(a)와 계란-프리 마요네즈(Just Mayo)(c) 그리고 제품 이용 조리법(Just Asian Cole Slaw)(b). (출처: Grow up with something better, Hampton Creek Food, <https://www.hampton-creek.com>)

(2) 지속가능한 인공합성 계란의 경제성과 미래

‘비욘드에그’는 미국 시장에서 아직 실제 계란을 대체할 수 있는 기술은 아니지만 가격 경쟁력과 저장 기간 연장으로 대규모 식품회사의 관심을 끌고 있다고 인터넷 신문인 GigaOM에 보도되었고 실리콘 밸리에서 지속가능 식품으로 주목받는 사업이 되었다. 이미 30여개국에 수출을 시작했고, 심지어는 정말 불량한 가짜 달걀로 유명한 중국에도 2014년부터 수출되기 시작했다. 또한, 세계적인 식품기업의 달걀 대체제로 원료공급도 시작했다고 한다.

일개 신생기업에 지나지 않았던 ‘햄프턴크릭푸드’ 사가 유명해진 계기는, 전 마이크로소프트의 회장이었고 현재는 스타트업 기업의 투자자로 활동 중인 빌 게이츠에 의해 ‘음식의 미래를 만드는 글로벌 3개 기업’에 선정되어 투자를 받으면서부터이다. ‘비욘드에그’ (Beyond Egg)라는 이름은, 트위터에서 투자를 받은 적도 있는 육류-대체 회사인 ‘Beyond Meat’의 이름을 차용한 것으로 ‘비욘드에그’도 빌 게이츠의 자금 지원을 받는 벤처회사 코슬라 벤처스사의 비노드 코슬라(Vinod Khosla)로부터 2백만 달러를 지원받았다¹¹. 영국 총리였던 토니 블레어의 지원을 받은 적도 있다¹². 현재 미국의 벤처캐피탈들은 ‘햄프턴크릭푸드’사와 같이 달걀이나 닭, 치즈, 소금, 캔디, 육류 등과 같이 새로운 기술로 저렴하고 건강한 음식을 만들 수 있는 식품기술 스타트업에 큰 관심을 가지고 투자하고 있다. 한편 중화권 최고갑부 리자청(李嘉誠) 홍콩 창장 그룹 회장은 2014년 2월 그룹 산하 투자회사를 통하여 ‘햄프턴크릭푸드’사에 2,300만 달러(약 247억원)의 투자를 하게 됐고, 리 회장이 이 계란을 직접 조리하고, 먹어보고 이 같은 투자 결정을 내렸다고 밝혔다. 실제 계란보다 40% 이상의 원가 감소 효과가 있을 뿐만 아니라 환경 보호에 있어서도 도움이 된다는 점을 제품의 장점으로 소개하였다고 한다. 일본의 미쓰이물산은 ‘햄프턴크릭푸드’사에 18억 엔을 출자, 일본 판매권을 취득하고 식품업체에 판매하는 한편 아시아 시장을 공략하려 한다.

‘비욘드에그’는 조만간 유기농 매장으로 유명한 대형 식품체인인 홀푸드(Whole Foods) 마켓에 시판될 예정인 것으로 알려졌다. 그러나 이 같은 ‘햄프턴크릭푸드’사의 주장에 대해 반론을 제기하는 의견도 있다. 미 농무성 농업기술연구소(USDA-ARS)의 영양생리학자인 레이먼드 글란(Raymond Glahn) 박사는 식물성 식재료를 사용하는 ‘비욘드에그’의 영양학적 가치는 인정하면서도 이 같은 인공합성 대체품이 기존 양계산업에 영향을 줄 만큼 물량을 생산하지는 못할 것이고 실제로 계란과 비슷한 맛을 내기도 어려울지 모른다고 하였다.

이러한 우려는 산업적, 기술적 어려움에 대한 인식으로, 세계는 식품의 영양건강기능성과 건강을 위한 생명공학기술에 연구와 지원이 집중되고 있어서 머지않아 극복될 수 있는 장애의 하나이며 도전적 목표 설정을 위한 지표 자료로 받아들여지고 ‘비욘드에그’와 같은 인공합성 계란의 미래에 대한 긍정적 관점이 우세해 보인다.

3) 식용곤충: 미래의 식품자원

(1) 식용곤충의 정의

2050년에 세계 인구는 92명에 도달하여, 동물성 단백질의 수요는 4억5천만 톤으로 늘어나며 세계 육류 소비는 2010년의 두 배에 이르게 되어 쇠고기는 매우 사치스러운 음식이 될 전망이라고 한다. 이렇듯 전 세계 인구의 증가와 함께 식량 수요가 질적으로나 양적으로 증가하여 식량문제 해결을 위하여 식량자원으로 곤충을 이용하는 대안으로 부각되고 있다¹³. 곤충은 전 세계적으로 130만종이 서식하며 전체 생물군의 70% 이상으로 다양성 측면에서 지상 최대의 생물자원이다.

곤충의 식품 효용성: 곤충은 인간이 필요로 하는 양질의 단백질, 비타민, 필수 아미노산 그리고 미네랄이 풍부한데 반해 지방 함량은 적어 이상적인 영양소 공급원이 될 수 있다¹⁴. 건조한 옥수수가 약 10%의 단백질을 함유하는 데 반해 식용곤충은 약 40-70%의 단백질을 함유하고 있으며 귀뚜라미는 80%에 달하고 쇠고기에 비해서는 단백질 함유율이 40% 정도 높으며 열량은 약 66%가 적다(그림 18).

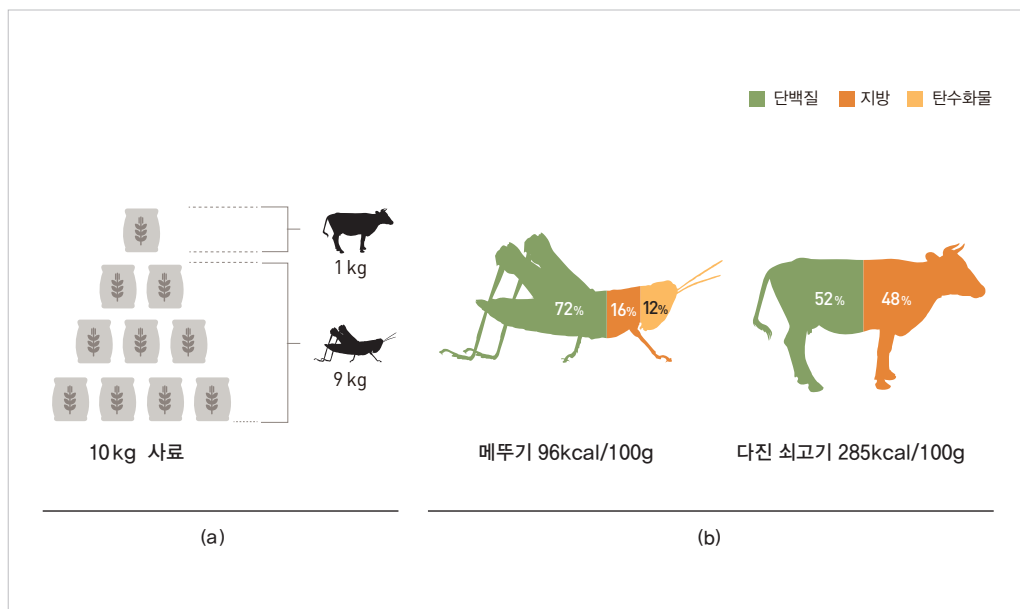


그림 18. 곤충과 소의 10 kg 사료당 체중 증가(a)와 영양성분(b) 비교 (출처: Case Study: Ento, the Art of Eating Insects, 3SixtyGrados (<https://3sixtygrados.wordpress.com/>) Feb 27, (2012))

곤충은 비단 요리 원료뿐만 아니라 단백질 첨가제로 사용하거나 의약품, 사료 등 다양한 분야에 활용이 가능하다. 또한 짧은 사육기간과 대량사육이 가능하고 유전자변이 등의 인공변이가 없으며 사육기간 내 물 소비가 적다는 장점이 있다(그림 19).



그림 19. 식량자원으로 곤충(퀴투라미) 사육의 가치 비교표 (출처: The need for high quality protein Why insects? EntoCube, <http://www.entocube.com/>)

식용 가능한 곤충은 전 세계에 2,000종에 이르며(그림 20) 모든 곤충 중 식물, 동물, 인간에 유해한 종류는 0.5% 미만이고 가장 많이 먹고 있는 곤충은 딱정벌레목(31%), 나비목(18%), 벌목(14%), 메뚜기목(13%), 노란재목(10%), 흰개미목(3%), 잠자리목(3%), 파리목(2%)이며, 기타목 곤충이 5%를 차지한다(그림 21).

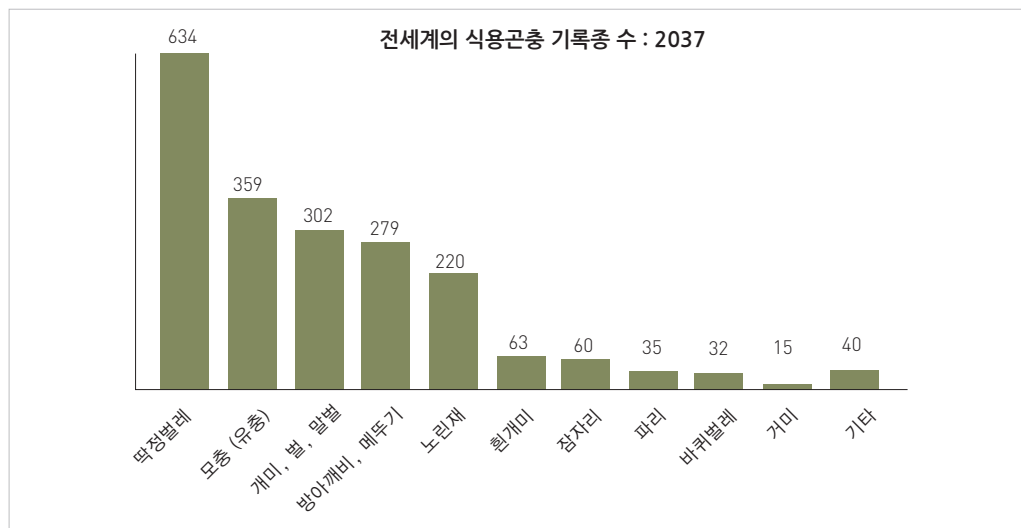


그림 20. 전세계 식용곤충 기록종 수 (출처: List of edible insects of the world, Yde Jongema (<http://www.wageningenur.nl/>) June 1, (2015))

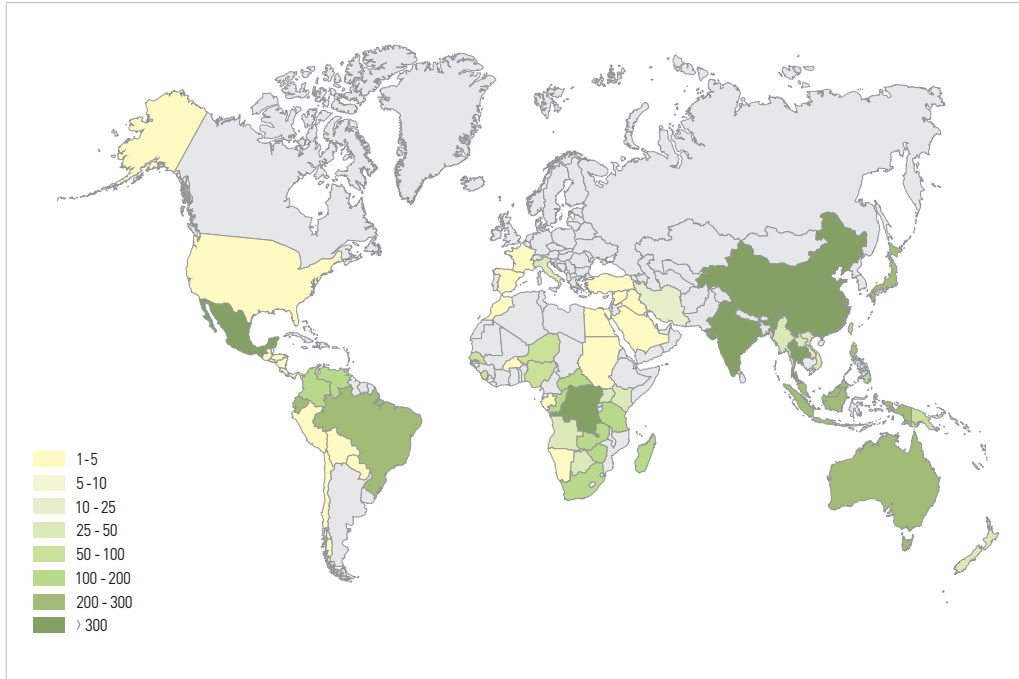


그림 21. 전세계 국가별 식용곤충 기록종 수 (출처: Centre for Geo Information, Wageningen University, Yde Jongema, 2012.)

곤충은 이미 밀집해서 사는 데 익숙해 있어 가축과 같이 대량 사육 시스템으로 인한 신종 질병 발생의 우려가 덜하다. 열악한 환경에서 잘 성장하는 특성으로 인해 대량 사육 시스템으로 인한 신종 질병 발생 우려에서 비교적 자유롭다¹³.

곤충의 경제성과 친환경성: 곤충은 학자에 따라 외온성동물(ectothermal) 또는 변온동물(poikilotherm)로 분류되는데 이는 체온 유지에 에너지가 소요되지 않으므로 먹이를 적게 소비하여 사료 소모가 적다¹³. 곤충은 먹이 전환률(food conversion rate)이 높는데 귀뚜라미를 예로 들면, 동일한 양의 단백질 생산을 위한 사료량은 소의 1/6, 양의 1/4 그리고 닭의 1/2 수준이다(그림 22). 물 소비도 가축에 비해 훨씬 적으며 단위 무게 당 암모니아와 온실가스 배출량도 적으며 유기질 폐기물 사료에도 잘 자란다. 따라서 곤충은 인간의 직접 섭취를 위하여나 추출을 위한 재사용 간접 식량으로도 가치가 있는 소형 가축으로서 식량자원으로 볼 수 있다¹⁷, 사육면적 또한 가축에 비해 훨씬 적게 소요되며 가축의 경우 필요한 목초지나 사료 재배지 등의 기타 토지 수요가 거의 없다. 아울러 곤충사육에서는 운송의 필요성이나 노력이 상대적으로 매우 적다¹³.

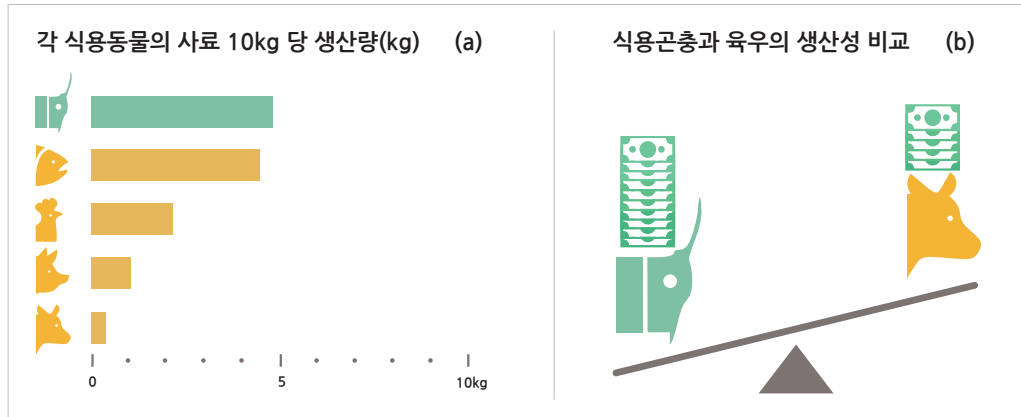


그림 22. 식용동물의 먹이 전환(a)(위로부터 귀뚜라미, 물고기, 닭, 돼지, 소)과 생산성(b) 비교 (출처: Edible Insects for the Masses, Amber G. Johnson, DesignDo Aug 18, 2014 (<http://designdo.se/>))

(2) 식용곤충의 역사와 국내외 동향

곤충섭식(攝食, entomophagy)의 역사는 매우 오래되었으며, 지구상의 다양한 문화권에서 현재까지 전수되고 있다. 인류 문명의 발달 과정에서 근대에 이르기까지 곤충섭식은 비위생적이고, 원시적인 습관으로 인식되었다¹⁵. 곤충이 정확히 언제부터 약용으로 사용되었는지는 명확하지 않으나 동·서양의 고문헌과 기독교, 유대교, 이슬람교 등의 종교 문헌에 다수 기록되어 있다. 중국은 오래전부터 곤충의 식용 및 약용이 일반적인 국가로서, 그 역사가 무려 3000년 이상으로 추정된다. 중국 명나라 시대의 이시진이 1596년 저술한 의서, 본초강목(本草綱目)에는 106종, 조선시대의 허준이 1610년에 완성한 동의보감(東醫寶鑑)에는 지네, 땅강아지 등 95종의 곤충이 가진 효능이 기록되어 있으며 질병 치료나 건강유지를 위한 민간약재로 곤충이 사용되어졌던 기록이 남아있다¹⁶.

국내의 식용곤충에 관한 최근 동향을 보면, 식용곤충의 개념에 정확히 부합하는 경우로서 벼메뚜기, 누에고치, 번데기가 많이 알려져 있으며, 누에고치의 번데기는 양잠산업의 발전과 더불어 대량 사육·소비되어 다양한 건강식품으로 가공·연구되고 있다¹⁸.

2010년 2월에 농림수산식품부에서는 ‘곤충산업의 육성 및 지원에 관한 법률(제10019호)’을 제정하였으며, ‘천적곤충 등으로 이용할 수 있는 곤충의 종류’에서 ‘식용 및 약용 곤충’을 지정하였다. 2014년 7월에 갈색거저리 유충(밀웜, mealworm, yellow worm, 고소애), 2개월 후, 흰점박이꽃무지 유충(굼벵이)가 식품의약품안전처에서 안전성평가에 의한 국내 1, 2호 식용곤충으로 한시적 허가를 받은 바 있다(그림 23).

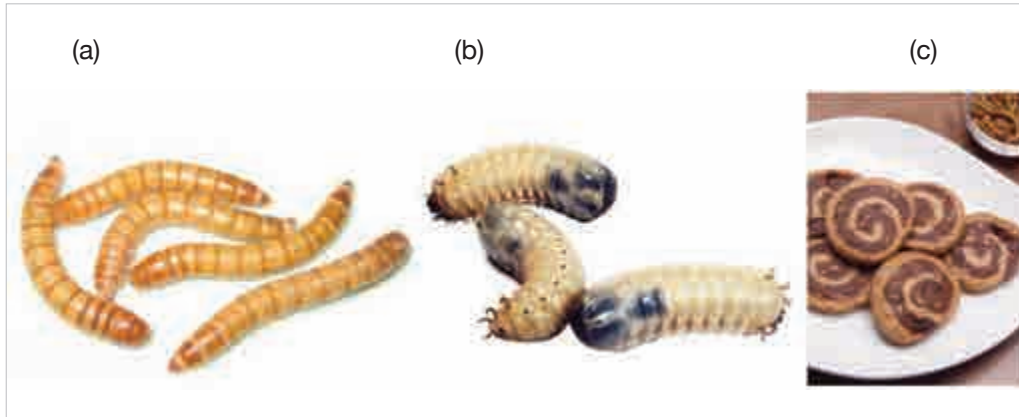


그림 23. 식용곤충 허가를 받은 고소애(갈색거저리 유충)(a)와 흰점박이꽃무지 유충(b), 시중에 판매중인 고소애 빵 제품(c)

메뚜기, 식용 누에 번데기, 백강잠(白僵蠶; 말린 누에고치) 등 세 가지 곤충이 이전에 식용으로 이미 허가돼 있었다. 하지만 이들 곤충은 과학적 연구를 거치지 않고 오랜 섭취로 안전성이 검증된 경우이고, 과학적 안전성을 거쳐 한시적 식품원료로 인정된 곤충은 갈색거저리 유충에 이어 흰점박이꽃무지 유충이 두 번째다. 이보다 앞선 4월에 제주특별자치도가 곤충사육시설 지원을 발표하였고 12월에 국내 최초 식용곤충 전문 카페와 식품업체가 오픈하였다. 2015년 5월에 장수풍뎅이 유충이, 9월에 귀뚜라미가 식용곤충 허가를 받았다. 11월에 열린 ‘제4차 규제개혁장관회의’에서 식용곤충 산업계는 한시적 식품원료로 인정된 곤충이 일반 식품원료로 전환될 수 있도록 관련규제를 정비할 것을 건의했으며, 이에 박근혜 대통령은 식약처장에게 한시적 식품원료로 인정된 곤충을 일반 식품원료로 전환할 것을 지시한 바 있다.

국외의 경우는, 국제연합식량농업기구(FAO)는 곤충을 ‘작은가축(little cattle)’으로 명명하면서 2008년에 태국의 치앙마이에서 식용곤충에 대한 국제워크숍을 개최한 이후로 전세계가 식용곤충에 대한 관심이 증가하였다. 네덜란드는 일찍 곤충식량에 대하여 주목하고 정책을 수립하였는데, 2010년에 농업자연식품부(LNV, Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit - 우리나라의 농림부, 해수부, 환경부, 식약처의 통합부처)에서 육류대체식품 연구에 50만 유로를 지원하면서, 유럽 최고 농업분야 연구개발교육기관인 와게닝겐(Wageningen)대학교에 식품산업에 곤충의 활용과 지속가능한 생산과 혁신적 연구추진(SUPRO2 프로젝트; 인간소비를 위한 지속 가능한 곤충단백질 생산)을 위해 약 100만 유로를 지원하였다¹³. 2011년 유럽 의회는 265만 파운드(약 46억 원)를 곤충섭취(entomophagy) 계획에 투자하기 시작하였다. 2012년 FAO는 인류의 식량안보 및 환경문제 해결방안을 위해 미래식량자원으로 식용곤충식을 제안하고 2013년에 2,000여종에 가까운 식용가능한 곤충의 목록을 발표하였다. 영국은 2014년에 새로운 음식(Nobel Food)에 관한 법령을 식용곤충에 대한 내용을 추가하여 30년 만에 개정하였으며 당시 영국의 소비자들은 35-46%가 메뚜기를 먹을 의향이 있는 것으로 조사되었다.

유럽연합(EU)은 유럽에서 300만 달러 상당의 각종 곤충들이 식재료로 사용되고 있다고 분석하였고 네덜란드의 Van de Ven Insect Nursery 등에서는 식용으로 메뚜기, 밀웜(갈색거저리 유충)을 생산하고 유통업체에서는 온라인과 오프라인을 통해서 판매도 한다.

미국의 경우는 20여개의 곤충식품 관련 사업체가 있고, 북미의 식용곤충 제품을 생산하는 대표적인 업체는 다음과 같다(그림 24, 25). (a) 차풀(Chapul); 미국에서 가장 먼저 시작한 업체로 축산업과 관련한 환경오염과 물 부족 문제에 심각성을 느끼고 사업을 시작했다고 하며 유타주에 소재하고 있고 아즈텍, 마차, 타이, 차코 바 이렇게 4가지 맛의 에너지바를 판매하고 있다. (b) 비티푸즈(bitty foods); 귀뚜라미 파우더로 오렌지 생강, 초콜렛칩, 초콜렛 카다멈 3종의 식용곤충 쿠키를 생산하며 베이킹 반죽용 파우더도 판매하고 있다. (c) 엑소(exo); 가장 잘 알려진 업체로 2013년 시작한 미국의 대표적인 크라우드 펀딩 업체이며 코코아 너트, 블루베리 바닐라, 피넛버터&젤리, 애플 시나몬 이렇게 4가지 맛의 귀뚜라미 바를 판매하고 있다.

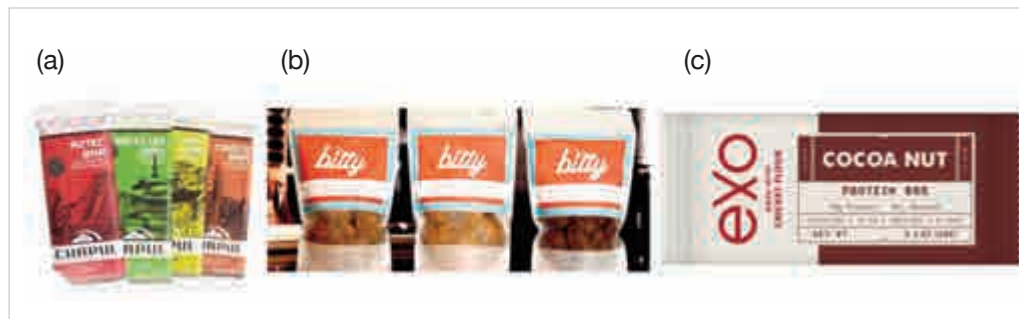


그림 24. 북미의 대표적 식용곤충 제품들; (a) Chapul의 에너지바, (b) bitty foods의 곤충 쿠키, (3) exo의 코코아 너트 에너지 바. (출처: 해당 업체의 홈페이지)



그림 25. 북미의 대표적 식용곤충 제품들; (a) Six Foods의 Chirps 칩, (b) Next Millenium Farms의 곤충 원료 제품 Bug Bistro, (c) Hopper Foods의 곤충 원료 제품. (출처: 해당 업체의 홈페이지)

(a) 식스푸드(Six Foods); 6개 다리의 곤충의 의미이며, Chirps라는 귀뚜라미 파우더에 영양 성분을 추가한 칩 형태의 제품으로 체다, 바비큐, 씨솔트 이렇게 3종이 출시되고 있다. (b) 넥스트 밀레니엄 팜즈(Next Millenium Farms); 캐나다 온타리오에 위치하며 밀웜, 슈퍼밀웜, 귀뚜라미 등의 식용곤충 파우더나 오븐에 구워낸 버그비스트로(Bug Bistro) 제품을 출시하고 있다. (c) 호퍼푸드(Hopper Foods); 2012설립되었고 가장 앞서가는 업체로서 ‘오픈버그팜(Open Bug Farm)’이라는 프로젝트를 통해 포럼을 운영하고 정책을 제안하는 등 이 분야의 오피니언 리더 역할을 하고 있다. 호퍼푸드가 제안한 것으로는 미국에서는 식용곤충의 제품 판매는 늘어나지만 식용곤충 농장의 수는 모자라서 산업화에 걸림돌의 되고 있다는 내용이 잘 알려져 있다(그림 26).

일본 기업들도 이런 움직임에 적극 동참하고 있다. 일본의 컵라면으로 유명한 대표 식품기업 닛신식품홀딩스(Nissin Foods Holdings)는 곤충에서 단백질을 먹기 좋은 방식으로 추출하는 기술을 연구 중인데 곤충이 일본의 식탁에 오를 날이 멀지 않았다고 한다. 중국은 약용 곤충을 대량으로 사육하고 있고, 네덜란드는 정부 차원에서 친환경 곤충 상품 개발에 경제적 지원을 해주고 있다. 벨기에도 유럽국가 중 최초로 곤충 10종의 식용판매를 허용했으며 태국, 프랑스, 호주, 멕시코 등의 국가에서도 식용곤충 산업을 미래의 중요한 산업으로 지정하였다.

