Food Engineering Progress
Vol. 8, No. 1. pp. 9~16 (2004.2)

총 설

식품생물 산업기술의 새로운 미래를 선도하는 나노기술

김종태 · 김철진 · 조용진 · 전보연
한국식품개발연구원 시스템공학연구팀

Nanotechnology as a New Frontier in Food and Bioindustry in the Future

Chong-Tai Kim, Chul-Jin Kim, Yong-Jin Cho and Bo-Youn Chun
Biosystems Engineering Team, Korea Food Research Institute

Abstract

Nanotechnology represents a new frontier in science and technology with long term goals and benefits. Nowadays, nanotechnology is producing many revolutions and applications such as quantum computing, surface and materials modification, novel separation and sensing technologies, and human biomedical replacements. These new techniques are being introduced in food and bio filed. In this review, the status and trends related to nanocomposites, nanoparticles, nanotubes, delivery vehicles and biosafety were reviewed. The situation of funding of nanotechnology research in USA, Japan and Korea is also summarized.

Key words: nanotechnology, nanocomposites, nanoparticles, nanotubes, delivery vehicles, biosafety

서 론

나노기술(nanotechnology)은 최근 양자 컴퓨터, 표면 및 재료의 변형, 고도분리, 센서기술, 대체의약 등과 같은 영역에서 응용되거나 연구개발이 지속적으로 진행되고 있으며, 앞으로도 과학기술 전반에 걸쳐 다양한 형태로 발전할 가능성을 가진 혁명적인 기술로 다가오고 있다. "Nano"는 10^{-9}을 나타내는 단위로서 1 nm는 10억분의 1미터를 나타내는 물리적 의미를 갖는데, International Technology Research Institute에서 발간된 "Nanostructure Science and Technology"에 관한 보고서(Siegel *et al.*, 1998)에서 나노기술을 다음과 같이 정의하고 있다.

.....direct control of materials and devices on a molecular and atomic scale, including fabrication of functional nanostructures with engineered properties, synthesis and processing of nanoparticles, supramolecular chemistry, self assembly and replication techniques, sintering of nanostructured metallic alloys, use of quantum effects, creation of chemical and biological templates and sensors, surface modification and films.

이러한 관점에서 현재까지의 나노기술은 주로 전자, 자동화, 초전도물질 및 의약품과 같은 생명과학 분야에 응용되어 다양한 연구개발이 수행되고 있으며, 추진전략은 나노 수준의 구조물을 제조하기 위하여 불균일한 재료를 분쇄, nanolithography, 정밀공학 등을 이용하여 분체화하는 하향식 방식과 자기규합(self-assembling)이 가능한 원자 또는 분자를 이용하여 나노구조물(nanostructures)을 제조하는 상향식 방식으로 나눌 수 있다. 최근 상향식 방법에 의하여 추진되는 전략은 특히, 정밀한 조절이 가능한 구조와 특성을 갖는 강인한 구조물, 높은 표면적을 갖는 입자, 활성성분을 포접하는 물질, 환경적인 요인에 의하여 색상을 변하게 하거나 자기세정 기능을 갖는 우수한 코팅 물질 등과 같은 것을 목

Corresponding author: Chong-Tai Kim, Biosystems Engineering Team, Korea Food Research Institute, Songnam 463-746, Kyonggido, Republic of Korea.
Phone: 031-780-9138, Fax: 031-780-9257
E-mail: ctkim@kfri.re.kr

표로 하고 있다. 합성과 조합기술은 액상, 고상 및 기상으로부터 전구체 공급과 물리화학적 전이방법을 통하여 최종 물질의 구조를 유지하면서 나노구조물의 구성블럭으로 융합되며, 이때 화학적 반응성 및 물리적 밀집도에 큰 영향을 받으며, 나노구조물을 제조하는 다양한 기술적 방법을 Fig. 1에 나타내었다. 본 고에서는 미래산업에 있어서 무한가치를 지니며 새로운 기술로 등장되고 있는 나노기술의 식품 및 생물산업 관련분야에서의 현재까지의 연구개발과 발전현황에 대하여 살펴보고, 향후 전망에 대하여 논하였다.

나노기술의 응용분야

표면개질(surface modification)

나노기술에 의한 표면변형에 의하여 표면의 깊이가 1~100 nm인 범위에서 표면전하, 전도도, 공극률, 표면거칠기, 흡습능력, 충돌저항, 마찰, 물리적 및 화학적 반응성, 생물기관과 조직과의 친화성 등을 조절할 수 있다. 개질된 표면특성은 물의 정화과정 시 곰팡이, 박테리아, 해조류 등에 의하여 발생할 수 있는 fouling의 최소화, 분뇨처리 공장과 식품제조공장에 있어서 발생하는 biomass의 처리, 식품 및 주류산업에 있어서 오염물질과 이취의 제거 및 조절 효과가 있다. 또한, 표면개질은 양조공정에서 발효증대와 생물공학산업에서의 공정제어 및 탄화수소 원료의 연료 대체용 생물반응공정의 개선 등에 효율적으로 활용된다.

