

나노기술과 식품안전

Nanotechnology in Food Safety

김 영 록
Young-Rok Kim

경희대학교 생명과학대학 식품공학과
Department of Food Science and Technology, Kyung Hee University

서 론

물질은 나노미터(10⁻⁹m) 스케일에서의 새로운 물리·화학적 특성을 나타내게 되고, 이러한 특성들을 잘 활용하여 기존에 구현하지 못했던 많은 기술적 성과들을 얻을 수 있게 되었다. 해마다 다량으로 쏟아져 나오는 나노과학 관련 학술논문이나 특허의 양은 다른 분야에서 유래를 찾아 보기 힘들고, 특히 최근 들어 바이오와의 융합으로 나노기술은 현대과학의 한 트렌드로 확고히 자리를 잡게 되었다. 하지만 나노기술에 대한 지나친 관심과 연구비의 편중으로 인해 ‘나노’라는 용어가 적절하지 않은 곳에까지 과도하게 사용되는 경향이 있고, 여기에 대해 학계 일부에서 우려의 목소리도 나오고 있다. 그럼에도 불구하고 나노기술이 지금까지의 그 어떤 기술보다도 우리 삶, 경제의 모든 부문에 큰 영향력을 발휘하게 될 것이라는 사실에 대해서는 넓은 공감대를 형성하고 있다. 현재 나노기술은 전자, 재료, 제약 및 생명과학 분야에 급속도로 응용의 폭을 넓혀가고 있고 앞으로 과학 대부분의 분야와 산업에 광범위하게 적용되어 미래 인간의 삶에 지대한 영향을 미칠 것으로 보여진다. 본 고에서는 식품산업, 특히 식품안전분야에 적용이 될 수 있는 나노기술에 대해 소개를 하고자 한다. 먼저 식품의 위생과 안전성을 실시간으로 현장에서 모니터링 할 수 있는 센

서기술과 식품의 안전성을 증진시켜주는 신개념의 포장기술, 그리고 오염을 방지하고 자체정화기능을 가진 표면처리기술에 대해 설명을 하고, 마지막으로 이러한 요소기술들이 융합된 총체적인 식품안전프로그램에 대한 제안으로 마무리를 하고자 한다.

식품안전 모니터링에 있어서의 나노기술

나노기술의 발전으로 인간이 만들 수 있는 구조의 크기는 점점 작아지고 있고, 극도로 미세한 생물학적 현상을 감지할 수 있는 시스템의 능력은 더욱 강력해졌다. 따라서 단 분자 수준에서의 결합과 반응 메커니즘을 연구할 수 있는 길이 열리게 되었고 이를 통해서 개개의 생물질(biomaterials)들의 구조와 기능을 이해할 수 있게 되었다. 이렇게 얻어진 정보는 더욱 진보된 형태의 기구를 디자인하는데 중요한 원동력이 되고 있다.

식품산업에서 나노기술이 빠른 속도로 적용되고 있는 곳은 식품안전분야로 병원성물질 및 오염물질을 검출하는 센서를 비롯해서 주변환경을 감지하거나 각 제품의 위치를 추적해서 기록하는 나노소자 등이 여기에 포함된다. 마이크로전자공학(Microelectronics)기술의 발전으로 센서의 사이즈나 기능이 향상되었을 뿐 아니라 생물시스템이 가지고 있는 고도의 선별력(speci-

Corresponding author: Young-Rok Kim, Department of Food Science and Technology, Kyung Hee University, Yongin 446-701, Korea
Tel: +82-31-201-3830
Fax: +82-31-204-8116
E-mail: youngkim@khu.ac.kr

ficity)을 도입하여 정확도 또한 높아졌다. 특히 사이즈가 작아지면서 현장에서의 테스트가 용이해졌고, 여기에서 한 걸음 더 나아가서 앞으로는 특정제품에 부착이 되어서 제품의 주위 환경이나 품질을 실시간으로 원격 모니터링 하여서 식품 제조에서 운송, 보관에 이르기까지 효율성과 안전성을 높여줄 것으로 예상된다.

