

나노(Nano)기술 - 식품과학의 새로운 영역

이 부 록

나노기술이란, 나노미터 크기의 재료가 나타내는 특성에 초점을 맞춘 과학기술로서, 수십년내에 가장 발전 가능성이 큰 과학기술 중의 하나가 되었다. 나노 과학기술이 발전함에 따라 과학자들은 식물과 동물기원의 생물질과 합성물질에서 일어나는 마크로 특성(macroscopic properties)과 분자구조와의 관계, 정렬도(degree of order)와의 관계, 분자간 힘과의 관계 등을 좀더 이해할 수 있게 되었다.

특히 고분자물질에 대한 나노크기의 콜로이드 특성을 이해하게 되면 인체내의 필요한 부위에 유효물질이 정확하게 전달되도록 분자구조를 조절하는 것이 가능해질 것이다. 따라서 좀 더 효율적인 인체내 물질 전달 체계가 확립되는 것이다. 또 아주 작은 나노기계가 혈액속으로 다니면서 병원균들을 죽이거나 손상된 조직을 치료하거나 식품을 통해서 섭취해오던 고분자의 항암물질을 직접 인체내로 유입시키는 것도 가능해진다. 이러한 발견으로 식품이 새로운 차원에서 건강 증진 효과를 발휘하게 하는 것이 가능해지고 있다.

나노기술을 바탕으로 한 전략들은 식품이나 환

경에서 병원균들의 신속검출을 위한 센서개발에 큰 기여를 해왔다. 본 고에서는 식품과학기술에 응용될 수 있는 현재의 나노기술들을 몇가지 고찰하여 미래에 식품나노기술이라는 새로운 연구 영역이 어떻게 펼쳐질지를 검토해 보고자 한다.

I. 나노기술

나노기술은 연구자들이나 제조업자, 심지어 최근에는 일반인들의 상상력까지도 사로잡고 있다. 미국에서는 2000년에 국가 나노기술법안(The National Nanotechnology Initiative)이 제출된 이후로 국가적 관심분야로 떠오르게 되었다. 많은 연방연구기관들이 나노기술의 중요성과 잠재력을 인식하여 나노기술연구를 가장 우선순위가 높은 연구로 자리매김하고 있다.

“나노”라는 말은 10^{-9} 의 크기를 나타내는 차원 단위로서 1나노미터는 10^{-9} 미터이다. 현재 나노기술에는 2가지의 주요 방법이 이용되고 있다. 하나는 “top down” 방식으로서 분쇄, 나노석판인쇄(nanolithography), 정밀공학 기법 등을 이용하여

큰 부피의 물질을 깨서 나노크기의 구조를 갖는 물질로 만드는 것, 두 번째는 "bottom up" 방식으로서 자기회합(self-assembling)이 가능한 개개의 원자나 분자들이 모여서 나노구조를 갖는 물질로 형성되는 방식이다.

오늘날에는 bottom up 방식이 더욱 유용하게 활용된다. 즉 정교하게 조절된 구조나 특성을 갖는 강력한 구조물질을 제조하거나, 표면적인 매우 큰 입자를 제조하거나, 유효성분을 둘러 쌓을 수 있는 재료 물질을 제조하거나, 자가청소나 주변환경에 따라 색상이 변할수 있는 코팅 물질을 제조하는데 bottom up 방식이 매우 유용하게 사용된다.

나노기술은 개개의 분자들을 연구하는데 있어서, 특히 분자간이나 분자내 결합을 연구하는데 새로운 길을 열어 주었다.

현재의 나노기술 연구대상은 촉매, 효소반응, 근육수축, 세포이동, DNA 복제와 전사, DNA 결합과 풀림(unknotting and unwinding) 단백질 접힘과 풀림(folding and unfolding) 등의 기작을 이해하는 것이 포함되어 있다.

나노기술은 생물물질들의 복잡성과 기능성을 이해하고, 복제하고, 개선시키는 창구로서 그런 물질들이 본래 갖고 있는 성질을 조절하는 것을 가능하게 해준다.

식품과학에서 나노기술의 잠재력은 과학적인 지식이 부족해서 아직 완전하게 인식되지는 못하고 있다. 만일 나노기술이 현재의 속도 내로 발전한다면, 우리는 곧 빛에너지로 움직이고, 주위환경을 스스로 감지하고, 원자들을 다룰 수 있는 자기복제 나노로봇을 만드는 것도 가능해 질 것이다.

그러한 나노로봇은 혈관을 통해서 이동하면서 손상된 DAN를 복구하거나 교체하고, 손상된 세포를 치료하고, 감염균이나 암세포 및 노화된 세포 등을 제거하여 인간을 더 건강하게 오래 살 수 있도록 프로그래밍될 수도 있다. 에너지의 보존 뿐 아니라 새로운 에너지원의 개발도 가능해지고, 청정생산기술(clean production method)과 혁신적인 재활용기술에 의해 쓰레기 발생이 최소화되고,

초소형 슈퍼컴퓨터가 개발되어 인간의 지능과 비슷한 인공지능이 우리가 생각하는 것 보다 훨씬 더 빠르게 실현될 것이며, 또한 우주개발이 앞당겨져서 우주여행이 일상화 될 것이다. 나노기술은 원자수준에서 무제한의 식품을 합성할 수도 있게 해주며, 그렇게 되면 배고픔의 문제도 해결될 것이다.