분리기술(separation technologies)

나노수준(nanoscale) 공학에 기초한 분리기술은 고염도 지역에서의 순수한 물의 공급에 있어 발생하는 biofouling의 최소화, 중금속 물질의 분리, 오염된 토양과 수로의 복구, 대기오염 감소, 탄화수소계 연료의 대체유발, 의약품 산업에서의 의약전달 메커니즘을 위한 조합기술 등에 응용된다.

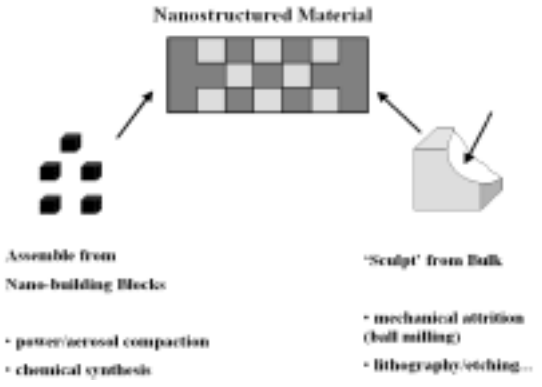

Fig. 1. Nanostructure synthesis and assembly approaches.

감지기술(sensing technologies)

감지기술은 인간과 가축과 관련한 개발에 있어서 유전자 실험, 혈액은행, 혈액학, 미생물 적용, 항생제효능 검색, “in vitro” 또는 “in vivo” 진단을 위한 생물학적 연구를 나노미터 수준에서 설계 및 최적화 함으로써 큰 장점을 제공한다. 또한, 고도의약선별을 위한 고도의 정량분석, 약리속도학 연구기술, 임상과 동물실험 및 독성학 선별, 환경 감시응용의 개발, 성장 호르몬의 농업적 실험을 위한 응용, 식품에 있어서 살충제 또는 다른 오염물질 정량 등과 같은 다양한 분야에 적용할 수 있다.

인간생체의학 대체(human biomedical replacements)

인공심장(shunts and stents), 인공피부, 지능형 밴드, TIDDS(transdermal and implant drug delivery system), 콘택트 및 안내(intra-ocular) 렌즈, 박동원(pacemaker), defibrillator, cochlea implants 등이 대표적인 연구개발 대상이며 상업적 활용 가능성이 있으며, 향후 인간의 장기기능 대체품 개발이 가능한 시점의 경계선에 위치해 있다고 판단된다.

식품 · 생물 나노기술

현재까지 식품 · 생물과학 분야에서 나노기술의 이용과 파급정도는 충분한 연구개발과 정보의 부재로 인하여 미미한 수준이며, 현재 진행되고 있는 속도로 지속적으로 발전이 이어진다면 가까운 시기에 광에너지에 의하여 작동되는 자기복제 나노로봇(self-replicating nano-robots)이 개발되어 이동과 주변환경 감지 및 원자수준의 물질은 취급할 수 있을 것으로 기대가 되고 있다. 이러한 나노 로봇이 개발되면 혈류내에 순환하면서 입력된 프로그램에 의해서 DNA의 교체 또는 변환, 손상된 세포의 치료, 감염원과 암세포 및 노화세포의 제거, 인간생명의 연장을 비롯하여 건강한 삶을 유지시킬 수 있는 시대가 올 것이다. 또한 식품 나노기술의 최종적인 목표는 원자 수준에서의 합성을 통하여 식량자원의 무한한 생산을 이룰 수 있는 나노기술을 개발함으로써 기

아를 해결하는 것이 포함된다.

식품·생물산업에 있어서 나노기술의 응용은 식품시스템 전반에 걸쳐 획기적인 변화를 일으킬 수 있을 것으로 예측되고 있다. 즉, 고도의 농업 및 식품안전 시스템, 질병처리 전달방법, 분자 및 세포생물학의 도구, 병원미생물의 감지 및 환경보호 등과 같은 분야에 있어서 파급효과가 크다고 판단된다. 다음은 식품분야에서 나노기술의 이용기술에 관한 것을 몇 가지 살펴보면, 먼저 나노센서(nanosensor)는 병원체와 오염물질을 감지하여 식품의 제조, 가공 및 선적과정에서 안전성을 확보할 수 있는 기술이다. 그리고 특수 나노장치는 특정식품의 환경변화와 유통단계를 정확하게 추적 및 기록할 수 있는 기술이며, "지능 시스템(smart system)"으로 일컫는 기술은 식품의 통합감지(integrated sensing), 분산화(localization), 기록관리(reporting), 원격조정 등의 기능을 제공함으로써 식품제조공정과 운송유통 단계에서의 효율성과 안전성을 증대시킬 수 있다.

