

Convergence Research Review

융합연구리뷰

차세대 정보통신기술을
이끌어나갈 근간
정보물리학

—

차세대 식품기술의 한 축을 담당할
나노기술

목차

융합연구리뷰 | Convergence Research Review
2015 April vol.1 no.1

- 03 발간사
 - 04 편집자주
 - 08 모든 정보는 양자가 지니고 있다
차세대 정보 기술을 이끌어 나갈 근간 정보물리학
정보물리학
 - 32 국가 R&D 현황 분석_ 정보물리학
 - 38 나노기술은 이미 우리 곁에 와 있다
차세대 식품기술의 한축을 담당하는 나노과학기술
식품안전에 있어서의 나노기술
 - 62 국가 R&D 현황 분석_ 식품안전에 있어서의 나노기술
-

표지 이야기

불확정성과 입자-파동 이중성의 양자물리학과 정보물리학을 시각화한 그림

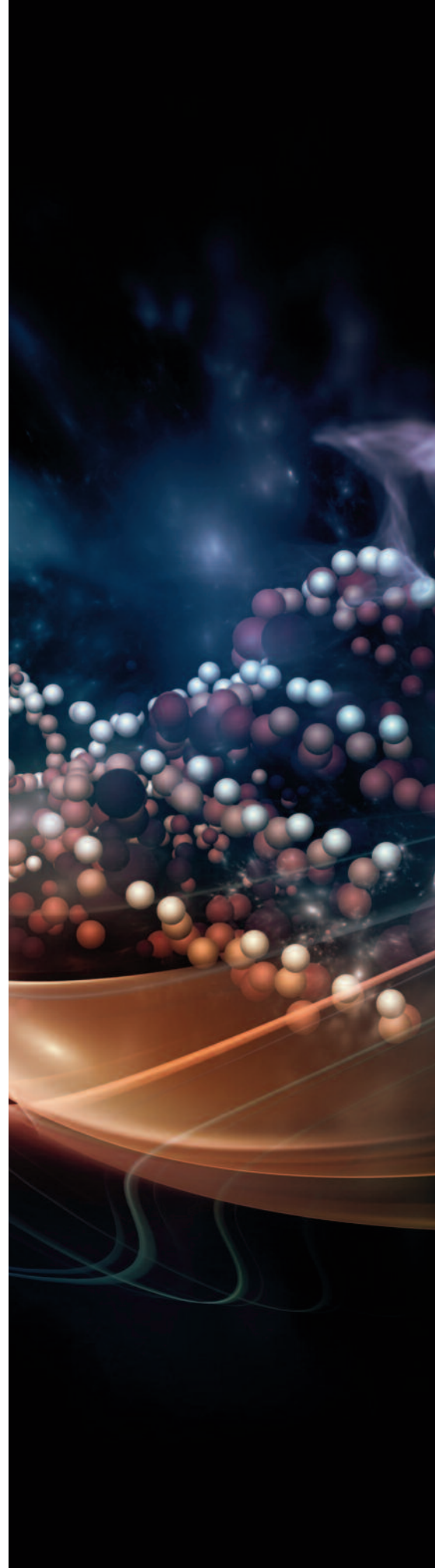
융합연구정책센터 KIST
Convergence Research Policy Center

발행일 2014년 4월 6일

발행인 하성도

발행처 한국과학기술연구원 융합연구정책센터
136-791 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5
tel. 02-958-4984 | <http://crpc.kist.re.kr>

편집 (주)디자인플럼 tel. 051-202-9201





발간사

아테네 철학을 뿌리로 하여 분화하기 시작한 학문은 18세기 산업혁명을 거치며 폭발적으로 증가하고 확장하였습니다. 현대의 과학기술 이루고 있는 물리, 화학, 기계, 전기 등의 학문이 다소간의 차이는 있겠지만 이 시기를 기점으로 학문적 체계를 갖추고 눈부신 발전을 거듭하였으며, 20세기에 이르러 그 꽃을 활짝 피웁니다.

최근에 이르러 각 영역에서 높게 쌓은 학문의 칸막이와 경계가 이제까지와는 다른 방향으로 움직이기 시작하였습니다. 몇 년전부터 우리사회에 불고 있는 ‘인문학 열풍’에서 보듯이, 멀리 떨어져 있던 다른 분야가 우연히 만나 새로운 학문과 기술이 나타나고, 새로운 제품과 서비스로 발전하고 있습니다. 특히 정보기술(IT), 바이오기술(BT), 나노기술(NT)로 대표되는 융합기술은 그동안 인류가 해결하지 못하였던 난제의 실마리를 제공할 것으로 기대되고 있습니다.

세계 각국은 융합연구를 확대하고, 새로운 융합기술의 개발과 보급에 막대한 자원을 투자하고 있으며, 우리 정부에서도 2014년에 ‘창조경제 실현을 위한 융합기술 발전전략’을 수립하는 등 융합연구의 활성화를 위한 지원을 확대하고 있습니다.

새로운 제품과 서비스를 발굴하여 경제의 성장동력을 만들고, 우리 사회와 인류가 마주하고 있는 사회문제의 해결을 위해서는 학문, 기술, 그리고 이를 수행하는 사람의 협력과 융합은 필수적입니다. 특히 최근의 연구 주제는 과학기술에 대한 지식뿐만 아니라, 이를 사용하게 될 시장과 사회의 수요, 연구개발과 활용과정에서의 윤리적 문제와 파급효과까지 다차원적인 정보의 분석과 판단을 필요로 하게 되었습니다.

이에 융합연구정책센터에서는 태동단계에 있거나 국내에 많이 알려지지 않은 융합 연구주제와 기술을 발굴하여 국내외 연구동향에 대한 심층분석 리뷰와 함께 국내의 R&D 현황을 제공하는 ‘융합연구리뷰’를 발간합니다. ‘융합연구리뷰’는 융합 연구와 기술 외에도 융합을 보다 잘 수행하기 위한 방법론, 융합연구 활성화 및 생태계 조성을 위한 정책방안 등도 전달할 예정입니다. ‘융합연구리뷰’는 끊임없이 연구에 매진하고 있는 연구자, 과학기술과 사회와의 소통을 고민하고 있는 정책입안자, 그리고 과학기술에 애정을 갖고 있는 일반 국민에게까지, 융합기술의 개발과 융합연구 정책에 대한 이해를 높이는 가치 있는 정보가 되리라 기대합니다. 앞으로 많은 관심과 성원 부탁드립니다.

차세대 정보통신 기술을 이끌어 나갈 근간 정보물리학

정보 혁명의 과정 속에서 우리나라는 범국가적 차원의 발 빠른 대응을 통해 정보통신 기술(ICT, Information Communication Technology)분야의 선진국으로 발돋움 할 수 있었다. 더 나아가 정보통신 관련 산업이 국가 경제의 한 축을 담당하며, 이제는 대한민국이 전세계 정보통신 기술을 선도해 나가는 역할을 수행하고 있다. 그렇다면 미래에도 대한민국이 정보통신 산업에서의 국가 경쟁력을 유지하고, 차세대 정보통신 기술에서도 주도적인 역할을 수행할 수 있는 방법은 무엇일까?

물리학 분야에서는 현대물리의 근간인 양자를 기반으로 한 '정보'에 대한 본질 탐구가 이루어지고 있다. 이러한 양자물리학을 바탕으로 한 '정보' 자체에 대한 본질 탐구와 함께 양자 얽힘과 불확정성의 원리와 같은 양자물리학적 개념과 정보통신 기술간의 융합 또한 시도되고 있다. 이러한 '정보' 본질에 대한 탐구와 융합의 시도가 바로 차세대 정보통신 기술을 선도해 나갈 수 있는 새로운 원동력은 아닐까? (미국과 같은 선진국에서도 양자물리학과 정보통신 기술간의 융합을 위한 연구가 양자 컴퓨팅, 양자 보안 기술 등 다양한 형태로 시도되어 오고 있다.)

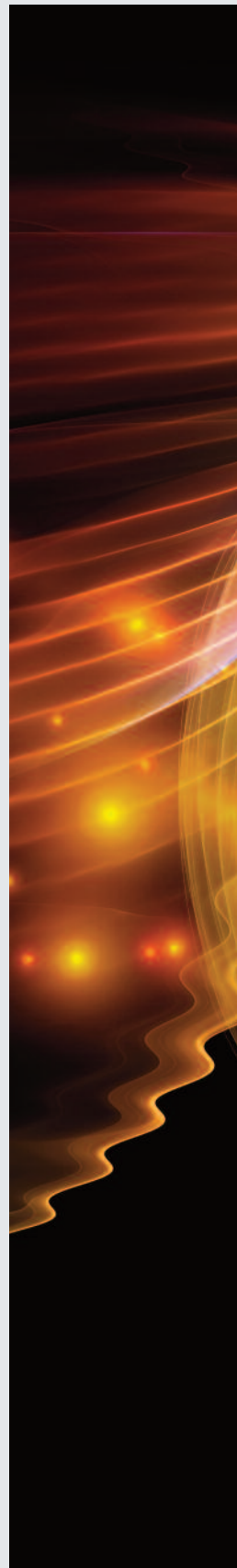
이에 이번 호의 1부에서는 차세대 정보통신 기술 개발을 위해 노력하는 많은 전문가 분들에게 정보의 본질에 대한 양자물리학적 탐구 내용에 대하여 심도 있게 소개를 하고자 한다. 본 리뷰를 통해 정보 본질에 대한 이해와 양자물리학과 정보통신 기술의 융합에 대한 단초를 얻어, 향후 차세대 정보통신 기술을 선도해 나가는데 도움이 되길 기대해 본다.

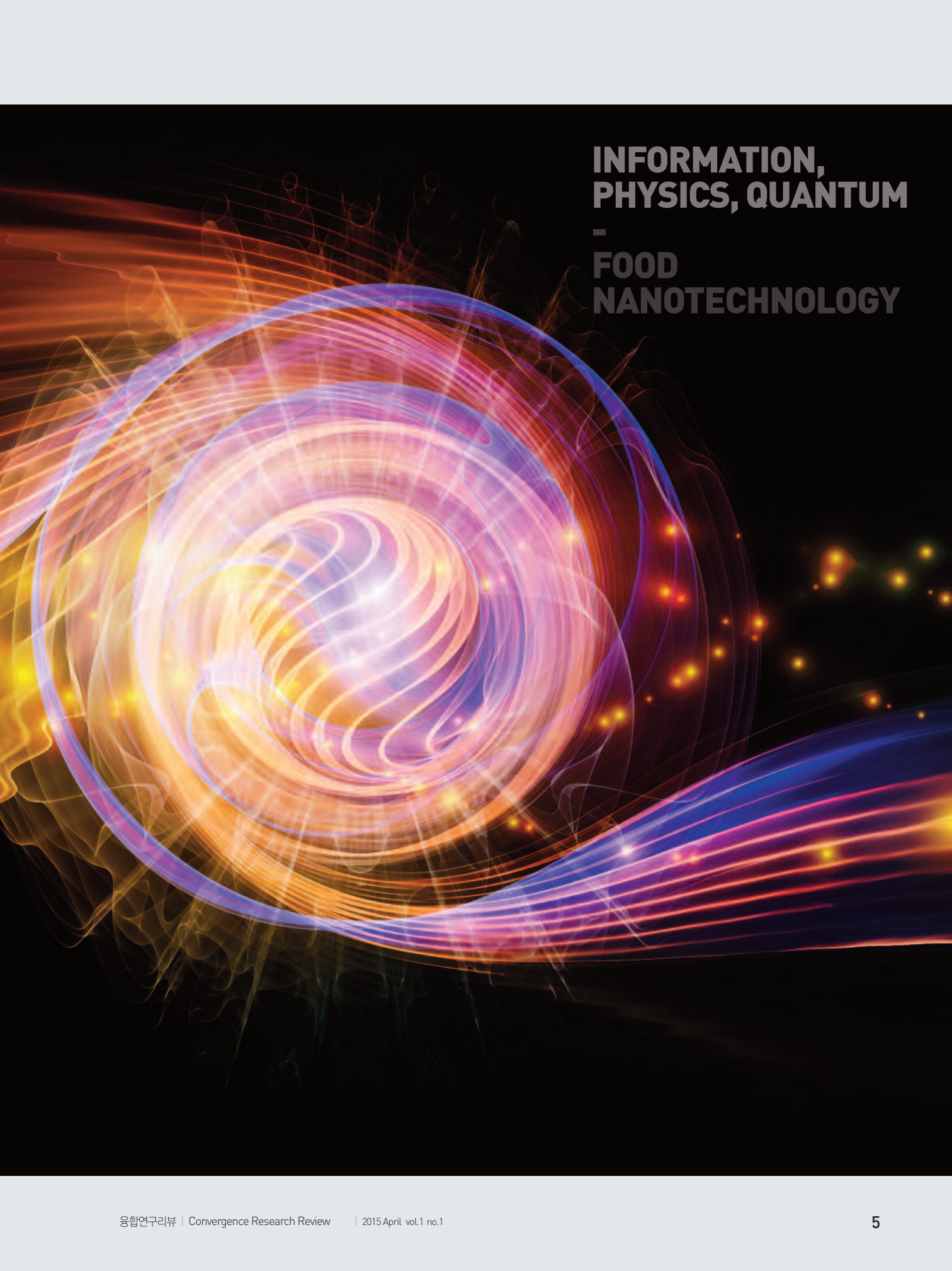
식품안전에 있어서의 나노기술

나노기술은 1981년 나노세계를 관찰할 수 있는 주사형 터널링 현미경(STM)이 개발된 이후로 1990년대 선진국들의 경쟁적인 투자를 바탕으로 지난 20여년 간 엄청난 발전이 이루어졌으며, 재료, 전자, 생명 분야 등의 발전에 지대한 영향을 끼치며 어느 정도 성숙기에 접어들었다고 평가 받고 있다. 최근에는 그 활용 분야를 더욱더 다각화하며 제2의 도약기를 준비하고 있다. 그 대표적인 분야가 바로 전세계 시장의 규모가 6조 달러*로 예상('16년 기준) 되는 식품 산업의 근간 식품기술 분야이다. 나노기술은 식품 안전 기술 개발과 나노기술이 적용된 새로운 식품 개발 등에 활용되고 있다.

*'08년 기준 식품산업 규모가 4조 3,890억달러, 자동차 산업이 1조 7,290억달러, IT 서비스 산업이 7,840억 달러임

이번 호의 2부에서는 나노기술과 식품기술의 전문가에게 식품 안전에 있어서의 나노기술을 중심으로 식품기술과 나노기술의 융합 사례를 심도 있게 소개하고자 한다. 본 리뷰를 통해 향후 활발한 융합연구를 통한 차세대 식품 산업을 이끌어갈 신기술들이 나타나기를 기대해 본다.





**INFORMATION,
PHYSICS, QUANTUM**
-
**FOOD
NANOTECHNOLOGY**

◦ 모든 정보는 양자가 지니고 있다
차세대 정보 기술을 이끌어나갈 근간 정보물리학

INFORMATION, PHYSICS, QUANTUM





정보의 물리

Information,
physics, quantum



서론

21세기는 정보화시대다. 1970년대 엘빈 토플러는 농업혁명, 산업혁명에 이어 정보혁명을 제 3의 물결이라 일컬으며, 앞으로 정보가 가장 중요한 자원이 될 것이라 예견한 바 있다. 물건이나 자본보다 정보가 더 가치 있는 시대가 올 것이라 이미 예측한 것이다. 실제 인터넷이 보급되고 컴퓨터가 발명되자 엄청난 양의 정보를 생성, 이동, 저장, 분석하는 것이 가능해졌다. 스마트폰은 인터넷과 컴퓨터를 결합하여 손바닥 위에 놓음으로서 정보혁명의 유비쿼터스 시대를 열었다. 이제는 정보의 과잉이 문제다. 하지만, 대규모 정보로부터 의미 있는 정보를 찾아내는 빅 데이터(big data)가 새삼 주목을 받고 있기도 하다.

이런 사회문화적 조류에 따라 과학의 여러 분야에서도 정보의 중요성이 점차 강조되는 분위기가 있다. 생명과학은 DNA에 담긴 정보의 의미를 찾는 거대한 정보과학으로 변모했다. 데이터에 대한 강력한 검색기능과 빠른 처리능력은 이제 첨예한 기술경쟁 분야가 되었다. 구글은 단순한 검색엔진이 아니라 세상 모든 정보를 가진 21세기 알렉산드리아 도서관이다. '구글'은 모든 것을 알고 있다는 말이 있을 정도다.

지금과 같은 속도로 인터넷에 정보가 집적된다면, 결국 이 세상의 모든 지식과 정보를 인터넷에서 보게 될지도 모른다. 사실 우리가 살아가는 하루하루의 일상은 모두 정보로 표시될 수 있다. 극단적으로 말해서 세상 모든 사람의 일거수일투족을 동영상으로 촬영하고 모든 대화와 모든 주고받은 문서를 저장한 데이터는 인간사회 그 자체라고 불리도 무방할 것이다. 이런 데이터는 결국 0과 1의 이진수로 저장매체에 저장될 수 있다. 결국 이 세상이 데이터에 불과할 수도 있다는 이야기다.

이제 이런 생각을 우주로 확장해 보자. 우주가 무엇인지에 대한 질문은 인류의 역사와 동시에 시작된 것이다. 물리학은 우주를 이루는 기본 물질이 무엇인지 탐구해왔다. 원자에서 시작해서 원자핵, 쿼크, 이제는 초끈에 이르기까지 우주를 이루는 근본 물질에 대한 탐구는 아직 첨단 연구주제다. 이런 연구에 깔린 기본 철학은 우주의 근본이 물질이라는 유물론적 세계관이다. 우주가 정말 물질로 구성되어 있는가 하는 질문은 사실 과학이라기보다 철학에 가깝다. 하지만, 현대물리학은 우주를 입자로 기술하는 것보다 장(field)으로 기술해야 한다거나 우주의 본질이 끈이라고 주장하기도 한다. 따라서 우주의 본질이 정말 물질이냐는 질문도 물리적으로 의미가 전혀 없는 것은 아니다. 이런 점에서 최근 우주의 본질을 정보로 보려는 움직임은 주목할 만하다.



그림 1. 영화 <매트릭스>의 한 장면. 이 세상이 컴퓨터 프로그램에 불과하다는 내용으로 큰 반향을 불러일으켰다. 최근 우주의 근본이 정보일지 모른다는 제안이 등장하고 있다. 그렇다면 <매트릭스>의 내용이 완전터무니 없는 것만은 아니다.

철학자 비트겐슈타인은 “세계는 사실들의 총체이지 사물들의 총체가 아니다.”라는 말을 남겼다. 사실 물리학자들은 물질이 실재한다고 생각한다. 하지만, 실재한다는 개념이 무엇인지 현대물리학에서 분명하지 않다. 양자역학이 제기한 비국소성이나 실재성의 부정과 같은 반직관적 결과들을 보면, 과연 물질이 실재 하는가하는 의문이 들 수 있다. 양자역학은 파동함수를 통해 오로지 계의 상태에 대해서만 이야기한다. 상태의 미래에 대해 알 수 있는 것은 확률 뿐이다. 확률을 정량화하는 물리량을 정보 엔트로피라 부른다. 이처럼 양자역학은 본질적으로 정보를 기반으로 하고 있다. 결국 우주의 근원을 사물이 아닌 사실, 즉 물질이 아닌 정보로 표현하려는 것은 새로운 대안을 찾던 물리학자들의 고민 끝에 나온 진지한 제안이다. 물론 영화 <매트릭스>에 나오는 SF와 같은 것으로 보일 수도 있다.

우선 2장에서서는 정보가 무엇인지 역사적, 철학적, 물리적 맥락에서 살펴볼 것이다. 물리학에서 정보가 의미를 갖게 된 것은 ‘맥스웰의 도깨비’ 역설 때문이다. 이 역설을 해결하는 과정에서 정보 엔트로피의 물리적 의미가 밝혀진다. 정보 엔트로피는 측정이라는 양자역학의 가장 미묘한 문제와 직접적으로 연결된다. 결국 정보가 가진 주관성/객관성이라는 오랜 난제가 양자측정이론으로 해결의 실마리가 생긴다. 정보의 열역학적 특징이 이해되자 정보를 이용한 엔진의 가능성이 열리게 된다. 최근 정보로 구동되는 질라드 엔진이 실험적으로 구현되었다. 정보엔진과 관련한 정보의 열역학은 3장의 주제다.

양자역학은 정보를 바라보는 새로운 관점을 제공한다. 양자역학은 위치, 운동량과 같은 정보를 완전히 아는 것이 원리적으로 불가능하다고 이야기한다. 우리는 대상이 입자인지 파동인지조차 알지 못한다. 우리가 알 수 있는 것은 단지 계의 상태와 그 상태가 얻어질 확률이다. 이런 점에서 양자역학은 정보만을 다룬다고 볼 수도 있다. 이제 양자측정이론은 정보를 이해함에 있어 핵심개념이 되었다. 이것이 4장의 주제다.



양자역학은 이상하다. 우리가 가진 실재의 개념을 가지고 양자역학을 이해하려는 어떤 시도도 성공한 적이 없다. 그렇다면 우리가 버려야 할 것이 위치나 운동량, 결정론적 세계관만이 아닐지도 모른다는 말이다. 양자 얽힘(entanglement)이나 양자 지우개(eraser), 지연된 선택(delayed choice)은 양자역학이 기술하는 상태가 시공간의 제약을 벗어남을 보여준다. 결국 한 번도 그 존재가 증명된 바 없는 실재라는 개념보다 양자상태가 기술하는 정보만으로 우주를 이해하는 관점이 가장 좋은 방법인지도 모른다. 존 아치볼드 휠러(John Archibald Wheeler)는 'it from bit(비트에서 존재로)' 라는 유명한 경구를 통해 우주에서 가장 근본적인 것이 정보임을 주장한 바 있다. 이에 대해서 5장에서 논의할 것이다.

정보란 무엇인가?

새년의 정보 엔트로피

정보가 물리적인 대상이 되려면 정량적으로 표시할 수 있어야 한다. 우리에게 필요한 것은 정보의 철학적 의미가 아니라 수학적 정의다. 정보는 어떤 사건이나 사실 혹은 진술에 대한 것이다. “내일 비가 내린다.”는 진술에 들어 있는 정보의 양은 얼마나 되는가? 지금이 장마철이라면 이 문장에 들어있는 정보의 양은 크지 않다. 비가 올 것이 당연하기 때문이다. 하지만 여기가 사막 한 가운데라면 이 문장은 엄청난 정보를 가진 셈이 된다. 이로부터 어떤 사건의 진술이 가진 정보의 양은 그 사건이 일어날 확률과 관련 있다는 것을 알 수 있다.

어떤 사건 X에 대해, X가 가질 수 있는 가능한 결과를 x로 표시하자. 예를 들어 주사위를 던지는 사건에 대해 x는 1부터 6까지의 값이 될 수 있다. 각 경우의 확률을 p(x)로 나타내면 각 사건의 결과에 들어있는 정보는 확률의 역수 1/p(x)로 표현가능하다. 확률이 작을수록 정보량이 크기 때문이다. 정보량이 질량이나 에너지 같은 것이라면 두 사건의 정보량은 개별 사건 정보량의 합과 같아야 할 것이다. 서로 독립인 두 사건 X, Y가 동시에 일어날 확률은 p(x)p(y)로 주어지며, 그 정보량은 1/[p(x)p(y)]가 된다. 이는 앞서 정의된 개별 정보의 합 1/p(x)+1/p(y)와 다르다. 따라서 로그함수를 도입하여 log[1/p(x)]을 특정사건 x의 정보량으로 정의하는 것이 클로드 새년(Claude Shannon)의 생각이었다. 결국 X의 정보량은 다음과 같이 모든 가능한 개별사건의 평균으로 주어지며, 이를 정보 엔트로피 혹은 새년 엔트로피라고 부른다.

$$H = - \sum_x p(x) \log p(x) \tag{1}$$

만약 X가 가질 수 있는 모든 경우의 수가 N이고 그 확률이 모두 같다면 엔트로피는 logN으로 주어진다. 즉, 가능한 경우의 수가 엔트로피와 관련된다는 것이다. 메뉴가 두 개뿐인 식당과 100개인 식당에서 메뉴 고르는 일을 생각하면 경우의 수가 많을수록 복잡하다는 것을 알 수 있다. 이런 점에서 엔트로피는 복잡성의 척도가 된다. 메뉴를 임의로 골라야 한다면 메뉴가 많을수록 더 무지해진다고 볼 수도 있다. 이런 점에서 엔트로피는 무지의 척도이기도 하다. 원래 정보 엔트로피는 데이터 전송에 필요한 최소의 채널의 개수를 계산하기 위해 고안되었다. 하지만, 맥스웰의 도깨비라는 역설을 해결하는 과정에서 이 개념이 물리학으로 들어오게 된다.

맥스웰의 도깨비

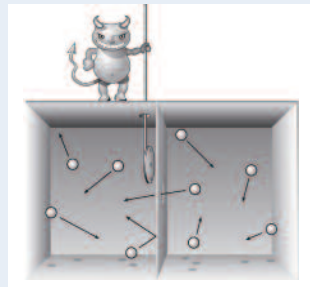


그림 2 맥스웰의 도깨비 모식도. 도깨비는 분자의 속도를 측정하고 그 결과에 따라 벽에 뚫린 작은 구멍을 여닫을 수 있다.

1871년 제임스 클라크 맥스웰은 <열의 이론>이라는 책에서 열역학이 가진 미묘한 문제를 지적한다^{1,2}. 만약 그림 2와 같이 기체분자의 속도에 따라 구멍을 여닫는 도깨비가 있다고 하자. 도깨비가 적절히 조작을 하면 한쪽에는 빠른 기체, 다른 한쪽에는 느린 기체를 모을 수

있다. 도깨비가 일(work)을 하지 않고 이런 작업을 할 수 있다면, 온도가 균일한 상태에서 자발적으로 온도의 차이가 얻어진다. 이는 열역학 제2법칙에 위배된다. 도깨비가 하는 작업은 단지 속도를 측정하고 문을 여닫는 것이다. 과연 도깨비는 일을 하지 않고 이런 작업을 할 수 있을까?

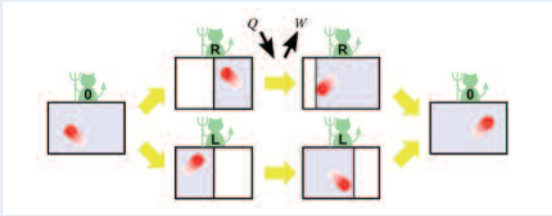


그림 3. 질라드 엔진의 모식도. 하나의 분자가 들어 있는 엔진에 벽을 넣어 둘로 나눈다. 분자는 오른쪽에 있거나 왼쪽에 있게 된다. 두 경우 모두 벽 양쪽의 압력차이 때문에 일을 할 수 있다. 이 때, 열원을 붙여 등온팽창 시키면 초기조건으로 돌아오는 순환엔진을 만들 수 있다.