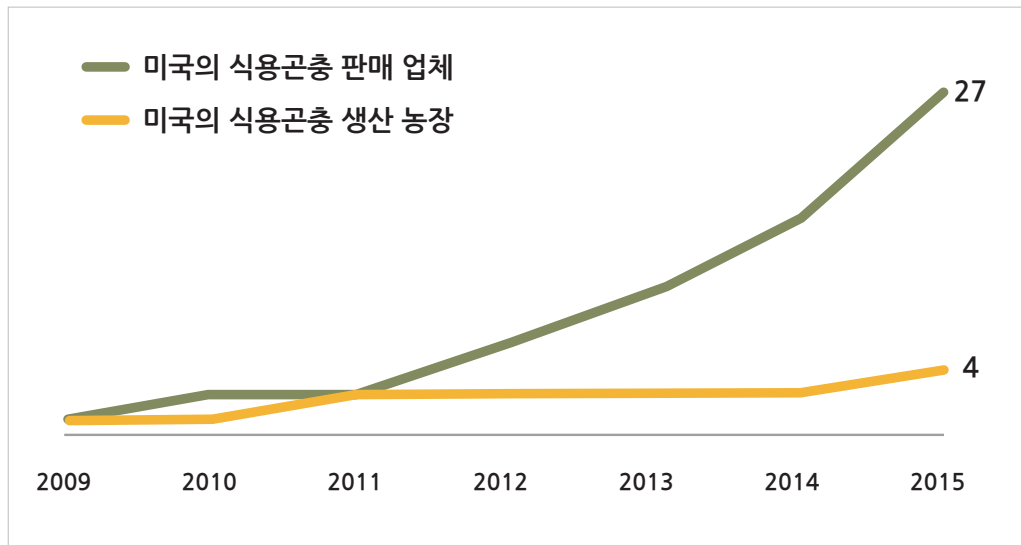


그림 26. 미국의 식용곤충 판매 업체의 증가와 정체된 생산 농장 비교 (출처: tiny-farms, <http://www.openbugfarm.com/>)

(3) 미래 대체식품으로서 식용곤충의 한계와 대책

식용곤충의 미래 산업화를 위하여 극복해야할 과제가 존재한다. 미래 대체식량으로서 식용곤충의 확장에 가장 심각한 걸림돌은 곤충혐오증(entomophobia)이다. 현재 아프리카, 중남미, 아시아 등 90여 개국에서는 단백질 공급원으로서 개미, 굼벵이, 메뚜기, 전갈 등 곤충을 식용하고 있는데 그럼에도 불구하고 곤충섭식(entomophagy)에 대한 거부감은 소비자들 사이에서 여전히 존재한다¹⁴.

이러한 곤충에 대한 혐오나 거부감은 특히 서구나 유럽에 상대적으로 많은데, 벨기에에서 수행한 곤충섭식의 인식 조사에 의하면, 식용곤충을 소비자가 사전에 접해보지 않았을 경우가 심각성이 크고 최근 출시된 식용곤충에 대한 정보를 얻고 시식을 해 본 후에는 거부감이 크게 줄어들었음을 결과로 제시하고 있다. 그래서 이 경우의 혐오증은 곤충에 대한 극단적으로 정신적 공포가 심해 소비자를 제외하면 일종의 새로운 것에 대한 이물거부감(neophobia)과 유사하며 경험에 의해 개선될 수 있는 심리적 선입견으로 볼 수 있다¹⁹.

대책으로서 심리적인 장애 극복을 위한 혁신적인 마케팅 기법 요구되고 고품격, 고품질, 고부가가치 식품으로 마케팅하는 전략이 필요하며 실제로 서양에서는 'insect'라는 단어 대신 'bug'를 사용하거나 곤충의 부정적인 이미지를 상쇄하기 위해 새로운 이름을 붙이는 사례도 그에 해당한다 하겠다. 곤충혐오는 교육과 홍보에 의해 개선될 여지가 많다고 할 수 있고 정부나 관련 업체의 노력이 필요하다고 하겠다. 그리고 식용곤충의 안전한 생산과 소비자 신뢰도 확보를 위한 국가 차원의 안전 규정 마련이 요구된다. 아울러 전통적으로 곤충을 약재로 이용해 온 한국·중국·일본과의 협력하는 연구나 정책사업을 추진하여 범국가차원에서 곤충자원에 대한 국민들의 긍정적 인지도 개선을 모색하는 것도 의미가 있다고 하겠다.

(4) 식량자원으로서 곤충의 미래식품 산업화

국내의 산업용 곤충의 용도별 비율에서 식용곤충은 2012년에 6%로 비교적 작은 시장규모를 형성하고 있으나 시작단계에 있는 식용곤충산업시장이 생산능가의 활성화와 함께 시장 확대가 될 것으로 전망하고 있다. 국내에서 사료용 및 식·의약품용으로 사용되는 시장규모는 2015년 약 700억 원으로 추정되고 있으나, 식품산업에서 곤충의 비중은 매우 미미하다.

정부는 ‘곤충산업 육성 및 지원에 관한 법률’을 통해 곤충자원의 고부가 신산업 육성을 위한 투자기반을 확보했으며, 이를 통해서 관련 산업의 발전을 기대하고 있다. 이에 식품산업에서 식용곤충을 수용하기 위해서는 이와 관련된 식품가공산업의 발달과 친화적인 마케팅 기법이 중요하다. 우선 식용 가능한 다양한 곤충 품목을 발굴하고, 소비자 신뢰도 확보를 위해 식품으로 식용이 가능함을 과학적인 자료로서 입증해 식품원료 인증을 획득해야 한다. 이와 더불어 식용 곤충을 영양공급원인 식품으로 정착시키기 위해서는 다양한 식품소재로의 가공적성 연구와 식품군의 개발뿐만 아니라, 곤충단백질 가공방식의 양적·질적 연구가 필요하며, 국제적 차원의 공동 연구로 생산·가공·유통에 대한 안전 규정 등의 적절한 사용 기준이 마련돼야 할 것이다⁴⁴. 미래의 식량문제에 대한 대안으로 접근하되 실질적이고 창조적인 경제성 창출을 노리는 것이 중요하다 할 수 있다.

세계적으로는 2050년 단백질 수요의 5%를 곤충으로 대체한다고 가정할 시 곤충 ‘식품’ 산업 매출은 450억 유로에 이르게 될 것이라고 예측하고 있다. 세계미래학회는 20년 후 유망한 10대 미래기술로 곤충을 활용한 신약 개발을 제안하였다. 네덜란드는 유럽 식품업체 및 소비자로부터 하여금 식품아이템으로서의 곤충을 수용하기 위해서는 가공기술이 발달해야 한다는 데 주목하고, 정부 및 산학연 공동으로 곤충단백질 가공방식 집중 연구에 투자하고 있다. 아울러 곤충은 식품뿐 아니라 약품산업 등 동물기반 단백질 원료의 주요한 대체품이 될 것으로 전망한다.



결론 및 시사점

오는 2050년 세계 인구는 거의 100억 명에 도달할 것으로 예측되는데 이 인구를 먹여 살리려면 2000년을 기준으로 60%을 증산, 약 69억 톤의 식량이 필요한 상황이다. 특히 수요가 급증하는 아프리카의 경우 2050년의 식량 수요는 2000년 대비 2.2배에 달할 전망이다. 아시아도 식량 수요가 1.8배 증가해 인구 증가속도인 1.4배를 웃돌 것으로 보인다. 따라서 미래식품으로서 다양한 먹거리를 발굴하고 경제성 있는 생산방법을 모색하는 것 시급한 현실이다.

미래 대체식품으로서 배양육의 다양한 장점과 가능성 때문에 배양육이 10년 내 대중화될 것이라고 본다. 그러나 상용화되기까지는 아직도 비용면에서나 해결해야 할 기술적 문제가 남아있다. 특히 인공식품인 배양육에 대한 소비자들의 부정적 인식도 해결해야 할 과제이다. 그러나 이러한 현재의 한계점에도 불구하고 배양육이 가진 안정된 공급 잠재력과 친환경적 지속가능성 등으로 보아 배양육 생산에 관한 대체기술의 미래는 한층 밝다고 할 수 있을 것이다. 실제로 현재 네덜란드에서는 대체 육류가 개발되어 소비가 증가함에 따라 일반 육류의 소비량이 줄어드는 양상을 보이고 있다. 네덜란드의 GIRA 식품연구소에 의하면, 2010년 이후 네덜란드 1인당 육류 소비량은 모든 육류에서 소비량이 2012년까지 2-4% 정도 오히려 감소하고 있는데 네덜란드인의 대체 육류를 선호하는 식습관의 변화와 육류의 가격 상승이 소비 감소의 원인으로 분석되고 있다(그림 27).

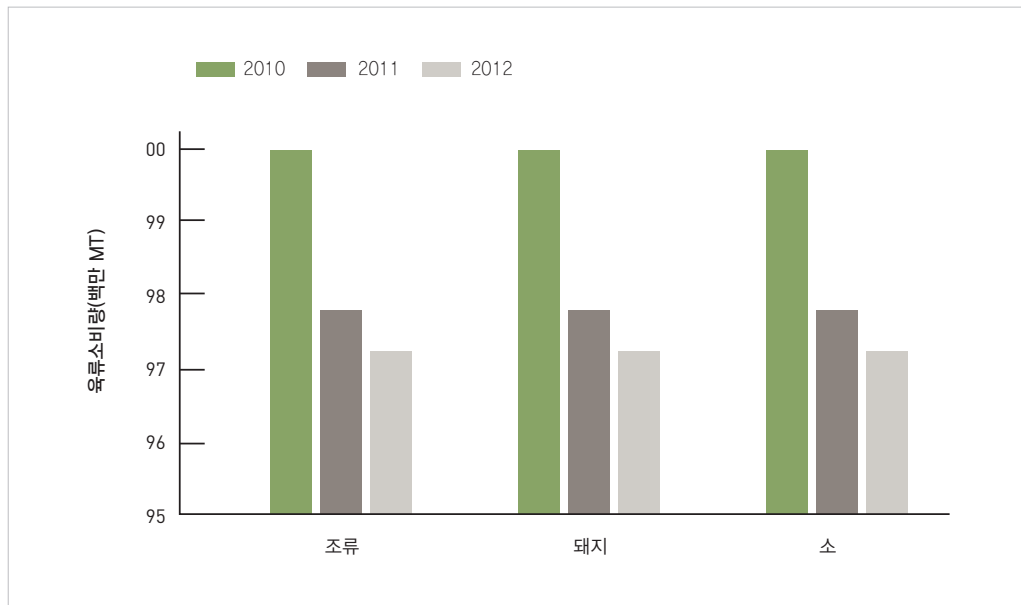


그림 27. 네덜란드의 2010 - 2012년 육류 소비량(2010년=100%). (출처: GIRA food service)

한정된 자원 하에 식량 위기를 돌파하고자 하는 전 세계적 노력의 하나로 2013년 FAO가 가축의 대체 식품으로 언급한 것은 단백질량은 비슷하지만 사육비용이 저렴한 귀뚜라미 같은 곤충을 미래 대체 식량으로 제안한 것이다. 핀란드 헬싱키의 벤처기업 엔트큐브는 ‘귀뚜라미야말로 식량 위기의 구세주’라 하였으며, 미국의 귀뚜라미 양식 벤처기업은 ‘귀뚜라미는 작은 새우와 같은 식감으로 다양한 연령층으로부터 사랑받는 메뉴’라고 하며 사육용 컨테이너를 아프리카의 비영리민간단체(NPO) 등에 판매할 계획이다. 미국의 월마트나 코스트코에서는 ‘식물 계란’으로 만든 마요네즈와 쿠키를 살 수 있다²⁰.

미래식품 대체기술로서 언급한 기술들은, 한계가 있기도 하지만 식품의 영양건강기능성과 건강을 위한 생명공학기술에 연구와 지원이 세계적으로 집중되고 있어서 인류의 식량문제 해결, 친환경, 지속가능성 건강기능성, 공급 안정성, 농축산 환경 개선 등의 장점으로 미래는 밝다고 할 수 있을 것이다.

맹진수

학 력

- 서울대학교 미생물학 박사
- 서울대학교 미생물학 석사
- 서울대학교 원예학 학사

경 력

- 現) 한국식품연구원 기능성식품연구본부 바이오공정연구단 단장
- 前) 美 NIH 임상센터 핵의학연구실 스태프
- 前) Howard 대학교 의과대학 생화학/분자생물학 RA
- 前) ISU US Biotech 연구소 PI
- 前) 美 NIH 국립심폐혈연구소(NHLBI) 펠로우

참고문헌

1. Nikos Alexandratos and Jelle Bruinsma, World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision, FAO Agricultural Development Economics Division, ESA Working paper No. 12-03, p. 131, (2012).
2. Jimmy Smith, Keith Sones, Delia Grace, Susan MacMillan, Shirley Tarawali, and Mario Herrero, Beyond milk, meat, and eggs: Role of livestock in food and nutrition security. *Aminal Frontiers* 3: pp. 6-13 (2013).
3. 박영숙, '배양육, 더 이상 동물 살해한 고기대신 고기를 각 가정에서 배양해서 먹는다' . 인테일리 (<http://indaily.co.kr>) (2013).
4. Hanna L. Tuomisto and M. Joost Teixeira de Mattos, Environmental Impacts of Cultured Meat Production. *Environ. Sci. Technol.* 45(14), pp 6117-6123 (2011).
5. 오승희, '배양육(In Vitro Meat)의 미래' . *Future Horizon* 26(11): 2 (2015).
6. Callan Boys, The future of food: Lab-grown meat and 3D-printed meals. *food&wine* (<http://www.stuff.co.nz>) (2015).
7. Nick Collins, Ethics of creating meat in a laboratory. *The Telegraph* (<http://www.telegraph.co.uk>) Sep 1. (2011).
8. Koert van Mensvoort, World' S First Lab-Grown Meat Restaurant, Next Nature Network and Submarine Channel (<http://www.bistro-invitro.com>) (2015).
9. Allison Guy, Four Objections to Lab-Grown Meat, Next Nature Network (<https://www.nextnature.net>) Nov 14, (2012).
10. Christina Agapakis, Steak of the Art: The Fatal Flaws of In Vitro Meat. *Discover* (<http://blogs.discovermagazine.com>) (2012).
11. Alec Liu, Silicon Valley' s Fake Eggs Are Better Than the Real Thing, *Motherboard* (<http://motherboard.vice.com/>) (2013).
12. Brad Stone, Venture Capital Sees Promise in Lab-Created Eco-Foods, *Bloomberg Business* (<http://www.bloomberg.com/>) (2013).
13. 임성아, 새로운 축산의 길 곤충. 축산유통종합정보센터 (<http://m.ekapepia.com/>) (2013).
14. Paul Vantomme, Insects for food and feed. Food and Agriculture Organization of the United Nations (<http://www.fao.org/>) (2015).
15. Chuleui Jung, Prospects of Insect Food Commercialization; A Mini Review. *Korean Journal of Soil Zoology* 17(1-2) : 5~8 (2013).
16. 김 용 옥 , Nutritional Values of Edible Insects, Korean Edible Insect Laboratory Knowledge Coop (<http://www.keilab.org/>)
17. 김은미, '곤충도 고부가가치 식품자원' , *식품저널* (<http://www.foodnews.co.kr>) (2015).
18. 임정호, '미래의 식품가공원료 식용곤충' . *식품저널* (<http://www.foodnews.co.kr>) (2014).
19. Rudy Caparros Megido et al, Edible insects acceptance by belgian consumers: promising attitude for entomophagy development *Journal of Sensory Studies* 29: 14-20 (2014).
20. 김석경, 귀뚜라미와 식물계란이 미래 먹거리? 주간무역 (<http://weeklytrade.co.kr/>) (2016).

국가 R&D 현황 분석

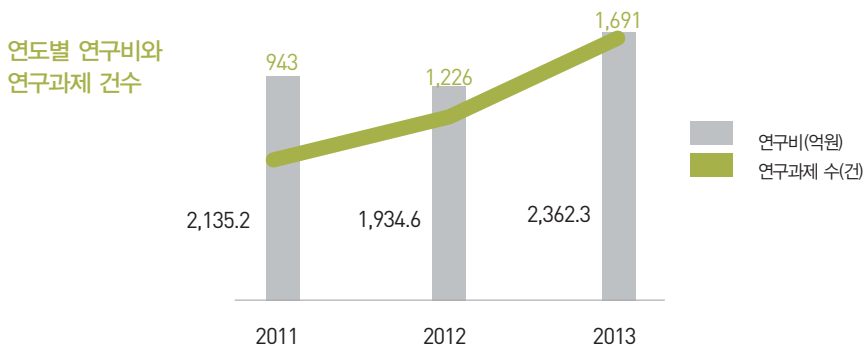
최근 3년간(2011~2013년) 미래 식품과 관련된 연구개발사업을 분석해보았다.

과제 선별 기준

배양육을 비롯한 곤충 식품 등의 미래 식품 및 식량에 대한 연구는 현재 이루어지지 않고 있기 때문에 미래 식품이 아닌 일반적인 식품 및 식량에 대한 연구 현황을 살펴봄

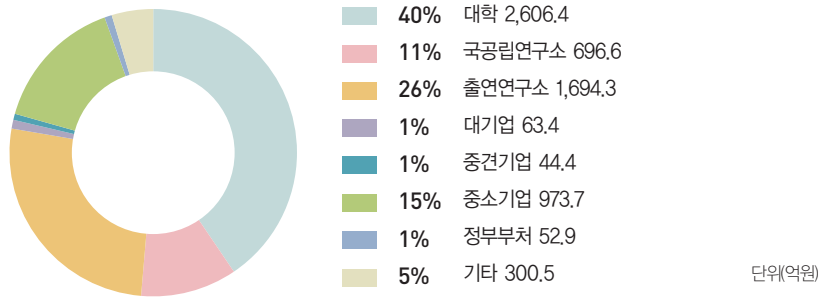
분석 결과 최근 3년간 총 3,860건의 과제에 6,432억원의 연구비가 투자됨

- 연구과제 수는 꾸준히 증가하는 것으로 나타났으나, 연구비는 약간의 증감이 있었던 것으로 나타남
- 하지만 최근 식량안보에 대한 전세계적인 관심과 식량산업의 시장 규모를 고려해 보았을 때 전체적인 식량/식품에 대한 연구비 규모가 충분치 않은 것으로 사료됨



연구수행주체 식품 및 식량 전체에 대한 연구를 분석한 만큼 다양한 주체들이 연구를 수행하고 있는 것으로 나타남

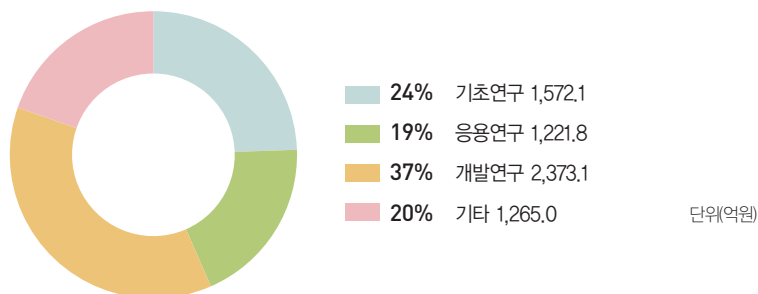
- 대학과 출연연, 중소기업, 국공립연구소 순으로 연구개발이 이루어지고 있는 것으로 나타남
 - 전반적으로 국공립연구소의 연구 비율이 11%로 다소 일반적이 연구개발 주제에 비하여 높게 나타난 것으로 제외하고는 낮으며, 연구비율은 일반적인 주제의 연구개발과 크게 다르지 않게 나타남



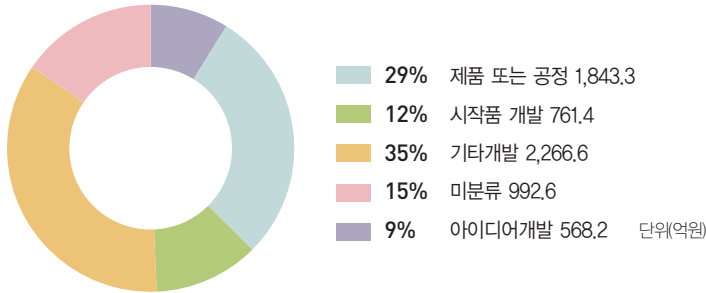
연구수준 식품, 식량과 관련된 연구는 연구개발단계나 수준, 성격과 관계없이 고르게 연구가 진행되고 있는 것으로 나타남

- 개발단계별로는 개발연구(37%), 기초연구(24%), 응용연구(19%) 순으로 이루어지는 것으로 나타났으며, 이는 과제 수로도 각각 1,487개, 1,102개, 802개로 차이가 없었음
- 연구개발성격 측면에서는 아이디어 개발(568억원, 350개), 제품 또는 공정 개발(1,843억원, 1,208개), 시작품 개발(761억원, 460개), 기타 개발(2,267억원, 1,336개) 등 고르게 연구가 이루어지고 있는 것으로 나타남
- 기술수명주기적 측면에서는 도입기(2,286억원) 및 성장기(2,328억원) 중심으로 연구가 이루어지고 있는 것으로 나타남

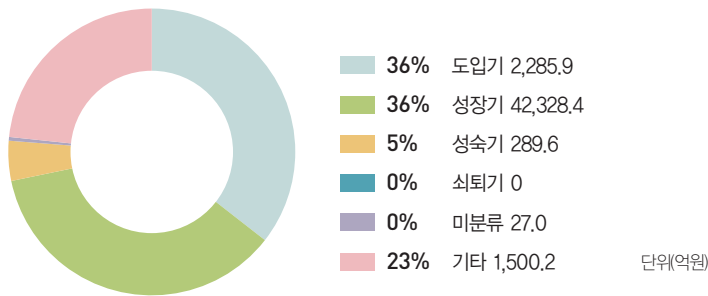
연구개발단계



연구개발성격

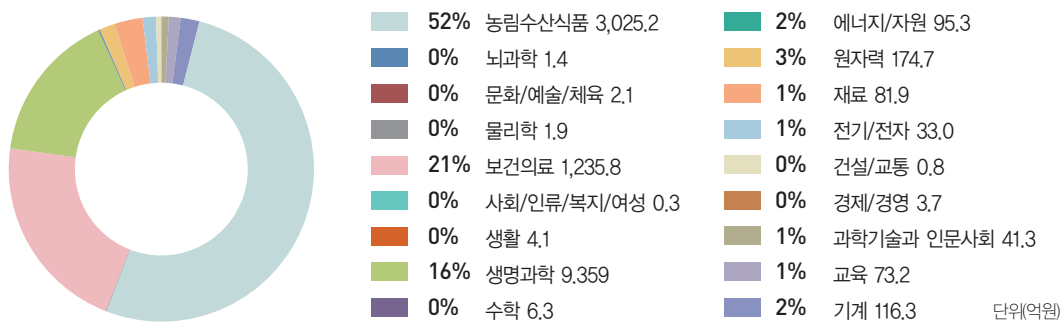


기술수명주기

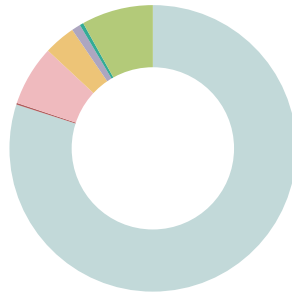


연구분야 국가과학기술표준분류와 미래유망 신기술분류(6T), 국가기술지도분류(NTRM)를 분석한 결과 농림수산식품(3,025억원, 52%) 중심의 BT(5,143억원, 80%) 연구가 다수인 것으로 나타남

연구분야 [국가과학기술표준분류]



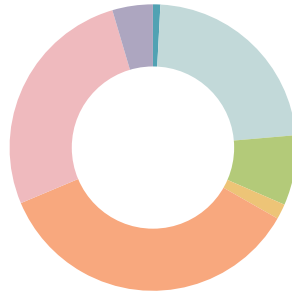
연구분야 [6T]



80%	BT	5,142.7
0%	CT	11.9
7%	ET	437.4
4%	IT	229.2
1%	NT	64.3
0%	미분류	27.0
8%	포함되지 않음	519.6

단위(억원)

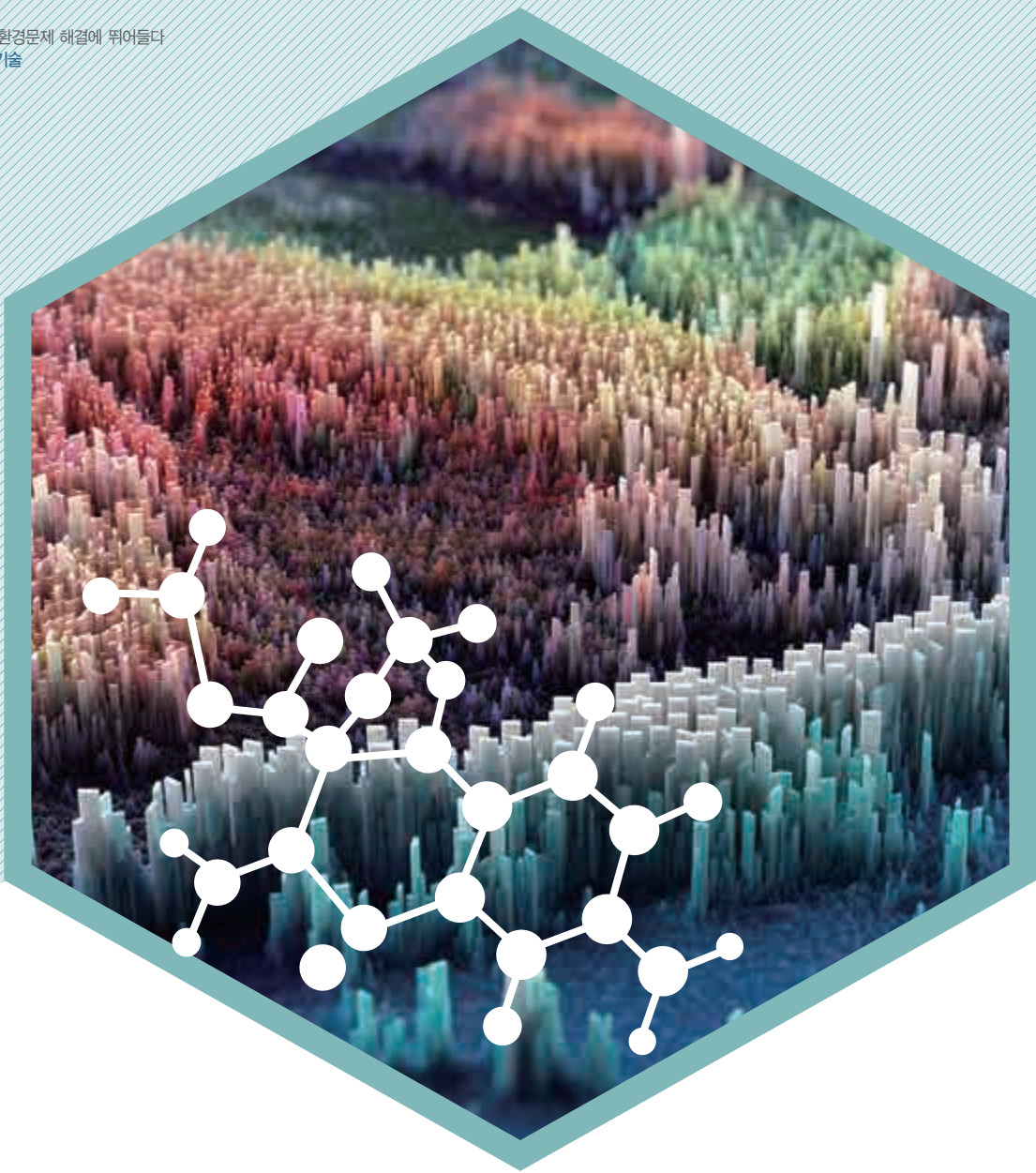
연구분야 [NTRM]



23%	건강한 생명사회 지향	1,466.3
8%	환경/에너지프론티어 진흥	508.4
2%	기반주력산업 가치창출	110.8
35%	국가안전 및 위상 제고	2,277.6
27%	포함되지 않음	1,721.7
4%	기타	293.6
1%	정보/지식/지능화 사회구현	53.6

단위(억원)

- 농림수산식품(3,025억원, 52%), 보건의료(1,236억원, 21%), 생명과학(936억원, 16%) 분야에서 대다수의 연구가 이루어짐
 - 하지만 식품/식량은 여러 분야와 연계가 되어 있는 융합분야인 만큼, 건설/교통, 경제/경영, 과학 기술과 인문사회, 문화/예술/체육, 사회/인류/복지/여성에 이르기까지 다양한 분야에서 관련 연구를 수행 중인 것으로 나타남
- 6T 기준에서는 BT가 5,143억원으로 전체의 80%를 차지하고 있는 것으로 나타남
- NTRM 분석 결과는 국가안전 및 위상 제고(2,278억원, 35%), 건강한 생명사회 지향(1,466억원, 23%)를 중심으로 연구가 이루어지고 있는 것으로 나타남
 - 식품/식량 산업의 규모를 고려하였을 때 기반주력산업 가치창출로 분류될 수 있는 연구도 많을 것으로 생각되나 아직 산업적 중요성이 연구개발사업 전반에 반영되지 못한 결과라고 사료됨



나노물질, 환경문제 해결에 뛰어들다 : 환경 나노기술

☎ 고려대학교 사회환경시스템공학부 이재상 (lee39@korea.ac.kr)

나노물질

나노(nano)의 어원은 고대 그리스어의 난쟁이(nanos)라는말에서 유래하였으며, 나노물질(nanomaterial)이라 함은 적어도 소재 구조의 한 차원이 나노(10^{-9}) 미터 크기의 물질임을 뜻하나 일반적으로 통용되는 나노스케일이란 1에서 100 나노미터 사이의 차원을 의미한다. 단순히 크기의 축소를 통한 소재 비표면적의 극대화 측면 외, 특히 동일한 화학조성을 갖는 물질이라도 나노 스케일로 존재할 경우 상응하는 매크로(macro) 스케일의 물질 대비 비약적으로 향상되거나 전례가 없는 고유한 물리적, 화학적, 광학적, 전기적, 기계적, 및 생물학적 특성을 나타낼 수 있다. 이런 효과에 근거하여 상향방식(bottom-up approach)을 통해 합성된 우수한 물성의 다양한 나노물질들이 현재 전자, 에너지, 촉매, 의료 등 여러 분야의 기반소재로서 그 활용가치를 인정받고 있다. 대표적인 나노물질의 형태학적 분류는 나노입자(nanoparticle) 혹은 나노결정(nanocrystal), 나노층(nanolayer), 그리고 나노튜브(nanotube) 등이 있다(그림 1).