식품·생물산업에 있어서 주요한 4개 분야 즉, 마이크로 및 나노수준 가공(nanoscale processing), 제품개발, 안전식품을 위한 방법의 설계와 계측장비 및 바이오보안(biosecurity)으로 구분할 수 있으며, 이러한 것들은 나노기술에 의하여 크게 발전될 수 있을 것으로 기대되며, 새로운 기능성 소재의 개발이 목표로서 이와 같은 식품·생물산업과 나노기술의 관계를 Fig. 2에 나타내었다.

나노기술의 기술적인 방법은 식품과학자 및 기술자가 식품성분이 구조화되고 각각의 성분이 어떻게 상호작용을 하게 되는지 이해를 하는 것을 도울 수 있으며, 따라서 식품분자를 정확하고 손쉽게 다룸으로써 새롭고 건강에 유익하고 기호성이 있는 안전한 식품을 개발할 수 있다.

나노컴포지트(nanocomposites)

나노구조의 재료는 독특한 특성을 나타내기 때문에 식품의 제조, 포장 및 저장 중 결정적인 영향을 미칠 수 있는 새로운 기능의 물질을 개발하는 데 폭 넓은 기회를 제공한다. 즉, 나노구조화 기술은 기존의 재료에 물리적 특성, 초전도성, 생체시스템 내에서 활성성분과의 결합 또는 효율적인 전달체로의 기능을 부가함으로써 제한된 환경적 영향과 저비용으로 가치를 향상시킬 수 있다. 최초의 나노컴포지트는 유기물질(단백질, 펩타이드, 지질)과 무기물질(탄산칼슘)의 상호반응에 의하여 거칠기(toughness)를 증가시키는 공정인 biomineralization에 의하여 시작되었다. 나노컴포지트 제품의 대표적인 것이 감자전분과 탄산칼슘으로 조성된 거품형태의 포장재료로서 무게가 가볍고 생분해성인 특징을 갖기 때문에 기존의 폴리스티렌을 대체할 수 있어 즉석식품(fast food)의 포장재로 널리 사용되고 있다(Stucky, 1997).

나노구조를 갖는 재료는 천연물질을 원료로 제조할 수가 있는데, 화산석의 일종인 montmorillonite는

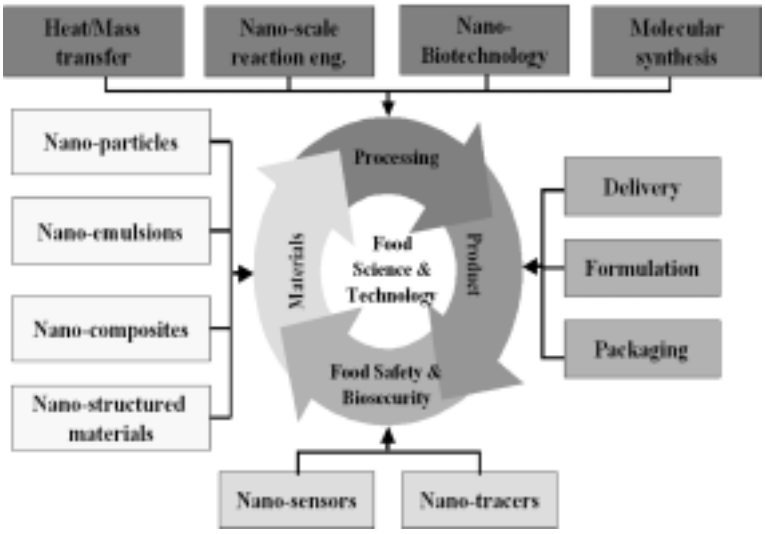

Fig. 2. Application matrix of nanotechnology in food science and technology.

나노미터 두께의 판상재로서 nanoclay의 제조에 많이 사용되고 있으며(Quarmley and Rossi, 2001), 미국의 Nanocor(주)는 플라스틱에 montmorillonite를 3~5% 첨가하여 가볍고 강도와 내열성이 있을 뿐만 아니라 산소, 이산화탄소, 수분 및 휘발성 성분의 차단특성이 큰 기능성 플라스틱 재료를 개발하여 다양한 식품포장 분야에 활용하고 있다. Nakashima *et al.*(1991)은 Al_2O_3-SiO_2로 구성되어 단일방향 극세기공을 갖는 SPG(Shirasu porous glass) 막을 개발하여 O/W, (W/O)/W, 및 (W/O)/W 유화제조 시스템에 적용하여 마이크로입자(microspheres)를 제조할 수 있는 기술을 검증하였으며, Yamazaki *et al.* (2002)은 SPG 막과 PTFE(polytetrafluoroethylene) 막에 의한 유화공정을 비교하는 연구에서 SPG 막 공정에 의하여 마이크로 혹은 나노미터 수준의 좁은 입자분포를 갖는 O/W 에멀젼을 제조할 수 있음을 보고하였다.