1929년 레오 질라드는 맥스웰의 도깨비에 대한 중요한 단서를 제공한다³. 그림 3과 같이 온도 T 인 분자 하나로 이루어진 엔진을 생각해보자. 여기에 벽을 넣어 엔진을 둘로 나눈다. 분자는 오른쪽에 있거나 왼쪽에 있을 것이다. 이제 벽이 움직일 수 있다고 가정하면, 압력차이 때문에 벽은 분자가 없는 방향으로만 움직인다. 이때 엔진에 온도 T 인 열원(heat reservoir)을 붙여주면 등온팽창에 의해 $kT \ln 2$ 만큼의 열역학적 일(work)을 얻게 된다. 벽이 엔진의 한쪽 끝에 도달하면 초기상태로 되돌아오게 되어 순환엔진(cyclic engine)이 된다. 이는 카르노(Carnot)의 원리를 위배한다. 왜냐하면 순환엔진의 경우 하나의 온도를 갖는 하나의 열원으로부터 일을 얻을 수 없기 때문이다.

열역학적으로 보면 엔진이 등온팽창할 때 열원에서 엔진으로 열 Q 가 이동한다. 이것이 엔진이 외부에 하는 일의 근원이다. 즉, $Q = kT \ln 2$ 가 된다. 이 때 열원의 엔트로피 S 가 엔진으로 같이 이동한다. ($S = Q/T = k \ln 2$) 엔진이 초기조건으로 돌아오고 나면 엔진의 엔트로피 변화는 없다. 엔트로피는 상태만의 함수이기 때문이다. 하지만, 열원은 열과 엔트로피를 엔진에 주기만 했으므로, 엔트로피가 감소된 상태다. 따라서 엔진과 열원으로 구성된 우주의 엔트로피는 한 주기(cycle)가 끝난 후 감소하게 된다. 이는 열역학 제2법칙에 위배된다. 질라드 엔진이 카르노의 원리에 어긋나지만, 열역학 제2법칙을 위배한 것은 아니다. 사실 분자가 어느 쪽에 있는지 알게 되는 과정에 단서가 있다. 도깨비가 분자의 위치를 측정하면 위

치에 대한 정보가 도깨비에게 전달된다. 이것은 정보 엔트로피가 이동하는 것으로 볼 수 있다. 도깨비에게 전달된 엔트로피는 최후에 열 저장소로 이동되며, 이것이 앞서 언급한 열원의 엔트로피 감소분을 정확히 상쇄한다. 이 과정에 대해서는 3장에서 보다 정확히 다룰 것이고, 여기서는 그 의미만 음미해보자.

이런 식으로 문제를 해결하기 위해서는 가정이 필요하다. 도깨비가 분자의 위치 측정으로부터 얻은 정보 엔트로피와 열원에서 엔진으로 이동한 물리적 엔트로피($S = Q/T = k \ln 2$)를 동일하게 간주한다는 것이다. 즉, 정보 엔트로피와 물리적 엔트로피가 같다는 가정이다. 이것을 받아들이지 않는다면 열역학 제2법칙이 무너질 수 있다. 참고로 정보 엔트로피 H 와 물리적 엔트로피 S 사이에는 상수만큼의 차이가 있다. 즉, $S = kH$ 이다. 여기서 k 는 볼츠만 상수다.

이제 질라드 엔진이 열역학 제2법칙을 위배하지 않는다는 것은 학계의 정설로 자리 잡았다. (카르노의 원리는 틀렸다.) 정보 엔트로피를 물리적 엔트로피로 보아야 한다는 뜻이다. 하지만, 이로부터 정보의 주관성/객관성이라는 문제가 나온다. 정보는 객관적일까? 즉, 엔트로피는 유일하고 객관적으로 결정될까? 한글의 엔트로피를 계산하기 위해서는 한글의 자모음이 사용되는 확률, 즉 빈도를 알아야 한다. 하지만 이것을 어떻게 객관적으로 결정할 수 있을까? 대한민국 모든 사람들의 대화를 실시간으로 분석할 수는 없을 거다. 가능한 샘플로 빈도를 알아내는 방법밖에 없다. 결국 어떤 사건이 일어날 확률은 그 사건을 바라보는 관찰자의 정보 수집 및 분석 능력에 따라 달라진다. 하지만 볼츠만이 도입한 물리적 엔트로피는 위상공간의 분포를 통해 유일하게 정의된다.

질라드 엔진은 정보 엔트로피가 물리적 엔트로피와 같을 것을 강제한다. 하지만, 물리적 엔트로피는 객관적이지만 정보 엔트로피에는 주관적 측면이 존재한다. 이 둘이 어떻게 같을 수 있을까? 모든 정보 엔트로피가 열역학적 일에 기여할 수 있는 것은 아니다. 이 문제의 단서는 양자측정에 있다. 이에 대해서는 4장에서 자세히 다룰 것이다. 질라드 엔진이 실제 작동할 수 있음은 고분자⁴, 원자포획(atom trap)^{5,6}, 단일 전자 박스(single-electron box)⁷, 콜로이드입자(colloidal particles)^{8,9} 등을 이용한 여러 형태의 실험으로 최근 증명되었다.

정보의 열역학

란다우어의 지우기(Landauer's erasure)

질라드는 1929년 논문에서 이미 정보의 중요성을 알고 있었다. 이후 레온 블릴루앙(Leon Brillouin)은 측정이라는 키워드를 제시하고 측정에 필요한 에너지를 제시하였다¹⁰. 하지만, 로프 란다우어(Rolf Landauer)¹¹, 찰스 베넷(Charles Bennett)¹², 올리버 펜로즈(Oliver Penrose)¹³ 등은 메모리 지우기(erasure)가 가장 중요한 개념이라고 주장한다.

이들은 우선 측정과정에서 엔트로피 변화가 일어나지 않음을 보인다. 도깨비는 물리적으로 1 비트의 정보를 저장하는 메모리로 생각할 수 있다. 그렇다면 측정하는 과정은 밀도행렬(density matrix)을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{1}{2}(|L \times L|_S + |R \times R|_S) \otimes |0 \times 0\rangle_M \Rightarrow \frac{1}{2}(|L \times L|_S \otimes |0 \times 0\rangle_M + |R \times R|_S \otimes |1 \times 1\rangle_M) \quad \text{식(2)}$$

아래 첨자 S는 시스템, 즉 엔진, M은 도깨비, 즉 메모리를 나타낸다. 측정하기 전에 분자는 왼쪽(L) 혹은 오른쪽(R)에 1/2의 확률로 존재한다. 따라서 엔진의 엔트로피는 $\log 2$ 다. 메모리는 0이라는 초기상태에 있고, 엔트로피는 0이다. 측정이 끝나면 분자가 왼쪽 또는 오른쪽에 있는지에 따라 메모리의 상태가 각각 0 또는 1이 된다. 이처럼 메모리와 엔진 사이에 상호관계(correlation)가 형성되는 것이 측정이다. 하지만, 이 과정에서 전체 계의 엔트로피는 변하지 않는다. 경우의 수가 여전히 2가지이기 때문이다. (엔진이 L이면서 메모리가 0, 또는 엔진이 R이면서 메모리가 1)

측정이 끝나면 벽이 움직이며 등온팽창한다. 이 과정에서 열원의 열이 엔진으로 들어와서 일로 전환된다. 동시에 열원에서 엔진으로 엔트로피가 이동한다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2}(|L \times L|_S \otimes |0 \times 0\rangle_M + |R \times R|_S \otimes |1 \times 1\rangle_M) \\ & \Rightarrow \frac{1}{2}(|L \times L|_S + |R \times R|_S) \otimes \frac{1}{2}(|0 \times 0\rangle_M + |1 \times 1\rangle_M) \end{aligned} \quad \text{식(3)}$$

전체 계의 경우의 수가 2개에서 4개로 늘었음에 주목하자. 즉, 엔트로피가 $2\log 2$ 로 두 배가 된다. 앞서 지적한대로 열역학 제2법칙을 만족시키기 위해서는 늘어난 엔트로피 $\log 2$ 가 열원으로 되돌아가야 한다. 순환엔진을 다시 작동하기 위해서는 메모리를 초기화해야 하며 이는 메모리를 지움으로써 가능하다. 지운다는 것은 0 또는 1이 가능한 상태 $(1/2)(|0 \times 0\rangle_M + |1 \times 1\rangle_M)$ 에서 0만 가능한 상태 $|0 \times 0\rangle_M$ 로 바꾼다는 뜻이다. 메모리의 엔트로피가 줄어든다는 말이다. 줄어든 엔트로피는 어디로든 가야한다. 이 예에서는 우주가 엔진, 메모리, 열원만으로 구성되어 있으므로 엔트로피는 열원으로 되돌아가야한다. 이렇게 해서 줄어든 열원의 엔트로피를 되돌릴 수 있다. 메모리의 지우기(erasure)가 열역학 제2법칙을 구한 것이다. 엔진, 도깨비, 열원 사이의 엔트로피 변화를 그림 4에 정리했다.

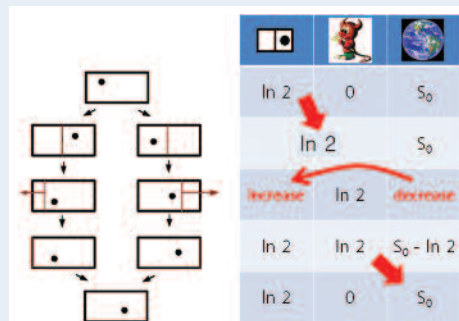


그림 4. 질라드 엔진에서 엔트로피의 변화와 이동을 모식적으로 나타낸 그림

피드백이 있는 경우의 열역학 제2법칙

정보를 이용하면 카르노의 원리를 위배하는 순환엔진을 고안할 수 있다. 하지만, 이 엔진이 열역학 제2법칙을 위배하는 것은 아니다. 왜냐하면 열원에서 엔진으로 이동한 엔트로피를 측정과 지우기를 통해 열원으로 되돌려줄 수 있기 때문이다. 그렇다면 정보를 고려하여 열역학 제2법칙을 다시 구성할 수 있을까? 측정과 지우기를 통해 이동하는 정보의 물리적 특성이 무엇일까? 지금까지의 논의를 엄밀한 수학적 표현으로 나타내는 것이 가능할까? 2008년 타카히로 사가와(Takahiro Sagawa)와 마사히토 우에다(Masahito Ueda)는 이에 대한 수학적 답을 제시한다^{14,15}.

질라드 엔진의 핵심적인 부분은 계의 상태를 측정하고 그 결과에 따라 다른 조작을 가해주는 것이다. 이것을 피드백 제어(feedback control)라고 하는데, 앞의 논의에서 이것에 대해 자세히 언급하지는 않았다. 예를 들어 질라드 엔진의 경우 분자가 왼쪽에 있다면 벽이 오른쪽으로 움직일 것이므로, 일을 할 수 있는 장치를 그 방향으로 부착해야 한다. 이런 작업을 하지 않으면 엔진은 일을 하지만 우리가 그 일을 유용하게 이용할 수 없다. 그래서 사가와는 피드백이 존재하는 상황에서의 열역학 제2법칙이라는 용어를 사용했다.

사가와가 구한 피드백이 있는 경우의 열역학 제2법칙은 다음과 같이 표현된다¹⁶.

$$W \leq -\Delta F_n + kT I(X:M) \quad \text{식 (4)}$$

여기서 F_n 은 비평형(non-equilibrium) 자유에너지(free energy)로서 통상적인 자유에너지와는 다르다. 이에 대해서는 다음 절에서 자세히 논의할 것이다. 식 (4)에서 마지막 항이 없으면 보통의 열역학 제2법칙이 된다. 즉, 등온과정에서 할 수 있는 최대의 일은 자유에너지의 변화량으로 주어진다. 하지만, 정보를 이용하여 피드백 하는 과정이 도입되면 마지막 항으로 기술되는 추가적인 일을 얻을 수 있다. 이것은 물리계 X 와 측정 장치 혹은 메모리 사이의 상호정보량(mutual information)으로 $I(X:M)$ 표현된다.

두 사건 X, Y 의 상호정보량은 다음과 같이 정의된다¹⁷.

$$I(X:Y) = H(X) - H(X|Y) = H(Y) - H(Y|X) \quad \text{식 (5)}$$

여기서 $H(X|Y)$ 는 조건부 엔트로피라 부르는 것으로

$$H(X|Y) = - \sum_{x,y} p(y)p(x|y) \log p(x|y) \quad \text{식 (6)}$$

로 정의되는데, $p(x|y)$ 는 조건부 확률이다. 상호정보량은 Y 를 알 때, X 의 엔트로피를 나타낸다. 만약 X 와 Y 가 완벽하게 관련되어 있다면, Y 를 알 때 X 에 대해서도 완벽하게 알게 된다. 엔트로피는 무지의 척도이므로, 이 경우 조건부 엔트로피는 0이 된다. 이 경우 식 (5)에 의해서 $I(X:Y) = H(X)$ 가 된다. 만약 X 와 Y 사이에 아무런 관계가 없다면 Y 를 아는 것이 X 의 정보에 아무런 영향을 주지 못한다. 따라서 Y 를 알 때 X 의 조건부 엔트로피는 그냥 X 의 엔트로피와 같다. 이 경우 $I(X:Y)$ 이 된다. 결국, 상호정보량은 상호관계(correlation)가 높을수록 큰 값을 갖게 된다.

물리계(엔진)와 메모리(도깨비) 사이의 상호정보량은 측정을 통하여 이 둘 사이에 얼마나 많은 상호관계가 생겼는지를 기술하는 것이다. 예를 들어 완벽한 상호관계가 생겼다면 계에 대한 완벽한 정보를 메모리가 가지게 되었다는 뜻이다. 분자가 왼쪽에 있으면 메모리가 0, 오른쪽에 있으면 메모리가 1, 이런 식이란 뜻이다. 하지만 측정에 오차가 많아서 측정을 하고도 메모리가 아무런 정보를 얻지 못했다면 상호정보는 0이 된다.

식 (4)와 같이 정보엔진이 추가적인 일을 할 수 있는 이유는 측정이 엔진의 엔트로피를 바꾸기 때문이다. 위상공간(phase space)상의 한 점은 물리계를 완전히 기술한다. 엔진의 통계역학적 상태는 위상공간에 분포하는 확률밀도함수 $\rho(x)$ 로 기술될 수 있다. 측정으로 얻어지는 결과를 m 이라 하면 측정은 엔진의 상태를 $\rho_0(x)$ 에서 $\rho(x|m)$ 로 바꾸게 된다. 따라서 측정 전후 엔진의 엔트로피의 차이는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \Delta S &= k \sum p_m [H(\rho(x|m)) - H(\rho_0(x))] \\ &= k [H(X|M) - H(X)] = -k I(X:M) \end{aligned} \quad \text{식 (7)}$$

엔진의 엔트로피 감소는 메모리의 엔트로피 증가를 의미한다. 메모리로 이동한 엔트로피 ΔS 가 열원에서 엔진으로 이동한 엔트로피를 상쇄시킨다. 따라서 이 엔트로피에 온도를 곱한 $T\Delta S$ 만큼의 열이 엔진으로 이동할 수 있다. 엔진은 이 열을 일로 전환시키므로 결국 $T\Delta S$ 가 엔진이 할 수 있는 일의 최대치가 된다.

정보엔진과 비평형 물리학

측정하기 전 물리계는 평형상태에 있다. 즉, $\rho_0(x) = e^{-\beta H_0} / Z_0$ 로 기술된다. 여기서 $\beta = 1/kT$ 이고, Z_0 는 분배함수(partition function)다. 측정 후의 상태 $\rho(x|m)$ 은 일반적으로 비평형 상태다. 가능한 m 을 모두 모은 것이 평형상태이므로 그 가운데 일부만 골라내면 비평형일 수밖에 없다. 이 때문에 정보의 열역학을 다룰 때, 비평형 물리학적 고려가 필요하다. 앞서 언급한 대로, 식 (4)의 자유에너지는 다음과 같이 정의된 비평형 자유에너지다^{18,19}.

$$F_n(\rho; H_0) = \langle H_0 \rangle_\rho - TS(\rho) \quad \text{식 (8)}$$

보통의 자유에너지 $F(\rho_0) = \langle H_0 \rangle_{\rho_0} - TS(\rho_0)$ 와 비교하면 차이가 있다. 측정을 통해 상태는 $\rho_0(x) \rightarrow \rho(x|m)$ 으로 급격히 변하지만 헤밀토니안은 H_0 로 그대로 있다. 측정은 상태를 고르는 과정에 불과하기 때문이다. 자유에너지는 평형상태에서만 정의할 수 있다. 비평형 상태에서도 평형상태의 경우와 최대한 유사하게 자유에너지를 정의한 것이다. 식 (4)에서는 이렇게 정의된 자유에너지가 사용된다



피드백이 있는 경우의 요동정리 (fluctuation theorem)

정보엔진에서 비평형 물리학을 고려해야 하는 또 다른 이유가 있다. 정보엔진을 실제 구현하는 경우 대개 요동(fluctuation)을 무시할 수 없는 상황이기 때문이다. 질라드 엔진만 보더라도 단 하나의 분자로 구성되어 있다. 하나의 분자에 대해 온도와 압력을 이야기하는 것이 이상할 수도 있겠다. 실제 하나의 분자가 갖는 운동에너지는 큰 요동을 갖는다. 통계역학의 물리량들은 수많은 입자들의 평균값이기 때문이다. 하지만, 분자가 하나 있는 엔진들의 앙상블(ensemble)을 생각하여 온도와 압력을 정의할 수 있다. 그렇다면 정보엔진은 왜 하나의 분자를 고려하는가? 분자의 개수가 많아지면 그 정보를 이용하기 어려워지기 때문이다. 아보가드로의 수의 분자를 가진 질라드 엔진을 생각해 보면 이해하기 쉽다. 여기에 벽을 넣어 봐야 벽의 양쪽에 분자의 개수는 거의 언제나 비슷할 거다. 이런 식으로 압력차를 얻는 것은 사실상 불가능하다.

비평형 과정은 시간에 대해 비가역과정이다. 따라서 시간의 순방향 진행과 역방향 진행에 차이가 생긴다. 요동정리(fluctuation theorem)²⁰는 이것을 정량적으로 표현하는 것이다.

$$\frac{p(\gamma)}{\tilde{p}(\tilde{\gamma})} = e^{\beta(w - \Delta F)} \quad \text{식 (9)}$$

여기서 γ 는 시간 순방향의 과정(time forward process)에서 위상공간상의 점이 이동하여 만드는 경로를 나타낸다. $\tilde{\gamma}$ 는 시간 역방향에 대한 경로다. 이 경로는 모든 비평형 과정을 포함한다. 두 경로에 대한 확률의 비가 평형상태의 온도(β), 일(w), 자유에너지차(ΔF)만으로 주어진다. 이것이 요동정리의 핵심이다. 이제 피드백이 고려되면 측정의 결과물 m 이 추가되어 식이 다음과 같이 바뀐다.

$$\frac{p(\gamma; m)}{\tilde{p}(\tilde{\gamma}; m)} = e^{\beta(w - \Delta F) + I(\gamma; m)} \quad \text{식 (10)}$$

여기서 I 는 경로에 의존하는 상호정보량으로 다음과 같이 정의된다.

$$I(\gamma; m) = \ln \frac{p(m|x)}{p_m} \quad \text{식 (11)}$$

식 (10)을 모든 경로와 측정결과에 대해 적분하면 자진스키(Jarzynski) 등식²¹의 일반화된 형태가 얻어진다.

$$\langle e^{-\beta(w - \Delta F) - I} \rangle = 1 \quad \text{식 (12)}$$

최근 이 식이 옳다는 것이 실험적으로 증명되었다⁹. 이 결과는 피드백을 고려한 열역학 제2법칙의 비평형 물리학 버전이라 할 수 있다. 평형, 비평형 모두의 경우에 정보를 추가하여 열역학 법칙을 확장하는데 문제가 없음을 입증한다.

정보의 양자역학

정보의 주관성

질라드 엔진은 정보를 물리적 실체로 만들었다. 식 (4)에 따르면 정보로부터 얻는 일의 양은 물리계와 메모리 사이의 상호정보량으로 주어진다. 상호정보량은 식 (5), (6)에서 보듯이 확률로 기술된다. 앞서 언급한 대로, 일반적으로 확률에는 주관적 측면이 있다는 것이 문제다. 왜냐하면, 식 (4)는 물리법칙이다. 여기에 주관적 요소가 들어올 수는 없다. 그렇다면 확률이 객관적일 수 있을까? 식 (4)에 나오는 정보량의 확률은 도깨비가 물리계를 측정하는 과정에서 나오는 것이다. 전형적인 양자역학의 측정문제란 뜻이다.

측정은 양자역학의 가장 기이한 부분의 하나다. 측정하기 이전에 대상에 대해서 아무 것도 말할 수 없다. 심지어 측정 전에는 대상이 존재하는지조차도 알 수 없다. 이에 대해 아인슈타인은 “우리가 달을 보지 않으면 달은 거기 없는 것인가?”라는 유명한 질문을 던졌다. 내가 달을 보지 않았어도 옆 사람이 달을 보면 달이 존재하는가? 인간이 아니어도 고양이가 달을 보면 측정된 것인가? 지구에 인간이 나타나기 전에는 달도 없었는가? 달이 존재하기 위해 우주에 지적인 생명체가 필요한가? 이 모든 것은 측정의 주체가 누구냐는 문제와 직결된다. 양자역학에도 정보의 주관성 문제가 내재한 듯 보인다.

결어긋남(decoherence)과 정보

양자측정에 대해서는 많은 이론이 있지만, 현재 가장 널리 인정받는 것은 결어긋남(decoherence)이론^{22,23}이다. (물론 이 사실에 대해서는 반론이 있을 수 있다.) 이 이론은 양자역학적 틀 내에서 측정을 설명하는 장점이 있다. 관심 있는 양자계를 ψ , 측정 장치를 ϕ 라고 하자. 양자계는 측정 장치하고만 상호작용을 한다. 그렇다면 양자계와 측정 장치로 이루어진 전체 계는 유니타리(unitary) 변환에 의해 진행하게 된다. 양자계는 양자역학의 전형적인 특징인 양자 중첩(superposition)을 형성할 수 있다. 예를 들어 이중슬릿을 지나가는 전자는 오른쪽(R)과 왼쪽(L) 슬릿을 동시에 지날 수 있다. 따라서 전체계의 양자상태는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{2}}(\psi_L + \psi_R) \otimes \phi \quad \text{식 (13)}$$

측정이 일어나면 측정 장치가 양자계와 상호관계(correlation)를 가지게 된다. 전자가 오른쪽을 지나는지 왼쪽을 지나는지에 따라 다른 상태를 가지게 된다는 뜻이다. 이는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{2}}(\psi_L \otimes \phi_L + \psi_R \otimes \phi_R) \quad \text{식 (14)}$$

이로부터 확률을 구해보면 다음과 같이 주어진다.

$$|\Psi|^2 = \frac{1}{2}(|\psi_L|^2 \otimes |\phi_L|^2 + |\psi_R|^2 \otimes |\phi_R|^2 + 2\text{Re}[\psi_L^* \psi_R \otimes \phi_L^* \phi_R]) \quad \text{식 (15)}$$

여기서 양자 중첩의 효과는 마지막 항 $2\text{Re}[\psi_L^* \psi_R \otimes \phi_L^* \phi_R]$ 에 들어있다. 측정이 오류 없이 정확히 수행되면 측정 장치의 두 상태는 서로 완전히 구분 가능하게 될 것이다. 양자역학적으로

$\langle \phi_L | \phi_R \rangle = 0$, 즉 이 두 상태가 서로 직교(orthogonal)한다는 말이다. 따라서 측정에 의해 중첩이 사라지고 고전적인 결과로 귀결된다.

결어긋남 이론은 측정의 주체 문제를 어떻게 해결하는가? 이 이론에서 측정 장치에 대해서는 아무런 단서조항이 없다. 양자계와 상호작용할 수 있으면 된다. 따라서 원리적으로 대상이 되는 양자계 그 자체가 아니기만 하면 된다. 측정 장치가 생명이나 지능을 가질 필요가 없다는 말이다. 이와 관련해서 많은 실험 결과가 있지만 1999년 안톤 차일링거(Anton Zeilinger) 그룹에 의해 수행된 일련의 실험이 좋은 예가 된다.

차일링거 그룹은 C_{60} 라는 거대 분자를 이용하여 간섭실험을 수행하였다²⁴. C_{60} 는 그 크기가 수 나노미터에 불과하지만 원자가 60여개나 모인 것이므로 충분히 거시적인 계라 할만하다. 차일링거 그룹 실험의 핵심은 이런 거대분자도 양자중첩을 보일 수 있다는 것이다. 결어긋남 이론에 의하면 양자중첩이 살아남는지의 여부는 계의 크기가 결정하는 것이 아니다. C_{60} 와 같은 거대분자라도 결어긋남을 막을 수만 있다면 양자중첩이 일어날 수 있다.

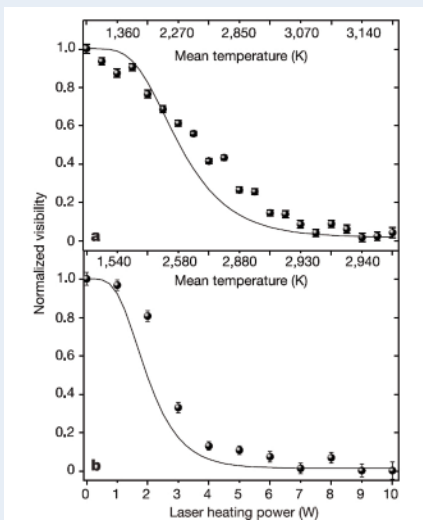


그림 5. 차일링거 그룹의 C_{60} 의 간섭실험에서 온도에 따른 간섭무늬의 가시성(visibility) [참고문헌 25의 그림]

C_{60} 가 간섭계를 통과하던 중 공기분자와 충돌한다면 충돌한 경로(예를 들어 ψ_L)와 충돌하지 않은 경로(예를 들어 ψ_R)에 대응하는 공기분자의 상태 ϕ_L 와 ϕ_R 가 서로 구분 가능할 것이다. 따라서 공기분자 하나와의 충돌만으로도 측정이 일어난다고 볼 수 있다. 실제 차일링거 그룹이 공기의 압력을 바꾸어가며 실험해본 결과 C_{60} 의 평균자유이동거리(mean free path)가 간섭계 전체 거리보다 커져야, 다시 말해서 공기분자와의 충돌을 무시할 수 있는 정도의 진공도에 도달해야 간섭무늬가 얻어진다. 자, 여기서 측정의 주체는 누구인가? 공기분자 하나가 측정의 주체라 할 수 있다.

차일링거 그룹은 추가적인 실험을 수행한다. C_{60} 를 오븐에서 1000K 가까운 고온으로 가열하여 빔(beam)으로 방출시킨다²⁵. 이런 온도가 되면 흑체복사를 무시할 수 없다. 흑체복사는 C_{60} 의 위치를 외부에 알려주는 효과를 준다. 빛의 분해능은 대략 파장의 길이 정도 되는데, C_{60} 의 온도가 높아지면 방출되는 빛의 파장이 짧아진다. 복사광의 파장이 간섭계의 슬릿사이의 거리보다 짧아지면 이제 C_{60} 가 지나가는 경로를 분해(分解)할 수 있게 된다. 실제 실험에서는 온도가 높아져서 흑체복사의 중심파장이 슬릿 간격보다 작아지면 간섭무늬가 사라지기 시작한다. 실험자가 흑체복사로 튀어나온 빛을 실제로 측정할 필요는 없다. 온도를 높이면 간섭무늬가 사라진다.