II. 식품 나노기술

현재 나노기술은 대부분 전기, 자동화, 초물질재료(super-materials), 제약 및 의약과 같은 생명과학 분야에 주로 응용되고 있다. 그렇지만 지난 수십년간 과학기술 발전에서 인간이 얻은 경험으로부터 나노기술은 위와 같이 응용분야가 제한되지 않고 보다 광범위하게 적용되어 인간생활에 전체적으로 큰 영향을 미칠 것이다.

우리 식탁에 나노기술로 생산된 먹거리가 올라오는 것은 시간 문제일 뿐이다.

나노기술은 세계의 식품체계를 바꿀만한 잠재력을 갖고 있다. 새로운 농산물 및 식품 안전체계, 질병 치료물질 전달기술, 분자 및 세포 생물학적 수단, 병원균 검출센서, 환경보호, 공공적인 미래 노동인구의 교육 등이 나노기술이 농산물 및 식품체계의 과학과 공정에 영향을 미칠 수 있는 주요 분야의 예이다.

- (1) 병원균과 오염물질 검출을 위한 나노센서들은 식품의 제조, 가공, 운송을 좀더 안전하게 할 수 있다.
 - (2) 특별한 나노장치들은 특정 생산품의 주위 환경변화나 운반 이력 등을 정확하게 측정, 기록할 수 있게 해 준다.
 - (3) 식품에 대한 감지와 위치추정, 보고, 원격조정등을 통합해서 실시할 수 있도록 해주는 스마트시스템(smart system)은 식품제조 및 운송의 효율성과 안전성을 높여줄 것이다.
- 식품산업에서 나노기술에 의해 크게 영향받게

될 주요 4분야는 다음과 같다.

- (1) 새로운 기능성물질의 개발
- (2) 마이크로 및 나노규모의 가공
- (3) 제품 개발
- (4) 일반적인 식품 안전 및 생물학적 안전을 위한 기술과 장치의 고안 등이다.

식품산업에서 나노기술이 응용될 분야들은 Fig. 1과 같다.

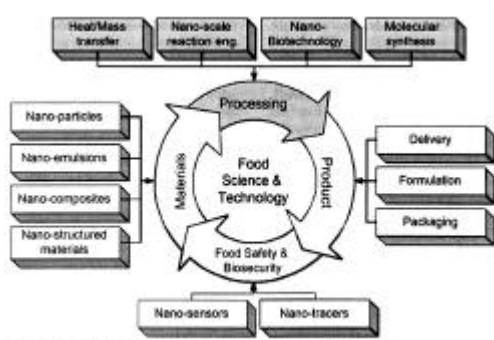


Fig. 1. Application matrix of nanotechnology in food science and technology

나노기술의 몇가지 장점들이 농업연구를 통해서 식품에 적용될 것이다. 분자 및 세포생물학에서 새로운 수단들이 개발되어 생식공학, 농업과 식품 폐기물을 에너지로 전환시키는 것과 효소적인 나노 생물가공(nano-bioprocessing)을 통한 유용부산물화, 식물과 동물의 질병 치료 및 예방 등이 그 예이다. 나노크기 수준에서 독특한 특성들(자기 회합특성, 자가치료특성, 병원균 및 오염물질 검출능력 등)을 갖는 새로운 물질들은 가까운 장래에 농업 및 식품산업에 새로운 돌파구가 될 것이다.

농업적 산물들이 가치있는 유용한 물질로 나노 전환(nanoconversion)되는 것을 통한 환경보호는 발전이 기대되는 또 하나의 분야이다. 식물성 유지를 생물연료나 생분해성 용매로 전환시키는 새로운 나노촉매를 고안, 개발하는 것이 나노기술적 수단의 도움으로 크게 촉진될 것이다.

공간과 환경적 여건을 관리하게 되는 것은 나노 기술로부터 장점을 얻을 수 있는 또 다른 주요 분야이다. 상추, 구운감자, 브로콜리, 갓구운 빵 등은 식탁에 오르기전 수많은 환경적인 변화에서 살아 남아야 한다.

농작물들은 잡초, 해충, 식물병원균, 나쁜날씨 등으로부터 보호되어야 한다. 여러 가지 잠재적인 문제로부터 농작물을 매일 밀착 감시하는 것은 식품생산자에게 매우 중요하다. 나노크기의 센서와 스마트 전달시스템(smart delivery system)을 통하여 농작물과 가축을 예방적으로 감시하고 치료하는 것은 식물성 및 동물성 식품원료들의 품질을 개선시킬 수 있다.

나노기술의 수단을 활용하여 식품과학자들은 식품구성성분들이 어떤 구조를 갖고 있는 서로 어떻게 반응하는지에 대해 좀더 잘 이해하게 되었다. 결과적으로 식품분자들을 좀더 정교하게 다룰 수 있게 되어 새롭고, 더 몸에 좋고, 더 맛있고, 더 안전한 식품을 개발할 수 있게 될 것이다. 즉, 환경을 오염시키지 않으면서도 더 경제적이고 효율적인 공정이 개발될 것이며, 더 경량화되고 더 정확한 식품제조 장비가 개발될 것이며, 좀더 가벼우면서도 기능이 뛰어난 강한 포장재가 포장안전성 증진 및 기능성 식품에 사용될 것이다. 식품공급안전성이 항세균성 표면포장재와 해로운 미생물 및 독소가 접촉되면 색깔이 바뀌는 포장재에 의하여 크게 향상될 것이다.