나노입자(nanoparticles)

의약분야에서는 신약개발뿐만 아니라 기존의 약물의 독성은 최소화하고 효율은 최대화하려는 연구가 지속되고 있는데, 이러한 점에서 약물전달시스템(Drug Delivery System, DDS)은 신약개발에 대한 비용보다 훨씬 저렴하면서 효과적인 치료효과를 나타내는 것으로 알려져 있다. 특히, 고분자는 생체적합성, 생체분해성, 화학적·생물학적 무독성, 독특한 물성을 지닌 특성 때문에 DDS용 재료로 활용하는 것에 대한 많은 연구가 이루어지고 있으며, 이들 고분자의 다양한 화학적 결합방식을 이용하여 나노입자의 개발연구도 급속하게 발전되고 있다. 나노입자는 최종목적으로 하는 의약전달에 있어서 리포좀의 입자 크기는 물론 저장기간 연장 및 리포좀보다 많은 종류의 의약을 포접하는 것과 같은 다양한 장점과 특수한 기능을 제공하는데, 친유성 고분자로 제조된 나노입자는 친유성 의약을 캡슐화하지만 의약을 함유한 hydrogel nanoparticles에 대한 연구의 시도는 드물게 보고되고 있다(Mitra *et al.*, 2002). 나노입자는 인체에 쉽게 용이하게 침투할 수 있으며, 순환을 통하여 각기 다른 신체 부위에 전달되며, 특히 100 nm 이하의 친수성 표면을 갖는 나노입자는 혈액내에서 더욱 긴 순환시간을 갖는 것이 밝혀졌다(Allemann *et al.*, 1993).

한편, 본 고의 저자들은 키토산(chitosan)과 단백질(gelatin, SPI, casein, gluten)을 이용하여 키토산-단백질 나오입자 제조기술 개발과 제조된 나노입자를 활성성분의 품질안정화에 응용하는 연구를 실시하였다(Kim *et al.*, 2003). 단백질-다당류 나노입자는 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 SPG 막 시스템을 이용하여 막 모듈(membrane module)의 공극 크기와 압력, 유화제 첨가량 등의 변수에 따른 제조특성을 분석하였다. SPG 막 공정에 의한 에멀젼(emulsion) 입자의 크기는 모듈의 공극 크기가 0.3 μm 모듈인 경우 유화제의 첨가량이 5, 7, 9%로 증가함에 따라서 고속교반에 의하여 제조한 에멀젼에 비해 각각 68.6, 56 및 54.2%, 0.5 μm 모듈인 경우는 35.7, 26.4

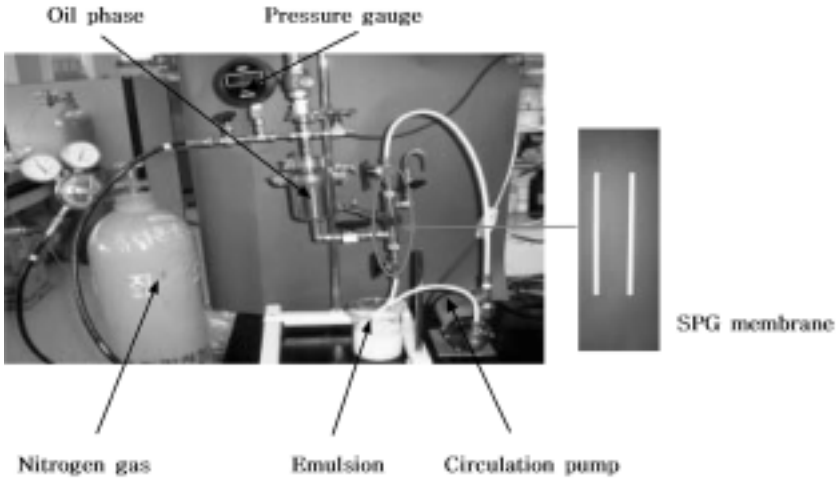

Fig. 3. Apparatus for the preparation of nanosphere emulsion.

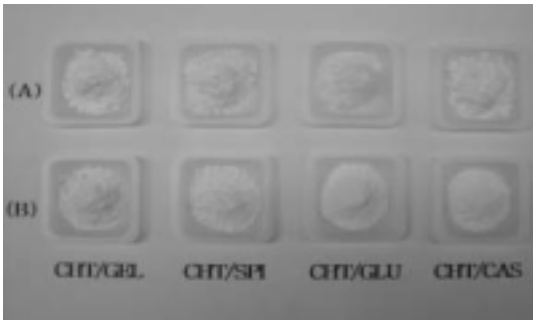

Fig. 4. Photograph of chitosan-protein nanospheres.