생물체들은 주변환경을 감지하는 여러 가지 형태의 센서를 가지고 있다. 생물체들이 가지고 있는 아주 미세한 구조들과 물리·화학·전기적 반응들을 이용해 감지하고 신호를 전달하고 있으며 이들 구조의 크기는 나노(nano)에서 매크로(macro)까지 다양하게 존재한다. 이렇게 우수한 생물 구성성분을 나노기술과 접목시켜 센서를 만들려는 연구가 많은 관심속에서 진행되고 있으며 이로 인한 센서의 감도와 선별력에 혁신적인 향상이 예상되고 있다(1). 센서가 만들어지기 위해서는 먼저 주변환경이나 오염물질 또는 병원균을 인지할 수 있는 (생물)소재를 찾아야 하고 인식된 정보를 전달하는 시스템을 개발해야 한다. 그리고 무엇보다도 이러한 구성성분을 칩 위에 효율적으로 잘 집적하는 것이 중요하다. 탄소나노튜브(carbon nanotube), 나노와이어(nanowire), 나노입자(nano particle), 나노포어(nanopore)등이 가지고 있는 우수한 전기 광학적 특성은 센서의 중요한 요소로 개발되고 있으며 나노공정기술의 발달로 칩 위에 집적할 수 있는 능력은 점점 더 강력해지고 있다(1-5). 그림 1에서는 나노와이어의 우수한 전기적 민감도와 항체의 높은 선별력을 이용하여 제작한 바이러스 센서를 보여주고 있다.

식품에 존재하는 유해 병원균의 검출은 식품안전에 있어서 매우 중요하다. 검출 방법은 신속하고 감도가 높아야 하며 또한 정확해야 한다. 유해균의 검출에 있어서 또 하나의 과제는 특정한 식품에 있어서는 살아있는 병원균이 한마리도 허용되지 않는 '제로용인'(zero tolerance)기준을 충족 하여야 한다. 식품시료에서 하나의 유해균까지 검출하기 위해서는 극도로 민감한 검출기술이 필요한데, 이를 위해서는 일반적으로 배양법이 사용된다. 배양법은 표적균을 쉽게 검출할 수 있는 수준까지 증가시키는 최고의 방법이기도 하지만 최소 하루에서 많게는 일주일 이상의 시간이 소요되는 단점을 가지고 있다. 최근에는 위에서 기술했

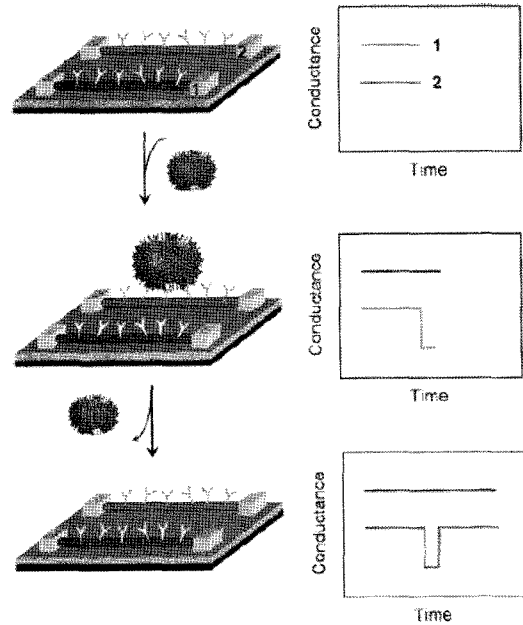


그림 1. 하나의 바이러스까지 검출이 가능한 나노와이어(nanowire) 센서의 개념도. 1과 2로 표시된 두 개의 나노와이어 검출기의 나노와이어 부분은 각각 다른 항체로 코팅이 되어 있고, 만약 특정 바이러스가 2번 나노와이어의 수용체에만 특이적으로 결합을 하게 되면 2번 나노와이어는 바이러스의 표면전하에 영향을 받아서 전도도가 변하게 된다. 바이러스가 나노와이어 표면에서 떨어져 나가면 나노와이어의 전도도는 다시 원래 수준으로 돌아 온다. 나노와이어의 전도도를 측정 함으로서 시료에 특정 바이러스가 존재하는지 유무를 판단할 수 있다(2).

듯이 나노기술이 접목 된 분광학적, 면역학적, 유전학적 검출방법들이 개발되고 있고, 이들의 뛰어난 감도와 선별력을 바탕으로 하나의 병원균까지도 신속하고 정확한 검출이 가능할 것으로 기대된다(그림 2).

