

나노 식품 소재와 나노 기능성 유제품 개발의 가능성

김 동 명* · 광 해 수

*카톨릭대학교 의과대학 · 세종대학교 식품공학과

Nanofood Materials and Approachable Development of Nanofunctional Dairy Products

D. M. Kim* and H. S. Kwak

*College of Medicine, The Catholic University of Korea,
Department of Food Science and Technology, Sejong University

ABSTRACT

Nanofood is advanced functional food which food industry and food scientist try to develop process foods in near future. To be developed nanofood, nanofood materials are needed, such as biodegradable nanosphere material, biotechnical nanofood material, and protein and nanofood material. There are some food industrial applications with nanotechnology, such as nanoencapsulation, nanomolecule making, nanoparticle and powder making, nano separation, and nano extration. We can find several nanofoods and nanofood materials on the market. In addition, dairy industry is also in the first step for the development of nanofunctional food. However, nanoencapsulations of lactase, iron, vitamin C, isoflavone are developed for functional milk. Dairy industry needs various nanofood materials to be advanced functional dairy products.

(**Keywords** : Nanotechnology, Nanofood, Nanofood material, Functional food)

I. 서론

시대가 바뀌면서 과거에는 식량난에 허덕이던 '못 먹고 못사는 시대'에서 우리는 이제 '웰빙'이란 말을 쓸 수 있을 정도로 건강하고 안락한 삶을 영위하고자 노력하고 있다. '웰빙'은 '잘 먹고 잘 살자는 것'이라고 간단히 정의할 수도 있지만 단순히 잘 먹고 잘 사는 것에서 나아가 인간의 '삶의 질'을 높이는 것으로 확대되고 있다. 따라서 웰빙 상품은 초기에는 유기농을 비롯한 건강식품류가 주류를 이루었으나 최근 들어서는 물질의 풍요와 잘못된 식생활로 생기는 비만, 당뇨, 고

혈압 등 각종 성인병과 환경오염 등에서 유래된 식품의 오염, 광우병, 구제역, 조류독감 등 신종 질병들이 인류건강을 위협하고 있다.

나노기술 (nanotechnology)은 이러한 '웰빙'을 위한 필연적인 기술이라 할 수 있으며 가까운 미래에는 각종 질병과 기아, 환경오염 등으로부터 올 수 있는 모든 문제점과 생명연장의 꿈을 동시에 실현시킬 수 있는 핵심기술이 될 것이다. 최근에 들어와 나노캡슐 (nanocapsule)을 이용한 우유, 요구르트, 화장품, 의약품 그리고 은나노 가전 및 생활용품에 이르기까지 웰빙을 위한 각종 상품들이 우리의 곁에 이미 다가와 있다. 특히 식품산업분야에 있어서 나노 기술의 초창기 산업화 모델로 꼽히는 이들 못지 않게 앞으로 나노와 식품공학기술이 접목되어 중장기 산업화 흐름에서 높은

Corresponding author : D. M. Kim, College of Medicine, The Catholic University of Korea #505 Banpo-dong, Soecho-gu, Seoul 137-701, Korea.

부가가치를 창출할 산업으로 기대를 모으고 있다^{6,15,25)}.

나노 (nano) 단위는 10억 분의 1 m(10^{-9})로서 우리 인체의 세포보다 수 백 배나 더 작아서 나노물질의 크기는 세포의 리보솜을 구성하는 단백질 분자의 단위와 유사하며 수 십 마이크로 단위(μm)인 머리카락 굵기의 수 만 분의 일에 해당한다 (Fig. 1). 이러한 저변 단위에서 전통 식품과학이 간과해왔던 양자역학적 접근으로 식품소재의 크기, 질량, 화학조성, 전기, 자성 등을 나노수준에서 분석하고 이를 응용하여 생체에 안정하게 흡수, 전달될 수 있는 기능성 식품으로 개발하는 것은 신 기능의 물성을 창출해나가는 나노 기술을 완성해 가는 것이 아닌가 사료된다.

나노기술 (nanotechnology)은 나노영역에 시스템을 구축하고, 고안하여, 유용한 물질을 생산하거나 새로운 성질과 현상을 이용하여 신소재를 생성하는 기술이다. 분자와 원자 차원의 극미세 기술로 마이크로 (100만분의 1)수준에서 논의되던 식품과학이 최근 들어 원자 몇 개 크기에 불과한 나노로 넘어가면서 그동안 예측하지 못했던 전혀 다른 성질을 이용한 연구가 한창이다^{2,36,46)}. 나노(nano)란 10억분의 1미터이다.

최근 나노기술은 전 세계적으로 상용화가 급진전되고 있으며, 특히 나노캡슐에 약물을 넣어 선택적으로 암세포만 제거하거나 손톱만한 칩 하나에 화학공장 하나를 지을 수 있는 소실 속의 이야기가 막연한 꿈이 아니라 현실로 다가오고 있는 것이다. 이미 의약이나 화장품, 생활용품 분야에서 나노기술은 더 이상 미래 꿈의 기술이 아니며 우리가 매일 접하는 식품분야도

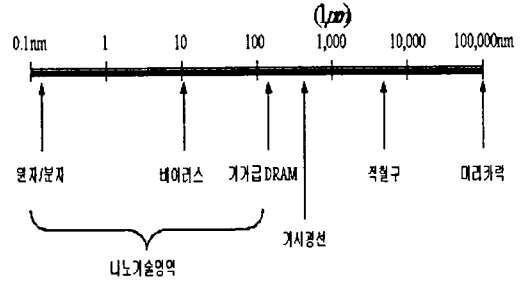


Fig. 1. The range of nanoboundary.

예외가 아니다. 따라서 최근 기술 선진국들은 미래 웰빙산업시대를 겨냥한 고부가가치 제품개발에 집중하고 있으며, 소재크기의 극소화를 통해 기능성(function), 안정성(stability) 그리고 안전성 (safety), 고도화와 가격 경쟁력 향상은 물론 에너지와 자원의 경제적 활용을 추구하고 있다. 그러므로 21세기 정보통신, 컴퓨터, 생명과학, 의료환경 등 미래 성장산업분야에서는 나노기술관련 연구개발이 필연적으로 요구되는 상황을 맞고 있는 시점에서 기능성 유제품 개발을 위한 나노기술의 적용은 매우 중요하다고 본다^{27,30,37)}. 그러므로 본고에서는 나노식품소재의 발전, 나노식품의 발전, 그리고 나노기술을 적용한 기능성 유제품 개발의 중요성과 전망에 대해서 알아보려고 한다.