C_{60} 가 공기분자와 충돌할 때, C_{60} 의 위치를 아는 것은 공기분자 뿐이다. C_{60} 가 흑체복사를 방출할 때, 방출된 빛이 향하는 목적지는 없다. 빛이 방출되지만 위치 정보가 빠져나간 것이다. 결국 이 실험을 통해 양자역학에서 측정의 주체는 측정당하는 양자계를 제외한 우주 전체라는 것을 알 수 있다. 측정 대상이 정확하고 유일하게 정의된다면 그것의 여집합, 즉 우주에서 측정 대상을 제외한 나머지도 정확하고 유일하게 정해진다. 결어긋남 이론에서는 이것을 환경(environment)라는 용어로 부른다. 결국 양자역학에서 측정의 주체는 환경이고, 정보에 주관성은 없다. 식 (4)에 나오는 상호정보량은 양자계(엔진)와 측정 장치(메모리) 사이의 상호관계로 볼 수도 있다. 따라서 열역학 제2법칙에 도입된 정보는 양자역학의 결어긋남 이론에 의해 객관성을 갖는다.

다세계(many worlds) 해석

결어긋남으로 양자측정의 많은 것을 설명할 수 있지만, 모든 물리학자들이 이 이론에 만족하는 것은 아니다. 그 대안이론 가운데 하나로 다세계(many worlds) 해석이라는 것이 있다. 요즘 대중적 인기를 끌고 있는 다중우주(multiverse)의 양자역학 버전이다.

결어긋남의 핵심은 식 (14)에 담겨있다. 이 식은 물리계가 단지 외부와 관계를 맺었음을 보여줄 뿐이다. 이제 여기서 둘 중의 하나는 실제 세계에서 일어나는 사건이고, 다른 하나는 그렇지 않다. 양자역학은 일어나지 않은 사건은 없애버려야 한다고 주장한다. 바로 파동함수의 붕괴(wave function collapse)라 불리는 현상이다. 이 부분이 어째 좀 이상하지 않은가? 일어났거나 일어나지 않았다는 것은 식 (14)에 들어있지 않다. 사실 이것은 관찰자, 바로 나의 생각이다. 따라서 제대로 하려면 관찰자까지 식에 집어넣어야 한다.

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{2}}(\psi_L \otimes \phi_L \otimes \chi_L + \psi_R \otimes \phi_R \otimes \chi_R) \quad \text{식 (16)}$$

여기서 χ 는 관찰자의 상태를 나타낸다. 전자가 왼쪽으로 지난다고 생각하는 관찰자 χ_L 와 오른쪽으로 지난다고 생각하는 관찰자 χ_R 가 존재하는 것이다.

이제 다세계 해석의 주장은 이렇다. 두 관찰자 가운데 누가 옳은지 알 수 없다. 즉, 두 관찰자 모두 옳다는 말이다. 모든 관성계가 동일하다는 상대성이론의 가정이 떠오른다. 결국 두 관찰자가 모두 옳다면 두 개의 우주가 존재해야 한다. [식 (16)에서 어느 관찰자가 옳은지 알 방법은 없다.] 어느 한 쪽이 붕괴되어 없어진 것이 아니라는 말이다. 우주는 전체적으로 유니타리 진행할 뿐이다. 이 과정은 슈뢰딩거 방정식으로 완벽하게 기술된다. 붕괴니 확률이니 하는 따위는 모두 관찰자가 자신이 본 것만이 옳다고 생각하고 양자상태를 이해하려고 할 때 생기는 허상 같은 거다. 마치 지구 위의 사람이 나는 절대적으로 정지해있다고 믿는 거랑 비슷하다. 다세계 해석은 아직 SF의 단계에 있다. 하지만, 이 이론이 옳다면 더 이상 양자측정에 대해 고민할 필요가 없어진다.



양자정보

열역학적으로 중요한 정보는 양자측정의 결과로 얻어지는 정보다. 이로부터 정보를 양자역학적으로 이해해야할 필요가 생긴다. 새턴 엔트로피에 대응하는 양자역학적 엔트로피는 폰 노이만 엔트로피(von Neumann entropy)라 불리는 것으로, 다음과 같이 정의된다.

$$S = -\text{tr} \rho \ln \rho \quad \text{식(17)}$$

여기서 tr은 trace를 의미하고, ρ 는 계의 밀도연산자(density operator)다.

양자역학적 정보는 고전적 정보와 차별되는 몇 가지 특징이 있다. 첫째, 모든 순수상태(pure state)의 엔트로피는 0이다. 예를 들어 다음과 같은 단순한 중첩상태를 고려해보자.

$$\psi = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) \quad \text{식(18)}$$

0과 1이 동시에 존재하는 상태다. 고전적으로 이런 상태는 불가능하다. 따라서 고전적으로 보면 0과 1의 두 가지 경우가 존재하고 엔트로피는 $\log 2$ 라고 해야 할 것이다. 양자역학은 이런 중첩상태를 하나의 상태로 간주한다. 따라서 엔트로피가 0이다. 중첩상태를 하나의 상태로 간주할 수 있다는 것이 양자 컴퓨터가 갖는 힘의 근원이다. 이 중첩을 유지하고 원할 때 깨는 것이 양자정보기술의 핵심이다. 중첩이 깨지는 과정을 측정이라 부르며 앞서 설명한 결어긋남 이론으로 이해된다.

둘째, 유니타리 변환에서 엔트로피는 보존된다.

$$-\text{tr} \rho \ln \rho = -\text{tr} (U^\dagger \rho U) \ln (U^\dagger \rho U) \quad \text{식(19)}$$

외부와 상호작용하지 않는 양자계의 시간변화는 유니타리 변환으로 기술된다. 따라서 고립된 양자계의 엔트로피는 변하지 않는다. 반면, 계의 초기조건이 비평형 상태인 닫힌 고전계의 엔트로피는 증가한다. 이것이야말로 고전세계에서 풀림(relaxation) 또는 열평형화(thermalization)라는 비가역현상이 일어나는 이유다. 물에 떨어뜨린 잉크방울이 물 전체로 퍼져나가는 이유이기도 하다. 만약 우주가 고립되어 있다면 양자역학은 우주 전체의 엔트로피가 변할 수 없다고 이야기한다. 그렇다면 왜 우주에 시간의 화살이 있는가? 고립된 양자계의 열평형화 현상은 아직 완전히 이해되지 않은 주제다²⁶.

셋째, 양자계는 고전계의 경우보다 더 강한 상호관계를 맺을 수 있다. 예를 들어 두 개의 양자계 A와 B로 구성된 순수 양자상태가 있다고 하자.

$$\rho_{AB} = |\psi_{AB}\rangle \langle \psi_{AB}| \quad \text{식(20)}$$

슈미트분해(Schmidt decomposition)를 생각하면 A, B의 개별 엔트로피는 같다는 것을 알 수 있다²⁷. 즉, $S(\rho_A) = S(\rho_B)$ 이다. 여기서 $\rho_A = \text{tr}_B(\rho_{AB})$, $\rho_B = \text{tr}_A(\rho_{AB})$ 이다. 이 경우 양자 상호정보량(quantum mutual information)은

$$I(\rho_A : \rho_B) = S(\rho_A) + S(\rho_B) - S(\rho_{AB}) = 2S(\rho_A) \quad \text{식(21)}$$

가 된다. 고전정보의 경우 $S(A) = S(B)$ 라면 식 (5)로부터 상호정보량의 최댓값은 $S(A)$ 가 된다. 양자상호정보량이 고전상호정보량의 2배가 된다는 뜻이다. 양자역학이 고전역학보다 더 큰 상호관계를 가질 수 있는 이유는 식 (21)에서 순수상태 ρ_{AB} 의 엔트로피가 0이기 때문이다. 결국 양자 중첩현상에 그 근원이 있는 것이다. 양자역학이 갖는 이런 추가적인 상호관계를 양자 얽힘(quantum entanglement)이라 부른다.

양자 얽힘(entanglement)

고전정보에 비해 두 배의 상호정보량을 가질 수 있는 양자역학적 상태의 물리적 특성은 무엇일까? 얽힘이라 불리는 이 상태에 대해서는 특별한 역사가 있다. 20세기 초 양자역학은 우리에게 결정론적 자연관을 포기하도록 만들었지만, 20세기 중반에 이르러서는 이보다 더 심각한 질문을 던진다. 양자역학의 비결정론을 거부하던 아인슈타인이 EPR 역설을 제기한 것이다²⁸. EPR이라는 이름은 이 역설을 제기한 아인슈타인(Einstein), 포돌스키(Podolsky), 로젠(Rosen)의 첫 글자를 딴 것이다. 이 역설을 다룬 논문에서는 위치나 속도와 같은 물리량들이 가져야 할 기본 성질로 실재성(reality)이라는 것이 제시된다. 어떤 물리량이 실재적이라면 측정되기 전에 그 값이 정해져 있어야 한다는 것이다. 양자역학에서 측정 전에 물리량은 정해져 있지 않으므로 이런 정의는 이미 양자역학과 모순을 일으키는 것처럼 보인다. 하지만 EPR의 주장은 미묘하다.

양자역학에서는 측정이 대상에 영향을 주기 때문에 물리량들이 원래 실재적이지 않다. 이 때문에 불확정성 원리가 나온다. 따라서 EPR이 말하는 실재성은 불확정성 원리에 의해 고려할 가치도 없다. 하지만, EPR은 불확정성 원리의 제약을 우회하기 위해 측정하고자 하는 대상을 직접 관측하지 않고 간접적으로 측정하는 방법을 제안한다. 아이디어를 간단히 설명하면 이렇다. 상자에 흰 공과 검은 공이 들어있다고 하자. 둘 중에 하나를 꺼내어, 색을 보지 않은 채 멀리 가져간다. 여기서 멀다는 것은 천문학적으로 먼 거리를 의미한다. 가져간 공의 색을 확인했더니 흰 색이다. 그렇다면 이 순간 상자에 남은 공은 검은 공이 된다. 상자 안에 남아있는 공의 색은 실재적이라 할 수 있다. 측정하기 전에 그 결과가 결정되어 있기 때문이다.

상자 안의 공은 측정당하지 않았으므로 측정에 의한 교란과 상관없다. 여기서는 공의 색깔을 고려했지만, 공의 위치나 속도까지도 비슷한 상황을 만드는 것이 가능하다. 한 쪽 공의 위치를 측정하면 다른 공의 위치를 아는 식이다. 그러면 멀리 떨어진 곳에서 무엇을 측정했는지에 따라 상자 안에 있는 공의 위치나 속도가 실재적이 될 수 있다. 물리량의 실재성이 멀리 떨어진 다른 물체의 측정결과에 의존한다는 것은 이상하지 않은가? 이것이 EPR 역설이다. 문제는 또 있다. 양자역학에 따르면 측정하는 순간 공의 색깔이 결정된다. 측정 전 물리량에 대해 아무 것도 알 수 없기 때문이다. 멀리 떨어진 곳에서 측정하는 바로 그 순간, 상자 안에 있는 공의 색이 결정된다. 하지만, 이것은 특수상대성이론의 가정에 위배된다. 빛의 속도보다 빠른 정보전달을 허용하기 때문이다.



이 역설들의 해결은 간단하다. 양자역학의 비결정론을 포기하는 것이다. 모든 물리량이 항상 결정되어 있다면 선택에 따른 실재성 역설은 바로 사라진다. 공을 상자에서 꺼낼 때 이미 어느 공이 선택되었는지 결정되므로, 멀리 가서 관측해봐야 이미 정해진 색을 확인하는 것이다. 따라서 빛보다 빠른 정보의 전달 따위는 없다. 결국 양자역학이 이야기하는 확률은 고전 확률과 같이 주관적인 것으로 우리의 무지를 반영할 뿐이라는 결론이 된다. 양자역학에 확률이 필요불가결하다면 아직 우리가 놓치고 있는 무엇인가 있다는 의미다. 우리가 아직 모르는 이것을 숨은 변수(hidden variable)라 부른다. 하지만, 숨은 변수가 정말 존재하는지에 답하는 것은 원리상 불가능해 보인다. 양자역학의 코펜하겐 해석이 맞는지, 숨은 변수가 존재하는지 상관없이 동일한 결과가 나오기 때문이다.

1964년 존 벨(John stewart Bell)은 'EPR 역설에 대하여' 라는 논문을 통해 놀랍게도 숨은 변수의 존재여부를 판별할 수 있는 간단한 부등식을 제시한다²⁰. 이 부등식을 얻기 위해서는 두 가지 가정이 필요하다. 첫째, 모든 물리량들이 항상 정확한 값을 갖는다. 둘째, 물리량들은 국소(局所)적으로 영향을 주고받는다. 첫 번째 조건은 실재성에 대한 가정으로 숨은 변수가 있음을 의미한다. 두 번째 조건은 국소성이라 불리는 것인데, 빛보다 빠른 정보 전달이 없음을 의미한다. 이 두 가정을 한데 모아 '국소적 실재성(local realism)' 이라 부른다.

벨의 부등식은 국소적 실재성이 만족되는 모든 상태에 대해 만족되는 부등식인 것이다. 놀랍게도 양자역학은 아주 특별한 상태에 대해 부등식이 위배된다고 예측한다. 대표적인 예가 벨의 상태라 불리는 것인데, 아래와 같이 표현된다.

$$\psi = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle) \quad \text{식 (22)}$$

이 상태는 걸어긋남에서 나온 식 (14)과 유사하다. 이제 물리학자는 실험적으로 부등식의 위배여부를 판별하여 EPR 역설 문제에 과학적으로 답을 할 수 있게 되었다. 1982년 알랭 아스페(Alain Aspect)는 벨 상태에 있는 두 개의 광자를 이용하여 벨의 부등식이 위배됨을 실험적으로 보인다²⁰. 이는 우주가 국소적 실재성을 갖지 않는다는 것을 의미한다. 논리적으로는 국소성이나 실재성, 둘 중 하나만 틀려도 충분하다.

양자역학은 얽힘이라는 상태를 통해 고전역학보다 두 배의 상호정보량을 가질 수 있다. 이 상태는 정보의 양이 정량적으로 많다는 것 말고도, 물리적 실체가 가져야하는 실재성, 국소성의 성질을 위배하는 것처럼 보인다. 양자정보는 본질적으로 우리의 상식을 뛰어넘는다.

정보 우주

양자측정과 정보

양자역학에서 관측이 대상에 영향을 주는 이유를 설명하기 위해 여러 가지 이론들이 제시되었다. 그 가운데 파인만의 설명이 직관적으로 이해하기 쉽다³¹. 이중슬릿을 지나가는 전자가 어느 슬릿을 지나가는지 관측하기 위해서는 슬릿사이의 거리 d 보다 짧은 파장의 빛을 전자에 쬐어야 한다. 이 때 전자와 충돌한 광자는 대략 h/d (h 는 플랑크상수)보다 큰 운동량을 전달하게 된다. 이 정도의 운동량으로부터 전자가 받는 역학적 교란은 간섭무늬를 없애버리기에 충분하다. 명쾌한 설명이지만, 어딘가 석연치 않은 부분이 있다³².

양자측정은 양자역학이 갖는 모든 비직관적 결과의 근원이다. 그런데 양자측정이 이렇게 고전역학적인 방식으로 설명된다는 사실이 이상하지 않은가? 물론 측정 과정의 교란은 하이젠베르크의 불확정성원리를 이루는 핵심이기는 하다. 하지만, 역학적 교란을 주지 않으면서 측정하는 방법이 있다면 어떤 일이 일어날까? 이와 관련한 여러 가지 실험이 있지만, 1998년 제라드 렘페(Gerhard Rempe) 그룹이 수행한 원자 간섭계 실험을 고려해보자³³.

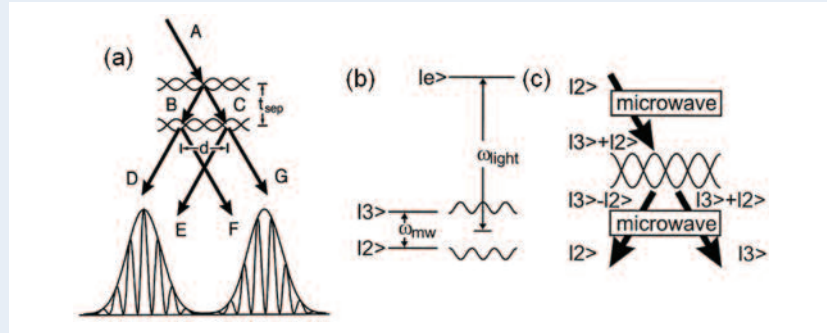


그림 6. (a) 실험장치 모식도. 원자의 경로는 붉은 선으로 표시되어 있다. 레이저의 정상파가 빔 분리기 역할을 한다. (b) 원자 내부 에너지레벨의 모식도. 빔 분리를 형성하는 레이저와 마이크로파의 진동수가 표시되어 있다. (c) 마이크로파에 의해 제어되는 원자의 내부 상태를 모식적으로 나타낸 것. [참고문헌 33의 그림]

그림 6(a)는 렘페 그룹이 사용한 원자 간섭계의 모식도다. 원자빔이 레이저가 만든 정상파에 A방향으로 입사한다. 정상파와의 상호작용으로 일부 원자들은 B 방향으로 방향이 바뀐다. 나머지는 그냥 진행방향 C로 진행하는데, 이렇게 원자빔이 둘로 나뉜다. 원자빔을 한 방향으로 모아 간섭무늬를 보기 위해 정상파를 하나 더 준비한다. 그러면 그림 아래에서 보듯이 두 개의 간섭무늬를 얻게 된다. 왼쪽 간섭무늬의 골 부분은 오른쪽 간섭무늬의 마루가 되어, 서로 상보적이다. 여기까지는 일반적인 원자 이중슬릿간섭계다.

이제 여기에 추가적으로 마이크로파를 가해준다. 이 마이크로파의 진동수는 그림 6(b)에서 보듯이 원자의 두 에너지레벨 (energy level) $|2\rangle$, $|3\rangle$ 과 공명을 이루도록 한다. 그러면 그림 6(c)에서 보듯이 원자의 내부 상태를 변화시킬 수 있다. 결국 왼쪽으로 진행하는 원자의 내부 상태는 $|2\rangle$ 가 되고, 오른쪽으로 진행하는 원자의 내부 상태는 $|3\rangle$ 이 된다. 간섭무늬를 만드는 것은 원자 그 자체, 즉 원자의 무게중심 좌표이다. 결어긋남 이론을 생각하면 중첩의 대상이 되는 양자계 밖의 것은 모두 관측자의 역할을 할 수 있다. 이 실험의 경우 원자의 내부 상태를 무게중심에 대한 관찰자로 볼 수 있다는 것이다. 그렇다면 원자의 경로가 내부 상태에 의해 측정당하여 서로 직교를 이루어 구분가능한 상황이 되었으므로 (즉, $\langle 2|3\rangle=0$) 측정이 일어난 것으로 볼 수 있다.

하지만, 파인만의 측정이론을 생각해보면 문제가 생긴다. 이 경우 측정이 주는 교란은 마이크로파가 야기한다. 마이크로파는 원자의 위치를 직접 측정하는 것이 아니므로, 위치 측정을 위해 그 파장이 슬릿 사이의 간격보다 작아야 한다는 제약조건이 없다. 실제, 마이크로파의 진동수는 원자 내부 상태의 에너지차로 정해지는데, 원리적으로 이 값은 아주 작게 만들 수 있다. 즉, 파장을 아주 길게 만들 수 있다. 즉, 마이크로파가 주는 교란은 간섭무늬를 없앨 만큼 충분히 크지 못하다는 말이다. 파인만의 설명에 따르면 간섭무늬는 존재해야 한다.

결국 어느 쪽이 맞는지는 실험으로 판정할 수밖에 없다. 실험에서 마이크로파를 가하면 간섭무늬는 사라진다. 양자측정결과는 역학적 교란 때문이 아니라, 양자계에 대한 정보가 외부로 빠져나갔는지의 여부로 결정된다는 뜻이다. 이 상황을 식으로 표현해보면 다음과 같다.

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|B\rangle + |C\rangle) \otimes |2\rangle \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|B\rangle \otimes |2\rangle + |C\rangle \otimes |3\rangle) \quad \text{식(23)}$$

여기서 B와 C는 그림 6(a)에서 원자의 두 경로를 나타내고, $|2\rangle$ 와 $|3\rangle$ 은 원자의 내부 상태를 나타낸다. 이 식은 결어긋남을 설명하는 식 (13) \rightarrow 식 (14)과 수학적으로 동일하다. 또한 질라드 엔진을 기술하는 식 (2)와도 수학적으로 같다. 뿐만 아니라 벨 상태 식(22)와도 같다. 이들이 모두 서로 관련되어 있음을 강조하고 싶다. 결국 양자측정의 핵심은 양자계의 정보가 외부로 이동하는데 있다. 중요한 것은 에너지의 교환이나 운동량의 전달, 역학적 교란이 아니다. 오로지 정보만이 중요하다.

양자지우개(quantum erasure)

양자지우개는 여러 실험을 통해 입증되었으나^{34,35}, 앞서 설명한 뎀페의 실험을 이용하여 그 기본 개념을 살펴보자. 그림 6(c)에서 보듯이 왼쪽으로 진행하는 원자의 내부 상태는 $|2\rangle$, 오른쪽으로 진행하는 원자의 내부 상태는 $|3\rangle$ 이 일어졌다. 이 경우 측정이 일어났기 때문에 간섭무늬는 사라진다. 만약 이때 오른쪽으로 진행하는 원자에만 추가적으로 마이크로파를 가하여 $|3\rangle$ 의 상태를 $|2\rangle$ 로 바꾸어주면 어떻게 될까? 앞서 우리는 원자의 내부 상태가 경로에 따라 $|2\rangle$, $|3\rangle$ 으로 될 때, 경로에 대한 측정이 일어났다고 이야기했다. 이제는 그 측정결과를 지우는 조작을 가하는 것이다. 그래서 이런 실험을 양자지우개(quantum eraser)라 부른다. 이것만으로 간섭무늬를 되살릴 수 있을까? 실험결과는 그렇다는 것을 보여준다. 수학적으로는 식 (23)의 역과정이 일어난 것으로 볼 수 있다. 다시 강조하지만 양자측정에서 중요한 것은 오로지 정보다



휠러의 지연된 선택(delayed choice)

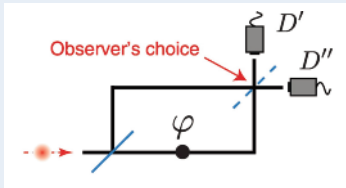


그림 7. 휠러의 지연된 선택 실험 모식도

1978년 휠러(Wheeler)는 지연된 선택(delayed choice)이라는 사고실험(thought experiment)을 통해 양자측정이 갖는 미묘한 측면을 보여준다. 여기에는 편의상 마흐젠더(Mach-Zehnder) 간섭계를 이용한다. 이 간섭계에서는 그림 7에서 보듯이 원자가 50:50으로 나누어지는 두 개의 빔 분리기 (beam splitter)를 지나게 된다. 첫 번째 분리기에서 원자는 둘로 나누어지며, 두 번째에서 다시 합쳐진다.

우선 두 번째 빔 분리가 없다고 생각해보자. 그러면 검출기 D' 과 D'' 모두에서 50:50 비율로 원자가 검출될 것이다. 하나의 원자를 보내면 두 검출기중 하나에서만 원자가 검출되므로 이는 원자의 입자성을 보여준다. 이제 두 번째 빔 분리를 넣어보자. 원자가 입자라면 마찬가지로 결과를 얻게 되지만 파동이라면 달라진다. 간섭을 이용하여 입사한 원자가 모두 D''에서 검출되도록 만들 수 있기 때문이다. 이 때 D'으로 가는 파동은 상쇄 간섭되어 사라진다. 입자였던 원자가 두 번째 빔 분리를 넣는 순간 파동이 되었다는 말일까?

자, 이제 이 마흐젠더 간섭계가 아주 크다고 상상해보자. 예를 들어 간섭계의 첫 번째 빔 분리가 지구에서 4광년 떨어진 알파-센타우리에 있고, 두 번째 빔 분리가 지구에 있다고 하자. 원자가 지구에 도달하려면 빛의 속도로 움직이더라도 4년이 걸린다는 말이다. 지구에 있는 우리는 두 번째 빔 분리에 대해 원래대로 놓거나 치워버리거나 하는 선택을 할 수 있다. 선택의 결과에 따라 입자성과 파동성이 결정된다. 과연 원자는 언제 입자인지 파동인지를 결정하는가? 상식적으로 생각하면 원자가 첫 번째 빔 분리를 지날 때 입자성/파동성을 결정해야 할 것 같다. 하지만 이 사고실험에 따르면 두 번째 빔 분리를 넣는 행위가 입자였던 원자를 파동으로 바꾸는 듯이 보인다. 그렇다면 알파-센타우리에에서 지구로 날아오는 동안 원자는 입자인가 파동인가?

비트로부터 존재로(it from bit)

양자역학은 기괴하지만 우주를 기술하는 가장 올바른 이론이다. 양자역학은 측정하기 전, 대상에 대해서 어떤 것도 이야기할 수 없다고 말한다. 아니 측정 자체가 대상을 만든다고 볼 수도 있다. 사실 우리가 우주에 대해 알 수 있는 것은 측정을 통해 얻어낸 정보뿐이다. 양자측정의 주체는 우주 전체이며, 이렇게 얻어진 정보는 객관적이다. 양자측정에서 중요한 것은 오직 정보다. 정보만 얻으면 간섭무늬가 사라지고, 정보를 지우면 간섭무늬가 되살아난다. 입자성, 파동성이라는 성질은 우리가 질문을 하는 순간 결정된다. 결국 양자역학으로 바라본 우주에서 가장 중요한 것은 정보라는 결론에 도달하게 된다. 그렇다면 우주의 근본이 정보라는 도약을 하는 것은 어떨까? 이런 입장의 대표자는 휠러이며, 이들의 구호가 '비트로부터 존재로(it from bit)'이다.

스무고개라는 게임이 있다. 한 사람이 단어 하나를 머릿속에 생각하고, 다른 사람이 20번의 질문을 통해서 그 단어를 맞추는 거다. 휠러는 양자역학을 답이 없는 스무고개에 비유했다. 질문을 받으면 아무 답이나 한다. 다만, 앞에서 한 대답과 모순이 되지 않는 대답을 해야만 한다. 대답들이 쌓이면서 하나의 개념으로 답이 수렴해간다. 답이 미리 존재하는 것이 아니고, 질문을 통해 답이 만들어져 가고 있는 것이다. 20개의 질문이 모두 끝나면 질문과 답의 목록과 이에 가장 근접한 개념이 얻어진다. 스무고개의 질문을 양자역학의 측정이라 볼 수 있다. 대답은 측정을 통해 얻은 정보다. 실제 양자우주에서 우리가 얻을 수 있는 것은 이것뿐이다. 그렇다면 우주에 실재나 본질은 없다. 질문과 답, 측정과 정보만이 있을 뿐이다. 한마디로 정보우주라는 거다. 차일링거는 이렇게 말한다. “우리가 가진 모든 것은 정보이다. 이것은 우리의 감각인상이며, 우리가 제기한 질문에 대한 대답들이다. 실재는 그 다음에 오는 이차적인 것이다. 실재는 우리가 얻는 정보로부터 도출된다.”