하지만 이러한 탁월한 방법들이 아직까지 널리 실용화되지 못하고 있는 이유는 쉽지 않은 시료전처리 과정 때문이다. 식품은 다른 어떤 시료보다 복잡한 성분들로 이루어져 있고, 이들을 제거해 주지 않게 되면 민감한 검출기작에 직·간접적으로 관여하여 비특이적 신호를 발생하기 쉽다(7). 따라서 검출하고자 하는 표적균들을 식품으로부터 분리하고 분석이 가능한 형태로 바꿔주는 시료전처리 과정이 필요하다. 또한 현장에서의 실시간 진단을 위해서는 휴대용 장비로 개발이 되어야 한다. 감도가 뛰어난 첨단장비라 할지라도 실험실에서만 가동이 된다면 현장에서 실험실로 시료

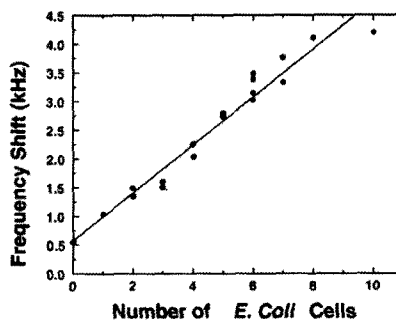
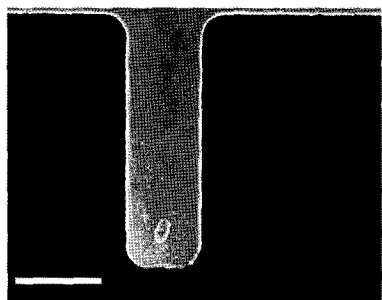


Fig. 2. 항체로 코팅이 된 진동자(oscillator)를 이용해 특정 병원균을 검출하는 장치. 왼쪽의 주사전자현미경 사진은 진동자에 붙은 표적 병원성 대장균(*E. coli* O157:H7) 하나를 보여주고 있다 (scale bar=5 μ m). 병원균이 진동자에 붙게되면, 이것은 진동자의 진동스펙트럼(vibration spectra)의 변화로 나타난다. 오른쪽 그래프는 진동자에 붙은 병원균의 숫자와 측정된 진동스펙트럼의 변화 간의 상관관계를 보여주고 있다(6).

가 이동하는 시간으로 인해 진단에 소요되는 시간이 늘어날 수밖에 없다. 이와 같이 시료전처리 기능과 분석기능이 일체화 된 소형화 장비를 개발하기 위해서는 각각의 기능을 수행하는 모듈들이 유기적으로 연결되어야 하고, 시료나 분석에 필요한 여러 가지 시약 용액 들을 조절하여 공급해 주어야 한다(8-11). 이를 위해서는 미세유체역학과 마이크로 밸브기술이 효율적으로 조합된 시스템이 요구된다(12) (그림 3). 그리고 최종적으로는 실험실이 아닌 현장에서 실시간으로

식품의 품질 및 안전성을 테스트하고, 더 나아가서 식품생산설비나 각각의 제품에 부착되어 식품의 상태를 모니터링 하여 관리하는 종합안전관리 시스템의 구축으로 이어지는데 나노기술의 역할이 클 것으로 기대된다.

식품안전성 향상을 위한 포장분야에서의 나노기술

식품포장은 식품의 안전을 보장하는 중요한 기술 중

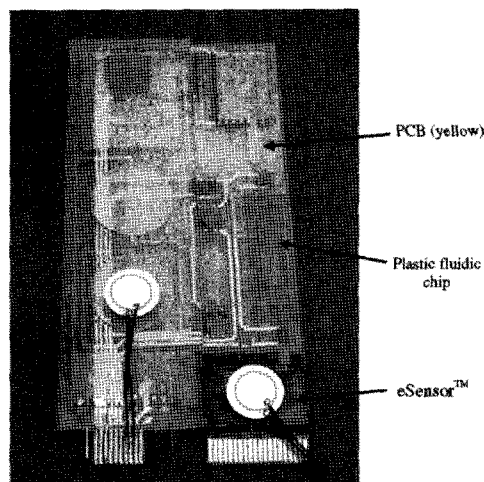
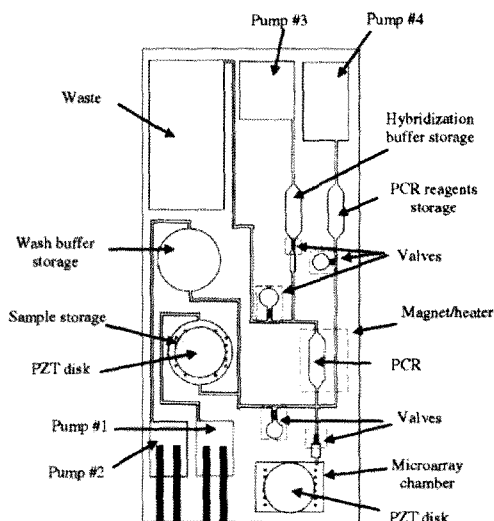