II. 나노식품소재의 개발과 전망

최근에 들어와 나노소재의 이론과 실험연구는 사람

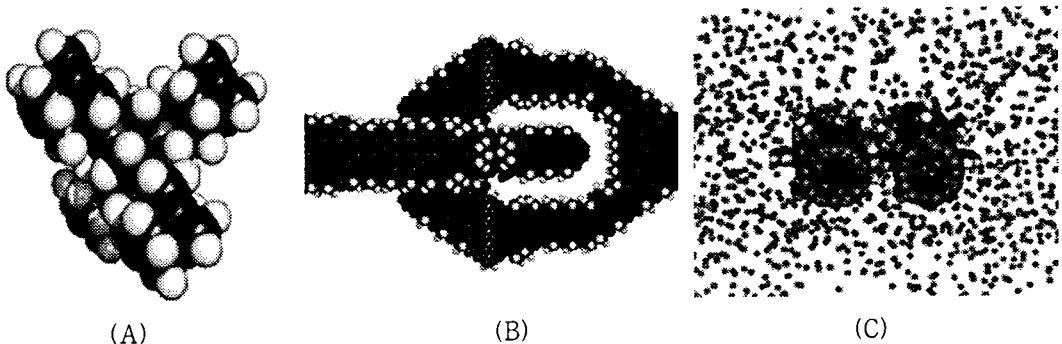


Fig. 2. Some examples of manufacturing processes of nanofood. A : A central 1,3,5,7 tetrabora-adamantane MBB linked to four surrounding 1,3,5,7-tetraaza-adamantane MBBs, B : Nano structures that can be formed includes the kind of nano molecules, C : Sustained release pattern of positional assembled nanofood materials and nanosphere.

들의 주목을 끌고 있다. 특히, 핵산과 단백질의 생화학, 생물물리, 생물역학, 열역학과 전자기학의 특징 및 지능복합재료는 이미 생명과학과 재료과학의 융합으로 되었다. 최근 나노생물칩(chips) 재료, 생체공학재료, 나노모터, 나노복합재료, 계면생물재료, 나노신호감지 장치, 약물전달계통 등 분야는 이미 큰 진전을 가져왔다^{1,2,5,47}. 식품분야에 있어서도 아직은 미약하지만 나노 공학(nanotechnology)과 생명공학(biotechnology)이 융합된 나노바이오(nanobio) 분야가 활발한 개발의 움직임을 보이고 있어 나노식품(nanofood) 또한 서서히 발전 가능성을 보이고 있다.

많은 생물현상은 나노 수준에서 시작이 되고 발생된다고 할 수 있다. 우리의 인체를 구성하는 핵산과 단백질 그리고 각종 영양소는 식품섭취를 통하여 소화기관이라는 화학공장에서 분해합성과정을 거쳐서 생성되고 이들은 생명기능을 집행하는 중요한 나노성분으로 이루어져 있는 가장 좋은 천연적인 나노식품소재가 된다고 볼 수 있다. 이런 성분들은 서로 작용하여 하나의 복잡하고 완전한 인체 구성요소가 되는 것이다. 나노식품(nanofood)의 연구는 이러한 접근방법으로 연구가 되어지고 있으며 핵산과 단백질 그리고 각종 영양소의 구조와 기능(그들의 식별, 결합, 상호변화, 특수 영양소의 흡수방출, 생물전기화학신호의 생산과 전도, 생물역학과 열역학의 특성 등이 포함)이 언급될 수 있으며, 나노식품을 구성하는 소재 또는 재료(나노식품소재)를 생산하는 새로운 기술도구와 장치, 설비도 언급될 수 있다^{2,6}.

나노식품소재는 크게 4가지 유형으로 나누어 볼 수 있다. (1) 천연적인 나노식품소재, (2) 생체내 생합성 혹은 인공합성된 나노식품소재, (3) 지능형 방출조절 나노입자소재, (4) 합성된 나노소재와 생합성된 복합소재 혹은 가공공정을 거친 나노소재가 그것이다. 여기에는 비록 많은 근본적인 문제가 아직 산재하고 있지만, 나노바이오의 연구와 더불어 나노식품의 새로운 소재연구와 개발은 이미 지대한 관심을 가지고 연구가 진행 중이다(Fig. 2). 나노식품(nanofood)은 생명기능을 집행하는 중요한 나노 성분으로 이루어져 있는 나노식품소재로 가공되며, 생체 내에서 안정하고 흡수가 용이하며 기능성이 효과적으로 발휘될 수 있도록 설계되어진다^{16,17,41,45}.

Ⅲ. 나노식품소재의 발전

현재 나노식품소재로는 submicron과 나노 수준의 입자합성, 제어방면에서 연구가 진행되고 있으며 일부에서는 일정한 특성을 갖고 있는 기능성 식품소재의 제조가 가능하게 되어 이런 나노수준에서 제조된 나노식품소재는 기존의 식품 소재와는 전혀 새로운 특성을 나타내고 있다. 각 소재별로 살펴보면 다음과 같다.

1. 생분해성 나노구(nanosphere) 소재

생분해성 나노구(nanosphere)는 나노식품 분야에 한창 발전하고 있는 기술로서 식품의 기능성 성분의 안정성, 안전성, 유효성 그리고 기호성을 연구하는데 큰 영향을 주고 있다. 나노복합재료로 생분해성 나노구를 제조하는 기술은 직접 생체조직 및 세포에 핵산, 단백질과 substrate간의 정적, 동적 흡착력을 증강시키고 소형화, 고분별율, 다기능을 촉진시켜준다. 최근 표면처리 및 화학적 침적방법은 나노구의 substrate 계면에서 0.4~2 μm의 분자단층(monolayer)을 제조할 수 있고, 0.4~2 nm의 상층(top layer) 및 다공 침수(weping)층과 아래층으로 구성된 다기능 층도 제조할 수 있어 각종 생분해성 미세구(microsphere)나 필름코팅에 응용이 가능하다. 또한 생체 내에서 조직 및 세포에 친화적으로 통제가 가능한 controlled release system을 갖춘 나노식품소재도 제조할 수 있다^{13,21,26}. 이렇게 되면 고가의 기능성 식품 소재의 보존상의 문제도 해결되며 섭취 후 체내 소화과정을 통해 큰 손실 없이 안전하게 원하는 부위에서 효과적으로 흡수이동이 가능하다. pH 감응성 나노구는 기능성 성분의 위장 내 강산에 안정하게 설계되어 있어 장내에서 pH sensitive release될 수 있는 선별성과 time controlled release될 수 있는 인지능도 가지고 있다. 이러한 나노식품제조기술을 적용하여 생산된 생분해성 나노구는 이미 선진국의 경우 기능성 식음료시장에서부터 서서히 응용되고 있다.