이런 이야기가 이상하다고 느껴지면 당신은 정상이다. 아직 물리학자들조차 정보우주가 정확히 무엇인지 모르고 있다. 실험적 증거가 없으면 말할 것도 없다. 이 이론이 얼마나 유용한지도 불확실하다. 정보우주는 빅뱅우주에 대해 무엇을 말해주는가? 정보우주는 양자 중력을 설명할 수 있나? 실용적 관점에서 전혀 쓸모없는 사변적인 선언에 가까울지도 모른다. 하지만 이런 관점까지 존재하는 이유가 무엇인지는 생각해 볼만하다. 정보우주는 과학논문보다 책으로 소개되고 있다.^{36,37,38,39,40}

결론 및 제언

정보는 물리적이다. 지식을 얻거나 잃는 것은 그 자체로 물리적 과정이다. 따라서 정보 역시 물리법칙의 지배를 받는다. 정보를 물리적으로 기술하기 위해서는 정량적으로 표현할 수 있어야 한다. 정보의 의미는 확률이고, 이것을 정량화한 것이 새턴의 엔트로피다. 엔트로피는 열역학 제2법칙과 관련된 물리량이다. 열역학 제2법칙이 정보를 제대로 포괄하기 위해서는 정보 엔트로피가 물리적 엔트로피와 동일해야 한다. 이는 정보가 물리적이라는 직접적인 증거다.

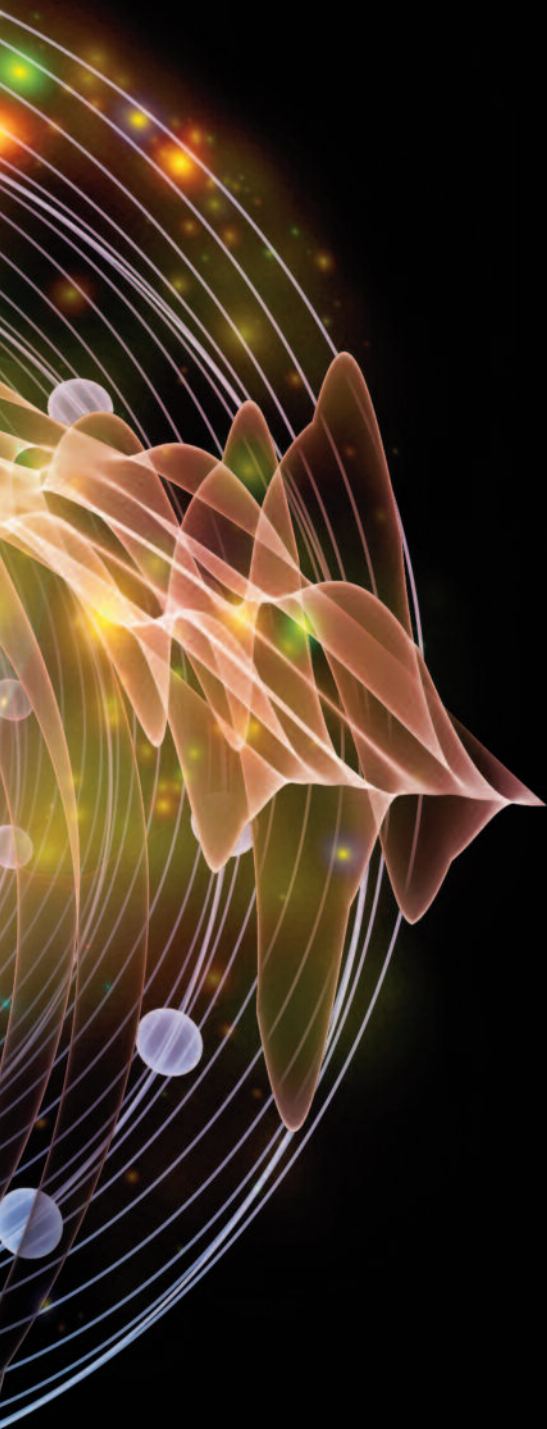
양자역학은 정보적이다. 양자역학은 계의 상태를 기술하며, 미래에 대해 확률만을 알려주고, 대상 자체가 아니라 측정으로 얻어진 결과, 즉 정보만 이야기한다. 사실 열역학에 도입된 정보 엔트로피의 확률은 양자측정으로 얻어진 정보다. 양자역학의 걸어 굿남 이론은 정보의 주관성 문제에 대한 단서를 제공한다. 하지만, 양자역학적 정보는 정보에 대한 우리의 상식을 뛰어 넘는다. 상태의 중첩, 시공간을 초월한 상호관계, 교란 없는 측정의 가능성, 측정 결과를 지우는 일이 양자역학에서는 가능하다. 이것은 고전역학적 실체라는 틀을 가지고는 도저히 이해할 수 없는 것들이다. 결국 우주의 근본을 정보로 보아야 한다는 정보우주 관점까지 제기되기에 이른다.

정보에 대한 이해는 이론적 관심만은 아니다. 생명체는 정보를 다루는 일종의 기계로 볼 수 있다. 지구상의 거의 모든 생명은 DNA에서 RNA를 거쳐 단백질로 이어지는 정보에 기반하여 생존한다. DNA에서 RNA로 정보를 전달하는 과정에서 나타나는 엔트로피 힘(entropic force)이라든지^{41,42}, 이 과정에서 생기는 오류를 수정하는 데 드는 에너지비용^{43,44} 등은 생명에서 정보의 역할을 보여주는 예다.

최근 양자정보를 정보엔진에 직접적으로 적용하거나⁴⁵, 피드백이 고려된 요동정리를 양자역학 영역으로 확장하려는 시도가 이루어지고 있다⁴⁶. 이는 정보의 열역학을 양자영역으로 확장시킬 것이며^{47,48,49} 양자역학적 관점에서 열역학 바라보는 새로운 시각을 줄 것으로 기대된다⁵⁰. 이는 양자 카르노엔진⁵¹이나 나노 스케일에서 작동하는 엔진, 분자모터의 효율 등에 대한 기초이론을 구성하는 데 도움을 줄 것이다. 정보와 엔트로피 문제는 궁극적으로 물리의 근본 문제들, 예를 들어 양자역학으로부터 고전역학의 출현, 열역학적 시간이 심리적 시간과 같은 이유⁵², 더 나아가 우주의 본질에 대한 심오한 질문에 대한 답을 주는데 기여하리라 생각한다.

흙, 공기, 불, 물은 결국 모두 에너지로 구성되지만 그것들이 취하는 여러 형태는 정보에 의해 결정된다. 어떤 일을 하려면 에너지가 필요하고, 한 일을 명기하려면 정보가 필요하다. - 세스 로이드(2006)





Kim Sang-wook



김상욱 swkim0412@pusan.ac.kr

학력 · KAIST 물리학과 박사
KAIST 물리학과 석사
KAIST 물리학과 학사

경력 · 現 부산대학교 물리교육과 교수
前 오스트리아 인스부르크대 방문교수
前 일본 동경대 방문교수
前 서울대 BK 조교수
前 포항공대, 카이스트, 독일 막스플랑크 연구소 연구원

참고문헌

1. Leff, H. S. and Rex, A. F., Maxwell's Demon: Entropy, Information, Computing (Princeton Univ. Press, 1990)
2. Maruyama, K., Nori, F. and Vedral, V., Rev. Mod. Phys. 81, 1-23 (2009)
3. L. Szilard, Z. Phys. 53, 840 (1929)
4. V. Serreli, C.-F. Lee, E. R. Kay, and D. A. Leigh, Nature, 445, 523 (2007)
5. J. J. Thorn, E. A. Schoene, T. Li, and D. A. Steck, Phys. Rev. Lett. 100, 240407 (2008)
6. G. N. Price, S. T. Bannerman, K. Viering, E. Narevicius, and M. G. Raizen, Phys. Rev. Lett. 100, 093004 (2008)
7. Koski, J., Maisi, V., Sagawa, T. and Pekola, J. P., Phys. Rev. Lett. 113, 030601 (2014)
8. Roldán, E., Martínez, I. A., Parrondo, J. M. R. and Petrov, D., Nature Phys. 10, 457-461 (2014)
9. Toyabe, S., Sagawa, T., Ueda, M., Muneyuki, E. and Sano, M., Nature Phys. 6, 988-992 (2010)
10. L. Brillouin, J. Appl. Phys. 22, 334 (1951)
11. Landauer, R., Phys. Today 44 (5), 23-29 (1991)
12. Bennett, C., Int. J. Theor. Phys. 21, 905-940 (1982)
13. Penrose, O., Foundations of Statistical Mechanics: A Deductive Treatment (Pergmon Press, 1970)
14. Sagawa, T. and Ueda, M., Phys. Rev. Lett. 100, 080403 (2008)
15. Juan M. R. Parrondo, Jordan M. Horowitz, and Takahiro Sagawa, Nature Phys. 11, 131-139 (2015)
16. Sagawa, T., Thermodynamics of Information Processing in Small Systems (Springer Theses, Springer, 2012)
17. Cover, T. M. and Thomas, J. A., Elements of Information Theory 2nd ed. (Wiley-Interscience, 2006)
18. Esposito, M. and Van den Broeck, C., Second law and Landauer principle far from equilibrium. Europhys. Lett. 95, 40004 (2011)
19. Still, S., Sivak, D. A., Bell, A. J. and Crooks, G. E. Thermodynamics of prediction Phys. Rev. Lett. 109, 120604 (2012)
20. Crooks, G. E., J. Stat. Phys. 90, 1481 (1998)
21. Jarzynski, C., Phys. Rev. Lett. 78, 2690 (1997)
22. Schlosshauer, Maximilian, Reviews of Modern Physics 76 (4), 1267-1305 (2005)
23. Wojciech H. Zurek, Physics Today, 44, 36-44 (1991)
24. M. Arndt, O. Nairz, J. Voss-Andreae, C. Keller, G. van der Zouw and A. Zeilinger, Nature 401, 680-682 (1999)
25. L Hacker Müller, K Hornberger, B Brezger, A Zeilinger, M Arndt, Nature 427, 711-714 (2004)
26. Marcos Rigol, Vanja Dunjko, and Maxim Olshani, Nature, 452, 854 (2008)
27. Vlatko Vedral, Introduction to Quantum Information Science (Oxford University Press, 2006)
28. A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen, Phys. Rev. 47 777 (1935)
29. Bell, John, Physics 1 (3): 195-200 (1964).
30. Alain Aspect, Philippe Grangier, Gérard Roger, Phys. Rev. Lett. 49 (2): 91-4 (1982)
31. Feynman, Richard P.; Robert B. Leighton; Matthew Sands, The Feynman Lectures on Physics, Vol. 3. (US: Addison-Wesley, 1965)
32. Scully, M. O., Englert, B. G. and Walther, H. Nature 351, 111-116 (1991)
33. S. Dürr, T. Nonn, and G. Rempe, Nature 395, 33 (1998)

-
34. Kim, Yoon-Ho; R. Yu, S.P. Kulik, Y.H. Shih and Marlan Scully, *Phys. Rev. Lett.* 84, 1-5 (2000)
 35. Walborn, S. P.; et al., *Phys. Rev. A* 65 (3): 033818 (2002)
 36. 안톤 차일링거 지음, 전대호 옮김, 아인슈타인의 베일 (승산, 2007)
 37. 세스 로이드 지음, 오상철 옮김, 프로그래밍 유니버스 (지호, 2007)
 38. 한스 크리스천 폰 베이어 지음, 전대호 옮김, 과학의 새로운 언어: 정보 (승산, 2007)
 39. 한스 크리스천 폰 베이어 지음, 전대호 옮김, 과학의 새로운 언어: 정보 (승산, 2007)
 40. James Gleick, *The Information: A History, a Theory, a Flood* (Pantheon Books, 2011)
 41. Andrieus, D. & Gaspard, P., *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 105, 9516-9521 (2008)
 42. Bennett, C. H., *Biosystems* 11, 85-91 (1979)
 43. Hopfield, J. J., *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 71, 4135-4139 (1974)
 44. Sartori, P. and Pigolotti, S., *Phys. Rev. Lett.* 110, 188101 (2013)
 45. Kim, S.W., Sagawa, T., De Liberato, S. and Ueda, M., *Phys. Rev. Lett.* 106, 070401 (2011)
 46. Funo, K., Watanabe, Y. and Ueda, M., *Phys. Rev. E* 88, 052121 (2013)
 47. Zurek, W., *Phys. Rev. A* 67, 012320 (2003)
 48. Funo, K., Watanabe, Y., Ueda, M., *Phys. Rev. A* 88., 052319 (2013)
 49. Park, J. J., Kim, K. H., Sagawa, T. and Kim, S., W., *Phys. Rev. Lett.* 111, 230402 (2013)
 50. Robert S. Whitney, *Phys. Rev. Lett.* 112, 130601 (2014)
 51. Marlan O. Scully, M. Suhail Zubairy, G. S. Agarwal, Herbert Walther, *Science* 299, 862-864 (2003)
 52. Mlodinow, L. and Brun, T.A., *Phys. Rev. E* 89, 052102 (2014)

국가 R&D 현황 분석

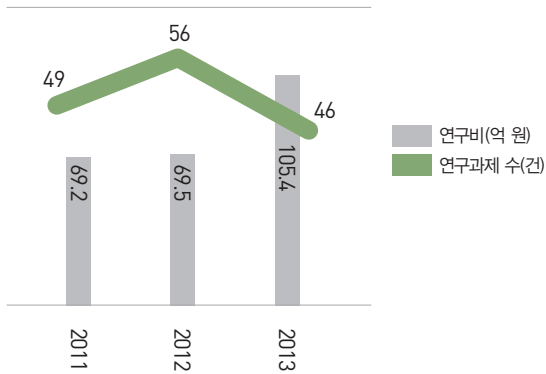
최근 3년간('11~'13년) 정보물리학과 관련된 연구개발사업을 분석함

| 과제 선별 기준 |

연구요약문 내 아래 키워드를 포함하고 있는 과제를 분석 대상 선정
(양자정보) or ((정보) and (엔트로피)) or ((비트) and (존재)) or (결어긋남)

분석 결과 최근 3년간 총 151건의 과제에 244억원의 연구비가 투자됨

연도별 연구비와 연구과제 건수

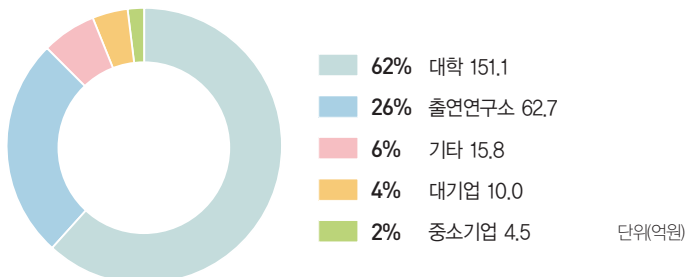


(연구수행주체) 대학이 132건의 과제에 대하여 151억원을 지원받아 가장 많은 연구를 수행함

- 대기업과 중소기업의 경우 각각 1건(10억원)*과 2건(4.5억원)**에 불과한 과제를 수행하고 있으나 정보/통신 분야 개발에 이를 활용하고 있다는 사실은 고무적임

* 1nl/bit ULP(Ultra Low Power)통신 핵심기술 개발

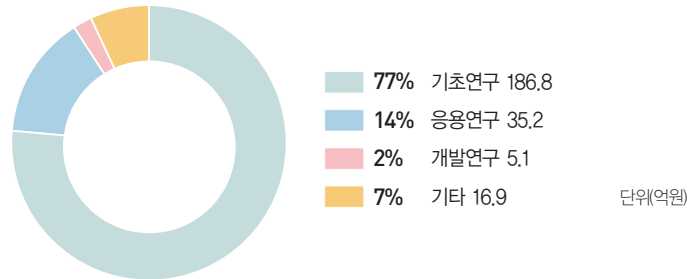
** 다차원영상 지원을 위한 웹기반 스마트 서비스 프레임워크 개발 / 모바일 스마트오피스 환경에서 내부자산관리 및 FIPS 140-2 등급 개인정보유출 관제 기술 개발



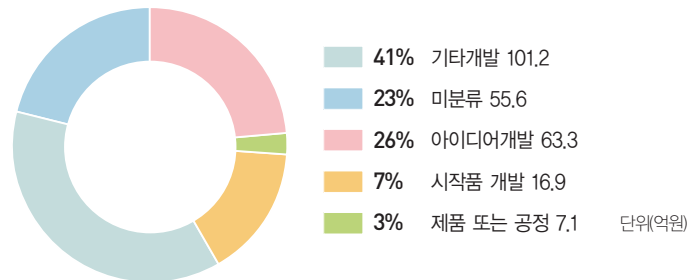
(연구수준) 연구개발단계, 연구개발성격, 기술수명주기를 분석한 결과 기초연구단계가 77%로 가장 많았으나 정보물리학의 특성상 연구개발성격과 기술수명 주기는 기타가 가장 많이 존재함

- 정보물리학에 대한 단순한 기초연구만 이루어지고 있는 것이 아닌 이를 활용한 응용연구(14%)와 개발연구(2%)가 낮은 비율로 이루어지고 있음
- 정보물리학 원리를 활용한 아이디어 개발(26%) 및 시작품 개발(7%), 제품 또는 공정 개발(3%)이 조금씩 이루어지고 있음을 확인할 수 있음
- 기술수명주기적 측면에서도 도입기(31%)와 성장기(12%)가 존재하는 것으로 보아 단순 원리가 아닌 기술적 활용을 고민하는 시점임을 확인할 수 있음

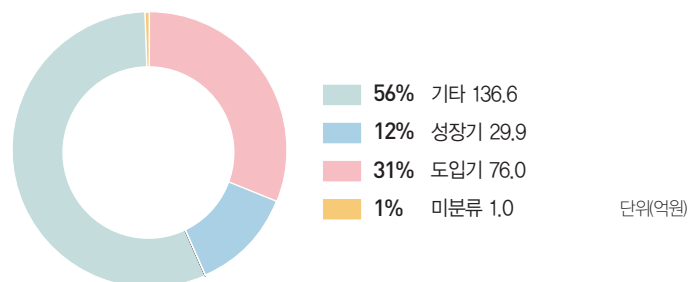
연구개발단계



연구개발성격

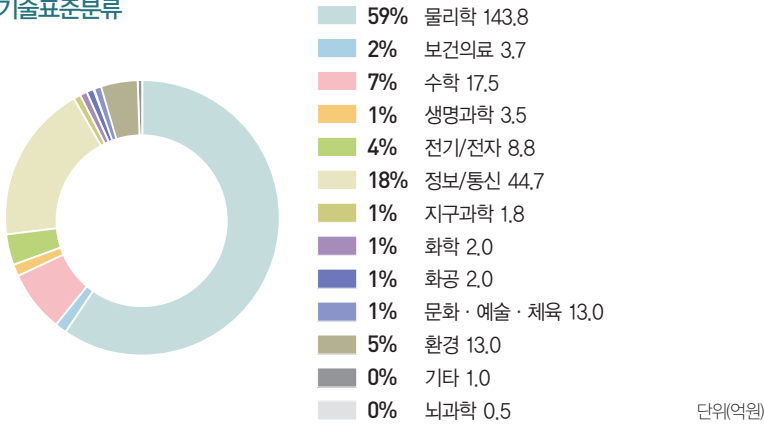


기술수명주기

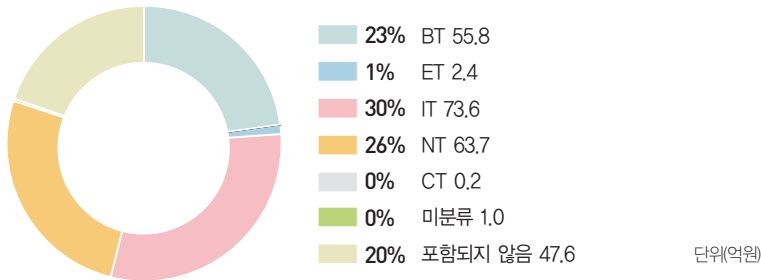


(연구분야) 국가과학기술표준분류와 미래유망 신기술분류(6T), 국가기술지도분류(NTRM)를 분석한 결과 물리학과 정보/통신 분야에서 주로 연구가 이루어짐

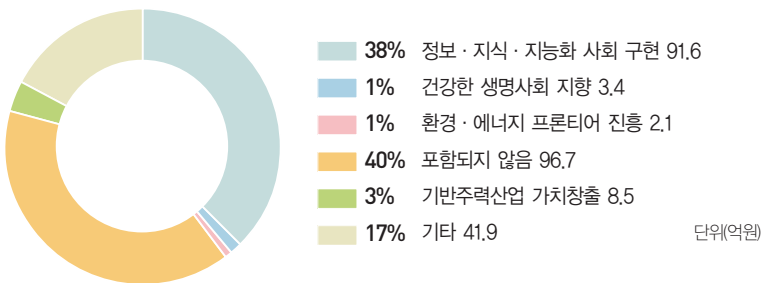
국가과학기술표준분류



미래유망 신기술분류(6T)



국가기술지도 분류 [NTRM]



- 물리학과 정보/통신 분야 이외에도 다양한 분야에 정보물리학 기반 연구가 일부 진행 중임
- 6T 분석에서 NT가 26%로 분석된 것은 소재적 관점에서 양자 정보 연구 과제들이 여기에 포함되었기 때문이고, BT가 23%로 분석된 것은 한국고등과학원 연구운영비지원사업이 BT로 분류되어 높게 나타남
- NTRM 분석 결과 포함되지 않음(40%)이거나 기타(17%)의 비율이 높게 나타났으며, 일부 활용이 되는 경우 대다수가 정보-지식-지능화 사회 구현 (38%)을 위해 활용될 것으로 기대됨

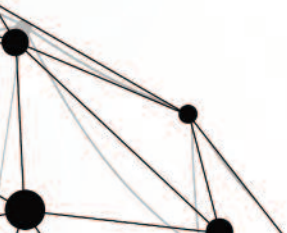
* 이는 아직 정보물리학 기반 연구가 사회적 기여에 대해 많은 고민이 이루어지지 않은 기초 단계임을 보여주는 것임



01 **Information,
Physics, Quantum**

—

02 **Food
Nanotechnology**



◉ 나노기술은 이미 우리 곁에 와 있다
차세대 식품기술의 한축을 담당하는 나노기술

FOOD NANOTECHNOLOGY





식품안전에 있어서의 나노기술

경희대학교 식품생명공학과 김영록

물질은 나노스케일에서 종종 새로운 물리화학적 특성을 나타내며 이러한 특성들을 적절히 조절하여 기존에 구현하지 못했던 새로운 특성을 가진 소재 및 소자를 개발하는 나노과학 또는 나노테크기술 분야가 발생하게 되었다. 나노스케일에서 새로이 나타나는 특성들은 광학적, 자기적, 전기적, 구조적, 화학적, 생물학적 변화들을 포함하고 있으며 이들에 대한 이해와 지식이 축적되면서 나노기술이 과학 전 분야에 미치는 영향은 점점 커져가고 있다. 해마다 출판되는 나노기술관련 학술논문과 특허의 수는 다른 분야에서 유래를 찾아볼 수 없을 정도로 증가하고 있다. 2000년을 기점으로 나노기술은 빠른 속도로 발전을 거듭해 오고 있으며 또한 많은 사람들의 관심을 모아오고 있다. 예로서 1990년대에 보고된 나노기술 및 나노소재에 관련된 논문은 불과 1,000여편 그리고 특허도 200여건에 지나지 않았다. 하지만 2002년까지 출판된 논문은 22,000편 그리고 관련 특허도 1,900건으로 기하급수적으로 늘었다. 이러한 추세는 지속적으로 이어져 2001년부터 2013년까지 ISI-인덱스 학술지에 출판된 나노기술관련 논문은 총 840,000여개에 이르게 되었다². 나노기술은 전자, 정보, 바이오기술과 접목되어 현대과학의 중요한 분야로 자리매김을 하기에 이르렀으며 그 어떤 기술보다도 인류의 삶에 큰 영향력을 발휘하게 될 것이라는 사실에 대해서 폭넓은 공감대를 형성하고 있다.

식품과학은 물리학, 화학, 생물학, 미생물학, 재료학 등 여러 학문이 융합된 복합학문이며, 인류가 축적한 광범위한 지식을 식품에 적용하여 안전하고 건전한 식품을 개발하고 연구하는 학문이다. 지난 수 세기 동안 식품의 식감, 풍미, 영양, 저장기간의 증진 그리고 식품에 존재하는 위해물질로부터의 안전성 확보를 위해 다양한 형태의 가공기술이 개발되어 왔다. 이렇게 축적된 경험과 기술을 바탕으로 현재의 식품은 소비자가 섭취하기 전 물리화학적 처리, 발효, 산분해, 건조, 양생, 훈제, 포장 등과 같은 여러 가공공정들이 확립되어 왔다. 식품업체는 소비자가 요구하는 식품의 신선도, 향미, 물성, 안전성의 증진 및 저장기간을 연장시키고 동시에 이런 가공공정에 필요한 비용을 낮출 수 있는 새로운 기술개발을 위해 많은 노력을 들이고 있다. 그 뿐 아니라 식품의 영양학적 가치를 높이고, 소금, 설탕, 조미료, 지방, 보존제와 같이 건강에 부정적 영향을 미칠 수 있는 물질들이나 부정적 이미지를 가지고 있는 물질들의 사용을 저감화하는 기술, 그리고 특정한 연령대의 소비자에 적합한 식품가공기술을 개발하고 있다. 나노기술은 새로운 식품소재개발 및 식품가공기술을 제공하여 식품업계 및 소비자들이 원하는 형태의 안전하고 건전한 식품개발을 가능하게 해 줄 수 있을 것으로 기대를 모으고 있다. 나노기술을 바탕으로 분자수준에서 물질의 구조나 배열을 조작함은 물론 식품성분을 나노제형화 함으로써 기존의 식품과학은 새로운 국면을 맞이하게 되었으며 이를 통해 지금까지 존재하지 않았던 또는 가공식품에서 구현하기 어려웠던 풍미와 물성 그리고 기능성을 구현해 낼 수 있는 가능성을 열게 되었다. 하지만 식품의 소재적인 측면에서 적용이 되고 있는 나노기술은 아직까지 초기단계에 머물러 있으며 산업화를 위해서는 상당한 시간이 소요될 것으로 보인다.

