

<초청논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-C.2017.5.1.069>

ISSN 2288-3991(Online)

【특집: 대한기계학회 70년과 기계산업】

기계공학 관점에서 살펴본 나노소재 산업의 발전 및 비전 §

김 대 성* · 최 만 수*,**†

* 서울대학교 멀티스케일에너지시스템연구단, ** 서울대학교 기계항공공학부

Development and Prospect of Nanomaterials Industries from the Perspective of Mechanical Engineering

Dae Seong Kim* and Mansoo Choi**,**†

* Global Frontier Center for Multiscale Energy Systems, Seoul National University

** School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University

(Received March 13, 2016 ; Revised March 30, 2016 ; Accepted March 30, 2016)

Key Words: Nanomaterials(나노소재), Materials Industries(소재 산업), Carbon Nanotube(탄소나노튜브), Graphene(그래핀)

초록: 나노기술은 IT, BT 기술과 함께 21세기에 기술혁명을 주도해 나갈 핵심 기술이기에 현재 우리나라를 비롯한 전 세계의 선진국들이 이 분야에 많은 연구 역량을 집중시키고 있고, 그 중에서도 나노소재 산업은 이 경쟁의 중심에 있다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 기계공학 측면에서 나노소재 산업에 대하여 살펴보았다. 나노소재는 나노크기의 재료라는 점에서 기존의 마이크론 혹은 서브마이크론 재료에서 발견할 수 없는 특별한 효과를 나타내거나 전혀 새로운 응용분야를 만들어낼 가능성이 크다. 특히 환경, 바이오, 에너지, 촉매 등 다양한 분야에서 그 응용이 기대된다.

Abstract: Nanotechnology, along with Information Technology (IT) and Bio-technology (BT), has been regarded as a core area that will drive technological revolution of 21st century. South Korea and other countries with advanced scientific and technological research programs are investing heavily in the field, and among its various aspects, nanomaterial industry is considered to be at the heart of this global competition. In this review, we look at nanomaterials industry from the perspective of mechanical engineering. Nanomaterials exhibit unique characteristics differing from those of micron, or sub-micron sized materials, and hence are potentially able to open up new opportunities. Specifically, environmental and biological sciences, energy, and catalysis are areas that are expected to benefit from these developments.

1. 서론

나노소재란 나노미터(nm), 즉 10억분의 1m 수준의 물질 혹은 소재를 다루는 분야를 일컫는 말로, 물리, 화학, 생물, 재료, 기계, 전자 등 여러 학제간의 과학기술이 서로 융합해서 이루어지는 기술이다. 물질의 성질을 결정하는 최소 단위는 분자임으로 나노소재기술은 현재 과학적으로 봤을 때, 마지막 소재기술이라 할 수 있다. 나노소재는 재료를 구성하는 1차입경의 크기가 100 nm 이하인 입자를 말한다. 일반적으로 입자의 크기는 외접하는 구의 직경으로 나타낼 수 있다. 나노소재가 중요한 이유는 여러 가지 활용분야에서 마이크론(micron) 또는 서브마이크론(submicron) 재료가 갖지 못하는 특성을 갖기 때문이다. 나노소재의 이러한 특징은 입경이

§ 본 논문은 편집위원회의 초빙에 의해 대한기계학회 창립 70주년을 기념하여 발행한 <대한기계학회 70년과 기계산업>에 수록된 내용을 재정리한 논문임.

† Corresponding Author, mchoi@snu.ac.kr

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

작아짐에 따른 표면적 증가 효과(surface-area effect) 및 모세관 효과(capillarity effect) 때문에 나타나는 것이 대부분이다. 표면적 증가 효과는 표면현상과 연관성이 큰 화학반응 및 촉매반응, 이종 성분의 흡·탈착 거동에 큰 영향을 미친다. 반면에 모세관 효과(표면장력의 영향으로 분말 내부에 미치는 압력 효과)는 소재의 근본적인 물성을 변화시킴으로써 이전에는 볼 수 없었던 새로운 현상들이 나타나게 한다. 따라서 마이크론 또는 서브마이크론 소재가 사용되던 분야에 나노소재를 적용하면 더 큰 효과를 나타내거나 예상하지 못한 특성이 나타나 전혀 새로운 응용분야 창출에 기여할 수 있다. 본 연구에서는 기계공학 측면에서 나노소재 산업에 대한 국내/외 발전 현황 및 향후 비전에 대하여 살펴보았다.