그림 3. 시료전처리, PCR, 그리고 DNA 마이크로어레이를 이용한 검출 기능을 하나의 기판 위에 구현한 플라스틱 유로칩의 조감도(왼쪽)와 실물사진(오른쪽). 왼쪽 조감도에는 시료와 반응액들의 이동에 필요한 유로들과 펌프, 그리고 반응챔버 및 검출장치등 여러 구성요소들이 유기적으로 조합된 구조를 보여주고 있다. 플라스틱 유로칩, 인쇄회로기판(printed circuit board, PCB), 그리고 모토롤라 이센서(eSensor) 마이크로어레이 칩 등 검출기 주요 구성요소들의 실제 모습이 오른쪽 사진에 잘 나타나 있다(9).

하나이다. 단순히 식품의 오염을 차단해 주는 기존의 수동적 포장개념에서 한 걸음 더 발전하여, 능동적 의미에서 식품의 안전성을 확보하고자 하는 노력들이 다양하게 이루어지고 있다. 가능성이 증진된 나노재료를 도입 함으로서 기존의 고분자기반의 포장재료가 가지고 있는 한계를 넘어서, 식품의 신선도나 색깔, 그리고 향미 등 보관시간에 따른 품질의 변화를 최소화시키고, 또한 식품이 보관·유통되는 과정 중 오염이나 품질저하가 발생했을 경우 이를 민감하게 감지하여 경고표시를 나타내는 등 이로 인한 소비자의 피해를 사전에 예방해 주는 스마트포장재의 개발노력들이 여기에 포함된다. 이렇듯, 최근 소비자들은 식품의 품질과 신선도를 유지시키고 안전성을 확보하는데 있어서 식품포장의 역할이 중요함을 인식하고 있으며 이러한 배경들이 혁신적인 식품포장재 개발의 실질적인 원동력이 되고 있다.

먼저 나노물질이 접목된 고분자 신소재가 새로운 포장재료로서 높은 잠재력을 가지면서 많은 사람들의 관심을 끌게 되었다. 고분자 나노복합재료는 고분자와 무기충진제로 이루어진 복합재료로서 고분자메트릭스에 분산되어있는 나노미터 사이즈의 무기충진제로 인해 기존의 순수 고분자나 기타 고분자복합재료 등과 비교했을 때 강도, 내열성, 내식성, 내연성, 가스차단성에 있어서 우수한 성질을 가지고 있다(13-15). 예를 들어, 나일론에 2%의 나노무기충진제를 첨가하여 만든 나일론 층상실리케이트 나노복합체(nylon layered silicate nanocomposites)는 인장강도가 두 배나 향상되었고 열변형 온도가 나일론보다 100°C 정도 더 증가 함으로서 고온환경에서의 응용이 가능하게 되었다. 무기충진제로서는 층상 실리케이트 (layered silicate)가 가장 많이 사용되고 있다. 층상실리케이트는 점토의 구성성분이고 따라서 나노구조 특성을 지니고 있는 아주 경제적인 재료이다. 이를 제조하기 위해서는 먼저 고분자 물질이 중합되는 과정에서 충진제를 첨가해 주는 방법이 있고, 두번째로는 고분자 물질과 충진제를 용매에 녹여서 섞어주는 방법, 그리고 마지막으로 고분자를 높은 온도에서 녹여서 충진제와 섞어주는 방법이 있다. 이중 마지막 방법이 기존의 고분자 가공기술과 병행할 수 있어 경제적이고 상용화가