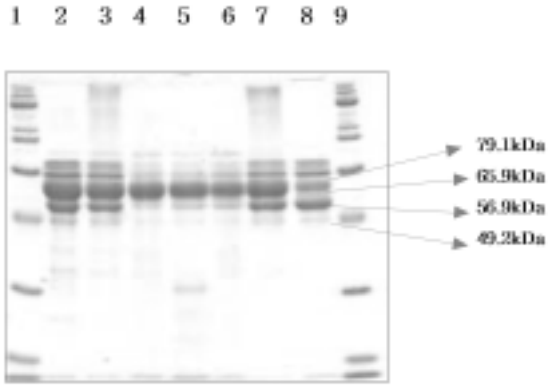

Fig. 5. SDS-PAGE patterns of water soluble protein of royal jelly complexed in chitosan-protein nano- and microspheres.
Lane 1, marker standard; lane 2, CHT/GEL/RJ; lane 3, CHT/SPI/RJ; lane 4, CHT/CAS/RJ; lane 5, CHT/GLU/RJ;, lane 6, CHT/GEL/RJ HOMO; lane 7, CHT/GLU/RJ HOMO; lane 8, RJ control; lane 9, marker standard.

및 13.3% 작게 형성되었으며, 에멀젼의 크기와 유화제의 첨가량과의 높은 상관관계를 보였다(R^2=0.93~0.99). 제조된 4종류의 단백질-다당류 나노입자(Fig. 4)의 열전이 특성은 로얄젤리를 포접시킨 경우 220 부근에서 흡열곡선을 나타내었으며, 단백질 종류에 따른 열전이 특성의 차이는 키토산과 단백질의 유화반응 기작과 깊은 상관성이 있을 것으로 판단되었다. 균질기를 이용하여 키토산/젤라틴과 키토산/글루텐에 로얄젤리를 포접시킨 대조구 마이크로입자와 SPG 막 공정에 의하여 제조한 이들의 나노입자의 미세구조 관찰시 SPG 막에 의하여 제조한 나노입자의 경우 미세입자가 현저하게 작은 구조로 형성되어 로얄젤리 성분이 단백질-키토산 고분자 복합체내에 존재하는 것을 알 수 있었다.

키토산-단백질-로얄젤리 나오입자의 SDS-PAGE 띠 형태를 관찰한 결과(Fig. 5), SPG 막에 의하여 제조한 나노입자는 분자량 50,000과 65,000 이상의 띠가 크게 사라졌으나, 분자량 55,000~57,000 범위에서 강력한 항균기능을 갖는 royalisin 단백질의 띠가 존재하는 것을 볼 때 키토산-단백질-로얄젤리 나오입자의 특성은 단백질 종류에 따라서 키토산과 로얄젤리와의 상호반응에 좌우되는 것으로 예측되었다.

나노튜브(nanotubes)

나노튜브는 1991년 일본전자주식회사(NEC)의 현미경학자인 Sumio Iijima가 graphite sheets를 “winding”에 의하여 벌집형태의 구조를 길고 얇은 형태로 제작하여 안정하고 강인하며 유연성이 있는 구조물이 최초의 개발제품이다. 나노튜브는 단위 무게에 대하여 강철보다 10～100배 강한 섬유로서, 기존의 건물구조물, 기어, 베어링, 자동차 부품, 의료용 재료, 스포츠 장비, 식품산업의 장치 등에서 사용되고 있는 세라믹, 알루미늄 및 금속을 대체하여 파열 및 열에 대한 저항성이 우수한 나노튜브-강화 컴포지트를 개발하기 위한 기초재료로 사용하고 있다.

최근 단백질의 결정화와 바이오반응기 및 바이오센서의 제작 등과 같은 생물학적 목적의 탄소 나노튜브의 이용에 대한 연구가 보고되었으며(Huang *et al*., 2002), 생물학적 적용시 수용액상에서 탄소 나노튜브의 불용성을 해결하는 것이 극복해야 할 과제로 대두되고 있다. Dagani(2002)와 Stobinski *et al*.(2003)은 수용성 요오드-전분 용액상에서 단일벽 탄소 나노튜브(single-wall carbon nanotubes, SWNT)를 용해하였으며, Bandyopadhyaya *et al*.(2002)은 gum arabic을 사용하여 유사한 결과를 얻었다. 한편, SWNT의 수용화를 glucosamine 및 bovine serum albumin으로 기능화하여 가능하게 한 연구보고가 있는 데(Pompeo and Resasco, 2002; Huang *et al*., 2002), 나노튜브에 glucosamine의 grafting은 나노튜브에 관여된 카르복실기에 acyl chloride를 생성되게 함으로써 가능하였다. 탄소 나노튜브에 관능기를 grafting하는 것은 건강과 관련한 분야에 응용시 매우 유용한데, DNA 배열에 나노튜브를 연결하는 것은 암세포중 단백질에 특이적으로 결합시킬 수 있는 것이며, 동일한 나노튜브의 다른 부분에 세포독을 grafting하는 것은 종양세포를 목표로 하고 파괴시킬 수 있도록 “유도미사일”을 공급하는 것으로 설명할 수 있다.