현재 가장 빠른 속도로 나노기술이 적용되고 가시적인 성과를 보이고 있는 분야는 식품포장과 식품에 존재하는 위해물질이나 병원균의 검출 등 식품안전을 모니터링 하는 분석기술이라 할 수 있다. 새로운 분석기술들은 금나노입자(gold nanoparticles), 탄소나노튜브(carbon nanotubes), 나노막대(nanorods), 자성나노입자(magnetic nanoparticles), 그래핀(graphenes), 나노다공성 막(nanoporous membranes), 양자점(quantum dot), 폴리디아세틸렌(polydiacetylenes), 나노포어(nanopore) 등의 나노소재를 적용하여 검출의 편리성, 정확도 그리고 감도를 향상시킬 수 있었다. 위에 기술한 나노소재들이 가지고 있는 광학적 특성 및 전기적 특성들은 생물학적 수용체의 특이적 결합특성과 결합되어 새로운 형태의 고감도 검출시스템으로 개발이 진행되고 있다. 그리고 생물학적 위해요소를 분석하는데 있어서 가장 강력하고 널리 사용되고 있는 방법인 PCR(polymerase chain reaction)은 시스템의 소형화와 분석에 소요되는 시간을 줄이기 위해 미세유체(microfluidic)칩 형태로 개발이 되고 있으며 최근 타겟 유해미생물의 유전자를 증폭하는데 걸리는 시간을 10분 이내로 줄일 수 있었다. 그리고 식품에 있는 위해요소들을 검출하기 위해서는 그러한 위해요소들을 검출 가능한 상태로 만드는 시료전처리 과정이 필수적이다. 식품은 복잡한 매트릭스로 구성되어 있어 여기에 존재하는 극미량의 위해물질을 검출하기 위해서는 시간이 오래 걸리는 증균배양 등의 과정이 필요한데, 최근에는 식품에 존재하는 극미량의 위해요소를 효과적으로 분리 농축하여 분석에 적합한 시료로 준비할 수 있는 시료전처리 과정에 필요한 마이크로/나노 유체기술에 대한 연구가 진행되고 있다. 본 리뷰는 식품안전을 모니터링하는 나노기술에 초점을 맞추어 작성이 되었으며, 보고서의 후반부에는 식품포장에 적용된 나노기술과 식품용 나노소재기술 그리고 식품 및 식품포장소재에 적용된 나노물질의 안전성관련 이슈들에 대한 간략한 개요가 기술되었다.

식품안전을 위한 나노기술

최근 식품유래 유해미생물 검출기술이 발전해 왔지만 아직도 기존 기술을 현장에서 적용하는데는 많은 기술적 문제를 안고 있다. 선진화된 식품위생관리 시스템을 가지고 있는 미국의 경우에도 현재 식중독으로 인해 매년 7,600만명의 환자가 발생하고 있고, 그 중 5,000명이 목숨을 잃고 있다. 보고에 따르면 살모넬라(Salmonella), 리스테리아(Listeria), 그리고 톡소플라즈마(Toxoplasma)에 의한 사망자의 수가 1,500명에 이르고 있다. 질병관리본부 자료에 따르면 최근 예시니아(Yersinia), 쉬겔라(Shigella), 리스테리아(Listeria), 캄필로박터(Campylobacter), O157 대장균(Escherichia coli O157:H7), 그리고 살모넬라에 대한 감염률은 줄어들고 있는 추세이나 비브리오(Vibrio)에 대한 감염률은 증가하고 있다. 리스테리아와 O157 대장균에 대한 감염률의 감소는 이들 유해균에 대한 인식 향상으로 위생관리가 보다 철저하게 이루어진 이유에 기인한 것으로 보인다. 미국 식약청, 농무성, 그리고 유럽연합에서는 즉석식품에서 리스테리아의 허용치를 0(Zero tolerance)으로 규제하고 있으며 또한 간소고기(Ground beef)에서도 O157 대장균을 한 마리도 허용하지 않는다고 밝히고 있다. 이러한 식품위생관리 규정의 강화는 식품생산 및 가공환경의 개선을 유도했으며 이로 인해 위에서 언급한 특정 미생물로 인한 식중독의 발병 건수를 줄이는 결과를 가져왔다. 그렇지만 여전히 노로바이러스(norovirus) 감염에 따른 질병은 전체 식중독의 50%를 차지하고 있으며 비브리오 감염에 따른 식중독은 증가하는 추세이다. 식품위생 관리 및 식품제조·가공환경이 개선·발전하고 있지만 보다 완벽한 예방을 위해서는 식품에 존재하는 위해물질 및 유해균을 신속하고 정확하게 검출하여 식품의 안전성을 확실하게 보장하는 것이 최선이다.

유해균의 오염에 따른 문제는 국민건강의 위협과 더불어 식품제조산업에도 막대한 경제적 영향을 주고 있다. 예로서 O157 대장균에 오염된 간소고기로 인해 미국 뉴저지에 위치한 Topps Meat Company社は 10,000톤에 해당하는 제품에 대해 리콜을 실시했으며 이로 인해 엄청난 경제적 손실을 입었다. 미국의 대표적

냉동햄버거 제조업체로 67년의 전통을 가지고 있는 이 회사는 이로 인해 파산을 면치 못 했다. 우리나라의 경우에도 축산식품을 제조·가공하는 회사의 규모가 날로 커져가고 있는 추세이고, 제품의 오염이 가져오는 결과는 단시간에 전국적으로 영향을 미칠 것으로 예상된다. 식품의 생산 및 가공 설비는 점점 대형화·자동화 되어감에 따라 처리 및 가공 단계가 증가하고 이는 외부로부터의 오염 가능성을 증가시키고 있다. 따라서 현장에서 신속하고 민감하게 유해물질을 검출하는 기술에 대한 필요가 점점 증가하고 있다.

기업체로서는 리콜에 따른 경제적 손실뿐 아니라 완제품이 시장에 출하되기 전 보관하는데 수반되는 비용을 고려해 보았을 때 유해균을 현장에서 신속하게 검출하는 기술에 대한 요구는 매우 절실하다. 신속한 결과는 제품이 시장으로 출하되는 시기의 단축을 의미한다. 따라서 Marshfield Food Safety社와 같은 특정 회사는 식품생산설비 현장에서 유해균검사 서비스를 제공하고 있다. 하지만 모든 업체들이 이러한 서비스에 드는 비용은 감당하기는 어렵기 때문에 자체적으로 사용할 수 있는 현장검출 시스템에 대한 연구가 지속적으로 진행이 되고 있다.

식품에 존재하는 위해물질 검출기술에 적용되는 나노소재 및 작용기작

생물체들은 주변환경이나 자신의 상태를 감지하는 여러 가지 형태의 우수한 인지도구를 가지고 있고, 이런 우수한 생물구성성분을 나노기술과 융합하여 새로운 차원의 고감도 센서로 개발 하려는 노력이 시작되었다. 센서를 개발하기 위해서는 먼저 특정 위해 물질을 특이적으로 인지할 수 있는 생물수용체를 확보해야 하고, 인지된 정보를 적절히 증폭하여 전달하는 신호전환시스템을 개발해야 한다. 그리고 무엇보다도 이러한 구성성분들을 칩 위에 경제적이고 효율적으로 집적하는 기술의 확립이 반드시 필요하다. 대표적 나노물질인 금나노입자, 탄소나노튜브, 나노막대, 자성나노입자(Nano Particle)등은 전기광학적 특성이 우수하기 때문에 센서의 핵심소재로 많은 관심을 받고 있다. 아래에 검출기술에 적용이 되고 있는 대표적인 나노물질들과 이들의 검출 기작에 대하여 기술하였다.



금나노입자(gold nanoparticles)

금나노입자는 화학적 반응을 통해 원하는 사이즈로 제조가 용이하며 다양한 탐침(probe)의 표면 기능화가 가능하므로 바이오센서 소재로의 응용이 광범위하게 이뤄지고 있다. 특히, 금나노입자를 이용한 센서개발 연구는 금나노입자가 용액중에 분산되었을 때 분산도에 따라서 흡수스펙트럼의 최대흡수파장이 변하게 되는 현상으로 비색센서 소재로 응용이 가장 활발하게 이뤄지고 있다. 예를 들어 약 13 nm의 지름 크기의 금나노입자가 수용액 상에서 잘 분산되었을 때는 530 nm의 최대흡수파장을 가지며 붉은 색을 띠는 반면, 응집현상이 일어난 금나노입자들은 최대흡수파장이 장파장으로 이동하게 되며 보라색으로 변하게 된다. 최근에 구연산으로 안정화된 금나노입자와 멜라닌의 상호작용에 의한 응집현상으로 시료인 우유로부터 0.05 mg/L의 농도까지 멜라닌 검출이 가능한 연구결과가 보고되었다(그림 1). 검출 결과는 멜라닌과 금나노입자 간 상호작용에 의한 금나노입자 용액의 색전이를 육안 또는 분광학적 분석법으로 확인 및 정량화가 가능하다(그림 2). 또한, 멜라닌과 선택적 결합도가 높은 18-crown-6⁵과 금나노입자 간 정전기적 반발력을 줄여주는 cysteamine⁶이 기능화된 금나노입자를 이용하여 검출 민감도를 향상시킨 멜라닌 검출 시스템이 보고되었다.

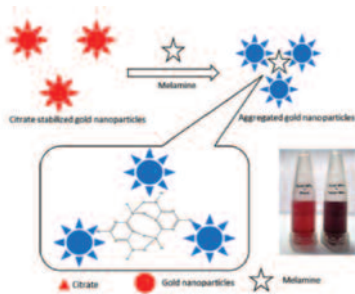


그림 1. 금나노입자의 응집현상을 이용한 멜라닌 검출 시스템의 모식도³

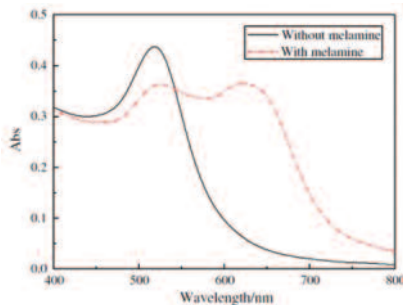


그림 2. 멜라닌 존재 여부에 따른 금나노입자 흡수스펙트럼의 변화⁴

금나노입자의 응집현상을 이용한 위해물질 검출 연구는 멜라닌 외에도 유기인계 농약⁷, 아플라톡신(aflatoxin) B1⁸, 살모넬라⁹, 미소시스틴(microcystin)-LR¹⁰, 구리 이온(copper ion)¹¹ 등이 있다. 하지만, 금나노입자 응집 현상 기반의 비색센서 시스템은 금나노입자 표면에 기능화된 탐침과 결합가능한 부위가 표적 물질에 최소 2개 이상 존재해야 하는 단점이 있다¹².

금나노입자의 응집현상을 기반으로 한 검출시스템 외에도 다양한 검출시스템이 개발되었다. 그 예로는 금나노입자의 형성과정 및 금나노입자의 생효소적 특성을 기반으로 한 검출법 등이 있다. 먼저, 금나노입자 형성과정을 기반으로 한 검출법의 예는 다음과 같다. 수용액 상에서 환원제에 의한 Au³⁺의 환원으로 금나노입자의 형성이 가능하며, 환원제와 상호작용을 하는 물질이 존재하는 경우 금나노입자의 형성은 저해될 수 있다. 이런 현상을 이용하여, 멜라닌이 존재하는 경우 환원제인 3,5-dihydroxybenzoic acid에 의한 금나노입자 형성이 저해되는 현상을 비색 분석 기반으로 확인할 수 있다¹². 그리고 금나노입자의 과산화 효소적 활성(peroxidase-like activity) 현상을 기반으로 한 검출법은 표적 물질인 멜라닌이 존재하는 경우 금나노입자간의 응집이 유발되고 응집체에 의한 과산화 효소적 활성 증대를 3,3',5,5'-tetramethylbenzidine (TMB)-H₂O₂ 발색 반응으로 검출 민감도를 향상시킬 수 있음을 보여준다¹³(그림 3). 과산화 효소적 활성을 이용한 검출법은 금나노입자를 직접적인 비색 요소로 이용한 것이 아니라 TMB-H₂O₂와 같은 발색 반응의 촉매제로 이용한 것이다.

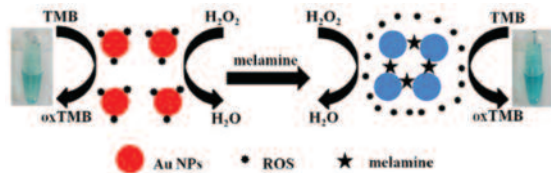


그림 3. 금나노입자의 과산화 효소적 활성을 이용한 발색 반응 기반 멜라닌 검출 시스템¹³

최근에는 금나노입자와 단백질로 형성된 초분자(supramolecule)가 표적 물질 존재 시 초분자 중 선택적으로 금나노입자 혹은 단백질이 표적 물질과 결합하는 현상을 이용한 센서가 개발되었다. 그 예로는 라이소자임이 코팅된 금나노입자 응집체가 고초균(Bacillus subtilis)에 의해 선택적으로 라이소자임이 초분자에서 분리되어 금나노입자의 분산도가 향상되는 현상을 비색 검출을 통해 확인하였다¹⁴(그림 4A).

반대로 금나노입자가 표적 미생물에 흡착되는 현상을 이용한 예로는 금나노입자와 초분자를 이룬 β -갈락토시다아제(β -galactosidase)가 금나노입자가 미생물과 결합에 의해 효소적 활성을 회복함으로써 발색 물질인 chlorophenol red β -D-galactopyranoside(CPRG)의 발색 유도를 통해 표적 미생물의 농도를 정량적으로 분석한 연구가 보고되었다¹⁵(그림 4B). 초분자에 의한 위해물질 및 병원성균 검출연구는 금나노입자의 특성 뿐 아니라 초분자를 이루는 단백질과 압타머와 같은 표적물질에 더욱 선택적 결합을 할 수 있는 분자가 이용될 수 있다. 따라서, 초분자 형태의 금나노입자 센서가 다양한 표적물질을 높은 민감도로 검출 가능한 센서 시스템 개발에 응용될 수 있을 것이라 예상된다.

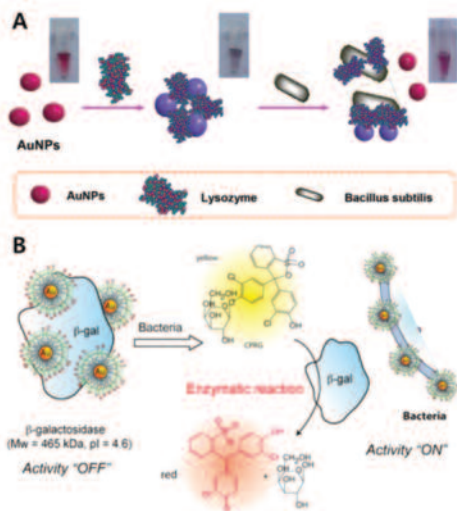


그림 4. (A) 금나노입자와 라이소자임 초분자를 이용한 고초균 검출 (B) 금나노입자와 β -갈락토시다아제 초분자를 이용한 XL1 대장균 검출 모식도^{14, 15}

금나노입자를 비색 요소로 이용한 다른 형태의 센서로는 측방 유동 검정 스트립(lateral flow assay strip) 방식이 대표적이다. 측방 유동 검정법은 항원-항체간 결합 반응을 기반으로 하고 있으며 금나노입자 표면에 항체를 고정화하고 스트립 기판에 고정화한 항체 간 결합을 샘플에 존재하는 항원에 의해 유발되는 샌드위치 결합을 금나노입자의 색으로 확인하는 방법이다(그림 5A). 측방 유동 검정 스트립 시스템으로 검출 연구된 물질로는 아플라톡신 B1¹⁶, 포도상구균의 외독소 B(Staphylococcal Enterotoxin B)¹⁷(그림 5B) 등이 있으며, 단일가닥 DNA가 기능화된 금나노입자를 이용한 GMO의 특정 유전자 검출 사례도 보고되었다¹⁸.

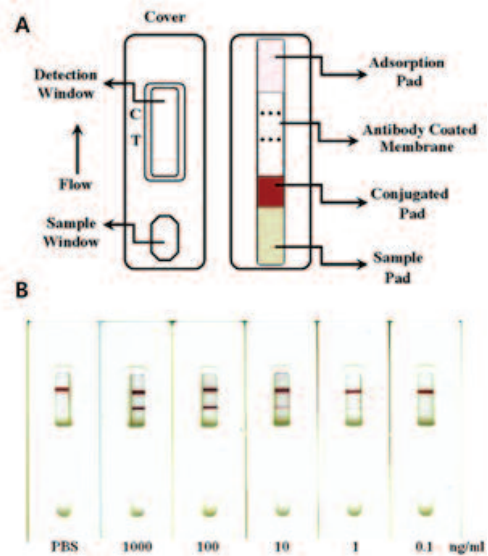


그림 5. (A) 측방 유동 검정 스트립의 검출 플랫폼 시스템 설계 (B) 금나노입자를 이용한 포도상구균의 외독소 B 검출 테스트 결과¹⁷

많은 식품 위해물질이나 병원성균 검출 비색센서의 요소로 금나노입자를 사용한 사례 외에도 몇몇 다른 검출방법들이 보고되었다. 그 예로, 수정미세저울(quartz crystal microbalance) 분석을 통해 O157 대장균의 표적 DNA를 검출할 때 금나노입자를 이용한 질량변화 증폭을 통해 검출 민감도를 향상시킬 수 있었다¹⁹. 또한, 제초제 성분인 아트라진 혹은 살모넬라 검출을 위한 전기화학 분석에 있어서 검출 표지로 금나노입자를 이용한 사례들이 보고된 바 있다²⁰.

탄소나노튜브(carbon nanotubes)

탄소나노튜브는 우수한 전기적/기계적 물성으로 기계적 센서와 화학적 센서로 개발이 용이하다. 탄소나노튜브는 화학적으로 비활성 재료이기 때문에 바이오센서 등에 활용 가능성이 무한하다고 할 수 있다. 일반적으로 탄소나노튜브를 바이오 센서에 적용하기 위해서는 화학적 또는 물리적 개질을 통해 나노튜브의 표면에 탐침을 기능화 하는 과정을 거치게 된다. 그리고 우수한 전기적 특성으로 탄소나노튜브는 전기적 검출 시스템 기반 바이오센서 개발에 주로 이용되고 있다. 특히, 탄소나노튜브 표면에서는 표적 생물분자 또는 세포와의 접촉으로 유발되는 전기적 특성 변화가 크고 전극의 표면적을 극대화 함으로써 검출 민감도를 증대시키는 장점이 있다. 탄소나노튜브 기반의 바이오센서는 크게 전기화학적 혹은 전계방출효과 트랜지스터(Field-Effect Transistor, FET) 등의 방식으로 나뉘질 수 있다. 여기에서는 전기화학적 측정 방식의 바이오센서 연구를 중심으로 살펴보고자 한다.

기본적으로, 탄소나노튜브 표면에 항체나 압타머와 같은 탐침을 기능화하고 표적물질의 결합으로 유도되는 전기적 변화를 관찰한 예는 다음과 같다. 일반 전극 위에 형성된 탄소나노튜브 네트워크에 기능화된 압타머는 용액내의 산화환원 반응을 매개하는 역할을 한다(그림 6). 이때, 표적물질인 테트라사이클린에 의해 압타머가 3차구조를 형성하게 되면 용액내의 산화환원 반응을 매개할 수 없으므로 용액내의 전기화학적 반응은 억제되게 된다. 이런 전기화학적 반응의 변화를 DPV(Differential Pulse Voltammetry) 측정을 통해 확인하였고 5 nM 수준까지 검출이 가능하였다. 특히, 실제 우유 시료에 포함된 테트라사이클린을 50 nM~20 μM 농도에서 85%이상 검출하는 민감도를 보여주었다²¹.

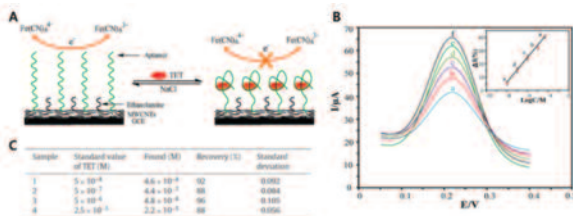


그림 6. (A) 압타머가 기능화된 탄소나노튜브를 이용한 테트라사이클린의 전기화학적 검출 모식도 (B) 상기시스템의 테트라사이클린의 DPV 측정결과 (C) 우유에 포함된 테트라사이클린의 검출능력을 평가한 결과²¹

구에서 신호를 증폭하기 위한 수단으로 효소를 이용하는 경우가 많다. 예를 들어 샌드위치 결합 방식에서 검출 항체에 과산화효소(Horse Radish Peroxidase, HRP)가 태그된 형태를 사용함으로써 전기화학적 신호를 증폭할 수 있다. 다음으로는 HRP와 같은 효소를 이용한 전기화학적 신호 증폭 사례에 대해 소개하고자 한다. 일반적으로 HRP를 사용하는 경우는 ELISA 방식과 유사하게 검출 항체에 HRP가 태그된 형태로 샌드위치 결합 방식을 선호한다. 이와 달리, 탄소나노튜브에 HRP가 태그된 항체를 기능화하고 표적균인 쉬겔라 플렉스네리(Shigella flexneri)가 항체에 의해 결합되었을 때 HRP의 활성이 저해되는 현상으로 3.1×10^3 CFU/ml까지 검출한 연구가 보고되었다. 특히, ELISA 처럼 각기 다른 항체를 사용하지 않았음에도 불구하고 ELISA 시험과 95% 이상 일치하는 결과를 보여주었다²².

탄소나노튜브는 일반적으로 전극을 형성하는 재료로 사용하게 되는데, 짧은 길이의 탄소나노튜브로 전기적 신호를 증폭시키는 목적으로 검출 항체와 결합시켜 포도상구균의 외독소 B(SEB)를 검출한 연구가 보고되었다²³. 일반적인 샌드위치 결합 방식과 탄소나노튜브를 단독으로 신호 증폭을 위해 사용했을 때 보다 항체/탄소나노튜브 복합체를 사용한 경우 신호 증폭이 극대화 됨을 확인할 수 있었고 그를 통해 10 pg/ml의 농도까지 검출이 가능하였다. 또한, 실제 식품 시료에 포함된 SEB의 검출능을 ELISA 방식과 비교 검증하였을 때, 유사한 결과를 보여줌으로써 개발된 시스템의 성능이 우수함을 나타내었다(그림 7).

이상에서, 탄소나노튜브를 이용한 전기화학적 검출 방식을 통한 식품 위해물질 및 병원성균의 검출 사례에 대해 살펴보았다. 대부분 표적 물질을 선택적으로 검출하기 위해서 항체 혹은 압타머 등의 탐침을 사용하고 있는데, 탐침을 사용하지 않고 전기화학적 검출 방식으로 위해물질을 검출한 사례에 대해 간략히 소개하고자 한다. 식품에 사용되는 몇몇 화학물질, 특히 색소와 같은 물질은 화학구조적 특징으로 인해 탄소나노튜브 혹은 그래핀과 높은 친화성을 가지고 있다. 이를 이용해 별도의 탐침을 사용하지 않고도 탄소나노튜브와 색소간의 친화적 결합함으로써 15~50 μg/l 수준까지 검출이 가능함을 보여주었다²⁴. 또한, 장어양식에 불법으로 사용되고 있는 말라카이트 그린을 비탐침 기반으로 탄소나노튜브와의 친밀 결합을 이용해 6 nM 수준까지 전기화학적 측정 방법으로 검출한 연구가 보고 되었다²⁵.

전기화학적 측정을 통해 식품 위해성분 및 병원균을 검출하는 연

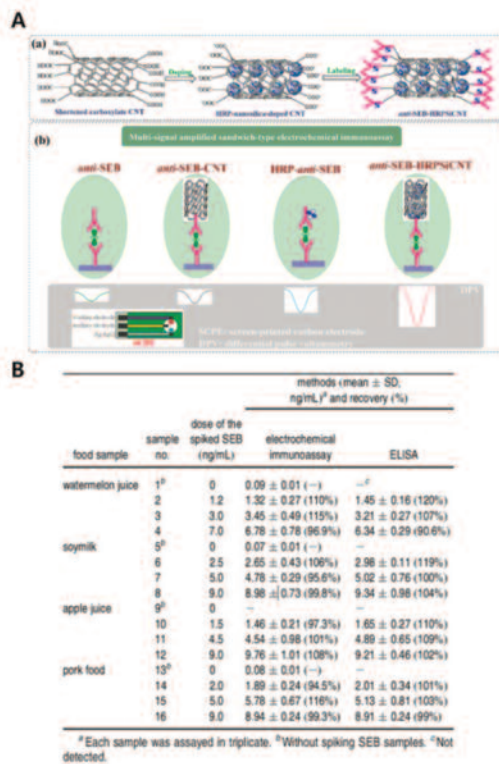


그림 7. (A) 검출 및 전기신호 증폭을 위한 탄소나노튜브 및 항체 복합체 제조 방법과 검출 모식도 (B) 상기 시스템을 이용하여 식품 시료로부터 SEB를 검출하는 민감도를 ELISA 방식과 비교 검증한 결과²³

전기화학적 검출 방식 외에 탄소나노튜브를 이용한 식품 위해요소 검출 연구로는 형광 분석 기반 검출 시스템이 가장 많이 연구되었다. 그 중에서도 전기화학발광(electrochemiluminescent, ECL) 분석법은 샌드위치 결합 방식을 이용하되 탄소나노튜브로부터 전달되는 전기적 신호를 2차 항체에 표지되어 있는 활성물질에 의해 발광되는 빛을 감지하여 표적 물질을 검출하게 된다. 예를 들어, 어류 독소인 펠리톡신(palytoxin, PliTX) 항체를 탄소나노튜브 전극에 기능화를 하고 전기적 산화 환원에 의해 발광 빛을 내는 물질이 태그된 항체간의 결합이 항원인 펠리톡신에 의해 유발될 수 있다(그림 8). 이 상태에서 전류를 흐르게 하면 용액내의 산화 환원 반응이 연쇄적으로 진행되게 되고 최종적으로 발광 빛이 나오는 것을 감지하는 방식으로 2.2 μg/kg 수준의 검출 한계를 가진 시스템을 개발하였다²⁶

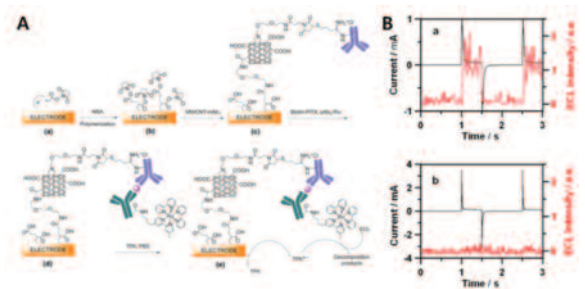


그림 8. (A) 탄소나노튜브를 이용한 ECL 방식의 펠리톡신 검출 시스템 제작 모식도 (B) 상기 ECL 방식으로 펠리톡신을 검출하는 정성적 검출력을 검증한 결과 (a) 펠리톡신이 있는 경우, (b) 펠리톡신이 없는 경우²⁶

지금까지 설명한 탄소나노튜브의 전기적 특성을 이용한 바이오센서 외에도 탄소나노튜브의 물리적 특성을 이용한 식품 위해성분 검출 센서 개발에 대해서 소개하도록 하겠다. 먼저, 단일벽 탄소나노튜브는 단일가닥 DNA와 혼성체를 이룰 수 있다고 알려져 있다. 이를 이용한 Hg²⁺ 검출 센서가 개발되었는데 검출 기작은 다음과 같다. 먼저 Hg²⁺와 결합력이 있는 단일가닥 DNA로 탄소나노튜브와 혼성체를 만들어주고 Hg²⁺와 함께 상보적인 DNA를 추가할 경우, 탄소나노튜브와 혼성체를 이뤘던 DNA가 Hg²⁺와 함께 결합을 하며 이중가닥 DNA가 형성되게 된다. 이때 이중가닥 DNA에 특이적으로 결합하여 발광하는 SYBR Green®이 존재하는 경우 형광측정을 통해 Hg²⁺를 7.9 nM 수준까지 검출가능한 결과가 보고되었다²⁷. 또한, 탄소나노튜브의 큰 표면적을 이용하여 ELISA 시스템의 검출 민감도를 6배 향상시킨 결과가 보고되었다. 연구에서는 ELISA 기판에 항체를 직접 고정화하는 일반적인 방법과 탄소나노튜브와 항체 혼성체를 ELISA 기판에 고정하는 방법을 비교하였다. 이를 통해 포도상구균의 외독소 B를 0.1 ng/ml 수준까지 검출할 수 있었으며 CCD와 결합하여 현장진단이 가능한 시스템으로 개발하였다²⁸. 이와 같이 탄소나노튜브는 식품 위해물질 및 병원성균 검출 시스템이 다양하게 적용되었으며 앞으로도 탄소나노튜브의 고유한 전기적 특성과 물리적 특성을 이용한 연구는 활발히 진행될 것이라 예상된다.