III. 나노조립체(Nanocomposites)

나노구조를 갖는 재료들은 독특한 특성을 나타내어 새로운 고기능성물질 재료의 원료가 되고 이렇게 제조된 물질들은 식품제조, 포장, 저장에서 중요한 역할을 하게 된다. 나노구조는 기존, 사용 하오던 물질의 기계적 강도나 초전도성을 증가시켜주어 가치를 높이기도 하고, 유효성분들을 훨씬

더 경제적으로 환경적 영향을 덜 받으면서 효과적으로 생체시스템에 전달할 수 있도록 해 준다.

나노 조립체로 대표되는 유망한 새로운 물질군들은 독특한 특성을 나타내는 형태와 계면성질을 갖고 있다. 최초의 나노조립체 조립은 생무기질화(biomineralization)에 의해 시작되었다.

생무기질화란 단백질, 펩타이드, 지방같은 유기물들을 탄산칼슘같은 무기물과 결합시켜서 강인하고 견고성(toughness)이 증가된 물질을 제조할 수 있게 해준다.

감자전분과 탄산칼슘으로 구성된 포장재가 좋은 예이다. 이 거품재질은 훌륭한 단열성을 갖고면서도 매우 가볍고 생분해성이 있어서 기존 패스트푸드에 사용되어 오던 폴리스티렌 포장박스(Clam-shell)를 대체할 수 있도록 개발되어 왔다. 예전의 시도에서는 플라스틱병에 맥주를 병입하면 이미, 미취가 발생했었지만 나노조립체를 사용하면 플라스틱 맥주병도 가능하다.

Nano Material Inc.(일본)는 나노조립체 차단물질(nanocomposite barrier material)을 함유한 페트(PET)와 같이 코팅된 플라스틱 필름에 사용할 수 있는 마이크로그래비 인쇄공정(microgravure process)을 개발하였다. 이 차단물질은 기존의 코팅된 식품포장재에 사용해온 실리카(silica)와 알루미나(alumina) 대체물질로서 훨씬 더 투명하고 기능성도 뛰어나다.

나노구조는 천연물질로부터도 형성될 수 있다. Montmorillonite라고 불리는 천연점토는 나노미터 두께의 여러 층들로 구성된 화산물질로서 나노점토를 생산하는데 가장 널리 사용되는 원재료이다. Nanocor Inc.와 Southern Clay Products와 같은 미국내 기업들은 나노조립체 생산에 첨가제로서 montmorillonite를 사용하고 있다. Montmorillonite를 3-5%만 첨가하면 플라스틱이 더 가볍고, 강도와 내열성은 증가하여 산소, 이산화탄소, 수분, 휘발성 물질들의 차단성을 높여주게 된다. 이러한 특성들은 식품포장에서 매우 유용하며, 이 차단물

질을 사용함으로써 가공육, 치즈, 제과, 시리얼, 데워먹는 즉석식품(boil-in-bagfoods)들의 유통기한을 상당히 증가시킬 수 있다. 또한 과일주스의 압착장비에도 사용되고, 유제품포장, 맥주 및 탄산음료병에도 사용된다.

IV. 나노튜브와 나노튜브막

탄소나노튜브(carbon nanotube)로 대표되는 새로운 세대의 나노물질은 1991년 일본 NEC Corp.사의 전자현미경학자인 Sumio Iijima에 의해 발견되었다. 나노튜브는 벌집구조를 갖는 한장의 얇은 그래파이트(graphite)를 매우 긴 튜브속으로 둥글게 말아 넣으므로써 제조되는데, 이렇게 넣어진다면 튜브가 더 유연하면서도 더 안전하고, 더 강하게 된다.

나노튜브는 가장 강한 섬유로 알려져 있는데 같은 중량의 강철섬유 보다 10-100배 정도 강도가 높다. 연구자들은 나노튜브를 이용하여 내분쇄성과 내열성이 증가된 나노튜브강화 조립체 등을 제조하고 이 강화조립체들은 기존의 세라믹 및 알루미늄은 물론이고 비행기, 기어, 베어링, 자동차부품, 의료장비, 스포츠장비, 산업적인 식품 가공장비 등에 사용되는 금속까지도 대체하고 있다.

최근 연구들은 바이오반응기(bioreactor)와 바이오센서의 재료나 단백질의 결정화같은 생물공학목적에 탄소나노튜브를 많이 사용하고 있다. 그러나 생물공학적으로 잘 활용하기 위해서는 탄소나노튜브의 비수용성이 해결되어야 한다. Dagari는 1겹짜리 탄소나노튜브를 요드-전분수용액(Fig. 2)에 용해시켰고, Bandyopadhyaya 등도 아라비아검 수용액을 이용하여 같은 결과를 얻었다. 한겹짜리 탄소나노튜브의 용해를 위한 또다른 수용액들은 글루코사민이나 소혈청알부민(bovine serum albumin)으로 튜브를 기능성화시킨 것들로 구성되어 있다.