용이하다. 또한 무극성의 폴리스티렌(polystyrene)으로부터 극성을 가지고 있는 나일론(nylon)에 이르기 까지 다양한 고분자에 적용을 할 수 있는 잇점이 있다. 이 방법을 통하여 나노복합재료를 만들었을 때 두 가지 형태의 혼합구조가 나타나는데 첫 번째는 고분자 체인이 층상구조의 실리케이트 사이에 삽입되어 고분자/무기물 층이 교차되는(intercalated hybrids) 다층 구조이고, 두 번째는 실리케이트가 단층으로 벗겨지면서 고분자 메트릭스 상으로 불규칙하게 분산되는(delaminated hybrids) 구조이다. 그리고 고분자 나노복합재료 내에 삽입·분산되어 있는 무기충진제의 형태와 특성에 따라 가스투과성을 조절할 수 있다. 그림 4에서 보듯이 고분자 메트릭스에 편상형태의 나노파티클을 첨가하여 콤포지트를 만들면 가스의 투과경로가 길어지기 때문에 가스차단력이 증가하게 된다(16). 특히 특정한 가스에 대한 선택적 투과성을 가지고 있는 나노파티클 재료를 도입하여 식품의 선도를 오랫동안 유지할 수 있는 포장재로 개발할 수도 있을 것이다. 그리고 충진제의 크기가 나노미터 수준이기 때문에 뛰어난 투명도를 가지고 있고 따라서 포장재로서 장점을 가지고 있다.

또한 식품에 존재할 수 있는 유해미생물의 생육을 억제하거나 사멸시키는 항균포장재(antimicrobial packaging)에 대한 요구도 증가하고 있다. 일반적으로 사람에게 해가 없는 천연항균물질을 비닐이나 플라스틱 등 식품포장재에 도입하여 *Listeria monocytogenes*, 병원성 *Escherichia coli*, 또는 곰팡이 등과

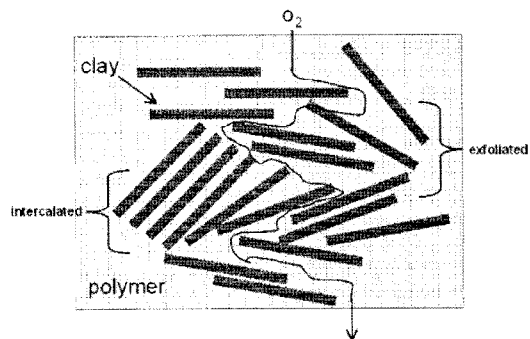


그림 4. 나노실리케이트가 함유된 고분자막(silicate-filled polymer)을 통과하기 위해 산소가 지나야 하는 길고 구불구불한 경로를 보여주는 개념도. Intercalation과 exfoliation(또는 delamination)의 차이가 잘 나타나 있다(16).

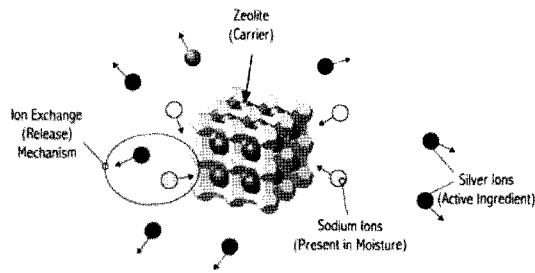


그림 5. 은이온치환 제올라이트(silver-substituted Zeolite)의 작동원리. 제올라이트에 흡수되어 있던 은이온이 주변(식품)에 존재하는 나트륨이온(sodium ions)과 치환되면서 일정한 속도로 외부로 유출되어 항균작용을 나타낸다. (From <http://www.websitelabels.com/images/ion.jpg>)

같은 부패관련균들을 대상으로 항균효과를 테스트하고 있다. 이를 통해 식품을 유해균으로부터 보호하고 또한 유통기한을 늘리는 기술로 적용하고자 한다. 여기에서 항균물질의 효율적인 전달을 위해 사용되는 물질로 관심을 받고 있는 것 중 하나가 다공성 나노재료이다(17, 18). 특히, 은이온치환 제올라이트(silver-substituted zeolites)는 일본에서 식품포장재료의 첨가제로 널리 사용이 되고 있다. 제올라이트는 나노미터 이하의 다공성 구조를 가지고 있고, 거기에는 나트륨이온(sodium ion)이 들어 있는데, 이 나트륨이온을 항균효과가 높은 은이온(silver ion)으로 바꾸어 준 것이 은이온치환 제올라이트이다(그림 5). 이 물질은 폴리에틸렌, 폴리프로필렌, 나일론 등 포장재로 쓰이는 고분자에 1-3% 수준으로 섞여서 항균포장재로 만들어진다. 이때 나트륨이온을 대체하여 제올라이트의 다