2. 기계공학에서의 나노소재 산업에 대한 핵심기술

2.1 나노입자 분산 및 분리기술

분산기술은 나노분말을 다양하게 활용하고자 할 경우 가장 기반이 되는 중요한 기술이다. 일반적으로 분말은 입자 크기가 작아지면 응집이 심해지는 경향이 있고, 분말의 응집에는 강한 응집과 약한 응집이 있다. 강한 응집은 분말 합성 시에 분말 입자간의 결합의 발생으로 형성되는 경우이다. 약한 응집이라 함은 합성 시에는 개별 입자로 존재하다가 분말 입자간 반데르발스 인력 혹은 흡착물질의 역할 또는 모세관 응축에 의한 수분 등의 영향으로 분말입자들이 서로 약하게 붙어 있는 것을 말한다. 강한 응집을 하고 있는 입자들은 큰 외력을 받지 않는 이상 서로 분리되지 않는다. 따라서 강한 응집을 하고 있는 응집체는 그 크기가 작을 경우 응집체 형태로 분산시키는 것은 가능하지만 개별 입자로 분산시키는 것은 매우 어렵다. 약한 응집체의 경우는 입자간의 정전 인력 및 반데르발스 인력을 극복할 있도록 분말표면에 흡착되는 이온농도를 조절하거나 입자간 거리를 늘려주기 위하여 고분자 물질을 분말표면에 흡착시켜 주는 방법으로 개별 분말 입자를 분산시키는 것이 가능하다. 이러한 분산문제를 해결하기 위하여 Han 등⁽¹⁾과 Cha 등⁽²⁾은 스파크 방전을 이용해 금속 나노입자를 기상에서 제조한 후, 바로 나노소재 혹은 나노 소자 제작에 활용할 수 있는 금속 나노입자 제조방법을 개발/발전 시켰다. 또한 Suh 등⁽³⁾은 전기수력학적 분무(Electrospray) 기술을 이용해 고하전된 나노입자를 기상에서 제조함으로써, 응집현상을 피하고 나노소재 혹은 나노소자 제작에 바로 활용 가능한 기술을 발전시켰다.

2.2 나노분말 코팅기술

나노재료 분말을 다른 재료(모재)의 표면을 코팅할 수 있다. 나노 분말 소재를 코팅하는 경우 분산체 내의 고상분율에 따라 코팅막의 충전밀도를 조절하는 것이 가능하다. 분산체로 모재 표면을 코팅한 후 액상매질을 증발시키고 나면 나노분말의 코팅막이 얻어지며 모재와의 결합 및 분말입자 간의 결합을 유도하기 위하여 온도를 높여 가열(소결)한다. 두꺼운 코팅막(후막)을 얻기 위해서는 코팅과 건조를 반복하거나 코팅-건조-소결 과정을 반복한다. 코팅막의 내부조직은 치밀하게 하거나 기공도를 조절하는 것이 가능하다. Sheen 등⁽⁴⁾은 화염을 이용해 TiO₂ 입자에 SnO₂가 박막 코팅된 코어-셸 형상의 나노입자를 한번에 생성하는 기술을 개발하였다.

2.3 나노구조체 성형기술

현재 다공성 나노입자를 제조하기 위하여 가장 널리 쓰이는 방법은 분무 열분해 방법으로, 금속염과 NaCl 혼합 용액을 분무한 뒤 열처리를 통해 NaCl이 포함된 금속산화물을 제조하고, 이 금속산화물을 물에 섞어 NaCl을 녹임으로써 다공성 나노입자를 제조한다. 이 방법은 NaCl이 물에 녹을 때, 원래 NaCl이 있던 자리에 기공이 생겨 다공성 나노입자가 형성되는 원리를 이용한 것으로 연속적이고 대량생산이 가능하기에, 향후 산업적으로 널리 활용될 것으로 사료된다.

나노소재는 비표면적이 대단히 커서 금형내 충전성이 대단히 나쁘고 일정한 형상을 갖도록 재료를 직접 높은 밀도로 성형(건식성형)하는 것이 매우 어렵다. 그러나 최근 이온주입을 이용한 3차원 나노구조체 형성 기술^(5,6)이 개발되어 나노소재 산업의 발전이 기대된다. 이 기술은 3차원 나노구조체를 형성하고자 하는 위치에 있는 PR(Photoresist)을 식각한 뒤, 나머지 PR 부분에 이온을 증착시켜 이후에 주입되는 하전 나노입자를 식각된 위치에 들어가도록 하여 나노구조체가 형성되도록 하는 기술이다(Fig. 1 참조).

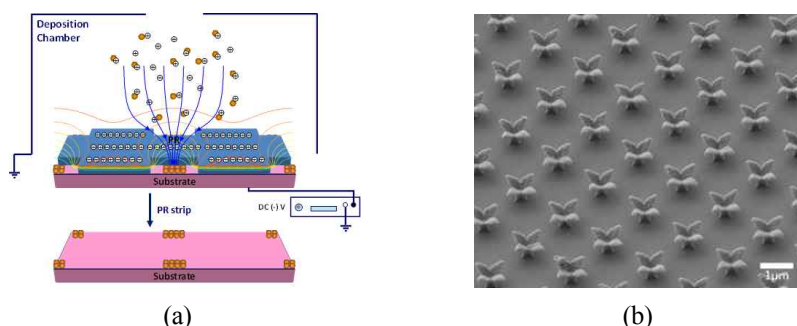


Fig. 1 Fabrication of 3 dimensional nanostructures via ion assisted aerosol lithography: (a) Fabrication method for 3 dimensional nanostructures, (b) 3dimensional nanostructures