이와 같이 소화기관에 자동으로 addressing하는 나노구의 연구는 향후 체내 소화기관의 기능연구와 효소단백질의 subcellular positioning에 응용될 수 있을 뿐만 아니라 기능성 성분의 안정성과 효율적인 소화흡수작용 기작에도 응용이 될 수 있다^{27,28,29} (Fig. 3). 생분해성 나노구는 내부에 기능성 물질 또는 미립자 상태의 유용물질을 넣고 바깥에 피막물질로 표면처리 및 화학적으로 침적시키는 방법으로 크기가 수 nm~수 μm이며 내부물질을 외부환경으로부터 보호하는 작용

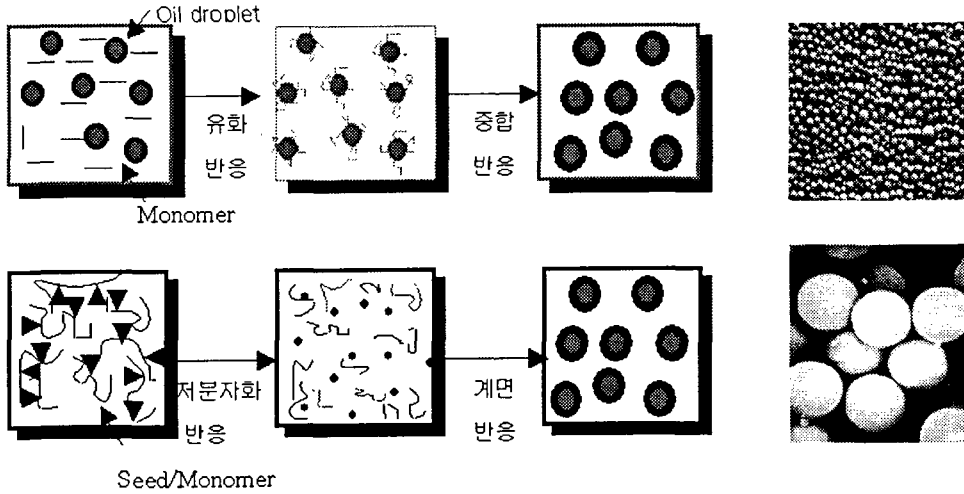


Fig. 3. Preparations of nanofood material incorporated biodegradable nanocapsules.

과 내부물질들을 외부로 용출시키는 속도를 조절하는 기능이 있다(Fig. 3).

2. 생물공학적 나노식품 (nanofood)소재

나노식품 (nanofood)소재의 연구는 소재에 대한 역학적 변형기술과 구조와 기능을 향상시킬 수 있는 기술에 집중되어 있다고 해도 과언이 아니다. 나노식품 소재의 생화학적 접근, 역학적 변형과 물리적 release 패턴 등을 해명하는 것은 나노식품소재의 설계와 제조에 기본이 되는데 몇 가지 예를 들면 다음과 같다.

견과류(호두, 잣 등)껍질의 구조는 생물공학적 측면에서나 소재과학의 측면에서 볼 때 매우 재미있는 것이다. 그들의 형태는 역학적으로 가장 좋은 소재의 특징(ρ : 1.2~1.4 mg/m³; young's modulus E: 1.5~5 GPa; fracture strength δf : 150~340 MPa; Mohr's Hardness: 2.5~5.0)을 갖추었다. 기능성에 있어서는 종자를 보호하여 외계환경에 대처할 수 있게 할 뿐만 아니라, 동시에 종자가 싹 트는 기간에는 껍질 속으로부터 나올 수 있게 한다. 그래서 산업적으로 견과껍질은 마찰에 잘 견디는 부드러운 물질로서 위생적이고 정밀한 조합공정에 사용될 수 있는데, 연구에 의하면, 견과껍질에는 내부에 직경이 10~20 nm 정도의 초산칼슘(calcium oxalate)염의 단일분자(mono-molecular)가 결정을 이루고 있기 때문이다. 이런 나노급 식품소재의 mineralized layer는 다량의 칼슘을 함유하고 있어 cyto-

cyst의 요구를 충족시키며, 소재를 구성하는 조직의 역학적 기능을 증가시켜 외부환경 (파괴, 침습 등)에 견딜 수 있게 한다. 따라서 견과류 껍질 속에 함유된 다량의 저장칼슘과 일정시간 동안 일정량의 칼슘이 주기적으로 발생하는 메커니즘을 연구한다면 나노식품의 소재개발 및 설계에 이용될 수 있다^{43,44}.

또 다른 예로써, 거미는 실 단백질 (fibroin)을 제조하는 생물이다. 이런 천연의 실은 수천 년의 진화를 거쳐 구조상에서 이미 최적화되어 있고 평행된 경도와 강도 전연성을 가지고 있기 때문에 이미 원자현미경의 зонде (sonde)로도 사용되고 있다. 이 거미줄 실 단백질은 재조합 반응을 거쳐 식품나노소재로 사용할 수 있으며 생물공학적 mineralized 과정은 특수기능의 식품나노복합소재의 제조에도 응용될 수도 있다. 비슷한 예로는, 이미 국내외적으로 널리 알려진 누에고치 실 단백질 (silk peptide)도 마찬가지로 하겠다^{20,21}. 또한 자성세균을 예로 들면, charge를 띠는 식품나노소재에 이 세균을 응용할 수가 있다. 생물공학적 mineralized 과정을 거쳐서 만들어진 자성 나노소재는 charged molecule을 이루고 한 층의 막에 쌓여 사슬형태로 배열되어 있으며 세포 내에서 일정한 polarity를 띠고 있다. 자성을 띠는 나노입자의 직경은 50~100 nm 범위 내에 있으며 자성세균 한 개 세포 내에는 10개의 자성분자가 있다. 이런 생물자성분자는 자성세균을 일정한 발효조건을 갖는 발효조에서 대량생산이 가능하며 향후 기능성 식품이나 면역증강 식품에 나노 소재

로 활용될 가능성이 매우 크다.

또 다른 예로써, 몇몇 연체동물의 경우에는 손상회복기간 중에 조직의 재생이 발생하게 되는데 이때 각 피부부에 나노소재가 bottom-up 방식으로 침적하게 된다. 즉, 하나의 유기층이 형성되고 이 유기층이 교차적으로 연결된 섬유조직으로 성장하여 두께가 약 33 nm 정도의 층을 형성한다. 그 후에 구형 나노구조 (spherulitic nanostructure)의 광물질들이 이 유기층에 착상하면서 mineralized 과정이 진행되고 이 과정에서 기능성 나노소재가 다량 형성된다. 또, 몇몇 곤충에는 점착시스템 (달라붙는 성질)이 있는데 이것을 이용하면 아주 좋은 생물공학적인 나노식품 소재가 될 수 있다. 대부분 나노소재의 마찰특성은 나노구조 및 성질과 밀접한 관계가 있는데, 이 점착시스템의 경우는 수많은 나노과립으로 조성되었기 때문에 점착마찰력이 기하급수적으로 증가된 상태이다. 이 때문에 곤충은 유리 등 매우 고운 물질표면에 점착하여도 미끄러지거나 떨어지지 않는 것이다. 이러한 생물공학적인 나노중합체 소재의 특성은 또 다른 나노입자 배열방식을 통하면 섬유 등에도 착상할 수 있어 역학적 기능을 최적화할 수 있다. 따라서 이러한 천연소재의 발굴과 이로부터 나노소재를 대량으로 분리해 낸다면 나노식품소재의 생화학 및 역학적 변형과 물리적 release 패턴을 해명할 수 있으며, 나노식품소재의 제제 설계와 생산에 큰 도움이 될 것으로 기대된다^{32,38,39)}.