수십 개에서 수천 개의 원자들이 1에서 100 나노미터의 응집체를 이룰 경우 가장 일반적인 나노물질로서 나노입자를 형성하게 되며, 전구체, 용매, 계면활성제, pH, 온도 등의 실험 조건에 따라 형태학적 특징을 조정할 수 있다. 또한, 여러 종류의 화학적 결합력(예: 수소 결합, 쌍극자 힘(dipolar force), 친수 및 소수 상호 작용 등)의 적절한 작용에 따라 매우 규격화된 층상 구조가 반복적으로 나타나는 나노층 기반 소재를 형성시킬 수 있으며, 이는 분리막, 촉매, 광학 소재로서 높은 적용성을 나타낸다. 실리콘, 이산화티탄, 탄소 등의 원자들로 구성된 원 혹은 다각형 구조를 나선형으로 배열함으로써 동심원을 공유하는 실린더 형태의 나노물질을 생성시킬 수 있으며, 이런 형태적 특성을 갖는 나노튜브의 경우 센서, 전극, 흡착 등의 소재 제작을 목적으로 활용되기도 한다.

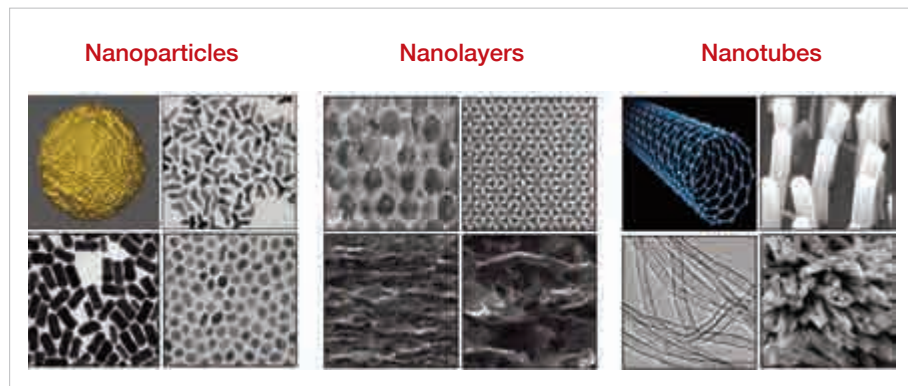


그림 1. 대표적인 나노물질 형태

02

환경-나노기술

나노기술과의 융합을 통한 해당 분야 기술의 혁신적 진보를 도모하고자 하는 흐름에 발맞추어, 환경공학과 나노기술과의 접목 가능성은 풀러렌(fullerene) 탄소나노소재의 최초 발견과 구조분석의 공로를 인정받아 1996년 노벨화학상을 수상한 미국 라이스 대학교(Rice University)의 리차드 스몰리(Richard Smalley) 교수의 2003년 5월 “Top Ten Problems of Humanity for Next 50 Years”이라는 제목의 공개강연에서 언급된 바 있다. 스몰리 교수는 향후 인류가 당면하게 될 난제로서 에너지, 물, 식량, 환경, 질병, 인구 증가 등의 10 가지 미래 이슈들을 해결할 수 있는 가장 적합한 해결책으로서 나노기술의 활용을 강조함으로써, 수자원 확보, 수질 관리, 환경 정화, 환경 오염 저감 등을 구현하기 위한 환경공학 분야에서의 나노기술의 구체적 역할론을 제시하였다.

또한 2003년 미국 리하이 대학교(Lehigh University) 웨이-시안 장(Wei-Xian Zhang) 교수는 미국화학회에서 발간하는 환경 과학과 기술(Environmental Science & Technology)저널에 환경-나노기술(Environmental Nanotechnology)이라는 새로운 융합 분야의 소개와 함께 나노소재의 환경공학 활용분야로서 환경오염 방지, 환경오염 처리 및 복원, 환경오염물질 측정 및 감지 등의 사례를 언급하였다. 관련하여 미국 노트르담 대학교(Notre Dame University)의 필샨트 카맛(Prashant Kamat) 교수나 오레곤 보건과학대학교(Oregon Health & Science University)의 폴 트라트니엑(Paul Tratnyek) 교수 등이 보다 협의화된 소재 분야에 - 광촉매 및 영가나노철 - 특화시켜 나노기술과 융합된 토양 및 수처리 환경 기술의 사례를 논문 특집호에서 소개하였다. 이후 최근까지 꾸준히 나노기술의 환경 적용 범주에 분류 가능한 다양한 연구 수행 결과들이 논문과 특허를 통해 소개되었으며, 환경-나노기술의 연구 사례, 경제성 및 효율성을 고려한 향후 적용가능성, 실제 현장적용을 위한 기술적 및 윤리적 당면 문제, 발전 방향 등을 포괄하는 리뷰(review) 형식의 논문 또한 지속적으로 출판되어 오고 있다.

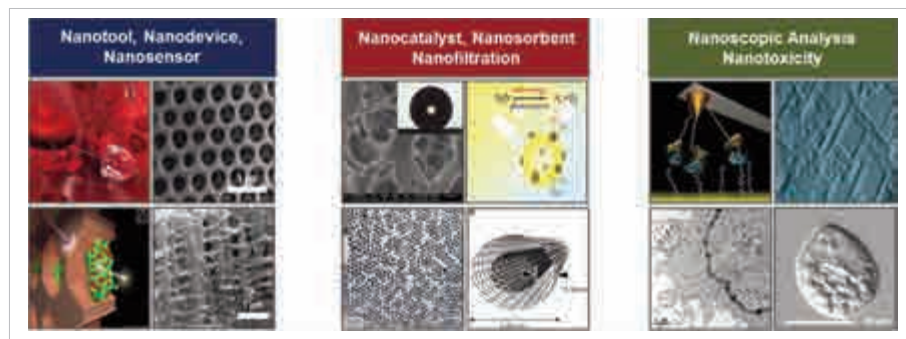


그림 2. 환경-나노기술의 분야

여러 연구 및 리뷰 논문, 총설, 특허 등을 종합하였을 때, 환경-나노기술의 적용은 크게 4가지 주요 분야로서 환경 감지 및 측정, 환경 복원 및 정화, 생태독성 및 환경 영향성, 그리고 환경현상 메커니즘 규명 등으로 분류할 수 있다(그림 2). 이 가운데 환경 내 다양한 현상 메커니즘(예: 광물 풍화(mineral weathering), 금속 이온 용출(dissolution) 및 침전(precipitation)) 고찰을 보다 미시적인 나노스케일 수준에서 수행하기 위한 환경과학 연구의 지향성과 관련된 분야는 현 총설에서 다루고자 하는 환경공학의 기술적 혁신을 위한 나노기술과의 융합과는 상관성이 낮으므로 논외로 할 것이다. 또한 실리콘 나노선(nanowire), 금 나노입자, 탄소나노튜브(carbon nanotube)를 활용하여 정확성, 신속성, 기질특이성 등과 관련된 환경 분석 및 측정 장비의 성능 향상과 함께 장비의 소형화를 위한 나노기술의 활용 분야도 최근 관심이 높아지는 환경-나노기술의 분야이나, 연구 사례의 구체성을 확보하고자 본 총설에서는 환경 복원 및 정화 기술과 나노소재 기술과의 통합 연구 사례에 대해 초점을 맞추고자 한다.

그림 2의 적용 분류에도 나타나듯이 화학조성 및 형태학적 특성 측면에서 다양성을 갖는 나노물질들은 환경 처리 및 복원 기술에서 활용되는 소재의 대체재 혹은 처리 공정효율 향상을 위한 기존 소재와의 융복합화 등을 위해 적용 가능하며, 흡착 및 여과와 같은 물리학적 처리 기술이나 산화 및 환원 반응에 기반한 화학적 처리 기술 등에 널리 그 활용가능성이 제시되고 있다. 특히, 나노기술과의 융합은 단순한 처리 성능 증가의 차원이 아닌, 전기 및 수도시설과 연결이 어렵거나 고립된 지역(off-the-grid)의 처리시설 적용의 한계 극복, 기존 환경기술 처리를 통해 활용하기 수원의 이용도 증가 및 자원화(예: 해수담수화(desalination)), 혹은 환경폐기물 처리와 에너지 및 유용자원 회수 병행(energy-water nexus) 등 현존하는 환경기술의 패러다임을 바꿀 수 있는 기술 혁신을 가져올 수 있다. 본 총설에서 다루지는 않으나, 특히 나노기술의 활용은 환경오염저감을 위한 사전대비(proactive) 측면에서의 그 시사점을 파악할 필요가 있다. 예를 들어, 탄소나노튜브와의 결합을 통한 콘크리트의 강도 증가나 산화세륨(CeO_2) 나노입자를 활용한 철근부식방지 등은 건축자재의 연한을 늘림으로써 건축폐기물 배출량 감소의 결과를 기대할 수 있으며, 다공성의 나노구조 제올라이트(zeolite) 촉매를 화학적 전환반응에 의한 화합물 형성 사용 시 전환율 증가를 통해 오염물질로서의 반응부산물이나 사용용매의 양적 감소를 유발함으로써 역시 공정 운영에 수반되는 환경오염 가능성을 사전에 차단할 수 있다.

최근 10년 사이 연구의 중요도 및 그와 관련한 연구비 투자 규모 증가에 상응하여 높은 주목을 받고 있는 분야는 나노물질의 생태독성 및 환경영향성과 관련되어 있다. 일례로 미국의 경우 국가나노기술계획(NNI: National Nanotechnology Initiative)에 따라 2000년부터 2004년까지 연방 정부의 나노기술 관련 연구비의 2.7%(약 8천8백만 달러)를 환경-나노기술에 투자해 왔으며, 그림 3에서 확인되듯이 나노물질의 환경영향성과 관련한 분야에 연구비의 투입 규모가 상대적으로 증가함을 확인할 수 있다. 환경-나노기술 분야에 상기한 리하이 대학교의 웨이-시안 장 교수의 논문에서도 이미 환경공학 외 타 분야를 포함하여 활용가능한 나노물질의 환경 유출과정에서 발생할 수 있는 여러 환경매체에서의 오염 이슈에 대해 지적한 바 있다. 특히 나노소재의 의료기술 적용 시 필연적으로 고려해야 할 나노물질의 인체유해성 고찰을 위해 2001년 발족한 미국 휴스톤의 CBEN(Center for Biological and Environmental Nanotechnology)을 중심으로 (나노물질의 환경 및 바이오 분야 적용성 탐구 외) 나노물질의 안정성 확보 및 나노물질 산업적 활용과 상업적 유통을 위한 사회적 합의, 지식 공유 및 전달 등을 위한 노력이 지속되어 왔다. 지속가능한 나노물질의 환경기술 적용을 위한 고려사항의 일환으로서, 최근까지 나노물질의 환경영향성과 관련한 연구 활동이 활발히 진행되고 있으며 관련하여 본 총설 후반에서 다루고자 한다.

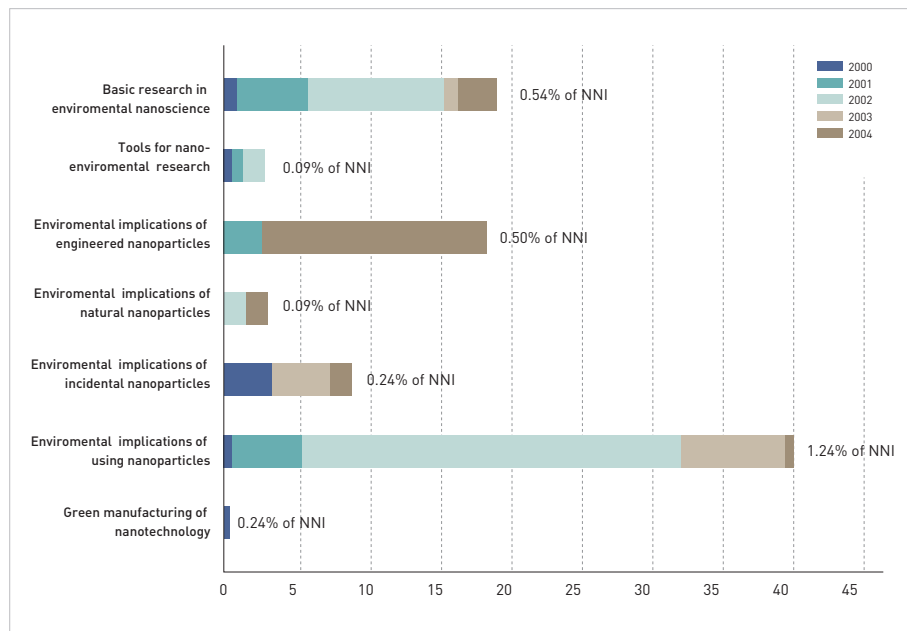


그림 3. 환경-나노기술 연구비의 상대적 규모 (미국) (Guzman et al., Environ.Sci.Technol. (2006)에서 발췌)

2.1. 나노물질을 이용한 화학적 수처리

환경생태학적 및 독성학적으로 문제를 유발할 수 있는 수계 유기화합물들을 처리하는데 있어서 화학적 산화-환원 반응은 1) 상이한 화학구조를 갖는 유기물의 처리에 범용적으로 활용할 수 있고, 2) 상대적으로 처리 속도가 신속하며, 3) 단순한 상전환(예: 흡착, 공기 탈기(air-stripping))이 아닌 근본적인 오염대상의 분해를 가능케 한다는 점에서 생물학적 혹은 물리학적 처리에 비해 효율적이다. 특히, 최근 환경 이슈로서 주목을 받고 있는 다양한 신종유기오염물질(emerging contaminants, 예: 내분비 교란 물질(endocrine disruptor), 약물질(pharmaceuticals), 과불화합물(perfluorinated compounds) 등) 대부분이 수계에 미량으로 존재한다는 점에서 화학적 산화-환원을 통한 처리 기법의 적용처를 찾을 수 있다. 환원 반응을 통한 중금속 처리 혹은 탈할로겐화(dehalogenation) 등에 대한 제한적인 나노물질의 적용사례도 있으나 일반적으로 상기한 화학적 처리 공정의 대부분은 오염물질의 산화를 통한 화학적 변형 및 관련 독성 감소를 기저 메커니즘으로 하며, 이와 관련하여 나노물질을 활용은 주로 고도산화처리(advanced oxidation processes) - 고효율 활성산소종(예: 수산화 라디칼(hydroxyl radical))을 발생시킬 수 있는 제반 물리화학적 수처리 공정을 통칭 - 분야에 전통적으로 이루어져 왔다. 이는 결국 고도산화처리 기법이 활성라디칼을 만들어 낼 수 있는 전구체(예: 산소, 과산화수소, 오존 등)로의 에너지 전달 혹은 전자전달반응에 근거하여 이루어지며, 특히 많은 나노물질들이 고효율 에너지 및 전자전달 특성을 보유하고 있다는 점에서 그 유래를 찾을 수 있다. 관련 나노물질로서 금속나노입자, 금속산화물계 반도체물질, 그리고 탄소계 나노물질(예: 풀러렌, 탄소나노튜브, 그래핀(graphene)) 등의 적용 가능성이 제시되어 왔다.

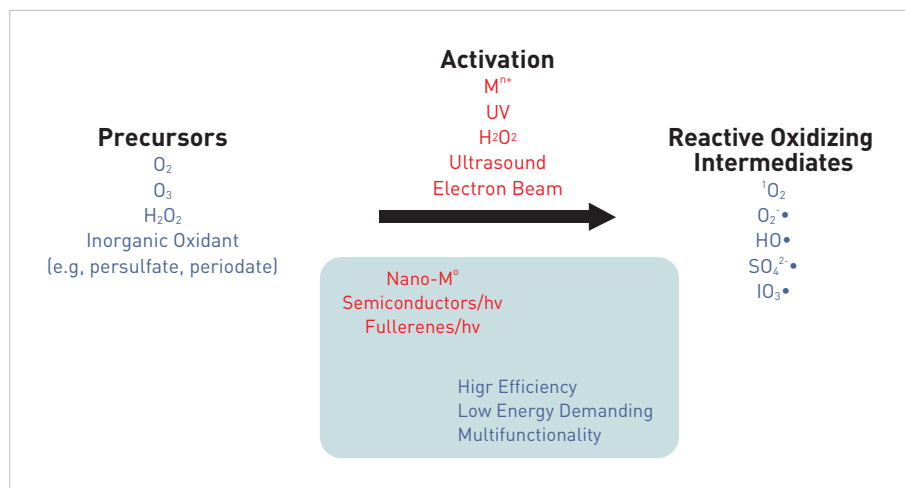


그림 4. 나노물질의 고도산화처리 기법 적용

1) 금속나노입자

나노영가철

금속나노입자 가운데 화학적 수처리 기법에 가장 널리 사용되어 온 물질은 영가나노철(zerovalent nanoscale iron)이다. 영가철소재의 활용은 일반적으로 철소재의 샘플링 용기에서의 장기간 시료 보관 시 점차적인 시료 농도의 감소 효과로부터 기인했다고 알려져 있으며, 초기 마이크로 크기의 영가철은 방향족 니트로화합물(예: nitrobenzene), 질산성 질소(nitrate), 혹은 염화에틸렌화합물(예: perchloroethylene) 등의 직접 환원 처리에 적용되어 왔다. 철은 지구상에 범용적으로 분포하고 있는 비교적 가격경쟁력이 높은 소재(실제 폐기철도 사용 가능)이며 오염물질의 환원처리 후 환경적으로 무해한 2가 혹은 3가 철의 용출이 부가반응으로서 기대됨으로, 나노 크기 철입자의 합성을 통해 반응표면면적으로 극대화시켜 오염된 수계 및 토양계 살포하는 방식의 처리 기법이 제안 가능하다. 나노크기 영가철의 환원특성을 향상시키기 위한 방법으로서 (귀)금속류(예: 팔라듐 (Pd), 니켈 (Ni)) 등을 조촉매로 활용하는 방안이 제안되었으며, 이는 1) 철입자 표면에서 오염물질로의 직접전자전달 촉진, 2) 철입자 표면에서의 수소이온 환원을 통한 환원제로서의 가스상 수소발생능 향상, 3) 오염물질 환원반응의 활성화에너지 감소 등의 효과를 가능케 한다.

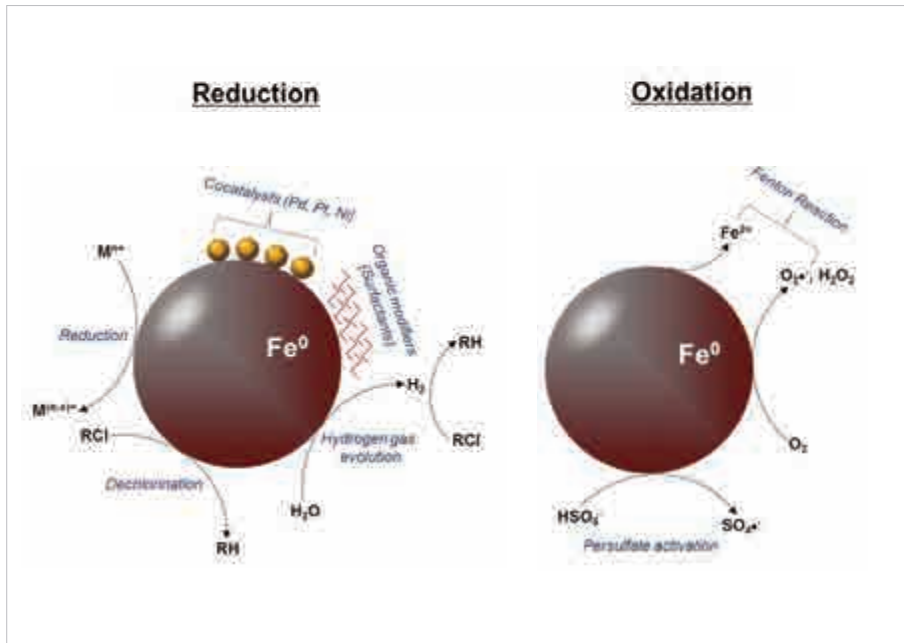


그림 5. 영가철 나노입자의 환원 및 산화 반응 적용

초기 마이크로 스케일 영가철의 주요 적용처가 환원 반응이었으므로 나노영가철의 초기 연구 대부분은 상기하였듯이 중금속, 나이트로 방향족, 염화 및 브롬화 화합물의 환원 처리에 초점이 맞추어졌다. 반면 2005년 호주 뉴 사우스 웨일즈 대학교 (University of New South Wales)의 데이비드 웨이트(David Waite) 교수 연구팀에 의해 나노크기 영가철 표면에서의 수산화 라디칼 형성을 통한 오염물질의 산화 가능성이 본격적으로 보고되었으며, 이는 영가철의 용존 산소로의 연속적 전자전달 반응에 의해 형성된 슈퍼옥사이드 라디칼종(superoxide radical) 혹은 과산화수소와 용출된 철이온 사이의 펜톤 반응(Fenton Reaction)을 기저 메커니즘으로 한다. 반면, 라디칼종 외 다른 발현 메커니즘으로서 고산화철(페릴 이온 (ferryl ion): Fe(IV)) 발생 가능성이 최근 연구논문을 통해 제시되고 있으며 일반적으로 산성 조건에서는 수산화 라디칼 기반의 오염물질 산화가 비선택적(화학구조에 상관없는 유기화합물 분해 가능)으로 촉발되며 중성 조건에서는 고산화철 기반의 대상 오염물질별 특이성을 갖는 산화반응경로가 발생하는 것으로 알려져 있다.

영가나노철의 효율을 높이기 위한 방안으로 (귀)금속입자의 표면담지 외 1) 영가나노철의 이동성을 높이기 위한 표면 개질제(surface modifiers) 활용(예: 계면활성제, 트리블록 공중합체(triblock copolymer) 고분자) 2) 소수성 유기오염물질에 대한 선택성 확보를 통한 처리능 증가를 위한 표면 개질제(예: carboxymethylcellulos, rhamnolipid 등) 적용, 그리고 3) 전자전달활성화 및 활성산소종 전구체 역할 화학제제 투입 등이 문헌을 통해 제시되어 왔다. 특히, 영가철 나노입자 표면에서의 산화 반응 가속화를 도모하기 위해 환원-산화 반응에 활성을 갖는(redox-active) 여러 화학제제들이 활용되어 왔다. 영가나노철 표면에서의 펜톤 반응을 위해서는 철과 용존 산소간의 전자전달반응을 통한 철이온 용출과 수산화 라디칼 전구체로서의 슈퍼옥사이드 라디칼 및 과산화수소의 발생이 전제되어야 한다. 따라서 적절한 전자전달 반응 매개체의 투입을 통해 펜톤 반응에 의한 수산화 라디칼의 발생 효율을 크게 증진시킬 수 있음이 제안되었으며, 이러한 메커니즘은 금속-산소 클러스터(cluster) 물질로서 폴리옥소메탈레이트나(polyoxometalate) 자연 수계에 존재하는 휴믹산(humic acid) 등을 매개체로서 선택한 실험에서의 오염물질 산화처리 효율 증가를

통해 입증되었다. 용존 산소 외 실제 철의 환원력을 활용하여 라디칼 산소종 전구체로서부터(예: 과산화수소, 과황산염) 높은 반응성을 갖는 수산화 혹은 설페이트(sulfate) 라디칼을 형성시키는 연구 또한 이루어져왔다. 과산화수소와 나노영가철을 결합하는 경우 기존의 고전적 펜톤 반응에 비해 높은 오염물질의 분해 효율이 관측되었으며(초기 비교적 과량으로 투입된 철 이온의 경우 중합억제제(radical quencher)로 작용), 과황산염의 환원을 통한 고효율 설페이트 라디칼 생성은 나프탈렌(naphthalene), 다이나이트로톨루엔(2,4-dinitrotoluene) 등의 분해에 효과적인 것으로 밝혀졌다.