2.4 나노소재 치밀화(소결) 기술

나노소재의 성형체는 성형을 위하여 첨가되었던 수분, 고분자 결합제 등을 제거(건조 혹은 탈지 (debinding))한 후 치밀화되는 공정(소결)을 거치게 된다. 나노재료가 충전된 성형체는 매우 미세한 모세관을 갖고 있기 때문에 이를 통한 수분 또는 고분자 성분의 제거에 대단히 긴 시간이 필요하다. 온도를 높여 이들 성분을 빠르게 제거하고자 할 경우 성형체 내부에 발생된 가스가 빠져나가지 못하고 압력이 증가하여 성형체 내부에 기공을 형성하거나 성형체가 파열되는 결함이 발생된다. 나노소재 성형체는 큰 입경의 분말입자를 사용한 성형체보다는 낮은 온도에서 치밀화 된다. 분말입자의 크기가 작아지면 치밀화의 구동력을 증가하지만 이와 함께 결정립 성장 속도 또한 급격히 증가한다. 소결체 밀도가 약 90% 이상으로 높아지면 결정립은 매우 빠르게 성장한다.

3. 기계공학 관점에서 국내 나노소재 산업의 발전

3.1 나노분말소재 산업

최근에는 다양한 기상 제조법이 연구되고 있는데, 스파크 방전 혹은 증발/응축법을 이용한 금속 나노입자의 제조가 그 대표적인 예라 할 수 있다. 그 중 은나노 입자를 살펴보면, 스파크 방전을 이용해 은나노 입자를 제조한 뒤 발생된 입자를 이용해 3차원 나노 구조체를 만들거나 필터에 은나노 입자를 코팅해 항균필터를 제작하는 것이다. Fig. 1은 은나노 입자를 이용한 3차원 나노구조체 형성 기술로서, 이러한 기술이 태양전지나 SERS(증강 라만 분광법, Surface Enhanced Raman Spectroscopy) 측정에 활용 가능함을 보였다.⁽⁵⁻⁷⁾

Fig. 2(a)는 나노 복합체 코팅 항균/항바이러스필터를 나타낸 것으로, 항균 코팅제인 은나노 복합체를 만들기 위해 은의 크기를 30nm로 형성시키고 복합구조로 만들어서 살균효과가 즉시 나타나도록 하였다.⁽⁸⁾ 현재 은나노 입자 코팅을 이용한 항균 에어필터는 자동차 필터나 공기청정기 필터로 널리 사용되고 있으며, 복합구조를 이용한 필터도 곧 상용화 될 것으로 사료된다.

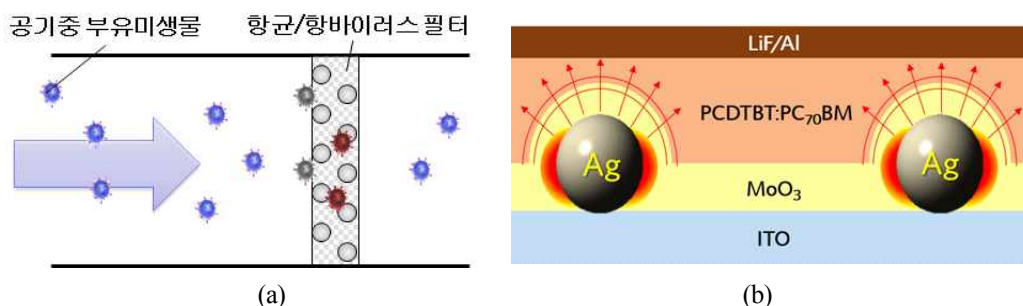


Fig. 2 Silver nanoparticle-decorated silica hybrid particles on the filter (a) and Solar cell via metal nanoparticle (b)

최근 기상에서 제조된 나노입자를 태양전지에 활용하는 연구가 수행되었는데, 박막 태양전지 셀에 은나노입자를 삽입하여 플라즈몬 공명 현상을 일으켜 효율을 향상시킨 연구[Fig. 2(b)]⁽⁹⁾와 스파크 방전으로 제조한 나노입자를 코팅/소결하여 태양전지 전극을 제조한 연구 등을 들 수 있다. 아직은 연구단계이기 때문에 대면적화, 안정성 확보 등 산업적으로 이용되기까지는 많은 후속연구가 필요하고 사료된다.

그 밖에도 나노금속산화물, 다공성 나노입자, TiO₂ 나노입자 제조에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다. 최근 분무 열분해방법을 이용해 세라믹, 금속입자, 양자점, Pt 촉매 등 다양한 나노금속산화물을 제조하고, 다공성 나노입자 제조 기술이 개발되었다.⁽¹⁰⁾ 이러한 나노입자 연속 제조법은 나노금속산화물 및 다공성 나노입자의 대량 생산을 가능케 하여 고성능 가스센서, 디젤 배기 산화촉매, 연료전지의 고성능 전극 등의 제조에 적용될 것으로 기대된다.