3. 단백질 및 나노식품소재

단백질은 나노식품을 제조하는 좋은 천연재료이다. 단백질로 구성된 분자구조체는 세포 속에 대량으로 존재하고 있으며 단백질을 구성하는 peptide 분자들은 액체 속에서 일정한 순서로 배열되어 나노수준

의 초(超) 분자구조를 형성한다. 예를 들자면, peptide 이온, 낭포, 단향막 (one-way membrane), 마이크로관 (micro tubule) 등이 그것이다. 이런 단백질 구조체는 서로 다른 나노 공정 중에 하나의 소재로 이용될 수 있으며 이러한 특성을 이용하여 단백질의 식별 및 결합구조에 대한 연구는 어떤 특수한 화학결합을 갖고 있는 기능성 식품 등의 소재 (단백질분자구조)를 target 분자로 하여 선택적으로 식별할 수 있는 기능을 부여할 수 있게 된다. 단백질은 아미노산의 異源중합체이므로 생화학적으로 이들의 residue에 부가반응을 시켜 특이한 위치에서 새로운 분자를 합성할 수 있다. 이러한 결합단백질의 분석을 통하여 과학자들은 이미 특이한 기능을 갖고 있는 나노식품 소재들을 성공적으로 생산하였다. 이런 나노식품 소재들 중, 단백질 측쇄는 나노식품과 연계하여 이들의 배열조합 또는 성분으로 사용할 수 있다. 예를 들면, peptide를 원료로 한 중합물질은 이미 발견된 특색들(motifs)를 이용하여 설계할 수 있고 친수성 중합물질 등과 반응시킨 후 합성된 peptide를 기능성 나노식품 소재로 만들어 인체 내 활성을 유지 및 조절시킬 수가 있는 것이다^{1,3,7,41)}.

일 예로써 그림 4와 같이 좌측의 cyclohexane-1,3,5/2,4,6-hexacarboxylic acid (B form)를 hydrochloric acid로 가열한 후 중합물질의 motifs를 변화시켜 새로운 나노분자 [all equatorial cyclohexane hexacarboxylic acid, commercially available]를 설계하여 합성시키면 acid B form을 전부 cis cyclohexane hexacarboxylic acid A form으로 바꿀 수 있다⁴⁵⁾.

또한, 몇몇 peptide는 섬유단백질의 물리적 특성을 변화시킬 수 있을 뿐만 아니라 자체적으로 망구조를 형성하여 새로운 기능성 메커니즘을 활성화 시킨다. 즉, 이렇게 만들어진 나노소재는 상호 생리학적으로 관련이 있는 효소들에 의해 degradation될 수 있는 위

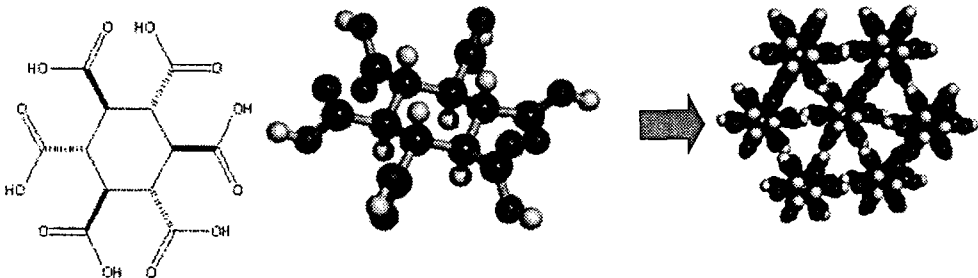


Fig. 4. Novel synthesized model of cyclohexane-1,3,5/2,4,6-hexacarboxylic acid nano molecules.

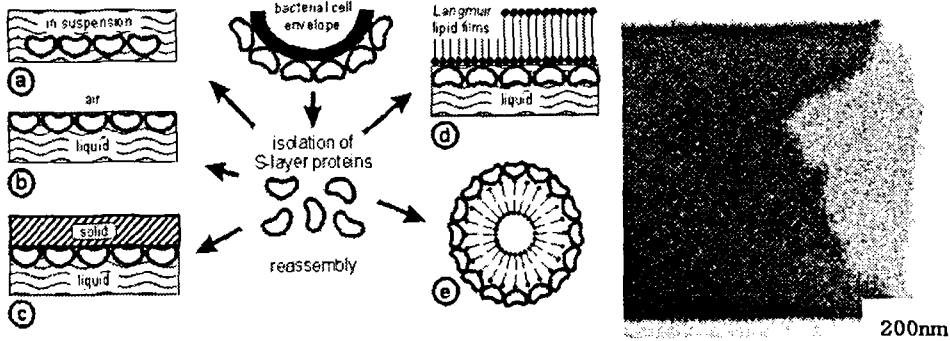


Fig. 5. Schematic drawing of the isolation of S-layer proteins from bacterial cells (A) and their reassembly into crystalline arrays in suspension (A), at solid supports (B), at the air-water interface (C), on lipid films (D) and on liposomes (E). Transmission electron micrograph of negatively stained preparation of a cylindrical S-layer self-assembly product (B). Bar, 200nm.

치에서 설계가 되어 접착성 분자, 성장성 인자, 세포 외 기질단백질 및 생물활성유전자 등과 쉽게 반응을 할 수 있게 한다. 이들 peptide는 합성 방법에 따라서 자체적인 분자 특성과 주요 축쇄의 특성을 동시에 가질 수 있게 할 수도 있고 계면이 형성되면 자체적으로 통제되는 방식으로 생체기능을 활성화시킬 수도 있다. 예를 들면, 단백질의 lift-off 기술을 이용하여 575 nm 이하의 계면을 생산할 수 있으며 이 기술을 응용하면 아주 높은 분별율을 확보할 수가 있다. 또한, 면역학적 positioning 방법을 응용하여 기능성 나노소재를 특정 위치에 결합시킨다면 세포의 기능을 직접 활성화시킬 수 있는 acceptor의 부착, 기능성 물질의 정보전달, 기능성 나노분자의 빠른 흡수이동, 세포간의 상호작용 활성화 등을 목적으로 하는 기능성 나노식품소재 연구에 응용할 수가 있을 것이다⁴²⁾ (Fig. 5, 6).