나노영가금속

기본적으로 영가상태의 금속입자들은 물속에서의 부식/용출을 통한 금속이온으로의 전환과정 동안 환원반응을 촉발할 수 있다. 결과적으로 영가금속입자들은 유기 혹은 무기 오염물질의 환원적 분해(예: 염화탄화수소 혹은 염화방향족의 탈염소화반응)에 직접 사용되거나 외부에서 투입된 라디칼 전구체(예: 산소, 과산화수소, 과황산염)로의 전자전달 유도를 통한 고반응성 라디칼종 형성에 활용될 수 있다. 후자의 경우 전구체로서 과산화수소 채택 시 유사펜톤산화(Fenton-like) 공정의 근간 메커니즘이 된다. 다양한 문헌을 통해 영가철 이외 영가알루미늄, 영가아연, 영가실리콘, 영가은 등이 상기한 처리 기법 구현을 목적으로 적용되어 왔으며, 클로로페놀, 다이옥신, 염화에틸렌 등의 환원 혹은 산화 처리 등이 그 사례이다. 특히, 구리는 철과 비교했을 때 약산성 혹은 중성 pH 처리 대상수에서의 응집/침전에 의한 안정성 저해에 비교적 덜 영향을 받는 것으로 알려져 있으며, 나노영가구리의 경우 펜톤반응과 동일한 메커니즘에 근거하여 과산화수소 조건에서 수산화 라디칼 형성 및 오염물질 산화분해를 기대할 수 있다. 구리산화물 입자의 경우 과황산염 활성화를 통한 유기물질 산화 처리에 활용된 사례가 있으며, 사우디아라비아 카우스트 대학교(King Abdullah University of Science and Technology) 장-필립 크루에(Jean-Philippe Croué) 교수 연구팀은 기존의 라디칼 형성을 통한 메커니즘이 아닌 유기물질과 과황

산염 사이의 전자전달반응을 촉진하는 매개체로서의 나노크기 구리산화물 입자의 역할을 제시하였다. 다시 말해, 전자주개(electron donor)로서의 유기오염물질과 전자받개(electron acceptor)로서의 과황산염간의 이중분자 전자전달은 결과적으로 유기오염물질의 산화분해로 나타남으로 이러한 전자전달을 원활하게 하는 산화 구리입자는 라디칼 형성에 의존하지 않는 반응경로를 통한 과황산염 활성화를 달성케 할 수 있다.

나노귀금속촉매

나노크기 귀금속 입자들은 기상 및 액상에서의 산화(예: 금 나노입자의 일산화탄소 산화반응 적용) 혹은 환원(예: 팔라듐 혹은 백금 나노입자의 니트로페놀(nitrophenol) 및 질산성 질소 환원반응 적용) 반응을 위한 촉매 소재로서 널리 활용되어 왔다. 미국 라이스 대학교의 마이클 웡(Michael Wong) 교수 연구팀은 팔라듐 및 금 나노입자를 합성하여 이를 염화에틸렌의 탈염소화반응을 통한 고속 처리에 적용하였으며, 특히 팔라듐과 금을 근간으로 하는 이중 귀금속 합성소재의 경우 단일 성분 귀금속 나노입자 대비 2000배 이상 빠른 탈염소화반응을 촉발시킬 수 있음을 제시하였다. 또한 나노귀금속 입자는 산화 반응 기반의 분해 메커니즘에 대한 저항성이 매우 높은 난분해성 오염물질(예: 퍼클로레이트(perchlorate))의 환원처리에 높은 적용 가능성을 나타낸다. 비귀금속류 나노촉매(예: 다공성 니켈)의 경우 부가적으로 수소 가스를 주입시킴으로써 오염물질(예: 질소계 소독부산물)의 환원 분해를 유발시킬 수 있는데 반해, 성공적 사례로서 미국 일리노이 주립 대학교(University of Illinois, Urbana-Champaign)의 티모시 스트라스만(Timothy Strathmann) 교수 연구팀은 외부 환원제제 주입없이 팔라듐과 레늄(Re)을 구성 성분으로 하는 이중 귀금속 나노 촉매만을 사용하여 액상의 퍼클로레이트를 염소 이온으로 환원시킬 수 있음을 제시하였다.

2) 산화물계 반도체 광촉매

금속산화물 반도체 광촉매는 광조사 조건에서 발생하는 전자-정공쌍의 촉매 표면 이동 후 촉발되는 산화-환원 반응을 기저 메커니즘으로 한다. 전자구조 특성상 반도체의 경우 적절한 수준의 광에너지 조사를 통해 활성화될 수 없으며 도체의 경우 광활성화를 통한 전자-정공쌍의(electron-hole pair) 생성이 가능하나 밴드갭(band-gap) 구조가 아니므로 빠른 전자-정공의 결합(electron-hole recombination)에 의해 도체 표면에서의 산화-환원 반응을 달성할 수 없다. 반면, 밴드갭을 갖는 반도체 물질의 경우 상온에서 적절한 수준의 광에너지 주입에 의해 전자-정공쌍을 만들어 낼 수 있으며, 전하 재결합도 일어나나 동시에 일부 전자와 정공이 반도체 표면으로 이동하여 무기 및 유기물의 산화-환원 반응을 유도할 수 있다. 이런 이유에서 나노크기의 반도체 물질들이 환경정화용 광촉매 소재로서 널리 활용되어 왔다. 반도체 광촉매의 상대적 활성 비교는 1) 광활성화를 위한 조사광의 파장대(필요 에너지)와 2) 생성 전자 및 정공의 환원 전위(촉매상 산화-환원 반응 효율)를 근거로 하여 이루어진다. 광활성화를 위한 적정 파장대는 반도체 물질의 밴드갭 에너지에 따라 결정되며 밴드갭 에너지가 낮을수록 파장장, 다시 말해 낮은 광에너지 조사 조건에서 전자-정공쌍의 생성을 달성할 수 있다. 전자 및 정공의 환원 전위를 통해 이론적으로 대상 유기 혹은 무기물질의 산화 및 환원 반응 촉발 가능성을 예측할 수 있으며, 특히 정공의 환원 전위는 고도산화공정의 주요 산화제로서의 수산화 라디칼 생성 가능 여부를 결정한다. 따라서 환경정화용 광촉매의 전자 구조는 비교적 낮은 광에너지 조사(예: 근자외선 혹은 가시광선)에 의한 광활성화를 가능케 하는 적절한 수준의 밴드갭 에너지와 물 혹은 수산화이온의 산화 반응을 통해 수산화 라디칼 형성을 유도할 수 있는 정공 생성에 적합한 가전자대 끝단 전위(valence band edge potential)를 포함해야 한다. 부가적으로 전도대 끝단 전위(conduction band edge potential)의 경우 용존 산소를 전자받게로서 활용하기에 적합해야 하며, 반대로 용존 산소의 환원이 열역학적으로 불가능한 경우 빠른 전자-정공쌍의 재결합으로 인해 표면에서의 의미있는 산화-환원반응을 기대하기 어렵다. 이런 필요조건에 근거하여 다양한 반도체 물질(그림 6) 가운데 환경광촉매로서 적용가능성을 갖는 나노물질은 제한적(이산화티탄 (TiO_2), 산화아연 (ZnO) 등)이다.

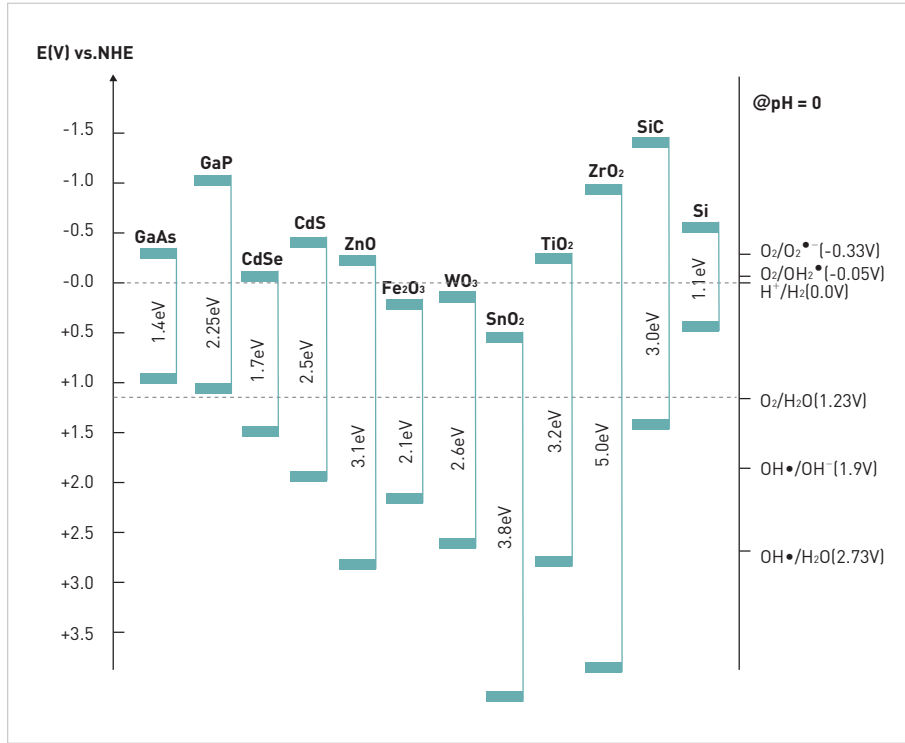


그림 6. 다양한 반도체 광촉매 물질의 에너지 준위 다이어그램 (Lee et al., Aquatic redox chemistry, Chapter 10에서 발췌)

이산화티탄 광촉매

이산화티탄은 상기한 환경정화용 광촉매의 전자구조적 특성을 적절히 보유한 소재로서 3.2eV 수준의 밴드갭 에너지는 380nm 이하의 근자외선 파장대 광조사를 통해 광활성화가 가능함을 의미하며 대략 2.7V_{NHE}의 가전자대 끝단 전위는 촉매 표면의 물 혹은 수산화이온으로부터의 효율적인 수산화 라디칼 형성을 달성케 한다. 특히 전도대 끝단 전위에 의한 용존 산소의 환원을 통해 전자-정공쌍의 재결합 효율을 낮춤으로써 적절한 수준의 전자-정공쌍의 촉매 표면 이동 및 그에 따른 산화-환원 반응 촉발을 기대할 수 있다. 그 외 이산화티탄의 경우 1) 높은 화학적 안정성, 2) 무독성(식품으로 분류; food-grade TiO₂), 3) 대량 생산을 통한 낮은 가격 등의 장점을 나타낸다.

일반적으로 이산화티탄 광촉매 산화 반응의 주요 경로는 정공 직접 산화와 라디칼 유도 산화로 구분되어 왔으며, 특히 산화 반응에 관여하는 라디칼로서 표면 결합(surface-bound) 수산화 라디칼, 자유(free) 수산화 라디칼, 슈퍼옥사이드 라디칼 음이온 등이 보고되어 왔다. 정공 직접 산화의 경우 수산화 라디칼 유도 산화 반응(양성자 추출 반응(proton abstraction), 수산화기 첨가 반응(hydroxylation), 전자 추출 반응(electron abstraction))에 대해 저항성이 높은 오염물질(예: 옥살산)의 분해에 효과적이다. 일반적으로 광촉매 반응의 경우 촉매 표면에 대한 접근성이 높은 혹은 촉매와의 친화성이 높은 오염물질일수록 빠른 분해능을 나타내는 것으로 여겨져 왔으나, 몇몇 연구문헌을 통해 광촉매 표면에서 생성된 수산화 라디칼이 어느 정도 거리를 이동(기상의 경우 약 $80 \mu\text{m}$ 수준)하여 오염물질을 산화시킬 수 있음(remote oxidation)이 밝혀졌다. 이는 광촉매 산화 반응에 있어서 자유 수산화 라디칼의 기여 가능성을 암시하는 결과이며, 특히 이러한 remote oxidation은 실내공기정화를 위한 광촉매 반응 메커니즘과 연관성이 높다. 슈퍼옥사이드 라디칼은 대상 반응물질에 따라서 산화제 혹은 환원제로서 작용할 수 있으며, 실제 활성산화종으로서의 반응성은 높은 낮은 것으로 알려져 있다. 그러나 슈퍼옥사이드 라디칼은 광촉매 상에서의 과산화수소 및 수산화 라디칼 생성에 있어서 전도대에서의 반응 메커니즘 구현에 중요한 중간 생성물이며 일부 제한적인 오염물질의 산화처리(예: 비소 3가의 5가로의 산화)에 높은 효율을 나타낸다.

상기하였듯이 이산화티탄 광촉매를 활용한 산화처리는 정공 혹은 수산화 라디칼의 높은 반응성에 기반함으로 거의 모든 유기오염물질을 분해시킬 수 있으며, 충분한 광조사 시간을 부여할 경우 유기물을 완전 무기화(mineralization)시킬 수 있다(이산화탄소, 물, 무기산으로 전환). 또한 속도론적으로 확산제한반응(diffusion-limited reaction kinetics)이므로 대부분의 유기오염물질에 대한 이중분자간 반응속도상수가 10^9 에서 10^{10} Ms 수준으로 측정된다. 결과적으로 광촉매 산화 반응은 다른 고도산화처리 공정에서와 동일하게 범용적으로 거의 모든 유기물질 처리에 적용 가능하며 그 처리 속도 또한 생물학적 처리 기법에 비해 매우 신속하다. 그러나 극소수 이긴 하나 이산화티탄 광촉매 반응에 매우 저항성이 높은 대표적 유기물질은 최근 신종 유해물질로서 주목을 받고 있는 과불화합물(예: perfluorooctane sulfonate(PFOS)) 등을 꼽을 수 있으며, 이는 매우 강한 탄소-불소간 결합력에 기인한다. 대부분의 에스-트리아진계열(s-triazine) 제초제(예: atrazine, simazine)의

산화 처리 후 형성되는 부산물로서 시안화요산(cyanuric acid) 또한 광촉매 산화 반응에 저항성이 높은 오염물질의 사례로서 수 일에 걸친 광조사 조건에서도 안정적으로 잔류할 수 있음이 관찰되었다.

이산화티탄 광촉매의 개질 기법은 1) 가시광활성 부여, 2) 전자-정공쌍 재결합 저해 혹은 계면간 전하전달(interfacial charge transfer) 촉진, 그리고 3) 오염물질과의 친화성 증가 등을 목적으로 적용된다. 이산화티탄 광촉매의 개질 방법은 다른 금속산화물 기반 반도체 광촉매의 개질에도 공통적으로 활용될 수 있다(그림 7).

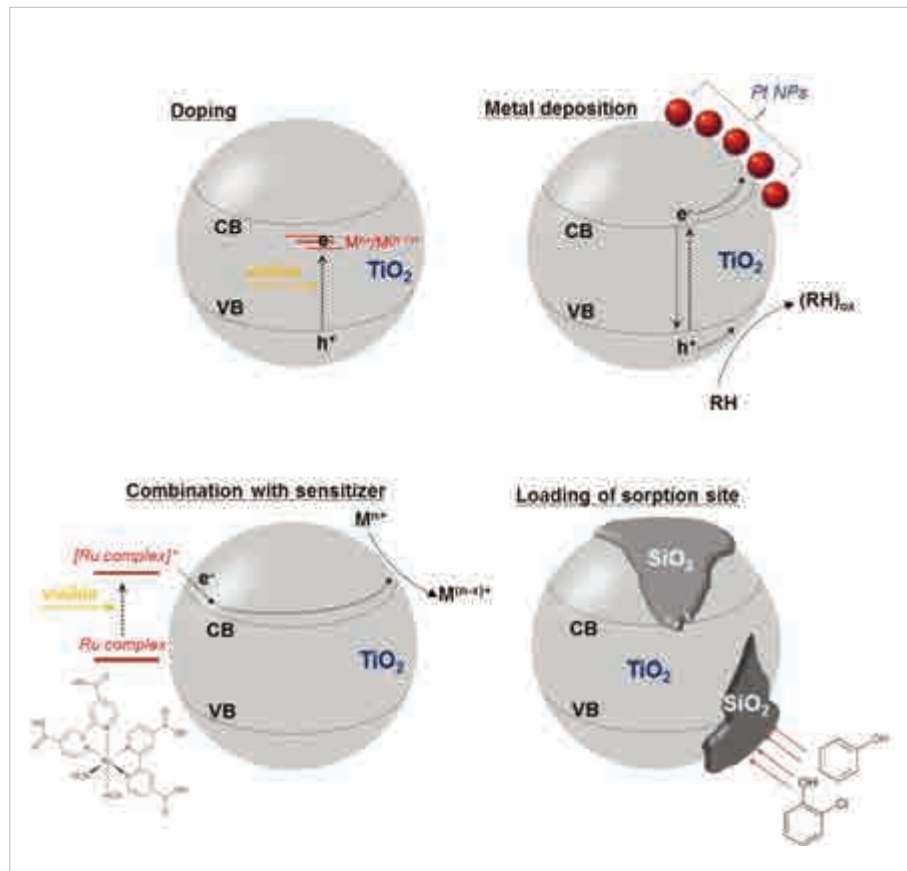


그림 7. 반도체 광촉매 물질의 개질 기법

도핑기법

밴드갭 에너지를 고려하였을 때 이산화티탄 반도체 광촉매는 근자외선 영역이하의 파장대에서 광활성화를 통한 전자-정공쌍의 형성이 가능하나, 적절한 촉매 개질 기법을 통해 가시광영역에서의 광촉매적 산화-환원 반응 유도를 기대할 수 있다. 대표적인 가시광활성화 개질 방법은 금속 양이온(예: V, La, Pt) 혹은 비금속 음이온(예: C, N, S) 등을 불순물(도펀트(dopant))로서 이산화티탄 격자구조 내 구성 원자들(Ti 혹은 O)과 치환시킴으로써 밴드갭 구조 내 새로운 에너지 수준을 만들어 내는 도핑 기법이 있다(그림 7). 도핑 기법을 적용할 경우 적용 금속 양이온(예: Fe, Mo, Rh)에 따라 단순히 자외선 조사 시 전하분리 효율 증가를 통한 광촉매 효율 상승 효과 또한 기대할 수 있으나, 일반적으로 순수한 이산화티탄 밴드갭 보다 낮은 광에너지로 광촉매를 활성화시킬 수 있으므로 가시광활성 부여가 가능하다. 이러한 금속 양이온으로 도핑 개질된 이산화티탄의 경우 가시광조사 조건에서의 중금속 환원, 염료계 오염물질의 탈색, 다양한 염소계 오염물질의 탈염소화 등 적용사례가 보고되고 있다. 특히, 미국 캘리포니아 공과대학교(California Institute of Technology) 마이클 호프만(Michael Hoffmann) 교수 연구팀은 2009년 13가지 금속 양이온을 활용하여 이산화티탄 광촉매를 도핑한 결과 메틸렌 블루 염료와 요오드 이온의 가시광 산화에 있어서 Cr과 Pt를 활용할 경우 가장 높은 가시광활성을 관찰할 수 있음을 제시하였다.

2001년 Science 저널에 일본 도요타 중앙연구개발센터 료지 아사히(Ryoji Asahi) 박사 연구팀이 질소 도핑 이산화티탄 광촉매의 가시광활성에 관한 논문을 발표한 이래로 비금속 음이온을 활용한 도핑 기법에 대한 관심이 높아졌다. 금속 양이온 기반 도핑 기법의 경우 가전자대에서 금속 양이온 유래 에너지 준위(cationic metal ion-induced energy state)로의 전자 증량(electron promotion)을 통해 가시광조사에 의한 전자-정공쌍 형성이 이루어지는 반면, 질소 외 탄소 및 황을 사용하는 경우 비금속 이온 유래 에너지 준위로부터 전도대로의 전자 여기를 통해 가시광활성 부여가 가능하다. 질소, 탄소, 황 개질 광촉매를 활용한 에틸렌 글라이콜(ethylene glycol), 아조 염료계, 클로로페놀류 등의 분해 사례에서 나타나듯이 도핑 기법을 통한 개질법은 자외선 영역에서 광활성을 나타내는 이산화티탄의 가시광 혹은 태양광 조사 조건에서의 활용가능성 확보토록 하나, 부가적으로 나타날 수 있는 제한점을 고려해야 한다. 일반적으로 도핑 개질 이산화티탄 광촉매의 경우 자외선에서 낮은 효율(순수 이산화티탄 대비)을 나타내며 이는 적용한 도펀트(예: Co, Al)들이 오히려 전자-정공쌍의 재결합을 용이하게 함으로써 촉매 표면에서의 산화-환원 반응을 속도론적으로 저해하기 때문이다. 이외 도핑 개질법의 제한점으로 특히 비금속 음이온을 도펀트로 활용하였을 경우(전자 여기가 가전자대가 아닌 음이온 도펀트 유래 에너지 준위로부터 일어나므로) 가시광조사 조건에서 형성되는 정공들의 환원전위가 물이나 수산화이온으로부터 수산화 라디칼을 생성시키기에 충분히 높지 않을 수 있다. 따라서 순수 이산화티탄 광촉매와 비교했을 때 가시광활성은 있으나 특정 그룹이 오염물질만을 산화 분해시킬 수 있는 선택적 반응성을 나타낼 수 있다.

가시광감응제 표면 도입

이산화티탄의 전자구조 수정없이 가시광흡수가 가능한 유기 혹은 무기 광감응제(photo-sensitizer)를 촉매 표면에 담지함으로써 이산화티탄 광촉매의 가시광활성을 유도할 수 있다. 이 경우 광감응제가 가시광을 흡수하여 들뜬 상태(excited state)가 된 후 전자를 이산화티탄의 전도대에 주입함으로써 화학적 반응이 촉발된다(그림 7). 광감응제로부터 유래한 전자는 결국 이산화티탄을 전자전달매체로 활용하여 전자받게물질로 전달되며, 대상 오염물질에 따라 환원 반응을 통해 오염물질 처리 혹은 용존 산소로부터 활성산소종 형성 후 오염물질의 산화 분해로 귀결된다. 특히 염료계 광감응제를 활용하는 이산화티탄 광촉매 시스템은 기존의 염료감응 태양전지(Dye-sensitized solar cell (DSSC)) 메커니즘을 차용한 것으로 루세늄 착물(Ru complex) 계열의 염료 광감응제는 가시광조사 조건에서 들뜬 상태로 전환된 후 전자를 이산화티탄 전도대로 주입하고, 전달된 전자는 결국 광촉매 표면에서 사염화탄소(CCl_4)나 6가 크롬의 환원 반응($\text{Cr}^{6+} \rightarrow \text{Cr}^{4+}$)을 촉발할 수 있다. 값비싼 루세늄 착물 외 광감응제로서 대표적인 유기오염물질 그룹인 염료물질(예: Rhodamine B)들을 활용하는 경우, 가시광 조사조건에서 염료의 전자 주입은 결국 염료의 전자 손실, 즉 산화 반응으로 연결되며 주입된 전자는 광촉매 전도대를 따라 촉매 입자 표면에서 환경처리 관련 산화-환원 반응을 유발할 수 있다. 자기 감응(self-sensitization)이라고 알려진 메커니즘을 통해 가시광 염료는 탈색되며 동시에 상기하였듯이 염화탄소나 중속의 환원을 통한 독성 감소, 귀금속(예: 은이온) 회수, 혹은 과산화수소 및 산소의 연속적 환원을 통한 활성산소종 발생 등을 달성할 수 있다. 특히, 중국과학원(Chinese Academy of Sciences)의 진카이자오(Jincai Zhao) 교수 연구팀은 자기 감응 메커니즘을 통한 활성산소종 형성능을 이산화티탄 상의 백금 조촉매 담지를 통해 개선할 수 있음을 제시하였다. 즉, 자기 감응에 의한 염료물질의 탈색을 유도하는 메커니즘과 함께 가시광 조사 조건에서 산화 라디칼에 의한 페놀류의 이산화티탄 촉매상에서의 산화 분해를 일으킬 수 있었다. 비슷한 사례로 수산화기를 갖는 다양한 페놀류(예: 카테콜 (catechol), 퀴논(quinone), 클로로페놀) 등은 이산화티탄 표면에서 가시광흡수가 가능한 착물을 형성하며 가시광 조사 조건에서 들뜬 상태의 촉매 표면 착물이 이산화티탄의 전도대로 전자를 주입함으로써 페놀류의 산화가 촉발될 수 있다. 또한 동일한 메커니즘으로 전도대를 따라 이동한 주입 전자는 촉매상 산화-환원 반응에 관여할 수 있는데, 이러한 표면 착물 형성을 가능케 하는 화학제제로서, 에틸렌 다이아민 테트라아세트산(ethylenediaminetetraacetic acid: EDTA), 페놀계 레진(phenolic resin), 포르피린(porphyrin), 그리고 풀러렌(fullerene) 유도체 등이 있다.

무기 광감응제로서 이산화티탄과 가전자대 및 전도대 끝단 전위의 위치가 다른 반도체 광촉매를 결합(coupling)으로써 (1) 가시광 조사를 통한 산화-환원 반응 달성과 (2) 효율적 전자 분리를 통한 산화-환원 반응 효율 증가 두 가지 효과를 기대할 수 있다)의 후자의 경우 주로 자외선 조사 조건에서 기대할 수 있는 현상으로 적절히 다른 전자구

조를 갖는 이종의 반도체 광촉매를 결합시켰을 경우, 두 광촉매에서 광화학적으로 형성된 전자와 정공들이 각각 에너지적으로 유리한(energetically favorable) 방향으로(결과적으로 반대 방향) 이동하여 다른 반도체 광촉매상에 축적되게 된다. 결국 이러한 전자와 정공의 이동은 전자-정공쌍의 재결합 반응을 효과적으로 저해함으로써 산화-환원반응 효율의 극대화를 기대할 수 있다. 특히, 이산화티탄 광촉매와 관련하여, 이산화주석(SnO_2)이나 삼산화텅스텐(WO_3) 등과의 결합이 상기한 효율적 전하 분리 효과를 유발할 수 있다. 반면, 가시광활성을 갖는 반도체 광촉매와 결합하는 경우 상기한 유기 광감응제와 동일한 역할을 기대할 수 있다. 즉, 삼산화텅스텐 혹은 황화카드뮴(CdS) 등의 경우 가시광 조사 조건에서 전자-정공쌍을 발생시킬 수 있으며, 정공의 경우 잔류하여 산화반응에 관여하는 반면, 전자의 경우 결합된 이산화티탄 광촉매의 전도대로 주입, 이동하여 이산화티탄 촉매상의 환원 반응을 - 직접 환원적 처리 및 용존 산소의 연속적 환원을 통한 산화라디칼 유도 반응 - 촉발할 수 있다.