공성 구조에 스며 들은 은이온은 일정한 속도로 외부로 유출이 되어 세균이나 곰팡이의 대사관련 효소작용을 억제하여 항균효과를 발휘하는 것으로 알려져 있다. 상용화된 대표적인 은이온치환 제올라이트는 AgIon Technologies LLC가 생산하는 AgIon™ 이다. 이 물질은 2000년 미국 FDA의 허가를 받아 미국시장에서 식품포장재 첨가제로 실제 사용이 되고 있다 (<http://www.cfsan.fda.gov/ms/opa-fcn.html>).

식품가공기구 및 장비의 위생에 있어서의 나노기술

식품가공공정에 있어서 기구나 장비에 유해오염물질이 부착되는 것을 차단해 주는 것이 중요한데, 여기에 ‘연잎효과(lotus effect)’를 적절하게 적용할 수 있다. ‘연잎효과’는 연잎에 물이 닿으면 연잎을 적시지 않고 방울로 뭉쳐져서 아래로 굴러 내리는 현상을 말한다(19). 연잎의 표면은 마이크로미터 크기의 돌기들이 돌출되어 있고, 각각의 돌기들은 다시 수십나노미터 크기의 왁스크리스탈로 덮혀 있기 때문에, 그 위에 물방울이 떨어지게 되면 표면과 접촉하는 면적이 극도로 줄어들게 되어 표면장력이 아주 낮아진다. 따라서 물방울은 연잎을 적시지 못하고 그 위에 둥그렇게 얹혀 있다가, 앞이 기울거나 하면 아래로 굴러 떨어지게 된다. 이 과정 중에 앞의 표면에 붙어있던 먼지나 작은 곤충 등 이물질들이 함께 씻겨져 나가게 된다. 진흙물과 같이 지저분한 환경에서 자람에도 불구하고 꽃과 잎이 항상 깨끗하게 유지되는 연꽃의 비밀은 바로 표면에 있는 나노돌기에 있다. 이처럼 탁월한

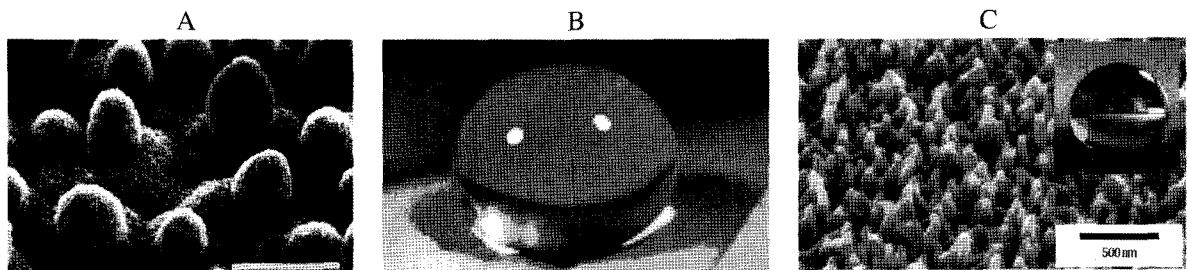


그림 6. (A) 연 잎(lotus leaf) 표면의 주사전자현미경 사진. 연 잎 상피세포의 마이크로 돌기는 나노미터 스케일의 왁스크리스탈로 덮여 있다(Bar: 20um)(19). (B) 연 잎 표면의 구조적 특성으로 인해, 표면을 적시지 못하고 연 잎 위에 둥그렇게 얹혀있는 물방울 사진. (From http://www.botanic.uni-bonn.de/system/lotus/en/prinzip_html.html) (C) 표면에 합성된 폴리아닐린 나노섬유의 주사전자현미경 사진. 삽입된 사진은 합성된 나노섬유 위에 얹혀 있는 물방울을 보여주고 있다. 연 잎과 마찬가지로 극소수성 특징을 가지고 있다(20).