나노막대(nanorods)

나노막대는 금속 결정이 형성되는 조건을 나노다공막(nanoporous membrane)과 같은 제한된 영역에서 진행하거나, CTAB(Cetyltrimethylammonium bromide) 혹은 TCAB(Tetraoctylammonium bromide)와 같이 막대 모양의 미셀을 형성하는 계면활성제를 주형으로 이용하여 제작할 수 있다. 형성된 나노막대는 종횡비에 따라서 흡수 스펙트럼이 변화된다고 알려져 있으며 그에 따른 광학적 변화에 따라 다양한 광학측정 기반 바이오 센서 연구에 이용되고 있다. 특히, 표면증강라만산란(Surface Enhanced Raman Scattering, SERS)이 일어나는 빛의 파장과 산란 강도는 나노막대의 형태 및 나노막대 간 간격에 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 최근에 보고된 연구에 의하면, 금나노막대들을 용액내에서 자가조립과정을 거쳐 2차원적으로 배열시키고 SERS 측정을 통해 식품 오염성분들을 낮은(0.9 fM)농도 수준에서 검출 가능한 시스템을 개발하였다(그림 9). 특히, 수직으로 배열된 금나노막대간 간격이 0.8 nm일때 SERS 산란광 강도를 높여주었을 뿐 아니라 재현성 있게 금나노막대 배열을 제조할 수 있다고 보고하였다²⁹. 은나노막대의 수직배열을 이용한 병원성 미생물들의 동정에 대한 연구도 보고되었다. 여기에서는 은나노막대를 기판에 증착 과정을 통해 형성시키고 특정 각도(86°)로 기울여 수직배열 시킴으로써 SERS 신호 강도를 향상시켰다. 이를 통해 부가적인 화학물질 없이도 제조된 SERS 기판으로 다양한 균들을 동정함은 물론 살아있는 균과 죽은 균까지 구분 가능함 보여주었다³⁰.

귀금속 나노막대를 이용한 SERS 측정뿐 아니라 다른 형태의 센서도 개발되었다. 예를 들어, 금/실리콘 이성 나노막대(Au/Si hetero nanorod)를 제조하고 형광 측정 방식을 통해 살모넬라 검출 연구가 보고되었다. 연구에서는 두 금속으로 이뤄진 나노막대를 형성하고 금에는 항체를 실리콘에는 형광물질을 흡착시켜 표적 병원균에 결합된 나노막대로부터 나오는 형광 빛을 측정하여 정성적 검출 시스템을 개발하였다³¹. 그리고 금나노막대 역시 금나노입자처럼 비색 검출 방식으로 활용될 수 있다. 금나노막대를 이용한 비색 검출 센서의 예는 다음과 같다. 먼저, 젠타마이신 항체와 젠타마이신 유사체로 각각 기능화된 금 나노막대를 제조한다. 젠타마이신 항체가 기능화된 금 나노막대와 젠타마이신 유사체가 기능화된 금 나노막대는 기능화된 항체와 유사체간의 결합으로 나란히 배열되게 된다. 하지만 젠타마이신이 존재하는 경우 경쟁적 결합으로 젠타마이신 항체가 기능화된 금 나노막대는 표적 물질인 젠타마이신과 결합을 하게 되므로 나노막대간의 결합은 유발되지 않는다. 이런 현상을 광학 측정을 통해 정량적으로 젠타마이신을 검출하였고 0.05 ng/ml 수준까지 분석할 수 있었다³².

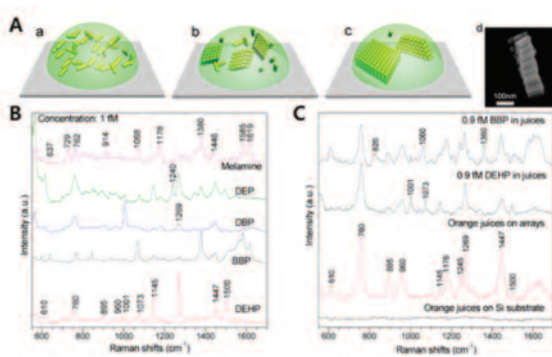


그림 9. (A) 금나노막대가 용액상에서 자가조립되는 과정과 형성된 금나노막대 배열의 TEM 사진 (B) 상기시스템을 이용한 식품 오염성분의 SERS 분석결과 (C) 주스에 포함된 식품 오염성분의 검출한계를 검증한 결과²⁹

자성나노입자(magnetic nanoparticles)

자성나노입자는 나노이미징 및 나노제약 분야 등의 영역으로 응용의 확대가 기대되는 나노재료이다. 특히, 자성나노입자 중에서도 산화철(Fe_3O_4) 나노입자가 가장 대표적인 재료로 인식되고 있다. 자성나노입자는 바이오센서 연구에도 이용되고 있는데 주로 복잡한 매트릭스로부터 표적으로 하는 생물학적 분자 혹은 세포를 분리 및 농축하기 위해 사용되고 있다. 표적물질의 선택적 분리 및 농축을 하기 위해서 자성나노입자의 표면을 항체 혹은 압타머 등과 같이 표적물질에 선택적 결합력이 있는 탐침으로 기능화하게 된다. 여기에서는 자성나노입자를 이용한 병원성균 검출 연구에 대해 간략히 소개하고자 한다. 먼저, polyaniline이 코팅된 산화철 나노입자에 O157 대장균 항체를 기능화 시키고 샘플로부터 O157 대장균을 선택적으로 분리하여 전기신호 측정이 가능한 측방 유동 스트립에 샌드위치 결합으로 농축시키게 된다(그림 10). 이때, 산화철 나노입자에 코팅된 polyaniline은 산도핑(acid doping)에 의해서 전도성을 띄게 되므로, O157 대장균 농도에 따라 양 전극을 통해 흐르는 전류량이 변화하게 된다. 이를 통해 67 CFU/ml의 농도까지 표적균을 검출할 수 있었다³³. 실제 식품으로부터 병원성 미생물 검출한 연구가 되고 있었는데, 항체가 기능화된 산화철 나노입자로 분리 농축하고 적외선 분광(Infrared Spectroscopy, IR-Spectroscopy) 분석을 통해 O157 대장균을 $10^4 \sim 10^5$ CFU/ml 수준까지 검출할 수 있었다. 그와 함께 쥐티푸스균(*Salmonella typhimurium*)과 대장균 K12 대한 교차반응 검증을 통해 특이적 검출능을 입증하였다³⁴.

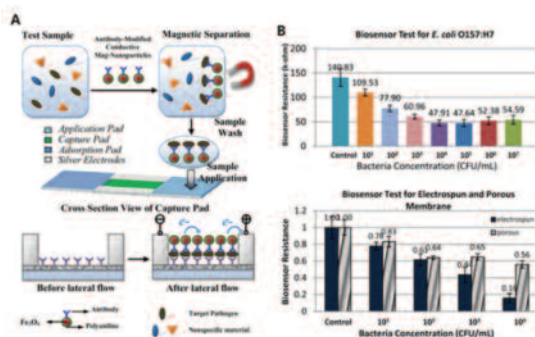


그림 10. (A) 산화철 나노입자를 이용한 표적균 분리 및 측방형 유동 스트립 기반 전기 측정 모식도 (B) 상기시스템의 O157 대장균 검출능력을 검증한 결과³³.

그래핀(graphenes)

그래핀은 탄소원자의 sp^2 혼성궤도로 이뤄진 육각형의 격자구조를 가진 2차원 물질로 1원자 층 두께(0.3 nm)를 가진다. 그래핀은 전기전도도가 매우 빠르고 3차원 물질인 실리콘 등과 달리 그래핀 표면에 생체 분자 흡착이 그래핀 특성에 미치는 영향이 크기 때문에 그래핀을 이용한 바이오센서 연구가 진행되고 있다. 먼저, 그래핀이 가지고 있는 우수한 전기적 특성은 전기적 측정법에 기반을 둔 센서 개발에 가장 많이 적용되고 있다. 예로써, 환원 그래핀 산화물(Reduced Graphene Sheet, RGS)과 키토산(chitosan, CS) 복합체로 전극위에 나노필름을 형성하고 그 위를 항 환원 세균(sulphate reducing bacteria, SRB)에 특이적인 항체로 기능화를 시켰다. 그리고 표적균인 SRB의 결합 여부 및 농도를 임피던스 분광법에 의해 검출을 하였으며 18 CFU/ml의 농도까지 검출능력을 보여주었다³⁵(그림 11). 또한, 전극위에 그래핀과 티로시나아제(tyrosinase)를 순차적으로 기능화하고 유기인계 제조제 성분을 전기화학적 측정법으로 검출한 결과가 보고되었다³⁶. 검출 원리는 반응용액에 함께 주입하는 카테콜(catechol)이 그래핀 위에 고정화된 티로시나아제에 의해 퀴논(quinone)으로 산화되게 되고 산화된 퀴논의 환원현상으로 전기화학적 신호가 감지되게 된다. 하지만 유기인계 제조제 성분이 존재하는 경우는 고정화된 티로시나아제의 활성이 저해되게 되고 전기화학적 신호가 감소하는 것을 모니터링 함으로써 0.2~3 ppb 수준의 농도까지 검출이 가능하였다.

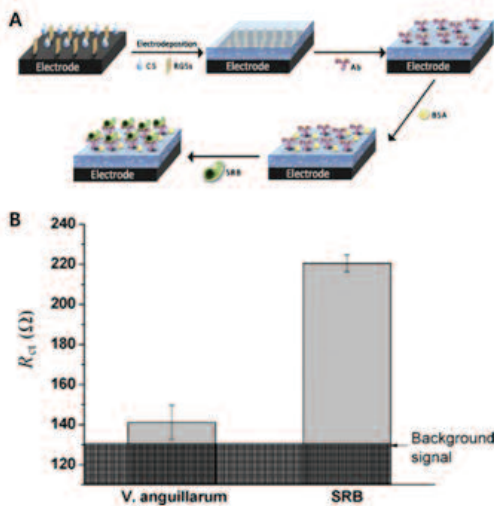


그림 11. (A) RGO sheet와 키토산 복합체 필름을 이용한 항체 고정화 및 SRB 검출 모식도 (B) 상기시스템의 선택적 검출능력을 검증한 결과³⁵

그래핀 기반의 광학적 바이오 센서는 전기화학적 발광법, 효소적 발광법, FRET(Fluorescence Resonance Energy Transfer) 등의 다양한 검출 시스템이 접목되어 연구되고 있다. 여기에서는 SERS(Surface Enhanced Raman Spectroscopy) 방식으로 식품에의 사용이 제한된 색소(colorant) 검출 연구를 소개하고자 한다. SERS 방식으로 표적 물질을 검출하기 위해서 은나노입자를 산화 그래핀 표면에 화학적 환원 과정으로 형성시킨다. 은나노입자 표면에 형성된 그래핀에 각기 다른 색소를 노출시키게 되면 색소와 그래핀간의 강한 상호작용으로 색소가 그래핀 표면에 흡착되게 되고 흡착된 색소로 인해 SERS 측정에 따른 peak의 양상이 달라지게 된다. 그를 통해 색소의 농도 및 성분을 구분할 수 있는 시스템을 보고 하였다³⁷(그림 12).

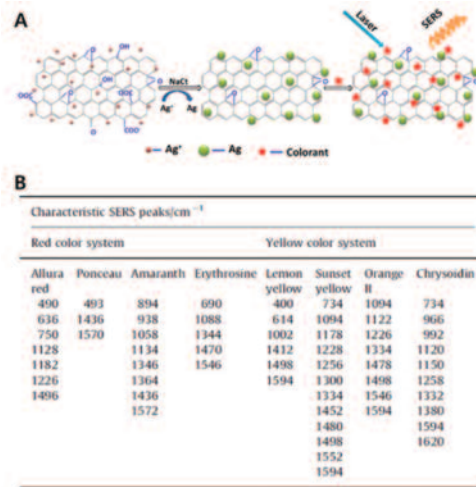


그림 12. (A) RGO sheet와 키토산 복합체 필름을 이용한 항체 고정화 및 SRB 검출 모식도 (B) 상기시스템의 선택적 검출능력을 검증한 결과³⁷

나노다공막(nanoporous membrane)

나노다공막을 이용한 식품 위해물질 및 병원성균 검출 연구는 주로 양극산화알루미늄(anodized aluminum oxide, AAO)을 사용하여 연구가 진행되었다. 산화알루미늄 나노다공막(AAO membrane, 이하 AAO 막)은 산화조건에 따라 나노포어의 크기 조절이 용이하고 대량생산이 가능한 장점이 있다. AAO 막을 이용한 센서 개발연구는 주로 전기화학적 임피던스 분광(electrochemical impedance spectroscopy)을 이용하여 병원성균 검출이 진행되었다. 병원성균을 검출하기 위해서 특이적인 항체를 AAO 막에 기능화를 시키고 음극과 양극 전극 사이에 항체로 기능화된 AAO 막을 위치시킨다. 그리고 병원성균 결합 전후의 변화된 임피던스 값을 측정하여 O157 대장균 및 황색포도상구균(*Staphylococcus aureus*)을 10^2 CFU/ml까지 정량적으로 검출이 가능함을 보고하였다³⁸. 최근에는 AAO 막 기반 센서의 검출 민감도를 향상시키기 위해서, 면역자성입자(immuno magnetic particle)를 이용하여 표적균인 O157 대장균을 농축시키고 그를 통해 검출 민감도를 10 CFU/ml까지 향상시킬 수 있었다³⁹. 그리고 AAO 막 표면을 히알루론산(hyaluronic acid, HA) 코팅을 통해 비특이적 흡착을 저해하고 고정화된 항체의 항원결합력을 증진시키는 방법을 통해 O157 대장균의 검출민감도를 우유 샘플에서 83 CFU/ml까지 향상시켰다⁴⁰(그림 13). 그 밖에도, 표면 탄성파(surface acoustic wave, SAW) 분석을 통해 AAO 막에 흡착된 암모니아 기체의 농도를 짧은 시간(~30초)안에 측정하는 기술이 보고된 바 있다⁴¹. 단 시간에 극도로 민감한 검출결과를 얻을 수 있었던 요인은 큰 표면적을 갖는 AAO 막 나노포어 내벽에 암모니아 기체가 흡착되기 때문인 것으로 보인다.

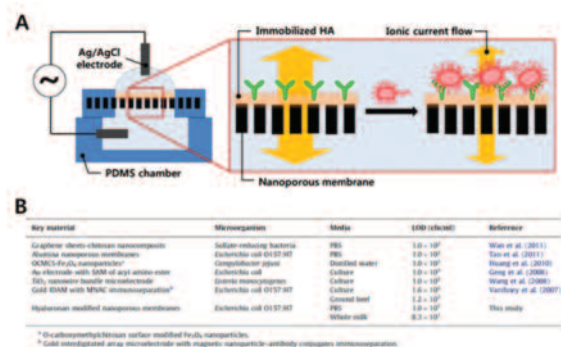


그림 13. (A) 히알루론산(HA)가 코팅된 AAO 막을 이용한 병원성균 검출 모드 (B) 상기시스템의 검출 한계를 보고된 다른 연구결과와 비교한 표⁴⁰



양자점(quantum dot)

양자점은 카드뮴 셀레나이드(CdSe)와 같은 반도체화합물 나노입자를 뜻하며, 일반적으로 빛을 흡수하여 발광하는 빛을 내는 특징을 가진다. 특히, 기존의 유기염료에서 나타나는 빛의 퇴행현상(photobleaching)이 현저히 줄어들었으며 방출하는 빛의 세기가 매우 크다는 장점이 있다. 따라서, 양자점을 바이오이미징 및 센서의 광학적 표지 물질로 사용한 연구가 활발히 진행되었으며 식품 위해요소 검출에 이용된 사례는 다음과 같다. 먼저, O157 대장균의 표적 염기서열(eaeA gene)과 상보적으로 결합하는 단일가닥 DNA를 각각 자성마이크로 입자와 양자점에 표지를 하고, 표적 DNA와 상보적 결합으로 발생한 자성마이크로입자-양자점 결합체의 형광 분석을 통해 병원성균 정량 검출을 보여주었다⁴². 이와 유사하게, 압타머가 기능화된 자성입자와 압타머가 기능화된 양자점을 이용한 샌드위치 결합방식으로 캄필로박터(Campylobacter)를 다양한 식품 시료로부터 10~250 CFU까지 검출한 결과가 보고되었다⁴³. 최근에는 polyamine이 기능화된 탄소양자점(carbon quantum dot)을 이용한 Cu^{2+} 검출 시스템이 개발되었는데, 이는 탄소양자점의 발광현상이 Cu^{2+} 의 선택적 표면 흡착에 의해 저해되는 현상에 의해 6 nM 수준까지 검출이 가능한 결과를 보여주었다⁴⁴(그림 14).

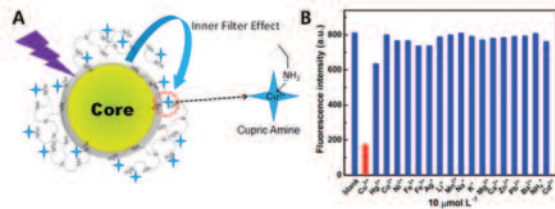


그림 14. (A) Polyamine이 코팅된 탄소양자점을 이용한 Cu^{2+} 검출 기작을 나타낸 모식도 (B) 제작된 탄소양자점 기반 센서 플랫폼의 Cu^{2+} 에 대한 선택적 검출 능력 검증 결과⁴⁴

또한, 카드뮴텔루라이드(CdTe)와 실리콘 양자점을 이용한 유기인계 제초제 성분의 발광 검출 기반 시스템이 각각 보고되었다^{45,46}. 특히, 유기인계 제초제를 검출하는 시스템에서는 아세틸콜린에스테라아제(acetylcholinesterase, AChE)의 활성이 제초제 성분에 의해 소실된다는 점을 활용하고 있다. 즉, 제초제 성분이 없는 경우에는, 아세틸콜린에스테라아제와 콜린옥시데이즈(Choline oxidase, ChOx)의 연속적인 반응에 의해 염화아세틸콜린으로부터 과산화수소가 형성되고 결과적으로 양자점의 발광이 소실되는 것이다. 하지만, 제초제 성분이 아세틸콜린에스테라아제의 활성을 억제하게 되면 일련의 반응이 일어나지 않고 과산화수소가 발생하지 않으므로 양자점의 발광은 유지되게 된다(그림 15). 따라서, 양자점은 앞으로도 식품 위해요소 바이오센서에서 광학적 요소의 표지인지 혹은 플랫폼으로 활용도가 높을 것으로 예상된다.

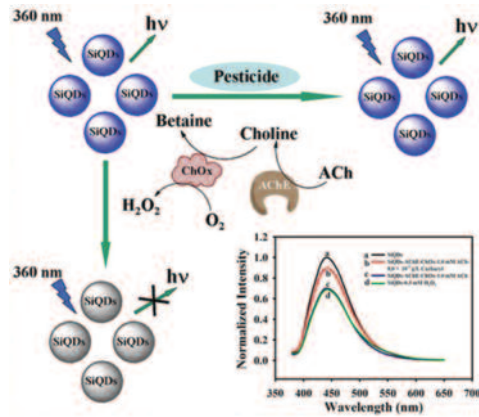


그림 15. 아세틸콜린에스테라아제(AChE) 및 콜린옥시데이즈(ChOx) 효소 연쇄 반응 시스템을 적용한 양자점 기반 유기인계 제초제 검출 시스템의 기작 모식도⁴⁶

폴리디아세틸렌(polydiacetylene, PDA)

PDA는 유용한 광학적 특성을 가진 공액고분자(conjugated polymer)로 비색 바이오센서 개발을 위한 기반 물질로 다양하게 이용되고 있다. PDA 단분자는 수용액에서 자가조립을 통해 쉽게 소포체(vesicle)를 형성할 수 있으며 추가적인 화학반응을 통해 표적 물질과 결합하는 탐침으로 표면을 기능화할 수 있다. 특히, PDA 소포체는 표면에 기능화된 탐침과 표적 물질간의 결합에 의한 물리적 스트레스로 인해 푸른색에서 붉은색으로 색전이가 유발되며 추가적인 표지 없이 정성 및 정량적 분석이 가능하다는 장점이 있다. 또한 붉은색의 PDA 소포체는 형광을 통해 추가적인 분석이 가능하다.

식품 안전을 위한 PDA 기반 바이오 센서 개발 사례는 다음과 같다. 먼저, GMO의 식품내 혼입방지 및 관련 규제에 의한 모니터링 수단으로 PDA 소포체 기반의 비색 센서 시스템이 개발되었다(그림 16). 특히, 항체로 기능화된 PDA 소포체를 이용한 제조제 저항성 GMO에서 발현되는 Phosphinothricin acetyltransferase(PAT)를 검출하기 위해서 실리카 비드 혹은 하이드로젤 비드 플랫폼을 이용하였다. 실리카 비드 및 하이드로젤 비드 플랫폼을 통해 표적 단백질 검출 민감도를 비교군 대비 향상시킬 수 있었으며 형광 검출을 통해 20 nM 수준까지 검출이 가능하였다⁴⁷. 또한, 항체로 기능화된 PDA 소포체를 이용하여 1 ng/ml의 미소시스틴-LR이 검출 가능한 시스템이 보고되었다⁴⁸. 그리고, 식중독을 유발하는 항색포도상구균과 대장균을 배양한 용액 상층액을 제조된 PDA 소포체와 반응시켜 유발되는 색전이 패턴을 통해 신규한 식중독균 동정 시스템을 개발되었다⁴⁹. 이와 같이 PDA 소포체를 이용한 검출 시스템들이 개발되었으며 추가적인 플랫폼을 이용하여 검출 강도를 증진시키거나 붉은색으로 전이된 형광 강도를 분석함으로써 검출 감도를 향상시킬 수 있었다.

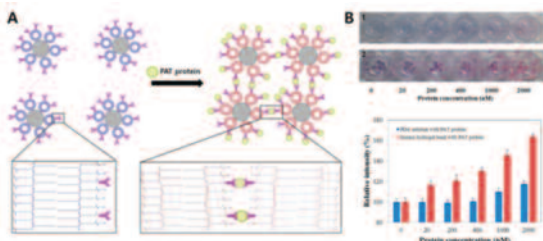


그림 16. (A) 마이크로 실리카 비드 플랫폼 기반의 PAT 단백질 검출용 PDA 센서의 작동 모식도 (B) 하이드로젤 비드 플랫폼에 도입된 PDA 소포체를 이용한 PAT 단백질 검출 결과 및 형광 강도 측정 결과⁴⁷

단백질 나노포어(protein nanopore)

단백질 나노포어는 단일 분자들을 검출 및 분석하기 위한 바이오센서 등에 사용되며 수 나노미터 크기의 구멍을 갖는다. 그 중에서도 α -hemolysin(α -HL)을 이용한 연구가 가장 활발하게 이뤄졌다. 분석방법은 매우 단순한데, α -HL을 인지질막에 재건을 하고 인지질막의 양단에 전위차를 주게 되면 α -HL 나노포어를 통해 이온이 이동하게 된다. 이온의 형태로 흐르는 전류량을 측정 시 DNA와 같은 분자들이 나노포어를 지나갈 때 발생하는 일시적인 전류 감소 현상을 관찰함으로써 단분자의 검출 및 분석이 가능하다. 최근에는 신경독소인 Hg²⁺를 α -HL을 이용해 검출한 연구결과가 보고되었다⁵⁰. 단백질 나노포어를 이용해 Hg²⁺를 검출하기 위해서 단일가닥 DNA를 표지물질로 사용하였다. 특히, 사용된 단일가닥 DNA는 강한 음전하를 가지고 있기 때문에 반대 전위를 가지는 방향으로 이동하게 된다. 이때, Hg²⁺와 결합하여 헤어핀(hairpin) 구조를 이루게 되면 동일한 길이의 단일가닥 DNA라 하더라도 나노포어를 통과하기 위해서는 더 긴 시간이 소요된다. 즉, 표적 물질과의 결합으로 형성된 단일가닥 DNA의 2차구조로 인한 나노포어 통과 시간 및 전류 감소량 차이를 확인함으로써 7 nM의 농도까지 분석이 가능함을 보여주었다(그림 17). 단백질 나노포어를 이용한 식품 위해물질 분석은 Hg²⁺와 같은 이온 혹은 저분자 수준에서의 검출이 용이할 것이라 예상된다.