수송차량(delivery vehicles)

나노입자는 기존의 캡슐화 시스템에 비하여 캡슐화 및 방출특성이 뛰어나며 순환시스템에 직접 소량 투입하여 목적을 달성할 수 있기 때문에 이용 및 개발에 대한 새로운 관심이 집중되고 있다. Banerjee *et al.*(2002)은 AOT(sodium bis(ethylhexyl) sulfosuccinate)/n-hexane 역마이셀 시스템을 이용하여 100 nm 이하의 교차결합 키토산 나노입자(chitosan nanoparticles, CCN)을 제조하고, 제조된 나노입자의 in vivo biodistribution 실험을 실시하여 CCN이 뼈의 골수에 분포된 결과를 확인함으로써, 의약분야에서 영상화 또는 targeting 목적으로 활용할 수 있음을 증명하였다. Bodmeier *et al.*(1989)은 다가의 다당류, 키토산, tripolyphosphate 등으로 수불용성 의약을 마이크로 또는 나노입자를 제조하여 구강의약 전달체로서의 특성을 연구하였다. 또한, Roy *et al.*(1999)은 인간의 땅콩 알레르기를 면역적 방법으로 예방하기 위하여 coacervation에 의하여 키토산-DNA 나노입자를 제조하여 구강유전자 전달체 및 백신설계 등에 이용하였다. 천연물질로 구성된 phospholipid와 divalent cation의 침전물인 "cochleates"은 매우 안정하고 정확한 전달시스템으로서 미국의 BioDelivery Sciences International사가 개발하여 특허기술을 확보였다. Cochleates는 주변 환경의 공격에 대한 저항성이 있는데, 고체막으로 이루어진 구조는 encochleated 분자의 붕괴 및 열악한 환경에 노출되었을 경우나 위에서의 소화효소에 의한 붕괴를 방지할 수 있는 것이 특징이다(Gould-Fogerite *et al.*, 2003). 한편, Dziechciarek *et al.*(1998)은 수용액상에서 콜로이드와 유사한 특성을 나타내는 전분계 나노입자를 개발하였는데, 식품의 혼합, 유화 및 특정한 레올로지가 요구되는 식품군 등에 활용이 가능하며, 페인트, 잉크 및 코팅 등과 같은 분야에 이용할 수 있다.

바이오안전성(biosafety)

나노기술의 적용과 관심의 폭이 큰 또 다른 분야는 최근 식품산업에 있어서 첨예하게 대두되고 있는 식품안전으로서, 나노입자를 이용한 적용기술의 개발이 시도되고 있다. 흡착특이성 나노입자(adhesion-specific nanoparticles)는 목표 미생물인 박테리아가 숙주에 결합하는 것을 저해함으로서 감염예방을 할 수 있는데, 자기규합(self-assembly) 기능을 갖는 유기 고분자(예, polystyrene)와 무기물 나노입자를 다당류나 고분자 펩타이드로 기능화시키면 목표 박테리아 세포의 고착을 증진시킨다(Latour *et al.*, 2003). 삼각 프리즘 형태의 나노입자를 탄저병, 천연두, 결핵 등을 감지하는데 사용하거나 폭 넓은 유전적 또는 병원성 질병의 감지하는데 적용할 수 있다(Fellman, 2001). 식품산업에 있어 발생하는 미생물학적 안전문제의 대부분은 미생물과 미생물 포자가 가공설비 및 표면에 부착된 것이 원인이 된다. 이러한 표면고착 미생물의 정량적 감지방법을 단분자 역학의 분석이 가능한 도구의 개발로 해결할 수 있는 것에 착안하여 Bowen *et al.*(2000)은 AFM (atomic force microscopy)을 사용하여 *Aspergillus niger*의 고착특성을 연구하고 식품가공 설비에 biofouling 막을 형성하는 박테리아 다당류의 구조정보를 밝혔다. 한편, 나노에멀젼(nanoemulsion)은 지방의 직경이 400~800 μm 크기를 갖는데, 박테리아, 포자, 바이러스, 곰팡이 포자 등과 같이 다양한 병원체의 생체막을 용해하거나 파괴할 수 있는 것으로 알려져 있다.

나노기술의 국가별 연구개발 전략

세계 각국은 나노기술을 선점하기 위하여 경쟁적으로 육성시책을 추진해 오고 있는데, 미국은 1996년부터 1998까지 미국 메릴랜드 소재 Loyola 대학의 World Technology(WETC) 학과내 8명의 요원이 나노입자, 나노구조재료, 나노장치 등의 분야에 본격적인 연구개발에 착수한 이래, 미국의 과학재단에 의하여 미국 전역에 걸쳐 연구를 수행할 수 있는 Air Force Office of Scientific Research, Office of Naval Research, Department of Commerce, Department of Energy, National Institute of Health, National Aeronautics and Space Administration 등과 같은 정부기관을 나노기술 연구기관으로 지정함과 동시에 충분한 연구재원이 지원되고 있다. 특히, 2000년 1월 미국 클린턴 대통령의 National Nanotechnology Initiatives가 발표된 이래 전 세계에서 국가적인 연구프로그램의 시책이 발표 및 추진되고 있으며, 나노기술을 기존의 IT 및 BT와 함께 육성하기 위하여 정부재정 지원이 2001년 423백만 달러, 2002년에는 604백만 달러가 투자되었다. 한편, 미국의 코넬대학 등 6개의 교육 및 연구기관에서는 nano-

biotechnology center를 설립하여 “Nano-Bio-Technology” 라는 용어를 쓰며, APEC 기술예측센터에 의하여 “Nano-Bio-System” 이라는 영역의 동향조사가 포함되었다.