TiO₂ 나노입자는 전기적 특성을 이용한 태양전지전극 뿐 만 아니라 특정 파장의 빛에 반응하여 산화/환원 반응을 일으키는 특성을 이용한 광촉매로도 사용된다. TiO₂는 빛을 받아도 자신은 변하지 않아 반영구적 광촉매로 사용될 수 있고, 산화력이 높아 살균력이 뛰어나기 때문에 유해 유기물의 광화학적 분해, 멸균(항균), 물 분해(수소 생성), 자기 정화, 탈취 등 환경소재로 활용되고 있다. 국내 산업체인 일진나노텍, 나노신소재, 나노컴포지트, 퓨리테크 등에서 광촉매 나노분말 뿐만 아니라, 세라믹, ITO/ATO/SiO₂ 나노분말, 코팅제 등을 생산하고 있다.

3.2 탄소 나노소재

탄소소재는 지구상에 가장 흔한 자원 중 하나인 탄소로 이뤄진 소재이고, 그 중에서도 나노 크기의 작은 물질을 분자, 원자수준에서 다루고 통제, 조작하는 나노기술과 결합하여 합성 및 응용할 수 있는 나노소재를 말한다. 최근 유연하고(flexible) 이동이 용이하고(portable) 입을 수 있고(wearable) 접을 수 있는(stretchable) 기능이 전자제품의 새로운 트렌드가 됨에 따라 이러한 특성을 나타낼 수 있는 다양한 형태의 탄소나노소재가 요구되고 있다. 특히 탄소나노튜브(CNT)는 각종 전자소자, 센서, 복합재료 등에 응용하기 위하여 많은 연구개발이 이루어져왔으며, 항공기 자동차용 경량복합소재 등으로의 응용 가능성이 높은 탄소 섬유는 현재 산업화가 진행 중이다.

탄소 원자들로 구성된 2차원 벌집 격자(honeycomb lattice)인 그래핀(graphene)은 2004년 최초로 흑연을 기계적 박리법을 통해 얇은 층으로 분리하여 얻어졌다. 이후 액상 및 열적 박리법, 화학 기상 증착(chemical vapor deposition: CVD), SiC상 합성 등의 여러 가지 방법으로 제조되고 있다. Lee 등⁽¹¹⁾은 그래핀을 화학 기상 증착법을 사용해 대면적으로 합성한 연구와 그래핀과 실리콘의 접합을 이용해서 높은 점멸비를 가지는 전기적 스위치를 구현한 연구, 그리고 그래핀을 이용해 테라헤르츠에서 광변조기를 구현한 연구 등을 수행하였다. Suk 등⁽¹²⁾은 폴리머 조절을 통해 화학증착법으로 합성된 그래핀의 전기적 특성을 향상시키는 기술을 개발하였다. 산업적으로는 그래핀은 높은 투명도와 전기 전도성을 이용해 기존 산화물 기반 소재를 대체하는 투명전극 소재로 주목받고 있다.

탄소나노튜브(Carbon nanotube; CNT)는 육각형 벌집모양의 탄소원자 결합으로 이루어진 흑연면이 원통형으로 감겨진 결합 물질로 튜브의 형태에 따라 화학적, 전기적, 구조적 특성이 달라 연성 디스플레이, 축전지, 연료전지, 반도체 메모리 등 다양한 분야에서 응용이 가능하다. 현재 국내의 CNT 관련 산업은 미국, 일본에 비해 원천기술 특허에서는 다소 경쟁력이 낮으나 반도체, LCD 등 응용기술 분야에서는 수준이 높아 Field Emission Display 공정기술 분야에서는 경쟁력을 확보하고 있다. 국내에서는 마이크로 유체칩(Microfluidics Chip)과 유전영동(Dielectrophoresis)을 결합하는 방법으로 CNT의 금속성과 반도체성을 고순도로 분리할 수 있는 기술이 개발되었고, CNT 원자현미경 탐침 대량조립 기술, 단일벽 CNT 잉크젯 프린팅 기술, CNT 투명 히터 기술 등 다양한 기술 또한 개발되었다. Oh 등⁽¹³⁾은 CNT 용액의 나노입자 코팅 기술 및 실리카-탄소나노튜브 용액을 이용한 표면 소수성 제어 기술 등 다양한 산업화를 위한 연구를 수행하였다. 이와 같은 연구에도 불구하고 상업화를 위해서는 대량생산을 통한 원가절감, 분산기술 확보, 관련 지적재산권 확보 등 해결해야 할 문제점이 남아있다. 한화석유화학과 엠파워에서는 CNT를 제조 및 판매하고 있으며, 상보, 엑사이엔씨, 탑나노시스 등의 업체에서는 터치패널의 ITO 필름 대체를 위한 양산체제를 구축하였다. 그러나 아직 원가절감

을 위한 Roll-to-Roll 방식이 도입되지 못한 상황이어서 산업화를 위한 추가 개발이 필요하다.