금속조촉매 담지

금속 양이온을 소량 불순물로 첨가, 반도체 광촉매의 구성 이온과 치환함으로써 광촉매의 활성 파장 영역을 조정하거나 전하 분리효율을 개선하는 금속 도핑 개질 기법과는 차별되게 반도체 광촉매 표면에 나노 크기의 금속 입자를 담지함으로써 광촉매의 활성을 증진시킬 수 있다(백금 이온 도핑 이산화티탄(Pt-doped TiO_2)과 백금 입자 담지 이산화티탄($\text{Pt-deposited TiO}_2$)은 상이한 광촉매임). 기본적으로 팔라듐, 백금, 금, 은 등의 귀금속계 나노입자를 이산화티탄과 같은 반도체 광촉매상에 고정화하였을 경우 높은 전자 친화도(electron affinity) 덕분에 담지한 귀금속 나노입자들이 자외선 조사를 통해 형성된 전도대 전자의 저장소(electron reservoir) 역할을 함으로써 결과적으로 전자-정공쌍의 재결합을 속도론적으로 저해할 수 있다(그림 7). 부가적으로 귀금속 나노입자의 경우 계면간 전자전달 반응 또한 촉진함으로써 이산화티탄 광촉매상에서의 산화-환원 반응 효율을 향상시킬 수 있으며, 사례로서 귀금속 담지 촉매상에서의 수소 생성, 사염화탄소 등 염화탄화수소 환원, 염료물질 탈색, 페놀류 산화 등의 가속화 등이 보고되어 왔다. 또한 은 입자의 경우 상기한 전자 저장소로서의 역할 외 높은 항균성 덕분에 다양한 살균 공정에서 타 귀금속 담지 광촉매 대비 높은 소독능을 나타내는 것으로 알려져 있다. 하지만 다양한 문헌 조사를 근거로 했을 때 상기된 귀금속류 나노입자 담지를 통한 전하 분리효율 및 계면간 전자전달을 상승 효과는 반드시 오염물질의 분해 속도 가속화로 귀결되어야 하나 그 담지 효과가 미미하거나 오히려 일부 오염물질(예: 삼염소에틸렌(trichloroethylene), 사염소에틸렌(perchloroethylene))의 분해 효율을 저해하는 작용을 하는 것으로 알려져 있다. 이는 귀금속류 나노입자가 상기한 메커니즘 외 조촉매로서의 역할을 할 수 있음을 제시하는 결과로서 실제 백금 나노입자 담지 이산화티탄의 경우 순수한 이산화티탄 광촉매상에서 유

도되지 않는 광촉매 반응경로를 촉발할 수 있는 것으로 알려져 있다. 예를 들어, 암모니아의 선택적 질소 전환(순수한 이산화티탄상에서는 질산화 질소로 산화전환됨), 알킬아민류의 알킬첨가반응(N-alkylation, 순수한 이산화티탄상에서는 주로 탈알킬반응(de-alkylation) 일어남), 혹은 무산소상에서의 빠른 삼염소아세트산 (trichloroacetic acid) 분해 등이 백금 담지 이산화티탄 촉매에서 촉발될 수 있는 것으로 알려져 있으며, 이는 단순한 전자-정공쌍의 재결합 저해와 같은 메커니즘으로 설명하기 어렵다.

표면흡착능 개질

광촉매 반응은 반드시 표면상에서의 반응(자유 라디칼 유도 반응을 통한 bulk phase에서의 산화분해)만으로 국한하여 설명할 수 없으나 광촉매 표면의 오염물질에 대한 친화도를 증가시키거나 흡착능을 개선하는 방식으로 처리 기법으로서의 광촉매 반응 효율을 향상시킬 수 있다. 가장 대표적인 접근법으로 다른 부도체 금속산화물(예: 실리카, 알루미늄)을 이산화티탄과 같은 광촉매에 담지함으로써 표면에(이온성) 오염물질과의 정전기적 친화도를 높여 처리 속도를 가속화할 수 있다(그림 7). 전하를 갖는 고분자 물질을 이산화티탄의 표면에 담지시키는 방법도 고려할 수 있으며, 특히 음전하를 띠는 나피온(nafion)과 같이 탄소-불소 결합으로 이루어진 고분자의 경우 촉매 표면 담지 시 양이온성 오염물질을 촉매상으로 끌어당겨 효과적으로 산화 처리되도록 할 수 있다. 탄소-불소 결합은 상기하였듯이 수산화 라디칼로 산화시킬 수 없으므로 재활용시 안정적으로 담지 상태를 유지하며 오염물질 산화 반응 시 중합억제제로서 작용할 가능성도 낮다. 유기 오염물질에 대한 흡착능이 높은 활성탄의 주요 구성 성분인 탄소계열의 개질 제제도 광촉매의 흡착능을 개선할 수 있으며, 사례로서 이산화티탄 전구체인 TEOS(tetraethoxy orthosilicate)와 PAN(polyacrylonitrile) 고분자 전구체를 전기방사법으로 뽑아 탄화시킴으로써 제조된 이산화티탄 담지 탄소 섬유 구조 또한 촉매상 오염물질의 유인을 용이케 함으로써 촉매의 광촉매 효율을 높일 수 있다. 반면, 단순히 촉매 표면의 오염물질 친화도 및 흡착 특성 개선 이외 제한적이긴 하나 촉매의 선택성을 향상시키는 방안으로서의 사례도 문헌을 통해 찾아볼 수 있다. 이스라엘 테크니온(Technion) 대학교의 야론 파즈(Yaron Paz) 교수 연구팀에서는 특정 오염물질(2-methyl-1,4-naphthoquinone)을 구별할 수 있는 분자인지구조(molecular recognition site)로서 베타 사이클로덱스트린(β -cyclodextrin) 유도체를 금과 이산화티탄의 패터화된 형태로 코팅된 도메인 중 금 표면에 선택적으로 담지하고 광촉매 반응을 유도한 결과, 수산화 라디칼 유도 반응이 특정 오염물질에 대해 선택적으로 높은 효율을 나타낼 수 있음을 제시하였다. 이는 분자인지구조체를 통해 선택적으로 광촉매 표면에 도달한 퀴논류(quinones)가 수산화 라디칼에 의해 산화됨으로써 나타나는 현상으로, 일반적으로 수산화 라디칼의 매우 강력한 산화력 때문에 비선택적인 반응만을 유도할 수 있는 것으로 알려진 광촉매 시스템의 오염물질 타겟형 적용 가능성을 암시하는 결과이다.

산화아연 및 삼산화텅스텐

산화아연(ZnO)은 이산화티탄과 거의 비슷한 밴드갭 에너지와 전도대 및 가전자대 끝단 전위를 나타냄으로 이산화티탄 외 가장 널리 적용되는 금속산화물계 광촉매 물질이다. 특히, 문헌에 따라 이산화티탄 대비 약간 낮은 밴드갭 에너지($E_g(\text{TiO}_2) = 3.2\text{eV}$ vs $E_g(\text{ZnO}) = 3.1\text{eV}$) 덕분에 산화아연 광촉매가 태양광 조사 조건에서 보다 높은 광촉매 활성을 나타낼 수 있는 것으로 보고된 바 있다. 반면 이산화티탄과 산화아연을 대상으로 광촉매 활성을 비교한 실험을 통해, 동일한 광물리적 성질에도 불구하고 보다 빠른 전자-정공쌍 재결합 속도와 더 낮은 양자 거둠율(quantum yield) 덕분에 이산화티탄이 오염물질 산화분해에 대해 상대적으로 높은 광촉매 활성을 보유하고 있음이 일반론이다. 특히 페놀류 산화분해에 산화아연을 적용하는 경우 이산화티탄 광촉매 산화반응 대비 방향족 중간생성물 생성이 보다 원활히 일어나는 것으로 나타나며, 관련하여 훨씬 낮은 무기화 효율이 관찰된다. 반면 염료 탈색 및 박테리아 소독 등의 적용 연구를 통해 제한적인 사례이긴 하나 이산화티탄 대비 산화아연의 광촉매 효율이 높은 것으로 나타났다. 산화아연은 산성 조건에서 광부식(photo-corrosion) 반응을 통해 아연 이온 용출이 유발됨으로 중성 및 염기성 조건에서의 수처리 적용에 적합한 것으로 알려져 있다. 상기한 산화아연에서의 효율적 전자-정공쌍 재결합에 근거하여 이산화티탄 대비 산화아연의 광촉매 반응은 외부 전자받개 물질(예: $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$, H_2O_2)의 투입을 통해 크게 개선될 수 있다.

삼산화텅스텐은 비교적 낮은 밴드갭 에너지(2.4-2.8eV)와 물 및 수산화이온 산화를 통해 수산화 라디칼을 형성시킬 수 있는 수준의 가전자대 끝단 전위($3.1V_{\text{NHE}}$)를 근거했을 때 가시광 조사 조건에서 라디칼 기반 광촉매 산화반응을 촉발시킬 수 있을 것이라 예상된다(그림 6). 그러나 삼산화텅스텐의 전도대 끝단 전위는 $0.4V_{\text{NHE}}$ 로서 일반적인 수계 전자받개로서의 용존 산소 환원 반응에 부적합함으로 빠른 전자-정공쌍 재결합에 의해 순수한 삼산화텅스텐의 경우 촉매 표면에서의 의미있는 산화-환원반응을 기대할 수 없다. 따라서 삼산화텅스텐상에서의 광촉매 반응을 촉발하기 위해서는 은, 백금, 산화구리 등과 같은 조촉매를 촉매 표면에 고정화하여 전하 분리를 극대화하는 방안이 제시되었다. 특히 백금 담지 삼산화텅스텐의 경우 질소 도핑 이산화티탄 대비 향상된 가시광 촉매 활성을 나타내었으며, 가시광 조사 조건에서의 수산화 라디칼 형성을 통해 페놀류, 염료, 염화아세테이트 등의 산화 처리가 가능성이 보고되었다. 용존 산소를 대체할 수 있는 전자받개 물질의 투입 역시 삼산화텅스텐상에서의 유기오염물질의 산화 및 무기화 반응을 크게 향상시킬 수 있다. 예를 들어 구리 이온 주입 시 Cu(I)/Cu(II) 산화-환원 사이클(redox cycle)을 통해 전자-정공쌍의 재결합을 속도론적으로 감소시켜 촉매상에서의 산화 분해 반응효율을 개선할 수 있으며, 효율적인 전자받개로서의 과황산염 혹은 과요오드산염 등의 첨가 역시 가시광 조사 조건에서의 삼산화텅스텐에 의한 다양한 유기오염물질(예: 염화페놀류, 약물질 등)의 분해반응을 촉발할 수 있다.

비-금속산화물계 광촉매

금속산화물계 광촉매의 가시광활성을 통한 오염물질의 분해는 상기하였듯이 도핑, 광감응제 담지, 혹은 이중 광촉매와의 결합 등과 같은 개질법을 적용해야 한다(그림 7). 반면, 이미 언급된 방식 외 고유한 밴드갭 에너지 덕분에 가시광활성을 보유한 비-금속산화물계(non-metal oxide) 나노물질을 대체 광촉매로서 활용하고자 하는 연구 동향 또한 존재한다. 실버 포스페이트(AgPO_4), 비스무스 바나데이트(BiVO_4), 카본 나이트라이드($\text{g-C}_3\text{N}_4$) 계열 나노물질 등이 대표적인 비-금속산화물계 가시광 광촉매로서 문헌상에 보고되고 있다. 실버 포스페이트의 경우 가시광활성과 함께 낮은 독성과 양의 방향으로 큰(highly positive) 가전도대 위치($2.9 \text{ V}_{\text{NHE}}$) 덕분에 물 산화나 오염물질의 산화 처리에 널리 이용되고 있다. 산화 메커니즘은 강력한 산화력을 갖는 정공과 물 혹은 수산화 이온 산화를 통해 생성 가능한 수산화 라디칼에 의해 촉발되나, 문헌에 따라 용존 산소의 다중 전자전달 반응(multi-electron transfer)을 통한 과산화수소의 생성($\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$)과 관련한 수산화 라디칼 생성 경로도 제시되고 있다. 실버 포스페이트는 은, 브롬화(AgBr)은, 반도체 광촉매(예: TiO_2 , BiVO_4) 그래핀 산화물, 탄소나노튜브 등과의 이종접합(heterojunction)을 통해 가시광 조사 조건에서 비스페놀에이나 염료계 오염물질의 신속한 탈색 반응을 유도시킬 수 있으나, 광부식 반응을 통한 자체 분해 가능성이 지속적으로 제기되는 이슈이다. 비스무스 바나데이트 역시 낮은 밴드갭 에너지(2.4 eV)와 충분히 큰 가전자대 끝단 전위($2.4 \text{ V}_{\text{NHE}}$) 덕분에 가시광 조사 조건에서 다양한 오염물질(예: 알킬페놀류(alkylphenols), 염료계 오염물)의 산화 처리를 촉발할 수 있는 것으로 알려져 있다. 반면, 낮은 흡착능과 전자-정공쌍의 비효율적 이동성 때문에 팔라듐, 은과 같은 귀금속류 혹은 코발트 및 구리 산화물 등의 금속산화물계 조촉매 담지를 통해 가시광활성 향상을 도모하고자 하는 노력이 문헌을 통해 나타난다. 카본 나이트라이드는 상기한 두 비-금속산화물계 광촉매와 마찬가지로 주로 물 분해(water splitting) 연구 분야에서 많이 다루어졌으나 최근 그 가시광활성 ($E_g(\text{g-C}_3\text{N}_4) = 2.7 \text{ eV}$)에 주목하여 제한적이긴 하나 환경광촉매로서의 가능성에 제시되고 있다. 상기한 두 광촉매 물질과는 달리 상대적으로 전도대와 가전자대의 끝단 전위가 음의 방향으로 이동해 있으므로($\text{CB} = -1.3 \text{ V}_{\text{NHE}}$, $\text{VB} = 1.4 \text{ V}_{\text{NHE}}$) 정공 직접 산화 혹은 물이나 수산화 이온으로부터의 수산화 라디칼 형성보다는 라디칼 전구체(예: H_2O_2)를 투입하여 환원 반응을 통해 산화제를 발생시키는 시도들이 보고되고 있다.

3) 탄소 기반 나노물질

탄소계 나노물질은 일반적으로 탄소 원자의 구조 내 배열 형태(structural conformation)나 그 혼성 상태(hybridization state)에 따라 각각의 물리적, 화학적, 광학적, 열적, 전기적 특성이 크게 변화한다. 그에 따라 여러 종류의 탄소 기반 나노물질들이 존재(그림 8)하며, 특히 환경 수처리 공정에 활용가능한 탄소계 나노물질로서 대표적인 소재들은 플러렌, 탄소나노튜브, 그리고 그래핀 등을 고려할 수 있다. 넓은 비표면적, 균일한 나노크기의 다공 구조, 유기물과의 친화성 등을 근거하여 탄소나노튜브나 그래핀의 경우 흡착제 혹은 분리막 소재로서의 잠재적 이용 가능성이 최근 문헌을 통해 보고되고 있다.

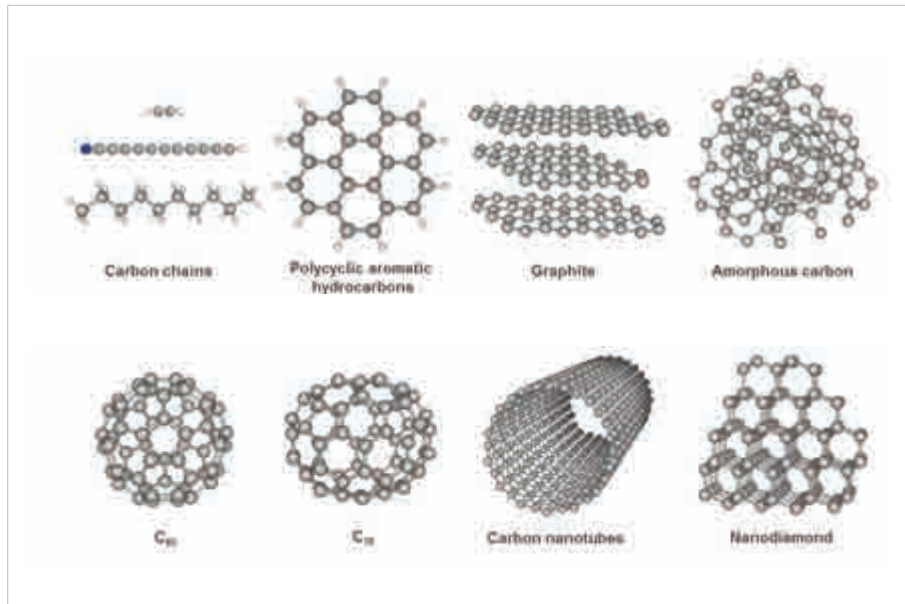


그림 8. 탄소 기반 나노물질 (Ehrenfreund et al., Science (2010)에서 발췌)

반면 플러렌의 가시광활성과 탄소나노튜브 및 그래핀의 전자전달매개 활성 등은 화학적 수처리 메커니즘과 연관성을 갖는다. 플러렌의 경우 가시광 조사 조건에서 에너지 및 전자전달을 통해 활성산소종을 형성시킬 수 있으며, 탄소나노튜브 및 그래핀의 경우 전자받개와 전자주개, 이종분자간의 전자전달을 촉진함으로써 산화-환원 반응을 촉발시킬 수 있다.

플러렌

1996년 크로토(Kroto) 등에 의해 최초로 발견된 플러렌은 탄소 원자로만 구성(흑연, 다이아몬드 등의 동소체(allotrope))된 속이 비어있는 구 형태(buckyball)의 구조를 갖으며 C₆₀, C₇₀, C₇₆, C₈₀, C₈₂, C₈₄ 등 다양한 이성질체를 갖는다. 플러렌은 가시광 조사 조건에서 들뜬 삼중항 상태(photo-excited triplet state)로 전환된 후 과도한 광에너지를 용존 산소로 전달함으로써 높은 산화력을 갖는 활성산소종인 단일항 산소(singlet oxygen)를 형성할 수 있다. 특히, 단일항 산소 형성에 대한 양자 거둠율은 거의 1에 가까우며, 이는 광자 하나당 한 개의 단일항 산소를 생성할 수 있음을 의미한다. 또한, 적절한 전자주계가 존재하는 경우 전자주계로부터 전자를 추출하여 용존 산소로 전달함으로써 슈퍼옥사이드 라디칼 음이온을 활성산소종으로 발생시킬 수 있다. 가시광 조사 조건에서의 에너지 혹은 전자전달을 통해 활성산소종을 형성한 후 들뜬 상태의 플러렌은 기저 상태(ground state)로 되돌아가므로 이론적으로 플러렌은 촉매적 활용이 가능하다.

이런 높은 가시광활성을 갖는 플러렌을 수처리 공정 소재로서 이용하기 위해서는 매우 낮은 수용해도(~10⁻⁹ mg/L)를 갖는 플러렌의 표면을 친수성이 높은 기능기로 개질할 필요가 있다. 미국 듀크 대학교(Duke University)의 마크 위즈너(Mark Wiesner) 교수 연구팀은 플러렌의 표면을 다수의 수산화기로 개질한 플러롤(fullerol: C₆₀(OH)₁₈₋₂₂)을 활용하여 대장균이나 MS2 박테리오파지(bacteriophage) 등을 불활성화시킬 수 있음을 보고하였으며, 이는 광조사에 의한 단일항 산소 형성 메커니즘에 기인한다. 반면 수용해도 증가를 위한 과도한 수산화기 표면 도입은 플러렌의 전자구조를 급격히 변화시킴으로 비개질 플러렌과 비교하였을 때 활성산소종 형성을 위한 가시광활성의 손실이 큼을 관찰할 수 있었다. 따라서 미국 라이스 대학교와 조지아공과대학교(Georgia Institute of Technology)의 페드로 알바레스(Pedro Alvarez)와 김재홍(Jae-Hong Kim) 교수 연구팀은 카르복실 혹은 암모늄과 같은 친수성 말단 기능기를 2, 4, 혹은 6 개 갖는 다양한 C₆₀ 플러렌 유도체(단일항 산소 형성능을 기반으로)가 플러롤 대비 훨씬 높은 가시광활성을 보유한 것으로 보고하였으며, 이를 활용하여 자외선 조사 조건의 이산화티탄 광촉매 대비 30배 이상 빠른 MS2 박테리오파지 불활성화를 달성하였다. 특히, 가장 높은 가시광활성을 갖는 것으로 밝혀진 tetrakis 혹은 hexakis C₆₀ amino-fullerene(암모늄 말단 기능기로 개질된 유도체)의 경우 최근 신중수계오염물질로서 구분되는 다양한 약물질 산화 처리에 매우 효율적인 것으로 관찰되었다. 특히 금속산화물 기반 가시광활성 촉매(예: 탄소 도핑 개질 TiO₂, 백금 담지 WO₃) 대비 특정 약물질(예: ranitidine, cimetidine)에 대해 훨씬 빠른 분해 속도를 가능케 하였으며, 실제

하수 2차 처리수 조건 실험 결과 약물질의 산화분해에 있어서 배경유기물의 간섭 효과 또한 미미한 것으로 나타났다(이산화티탄 광촉매 상에서 촉발되는 수산화 라디칼 기반 산화 반응의 경우 배경유기물 존재 시 활성이 크게 감소함). 특히, C₆₀ 유도체의 기능기는 실리카 기반 지지체 담지 시 가교 역할을 할 수 있으므로 물리적 여과를 통해 분리가 용이한 tetrakis 혹은 hexakis C₆₀ aminofullerene 담지 실리카 합성이 가능하며, 이러한 고정화 과정에서의 활성산소종 형성능 혹은 오염물질 분해능 측면에서 광화학적 활성 감소 효과가 크지 않음을 관찰하였다. 플러렌의 재사용 및 수계 유출 방지를 달성을 위한 처리 후 분리 기법으로서 다공성 실리카에 나노 마그네타이트(magnetite) 입자를 함침시킴으로써 지지체를 구성하고 그 위에 플러렌을 담지하는 방식의 접근법이 제안되었으며, 이를 통해 합성된 촉매는 자성 분리가 가능하며 광조사를 통해 오염물질 산화 분해 및 바이러스 불활성화를 촉발할 수 있었다. 또한, 플러렌과 이산화티탄 표면에 존재하는 수산화기를 통해 가시광활성 광감응제로서 플러렌의 이산화티탄 촉매 표면 담지가 가능하며 이 경우 가시광 조사 조건에서 플러렌에서 이산화티탄으로의 전자 전달을 통해 다양한 오염물질(예: 클로로페놀, 크롬 6가 등)의 산화-환원 반응이 이루어질 수 있음이 보고되었다.

탄소나노튜브 및 그래핀

전자전달을 효율적으로 매개할 수 있는 탄소나노튜브와 그래핀의 특성은 오염물질의 처리와 관련성이 있는 산화-환원 반응의 촉발하거나 가속화할 수 있다. 이는 탄소 기반 나노소재의 소수성에 기인한 유기오염물질의 용이한 촉매 표면 흡착으로 설명할 수도 있으나 일반적으로 전자전달매개능의 개선과 연관시킨다. 탄소나노튜브 혹은 그래핀을 금속산화물 계열 반도체 광촉매와 결합하였을 경우 탄소 기반 나노물질은 전도대 전자를 효율적으로 추출하여 계면간의 전자전달을 통한 용존 산소의 환원을 촉진하므로 결론적으로 반도체 광촉매에서 형성된 전자-정공쌍의 재결합을 효율적으로 방지한다(그림 9). 유기오염물질 분해 및 중금속(예: 비소) 산화 등의 결과를 통해 이러한 개질법은 전자 친화도가 높은 귀금속류(예: Pd, Pt) 나노입자의 광촉매 표면 담지를 통해 기대할 수 있는 효과와 대동소이한 결과를 가져오며, 특히 최근 귀금속을 활용하지 않는 촉매 시스템(noble metal-free catalytic system)에 대한 시장 요구를 고려했을 때 향후 발전 가능성을 기대할 수 있다.

탄소나노튜브 혹은 그래핀의 경우 코발트나 망간 등의 금속나노입자와는 다른 메커니즘으로 과황산염을 활성화할 수 있다. 즉, 과황산염의 환원 반응을 통한 고활성 설페이트 라디칼의 형성이 아닌, 전자주개로서의 오염물질과(예: 페놀류) 전자받개로서의 과황산염간의 전자교환을 촉진함으로써 과황산염 존재 시 탄소나노튜브 혹은 그래핀 산화물의 적용은 오염물질의 산화 분해를 촉발할 수 있다(그림 9). 호주 커틴 대학교(Curtin University)의 샤오빙 왕(Shobing Wang) 교수 연구팀은 그래핀 산화물 상에서 과황산염의 활성화를 통한 페놀류의 분해 가능성을 제시하였으며, 특히 질소 도핑을 통한 탄소나노튜브의 전도도 및 전자전달매개능 증가를 통해 과황산염 활성화 효율을 개선하여 순수한 탄소나노튜브 대비 페놀의 분해 속도를 크게 가속화할 수 있음을 제안하였다. 역시 라디칼이 관여하지 않는 활성화 메커니즘 제안에 대한 연구로서 한국 고려대학교 및 울산과학기술대학교의 이재상, 이창하 교수 연구팀은 탄소나노튜브에 의한 과황산염 활성화 시 비선택적인 설페이트 라디칼의 반응성과는 무관하게 오염물질 별로 분해 효율이 매우 큰 차이를 보임을 제시하였다.

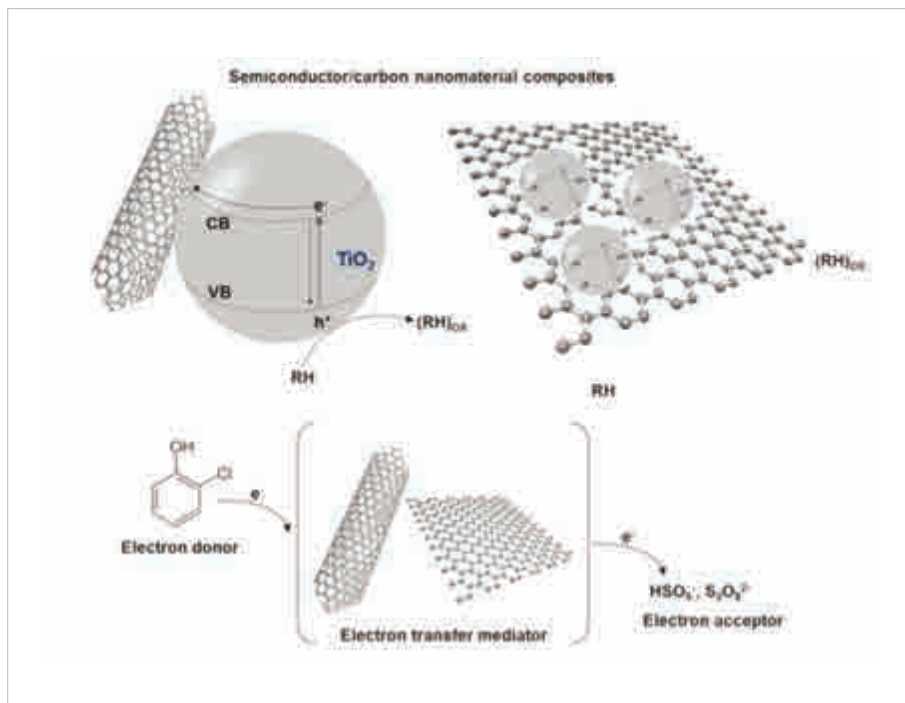


그림 9. 탄소나노튜브 및 그래핀의 촉매 시스템 적용

2.2. 나노물질을 이용한 물리학적 수처리

나노물질이 활용될 수 있는 물리학적 수처리 기법은 흡착과 여과이며, 이는 기존의 활성탄 흡착제나 고분자 기반의 분리막을 대체하거나 혹은 통용되는 물리학적 수처리 환경 소재와의 결합을 통해 성능을 향상하는 방식으로 발전되어 왔다. 또한 나노물질의 첨가를 통해 처리 효율 외 자성(magnetism), 항균성, 광촉매 활성, 고강도 등 부가적 기능성을 확보토록 할 수 있다. 관련 나노물질로서 금속산화물계 나노입자 및 탄소계 나노물질(예: 탄소나노튜브, 그래핀) 등의 활용 가능성이 제시되어 왔다.