자정작용을 가지고 있는 연잎의 구조를 모방하여 인위적으로 동일한 효과를 얻고자 하는 생체모사 연구가 진행되고 있다(19-21). 오하이오 주립대학의 Epstein 교수 연구실에서는 표면에 직경이 10-40 nm, 길이가 70-360 nm인 polyaniline nanofiber를 합성하였고, 여기에 CHF₃나 CF₄ 플라즈마 처리를 통해 접촉각(contact angle)이 175° 이상인 극소수성(super hydrophobic) 표면을 만들었다(그림 6)(20). 이렇게 만들어진 극소수성 표면은 오염물질의 부착을 최소화하고, 더 나아가서 자체정화(self cleaning)기능을 발휘할 수 있는 표면을 만드는데 사용할 수 있을 것으로 기대하고 있다. 식품산업에 있어서 오염의 위험성이 높은 도축장이나 육가공 시설의 장비나 기구들의 표면을 코팅하는데 적용하면 새로운 차원의 위생설비 개발이 가능할 것으로 기대된다.

유비쿼터스 식품안전 프로그램(Ubiquitous Food Safety Program)

식품안전의 최종목표는 소비되고 있는 모든 식품의 상태를 모니터링 하며, 문제가 발생했을 때 이를 정확하게 판단하고 대처하여, 문제가 더 이상 확산되지 않도록 예방하는 총괄적 의미에서 식품의 안전을 확보하는 유비쿼터스 식품안전시스템의 확립이다. 이를 위해서는 생산된 식품의 포장재에 식품의 위치와 품질 상태를 감지하는 마이크로센서를 도입하고, 식품의 품질이나 위생상태에 이상이 발생했을 경우 이를 유통과정 일부에서 정확하게 모니터링하는 시스템의 구축이 필요하다. 식품의 상태를 모니터링 하기 위해서는 위에서 기술한 포장재에 부착된 고감도센서뿐 아니라 파악된 정보를 필요한 곳에 효과적으로 전달하는 마이크로 송·수신 시스템이 필요하다. 여기에는 RFID(Radio Frequency Identification)기술이 적절히 응용될 수 있을 것으로 기대되고 있다. RFID기술은 50여년전 군용으로 개발이 된 이래, 현재는 교통카드 등 생활 여러 분야에 실질적으로 적용이 되고 있다. RFID는 마이크로칩과 안테나로 구성되어 있으며 이것이 발생한 라디오파(radio wave)신호는 무선네트워크시스템으로 읽게 된다. 일일이 수동으로 스캔을 하

여 정보를 읽어 들이는 바코드와 달리 RFID는 수백 개의 태그(Tag)를 동시에 읽을 수 있기 때문에, 이미 월마트(Wal-Mart)나 홈디포(Home Depot), 그리고 테스코(Tesco) 등 대형유통업체에서 높은 관심을 가지고 있다. 이러한 RFID기술을 초소형센서기술과 적절하게 접목시키면 식품의 상태를 실시간으로 모니터링하는 식품안전관리시스템 확립으로 발전시킬 수 있다. 그리고 만약 식중독이 발생하게 되면 이를 현장에서 실시간으로 진단하고, 네트워크 시스템과 연동된 데이터베이스를 활용하여 신속하고 정확하게 원인물질을 밝혀내는 것이 가능하다. 원인물질을 함유한 모든 제품은 추적을 통해 유통라인에서 추출하여 문제의 확산을 최소화할 수 있다. 기술된 바와 같이 나노기술은 커뮤니케이션과 네트워크의 유기적인 합병을 통하여 유비쿼터스 식품안전프로그램의 완성에 중요한 역할을 할 것이다.

결 론

나노기술의 적절한 응용을 통해 식품업체는 생산성과 품질에 있어서 경쟁력을 확보할 수 있게 되고, 또한 경쟁력 있는 가격에 우수한 기능성을 가진 진보된 형태의 식품의 안정적인 공급이 가능할 것이다. 그리고 품질과 안전성을 확보할 수 있는 식품의 생산·유통 시스템의 정착으로 소비자의 건강과 삶의 질이 크게 향상되는 혜택을 누리게 될 것으로 기대된다. 나노기술에 있어서, 많은 사람들이 크기에 관심을 가지고 있고, 크기가 작아지는 것과 기술력을 동일선상에서 이해하려는 경향이 있다. 반도체나 기타 전자회로의 생산에 있어서 크기를 줄이는 것은 집적도, 즉 성능의 향상과 직결되지만, 이러한 개념이 다른 분야에도 동일하게 적용되는 것은 아니다. 바이오텍이나 식품과학에 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 스케일 중 어느 것이 더 중요하냐가 결정된다. 나노에만 집착하게 되면 전체 숲을 이해하기 힘들게 된다. 나노와 마이크로, 그리고 마크로

(macro) 레벨의 조화로운 협력으로 전체 그림을 보다 정확하게 파악하고 이것이 미래 나노관련기술의 올바른 방향이 되어야 한다.