3.3 나노복합재료

나노복합재료 분야에서는 점토(clay)를 대체하여 CNT나 그래핀을 충전제로 사용하기 위한 연구가 활발하다. 이러한 고분자/CNT 혹은 그래핀 나노복합재료는 기존의 소재로는 얻을 수 없었던 다양한 기계적, 열적, 전기적 및 광학적 특성들을 얻을 수 있는 장점을 지니고 있다. 최근 연구를 보면 그래핀 위에 고품질의 반도체 박막을 만들고 이를 원하는 기판에 자유자재로 붙일 수 있는 기술을 구현하여, 고효율 LED와 디스플레이, 태양전지 등을 개발하는데 활용할 수 있는 길을 열었다. 그래핀 복합소재 기술이나 표면개질 기술은 실리콘 등 딱딱한 재질의 기판뿐 아니라 휘어지는(flexible) 플라스틱 기판에도 이용될 수 있다는 장점 때문에 다양한 연구가 진행 중이지만 아직 상업화가 이루어지지 못하고 있다.

현재 국내에서는 카본 나노섬유를 이용한 나노복합재료 외에는 해외에 비해 나노복합재료에 대한 연구가 활발히 진행되지는 않고 있다. 부산대학교에서는 폴리머-탄소나노필러 나노복합체의 성장 및 합성 기술을 개발하고, 탄소나노구조체 기반 엔지니어링 복합플라스틱의 기계적-전기적 특성 연구 및 새로운 분무 열분해방법을 이용한 나노복합체 대량생산 기술을 개발하는 등 다양한 산업화를 위한 연구를 수행하였다.⁽¹³⁾ 한국기계연구원에서는 저전압에서도 효율적인 방전을 일으키는 고전도성 마이크로/나노 탄소섬유를 개발하여 실내 초미세먼지를 효과적으로 제거할 수 있는 공기정화장치의 방전극으로 활용하는 기술을 개발하여 제품을 상용화하는 등 다양한 나노복합재료 연구가 수행중이다.⁽¹⁴⁾ LG화학에서는 CNT 고분자 복합재를 개발하고 있으며, 엑사이엔씨에서는 터치스크린용 투명전극과 CNT-구리-알루미늄 복합재를, 그리고 탑엔지니어링에서는 LED간판용 CNT 투명필름을 개발하고 있다. 또한, 덕산하이메탈과 티모에서는 CNT 염료감응형 태양전지 모듈을 개발하여 상업화를 진행 중이다. 그러나 분산기술 확보와 가격인하 등 상업화를 위하여 넘어야 할 장벽들로 인해 아직 산업화 실적은 미미하고 할 수 있다.

4. 기계공학 관점에서 글로벌 나노소재 산업의 발전

4.1 나노분말소재

전구물질들을 열적으로 적절하게 처리해 줌으로써 고체성분의 나노입자는 남기고 불필요한 성분들은 증발시켜 날려 보내는 열분해방법으로 다양한 종류의 나노입자들을 만들 수 있다. 이 방법으로 은, 백금, 니켈, ZrO_2 , Al_2O_3 , SnO_2 , TiO_2 , GaN, CdS, ZnS 및 탄소나노튜브 등의 나노입자들이 합성된 바 있다. 중국에서는 실리카의 메소기공 내에 은 나노입자를 합성하였다. 다공성 실리카겔을 질산은 용액과 혼합한 뒤, 열분해를 통해 2.5~3.5nm 정도의 은나노입자를 만들었다. 브라질에서는 표면적과 기공의 부피가 대단히 큰 니켈-알루미늄 또는 니켈-마그네슘 복합물질을 합성하였다. $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$, $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ 를 $C_6H_8O_7 \cdot H_2O$ 와 ethyleneglycol 등과 혼합해서 열분해시켜서 Al_2O_3 또는 MgO 기공 내에 2.3~39.8nm 크기의 니켈 나노입자가 분포된 복합물질을 얻을 수 있었다. 금속 나노입자가 분포된 마이크로 및 메소기공 시스템은 촉매에 응용될 수 있다는 가능성 때문에 주목을 받고 있는 물질이다. 한편 미국에서는 GaN 나노입자를 합성하였다. 합성된 GaN의 평균 직경은 약 40nm 정도이고, 나노입자의 전자회절사진(SEAD, selected area electron diffraction)을 촬영해 본 결과 GaN에서 전형적으로 나타나는 결정형태인 입방체나 육방 결정 형상의 회절 고리(diffraction ring)가 나타나지 않는다는 점으로부터 이 결정이 비정질이라는 사실을 확인할 수 있었다. 일본에서는 ZnS와 CdS의 전구물질들인 $Zn(NO_3)_2$, $Cd(NO_3)_2$ 및 $SC(NH_2)_2$ 등이 포함된 수용액을 초음파 스프레이로 고온의 반응기 안으로 분사해서 열분해시킴으로써 ZnS와 CdS 반도체 나노입자를 합성하였다. 전구물질의 농도와 전구물질이 통과하는 노의 온도를 조절해서 나노미터 크기의 입자를 얻는데 성공했다.