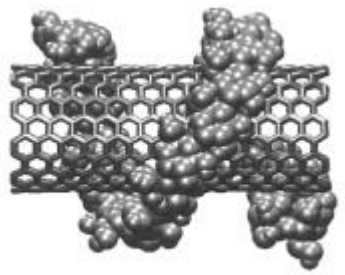


Fig. 2. Amylose chain coiled around a single-wall carbon nanotube, From Dagani(2002)

탄소나노튜브에 기능기(functional group)들을 접합(grafting)시키는 것은 건강분야 응용에서 매우 유용할 수 있다. 예를 들면, 나노튜브의 한쪽 끝을 암세포의 특정단백질에 결합할 수 있는 DNA Sequence에 결합시키고, 또다른 한쪽 끝에는 암세포를 죽일 수 있는 독소물질을 결합시키면 나노 튜브는 암세포만 골라서 죽이는 유도탄이 될 수 있다.

또 다른 예는 유효성분을 포접할 수 있는 2중지질막의 자기회합에 의해 형성된 나노튜브가 있다. 이 나노튜브는 생물학적 적합성(biocompatibility) 때문에 생체시스템내의 물질전달체계에 매우 이상적인 것으로 평가받고 있다. 특별히 잘 정렬된 나노구조를 갖는 다층나노튜브(multilwall nanotube)는 센서제조에 매우 유용하다.

나노튜브막을 제조하면 식품에 매우 유용하게 사용된다. 높은 선택성을 갖는 나노튜브막들은 효소, 항체, 단백질, DNA 등을 분자수준에서 인식하기 위한 센서의 한 부분으로 분석적인 목적으로 사용될 수도 있으며, 단백질과 같은 생물분자들의 막분리에도 사용될 수 있다. 현재 식품산업에서 사용되는 기존 막들의 선택성과 수율은 그다지 만족스럽지 못하다. 그 주된 이유는 막의 구조나 화학적 친밀도(chemical affinity)를 조절하는 것이 제한되어 있기 때문이다. 나노튜브들을 바람직한 방법으로 기능성화 시킴에 의해 나노튜브막들이 분자들을 분자크기나 모양, 화학적 친밀도에 따라 효과적으로 분리되도록 제안되어 질 수 있다. 예

를 들면 Lee와 Martin은 내부직경이 1nm 이하인 1층으로 분산된 금나노튜브를 함유하고 있는 막을 개발했다. 이 막은 막으로 나뉘어져 있는 양쪽 용액사이의 분자들의 분리나 이온전달 등에 사용될 수 있다. 그들은 나노튜브의 내부를 소수성으로 만들어서 나노튜브막이 소수성분자들을 우선적으로 추출하고 전달할 수 있도록 하였다. 이러한 기술을 아직까지 식품산업에 적용시키기에는 너무 벅차지만 가까운 장래에 강화식품제조나 식이보충제, 의약품의 제조에 사용되는 단백질, 펩타이드, 비타민, 무기질 등의 기능성 식품생물분자들의 분리에 활용될 것이다.

탄소나노튜브가 기본바탕이 되는 또다른 응용분야는 전기전도성막의 개발이다. 직경보다 길이가 훨씬 긴 (high length to diameter) 탄소나노튜브는 보통 절연체인 합성고분자를 전도성 고분자로 전환시키는데 사용될 수 있다. 전기나 자동차산업 이외에도 이러한 고분자들은 향료나 기능성 분자들의 분리시 분리나 에너지 효율성을 높여 줄 수 있는 새로운 막의 개발에도 활용될 수 있다.

이와 같은 개발의 기본개념은 막으로 제조, 개발될 수 있는 고분자기질 속으로 아주 작은 탄소나노튜브들을 균일하게 포접시키는 것이다. 이 전도성막들은 상(Phase)변화가 수반되는 막분리 공정에 필요한 열에너지를 공급할 때 막이 가열되지 않도록 할 수도 있다. 따라서 저장되어 있는 용액이 가열될 때 발생하는 열 손상을 최소화하기도 하고, 열전달을 증가시키고 영양적, 관능적 손상을 일으키는 가열 잔열(prolonged heating)의 폐해를 최소화한다. 식품향 성분의 막증기 분리(membrane pervaporation) 및 막증류(membrane distillation)에 의한 알콜속의 수분제거, 휘발성 액체의 온도에 따른 흡착 등은 전도성 고분자 막들이 식품 및 관련 산업에서 사용될 수 있는 몇가지 예이다.

고도의 나노가공성 막(nanoporous membrane)도 높은 표면적을 갖는 집적체(clusters)와 나노결정체 같은 나노크기 물질을 사용하여 제조될 수 있다.

나노기술은 마이크로여과막이나 한외여과막의

기공을 분리하고자 하는 화합물과 결합성이 강한 고분자나 올리고성 액체로 채워서 막을 기능성화 시키는데도 사용될 수 있다. 유기고분자들을 무기질 실리카 나노입자들로 결합시켜 나노입자들이 보강된 나노막은 큰 분자들을 작은 분자들 보다 더 쉽게 통과시킬 수 있다. 실리카 첨가에 따라 흐름량이 200% 이상 증가하고 막의 투과성이 개선되어 막분리에 관한 통념이 깨지고 있다. 투과성이 증가하는 것은 나노입자때문인데 이 나노입자들이 고분자 사슬들을 서로 더 멀리 떨어져 있게 하여 막에서 기공의 공간이 더 커지게 하는 것이다. 이런 막들은 에탄올이나 메탄올 같은 연료를 값싸게 정제하는데 사용되고 있으나 식품관련 산업에도 적용이 가능하다.