일본은 1995년 일본 과학기술 기본법 130호를 발효한 후 나노기술의 기초연구를 위하여 정부의 공공적인 재정지원을 증가하여 1996년부터 2000년까지 대학, 기업체, 국가연구실 등에 약 1,480억 달러 이상의 예산을 할당하는 것을 목적으로 추진하였다. 그 결과 1996년 과학기술 분야에 지원된 정부예산의 주된 수혜 부서는 문무성으로서 연 233억 달러를 지원받아 과학기술 예산의 46.5%에 달하였으며, 과학기술청은 25.9%, 국제무역산업성은 11.9%의 예산이 지원되었다. 1997년에는 학계가 문무성에서 연구개발을 위한 “grants-in-aid”로서 935백만 달러, 다른 부처에서 239백만 달러의 재정지원을 받았다. 이후, 일본은 n-Plan21을 수립하여 2001년 396백만 달러의 예산지원을 하였다. 한편, 유럽연합은 제 6차 Framework Program을 통해 2003~2006년까지 4년간 총 13억 유로(약 1조4천억 원에 해당)를 투자할 예정이다.

우리나라는 2002년 2월 산업자원부가 “나노기술 시장전망과 산업화방안”에 대한 워크숍에서 산·학·연 협력을 통한 “Nanotechnology Cluster” 조성 추진계획을 발표하였다. 2003년 4월에는 과학기술부, 산업자원부, 정보통신부 등 9개 부처가 참여하는 2003년도 나노기술발전시행계획을 확정하여 “나노기술종합발전계획(2001~2010)에 따라 범국가 차원에서 나노기술의 체계적 육성을 위한 계획수립과 추진이 진행중이며, 2003년도에는 나노핵심·원천기술개발, 연구인프라 확충 및 나노기술 지원체제 등에 총 2,496억 원을 투입하였다.

결 론

나노기술의 세계적인 흐름은 미국, 일본, 유럽연합 등이 협력하여 국가적인 연구개발 프로그램을 수행하면서 주도국으로 선두에 나섰고, 한국을 비롯하여 호주, 캐나다, 중국, 싱가포르, 대만 등이 그 뒤를 이은 새로운 초보국 대열에 막 들어섰다고 얘기할 수 있다. 이처럼 국제적으로 선진국들에 의하여 연구개발이 주도되고 있는 이유는 나노기술의 성장과 기술력에 대한 부가가치가 다른 어느 분야보다 크며 향후 미래산업의 핵심기술로 부상할 가능성이 크기 때문인 것으로 판단된다. 나노기술의 정의는 국가별로 다소 차이는 있지만 본 고의 서론에서 정의한 것과 같이 원자 또는 분자와 덩어리 재료(bulk material) 사이의 중간 크기를 갖는 물질에 의하여 물리적, 화학적, 기계적, 생물학적 특성과 현상, 시스템의 과정 등이 개선되거나 고도의 수준을 부여하는 기술로서, 나노기술에 의한 결과물의 현상학적인 길이와 시간의 척도는 최초의 구조와 비교된다고 할 수 있다. 따라서 0.1~100 nm의 범위에서 원자, 분자, 거대분자 수준의 조절을 통하여 구조, 성분 또는 장치를 새롭게 만들거나 이용할 수 있는 것을 의미한다.

나노기술은 본문에서 전술한 바와 같이 식품·생물 나노기술, 나노컴포지트, 나노입자, 나노튜브, 수송차량, 바이오안전성 등과 같이 다양한 분야에서 접근할 수 있으며, 그와 동시에 응용분야는 틈새기술로 개척할 수 있는 가능성도 충분히 존재하고 있다. 특히, 나노입자 기술이 가장 중요하게 파급될 것으로 전망되는 것은 바이오재료 계면(biomaterial interface) 분야로 예측되기 때문에 식품 및 생물소재에 관련한 나노입자 기술개발은 국내 나노기술의 선구자 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

우리나라도 정부차원의 “나노기술발전시행계획”에 의거하여 나노기술 분야에 대한 연구개발 투자가 전폭적으로 지원되어 나노핵심 원천기술 개발, 나노기술 연구개발 핵심 인프라 확충, 나노기술 연구개발 및 산업화 지원체제의 강화 등과 같은 중점과제가 추진되고 있어 머지 않아 나노기술의 큰 성과가 있길 기대해 본다.