기화(vaporization)된 전구물질을 반응기 내로 주입시키면 고온 물질에 흡착되어 열적으로 분해되거나 다른 기체와 반응해서 결정을 생성시키는데, 이러한 CVD 방법으로 호주에서는 $(CH_3)_3Ga(TMG)$, $(CH_3)_3In(TMI)$ 및 AsH_3 를 각각 Ga, In, As의 전구물질로 사용해서 AlGaAs 기판 상에 AlInAs 양자점

(quantum dot, QD)을 성장시키는데 성공하였다. 일본에서는 흔히 사용되는 계면활성제 없이 GaN 층 위에 InGaN 양자점을 자기결합 시키는데 성공하였다. 즉, 수평의 수정(水晶) 반응기에 30nm 두께의 GaN 핵 생성층을 성장시키는 동시에 trimethylgallium(TMГ)을 수소 기체와 혼합해서 통과시켜서 InGaN 양자점이 GaN 층 위에 자기결합 되도록 유도하였다.

현재 나노와이어나 나노벨트, 나노튜브 등을 만드는 연구가 활발하게 진행중인데, 대표적인 소재로는 실리콘, GeO₂, Ga₂O₃, SnO₂ 등의 나노와이어와 ZnO 나노막대, GaO 나노벨트 및 나노박판 등이 있다. 이러한 물질들은 일반적으로 전자빔(electron beam), 열에너지, 스퍼터링(sputtering), 방전플라스마(arc plasma) 및 레이저 펄스 등을 이용하여 물질을 기화시킨 뒤, 증기상 물질을 응축시켜 제조한다.

Nanopowder Enterprises사와 Tetronics사에서는 Single plasma torch와 twin torch를 이용해 Al₂O₃, MgO, TiO₂, Y₂O₃ 등의 나노분말을 생산하고 있으며, TAL Materials사와 Advanced Materials & Nanopowder Industries사에서는 화염 열분해 방법을 이용해 세라믹 나노분말을 제조 및 판매하고 있다. 또한 Argonide nanometals사에서는 전기폭발법(Electro-explosion)을 이용해 금속 나노분말을 제조하고 있으며, Powdermet 사에서는 화학증착법(Chemical vapor deposition)을 이용해 코팅된 나노분말을 제조한다. 이외에도 SUPERIOR Micropowders사, Nanopowder Industries사, Nanomat사, Nanopac사 등 많은 업체들이 나노분말 재료를 제조 및 판매하고 있다.

4.2 탄소 나노소재

그래핀은 특이한 물리적 성질 때문에 학계와 산업계의 비상한 관심을 끌어왔다. 그래핀은 강철보다 200배 높은 인장강도를 가지고 있고, 귀금속이나 다이아몬드보다 더 뛰어난 열전도체이다. 게다가 전자의 평균 자유 경로가 상온에서도 μm 에 육박할 정도로 우수한 전기전도성을 갖고 있어서 이상적인 전자재료로서 주목받아 왔다. 그래핀은 기존에 널리 사용되는 ITO에 비해 제조비용이 낮을 뿐만 아니라, 기계적인 충격에도 강하므로 산업적으로 유연 태양전지나 디스플레이 기기의 투명전극으로 활용될 수 있다. 뛰어난 전기적 성질을 활용해서 전계효과 트랜지스터 등 전자 스위치 소재로 활용하려는 연구도 활발히 진행 중이지만, 본격적인 산업화는 아직 미흡하다. 높은 전하이동도에 비해 밴드 갭이 작아 점멸비가 낮아지는 등 아직 해결하지 못한 문제로 인해 현재 산업화를 위한 연구가 진행 중이다.

CNT의 세계 총 생산량은 2014년도에 약 7000톤 정도로 추정되고 있으며 가격은 최근 제조기술의 발달로 \$40/kg 이하에 형성되어 계속 내려가고 있는 추세이다. Unidym사, Toray industries사, Mitsubishi Rayon사, South West Nano Technologies사, Klean Carbon사 등의 회사들이 단일벽 탄소나노튜브를 생산하고 있으며, Showa Denko사, CNano사, Nanocyl사, Arkema사, Hyperion Catalysis International사 등의 회사들이 다중벽 CNT를 생산하고 있다. 세계적으로 생산되는 CNT의 대부분이 복합소재(고강도, 고전도성, 발열, 방열, 경량 등)의 재료로 사용되고 있으며 이를 이용한 스포츠용품 등 소비자 상품 역시 꾸준히 증가하고 있다. 나머지는 전자 재료, 에너지 재료 등의 분야에 응용되고 있다.