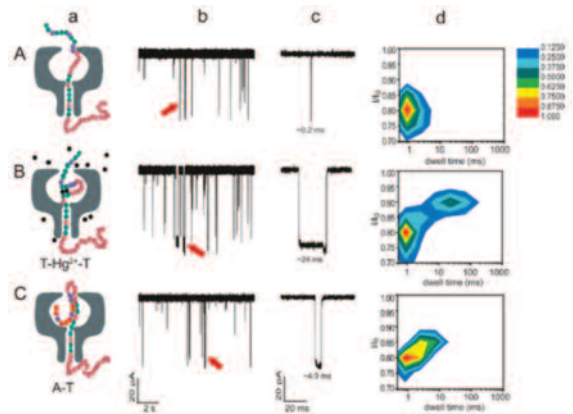


그림 17. (A) 단일가닥 DNA, (B) 단일가닥 DNA-Hg²⁺ 결합체에 의한 hairpin (C) 상보적 A-T 염기서열에 의한 hairpin 구조에 의한 모식도 및 실험 결과; (a) 단일가닥 DNA의 α -HL 나노포어 통과를 나타낸 모식도, (b) 전류측정 결과, (c) 단일 검출 신호 (d) 검출 신호의 전류 감소율 및 통과시간에 대한 이차원적 분산도⁵⁰

압타머(aptamers)

압타머는 펩타이드, 단백질 및 저분자의 유기물과 같은 다양한 표적물질에 선택적으로 결합을 하는 특징을 가진 단일가닥 핵산(DNA 또는 RNA 등)을 지칭한다. 특히, 표적물질에 높은 친화성과 특이성을 갖는 압타머를 선별하는 과정은 SELEX(Systematic Evolution of Ligands by Exponential enrichment)라고 알려진 발굴 기술을 통해 이뤄진다. 표적물질과의 높은 친화성으로 인해 단일 항체(monoclonal antibody)와 비교되는 압타머는 화학적 항체(chemical antibody)라고 불리기도 한다. 특히, 압타머는 항체에 비해 열적, 화학적 안정성이 뛰어나다는 장점이 있다. 식품 위해물질 및 병원성균 검출 센서개발에서 압타머는 표적물질을 감지하는 탐침으로 이용되고 있다. 그 예로는, 전도성 고분자가 코팅된 금나노입자 표면에 카나마이신에 특이적인 압타머를 기능화 시키고 전압전류측정법(voltammetric method)을 통해 카나마이신을 정량적으로 검출한 결과가 있다. 특히, 실제 유류 시료로부터 11 nM 수준까지 검출이 가능함을 보여주었다⁵¹(그림 18). 그리고, 압타머가 기능화된 자성입자와 압타머가 기능화된 양자점을 이용한 샌드위치 결합방식으로 캄필로박터를 다양한 식품 시료로부터 10~250 CFU까지 검출하였다. 압타머는 표적균의 표면에 존재하는 단백질을 인지하여 선택적으로 결합하고 이와 연동하여 사용된 양자점을 통해 형광측정 방식으로 정량적 검출을 시도하였다. 다른 균들과의 교차 반응 검증에서도 선택적으로 캄필로박터균들에 높은 반응성을 나타냄을 확인하였다⁴³(그림 19). 또한, 음전하를 띠는 압타머와 양전하를 띠는 금나노입자간 정전기적 상호작용으로 응집체가 형성될 수 있는데, 압타머의 표적인 테트라사이클린이 존재하는 경우 금나노입자와의 상호작용이 저해되어 금나노입자의 분산도가 유지되는 현상으로 테트라사이클린을 비색 분석을 통해 검출한 연구가 보고되었다⁵². 앞으로도 압타머는 표적 물질을 인식하는 탐침으로 식품 위해요소를 검출하는 다양한 시스템에 적용될 수 있을 것이라 예상된다.

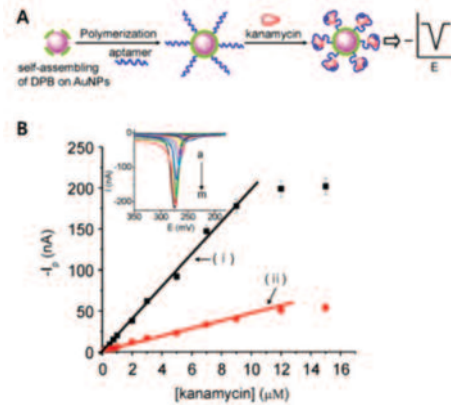


그림 18. (A) 압타머를 이용한 카나마이신 검출 시스템 모식도 및 (B) 카나마이신 농도에 따른 LSV(Linear Sweep Voltammetry) 측정 결과⁵¹

Species	Sample	% Cross-Reactivity
<i>Campylobacter jejuni</i>	live	100%
<i>Campylobacter coli</i>	live	70%
<i>Campylobacter lari</i>	live	57%
<i>Escherichia coli</i> 8739 (Crooks)	live	4.9%
<i>Escherichia coli</i> 0157:H7	live	14.2%
<i>Enterococcus faecalis</i>	live	4.7%
<i>Listeria monocytogene</i>	heat-killed	7.9%
<i>Salmonella typhimurium</i>	heat-killed	5.3%

$$\% \text{Cross-reactivity} = \frac{(\text{Peak fluorescence of target bacteria} / A_{625nm})}{(\text{Peak fluorescence } C. \text{ jejuni} / A_{625nm})} \times 100$$

그림 19. 캄필로박터균 검출을 위한 압타머-자성입자 및 압타머-양자점의 교차 반응 검증 결과⁴³

신속 PCR 기술 및 랩온어칩 기술

핵산 증폭 기술은 분자생물학과 재조합 DNA 기술에 있어서 가장 유용하게 사용되는 기술이며 또한 생물학적 검출법으로 잘 확립이 되어 왔다. PCR 기술을 이용한 DNA 증폭은 유전자 조작 및 감염형 질병의 확인과 같은 목적으로 활용되고 있다. 더불어, 핵산 증폭 기술은 박테리아 및 바이러스의 검출에 있어서 높은 특이성과 선택성을 제공하기 때문에 병원성균 검출에 있어서 강력한 기술로 이용되고 있다. 또한, RCA(Rolling Circle Amplification), LCR(Ligase Chain Reaction), NASBA(Nucleic Acid Sequence Based Amplification)와 LAMP(Loop-mediated Isothermal Amplification) 등의 PCR 기술이 발전함에 따라 다양한 진단이 가능해졌다. 신속 PCR 기술은 상기 개발된 기술들과 함께 PCR 수행을 위한 denaturation, annealing, extension 단계별 열적 순환(thermal cycling)에 걸리는 시간을 단축시켜 PCR이 완료되는데 소요되는 시간을 줄이려는 연구들이 진행되어 왔다. 소형화된 핵산 증폭기술 개발을 통해 열적 순환에 걸리는 시간을 최소화할 수 있으며 이는 Lab-on-a-Chip 기술과의 융합을 통해 극복할 수 있다. 예를 들어, 미세유체 칩(microfluidic chip) 내부에 주입된 소량의 PCR 샘플이 각각 다른 온도로 설정되어 있는 구역으로 순환적으로 이동하는 방법으로, 최근에는 폐쇄 루프(closed loop)내에 존재하는 PCR 샘플이 온도가 다른 구역으로 이동하는 신속 PCR 기술이 개발되었다(그림 20). 연구를 통해 9 μ l의 PCR 반응 용액을 폐쇄 루프 안을 순환시키며 130 bp DNA를 12분 안에 증폭하였으며 증폭된 핵산을 전기영동을 통해 확인하였다⁵³. 이런 기술과 더불어, 최근에는 등온핵산 증폭기술과 더욱 발전된 Lab-on-a-Chip기술을 융합시켜 칩상에서 핵산을 분리 및 농축하고 등온핵산 증폭 반응을 통해 샘플로부터 표적 핵산을 검증하는 기술까지 개발되었다. 앞으로도 이런 기술들의 융합을 통해 미량의 시료로부터 신속하게 병원성균을 검출할 수 있는 시스템이 개발될 수 있을 것이라 기대된다.

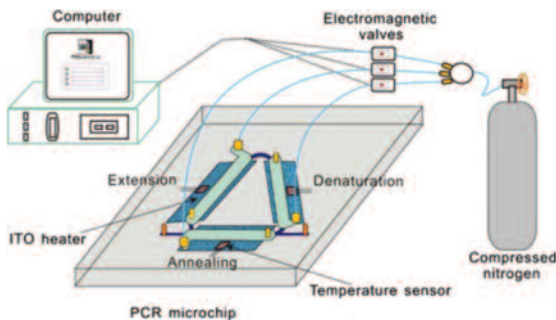


그림 20. 미세유체 칩 기반의 폐쇄 루프를 이용한 신속 PCR 칩의 모식도⁵³

식품포장적용 나노기술

현재 나노소재가 적용된 식품포장기술은 식품분야에 이미 어느 정도 정착이 되었고 빠른 속도로 개발이 진행이 되고 있는 대표적인 나노기술이라 할 수 있다. 특정 나노재료를 도입함으로써 기존의 고분자기반의 포장재료들이 가지고 있는 한계를 넘어서, 식품의 신선도나 색깔, 그리고 향미 등 보관시간에 따른 품질의 변화를 최소화시킬 수 있게 되었다. 나노소재가 포함된 병이나 필름과 같은 포장소재들은 기존의 소재와 비교했을 때 가스차단력이나 물리적 강도 그리고 열에 대한 안전성에 있어서 우수한 특성을 보이고 있다. 또한 소량의 나노물질을 첨가함으로써 이와 같은 특성을 얻을 수 있기 때문에 병이나 포장에 가지고 있는 고유의 색깔이나 투명도에 영향을 미치지 않는다. 예를 들어, 나일론에 2%의 나노무기충진제를 첨가하여 만든 나일론 층상실리케이트 나노복합체(nylon layered silicate nanocomposites)는 인장강도가 두 배나 향상되었고 열변형 온도가 나일론보다 100℃ 정도 더 증가함으로써 고온환경에서의 응용이 가능하게 되었다⁵⁴. 층상실리케이트(layered silicate)는 점토의 구성성분이기 때문에 나노구조 특성을 가지고 있는 아주 경제적인 재료이다. 포장재용 나노복합재료는 고분자를 나노충진제와 섞어준 후 고온에서 압출성형을 하게 되면 고분자가 층상구조의 실리케이트 사이에 삽입되어 고분자와 무기물층이 교차되는(intercalated hybrids) 다층 나노구조, 또는 실리케이트가 단층으로 벗겨지면서 고분자 매트릭스 상으로 불규칙하게 분산되는(exfoliated) 구조가 만들어지게 된다. 그림 21에서 보여 주듯이 고분자 매트릭스에 판상형태의 나노실리케이트를 첨가하여 복합체를 제작하게 되면 가스의 투과경로가 길어지기 때문에 가스차단력이 증가하게 된다. 이러한 나노복합소재는 나노충진제의 크기가 나노미터 수준이기 때문에 포장재의 투명도에 영향을 미치지 않는 장점을 가지고 있다.

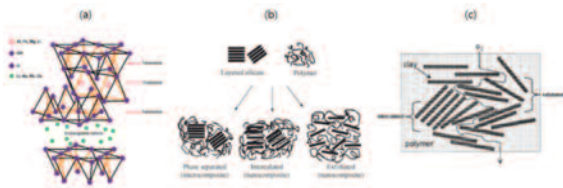


그림 21. (a) 2:1 층상실리케이트의 일종인 디옥타헤드럴 녹점토(dioctahedral smectite)의 결정구조⁵⁵. (b) 고분자와 층상실리케이트의 혼합으로 형성된 다양한 형태의 나노복합체⁵⁶. (c) 층상실리케이트 나노복합체로 형성된 막을 통과하기 위해 산소가 지나가야 하는 경로가 길어지는 현상을 보여주는 개념도⁵⁷

금속 나노입자 또한 식품포장재의 물리적 강도와 차단능력의 향상, 항균특성 부여, 그리고 포장재와 내용물의 광퇴화(photodegradation)를 줄이는 목적으로 적용이 되고 있다. 은나노입자는 항균특성으로 인해 식품포장재에 가장 널리 사용이 되고 있다. 구리, 아연, 티타늄 나노입자 또한 항균특성을 가지고 있기 때문에 연구개발이 활발하게 진행이 되고 있다. 산화티타늄 나노입자는 또한 마모에 대한 저항성과 UV 차단능력이 뛰어나기 때문에 포장재 첨가소재로 많은 관심을 받고 있다⁵⁸.

이러한 장점들로 인해 나노물질이 첨가된 포장재는 가공육, 치즈, 제과, 시리얼, 레토르트제품, 과일주스, 유가공품 등에 적용이 될 것으로 전망이 된다. 특히 고분자-층상 나노실리케이트 복합체는 현재 가장 널리 사용이 되고 있는 나노포장 소재이며 나노실리케이트와 복합체를 형성하는 고분자 물질로는 폴리아미드(polyamide), 나일론(nylons), 폴리올레핀(polyolefins), 폴리스티렌(polystyrene), 에틸렌-비닐아세테이트(ethylene-vinylacetate) 공중합체, 에폭시 레진(epoxy resins), 폴리우레탄(polyurethane), 폴리아미드(polyimides) 그리고 폴리에틸렌 테레프탈레이트(polyethylene terephthalate, PET) 등이 있다. Nanocor社에서는 나노실리케이트 복합체를 이용하여 산소의 유입을 막고 이산화탄소의 유출을 최소화 하는 Imperm® 제품을 시판하고 있다. Honeywell社의 Aegis®OX 제품은 PET 병에 가스차단특성이 뛰어난 나노점도 복합체 레진을 적용하여 가스 차단특성을 증진하였으며 맥주나 주스용기에 적용을 하고 있다. 이러한 제품들은 미국의 Miller Brewery社와 한국의 하이트진로社에서 맥주병에 도입을 하여 시판을 하고 있다.

기타 나노기술이 적용된 식품 현황

최근 식품분야에의 적용이 시도되고 있는 나노기술들은 제약 (pharmaceutical), 화장품(cosmetics) 그리고 건강기능성제제 (nutraceutical)에 적용이 되고 있는 기술들과 기반을 같이 하고 있다. 특히 분자수준에서 생체와 작용을 한다는 측면에서 식품과, 약품 그리고 화장품의 경계는 점점 더 모호해 질 것으로 예상된다. 현재 활발히 진행이 되고 있는 개발분야는 특정식품성분이나 영양성분의 나노제형화이다. 나노에멀전(nanoemulsion), 미셀(micelle), 에멀전이중막(emulsion bilayer), 역미셀(reverse micelle) 등이 이에 포함된다. 이러한 나노소재는 적용된 식품의 맛과 물성 그리고 품질의 일관성을 유지시켜주는 것으로 보고되었다. 예를 들어 나노제형화된 지방을 함유하고 있는 마요네즈, 스프레드(spreads), 아이스크림 등은 기존제품에 비해 적은 양의 지방을 함유하고 있음에도 동일한 맛과 식감을 가지고 있어 건강을 위해 저지방제품을 찾는 소비자들에게 적절한 대용품으로 시판되고 있다. 그뿐 아니라 다수의 건강기능성제제 및 영양강화성분 등의 전달체로 나노미셀, 나노자기조립액체구조(nano-sized self-assembled liquid structure, NSSL), 나노코클리에이트(nanocochleate) 등이 사용되고 있다. 최근에는 우유단백질인 알파 락트알부민(alpha-lactalbumin)이 나노튜브 형태로 자기조립되는 현상을 발견하였고 이를 영양성분이나 약성분의 전달체로 개발하는 연구가 진행되고 있다⁵⁹.

건강식품으로 알려져 있는 참치유(tuna fish oil)는 비린내로 인해 가공식품에 적용이 어려웠지만 호주의 George Weston Food 社에서는 참치유의 비린내를 마스크(masking)할 수 있는 마이크로캡슐화 기술을 개발하여 'Tip Top-up'이라는 브랜드의 빵에 첨가하여 시판을 하고 있다. 마이크로캡슐 기술은 건강에 유익한 프로바이오틱 미생물을 장에 살아있는 형태로 전달하는 전달체에도 적용되고 있다. 이러한 나노/마이크로 제형화 기술은 유용성분이 가지고 있는 원치 않는 특성을 마스크하거나 소화기관의 특정한 위치에서의 방출특성 조절, 그리고 첨가물의 분산성이나 용해도를 증진시키는 목적으로 개발이 되고 있는 추세이다. 토마토 카로테노이드(carotenoids)나 리코펜(lycopene)과 같은 기능성 성분들 또한 용해도와 분산성이 뛰어난 나노입자 형태로 제형이 되어 음료수나 기타 가공식품에 첨가하여 식품이나 음료의 색과 건강기능성을 부여하는 용도로 사용될 수 있다. 무기물의 경우 수분이나 산소의 차단특성이 있기 때문에 식품의 코팅용도로 응용이 되고 있다. 이산화규소(SiO₂), 이산화티타늄(TiO₂), 산화마그네슘(MgO) 나노입자는 식품의 표면을 50 나노미터 두께로 코팅을 하여 초콜렛과 같은 제품에 있어 공기나 수분에 대한 차단 특성을 부여하며 또한 외부충격으로부터 제품의 형태를 보호해주는 역할을 한다. 미국 Mars社의 M&Ms 초콜렛 등은 이러한 나노입자코팅기술을 이용하여 초콜렛 제품의 강도를 높이고 초콜렛이 수분이나 체온에 의해 녹녹해 지는 문제를 개선할 수 있었다. 또한 이산화규소나 이산화티타늄 나노입자는 식품용 분말소재의 색을 선명하게 해 주며 가공과정 중 분말재료의 유동특성을 증진시켜주거나 수분으로 인한 뭉침현상을 저해하는 고결방지제의 목적으로도 사용이 되고 있다.

식품에 적용된 나노물질의 안전성 이슈

식품용 나노물질은 이들이 적용된 식품 또는 음료 등의 섭취로 위장관을 통해 체내 흡수될 수 있다. 나노물질의 경우 마이크로 크기 물질에 비해 입자 크기가 작으므로 부피 대비 표면적 비율이 크게 되어 기존의 마이크로 크기 물질과는 전혀 다른 물리화학적 특성을 보유하게 된다. 즉, 나노물질은 우수하고 빠른 물리적, 화학적 및 생물학적 반응성을 보유하는데, 이와 같은 특성으로 인한 나노물질의 안전성에 대한 우려가 제시되고 있다. 그러나 아직까지 나노물질의 독성 연구는 주로 제조된 물질의 흡입독성이나 의학적 응용을 고려한 주사제로써의 독성에 치중되어 왔고, 식품관점에서의 위장관 섭취에 의한 나노물질의 독성에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 실질적으로 식품으로 섭취 시 위장관을 통한 나노물질의 흡수에 대해서는 아직까지 정확히 알려지지 않았다. 아울러 식품용 나노물질의 위장관 흡수로 인해 나노물질의 생체이용률이 향상되는지에 대한 연구와 이로 인한 독성과의 상관관계에 대한 연구도 활발히 진행이 되고 있다.

기존에 식품용으로 사용되고 있는 생체 친화적 혹은 생분해성 물질과 동일 성분으로 식품용 나노물질을 제조하였을 경우 안전성을 문제시하지 않는다. 식품 중에는 천연적으로 존재하는 나노구조의 물질을 포함하는 경우가 있는데, 우유의 주요 구성성분인 카제인 미셀(casein micelles), 유청단백질(whey proteins) 및 유당(lactose) 등은 0.5-300 nm 크기 범위의 나노 구조 물질에 해당된다⁶⁰. 고기나 생선의 근육구조 또한 고도로 조직화된 나노 복합체라고 할 수 있다. 이렇듯 자연에 존재하는 나노구조 물질은 GRAS(generally recognized as safe) 물질로서 독성 평가 대상에서 제외된다⁶¹. 그러나 제조된 나노물질(engineered nanomaterials)이 의도적으로 첨가된 경우, 특히 무기 나노소재를 식품용으로 첨가하고자 할 경우에는 독성에 대한 검증이 필요하다. 그러나 식품 분야에서 나노물질의 dose-response 관계, 인체 노출평가 등에 대한 데이터가 충분치 않기 때문에 식품용 나노물질의 인체 장기 노출에 대한 독성평가, 나노물질의 생체 내 거동, 식품성분과의 상호작용, 식품포장 및 용기에 적용된 나노물질의 용출에 따른 인체 유해성, 체내에서의 특성 규명 그리고 식품용 나노물질의 표시기준 등이 확립될 필요가 있다.

식품용 나노물질의 위장관 흡수

식품용 나노물질의 안전성 이슈는 식품용 나노물질로 섭취 후 위장관으로부터의 투과성이 증가하여 인체에 유해한 효과를 초래할 수 있다는 불안감에 기인한다고 볼 수 있다. 실질적으로 위장관을 통한 나노물질의 흡수는 마이크로 물질에 비해 효율적인 것으로 보고된 바 있다⁶². 또한, 소장 표면의 1%에만 존재하는 페이 에르판(Peyer's patches)이 나노물질의 체내유입에 관여하는 것으로 보고되었다⁶³. 일반적인 생리 조건에서 소장 벽의 융합막(tight junction)의 크기가 0.3-1.0 nm인 점을 감안하면 나노물질의 파라셀룰러 이동(paracellular transport)을 통한 유입은 극히 적을 것으로 보여지나⁶⁴, 나노물질과 소장 상피세포와의 상호작용에 의해 이 경로를 통한 흡수 가능성도 배제할 수 없다. 한편, 이러한 결과들은 제한된 일부 물질을 사용해서 얻어진 결과이며 식품에 적용되는 모든 나노물질을 대표한다고 볼 수 없다. 소장 상피세포를 통한 나노물질의 흡수가 나노물질의 물리화학적 특성에 의존적인 것으로 알려져 있는데, 즉 표면전하, 소수성, 입자크기, 표면화학 등의 특성에 따라 달라질 수 있으므로 보다 다양한 식품용 나노물질을 이용한 위장관에서의 흡수 효율에 대해 연구할 필요성이 있다.

한편, 생체이용률 향상이 목적이 아닌 식품첨가제로써 특정한 용도의 목적으로 사용되고 있는 나노물질도 있으며, 나노물질이 이슈가 되기 이전부터 식품 제조 공정 상의 편의 및 관능 특성을 고려하여 나노크기로 제조되어 사용되어 왔다. 이산화티타늄의 경우 제과, 음료, 유제품 등에 발색제(color additive)로 사용되고 있는데, 이 물질의 사용에 대한 규제는 없다⁶⁵.

식품포장 및 용기로부터 나노물질 용출 가능성과 인체 유해성

최근 들어 나노물질을 식품용 포장재 또는 식품용기 등으로 적용 시 이들로부터 유리되어 인체에 유해한 효과를 초래할 수 있는지에 대한 관심이 급증하고 있다. 포장재 또는 용기에 특정 목적으로 첨가된 나노물질의 경우 직접적으로 식품과 접촉할 수 있고, 따라서 나노물질이 식품으로 유입될 가능성이 있다. 특히 포장 또는 용기에 적용된 나노물질은 대부분 금속성 무기나노물질로 이들이 저장기관 중 환경 변화, 미생물 오염 또는 식품과의 상호작용에 의해 이온으로 유리되어 용출될 가능성 또한 제기되고 있다. 실질적으로 다양한 금속이나 합금 성분들이 주변 환경으로부터 식품을 안전하게 분리하여 보관 및 저장하기 위한 목적으로 주방용품, 용기, 캔 및 호일 등에 오래전부터 사용되어 왔는데, 에폭시을 이용한 캔의 코팅(epoxy can coating)이나 고분자막(polymer layer)을 이용하여 금속 이온이 식품성분으로 유입되는 것을 방지하기 위한 가이드라인을 마련한 바 있다⁶⁶. 그러나 나노물질을 포장이나 용기 등에 적용하는 것에 대한 규제방안은 아직까지 마련되지 않았다.

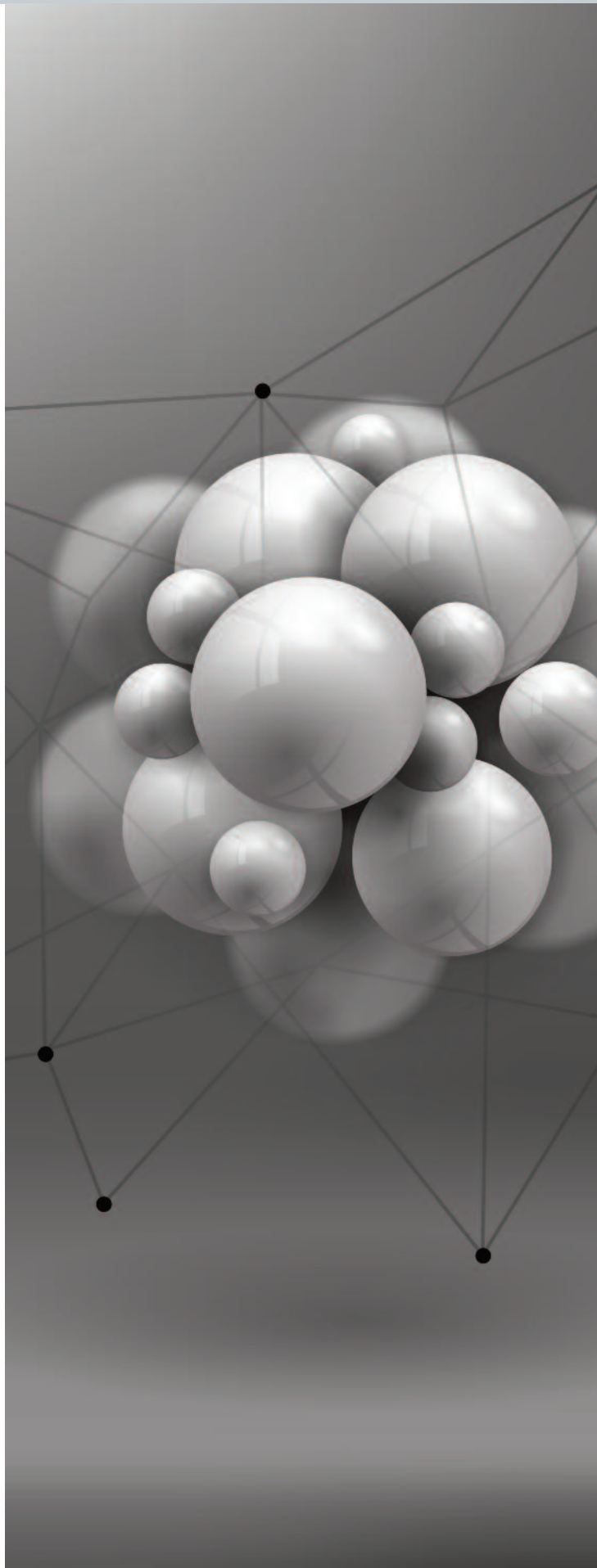
최근 연구에서는 은나노물질(silver nanoparticle)을 적용한 가정용 제품에서 은이온과 은나노물질의 용출이 확인된 바 있으며⁶⁷, 특히 환경조건에 따라 이온화가 용이한 은나노물질의 경우 사용에 대한 규제가 이루어지고 있다. 유럽 식품안전국(European Food Safety Authority)에서는 은-제올라이트(silver zeolites)를 식품과 직접 접촉하는 제품에 적용할 경우 유통기간 철저히 지킬 것을 권고하고 있으며, 식품 재료에서의 은이온의 농도를 생물학적으로 독성이 없는 수준인 식품 1킬로그램당 50마이크로그램($50\mu\text{g Ag}^+/\text{kg food}$) 이하로 강력하게 제한하고 있다⁶⁸. 미국 식약청(FDA)에서는 물병에 항균효과를 부여하기 위한 목적으로 은을 첨가하는 경우 킬로그램당 17마이크로그램($17\mu\text{g Ag}^+/\text{kg}$) 이하로 첨가하도록 규제하고 있다⁶⁹. 은나노 뿐만 아니라 식품용 포장 및 용기에 적용되고 있거나 적용 가능성이 있는 다른 나노물질의 용출과 이로 인한 식품성분으로의 유입, 이와 관련된 법적인 규제 방안 등에 대한 연구는 계속해서 이루어지고 있다.