미생물 세포로부터 분리된 단백질을 특수구조의 극성소재 표면에 전자를 발생시킬 수 있는 생체막으로 만들어 생체고분자와 계면반응으로 재 결합시킴으로써 체내의 target 장기 또는 소화기관에 적용하면 나노식품을 감지하거나 대량흡수이동시킬 수 있는 이온통로를 제공할 수 있다. 직경이 0.2~2 nm이고 길이가 1~2 nm인 생물이온통로는 고도의 이온 선택성이 있고, 이온통로의 열리고 닫히는 상태를 서로 신속히 바꿀 수 있으며, 일부는 이온들에 의해 억제될 수도 있는 3차원적인 수소결합 나노구조체 (polycationic ferritin molecules)를 형성, 이를 전자현미경으로 관찰한 사진이 Fig. 6이다(A: TEM, B : SEM).

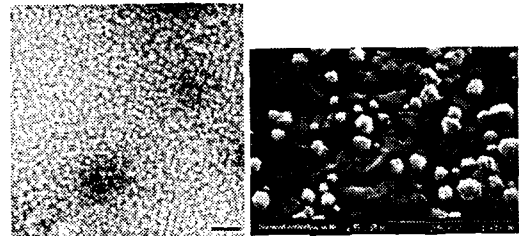


Fig 6. Transmission electron micrograph of polycationic ferritin molecules regularly bound to the crystalline domains of an S-layer with oblique lattice symmetry. Bar, 50nm (A). Scanning force microscopical image of a patterned S-layer on a silicon wafer. Bar, 10 μm (B).

IV. 나노식품 연구와 생산기술의 발전

최근 10년 동안 나노기술의 급속한 진보는 나노식품소재를 연구하는 식품장비의 발전에도 지대한 관심을 불러 일으켰다. 일반적인 나노 연구장비인 AFM, SEM, STM 등을 제외하고 새롭게 개선된 연구장비도 나타났다^{2,18,25,36)}. 예를 들면, ultra-low temperature electronic mirror, mass spectrograph, 에너지여과 electronic mirror, 나노수준부각기기, 영광반사현미경, optical acquisition unimolecular 기기, optical tweezer 등이다. 기존의 실험방법과 연구장비, 생산 및 제조기술 등은 그 사용 목적에 맞게 새롭게 개발되었고 그에 못

Table 1. Some examples of food industrial applications with nanotechnology and production facilities

Nanocapsule화	Nanosphere, 저분자 다당류, 제조장치, 유화기술, 중합반응, 계면반응, spray drying, spray cooling, suspension process, extrusion, coacervation, cocrystallization, molecular inclusion, freeze drying
Nanomolecule화	미생물발효, 천연물분리합성, 생분해성/광분해성/가수분해성 고분자 합성
Nanoparticle화	유동층코팅, 유동층건조, 급속동결건조, 진공동결건조, 펄스레이저, 마그네트론스프터, 초임계 추출분리
Nanopowder화	Nanomill, 분쇄기 (공냉식, 수냉식, 기류식, 폭발식, 초음파식, 액상분쇄 등), 절단/파쇄기
Nanoremodeling화	Trapping, lock-and-key structure, binding, synthesis, 플라즈마 표면처리 장비, 코로나 방전기, 자외선개질기
Nanoseparation화	Nano/ultra filtration, 콜로이드 액상 에이프론(Colloidal Liquid Aphrons, CLA), 선분산 용매 추출기술 (Predispersed Solvent Extraction, PDSE), Reactive distillation
Nanoextraction화	Reactive nanoextraction, 초임계유체추출(SFE)/초임계유체 크로마토그래피(SFC), 적외선/microwave를 이용하는 추출정제

지 않은 숙련된 기술도 요구되었다. Table 1은 최근 몇 년간 국내외에서 나노식품소재에 적용된 나노 응용기술과 생산설비 등을 간략히 예시한 것이다. 기초연구에서 original position과 original position외의 실험방법은 이미 나노소재에 대한 3D 구조, 표면형태와 물리역학적인 연구에 상당한 진전을 보이고 있으며, 응용기술에서는 nanocapsule, nanomolecule, nanoparticle, nanopowder, nanoremodeling, nanoseparation, nanoextraction 등을 중심으로 기존의 micro 및 macro position에서 조금씩 nanoposition으로 기술이 상향 조정되고 있다 (Fig. 7).

나노분자기술의 연구개발과 나노소재 생산기술의 발전은 기존의 micro 및 macroposition에서 조금씩 nanoposition으로 top-down하거나 nanoscale position에서 macroscale position으로 bottom-up 하여 수많은 나

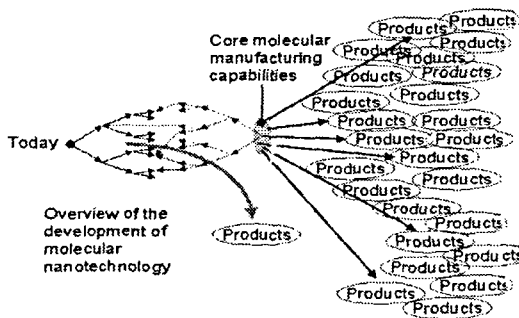


Fig. 7. Schematic drawing of the application of nanotechnology in food industry by fields of usage.

노소재 및 제품을 효율적으로 대량생산 해낼 수 있다. 그래서, 식품분야에서 나노분자기술의 연구개발과 나노소재 생산기술의 발전은 거시적인 영역으로부터 초미세 영역으로 Top-down 방식을 채택하거나 조미세 영역으로 부터 거시적인 영역으로 Bottom-up하는 방식을 채택함으로써 나노식품생산을 위한 제반 관련산업까지 동시에 발전을 도모할 수 있다. Table 2는 최근 몇 년간 국내외에서 개발된 나노식품소재 및 식품관련 산업에 적용된 나노제품들을 간략히 예시한 것이다^{6,25,47}.

최근에는 이런 나노 응용기술 중에서 나노분자 remodeling 분야가 나노재료학자들의 지대한 관심을 보이고 있으며 이미 accepter와 촉매점의 작은 유기분자 사슬망의 합성에 촉각을 곤두세우고 있다. 이 기술을 응용하여 기능성 물질의 분리, 정제, 합성과 새로운 효소, 단백질 등의 기능성 나노소재를 대량으로 생산하고 있으며 지난 몇 년간 관련업계의 주목을 끌고 있다. 이와 더불어 나노역학의 측정기술도 급속한 발전을 이루어 nN 분별율이 있는 마이크로형 측정기계는 이미 생체세포의 역학분포를 측량할 수 있게 되었으며 세포의 단일 접촉점에서의 힘도 측정할 수 있게 되었다. Optical Tweezer로는 한 개의 나노분자 운동상태를 탐측하고 시뮬레이션 할 수 있으며 이러한 측정장비를 통하여 분자운동역학적 접근은 나노식품 소재연구 방법에서 큰 진전을 가져왔다. 이런 유형의 연구는 향후 나노소재와 생체분자간의 근본적인 역학관계를 이해하고 그 메커니즘을 규명하는데 큰 도움이 될 뿐만 아니라 나노식품소재의 설계와 제조를 위한 기초가 될 전망이다.