4.3 나노복합재료

고분자 나노복합재료는 고분자 매트릭스에 100nm 이하의 충전제로 이루어진 소재이다. 충전제로는 그동안 카본섬유, 실리카, 점토 등이 사용되었으나, 최근에는 CNT나 그래핀을 충전제로 사용하기 위한 연구가 전세계적으로 진행되고 있으며, 이러한 고분자/CNT 나노복합재료는 기존의 소재로는 얻을 수 없었던 다양한 기계적, 열적, 전기적 및 광학적 특성들을 얻을 수 있는 장점을 지니고 있다.

복합소재의 재료로 사용되는 CNT는 일정한 방향성 없이 분말의 형태로 제조되어 대량생산공정에 투입되기 때문에 CNT 개개의 특출한 성질을 보여주고 있진 않다. 방향성을 살리는 형태로 제조되는 CNT는 아직 관련 생산, 처리기술의 미숙 및 대량 생산시설의 미비로 크게 상용화가 진행되고 있지는 않는 실정이다. 다만 미국과 일본 등의 대학과 연구기관에서 CNT의 뛰어난 물성을 살리는 고성능 합성섬유와 복합재료등의 연구가 활발히 이루어지고 있기 때문에 향후에 상용화가 기대된다. 전자재료와 에너지재료로써도 활발한 연구에 힘입어 트랜지스터, 투명전극, 태양전지, 2차전지등의 분야에 응용되고 있다.

나노복합소재의 응용이 가장 활발한 분야는 의약품 분야라고 볼 수 있다. 특히 약물전달시스템(drug delivery system)에서 유기 복합 나노입자가 가장 큰 가능성을 보이고 있다. 나노약물전달체로 사용되는 일반적인 의미의 나노입자는 5-250 nm 정도로 효소나 수용체, 항체 등과 비슷한 정도의 크기를 가지며 나노입자 자체의 물리, 화학적 특성에 따라 활용도가 달라진다. 나노입자에는 폴리머(polymer)나 덴드리머(dendrimer) 같은 유기나노입자와 산화철(iron oxide)나 금 나노입자 같은 무기나노입자가 있으며 이 둘을 접합한 유/무기 하이브리드도 있다.

Bio-세라믹스 나노복합재료는 고강도이면서, 탄성율의 조절이 가능하기 때문에 고강도화 하면서 또한 Bio-active한 특성까지 갖춘 재료를 설계할 수 있다는 면에서 응용가능성을 넓힐 수 있다. 그 예로 고강도, 고인성 ZrO₂ 기지상에 Al₂O₃를 분산시킨 나노복합재료를 들 수 있다. 이러한 고강도, 고인성 나노복합재료가 몸안에 장착될 경우에 Atptite 층을 통하여 뼈와 결합할 수 있다는 결과를 보여주며 실질적으로 Bio-세라믹스에의 응용가능성을 시사한다고 할 수 있다.

5. 기계공학 관점에서 나노소재 산업의 비전

5.1 나노분말소재

나노분말 소재는 다른 형태의 나노소재에 비하여 시장진입이 빨리 이루어지고 있긴 하지만 여전히 여러 가지 문제를 갖고 있다. 첫째는 몇몇 분말의 예를 제외하고는 대규모의 시장이 형성되지 않고 있다는 점이다. 이전부터 사용되어 오던 실리카 나노분말, 탄소분말과 같이 많은 양의 수요를 갖고 있는 경우나 반도체 제조공정인 화학기계적 연마공정(CMP)에 소요되는 많은 양의 슬러리용 나노분말을 제외하면 아직까지 많은 생산량을 필요로 하는 나노분말은 거의 없다. 둘째는 나노분말을 합성하는 공정들이 여전히 경제성을 확보하고 있지 못해서 분말가격이 여전히 비싸다는 점이다. 나노분말의 비싼 가격은 응용기술 개발에 장애가 되기 때문에 수요 창출을 막는 요인이 되고 있다. 셋째는 나노분말의 사용, 특히 나노분말을 건식으로 사용(취급)하는데 많은 어려움이 있다는 점이다. 나노분말은 분산(dispersion)이나 성형(compaction)에서의 어려움을 차지하더라도 취급상 많은 어려움이 있다. 나노분말은 매우 작고 가볍기 때문에 고밀도 충전은 대단히 어려운 반면 공간내 확산이 잘 된다. 이러한 문제점을 잘 해결한다면, 화학공업이 필요로 하는 다양한 촉매(화학물질의 합성 및 정제), 환경산업 분야에 쓰일 오염제거제(흡착 및 분해), 침전제(응집제) 등에 널리 활용될 수 있다.