1) 금속산화물계 흡착제

높은 비표면적, 짧은 입자 내부 확산 거리(intra-particle diffusion distance), 그리고 다량의 표면 반응 자리(reaction site) 등의 특징으로 인해 나노스케일의 금속산화물(예: 산화철, 이산화티탄, 알루미늄)은 중금속(예: 카드뮴, 수은, 크롬, 구리) 흡착 소재로서 활용되어 왔다. 사례로서 무기 및 유기 오염물질의 흡착 제거에 널리 활용되고 있는 활성탄 대비 자철광(magnetite: Fe_3O_4)이나 이산화티탄 나노입자 경우 비소와 같은 중금속 오염물질의 흡착 처리에 탁월한 효율을 나타내는 것으로 알려져 있다. 특히, 비표면적으로 표준화(normalization)하였을 경우 10nm 크기의 자철광 나노입자는 수 백 nm 나노입자 대비 3배 가량 높은 비소 흡착 성능을 나타내었으며 이는 금속산화물 기반 나노입자의 높은 흡착능이 비단 비표면적에 국한된 구조 인자 때문만이 아니라는 것을 의미한다. 즉, 자철광이 나노입자화되면서 표면 구조가 개질되어 나타나는 새로운 반응 자리 생성의 가능성을 암시한다. 미국 라이스 대학교 연구팀에 의해 개발된 자철광 나노입자 기반 흡착 시스템(arsenic-cleansing nanorust)은 2009년 실제 멕시코의 구안후아토(Guanajuato)에 위치한 수처리 시설에서 음용수 비소 제거 목적으로 시험 적용된 사례가 있다. 높은 흡착 효율 외 금속산화물계 흡착제의 경우 단순한 pH 조정을 통해서 쉽게 재활용이 가능한 것으로 알려져 있으며, 실제 여러 번의 재사용 결과 흡착 성능이 지속적으로 유지될 수 있음이 문헌을 통해 제시되고 있다.

2) 탄소기반나노물질 흡착제

탄소계 나노물질의 경우 부피 대비 높은 비표면적과 함께 다공성 구조 및 개질이 용이한 표면 특성 덕분에 활성탄 기반의 흡착제를 대체하기 위한 나노소재로서 활용 가능성이 제시되어 왔다. 특히, 탄소나노튜브의 경우 표면상에서 유기오염물질과 다양한 상호작용(예: 소수성 효과, $\pi-\pi$ 상호작용, 수소 결합, 공유 결합, 정전기적 상호작용 등)이 가능함으로 여러 구조 특성을 갖는 유기물의 흡착을 가능케 한다. 탄소나노튜브 상의 이러한 다변화된 흡착 메커니즘의 구현을 통해 활성탄의 주요 소재적 결함으로서 저분자량 극성 유기물질에 대한 낮은 흡착 성능과는 차별되게 다양한 유기물 제거를 위한 범용적 활용 가능성을 기대할 수 있다. 예를 들어, π 전자가 풍부한 탄소나노튜브 표면의 경우 탄소 이중결합이나 벤젠링 구조를 포함하는 탄화수소계 유기오염물질에 대해 높은 흡착 성능을 나타내며, 전자공여가 가능한 탄소나노튜브 표면 반응 자리의 경우 카르복실기, 수산화기, 아민기 등을 보유한 유기물과의 수소 결합 형성을 통해 효율적인 흡착 반응을 유도할 수 있다. 상기하였듯이 탄소계 나노물질의 경우 적절한 화학 처리 방법을 통해 표면에 여러 기능기를 도입할 수 있으며, 이를 통해 특정 구조의 유기오염물질의 선택적으로 흡착할 수 있는 소재로서의 변환이 가능하다. 예를 들어, 친수성 수산화기나 카르복실기로 표면 개질된 탄소나노튜브의 경우 활성탄 대비 보다 높은 저분자 극성 오염물질의 흡착 처리를 가능케 하며, 표면 산화처리된 탄소나노튜브의 경우 정전기적 상호작용을 통해 구리, 납, 카드뮴, 아연 등의 금속 이온들을 효율적으로 제거할 수 있는 것으로 알려져 있다. 직접 흡착을 통한 활용 외 높은 비표면적 덕분에 탄소나노튜브는 금속산화물계 나노입자의 지지체로서도 이용된 사례를 찾을 수 있다. 예를 들어 이산화세륨 나노입자를 탄소나노튜브의 표면에 담지한 융합 소재의 경우 비소나 크롬의 제거에 활용 가능하며 알루미늄 입자를 탄소나노튜브 상에 고정화하여 불소 이온을 흡착 처리할 수 있다.

3) 나노물질 기반 분리막

최근 여과공정의 핵심 소재로서 각광받고 있는 분리막 소재 개질을 위해 금속 및 금속산화물계 나노입자와 탄소나노튜브 등이 사용되고 있으며, 이를 통해 분리막의 투과성(permeability) 개선, 막오염 저항성(fouling resistance) 부여, 기계적 강도 및 열적 안정성 확보, 기타 새로운 부가 기능(예: 광촉매 활성화, 자기 세정) 장착 등을 가능케 할 수 있다. 알루미늄, 이산화티탄, 실리카, 제올라이트 등 금속산화물계 나노입자를 고분자 분리막에 첨가하였을 경우 막의 친수성을 증가시킴으로써 막오염 현상의 감소를 유도할 수 있으며, 이외 투수성을 개선함과 동시에 고분자막의 열적, 기계적 안정성을 높일 수 있다. 또한, 은 나노입자나 탄소나노튜브와 같은 항균성을 갖는 나노물질을 고분자 분리막 내 함침하거나 표면에 코팅함으로써 분리막상의 바이오필름 생성을 억제할 수 있다. 오염물질의 화학적 산화를 촉발하는 이산화티탄 광촉매나 영가철 나노입자를 고분자 분리막과 결합시킴으로써 여과와 동시에 막 표면에서의 오염물질의 산화 분해를 달성시키고자 하는 기술적 노력 등도 문헌을 통해 찾을 수 있다. 특히, 정삼투(forward osmosis) 혹은 역삼투(reverse osmosis) 막 공정에 활용되는 초박막 나노복합체 분리막(thin film nanocomposite membrane)에 다공성의 제올라이트, 은 나노입자, 이산화티탄 나노입자, 탄소나노튜브를 도입함으로써 투수성 및 막오염 저항성 등의 성질을 개선하고자 하는 시도 등이 지속적으로 이루어져 왔으며, 실제 미국 캘리포니아 주립대학교(University of California, Los Angeles) 에릭 호크(Eric Hoek) 교수 연구팀은 NanoH₂O라는 분리막 제조회사와 공동연구를 통해 상용화된 TFC 분리막을 개발하였다(그림 10).

수직배양 탄소나노튜브 분리막은 기존 유체 유동 이론에 의해 예측된 값보다 만에서 십만 배 빠른 유속을 구현할 수 있다는 점에서 최근 관련된 많은 연구활동이 이루어지고 있다. 이는 탄소나노튜브의 나노스케일 채널과 함께 소수성 및 튜브 내부 벽의 미끄럼 정도에 의해 튜브 채널 내에 흐르는 물 분자에 대한 매우 낮은 마찰 저항이 유도됨으로써 나타나는 현상으로 예상하고 있다. 동일한 기대 효과를 고려하여 최근 그래핀 산화물 기반의 분리막 또한 한양대학교 박호근 교수 연구팀에서 제조에 성공, 그 성능을 2013년 Science에 보고한 바 있다. 반면, 수직배양 탄소나노튜브는

여전히 그 제조가 기술적으로 어려우므로 또 다른 활용처로서 역삼투 고분자 분리막에 탄소나노튜브를 혼재시킴으로써 기계적 강도를 높이고자 하는 노력 또한 이루어지고 있다. 상기하였듯이 탄소나노튜브와의 소재 융복합은 분리막의 흡착능, 항균성, 열적 안정성 측면에서의 개선 효과 또한 기대할 수 있다.

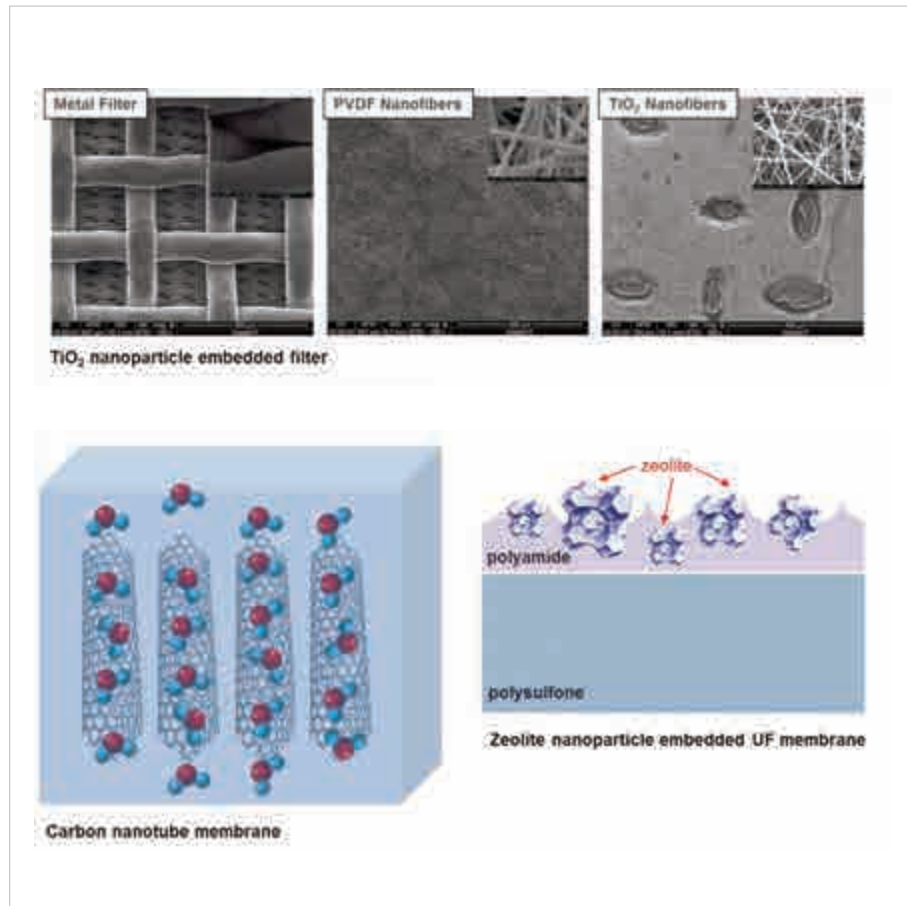


그림 10. 나노물질 기반 분리막 (Ramasundaram et al., Journal of Hazardous Materials (2013)에서 일부 발췌)

03

나노물질의 환경영향성

나노물질의 환경 기술을 위한 적용을 위해 고려되어야 할 우선 사항은 나노물질 기반의 환경 소재에 대한 안정성 확보 여부이다. 이에 대응하여 지지체 고정화, 자성 분리, 후단의 여과 회수 공정 등이 나노물질의 환경 유출 방지를 위한 방안으로서 제시되고 있으며, 아울러 동일한 기능성을 지니면서 현저히 낮은 생태 독성 혹은 인체 유해성을 갖는 나노물질의 설계 관련한 연구들도 활발히 진행 중에 있다.

나노물질의 생물학적 유해 효과(adverse biological effect)는 활성산소종 발생, 산화스트레스, 단백질 분해, DNA 파괴, 식세포기능성 변이, 신경조직 침투, 염증 등 다양한 메커니즘을 통해 발현 가능한 것으로 알려져 있다. 예를 들어 탄소계 수처리 적용 가능 나노소재로서 기술된 플러렌의 경우 콜로이드 형태, 고분자 표면 코팅 형태, 수산화기 혹은 카르복실기에 의한 표면 개질 형태, 금속 결합 형태 등이 공히 세포독성(cytotoxicity), 항박테리아성(anti-bacterial activity), 단백질접힘 방해(protein folding inhibition), DNA 상해 등의 효과를 나타내는 것으로 알려져 있으며 동물실험을 통해 생체축적 가능성 또한 제기되고 있다. 나노물질의 유해성과 관련하여 초창기 연구는 주로 나노스케일의 입자성에 근거하여 기상오염물질로서 분류하였으나, 최근 많은 연구들은 상기한 유해성은 에너지/전자전달, 산화-환원 표면 반응, 광화학적 전자-전공쌍 형성, 및 구성금속 용출 등과 관련한 나노물질의 고유 특성과 연관성이 높은 것으로 제안하고 있다. 이에 근거하여 문헌에 따라 나노물질은 약물질, 내분비 교란 물질, 중금속, 과산화합물 등과 함께 최근 환경 이슈로서 신중유해물질로 분류하고 있다. 이미 다양한 생물학적 지표군(biological indicator)을 통해 확인된 상기 나노물질의 생태학적 독성 유발 가능성 외 약물질 가운데 항생제의 수계 유출을 통한 생물학적 수처리 공정 교란 가능성과 함께 항박테리아성을 보유한 나노물질의 수처리 시설 내 유입 또한 동일한 효과를 유발할 것이라는 연구 결과 또한 주목할 만 하다.

바로 제조된(freshly prepared; pristine) 나노물질을 대상으로 한 독성 평가 연구 결과에 기반하여 제기된 나노물질의 생물학적 유해성과 실제 나노물질이 자연 수계, 대기, 토양 환경시스템에 유출되었을 때 발현되는 환경위해성 및 생태독성과의 연관 가능성을 탐구하기 위한 노력 또한 나노물질의 환경 내 거동(environmental fate and behavior)

이라는 연구주제로 이루어져왔다. 결국 나노물질의 환경위해성평가(environmental risk assessment)란 나노물질의 생물학적 유해 효과 및 독성과 함께 나노물질에 대한 노출 가능성을 동시에 고려해야 한다($\text{risk} = \text{toxicity} \times \text{exposure}$). 나노물질에 대한 노출 시나리오와 관련하여 환경내 나노물질 거동 연구의 사례로서, 낮은 수용해성 및 강한 소수성을 갖는 탄소계 나노물질의 수계 환경 유출 시 고유 특성, 화학 조성, 이동성, 및 독성 등의 변형 가능성이 제시된 바 있다. 탄소나노튜브의 경우 휴믹산 혹은 자연유기물(natural organic matters) 등과의 상호작용을 통해 수계 현탁상태(aqueous dispersion)를 쉽게 형성하며 이는 탄소나노튜브의 수용액상 활용을 위해 이용되는 계면활성제(surfactant)의 역할에 비견된다. 플러렌의 수계 이동성과 관련한 시나리오 연구 사례로서 미국 라이스 대학교의 조셉 휴즈(Joshep Hughes) 연구팀은 극도로 낮은 수계 용해도를 나타내는 C₆₀ 플러렌이 장기간 동안 물 속에 체류할 경우 수계에 매우 안정적인 콜로이드를 형성할 수 있음을 제시하였으며, 특성 분석을 통해 콜로이드는 수십에서 수백 나노 크기의 특징적인 결정성 보유하고 있으며 친수성 기능기 형성 등은 표면상에서 일어나지 않는 것으로 확인되었다. 따라서 이런 결과들은 탄소나노튜브나 플러렌의 경우 자연 수계 유출 시 일반적으로 강한 소수성에 기반하여 예상되는 침전현상이 아닌 자연유기물과의 상호작용 혹은 자체의 안정적인 콜로이드 형성을 통해 높은 수계 이동성을 확보할 수 있음을 제시한다.

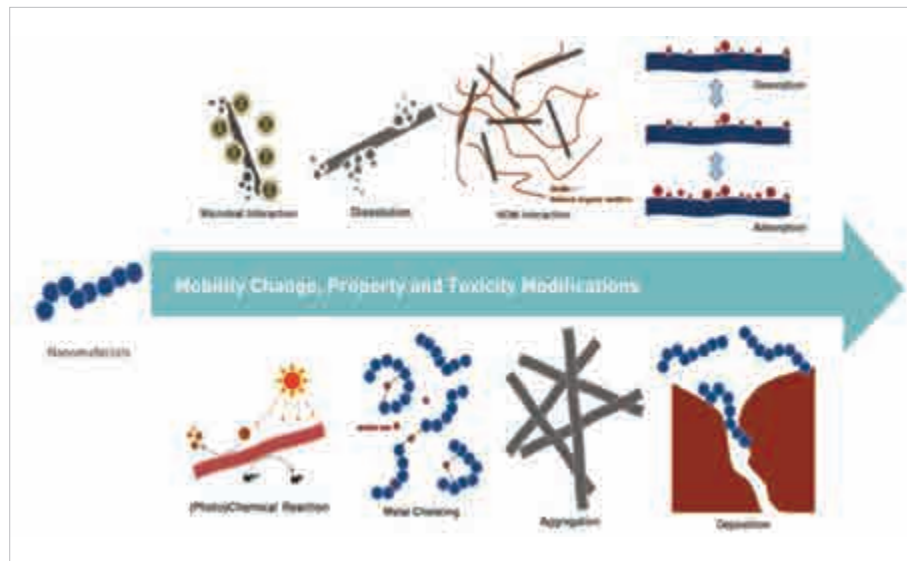


그림 11. 나노물질의 환경 유출 후 특성 변환 시나리오

자연계 내에서의 유동성 및 최종 생물학적 수용체(biological receptor)에 대한 접근성과 다양한 수계 (광)산화 반응에 의해 나노물질의 화학적 조성, 형태학적 특성, 및 고유 성질 등이 변화할 수 있음이 문헌을 통해 제시되었으며, 이는 결국 자연계 유출 시 다양한 화학적 변형 경로를 통해 나노물질의 환경영향성이 개질될 수 있음을 제안하고 있다 (그림 11). 예를 들어, C₆₀ 플러렌의 경우 수계 안정형 콜로이드로 전환되면서 고유의 광 화학적 특성(예: 단일항 산소종 형성능)을 크게 잃는 것으로 나타났으며, 콜로이드의 경우 자연계나 수처리 공정 내에서 쉽게 겪을 수 있는 오존, 수산화 라디칼, 활성염소 등과의 반응을 통해 입자 크기의 감소, 표면 기능기 형성, 광감응 특성 개질 등의 수계 유동성 및 생물학적 유해 효과와 관련성이 높은 성질 변형을 경험하는 것으로 알려져 있다. 태양광 및 자외선 조사 조건에서의 광화학적 반응 역시 수계 안정형 플러렌 콜로이드의 표면 화학조성, 광화학적 활성산소종 형성능, 및 생물학적 독성의 변화를 유발함이 밝혀졌다. 이러한 결과들은 생태독성유발 후보군으로 나노물질을 상정하였을 경우 대응해야 할 나노물질의 자체 독성 외 해당 나노물질이 자연계 유출 후 경험하게 되는 다양한 화학적 변형에 대한 저항성 또한 매우 중요한 고려 인자로 인지해야 함을 제시한다.

미국 라이스대학의 페드로 알바레스 교수 등은 향후 나노물질의 자연계 유출과 관련하여 환경친화적인 나노물질의 설계와 나노물질의 폐기 방안에 대한 미국과 유럽의 여러 대학에서 모인 연구자들의 의견을 수렴하여 2009년 논문을 출간하였다. 특히, 발표 논문에서는 자연계에서의 나노물질의 안정성 예측 및 나노물질의 생이용성(bioavailability), 생물축적(bioaccumulation), 및 독성을 증가시키는 관련 특이성 이해를 위한 구조-활성 연관관계(structure-activity relationship), 나노물질의 생이용성, 영양 단계를 통한 이동(trophic transfer), 치사효과 등의 평가를 위한 표준화된 프로토콜, 나노물질의 형태 및 농도 예측을 위한 다양한 유출 시나리오 고려를 위한 다상 거동 모델(multiphase fate and transport model) 등과 관련한 지식을 우선적으로 발전시킬 것을 제안하였다. 이런 중지를 모아 2009년 미국 NSF의 재원으로 미국 서부와 동부에 각각 CEIN(Center for Environmental Implications of Nanotechnology)과 CEINT(Center for the Environmental Implication of NanoTechnology) 등을 설립하여 UCLA와 듀크 대학교에 각각 위치시키고 미국 내외 대학중심 연구팀들이 참여하도록 하였다. 라이스 대학교의 CBEN 이후 미국 내 환경-나노 기술과 관련한 이러한 연구 흐름은 결국 나노물질의 환경 기술과의 융합화는 나노물질의 환경 안정성과 관련된 연구와 필연적으로 동반되어야 함을 시사한다.

나노물질의 환경소재로서의 경제성

최근 2015년 미국 라이스 대학교를 중심으로 애리조나 주립 대학교(Arizona State University), 예일 대학교(Yale University), 텍사스 주립 대학교-엘 파소(University of Texas, El Paso) 등은 NSF로부터 5년간 약2천만달러 규모의 지원을 받는 공학연구센터를 발족시켰다. NEWT(Nanotechnology-Enabled Water Treatment Systems)로 명명된 이 센터는 촉매, 전극소재, 흡착제, 분리막 등의 환경 기반 소재에 나노기술을 융합시켜 최종적으로 공간집약적(compact)이며, 이동 가능하고(mobile), 기존 전기-수도 시설과 독립적(off-the-grid)으로 작동할 수 있는 수처리 모듈을 개발하는 것을 목표로 삼고 있다. 이는 결국 환경-나노 기술의 최종 지향점을 대규모의 중앙 집약적인 기존 수처리 인프라에서 탈피하여 분산화된(decentralized) 수처리 모듈 시스템 구현으로 상정하였음을 시사하며 향후 기술적 성숙을 통해 제품화된 결과물을 생산하여 최종적으로 수처리 시장으로의 진입을 염두하고 있음을 암시한다.

환경-나노 기술의 적용 가능성을 평가하는데 있어서 상기한 나노물질의 환경영향 성과 함께 기술의 시장성 및 경제성 또한 고려되어야 할 중요한 인자이다. 미국 라이스대학교의 페드로 알바레스 교수는 이를 위해 나노물질의 환경 처리 기법 적용 시 기대 효과를 분류하여 접근해야 한다고 제안하고 있다. 즉, 선진국의 경우 이미 잘 발달된 환경 정화/처리 인프라를 보완하는 입장에서 나노물질의 활용하고자 하며 이 경우 나노물질 기반의 시스템은 기존 인프라를 통해 처리되지 않는 난분해성 오염물질 혹은 신중유해물질을 대상으로 삼아야 하는 반면, 전반적으로 전기, 수도 시설이 열악한 개발도상국의 경우 독립적으로 운전 가능한 모듈화된 수처리 시스템, 특히 소독 시설 등에 우선적으로 나노물질의 적용을 고려하고자 할 것이다. 이에 따라 활용 나노물질의 종류, 시스템화 방법, 적용 목적 등이 차별화되어 처리 시설이 구현된다면 불필요한 자원 낭비를 방지할 수 있을 것이다. 일반적으로 나노물

질의 생산 단가를 높이는 공정은 합성 후 분리 및 정제(separation & purification) 단계로 알려져 있다. 그러나 전자, 반도체, 에너지 소재와는 달리 환경 나노소재의 경우 높은 순도와 규격화된 형태학적 특징이 수반될 필요가 없다(예를 들어, 100%에 가까운 순도, 10-15 nm로 균일한 입자 크기, 높은 결정성은 수처리용 광촉매로서 이산화티탄이 반드시 갖춰야할 소재 특성이 아님). 따라서 보다 경제성이 높은 환경 나노소재의 생산을 위해 특화된 생산 라인을 갖추므로써 소재 단가를 낮출 수 있을 것이다. 또한, 나노물질 기반 환경 정화 기술의 경제성 확보와 관련하여 중요한 사항으로서, 상기하였듯이 대부분의 나노물질이 쉽게 재활성화(reactivation, regeneration)되고 오염에 대한 저항성이 탁월하며 기계적 열적 강도가 높으므로, 비교적 고가의 나노물질의 회수하여 재사용할 수 있는 적절한 방안을 마련할 필요가 있다. 관련하여 효율적인 나노물질의 회수를 위해 자성 분리 기능성, 물리적 분리 용이 지지체상의 고정화, 열 및 pH 감응 친수-소수성 전환 등의 특성을 소재 설계 시 고려해야 할 필요가 있다.

이재상

학 력

- 포스텍 환경공학부 박사
- 서울대학교 화학생물공학부 석사
- 서울대학교 화학생물공학부 학사

경 력

- 現) 고려대학교 건축사회환경공학부 교수
- 前) KIST 물자원순환연구단 선임연구원
- 前) Rice 대학교 토목환경공학부 포스닥
- 前) Georgia 대학교 토목환경공학부 포스닥
- 前) 포스텍 환경연구소 포스닥

참고문헌

1. M. R. Hoffmann, S. T. Martin, W. Choi, D. W. Bahnemann "Environmental applications of semiconductor photocatalysis" *Chemical Reviews* (1995)
2. T. Masciangioli and W.-X. Zhang "Environmental technologies at the nanoscale" *Environmental Science & Technology* (2003)
3. P. Kamat and D. Meisel "Nanoscience opportunities in environmental remediation" *Comptes Rendus Chimie* (2003)
4. P. G. Tratnyek and R. L. Johnson "Nanotechnologies for environmental clean-up" *Nanotoday* (2006)
5. M. R. Wiesner, G. V. Lowry, P. J. J. Alvarez, D. Dionysiou, and P. Biswas "Assessing the risks of manufactured nanomaterials" *Environmental Science & Technology* (2006)
6. M. S. Mauter and M. Elimelech "Environmental applications of carbon-based nanomaterials" *Environmental Science & Technology* (2008)
7. P. J. J. Alvarez, V. Colvin, J. Lead, and V. Stone "Research priorities to advance eco-responsible nanotechnology" *ACS Nano* (2009)
8. X. Qu, J. Brame, Q. Li, and P. J. J. Alvarez "Nanotechnology for a safe and sustainable water supply: Enabling integrated water treatment and reuse" *Accounts of Chemical Research* (2013)
9. X. Qu, P. J. J. Alvarez, Q. Li "Applications of nanotechnology in water and wastewater treatment" *Water Research* (2013)
10. A. D. Bokare and W. Choi "Review of iron-free Fenton-like systems for activating H₂O₂ in advanced oxidation processes" *Journal of Hazardous Materials* (2014)
11. D. J. Martin, G. Liu, S. J. A. Moniz, Y. Bi, A. M. Beale, J. Ye, J. Tang "Efficient visible driven photocatalyst, silver phosphate: Performance, understanding, and perspective" *Chemical Society Reviews* (2015)

국가 R&D 현황 분석

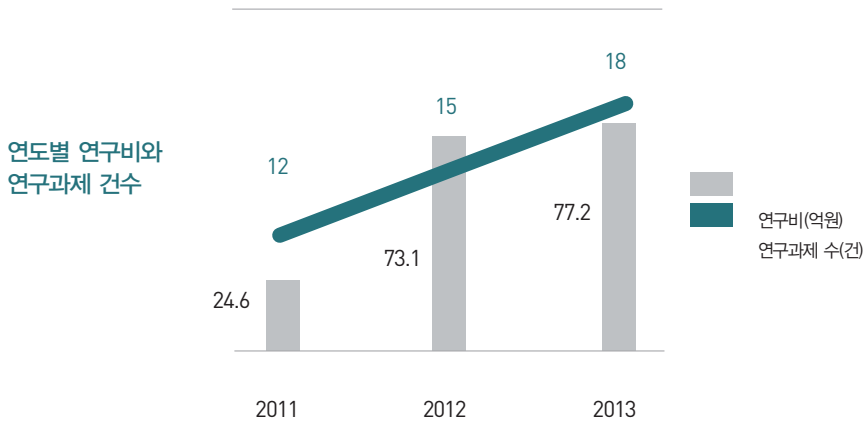
최근 3년간(2011~2013년) 환경-나노와 관련된 연구개발사업에 대해 분석해보았다.

| 과제 선별 기준 |

연구요약문 내 아래 키워드를 포함하고 있는 과제를 선별한 후 연구내용을 바탕으로 분석 대상 선정
(환경) and (나노) and ((물질) or (영향성))

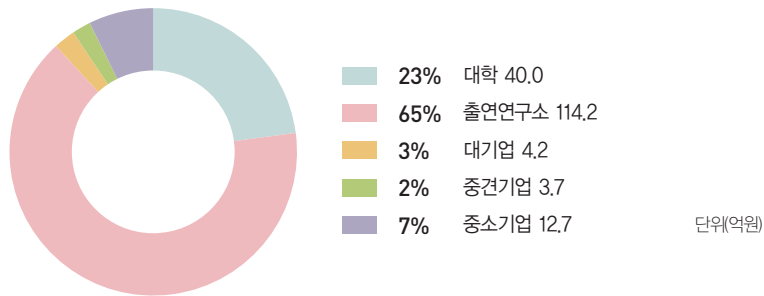
분석 결과 최근 3년간 총 45건의 과제에 175억원의 연구비가 투자됨

- 환경-나노 융합연구와 관련된 연구과제 수와 연구비가 꾸준히 증가하고 있는 것으로 나타남



연구수행주체 출연연구소(65%)를 중심으로 연구가 이루어지고 있음.