결론

식품산업은 나노기술의 적절한 응용을 통해 안전하고 진보된 형태의 식품의 개발에 대한 기대를 키워가고 있다. 특히 식품안전은 기업의 손실을 예방하고 국민의 건강을 위한 국가적 차원의 과제이다. 나노기술에 있어서, 많은 사람들이 크기에 관심을 가지고 있고, 크기가 작아지는 것과 기술력을 동일선상에서 이해하려는 경향이 있다. 전자나 통신분야에 사용이 되고 있는 반도체나 기타 전자회로의 경우 크기를 줄이는 것은 기기의 소형화와 성능의 향상과 직결되지만, 이러한 개념이 식품 분야에도 동일하게 적용되는 것은 아니다. 식품에 있어서 중심적 역할을 하는 물질의 크기는 나노미터(nm)에서 밀리미터(mm)에 이르기까지 넓게 분포되어 있다. 중요한 것이 크기에만 국한되어 있는 것이 아니다. 추구하는 목적에 따라 나노미터, 마이크로미터 또는 밀리미터 스케일의 조화로운 협력이 필요하다. 특히 식품안전에 있어서 나노물질이 가지고 있는 우수한 특성으로 위해물질의 검출기술이 발전하였지만 대부분 시료전처리 과정이 간과된 순수한 형태의 위해물질을 검출하는 방식으로 개발이 진행되고 있다. 아무리 우수한 기술이라 하더라도 정작 우리가 섭취하는 실제 식품의 안전성을 모니터링하는데 적용할 수 없다면 그 기술은 완성된 기술이라 할 수 없다. 식품은 복잡한 매트릭스로 구성된 복잡물질이기 때문에 이를 분석에 필요한 형태로 바꾸어 주는 전처리기술이 필요하며 이를 위해서는 기존의 전처리 기술을 나노기술이 적용된 우수한 검출기술과 연동할 수 있는 형태로의 개발이 반드시 수반되어야 한다.

그리고 식품소재적인 측면에서 대부분 식품성분의 나노제형화 및 나노캡슐화에 관심을 집중하고 있고 분자레벨에서 식품구성 성분 분자의 조작을 통한 물성의 변화 및 유용성분 제작에 대한 개발 및 연구는 상대적으로 미미한 편이다. 식품소재 시장의 규모로 보았을 때 나노제형화 된 특정소재에 대한 수요보다는 대량으로 사용되는 가공식품소재에 대한 수요가 훨씬 크므로 소재에 대한 분자레벨에서의 특성을 이해하고 이를 나노미터 스케일에서 조작하여 새로운 이화학적 특성을 가지는 우수한 소재로의 개발에 대한 연구가 지속적으로 필요한 상황이다. 그리고 나노기술응용식품에 대한 소비자들이 가질 수 있는 막연한 불안감을 사전에 예방하기 위해 나노기술응용식품에 대한 명확한 정의를 확립하고 안전성에 대한 연구가 충분히 수반된 후 소비자들에게 나노기술응용식품에 대한 올바른 인식을 심어주기 위해 지속적인 소통노력이 필요하다.



Kim Young-rok



김영록 youngkim@khu.ac.kr

학력 · 코넬대학교(Ithaca, NY, USA) 식품공학과 (나노바이오공학) 박사
코넬대학교(Ithaca, NY, USA) 식품공학과 (식품미생물학) 석사
강원대학교 식품공학과 학사

경력 · 現 경희대학교 생명과학대학 식품생명공학과 교수
前 삼성종합기술원 바이오랩 책임연구원
前 하버드대학교 분자세포생물학과(Cambridge, MA, USA) 박사후 연구원

참고문헌

1. T. Heinze, *Nanotechnology Law & Business*, 2004, 1, 10.
2. StatNano News: <http://statnano.com/news/46534>.
3. N. Kumar, R. Seth and H. Kumar, *Analytical biochemistry* 2013, 456, 43–49.
4. L. Li, B. Li, D. Cheng and L. Mao, *Food Chemistry* 2010, 122, 895–900.
5. H. Kuang, W. Chen, W. Yan, L. Xu, Y. Zhu, L. Liu, H. Chu, C. Peng, L. Wang and N. A. Kotov, *Biosensors and Bioelectronics* 2011, 26, 2032–2037.
6. N. Kumar, R. Seth and H. Kumar, *Biosensors and Bioelectronics* 2010, 456, 43–49.
7. H. Li, J. Guo, H. Ping, L. Liu, M. Zhang, F. Guan, C. Sun and Q. Zhang, *Talanta* 2011, 87, 93–99.
8. T. A. S. Eldin, H. A. Elshoky and M. A. Ali, *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci* 2014, 3, 219–230.
9. S. Wang, A. K. Singh, D. Senapati, A. Neely, H. Yu and P. C. Ray, *Chemistry—A European Journal* 2010, 16, 5600–5606.
10. F. Wang, S. Liu, M. Lin, X. Chen, S. Lin, X. Du, H. Li, H. Ye, B. Qiu and Z. Lin, *Biosensors and Bioelectronics*, 2015.
11. W. Yang, J. J. Gooding, Z. He, Q. Li and G. Chen, *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 2007, 7, 712–716.
12. Q. Cao, H. Zhao, Y. He, X. Li, L. Zeng, N. Ding, J. Wang, J. Yang and G. Wang, *Biosensors and Bioelectronics* 2010, 25, 2680–2685.
13. P. Ni, H. Dai, Y. Wang, Y. Sun, Y. Shi, J. Hu and Z. Li, *Biosensors and Bioelectronics*, 2014, 60, 286–291.
14. S. Qiu, Z. Lin, Y. Zhou, D. Wang, L. Yuan, Y. Wei, T. Dai, L. Luo and G. Chen, *Analyst*, 2015.
15. O. R. Miranda, X. Li, L. Garcia-Gonzalez, Z.-J. Zhu, B. Yan, U. H. F. Bunz and V. M. Rotello, *Journal of the American Chemical Society* 2011, 133, 9650–9653.
16. J.-Y. Liao and H. Li, *Microchimica Acta* 2010, 171, 289–295.
17. S. Rong-Hwa, T. Shiao-Shek, C. Der-Jiang and H. Yao-Wen, *Food Chemistry* 2010, 118, 462–466.
18. D. P. Kalogianni, T. Koraki, T. K. Christopoulos and P. C. Ioannou, *Biosensors and Bioelectronics* 2006, 21, 1069–1076.
19. L. Wang, Q. Wei, C. Wu, Z. Hu, J. Ji and P. Wang, *Chinese Science Bulletin* 2008, 53, 1175–1184.
20. E. Valera, J. Ramón-Azcón, F. J. Sanchez, M. P. Marco and Á. Rodríguez, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2008, 134, 95–103; A. S. Afonso, B. Pérez-López, R. C. Faria, L. H. C. Mattoso, M. Hernández-Herrero, A. X. Roig-Sagués, M. Maltezda Costa and A. Merkoçi, *Biosensors and Bioelectronics* 2013, 40, 121–126; S. A. Vetrone, M. C. Huarng and E. C. Alocilja, *Sensors* 2012, 12, 10487–10499.
21. L. Zhou, D.-J. Li, L. Gai, J.-P. Wang and Y.-B. Li, *Sensors and Actuators B: Chemical* 2012, 162, 201–208.
22. G. Zhao, X. Zhan and W. Dou, *Analytical biochemistry*, 2011, 408, 53–58.
23. D. Tang, J. Tang, B. Su and G. Chen, *Journal of agricultural and food chemistry* 2010, 58, 10824–10830.
24. J. Zhao, Y. Zhang, K. Wu, J. Chen and Y. Zhou, *Food chemistry*, 2011, 128, 569–572; Y. Zhang, X. Zhang, X. Lu, J. Yang and K. Wu, *Food chemistry* 2010, 122, 909–913.
25. H. Yi, W. Qu and W. Huang, *Microchimica Acta* 2008, 160, 291–296.
26. V. A. Zamolo, G. Valenti, E. Venturelli, O. Chaloin, M. Marcaccio, S. Boscolo, V. Castagnola, S. Sosa, F. Berti and G. Fontanive, *ACS nano* 2012, 6, 7989–7997.
27. L.-q. Guo, N. Yin, D.-d. Nie, J.-r. Gan, M.-j. Li, F.-f. Fu and G.-n. Chen, *Analyst* 2011, 136, 1632–1636.
28. M. Yang, Y. Kostov, H. A. Bruck and A. Rasooly, *Analytical chemistry* 2008, 80, 8532–8537; M. Yang, S. Sun, Y. Kostov and A. Rasooly, *Lab on a Chip* 2010, 10, 1011–1017.
29. B. Peng, G. Li, D. Li, S. Dodson, Q. Zhang, J. Zhang, Y. H. Lee, H. V. Demir, X. Yi Ling and Q. Xiong, *ACS nano*, 2013, 7, 5993–6000.
30. H. Chu, Y. Huang and Y. Zhao, *Applied spectroscopy* 2008, 62, 922–931.
31. J. Fu, B. Park, G. Siragusa, L. Jones, R. Tripp, Y. Zhao and Y.-J. Cho, *Nanotechnology*, 2008, 19, 155502.
32. Y. Zhu, C. Qu, H. Kuang, L. Xu, L. Liu, Y. Hua, L. Wang and C. Xu, *Biosensors and Bioelectronics*, 2011, 26, 4387–4392.
33. Y. Luo, S. Nartker, M. Wiederoder, H. Miller, D. Hochhalter, L. T. Drzal and E. C. Alocilja, *Nanotechnology, IEEE Transactions on*, 2012, 11, 676–681.
34. S. P. Ravindranath, L. J. Mauer, C. Deb-Roy and J. Irudayaraj, *Analytical chemistry* 2009, 81, 2840–2846.
35. Y. Wan, Z. Lin, D. Zhang, Y. Wang and B. Hou, *Biosensors and Bioelectronics* 2011, 26, 1959–1964.
36. T. Liu, M. Xu, H. Yin, S. Ai, X. Qu and S. Zong, *Microchimica Acta* 2011, 175, 129–135.

-
37. Y. Xie, Y. Li, L. Niu, H. Wang, H. Qian and W. Yao, *Talanta*, 2012, 100, 32–37.
38. J. Yu, Z. Liu, Q. Liu, K. T. Yuen, A. F. T. Mak, M. Yang and P. Leung, *Sensors and Actuators A: Physical* 2009, 154, 288–294; F. Tan, P. H. M. Leung, Z.-b. Liu, Y. Zhang, L. Xiao, W. Ye, X. Zhang, L. Yi and M. Yang, *Sensors and Actuators B: Chemical* 2011, 159, 328–335.
39. K. Y. Chan, W. W. Ye, Y. Zhang, L. D. Xiao, P. H. M. Leung, Y. Li and M. Yang, *Biosensors and Bioelectronics* 2013, 41, 532–537.
40. C.-K. Joung, H.-N. Kim, M.-C. Lim, T.-J. Jeon, H.-Y. Kim and Y.-R. Kim, *Biosensors and Bioelectronics*, 2013, 44, 210–215.
41. O. K. Varghese, D. Gong, W. R. Dreschel, K. G. Ong and C. A. Grimes, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2003, 94, 27–35.
42. G.-Y. Kim and A. Son, *Analytica chimica acta* 2010, 677, 90–96.
43. J. G. Bruno, T. Phillips, M. P. Carrillo and R. Crowell, *Journal of Fluorescence*, 2009, 19, 427–435.
44. Y. Dong, R. Wang, G. Li, C. Chen, Y. Chi and G. Chen, *Analytical chemistry* 2012, 84, 6220–6224.
45. Z. Zheng, Y. Zhou, X. Li, S. Liu and Z. Tang, *Biosensors and Bioelectronics* 2011, 26, 3081–3085.
46. Y. Yi, G. Zhu, C. Liu, Y. Huang, Y. Zhang, H. Li, J. Zhao and S. Yao, *Analytical chemistry*, 2013, 85, 11464–11470.
47. M.-C. Lim, Y.-J. Shin, T.-J. Jeon, H.-Y. Kim and Y.-R. Kim, *Analytical and bioanalytical chemistry* 2011, 400, 777–785; S.-H. Jung, H. Jang, M.-C. Lim, J.-H. Kim, K.-S. Shin, S. M. Kim, H.-Y. Kim, Y.-R. Kim and T.-J. Jeon, *Analytical Chemistry* 2015.
48. Y. Xia, J. Deng and L. Jiang, *Sensors and Actuators B: Chemical* 2010, 145, 713–719.
49. A. C. dos Santos Pires, N. d. F. F. Soares, L. H. M. da Silva, M. d. C. H. da Silva, M. V. De Almeida, M. Le Hyaric, N. J. de Andrade, R. F. Soares, A. B. Mageste and S. G. Reis, *Sensors and Actuators B: Chemical* 2011, 153, 17–23.
50. S. Wen, T. Zeng, L. Liu, K. Zhao, Y. Zhao, X. Liu and H.-C. Wu, *Journal of the American Chemical Society*, 2011, 133, 18312–18317.
51. Y. Zhu, P. Chandra, K.-M. Song, C. Ban and Y.-B. Shim, *Biosensors and Bioelectronics*, 2012, 36, 29–34.
52. Y. Luo, J. Xu, Y. Li, H. Gao, J. Guo, F. Shen and C. Sun, *Food Control* 2015.
53. Z.-R. Xu, X. Wang, X.-F. Fan and J.-H. Wang, *Microchimica Acta* 2010, 168, 71–78.
54. E. P. Giannelis, *Advanced materials*, 1996, 8, 29–35; E. P. Giannelis, *Appl. Organometal. Chem.*, 1998, 12, 675–680.
55. G. Beyer, *Plastics, Additives and Compounding*, 2002, 4, 22–28.
56. M. Alexandre and P. Dubois, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2000, 28, 1–63.
57. J. C. Grunlan, A. Grigorian, C. B. Hamilton and A. R. Mehrabi, *Journal of Applied Polymer Science*, 2004, 93, 1102–1109.
58. A. Llorens, E. Lloret, P. A. Picouet, R. Trbojevich and A. Fernandez, *Trends in Food Science & Technology*, 2012, 24, 19–29.
59. J. F. Graveland-Bikker and C. G. de Kruif, *Trends in Food Science & Technology*, 2006, 17, 196–203.
60. d. K. G. Tuinier R, *J. Chem. Phys.*, 2002, 117, 1290–1295
61. B. A. Magnuson, T. S. Jonaitis and J. W. Card, *Journal of Food Science*, 2011, 76, R126–R133.
62. D. MP, L. V, A. GL and L. RJ, *Pharm Res*, 1996, 13, 1838–1845.
63. A. des Rieux, V. Fievez, M. Garinot, Y.-J. Schneider and V. Preat, *Journal of Controlled Release*, 2006, 116, 1–27.
64. A. des Rieux, V. Fievez, I. Theate, J. Mast, V. Preat and Y.-J. Schneider, *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2007, 30, 380–391.
65. Directive 94/36EC (1994). On colors for use in foodstuffs. Official Journal of the European Community, L237, 13e29, 10. 09. 94.
66. Draft Guidelines for Metals and Alloys and Alloys prepared by RD 4/1–48(Revision of Guidelines Dated 13.02.2002.
67. T. Benn, B. Cavanagh, K. Hristovski, J. D. Posner and P. Westerhoff, *Journal Environmental Quality*, 2010, 39, 1875e1882.
68. Opinion of the scientific panel on food additives, flavourings, processing aids and materials in contact with food (AFC) on a request from the Commission related to a 7th list of substances for food contact materials (Question N_EFSA-Q-2003-076, EFSA-Q-2004-144, EFSA-Q-2004-166, EFSA-Q-2004-082, EFSA-Q-2003-204, EFSA-Q-2003-205, EFSA-Q-2003-206). The EFSA Journal, 201, 1e28.
69. FDA Food Additive Regulations, 21 CFR Part 172 Food Additives Permitted for Direct Addition to Food for Human Consumption (2009)

국가 R&D 현황 분석

최근 3년간('11~'13년) 식품 나노기술과 관련된 연구개발사업을 분석함

과제 선별 기준

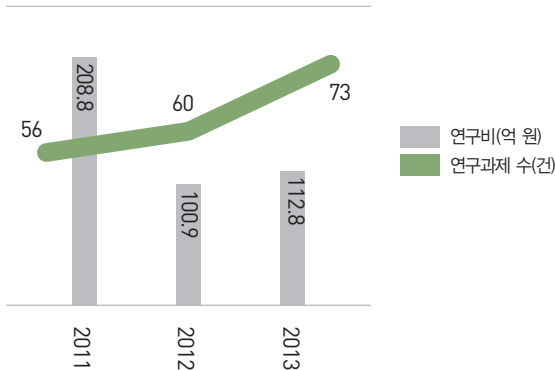
연구요약문 내 아래 키워드를 포함하고 있는 과제를 분석 대상 선정
 ((나노) and (식품)) or ((나노) and (작물))

분석결과 최근 3년간 총 189건의 과제에 422억원의 연구비가 투자됨

- '11년 나노기술과 식품분야에 대한 연구를 부가적으로 진행하던 사업들*이 '12년 이후로 이어지지 않으면서, '12년 연구비가 감소한 것으로 보이거나 연구과제 건수를 바탕으로 분석해 보면 연구 투자 비율은 미세하게나마 증가 추세에 있다고 볼 수 있음

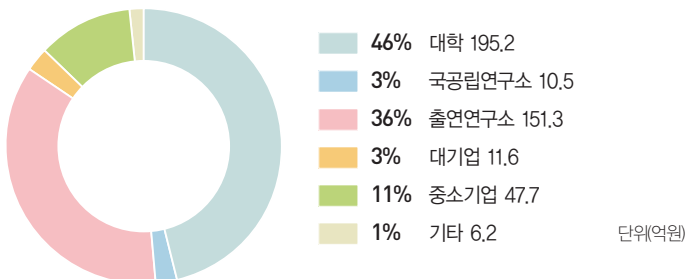
* 한국기초과학연구원 지원비(35억원), 차세대바이오그린21(16억원), 지역거점연구단육성사업(21억원) 등

연도별 연구비와 연구과제 건수



(연구수행주체) 대학이 116건으로 가장 많은 연구를 수행하고 있지만 연구비 규모면에서는 대학과 출연연이 각각 195억원과 151억원으로 비슷한 지원을 받아 연구를 수행함

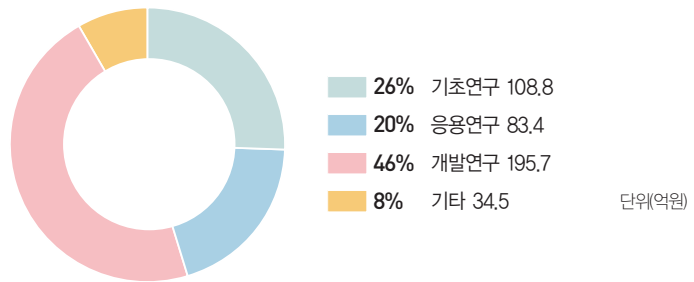
- 대기업(5건, 3%)과 중소기업(36건, 11%)에서도 연구가 이루어지고 있는 것으로 보아 상당 부분 활용적인 측면에서 연구가 이루어지고 있는 것을 알 수 있음



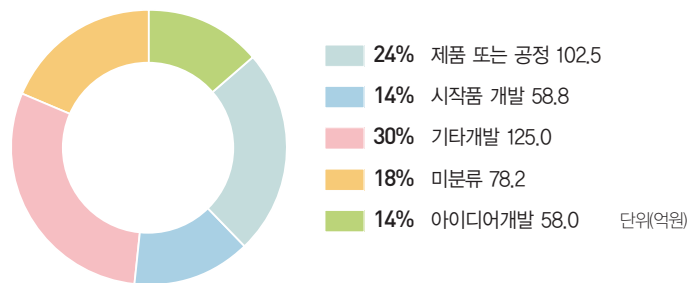
(연구수준) 연구개발단계, 연구개발성격, 기술수명주기를 분석한 결과 개발연구단계가 46%로 가장 많았으며, 연구개발 성격도 제품 또는 공정 연구가 24%, 기술수명주기도 성장기가 35%로 가장 많이 나타나 산업활용도가 높은 기술임

- 식품기술로서의 나노기술의 기초연구와 응용연구도 각각 26%, 20% 수준으로 이루어지고 있음
- 연구개발성격에서 아이디어 개발(14%), 제품 또는 공정(24%), 시작품개발(14%)이 전체의 50%가 넘는 것으로 보아 산업적 활용 가능성이 높음
- 기술수명주기적 측면에서도 도입기(24%)와 성장기(35%)의 비율이 높고 성숙기(6%)가 존재하는 것으로 보아 산업적으로 활용 가능성이 커지고 있음

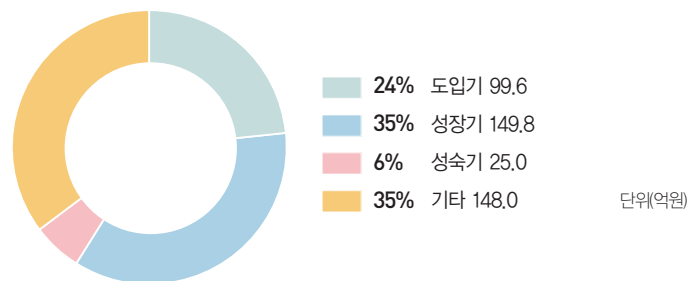
연구개발단계



연구개발성격



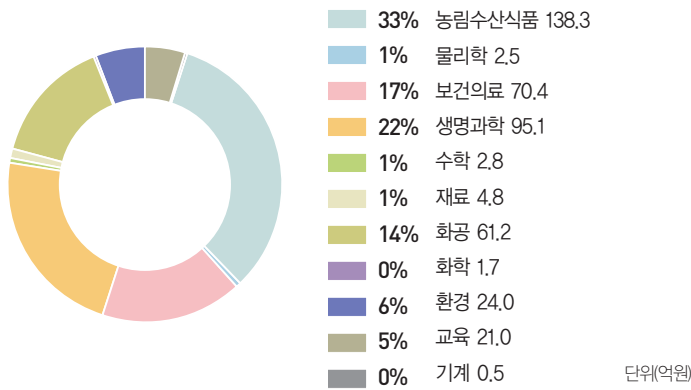
기술수명주기



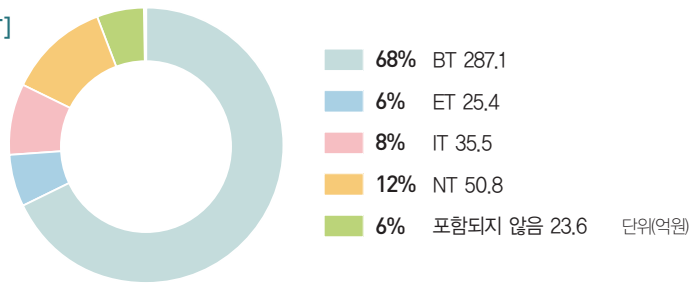
(연구분야) 국가과학기술표준분류와 미래유망 신기술분류(6T), 국가기술지도분류(NTRM)를 분석한 결과 농림수산식품과 생명과학, 보건의료 분야에서 주로 연구가 이루어지고 있음

- 식품과 관련된 나노기술인 만큼 농림수산식품(33%), 보건의료(17%), 생명과학(22%) 분야에서 대다수의 연구가 이루어지고 있음
- 6T 분석에서도 BT가 68%로 대다수를 차지하였으며, NT(12%), IT(8%), ET(6%)가 분석된 것은 나노기술 자체에 초점이 맞춰졌기 때문인 것을 확인할 수 있었음
- NTRM 분석 결과 포함되지 않음(41%)이거나 기타(8%)의 비율이 높아, 한가지 분야로 뚜렷한 적용한 분야가 나타나지 않았음
- * 식품기술의 특성을 고려하였을 때 어느 한 분야로 적용 분야를 한정하기 어렵고, 나노기술이 식품기술에 적용되었을 때 다양한 분야에서 활용될 수 있기 때문인 것으로 사료됨

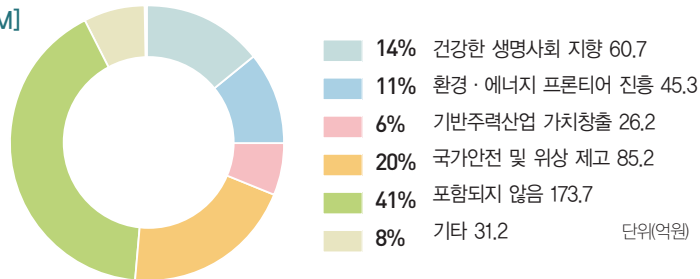
국가과학기술표준분류



미래유망 신기술분류[6T]



국가기술지도분류[NTRM]



INFORMATION,
PHYSICS, QUANTUM
-
FOOD
NANOTECHNOLOGY



새로운 50년, 미래를 향한 KIST의 도전

수월성 (Research Excellence)

미래 선도
“원천기술 확보”
경영체계 글로벌 스탠다드화

새로운 50년, 미래를 향한 KIST의 도전!

과학기술로 국민 모두가 행복해지는 대한민국을 만들기 위해 미래를 준비해가는 연구소입니다.

공공성 (Public Purpose)

국가/사회적 현안
“해결 기술 개발”
윤리/청렴 경영 문화 정착

개방성 (Open Innovation)

융합/협력
“개방형 플랫폼 구축”
소통/나눔/제도 인프라 구축

01 기초 · 미래선도 미래준비형 선도연구

미지 영역 도전을 통한 신성장동력 창출
고령화, 미래자원 부족 등 미래 문제 선제적 대응

02 공공 인프라 사회문제 해결형 융합연구

사회문제해결로 국민 행복, 삶의 질 향상 기여
개방형 R&D를 통해 3년 내 가시적 성과 창출

03 산업화 창조경제 지원형 상용화 연구

동방성장형 연구로 출연(연) 성과확산 모델 제시
KIST의 신기술창업 및 중소기업 지원

국가를 대표하는 융합연구 정책의 싱크탱크



융합연구정책센터는 국가 융합연구 정책 및 전략 방향 수립을 통하여 융합연구를 활성화하고
 융합연구 문화를 정착시키고자 설립되었습니다.
 창조경제를 견인하고 신산업 창출에 기여하기 위하여
 국가 융합연구 정책 및 전략 방향을 수립하는 융합연구의 싱크탱크가 되었습니다.



정부 융합연구 정책 지원

- 융합 정책 및 전략 수립
- 국가 융합기술발전 기본계획 / 시행계획 수립

융합연구 사업기획

- 융합기술 수준 / 성과 분석조사
- 융합기술 동향 분석
- 융합포럼 개최 및 지원
- 융합연구 신규 사업기획 및 지원



CRPC
 주요연구분야



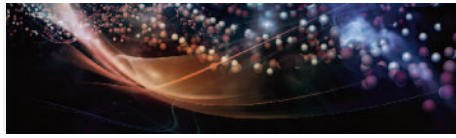
융합정보 분석 및 제공

- 융합기술 심층분석 제공
- 융합관련 정보의 허브 수행

네트워킹 구축 및 확산

- 융합 인력양성 및 교육 지원
- 국내 외 융합연구 협력 네트워크 구성





INFORMATION, PHYSICS, QUANTUM
-
FOOD NANOTECHNOLOGY