참고문헌

1. Besteman K, Lee JO, Wiertz GM, Heering HA, Dekker C. Enzyme-coated carbon nanotubes as single-molecule biosensors. *Nano Letters* 3: 727-730 (2003)
2. Patolsky F, Zheng G, Lakadamyali OHM, Zhuang X, Lieber CM. Electrical detection of single viruses. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 101: 14017-14022 (2004)
3. Chen P, Gu J, Brandin E, Kim YR, Wang Q, Branton D. Probing single DNA molecule transport using fabricated nanopores. *Nano Letters* 4: 2293-2298 (2004)
4. Alivisatos P. The use of nanocrystals in biological detection. *Nat. Biotechnol.* 22: 47-52 (2004)
5. Kim YR, Min J, Lee I, Kim S, Kim AG, Kim K, Namkoong KC. Nanopore sensor for a fast label-free detection of short double-stranded DNA. *Biosens. Bioelectron.* 22: 2926-2931 (2007)
6. Ilic B, Czaplewski D, Zalalutdinov M, Craighead HG, Neuzil P, Campagnolo C, Batt CA. Single cell detection with micro-mechanical oscillators. *J. Vac. Sci. Technol. B* 19: 2825-2828 (2001)
7. Batt CA. Food pathogen detection. *Nature* 316: 1579-1580 (2007)
8. Cho YK, Lee JG, Park JM, Lee BS, Lee Y, Ko C. One-step pathogen specific DNA extraction from whole blood on a centrifugal microfluidic device. *LabChip* 7: 565-573 (2007)
9. Liu RH, Yang J, Lenigk R, Bonanno J, Grodzinski P. Self-contained, fully integrated biochip for sample preparation, polymerase chain reaction amplification, and DNA microarray detection. *Anal. Chem.* 76: 1824-1831 (2004)
10. Lee JG, Cheong KH, Huh N, Kim S, Choi JW, Ko C. Microchip-based one step DNA extraction and real-time PCR in one chamber for rapid pathogen identification. *Lab. Chip.* 6: 886-895 (2006)
11. Huang Y, Mather EL, Bell JL, Madou M. MEMS-based sample preparation for molecular diagnostics. *Anal. bioanal. Chem.* 372: 49-65 (2002)
12. Whitesides GM. The origins and the future of microfluidics. *Nature* 442: 368-373 (2006)
13. Giannelis EP. Polymer layered silicate nanocomposites. *Adv. Mater.* 8: 29-35 (1996)
14. Novak BM. Hybrid nanocomposite materials-Between inorganic glasses and organic polymers. *Adv. Mater.* 5: 422-433 (1993)
15. Giannelis EP. Polymer-layered silicate nanocomposites: synthesis, properties and applications. *Appl. Organometal. Chem.* 12: 675-680 (1998)
16. Grunlan JC, Grigorian A, Hamilton CB, Mehrabi AR. Effect of clay concentration on the oxygen permeability and optical properties of a modified poly(vinyl alcohol). *J. Appl. Polym. Sci.* 93: 1102-1109 (2004)
17. Appendini P, Hotchkiss JH. Review of antimicrobial food packaging. *Innovative Food Sci. Emerging Technol.* 3: 113-126 (2002)
18. Quintavalla S, Vicini L. Antimicrobial food packaging in meat industry. *Meat Sci.* 62: 373-380 (2002)
19. Barthlott W, Neinhuid C. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. *Planta* 202: 1-8 (1997)
20. Chiou NR, Lu C, Guan JJ, Lee LJ, Epstein AJ. Growth and alignment of polyaniline nanofibers with superhydrophobic superhydrophilic and other properties. *Nat. Nanotech.* 2: 354-357 (2007)
21. Zhu Y, Hu D, Wan MX, Jiang L, Wei Y. Conducting and superhydrophobic rambutan-like hollow spheres of polyaniline. *Adv. Mater.* 19: 2092-2096 (2007)