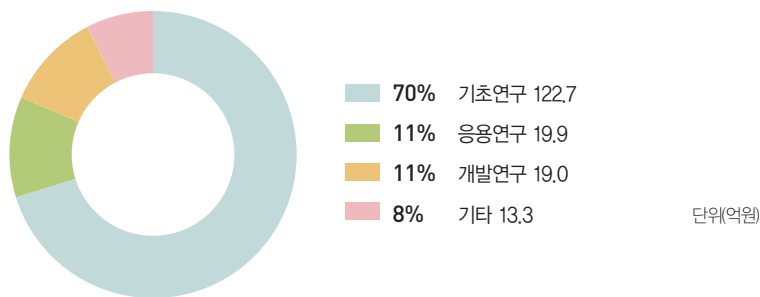
- 연구비의 비중으로는 출연연구소가 가장 높게 나타났으나, 과제 수에서는 대학이 28개의 과제를 수행하며 가장 많은 연구를 수행하고 있는 것으로 나타남
 - 출연연구소의 과제 수는 8개에 불과함
- 환경-나노 융합연구와 관련하여 중소기업을 중심으로 연구가 일부 이루어지고 있는 것으로 나타남



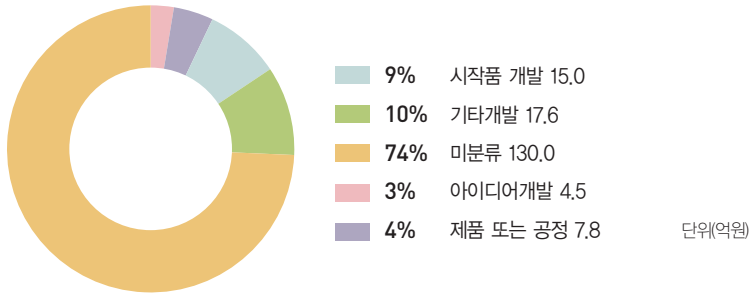
연구수준 기초연구단계(70%) 위주의 연구가 이루어지는 것으로 나타남

- 대학과 출연연구소 중심의 기초연구단계 연구가 23건(123억원)으로 대다수를 차지함
 - 응용연구와 개발연구에는 각각 19.9억원(과제수 9개)과 19억원(과제수 11개)이 투자되고 있어 응용/개발 연구에 대한 연구 투자 비율은 서로 비슷하게 나타남
- 연구개발 성격으로는 대부분의 연구가 가능성을 타진하고 평가하는 연구 중심으로 이루어져 미분류로 분류된 연구가 74%에 달함
- 이는 기술수명주기적 측면에서는 비슷하게 나타나 기타로 분류된 연구가 49%(86.5억원)에 달하였음
 - 하지만 국내는 물론 해외에서도 환경-나노 융합연구가 이제 막 시작되어 학문적 체계를 잡아가는 상황이기 에 기술수명적 측면에서 도입기라고 보는 연구도 상당수 존재함(40%)

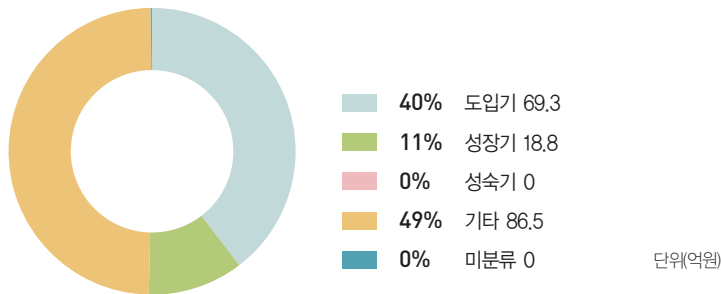
연구개발단계



연구개발성격

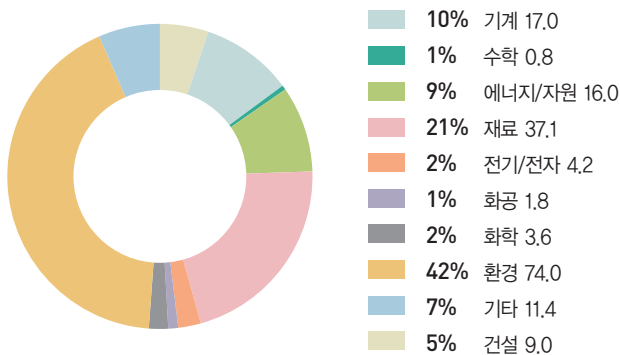


기술수명주기

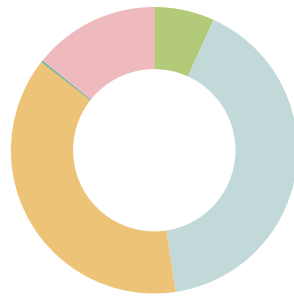


연구분야 국가과학기술표준분류와 미래유망 신기술분류(6T), 국가기술지도분류(NTRM)를 분석한 결과 환경과 나노의 융합연구인 만큼 환경(74억원, 42%), 재료(37.1억원, 21%), ET(71.4억원, 41%), NT(66.4억원, 38%) 중심의 환경/에너지 프론티어 진흥(89.6억원, 51%) 중심의 연구로 나타남

연구분야 [국가과학기술표준분류]



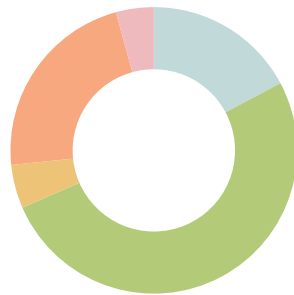
연구분야 [6T]



41%	ET 71.4
38%	NT 66.4
0%	미분류 0.3
14%	포함되지 않음 24.9
7%	BT 11.9

단위(억원)

연구분야 [NTRM]



17%	정보/지식/지능화 사회구현 30.1
51%	환경/에너지프론티어 진흥 89.6
5%	기반주력산업 가치창출 8.6
23%	포함되지 않음 39.1
4%	기타 7.5

단위(억원)

- 환경분야에서의 나노기술을 활용하는 연구임에도 불구하고 건설/교통, 수학, 기계, 에너지/자원, 전기/전자 등 다양한 분야에서 관련 연구가 수행되고 있는 것으로 나타남
 - 환경 평가 및 개선과 관련한 연구들 중심이기에 건설/교통(9억원, 5%)과 에너지/자원(16억원, 9%) 분야에서 연구가 이루어짐
 - 수학, 전기/전자, 기계, 화공, 화학 분야의 경우 환경분야에서의 나노 물질의 구현 및 관리, 활용 적인 측면에서 연구가 이루어지고 있음
- 6T 기준에서도 ET와 NT가 전체의 79%를 차지하고 있지만, 생체 영향성 평가 및 생체 나노 물질 활용 등의 이유로 일부 BT 연구 및 미분류 연구가 이루어지고 있는 것으로 나타남
- NTRM 분석 결과 또한 환경/에너지 프론티어 진흥이 가장 높게 나타남
 - 환경-나노 융합연구의 중요한 부분중의 하나인 영향성 평가 연구가 존재함에도 불구하고 건강한 생명 사회 구현 부분으로 분류된 연구가 하나도 발견되지 않은 것으로 보아 아직 환경-나노 물질의 사회적 영향에 대한 개념 연구는 부족한 것으로 사료됨

디지털 교육 기술 동향

▣ 융합연구정책센터 이남우

01 선정배경

- 정보통신기술의 발전에 따라 선택적, 맞춤형 교육이 가능해 지면서 전세계적으로 디지털 콘텐츠를 이용한 교육 관련 기술 개발이 활발히 이루어지고 있음
 - 수업의 콘텐츠 및 방식의 다양화와 시공간 제약이 사라지면서, 집단 지성, 소셜 러닝 등을 활용한 학습자원의 공동 활용 및 협력 학습이 가능해짐
- 우리나라에서는 21세기 지식정보화 사회에서 요구되는 새로운 교육방법, 교육과정, 평가, 교사 등 교육 체계 전반의 변화를 이끌기 위하여 2011년 스마트교육 추진전략을 수립하여 시행함
 - 최신의 정보기술(Technology-embedded)을 바탕으로 자기 주도적(Self-directed), 학습자의 흥미·동기 유발(Motivated), 맞춤형 교육제도(Adapted), 풍부한 학습자료(Resource enriched)의 활용을 목표로 함
- 통신환경의 변화와 디지털 교육의 시장 변화 파악 및 대처가 필요함



02 기술개요

❖ (정의) 디지털 콘텐츠를 바탕으로 수행되는 교육

(관련 기술) 크게 콘텐츠를 제작하고 이를 관리/운영하는 기술과 제작된 콘텐츠를 학습자가 활용할 수 있는 기술로 구분 가능함

- (콘텐츠) 문서 디지털화, 데이터 저장, 네트워크, 데이터 관리 기술, 클라우드 컴퓨팅 등의 기술
- (활용) 학습자 사용 환경, IoT, 가상현실, 디스플레이, 통신, 센서, 입력, 모바일 기기 등의 기술

❖ (주요 요소) 디지털 교과서, 교육용 디바이스, 교육용 플랫폼

- (디지털 교과서) 과거 제한된 통속속도로 인하여 저용량의 텍스트와 이미지 위주의 디지털 교과서가 제작되었으나, 현재는 멀티미디어(동영상/애니메이션 등)와 웹 연동을 통해 교과와 관련된 외부자원을 적극적으로 활용할 수 있는 형태로 변화 중

- 현재 HTML5 또는 Javascript 등으로 구현 방식의 표준화가 진행 중이며, 광대역 통신 환경 구축 및 증강현실 및 가상 현실 기술과 해당 기기의 발전으로 가상 현실 속 체험형 디지털 교과서 및 교육용 디바이스가 활용될 것

- (교육용 디바이스) 별도의 교육용 디바이스를 제작하던 방식에서 스마트폰 및 태블릿 PC 등의 휴대용 단말기와 함께 웨어러블 디바이스, 스마트 펜 등의 급격한 기술 발전으로 범용 기기를 기반으로 한 BYOD* 형태화

* Bring Your Own Device

- (교육용 플랫폼) 데이터 저장 기술, 서버 관리 기술의 발전과 함께 클라우드 컴퓨팅 기술의 대중화로 다양한 개방형 교육플랫폼이 등장하고 있으며, MOOC*와 같은 대중을 대상으로 한 공개강좌 서비스도 등장

* Massive Open Online Course

- 빅데이터 기술의 발전과 인공지능 기술, 감정 센서 등의 발전에 힘입어 적극적 쌍방향 강의가 이루어져 교육 중 실시간 소통이 가능해질 전망



그림 1. 디지털 교육의 구성요소



그림 2. 교육용 디바이스의 변화

- (핵심 기술) 디지털 교육과 관련된 다양한 기술 중 큰 영향을 미칠 것으로 예측되는 대표적인 기술로는 햅틱스·로보틱스, 시각화, 모바일, 통신, IoT, 데이터분석, 3D프린팅, 인공지능 비서가 있음



- (햅틱스 · 로봇틱스) 학습자에게 촉각적인 피드백을 제공해 줌으로써 실감적인 교육을 가능하게 해 줄 것으로 기대되는 기술로, 특히 의료 교육과 실습 분야에서 큰 기여를 할 것으로 예상됨
- (시각화) 큰 화면과 쌍방향 칠판, 홀로그램, 피코 프로젝터, 모바일 기기 등 학습자에게 좀 더 효율적으로 시각적인 콘텐츠를 전달하는 기술로, 현재는 LCD가 낮은 가격으로 주요 시장을 선점하고 있으나, 콘텐츠의 질이 향상되면서 OLED, 휘어지는 디스플레이, 3D 디스플레이 등이 향후 시장을 대체해 나갈 것으로 예상됨
- (모바일 기기) SNS를 통한 교육 등을 가능하게 만들어 줄 것으로 기대되며, 고성능의 저렴한 모바일 기기의 출시로 디지털교육의 질적 향상이 기대됨
- (통신기술) 학습자가 적은 비용 · 빠른 속도로 온라인 디지털 콘텐츠를 접할 수 있으며, 이를 위해 데이터와 파일 공유, 클라우드 컴퓨팅, 온라인 멀티미디어, 화상회의 등의 기술이 현재 활발히 활용되고 있으며, 통신용량 및 속도의 개선으로 향후 양질의 학습 디지털 콘텐츠가 개발될 전망
- (IoT) 학습자가 사용하는 데이터와 반응의 실시간 수집과 분석을 바탕으로 효율적인 교육이 이루어질 수 있으며, 시스템 구축 시 활용방안이 무한할 것으로 예상됨
 - ※ 영국에서는 8개 학교와 DISTANCE 콘소시움이 IoT 기반 자벨리(Xively) 클라우드 서비스를 통해 정보를 수집하고 실제 학습에 활용할 수 있는 방안을 연구 중
- (데이터 분석) 학습 관련 데이터를 분석하여 학습 패턴을 찾고 지도하는 기능이 구현되어 학습 시스템의 발전을 이끌어 나갈 것으로 예상됨
 - ※ 미국과 유럽의 상당수 초/중학교의 학습관리 시스템 잇츠러닝(itslearning)을 통해 학생들의 학습 성과를 모니터링. MyDistrict360은 교육행정담당자들을 위한 맞춤형 포털로 학습자의 데이터와 재정 정보를 시각화함
- (3D 프린팅) 그림과 영상만이 아닌 실제 모형으로 현실감 있는 학습을 가능하게 할 것으로 예상됨
 - ※ 미국 마이애미 대학 인류학 전공 학생들과 아이오와 주립 대학의 GeoGABLab 학생들은 고대 이집트 그릇이나 회귀 화석과 결정, 광석 등을 3D 프린터로 본떠 학습에 활용 중임
- (인공지능 비서) 자연어 처리를 수행하는 애플의 '시리' 나 구글의 '나우', MS의 '코타나' 와 같은 인공지능 비서들이 학습 어시스턴트로 학습을 도울 것으로 예상됨

03 주요국 현황

- 많은 국가들이 정보통신기술 기반의 스마트교육 정책을 추진 중이며, 특히 호주, 미국, 핀란드, 일본, 싱가포르가 적극적으로 추진 중임

표 1. 주요국의 스마트교육 동향

국가	주요동향
호주	<ul style="list-style-type: none"> • 전세계적으로 가장 먼저 디지털 교육 기술 기반의 스마트 교육 과제를 시작함 • 다양한 전자 기기를 활용한 수업 지원 및 활발한 콘텐츠 공유를 위한 인터넷/클라우드 기반의 플랫폼 개발이 가장 잘 이루어짐 • Smart Class ICT eLearning Index 및 학교별 ICT 사용 현황, 향후 전략, 학생·학부모 만족도 등이 담긴 연간 보고서 발간으로 학생, 학부모, 지역 사회가 자유로이 이를 열람하고 학생과 학부모는 자신에게 맞는 학교를 선정할 수 있음
미국	<ul style="list-style-type: none"> • 2010년 디지털 교육 기술 기반 교육 정책을 시작으로 기기 배포 및 관련 제도·조직 구성을 통한 디지털 교육 활성화 추진 • 온라인 교육 콘텐츠 생산 및 학생들에게 유용한 피드백을 줄 수 있는 온라인 교육·평가 체계와 프로세스 개발을 중점적으로 수행 • 교육, 기술, 과학에 초점을 맞춘 디지털 교육 전담 기관 마련 및 디지털 교육 활성화를 위한 기반 및 결과 분석 방식 개발 • 애플, 마이크로소프트, 스프린트, 버라이즌, 어도비 등의 업체들이 소프트웨어 제공 및 디지털 기기, 콘텐츠 제공, 네트워크 무료 제공 등으로 5억 달러 이상의 지원을 수행 중
핀란드	<ul style="list-style-type: none"> • 개별 기술 개발보다는 디지털 교육 환경 조성에 초점 • 디지털 교과서 및 온라인 교육에 한정하지 않고 학생들에게 가장 유익하고 맞는 학습 내용과 방법, 환경(물리적+가상적) 등에 대한 다양한 모형을 접목하는 방식을 적용하여 미래형 학교 모색
일본	<ul style="list-style-type: none"> • 교육용 기기 보급 및 디지털 콘텐츠 개발에 중점- 2017년까지 1인 1태블릿 보급 목표 (4년간 6조 5,000억원 투자) • 클라우드 기반의 협동 플랫폼을 구축하여 디지털 콘텐츠 활성화에 초점
싱가포르	<ul style="list-style-type: none"> • 디지털 교육을 바탕으로 한 '체험'에 가장 중점을 두고 있음 • 기존의 수동적인 교육이 아닌 3D/4D 콘텐츠를 활용한 '체험' 중심의 디지털 교육 시스템을 도입 중



● 국내에서는 1997년 디지털 교과서에 대한 기초연구가 시작된 이후 2002년 '디지털 교과서 개발과 보급을 위한 중장기 계획', 2007년 '디지털 교과서 상용화 추진 방안', 2011년 '인재대국으로 가는 길 스마트 교육 추진 방안' 등으로 디지털 교육 사용화를 위해 정책적인 노력을 다각적으로 수행 중

- 디지털 교과서와 함께 스마트 교실 프로젝트를 추진하여 전자칠판 및 태블릿 보급을 통한 디지털 교육을 현장에서 시범적으로 운영 중
- 2011년 '인재대국으로 가는 길 스마트 교육 추진 방안'에 따라 2014년 초등학교를 시작으로 2015년까지 초·중·고 교과서의 디지털화를 추진중이나, 아직 부진한 상황이며, 스마트 스쿨 도입 또한 세종시와 혁신도시 일부지역에만 한정적으로 진행됨



04 주요 기업의 개발 현황

- (해외 기업) 미래 교육 IT시장의 성장을 예측하여 디지털 교과서 등의 교육용 콘텐츠를 효율적으로 제공할 수 있는 플랫폼 중심의 기술 개발과 함께 기존 IT 기술 및 기기의 교육용 활용 지원 사업 진행

표 2. 해외기업의 스마트교육 개발 동향

기업	주요동향
애플	<ul style="list-style-type: none"> • 디지털 교과서 제작툴 iBooks2 개발 • 온라인 개방형 강의 플랫폼 iTunes U 개발 • 미국 학교 아이패드 무상보급 실시
구글	<ul style="list-style-type: none"> • Google apps for education 교육용 앱 지원 • 무료 교육용 플랫폼 Classroom 개발 • 구글 플레이에서 디지털 교과서 제공
마이크로 소프트	<ul style="list-style-type: none"> • Microsoft Educator in Network를 통해 114개국 1만 2,000개 학교와 460만 명의 교사를 지원 • 스카이프 다중 영상회의 기술 활용 스카이프 인 더 클래스 룸 제공 • '코두' 등 교육 프로그램 운영 • 윈도클래스룸(WIC) 협의회 구성을 통해 디지털 교육에 필요한 H/W, S/W 개발 추진
퀄컴	<ul style="list-style-type: none"> • Wireless Reach 이니셔티브 • 스냅드래곤이 탑재된 삼성 갤럭시 태블릿과 연중무휴 24시간 4G/LTE 접속 환경을 국내 시범적으로 제공 중 • AllJoyn-Allseen Alliance 오픈소스 소프트웨어 제공 • Vuforia 모바일 비전 플랫폼 개발 • 120,000 개 학습 콘텐츠 모듈이 포함된 OnTeacher 콘텐츠 플랫폼 구축
인텔	<ul style="list-style-type: none"> • 인텔 에듀케이션 솔루션(교육용 태블릿 PC+소프트웨어+교육콘텐츠) 개발



❖ (국내 기업) 전자업체 및 통신업체, 벤처 등 다양한 기업이 교육용 디바이스, 플랫폼, 디지털 콘텐츠 개발 등을 진행 중

표 3. 국내기업의 스마트교육 개발동향

기업	주요동향
삼성전자	<ul style="list-style-type: none"> 스마트스쿨 구현을 위한 모바일 솔루션 제공 - 화면 공유 서비스 및 미러링, 학생 디바이스 제어, 원격 실행, 수업 관리, 모듈별 협업 진행, 시험 등 스마트스쿨 관련 하드웨어 기기 제공- 태블릿 pc, 대형 디스플레이 장치 등 러닝허브 플랫폼 개발 현재 국내 1,226개 학교에 스마트스쿨 구축
LG전자	<ul style="list-style-type: none"> 스마트 스쿨 하드웨어 기기 제공 - 84인치 전자칠판, 초단초점 프로젝터, 3D TV, 무선 장비, 단말기, 터치 펜 등 약세사리, 수업관리용 데스크톱 디지털 교육 수업솔루션 iCLASS 제공
SKT	<ul style="list-style-type: none"> 첨단 ICT 기술 체험을 위한 T.um 및 찾아가는 SKT 스마트교실 운영 장애학생을 위한 스마트 러닝 시스템 개발 MDM과 스쿨박스의 기능을 결합한 Smart Class Solution을 개발 중국 1,300여개 학교 대상 공급 스마트 교육 로봇 '아띠' 개발 청담러닝과 T 스마트러닝 플랫폼 개발
KT	<ul style="list-style-type: none"> 교육용 로봇 '키봇1', '키봇2' 개발 초등 교과과정 '올레스쿨', 중학교 대상 인터넷 강의 '올레 수박씨닷컴', 일반 교육 프로그램 '올레 tv now' 디지털 교육 콘텐츠 제공 서비스 운영 (+삼성) 전자칠판, 컴퓨터, 노트북 등의 ICT실습 환경을 갖추고, 전력을 공급하기 위한 태양광 발전시스템이 장착된 이동형 교실 '솔라스쿨' 개발 및 아프리카 지역에 설치 보급 베트남 360여개 시범학교에 스마트 스쿨 장비와 학사관리시스템 솔루션 공급
청담러닝	<ul style="list-style-type: none"> 스마트러닝을 위한 전반적인 플랫폼, 소프트웨어 관리/운영 시스템을 비롯한 콘텐츠 개발·운영 중 UNESCO와 아시아 개발도상국의 스마트 교육 프로젝트 추진 중- 디지털 콘텐츠 제공 및 데이터베이스 플랫폼 구축 태국 IPST 부속학교에 스마트클래스 시범 공급 스마트 클래스 솔루션 CREO 개발
KnowRe	<ul style="list-style-type: none"> 온라인 수학 교육 콘텐츠 개발-개인 맞춤형 콘텐츠 제공 시스템을 구축 교육과 게임의 접목을 통한 교육콘텐츠에 대한 흥미·참여 극대화 미국 50여개 중고등학교에 공급·운영중

05 시장예측

❖ 이러닝, 교육용 디바이스, 솔루션 등 교육 산업 내 새로운 시장 창출이 예상되며, 해외 기업들이 적극적으로 참여하여 시장의 변화는 가속화 중

- 디지털 교육을 중심으로 한 스마트 교육, 스마트 러닝 시장 규모는 2020년 4,469억 달러에 이를 것으로 전망 (Market and Markets, 2015)
- 중국의 온라인교육 시장은 '15년 1,600억 위안으로 전망 (iResearch, 2014)

지속적인 시장 규모의 증대가 예상되며, 많은 기업들이 실제로 디지털 교육 기술 개발에 주력하고 있으나 수요처인 각국 정부의 예산 편성정도에 따라 시장 규모의 성장세는 달라질 것으로 예상됨

- 우리나라는 스마트 교실과 관련하여 올해 약 2조원 규모의 시장이 형성될 것으로 예상되었으나, 정부의 예산 집행 변화와 학교 현장에서의 스마트 교육 수요 부족으로 약 1,000억원 규모의 시장만 형성됨





06 시사점

❖ 디지털 교육은 정보통신기술을 비롯한 다양한 기술 개발을 통해 더욱더 확산될 전 세계적인 메가트렌드

- 해외 주요국은 디지털 교육에 관심을 갖고 이를 실행할 수 있는 정책적인 지원을 적극적으로 추진 중
- 반면, 우리나라는 앞선 정보통신기술을 바탕으로 발빠르게 디지털 교육에 뛰어들었으나, 최근 정책적인 지원이 확대되지 않는 상황

디지털 교육 관련 국내 기술은 동남아 지역을 중심으로 해외시장을 개척하는 등 일정수준에 올라와 있는 것으로 평가됨

- 하드웨어는 스마트폰, 태블릿 등의 교육용기기를 중심으로 높은 경쟁력을 가지고 있으며, 통신네트워크 등 세계 최고 수준의 기술경쟁력을 갖고 있는 것으로 평가됨
- 교육용 콘텐츠는 다양성과 품질이 많이 부족하여 실제 스마트 교실이 구축되어도 활용되지 못하는 사례가 많음
- 교육용 플랫폼은 업체별 독자 플랫폼을 개발하여 제품 간의 경쟁을 통한 경쟁력 향상을 기대할 수는 있지만 서로 간의 호환성이 떨어짐으로 인해 시장 전체의 경쟁력 향상에는 도움이 되지 않는 것으로 평가됨

향후 디지털 교육을 이끌 것으로 예측되는 핵심 기술들은 현재 국내에서 많은 관심과 지속적인 투자를 받고 있는 분야이기 때문에, 향후 국내 디지털 교육의 기술 경쟁력은 증가할 것으로 예상됨