고도의 높은 표면적을 갖는 물질도 전기나 광학 장치의 얇은 필름 제조에 적용가능성이 높으며, 나노기공성의 열차단코팅이나 아미노산 및 다른 생체분자들의 선택적 흡착제 개발에도 적용될 수 있다. 이 선택적 흡착제는 분자각인기법(molecular imprinting technique)을 사용하여 성공한 것으로 이 기법으로 분자열쇠에 적합한 인공의 자물쇠를 만드는 것이 가능해졌다. 이와같은 개념은 바이오센서 개발이나 효율적인 물질 전달 시스템을 개발하는 식품산업에 유용할 수 있다.

V. 혁신적인 전달체(Delivery Vehicles)

전달시스템이 효과적이기 위해서는 캡슐에 싸인 유효성분들이 적정부위까지 잘 운반되어야만 시간에 따라서도 체내에서 농도가 일정하게 유지되며, 도달하기 전에 분해되어 버리는 현상 등을 막을 수 있다. 기초의 전형적인 캡슐화시스템보다 나노입자와 나노구(nanosphere)가 캡슐화와 물질방출(encapsulation and release) 효율을 높여주기 때문에 매우 주목받고 있다. 즉, 기초의 캡슐화보다 훨씬 적은양이 순환계내에 투약되어도 약효가 충분하기 때문이다.

Roy 등은 DNA와 키토산의 복합 코아세르베이트(coacervate)가 유전자치료와 백신 개발에서 전달체로 사용될 수 있음을 보여 주었다. 그들은 쥐를 이용하여 땅콩 알레르기 유전자에 대한 면역화 시험을 실시하였다. 결과는 DNA로 기능성화된 나노입자들을 경구투여 방법을 사용해서도 전세계의 수많은 소비자들이 고통받고 있는 식품 알레르기를 효과적으로 치료할 수 있다는 놀라운 것이었다.

전달시스템의 효율은 dendrimer로 코팅된 입자들을 사용하면 더 증가된다. Dendrimer란 규칙적이고 곁가지가 긴 3차원 구도를 갖는 거대분자(macromolecule)로서 많은 유효기들을 갖고 있기 때문에 여러가지의 기능성을 나타낸다. 즉 센서, 촉매, 서방형 방출(controlled release) 및 특정부위 전달(site-specific delivery)의 작용기 등에 유용하게 활용될 수 있다.

코킬레이트(cochleate)라고 불리는 매우 안정하고 정교한 전달시스템은 미국 뉴저지주에 있는 BioDelivery Sciences International 사에 의해 개발되어 특허 출원되었다. 코킬레이트란 인지질과 2가양이온의 복합침전물로서 자연에서 생성되는 물질들로 구성되어 있다. 이들은 크고 연속적이고 나선형으로 감겨있는 고체지방 이중막으로 구성된 다층막 구조를 갖고 있다.

코킬레이트는 목표가 되는 세포부위에 도달하면 자신의 바깥 층막을 녹여서 목표세포에 내용물을 정확히 전달시켜 준다.

코킬레이트는 환경변화로 부터도 안정하다. 코킬레이트가 갖는 고체의 다층구조가 주위환경으로부터 코킬레이트가 분해되는 것을 막아준다. 심지어는 위속에서 위산 및 소화효소에 대해서도 안정하게 해준다. 따라서 비수용성 화합물이나 단백질 및 펩타이드 약물, 분자량이 큰 소수성 화합물들과 같은 많은 생리활성 물질들의 캡슐화와 전달에 사용될 수 있다. 즉, 가까운 장래에 이러한 시스템이 기능성 식품고분자들을 캡슐화시켜서 목표세포에 까지 전달하고 유효물질을 방출시키는데 활용될 수 있을 것이다.

나노수준에서 문제를 나누는 것도 식품분자들의 기능성을 개선시키거나 제품의 품질을 향상시킬 수 있는 가능성을 활짝 열어놓는 것이다. Dziechciaruk 등은 수용액상에서 콜로이드체처럼 행동하는 전분성 나노입자를 개발했다. 이 입자들은 식품의 혼합이나 유화, 식품에 독특한 물성을 부여하거나 또는 페인트, 잉크, 코팅제의 제조같은 비식품분야에도 적용될 수 있다.

VI. 생물학적 안전성을 위한 나노수단들 (nanotool)

나노입자들을 활용하는 또다른 분야는 식품안전 분야에 대한 적용이다. Latour 등은 합성부착성 나노입자(adhesin-specific nanoparticle)를 연구하고 있다. 이 부착성 입자들은 특정세균에 비가역적으로 부착하여 세균이 인체에 영향을 미치지 못하도록 한다.

이 연구는 2가지 형태의 나노입자들을 사용하여 축산물에 존재하는 식중독 병원균들의 감염력을 감소시키는데 목적이 있다. 한가지 형태는 유기고분자(예 : polystyrene)의 자기회합특성을 이용한 것이고, 또 다른 두번째 형태는 특정 세균세포에 대한 부착성을 증가시키는 다당류나 폴리펩타이드로 기능성화된 무기나노입자들을 이용하는 것이다.