Table 2. Some examples of typical nanofood and nanofood materials in food industry on the market

다이어트 식품	녹차잎, 실크렙타이드, 유산균 등	항균냉장고	은 나노입자
인삼가공 식품	인삼추출액, 진산, polysaccharides	PET 보틀	나노촉매용 투명 디라미네션 PET
조제분유/유제품	Ferric, vitamins	단백질(가공) 식품	단백질, 펩티드 나노캡슐
기능성 음료/식품	Vitamin C, herbal extracts	pH감응 포장지	pH별 변색나노입자, pH지시제
식품첨가물	Silk protein, retinol etc.	감온 포장재	온도별 변색 나노입자
투명화제/UV차단제	Zinc oxide, SiO ₂	감광 포장재	광질별 변색 나노입자
면역증강제/조절제	게르마늄, 미네랄 나노분체	천연색소	코치닐색소 등
천연향료	각종 천연식향	기능성 용기/포장재	식품 포장용 나노복합체
임상용 바이오칩	임상용 나노입자 마이크로어레이	바이오 현미/쌀	바이오 은이온수 코팅
선도유지제	황토, 게르마늄, 숯, 실버 나노입자	탈모방지/발모촉진	천연 나노추출물
금/은 나노콜로이드	금/은 나노입자 함유 콜로이드용액	장용기재	장용 아크릴 나노입자 공중합체
미네랄제제	미네랄 나노입자, 저분자 키토산	비타민제/항균제	비타민 함유 무기하이브리드 복합체

V. 유제품에 나노기술의 적용 가능성 및 그 중요성

지금까지 살펴본 바와 같이 나노기술 가운데 아직 상업화가 된 기술은 몇 가지 되지 않고 식품분야에서도 그 가능성은 무한하다. 특히 유제품의 경우에는 우유를 포함하여 요구르트, 유산균음료, 치즈, 아이스크림, 버터, 분유로 나눌 수 있다. 또한 유산균이나 효모가 당으로부터 유산을 만드는 발효과정을 거치면 발효유, 치즈, 버터 등과 같은 다양한 발효유제품도 만들어진다.

그러나, 유제품은 제일 중요한 것이 유제품의 맛을 결정하는 신선도이고, 두 번째로는 기능성이라 하겠는데 최근에는 유제품에도 DHA, 칼슘, CLA, 셀레늄, 아미노산, 올리고당 등 수 많은 기능을 첨가하는 경향이 있다. 그래서 웰빙족들에게 유제품은 자신과 가족들의 건강을 위하여 체질과 취향에 따라 선택하는 맞춤형 상품이 된 것이다. 따라서 유제품의 경우에는 그 특성상 나노식품이 될 수 있는 완벽한 조건을 갖추었다고 할 수 있다.

유제품 중에 유산균 발효유는 제품의 유형에 따라 액상발효유, 농후발효유, 크림발효유, 농후크림 발효유, 버터발효유 등으로 구분될 수 있는데, 유형별로 균주의 선택과 발효의 방법, 제형결정에 있어서 나노분자 가공방법과 기능성 나노식품소재의 첨가로 제품의

기호성을 좋게 할 수 있고, 또한 배가시킬 수가 있다. 즉, 우리나라에는 액상발효유와 농후발효유가 널리 이용되고 있는데 떠먹거나 짜먹는 형태의 호상발효유와 마시는 형태의 드링크발효유, 프리미엄발효유의 경우 순수하게 젖산 발효하는 방법이 있지만, 유산균과 효모 또는 이들이 생산해 내는 효소를 나노 가공하여 안정화 시킨다면 부분적으로 알코올을 발효하여 만들어지는 젖산-알코올발효유의 안정적인 생산과 제품의 기능성을 더욱 높일 수 있다. 또한, 발효유 제조에 사용되는 유산균을 이용하여 발효시킨 액상 요구르트나 드링크타입의 요구르트 경우도 마찬가지이다. 이밖에도 원료유에 유산균, rennet 등을 첨가하여 우유단백질 성분중 casein을 응고시키고, 유청을 제거한 다음 가열, 가압 등의 과정을 거쳐서 발효 숙성시킨 치즈와, 유산균과 향미를 생성하는 젖산균을 발효시켜서 만들어진 향미가 좋은 산성 젤 type의 발효크림을 생산하는 공정에서 나노기술을 적용하거나 나노입자소재를 사용하여 제조하면 원가절감은 물론 고부가가치 기능성 상품을 제조할 수 있다.

우유를 마실 때 설사를 하거나 복통을 일으키는 원인의 대부분은 유당불내증으로, 우리나라 성인들 중에는 70~80%가 이런 증상이 있다. 유당불내증을 해결하기 위하여 유당분해효소를 나노캡슐화하여 우유를 제조하면 이런 문제는 해결되리라 본다. 또한, 발효유 내에는 8~10% 내외의 당(탄수화물)이 들어 있는데 이는

당뇨환자나 비만환자, 다이어트 중인 사람들에게는 거부감을 줄 수 있으나 나노 가공공정으로 당 성분을 줄이게 되면 장에 좋은 발효유 섭취에 큰 문제는 없을 것이다^{27,28,29)}.

우유는 영양소의 종류, 양, 이용 효율면에서 인류에게 가장 완전한 식품으로 알려져 있지만 그만큼 영양적 가치가 높기 때문에 변질되지 않고 안전하게 섭취할 수 있게 나노가공을 한다면 영양을 손실 없이 최대한 섭취가 가능하고 이렇게 가공된 나노우유를 재료로 하여 만들어진 유산균 발효유는 단백질, 유당, 유산, 비타민, 기타 무기물 등이 풍부하게 들어 있을 뿐만 아니라 소화흡수 증진, 천연단백질에 대한 알레르기 반응감소, 지방의 소화 및 흡수작용 촉진, 유당 소화불량 소비자의 유제품 음용 가능, 소화액 분비 증가, 칼슘·인·철분의 이용도 향상, 체내 비타민량 증가, 미각 양호 등 기능성 면에서 월등할 것이다. 또한, 나노발효공정을 통하여 생성된 양질의 유산은 발효유 제품의 보존료이자 부드러운 신맛과 신선한 맛을 주어 기호성을 높일 뿐만 아니라 우유 단백질인 카제인 커드에 영향을 주어 소화를 도우며 칼슘 등과 같은 무기물의 흡수를 개선시킬 것이며 발효유에 나노화된 유당, 유산, 비타민 D의 혼합은 칼슘의 체내 흡수를 최적 상태로 만들어 인체의 골격 형성에 필요한 칼슘과 인의 흡수를 도와, 성장기의 발육이나 갱년기 이후의 칼슘 부족으로 인한 각종 질병을 예방할 수 있을 것이다^{26,30)}. 이밖에도 유산균의 발효과정에서 증가되는 비타민 B₁, B₂, 나이아신, 엽산 등의 소화 안정성을 높이고, 비타민 C, 철분, DHA 등 기능성 소재를 다량 섭취하기 위해 나노캡슐화 혹은 나노입자화 한다면 불안정한 기능성 물질을 안정적으로 섭취할 수 있다^{14,44,49)}.