- 최근 콘텐츠 위주로 시장 재편이 이루어지고 있는 상황을 감안할 때, 콘텐츠 및 플랫폼 간의 호환성을 염두에 둔 기술 개발이 필요함
- 디지털 교육 콘텐츠 개발은 KnowRe와 같이 전 세계 시장을 대상으로 성공할 수 있는 콘텐츠를 우선적으로 개발하여 국제적인 경쟁력을 높이는 전략과 국내 디지털 교육 환경 조성을 위한 정부 중심의 국내용 디지털 교육용 콘텐츠 제작의 병행이 필요함

참고문헌

- 스마트교육 추진 전략 실행계획, 교육과학기술부 (2011)
- 스마트교육 글로벌 동향, 한국교육학술정보원(KERIS) (2012~2015)
- 디지털 교과서 최신 해외 동향 분석 및 주요 시사점, KERIS 이슈리포트, 한국교육학술정보원(KERIS) (2009)
- IoT가 바꾸는 미래학교 Smart Classroom, 디지예코 보고서 (2014)
- 스마트교육환경에서의 디지털교과서 표준화 방향, TTA Journal Vo.1. 149 (2013)
- 교육의 미래, 디지털에서 찾다, 더 퍼스트 미디어 (2014)



스마트 인터랙션(Smart Interaction) 기술

▣ 융합연구정책센터 이아름

01 선정배경

● 시대가 변화함에 따라 인간을 이해하는 인간 중심·인간 친화제품 및 서비스가 시장을 주도

- 인간과 정보기기(디바이스) 사이의 상호작용을 보다 자연스럽게 편리하게 하는 사용자 친화적 기술 · 제품개발이 중요

인간의 다양한 감각을 자유롭게 이용하려는 욕구가 커지면서 기존의 기계에 인간을 맞추려는 시스템에서, 기계에 인간을 맞추려는 기술 및 제품개발로의 변화 시도 중

- 키보드, 마우스, 터치스크린 등 제한된 인터페이스 기기를 사용하는 한계를 탈피하고 인간의 음성, 동작, 감성 등 인간이 가지고 있는 다양한 감각을 활용하는 스마트 인터랙션(Smart Interaction) 연구 추진



그림 1. 영화 마이너리티 리포트의 동작인식 기반 인터페이스 사용 장면

(영화 '마이너리티 리포트'에서 주인공 톰 크루즈는 손에 장갑을 끼고 투명한 디스플레이 앞에서 제스처를 통해 영상을 제어하는 모습이 등장 / 마우스나 터치스크린을 사용하지 않고 허공에서 손동작만으로도 컴퓨터를 사용하고 다른 기기와 정보를 교환 가능)

- 스마트 인터랙션 기술 기반의 제품 및 서비스는 모바일 정보기기 뿐만 아니라 게임/엔터테인먼트, 의료/재활 및 치료 등 다양한 산업으로의 연계 및 파급 효과가 클 것으로 기대
- 최근 애플, 구글, 삼성 등 글로벌 IT 기업을 중심으로 VR(Virtual Reality)의 대중화와 활용 확장성이 보편화되면서 인간-기기 간, 특히 스마트폰을 중심으로 한 상호작용 기술이 점차 진화하는 중
 - 기존 엔터테인먼트적 기능을 넘어 서비스, 구매 등 실생활까지 파고 드는 서비스로의 진화를 통해 가상현실 속 인간과 정보기기 간의 인터랙션 기술은 더욱 성장 할 것으로 예상

02 개요

- (정의) 음성인식, 동작인식, 얼굴인식, 감성인식 등 보다 인간 친화적인 방법으로 인간이 기기와 상호작용 하는 것
 - 키보드, 마우스 등 단말기 중심의 입력 방식이 아닌 사용자의 음성, 터치, 손동작 및 몸 제스처, 상황인식 등 보다 인간 친화적인 인터페이스를 제공
- (음성인식) 일종의 패턴인식 과정으로 사람마다 목소리와 발음, 억양 등이 다르기 때문에 사람들로부터 음성 데이터를 수집해 이로부터 공통된 특성을 추출, 기준 패턴을 생성
- (동작인식) 센서나 장치를 부착하여 획득한 데이터를 동작인식에 이용하는 접촉식 방식과, 카메라를 이용해 사용자의 동작 데이터를 획득하고 영상 분석을 통해 인식하는 비접촉식 방식으로 구분
- (얼굴인식) 얼굴이미지를 복잡한 배경과 분리하고 눈, 코, 입 등의 위치들을 이용하여 정렬 및 사이즈 정규화, 안면인식을 위한 특정 정보를 추출하여 자동적으로 사람의 얼굴을 구분하고 확인
- 이외에도 인간의 뇌를 기계와 연결하여 뇌신경신호를 실시간으로 해석하여 활용하는 BCI* 등 다양한 형태의 스마트 인터랙션 기술 등장

* BCI는 머리 표면에 부착한 전극을 통해 뇌파(brain wave)를 전문용어로는 뇌전도(EEG · Electroencephalogram) 전기신호를 측정하여 이를 사용자가 제어하기를 원하는 기기에 전송



03 시장동향

- ❖ 차세대 생체 인식 기술 관련 시장은 2020년 330억 달러로 크게 성장할 것으로 예상
 - 기존 단순히 인식모듈을 탑재한 것을 넘어 얼굴, 지문, 홍채인식 등 생체정보를 이용한 생체인식 기술 시장이 확대될 것으로 전망(그림2)

- ❖ 스마트기기에 쓰이는 동작인식 센서 출하량은 2012년 24억개, 2013년 35억 개를 기록 (시장조사업체 IHS)
 - 2017년에는 출하 규모가 60억개 이상으로 증가할 전망(그림3)

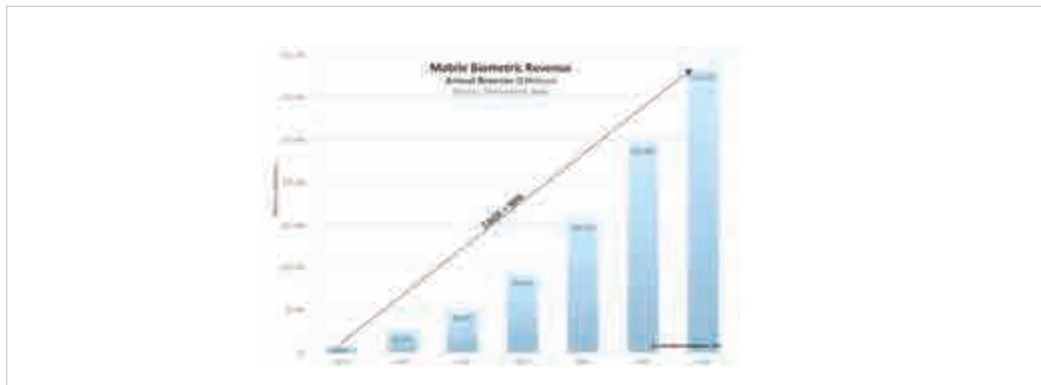


그림 2. 모바일 생체인식 시장 전망 (출처 : AMI)

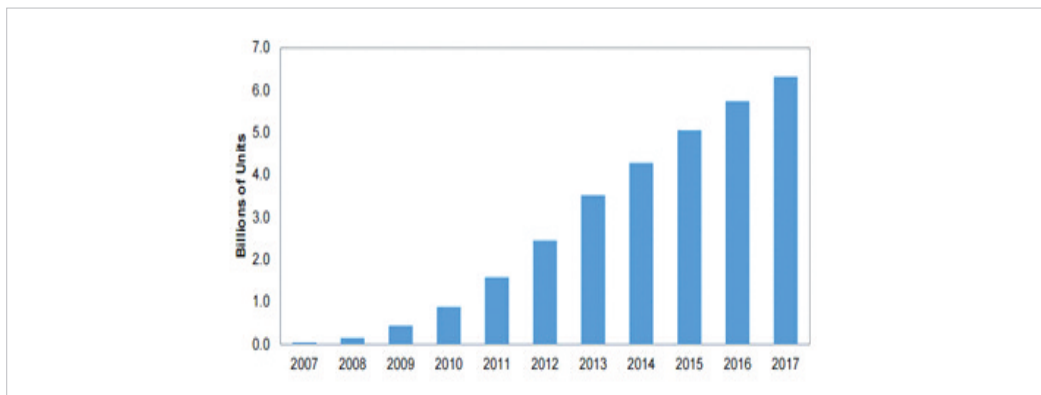


그림 3. 동작인식 센서 시장 출하량

04 제품 및 업체동향

● (음성인식) 음성인식기술을 기반으로 하는 제품 및 서비스로는 애플의 '시리(Siri)' 와 구글 '나우(NoW)', 마이크로소프트 '코타나(Cortana)' 등이 대표적

- 애플이 인공지능형 음성인식 서비스 시리(2011.10.)를 발표한 이후 구글 나우(2012.7.)가 연이어 공개
 - 시리는 iOS를 사용하는 애플의 스마트 디바이스에 탑재되어 있는 음성인식 기반 개인 비서 서비스로, 사용자가 음성으로 명령을 내리면 명령을 해석한 후 결과를 보여주거나 앱을 실행시켜 줌
 - 구글 나우는 '나우 자체 서비스 방식'으로, 명령을 내리기도 전에 사용자의 사용패턴(행동)을 미리 인지하고 정보를 제공한다는 점에서 시리와 차별성을 둠

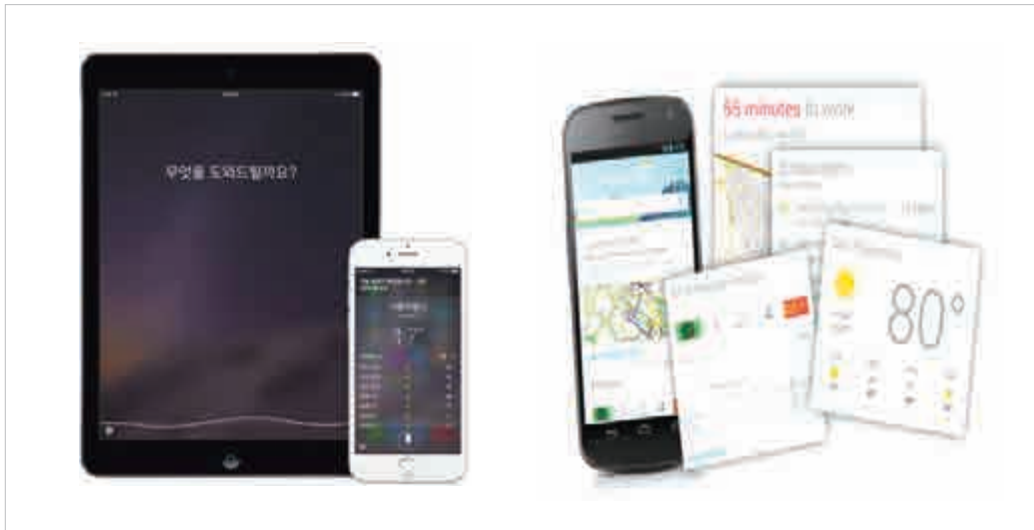


그림 4. Siri(Apple) (좌), NoW(Google) (우)

- 이외에도 마이크로소프트가 개발한 코타나의 경우 기본적으로 애플의 시리와 유사하지만, 구글의 나우처럼 사용자에게 유용한 정보를 자동으로 제공하는 기능도 제공



그림 5. Cortana(Microsoft)

●● (동작인식) 가속도, 빛, 음파 등 여러가지 물리적 요소를 활용하며 스마트워치부터 스마트 안경, 스마트신발, 스마트반지 등 다양한 웨어러블 기기로의 활용도 증대

- 일본 기업 로그바(Logbar)는 손가락 움직임을 통해 각종 명령을 내릴 수 있는 스마트반지를 개발
 - 스마트반지에는 동작인식 센서가 내장되어 있으며 전용앱을 통해 원하는 동작과 명령을 설정한 후 사용 가능
 - 카메라를 이용하는 비접촉식기술이 카메라 앞에서 동작을 해야만 명령이 인식되는 것과는 달리, 로그바의 스마트반지는 반지만 끼고 있으면 어디에서나 명령을 내릴 수 있음



그림 6. 스마트반지(Logbar)

05 응용제품 개발사례

- 이스라엘 기업 MUV 인터랙티브(MUV Interactive)는 허공을 스크린처럼 활용하는 손가락 컨트롤러 버드(Bird)를 개발
 - 버드는 센서를 탑재하고 있어 공중에서 손가락을 살짝 밀거나 당기고 이동하는 등의 다양한 움직임을 그대로 인식하고 작동
 - 제품을 TV나 프로젝터에 동기화하면 거대한 터치스크린으로 이용할 수 있으며, 스마트폰과 연동하는 다양한 사물 인터넷 기기는 스마트폰 없이도 직관적으로 조작가능
 - 즉, 리모컨이나 스마트폰, 태블릿 같은 기기 없이도 방 안에 있는 다양한 기기를 손가락 하나로 조작 할 수 있다는 장점을 지님
- ※ 버드 외에도 닌텐도 Wii나 마이크로소프트의 키넥트(엑스박스(x-box) 게임기에 연결해 사용할 수 있는 동작인식 제품) 등과 같은 게임기에서는 제스처를 이용한 입력장치가 확대되면서 가만히 앉아 키보드, 조이스틱을 조작하는 게임이 아닌 직접 모션을 취하는 방식으로 게임 산업에도 변화
- ※ PC에서도 제스처를 활용할 수 있는 리프모션(Leap Motion)이나 마요(Myo)와 같은 컨트롤러, 손가락에 착용해 마우스처럼 이용할 수 있는 미세스트로(Mycestro) 같은 제품 개발 추진

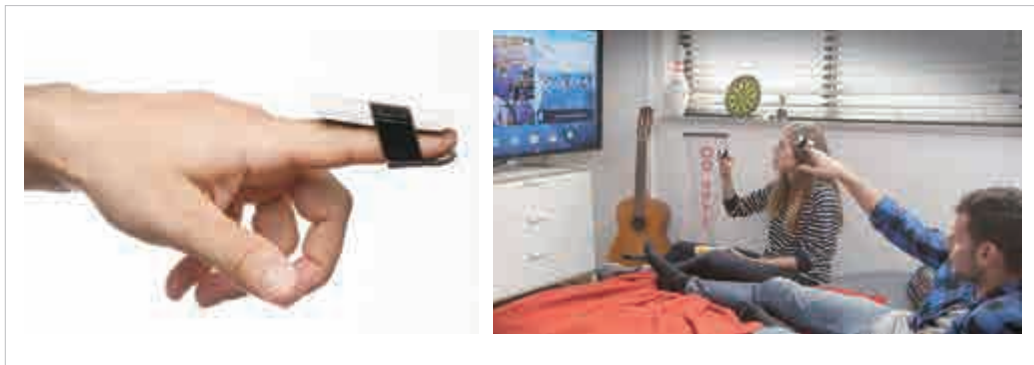


그림 7. 손가락 컨트롤러 Bird(MUV Interactive)



●● (얼굴인식) 처음에는 CCTV 등에 찍힌 영상을 분석해 보안 용도로 사용하기 위해 개발 되었으나 최근에는 감정 분석, 광고, 모바일 애플리케이션 등 다양한 분야에 사용

- MIT 미디어랩에서 창업한 어펙티브바(Affectiva)는 얼굴표정을 인식하여 감정상태를 파악 할 수 있는 솔루션인 '어프덱스(Affdex)' 를 개발(2013년 10월)

- 어프덱스는 노트북, 태블릿, 스마트폰 등에 탑재된 웹캠과 카메라를 이용해 광고 등 고객 관련 온라인 미디어를 시청하는 사람들의 얼굴 표정을 캡처해 수집
- 데이터를 클라우드 서비스로 전송하여 놀라움, 혐오, 웃음, 주의 등의 구체적인 감정상태와 정서로 분석

※ 사람의 얼굴을 캡처해서 얼굴의 움직임, 모양, 질감 등을 픽셀 단위로 평가한 후, 10억개에 달하는 세계 최대 규모의 얼굴 표정 데이터베이스에 근거해 분석

- 광고나 동영상에 대한 고객의 반응을 정밀하게 측정함으로써 소비자 반응을 검토하고 광고를 통한 상품 매출의 증가, 감소 등 다양한 형태의 시사점을 제공

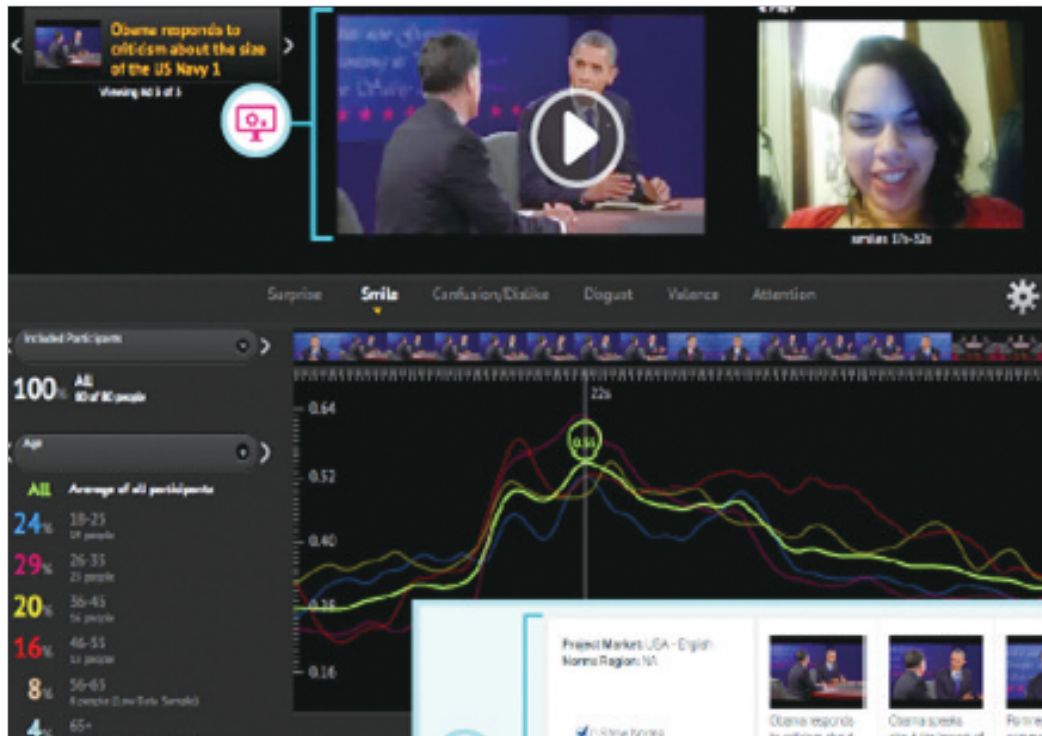


그림 8. 어프덱스 표시정보(Affectiva)

06 연구동향

●● 현실세계와 가상공간을 하나로 연결하는 ‘안경식 디스플레이’ (HMD*)와 근육의 신호로 사용자의 운동의도를 실시간 예측하는 ‘피부 근전도 센서(sEMG**) 및 인식 기술’ 개발

* HMD: Head Mounted Display ** sEMG: surface Electromyogram

※ 미래부 글로벌프린티어사업 KIST 실감교류인체감응솔루션연구단은 피부 근전도 센서 개발을 통해 사람의 근육에서 나오는 전기신호를 측정하여 사용자가 어떤 움직임을 하려는지 미리 알아내는 기술 개발

- 피부 근전도(sEMG) 센서는 밴드 형태로 팔뚝에 착용하면 손과 손가락의 운동패턴을 미리 인식 할 수 있고, 함께 탑재된 관성센서를 사용하면 사용자 팔의 이동량을 동시에 측정
- 즉, 허공에서 손동작만으로 컴퓨터 화면에 글씨를 쓰거나, 멀리 떨어진 로봇 팔을 움직이고, 스포츠 선수의 움직임을 실시간으로 측정하여 교정하는 일 등이 가능
- 센서는 헬스, 재활의료기기, 게임 산업 쪽에 응용 가능



그림 9. a. 피부 근전도(sEMG) 센서 / b. 구글 지도 조작 장면 / c. 손동작으로 글씨 쓰는 장면 / d. 로봇팔 조작 장면



05 국내대응현황

● 구글은 프로젝트 솔리(Project Soli)를 통해 지금까지 센서로 인식 할 수 없었던 제스처 조작을 가능하게 해주는 동작인식 레이더 모듈 개발 중

- 카메라를 통한 피사체의 움직임을 감지하는 기존 인식기술과는 다르게 전파의 움직임을 통해 다양한 형태의 움직임을 감지

※ 프로젝트 솔리는 돌아온 레이더파를 이용해 어떤 동작을 수행했는지 추출. 레이더는 카메라와 비교하면 민감해서 작은 움직임도 읽을 수 있음

- 레이더의 장점은 외부에 안테나 같은 게 노출되지 않아도 높은 정밀도를 유지할 수 있는 것. 따라서 손가락 움직임만으로 원하는 동작을 감지하거나 음악 플레이어를 주머니에서 빼지 않고 조작 가능함

- 스마트폰, 스마트워치, 웨어러블 기기 등을 직접적인 터치 없이 손을 비비거나 튕기는 동작을 통해서 조작 가능

- 특히 터치가 위험한 상황의 기기를 조작하거나 정확한 위치에 터치를 할 수 없는 장애인들에게 활용가능성 높음

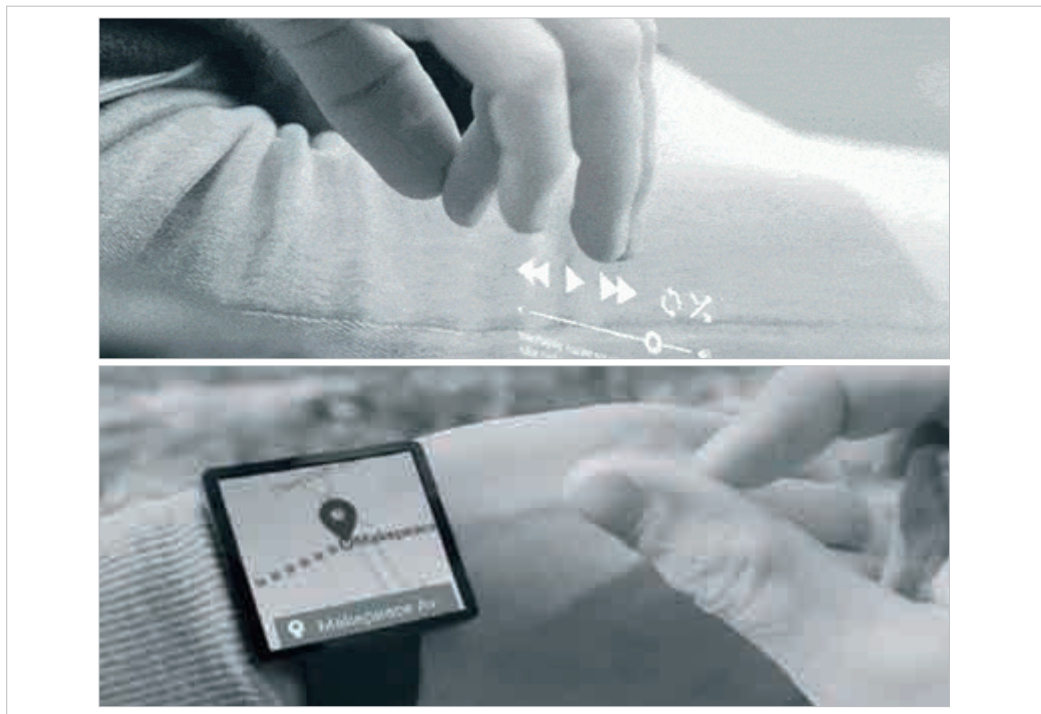


그림 10. 구글의 동작인식 센서 Soli 프로젝트

●● 눈으로 TV를 조작하는 기술

- ETRI(한국전자통신연구원)는 리모컨 대신 눈 동작만으로 TV 메뉴를 조작 할 수 있는 '시선인식 기반의 차세대 사용자경험(UI/ UX) 기술' 을 개발
- TV 화면 아래에 달린 카메라가 사람의 동공을 세밀하게 추적하여 사용자의 시선에 따라 커서가 이동하고 선택하고자 하는 대상을 1초 이상 쳐다 보면 클릭되는 방식으로 작동
- 2미터 이상의 원(遠)거리에서도 사용 할 수 있어 활용가치가 크고, 단순히 메뉴 조작 뿐만 아니라 한글 등 문자를 입력 할 수 있는 영상키보드 기술도 개발되어 인터넷 검색이나 문서 작업 등도 지원 가능
- TV 환경 외에도 사용자의 시선 추적을 응용한 차세대 게임, 자동차 운전자의 졸음운전 감시, 홍채 정보 기반의 본인 인증 서비스 등 다양한 분야에 활용이 가능 할 것으로 예상
- 특히 리모컨 이용이 어려웠던 지체장애인들의 정보 접근성 향상에 크게 기여 할 것으로 기대



그림 11. 원거리 비착용형 시선추적기술 원리

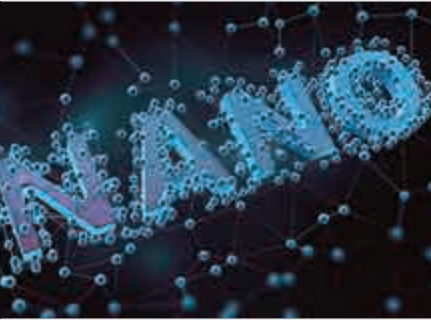


06 시사점

- 음성, 동작, 터치인식 등 다양한 입력 방식을 활용한 스마트 인터랙션 기술은 IT 기기나 서비스와 융합하였을 경우 그 파급력이 더욱 극대화 될 것으로 전망
 - 생활 전반에 확산되고 있는 스마트폰, 스마트 TV 등 IT 산업 기반의 스마트 인터랙션 기술은 주거, 교육, 의료, 문화산업 등으로의 연계효과가 상당 할 것으로 예상
- 빅데이터, 인공지능 등과의 융합을 통해 관련 기술 및 제품은 점차 정교화, 고도화 가능 할 것으로 기대되며 이는 인간 친화적 서비스 및 제품개발에 핵심적 경쟁 요소가 될 것으로 판단
- 보다 직관적이고 편리하며, 인간의 다양한 감성적 욕구 충족을 위해 인간-기기 간 상호 작용을 보다 수월하게 할 수 있게 하는 고도화 기술 선점을 통한 노력 필요

참고문헌

- 류한석(2011), 스마트 인터랙션의 동향 및 전개방향, 디지에코
- 류한석(2015), 동작인식 기술 트렌드 및 시사점, 디지에코
- 한국연구재단(2015), 보도자료(안경식 디스플레이, 손동작으로 움직이는 아바타... 가상현실 '성큼')
- 한국인터넷진흥원(2013), 인터넷 및 정보보호 10대 이슈 전망
- 한국콘텐츠진흥원(2011), 음성인식 기술의 동향과 전망, 문화기술(CT) 심층리포트
- 한국콘텐츠진흥원(2012), 휴먼-디바이스 인터랙션 기술, CT 인사이트
- 한국콘텐츠진흥원(2014), 얼굴인식 기술이 주도할 콘텐츠 서비스의 진화
- Next-Generation User Interaction, June 2015, Frost & Syllivan
- <http://techholic.co.kr/archives/42249>



융합연구정책센터
Convergence Research Policy Center

(02792) 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5 t. 02-958-4984