식품과 물공급에서 생물학적 안전성은 매우 중요하다. 생물학적 유해 요소들을 더 신속하고 정확하게 고감도로 검출할 수 있는 새로운 기술개발이 요구되고 있는 실정이다. Fellman은 탄저병, 천연두, 폐결핵과 같은 생물학적 질병과 광범위한 유전성 및 병원성 질병을 검출하는데 사용될 수 있는 삼각형의 프리즘모양(triangular prismatic shape)을 갖는 나노입자들을 제조하는 방법을 개발하고 있다.

생물학적 병원균들을 신속하게 검출하는 칩형태의 검지법은 식품가공 및 유통분야에서 대단한 응용 잠재력을 갖는 새로운 영역이다. 즉, 공기전염성이나 수인성 세균, 바이러스, 기타 항원들에 대

한 노출로부터 식품에 조기경보를 내릴 수 있는 것이다. 고도의 다공성 유기실리카지지체(organosilicate support)로 제조되는 간단하고, 연계기가 필요없는 고성능 DNA 칩(microarrays)을 제조하는 새로운 방법이 Rutgers 대학내 Huang의 연구실에서 연구중이나, DNA 칩은 고체 지지체에 짧은 길이의 DNA 염기서열(sequence)들이 배열되어 있는 것으로서, 병원균으로부터 추출된 특정한 DNA의 염기서열을 밝혀내기 위해서 그 염기서열에 대응되는 염기서열(hybridization)이 배열되어 있다. 그 칩에 있는 형광라벨된 특정 DNA에 결합되는 DNA 서열을 밝혀내는데는 형광현미경적 방법이 사용된다(Fig. 3).

식품산업에서 발생하는 많은 미생물학적 안전성 문제들은 식품가공설비와 그 표면들이 미생물과 포자들로 오염되어 있기 때문이다. 표면오염과 관련된 가장 중요한 특성중의 하나가 부착성이나 이 부착성은 Bacillus와 같은 미생물이 갖는 주요한 독성 요소 중의 하나로 알려져 있다. 포자 부착성을 정량화하는 것은 식품산업에서 아주 의미있는 문제이다. 단분자기구(single molecule mechanics)를 분석할 수 있는 도구를 개발함으로써 정량화가 쉬워졌다.

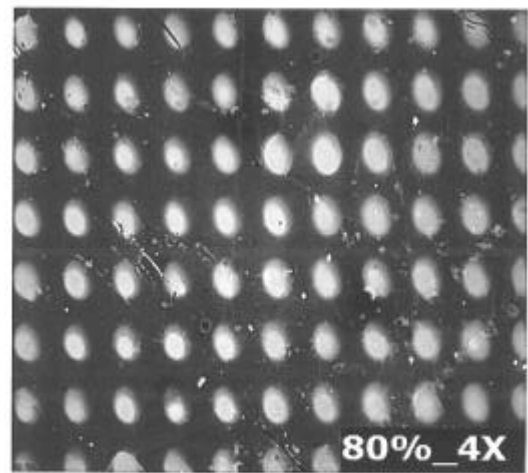


Fig. 3. Fluorescence microscopy image of microarrays of DNA from *Escherichia coli* D157: H7 patterned on a porous polymeric surface.

Bowen 등은 *Aspergillus niger*의 부착성을 연구하기 위해서 원자현미경(AFM Atomic Force Microscopy)을 사용했는데, 식품가공장비에 들러 붙어 스케일층을 형성하는 세균성 다당류의 구조 정보를 얻을 수 있다. Carnesano와 Logan은 음으로 하전된 세균과 AFM 실리콘질산염팁(silicon nitride tip) 사이의 전기적 척력(repulsion)에 미치는 pH, 이온강도, 세균표면 고분자들의 영향을 검출하는 AFM 방법을 개발했다. 세균표면의 고분자들이 가장 영향을 크게 미치는 요소로 밝혀졌다.

오염된 장비의 표면과 미생물사이의 상호반응을 이해하면 세균의 부착을 막을 수 있는 물질을 설계할 수 있다. 연구자들은 벌써 특정한 환경에서 방출되어 오염된 미생물들을 사멸시키는 항생물질을 함유한 새로운 형태의 자가청소물질을 개발하는 연구를 하고 있다.

개발하는데 시간이 좀 걸릴지라도 이러한 해결책들은 식품산업에 매우 유용하다. 표면의 오염물질을 제거시키는 것이 해로운 미생물과 싸우는 가장 중요한 수단이기 때문이다. 그러나 기존의 세정 및 살균제로 사용되는 물질들의 부식성 때문에 민감한 장비들에 대한 사용은 적합치 못하였다.

Baker와 동료들은 지방층과 수용액층을 혼합하여 나노에멀전을 만드는데 고속교반기를 사용하는데, 이 장비를 안전하게 세정하고 살균시키는 데는 적합한 방법이다. 나노에멀전은 400-800 μ m의 직경을 갖는 오일 방울들로 구성되어 있는데, 이 작은 에멀전들이 세균과 세균포자, 바이러스, 곰팡이포자와 같은 다양한 병원균들의 세포막에 결합하여 결국 막을 파괴시키는 역할을 한다.