문 헌

Allemann, E., R. Gurny and E. Deolker. 1993. Drug loaded nanoparticles: preparation methods and drug targeting issues. Eur. J. Pharm. Biopharm**. 39**: 173-191

Bandyopadhyaya, R., E. Nativ-Roth, O. Regev and R. Yerushalmi-Rozen. 2002. Stabilization of individual carbon nanotubes in aqueous solutions. Nano Letters **2**(1): 25-28

Banerjee, T., S. Mitra, A.K. Singh, R.K. Sharma and A. Maitra. 2002. Preparation, characterization and biodistribution of ultrafine chitosan nanoparticles. Int. J. Pharm. **243:** 93-105

Bodmeier, R., F. Chen and O. Paeratakul. 1989. A novel approach to the oral delivery of micro- or nanoparticles. Pharm. Res. **6**(5): 413-417

Bowen, R., R. Lovitt and C. Wright. 2000. Direct quantifi-

cation of *Aspergillus niger* spore adhesion in liquid using an atomic force microscope. J. Colloid Interface Sci. **228**: 428-433

Dagani, R. 2002. Sugary way to make nanotubes dissolve. Chem. Eng. News **80**(28): 38-39

Dziechciarek, Y., R.J.G. van Schijndel, K.F. Gotlieb, H. Feil and J.J.G. van Soest. 1998. Development of starch-based nanoparticles: Structure, colloidal and rheological properties. www.mate.tue.nl/nrv/ede/dziechciarek.html

Fellman, M. 2001. Nanoparticle prism could serve as bioterror detector. http://unisci.com/stories/20014/124011.htm

Gould-Fogerite, S., R.J. Mannino and D. Margolis. 2003. Cochleate delivery vehicles: Application to gene theraphy. Drug Delivery Technol. **3**(2): 40-47

Huang, W., S. Taylor, K. Fu, Y. Lin, D. Zhang, T.W. Hanks, A.M. Rao and Y.P. Sun. 2002. Attaching proteins to carbon nanotubes via diimide-activated amidation. Nano Letters **2**: 311-314

Kim, C.T., C.J. Kim, Y.J. Cho, Y.K. Park, B.Y. Chun and A.J. Choi. 2003. Development of processing technology of protein-polysaccharide nanosphere and its utilization. Research report E033003-0286, Korea Food Research Institute, Kyonggido, Korea

Latour, R.A., F.J. Stutzenberger, Y.P. Sun, J. Rodgers and T.R. Tzeng. 2003. Adhesion-specific nanoparticles for remonal of Campylobacter jejuni from poultry. CSREES Grant(2002-2003), Clemson Univ., SC. USA

Mitra, S., T.K. De and A.N. Maitra. 2002. Hydrogel nanoparticles: their applications in drug delivery. Encyclopedia of Surface and Colloid Science 2397-2413

Moraru, C.I., C.P. Panchapakesan, Q. Huang, P. Takhistov, S. Liu and J.L. Kokini. 2003. Nanotechnology: A new frontier in food science. Food Tech. **57**(12): 24-29

Nakashima, T., M. Shimizu and M. Kukizaki. 1991. Membrane emulsification operation manual. Industrial Research Institute of Miyazaki Prefecture, Miyazaki, Japan

Pompeo, F. and D. Resasco. 2002. Water solubilization of single-walled carbon nanotubes by functionalization with glucosamine. Nano Letters **2**(4): 369-373

Quarmley, J. and A. Rossi. 2001. Nanoclays. Opportunities in polymer compounds. Ind. Minerals **400**: 47-49, 52-53

Roy, K., H.Q. Mao, S.K. Huang and K. Leong. 1999. Oral gene delivery with chitosan-DNA nanoparticles generates immunologic protection in a murine model of peanut allergy. Nature Med. **5**(4): 387-391

Seigel, R.W., E. Hu and M.C. Roco. 1998. Nanostructure science and technology-A worldwide study. International Technology Research Institute(WTEC Division), Baltimore, MD, USA

Stobinski, L., P. Tomasik, C.Y. Lii, H.H. Chan, H.M. Lin, H.L. Liu, C.T. Kao and K.S. Lu. 2003. Single-walled carbon nanotube-amylopectin complexes. Carbohyd. Polym. **51**: 311-316

Stucky, G.D. 1997. High surface area materials. *Proceedings of the WTEC Workshop on R&D Status and Trends in Nanoparticles, Nanostructured Materials, and Nanodecices in the United States.*

Yamazaki, N., H. Yuyama, M. Nagai, G.H. Ma and S. Omi. 2002. A comparison of membrane emulsification obtained using SPG(Shirasu Porous Glass) and PTFE[Poly(tetrafluoroethylene)] membranes. J. Disp. Sci. and Tech. **23**(1-3): 279-292

www.wtec.org/loyola/nano/00_es.htm

www.most.go.kr/most/t_board_admin_operation.jsp