VI. 결론

새로운 미래는 '웰빙시대'로 건강하고 안락한 삶을 살 수 있는 '삶의 질'을 중요시하는 시대이다. 그러나 최근 들어서는 물질의 풍요와 잘못된 식생활로 생기는 각종 성인병과 환경오염 등에서 유래된 식품의 오염 및 광우병, 구제역, 조류독감 등 신종 질병들이 인류건강을 위협하고 있다. 나노기술은 이러한 질병과 기아, 환경오염, 생명연장의 모든 문제에 해결점을 제시한다. 분자나 원자단위의 나노급 식품소재는 바로 이러한 toxic waste를 획기적으로 줄일 수 있으며 기존

을 해결하고 질병의 원인이 될 수 있는 모든 문제점을 해결할 수 있어 우리의 식생활을 크게 바꿀 것으로 내다보고 있다.

나노식품소재는 이미 선진국을 중심으로 많은 사람을 감동시킬 전망을 펼쳐 보이고 있다. 이 영역의 최종목적인 나노수준에서 기능성식품소재 및 식품을 제조하는 것이다. 나노식품소재의 탐색은 생명과학과 식품소재과학의 교차영역에서 새로운 학문분야로 발전하고 있으며 근본원리를 응용하면 여러 가지 나노식품 및 소재를 설계하고 제조하는데 사용할 수 있다. 식품나노소재는 이미 거대한 시장을 형성하고 있으며 전 세계에서 최근 2년간 매년 1,000억 달러의 이윤을 창조하였다. 영국 나노기술연구소의 통계에 따르면, 최근의 나노식품들은 전체의 1%밖에 되지 않으나, 나노기술의 신속한 발전과 더불어 이 비율은 멀지 않은 장래에 매우 높아질 것으로 추산하고 있다^{246,47)}. 더욱이 기업들의 새로운 제품을 연구하려는 욕구는 날로 증가하고 있으며 미래의 획기적인 식품에 대한 혁신은 점점 나노기술과 전통기술의 융합으로 집중되고 있으며, 멀지 않은 장래에 나노식품은 우리의 식생활을 크게 개선시킬 것이다. 그래서 인류의 건강과 풍족한 먹거리, 그리고 편안한 환경을 제공할 수 있는 산업이 미래의 최적 산업으로 각광 받을 것이 자명하므로, 나노기술과 융합한 나노식품기술은 가까운 미래에 우리의 식품산업구도를 전면 재창출할 수 있을 것으로 기대된다.

끝으로, 유제품의 경우에도 제품의 종류가 매우 다양하고 우리의 식생활에서 빠질 수 없는 중요한 식품 중 하나로서 최근에는 DHA, 칼슘, 철분, 비타민류, 저지방, 저칼로리 등 수 많은 기능을 강화하려는 경향이 있다. 따라서 향후에는 여러 형태의 기능성 유제품이 개발될 가능성이 있고 나노공정의 적용과 나노소재를 사용함으로써 완벽한 나노식품이 개발될 전망이다.

VII. 참고문헌

1. Collier, T. O., Jenney, C. R., DeFife, K. M. and Anderson, J. M. 1997. Protein adsorption on chemically modified surfaces. *Biomed. Sci. Instrum.*, 33:178-183.
2. Crndall, B. C. and James, L. 1992. *Nanotechnology: Research and Perspectives*. MIT Press.
3. Creighton, T. E. 1988. The protein-folding problem.

- Science, 240:267-268.
4. Drexler, K. E. 1981. Molecular engineering: An approach to the development of general capabilities for molecular manipulation. Proc. Nat. Acad. Sci., 78: 5275-5258.
 5. Eric Drexler, K. 1989. Biological and nanomechanical system. Artificial Life, 501-509.
 6. Helmut Kaiser Consultancy : Nanotechnology in Food and Food Processing Industry; see at: <http://www.hkc22.com/Nanofood.html>
 7. Ho, S. P. and DeGrado, W. F. 1987. Design of a 4-Helix bundle protein: Synthesis of peptides which self-associate into a helical protein. J. Am. Chem. Soc., 109:6751-6758.
 8. Hu, D., Liu, H. and Pan, I. 1993. Inhibition of bovine serum albumin adsorption by poly (ethylene glycol) soft segment in biodegradable poly(ethylene glycol) /poly (L-lactide) copolymers. J. Appl. Polym. Sci., 50: 1391-1396.
 9. Kim, D. M. and Park, W. M. 2000. Isolation of anti-microbial substance from *Hericium erinaceum*. Mycobiology, 28:33-38.
 10. Kim, D. M., Shin, H. S. and Park, J. S. 2001. A continuous oxidation process for the regio-selective oxidation of primary alcohol groups in chitin and chitosan. Korean Patent No.10-2001-0007851:1-16.
 11. Kim, D. M., Shin, H. S. and Park, J. S. 2002. Novel retinoid derivatives and methods for producing said compounds and an anti-cancer pharmaceutical composition comprising said compounds. Korean Patent No. 10-2002-0015016:1-18.
 12. Kim, D. M., Shin, H. S. and Park, J. S. 2002. Water-soluble films comprising anti-cancer medicines and their preparation. Korean Patent No. 10-2002-0014263: 1-19.
 13. Kim, D. M., Shin, H. S. and Park, J. S. 2002. Preparation of round microcapsules comprising powders of a steamed red-ginseng or a ginseng. Korean Patent No. 10-2002-0006318:1-17.
 14. Kim, D. M., Shin, H. S. and Park, J. S. 2002. Emulsify compositions comprising high unsaturated fatty acids and their preparations for micro liquid capsules Novel retinoid derivatives and methods for producing said compounds and an anti-cancer pharmaceutical composition comprising said compounds. Korean Patent No.10-2002-0003552:1-15.
 15. 김동명. 2003. Nano-/Encapsulation technology의 건강기능성 식품으로의 도입 가능성. 월간식품세계 (특집), 3:42-46.
 16. 김동명. 2003. 첨단 나노기술 (Nanotechnology)의 건강기능성 식품에 도입. 한국식품정보원 (Daily Foodi News), 2:6-7.
 17. 김동명. 2003. 건강보조식품에 나노기술의 접목. 식품음료신문 (특집), 2:20-21.
 18. 김동명. 2003. 나노기술과 실크펩타이드. 한국경제신문 (산업), 2:14.
 19. 김동명. 2003. 식품산업과 나노기술. 매일경제신문 (국제경제), 1:16.
 20. Kim, D. M., Lee, S. H. and Ku, S. J. 2003. Study on consequent nutrient intake status, fat distribution and serum lipid composition after low-molecule peptide, green tea leaves and dietary fiber supplementation, SG-28 diet program. Kor. Nutr. Soc., 39:53-59.
 21. Kim, D. M., Lee, S. H. and Ju, S. S. 2003. Effects of anti-aging action, testosterone contents, and stamina improvement after Spirulina, encapsulated herbal extract, and silk peptide. Kor. Agrochemical Soc., 42:12-17.
 22. Kim, D. M., Shin, H. S. and Park, J. S. 2003. New retinol derivatives, the method of preparations and the uses thereof. European Patent No.02729592.2-2404-KR0200041:1-36.
 23. Kim, D. M., Kim, T. K. and Joo, C. K. 2003. Biodegradable characteristics of novel sustained release collagen film containing 5-fluorouracil (5-FU) and mitomycin-C (MMC). Biomaterials Research, 7:248-253.
 24. Kim, D. M. and Joo, C. K. 2004. Sustained release collagen film for treating ophthalmology disease and the method for producing thereof. Korean Patent No. 10-2004-0020099:1-16.
 25. 김동명. 2004. 기능성 나노식품의 개발현황과 전망. 월간식품세계 (특집), 5:36-47.
 26. Kim, S. J., Ahn, J., Seok, J. S. and Kwak, H. S.