VII. 생물분자들의 특성파악 및 조작

나노수준에서 물질과 단일고분자들의 특성을 파악할 수 있는 기법을 개발한 것은 지난 10년간 과학기술 중에서 가장 의미있는 진보적 발전이다.

강력한 현미경이 생물고분자의 구조 및 구조를 안정화시키는 분자간 및 분자내 결합력을 밝혀내

는데 크게 기여했다. AFM과 Friction Force Microscopy (FFM)는 생물고분자의 부분적 유리전이상태(glass-transition), 나노레올로지 및 나노마찰성(nanotribological) 특성을 측정하는 것을 가능하게 하고 있다. 단일 사슬의 단백질과 다당류 및 DNA의 레올로지 특성은 AFM을 사용하여 연구되어 왔다. 그 결과 과학자들은 DNA 전사 및 단백질 구조형성(folding)에 관련되는 기작들로서 시동단백질 (motor protein)이 어떻게 작동하는지, 약물이 인체내에서 목표분자에 어떻게 작용하는지 이해하는데 큰 진전을 이루었다.

AFM은 전분(Fig. 4)과 단백질의 구조적 특성을 밝히는데 활용되어 왔으며, 하일란(hylan), 잔탄검, 카파카라기난, 젤란, 콜라겐과 같은 고분자들의 겔 형성 기작과 에멀전과 마이크로에멀전에서 계면활성제들의 계면분포와 반응에 대한 기작을 훨씬 더 잘 이해할 수 있게 도와주고 있다.

이러한 연구들은 식품과 식품구성성분들의 기능성과 품질, 저장 안정성 등을 조절하는데 중요한 역할을 한다.

AFM이 가장 많이 응용되는 것중의 하나는 섬세한 생물질들의 형태를 비파괴적으로 분석하는 것이다. Rutgers 대학의 Kokini 그룹은 식품가능한 고분자 필름과 코팅젤의 나노크기 특성을 밝히는데 AFM을 활용하고 있다. AFM 분석으로 Zein 필름의 표면 거칠기에 대한 나노크기의 형태적 세부사항들을 알아내어 이 필름의 차단막(barrier)으로서의 잠재력을 통찰하게 되었다(Fig. 5).

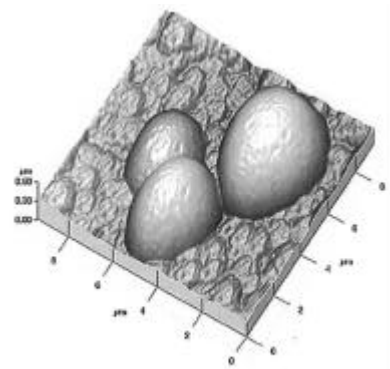


Fig. 4. Surface topography of triticale starch granules. From Juszczak (2003)

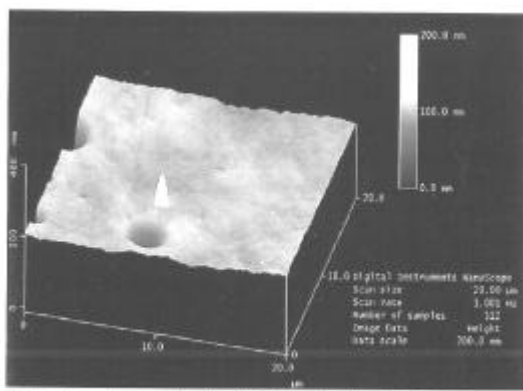


Fig. 5. Surface topography of a zein film analyzed by Atomic Force Microscopy.

나노크기 측정은 필름표면의 경도, 탄성, 부착성 등에 대한 주위 환경요소들의 영향을 정량화할 수 있게 해주기 때문에 고기능성의 식용가능한 식품 포장재를 개발하는데 매우 유용한 기법이다.

AFM은 또한 다상식품(multi-phase food)의 기계적 특성과 각상(phase)들의 행동을 감지하는 도구로 사용될 수도 있으며, 식품성분의 적합성을 미리 평가하는데도 사용될 수 있다. 이러한 것들은 나노기술과 그 수단들이 식품산업과 연구에 얼마나 유용한지를 보여주는 몇가지 예에 불과하다. 수년내에 수많은 새로운 응용분야가 개발될 것이며, 이 원고가 쓰여지는 이 순간에도 새로운 응용분야가 개발되고 있을 것이다.

VIII. 거대한 영향을 미치는 잠재력

어떤 기술이 장기적으로 어떻게 영향을 미칠지 예측하는 것은 매우 어렵다. 특히 나노기술은 더욱 어렵다. 유전공학과 같은 거의 모든 새로운 기술에 나노기술이 응용되어 너무 과도한 조작이 가능해지지 않을까지하여 일부 사람들은 두려워하고 있다. 우리는 이 조작과 조절이 현명하게 사용되리라는 것을 믿고 있으며, 나노기술이 과학혁명에 얼마나 거대한 영향을 미칠지에 대해서는 논란이 많다. 따라서 식품과학기술은 나노기술을 인류복지 위한 유용한 수단으로 활용, 승화시켜야 한다.

참고문헌

1. Bandyopadhyaya, R., Nativ-Roth, E., Feggy, O., and Yerushalmi-Rozen, R. 2002. Stabilization of individual carbon nanotubes in aqueous solutions. *Nano Letters* 2: 25-28.
2. Bodmeier, R., Chen, H.G., and Paeratakul, O. 1989. A novel approach to the oral delivery of micro- or nanoparticles. *Pharmaceut. Res.* 6:413-417.
3. Bowen, R., Lovitt, R., and Wright, C. 2000. Direct quantification of *Aspergillus niger* spore adhesion in liquid using an atomic force microscope. *J. Colloid Interface Sci.* 228: 428-433.
4. Gamesano, T.A. and Logan, B.E. 2000. Probing bacterial electrosteric interactions using atomic force microscopy. *Environ. Sci. Technol.* 34: 3354-3362.
5. Cox, D.M. 1999. High surface area materials. In "Nanostructure Science and Technology. A Worldwide Study," prepared under the guidance of the National Science and Technology Council and The Interagency Working Group on NanoScience, Engineering and Technology, ed. R.W. Siegel, E. Hu, and M.C. Roco. Available online at www.wtcc.org/loyola/nano/toc.htm(accessed May 2002).
6. Dagani, R. 2002. Sugary ways to make nanotubes dissolve. *Chem. Eng. News* 80(28): 38-39.
7. Dziechciarek, Y., van Schijndel, R.J.G., Gottlieb, K.F., Feil, H., van Soest, J.J.G. 1998. Development of starch-based nanoparticles : Structure, colloidal and rheological properties. Presented at Meeting of Dutch Society of Rheology, Oct, 22. Abstract available online at: www.mate.tue.nl/nrv/ede/dziechciarek.html(accessed June 2003).
8. Fellman, M. 2001. Nanoparticle prism could serve as bioterror detector. Available online at

- <http://unisci.com/stories/20014/1204011.htm>(accessed May 28, 2002).
9. Gould-Fogerite, S., Mannino, R.J., and Margolis, D. 2003. Cochleate delivery vehicles: Applications to gene therapy. *Drug Delivery Technol.* 3(2): 40-47
 10. Huang W., Taylor, S., Fu, K., Lin, Y., Zhang, D., Hanks, T.W., Rao, A.M., and Sun, Y.P. 2002. Attaching proteins to carbon nanotubes via dillimide-activated amidation. *Nano Letters* 2: 311-314.
 11. Jelinski, L. 1999. Biologically related aspects of nanoparticles, nanostructured materials and nanodevices. In "Nanostructure Science and Technology. A Worldwide Study," prepared under the guidance of the National Science and Technology Council and The Interagency Working Group on NanoScience, Engineering and Technology, ed. R.W. Siegel, E. Hu, and M.C. Roco. Available online at www.wtec.org/loyola/nano/toc.htm (accessed May 2002).
 12. Juszczak, L. 2003. Surface of triticales starch granules B NC-AFM observations. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, Food Science and Technology, Volume 6, Issue 1.* Available online at <http://www.ejpau.media.pl/series/volume6/issue1/food/art08.html>(accessed November 2003).
 13. Kingsley, D. 2002. Membranes show pure promise. *ABC Science Online*, May 1. Available online at www.abc.net.au(accessed August 2003).
 14. Latour, R.A., Stutzenberger, F.J., Sun, Y.P., Rodgers, J., and Tzeng, T.R. Adhesion-specific nanoparticles for removal of *Campylobacter jejuni* from poultry. CSFEES Grant (2000-2003), Clemson Univ., S.C. www.clemson.edu (accessed June 2003).
 15. Lee, S.B. and Martin, C.R. 2002. Electromodulated molecular transport in gold-nanotube membranes. *J. Am. Chem. Soc.* 124: 11850-11851.
 16. Lerner, E.J. 2000. Nano is now at Michigan. *Medicine at Michigan*, Summer issue, pp. 14-21. Available at www.medicineatmichigan.org (accessed June 2002).
 17. Moore, S. 1999. Nanocomposite achieves exceptional barrier in films. *Modern Plastics* 76(2): 31-32.
 18. Pompeo, F. and Resasco, D.E. 2002. Water solubilization of single-walled carbon nanotubes by functionalization with glucosamine. *Nano Letters* 2: 369-373.
 19. Quarmley, J. and Rossi, A. 2001. Nanoclays. Opportunities in polymer compounds. *Ind. Minerals* 400: 47-49, 52-53.
 20. Ramström, O. 1996. Molecular imprinting technology. A way to make artificial locks for molecular keys. Homepage of Olof Ramström, Center for Chemistry and Chemical Engineering, Lund University, Sweden. Available online at www.smi.tu-berlin.de. (accessed June 2003).
 21. Rouhi, M. 2002. Novel chiral separation tool. *Chem. Eng. News* 80(25): 13.
 22. Roy, K., Mao, H.Q., Huang, S.K., and Leong, K.W. 1999. Oral gene delivery with chitosan-DNA nanoparticles generates immunologic protection in a murine model of peanut allergy. *Nature Med.* 5: 387-391.
 23. Stucky, G.D. 1997. High surface area materials. Proceedings of the WTEC Workshop on R&D Status and Trends in Nanoparticles, Nanostructured Materials, and Nanodevices in the United States. Available online at http://www.wtec.org/loyola/nano/US_Review/07_03.htm(accessed September 2003).
- <출처: Food Technology, 52(12), 24-29, 2003>