2003. Microencapsulated iron for drink yogurt fortification. *Asian-Aust. J. Anim. Sci.*, 16:581-587.
27. Kwak, H. S., Ihm, M. R. and Ahn, J. 2001. Microencapsulation of β -galactosidase with fatty acid esters. *J. Dairy Sci.*, 84:1576-1582.
28. Kwak, H. S., Lee, J. B. and Ahn, J. 2002. Treatment of microencapsulated β -galactosidase with ozone : Effect on enzyme and microorganism. *AsianAust. J. Anim. Sci.*, 15:596-601.
29. Kwak, H. S., Kwon, S. H., Lee, J. B. and Ahn, J. 2002. *In Vitro* stability of β -galactosidase microcapsules. *Asian-Aust. J. Animal. Sci.*, 15:1808-1812.
30. Kwak, H. S., Yang, K. M. and Ahn, J. 2003. Microencapsulated iron for milk fortification. *J. Agric. Food Chem.*, 51:7770-7774.
31. Kossovsky, N., Gelman, A. and Sponsler, E. 1994. Cross linking encapsulated hemoglobin with solid phase supports: lipid enveloped hemoglobin adsorbed to surface modified ceramic particles exhibit physiological oxygen lability. *Artif. Cells Blood. Substit. Immobil. Biotechnol.*, 22:479-485.
32. Vroman, Leo and Adams, Ann L. 1969. Identification of Rapid Changes at Plasma-Solid Interfaces. *J. Biomed. Mater. Res.*, 3:43-67.
33. Vroman, Leo and Adams, Ann L. 1969. Identification of Adsorbed Protein Films by Exposure to Antisera and Water Vapor. *J. Biomed. Mater. Res.*, 3:669-671.
34. Vroman, Leo and Adams, Ann L. 1969. Findings with the Recording Ellipsometer Suggesting Rapid Exchange of Specific Plasma Proteins at Liquid-Solid Interfaces. *Surface Sci.*, 16:438-448.
35. 이인식. 1995. 미래는 어떻게 존재하는가. 민음사, 211-218.
36. 이인식. 2002. 나노기술이 미래를 바꾼다. 김영사, 1-269.
37. Lee, J. B., Ahn, J. and Kwak, H. S. 2003. Microencapsulated ascorbic acid for milk fortification. *Arch. Pharm. Res.*, 26:575-580.
38. Lopez, G. P., Ratner, B. D., Tidwell, C. D., Haycox, C. L., Rapoza, R. J. and Horbett, T. A. 1992. Glow discharge plasma deposition of tetraethylene glycol dimethyl ether for fouling-resistant biomaterial surfaces. *J. Biomed. Mater. Res.*, 26(April):415-439.
39. Needham, D., McIntosh, T. J. and Lasic, D. D. 8 July 1992. Repulsive interactions and mechanical stability of polymer-grafted lipid membranes. *Biochim. Biophys. Acta.*, 1108:40-48.
40. Osterberg, E. 1995. Protein-rejecting ability of surface bound dextran in end-on and side-on configurations: Comparison to PEG. *J. Biomed. Mater. Res.*, 29:741-747.
41. Pitt, W. G., Park, K. and Cooper, S. L. 1986. Sequential protein adsorption and thrombus deposition on polymeric biomaterials. *J. Colloid Interface Sci.*, 111:343-362.
42. Pum, D., Angela, N., Erika, C. T., Margit, S. and Uwe, B. S. 1999. S-layer proteins as basic building blocks in a biomolecular construction kit. *Trands in Biotechnology*, 17:8-12.
43. Quellec, P., Gref, R., Perrin, L., Dellacherie, E., Sommer F., Verbavatz, J. M. and Alons, M. J. 1998. Protein encapsulation within polyethylene glycol-coated nanospheres. I. Physicochemical characterization. *J. Biomed. Mater.*, 42:45-54.
44. Quellec, P., Gref, R., Dellacherie, E., Sommer, F., Tran, M. D. and Alonso, M. J. 1999. Protein encapsulation within poly(ethylene glycol)-coated nanospheres. II. Controlled release properties. *J. Biomed. Mater.*, 47:388-395.
45. Ralph, C. Merkle 2000. Molecular building blocks and development strategies for molecular nanotechnology. *Nanotechnology*, 89-99.
46. Richard, Terra. 1993. Working Molecules: Progress Toward Nanotechnology. *Analog.*, 113:44-68.
47. Robert, A. and Freitas, Jr. 1999. Nanomedicine, Volume I: Basic Capabilities, Landes Bioscience, Georgetown, TX, see at: <http://www.nanomedicine.com>
48. Seok, J. S., Kim, F. S. and Kwak, H. S. 2003. Microencapsulation of water-soluble isoflavone and physico-chemical property in milk. *Arch. Pharm. Res.*, 26:427-432.
49. Storm, G., Belliot, S. O., Daemen, T. and Lasic, D. D. 1995. Surface modification of nanoparticles to oppose uptake by the mononuclear phagocyte system.

Adv. Drug Deliv. Rev., 17:31-48.

50. Tang, L. and Eaton, J. W. 1995. Inflammatory res-

ponses to biomaterials. Am. J. Clin. Pathol., 103
(April): 466-471.