반도체기술의 지속적인 발전과 함께 CMP(Chemical Mechanical Polishing, 화학적 기계적 연마) 공정의 대상물질이 계속해서 변화되어 갈 것이기 때문에 CMP 분야는 나노분말 분산기술을 주도해 갈 것이다. 이외에도 나노분말의 분산체는 화장품, 마이크로유체(micro-fluid) 등으로 직접 쓰이거나 페인트, 페이스트 등 코팅을 위한 재료로 폭넓게 쓰이므로 매우 유망한 분야라고 할 수 있다. 표시장치를 위한 형광물질의 코팅, 전자파 차폐코팅, 반사/무반사코팅, 자외선 차단코팅(자외선 차단 화장품 포함), 금힘 방지 코팅, 결로방지 코팅 등 나노분말의 코팅기술은 향상된 특성을 강점으로 기존 방법에 의한 코팅 내지는 마이크론 혹은 서브미크론 분말을 이용한 분말코팅을 상당부분 대체하게 될 것이며 나노분말의 새로운 물성을 이용한 새로운 응용분야를 창출해 낼 것이다. 나노분말을 이용해서 벌크형태의 소결체를 경제적으로 제조하기 위해서는 아직까지 해결해야 할 문제가 너무 많다. 비교적 두께가 얇은 투과막(다공질막 포함), 다공체 벌크 등 나노구조를 유지하기가비교적 용이한 소결체를 제조하는 기술은 상당히 발전되어 있으므로 부분적으로 산업화가 나타나고 있고 점차 활성화될 것이다. 환경산업혹은 에너지 관련 산업에의 적용이 매우 유망하다. 벌크형태의 소결부품을 제조하는 것은 당분간 경제성을 확보하기가 곤란하여 특수목적분야를 제외하고는 쓰이기 어려울 것이다.⁽¹⁵⁾

5.2 탄소 나노소재

산업적으로 그래핀은 높은 투명도와 전기 전도성을 이용해 기존 산화물 기반 소재를 대체하는 투명 전극 소재로 주목받고 있다. 그래핀은 기존에 널리 사용되는 ITO에 비해 제조 비용이 낮을 뿐만 아니라,

기계적인 충격에도 강하므로 플렉서블 태양전지나 디스플레이 기기의 투명전극으로 활용될 수 있다. 뛰어난 전기적 성질을 활용해서 전계효과 트랜지스터 등 전자 스위치 소재로 활용하려는 연구도 활발히 진행 중이지만, 본격적인 산업화를 위해서는 높은 전하이동도에 비해 밴드갭이 작아 점멸비가 낮아지는 문제를 해결해야 한다.

CNT는 튜브의 형태에 따라 화학적, 전기적, 구조적 특성이 달라 연성 디스플레이, 축전지, 연료전지, 반도체 메모리 등 다양한 분야에서 응용이 가능하다. 세계 CNT 및 CNT 복합재료 시장은 2009년 약 1.2~1.6억 달러 수준으로 크지 않은 편이나 양산화와 분산기술의 진보로 인하여 CNT 복합재료 시장은 매년 약 70% 정도 증가할 것으로 예상된다. 2005년 250~350달러/kg 이던 MWCNT(Multi-wall CNT) 가격은 2009년 100~150달러/kg으로 크게 하락하였는데, 업체들의 생산능력 확충으로 인하여 원가가 하락하면서 수요도 증가하는 추세다. CNT를 재료로 한 탄소섬유는 무게가 철의 1/4에 불과하지만 강도는 10배에 달하는 첨단소재로 고가로 인해 한정적인 분야만 사용되었으나 연비절감 및 환경규제 강화로 보잉을 비롯한 항공기 제조사들이 탄소섬유 사용 비중을 확대하고 있다. 최근 CNT는 기존의 ITO를 대체하는 투명전도성 필름 등 기능성 필름으로 각광받는 추세로 그 전망이 매우 밝은 편이다.

5.3 나노복합재료

유/무기 고분자하이브리드 재료의 경우, 투명 광학재료, 페인트/코팅, 엔지니어링 플라스틱, 생체재료 및 다공질 재료 등으로 상용화가 시도되고 있다. 잠재적 시장 중에서 가장 유망한 분야는 광학용 재료이고, 그 다음으로 큰 시장이 페인트/코팅 부문인데, 상당 부분을 대체할 잠재성이 높다. 복합 나노소재의 응용이 가장 활발히 다루어지고 있는 분야는 의약품 분야라고 볼 수 있다. 특히 약물전달시스템에서 유기 복합 나노입자가 가장 큰 가능성을 보이고 있다. 약효 성분의 운반체로서 유기 복합나노입자가 이용될 경우 특정 부위에 집중할 수 있으며, 과다 약물 사용을 피할 수 있어 약물에 의한 부작용을 크게 감소시킬 수 있다. CNT 복합재료의 경우 전 세계적으로 연구와 특허출원이 활발하게 이루어지고 있고 대량생산 설비가 갖추어짐에 따라 생산량과 가격이 점차 떨어지는 추세로써 미래에 광대한 산업 전반에 응용될 수 있을 전망이다. 현재 상용화가 진행되어있는 합성섬유, 복합소재, 도료 등의 성능도 개선될 여지가 충분하며 더 길고 순도가 높은 CNT를 자유자재로 원하는 형상으로 만들어 내는 기술이 발전함에 따라 새로이 정밀기계, 나노기계, 인공 근육, 소수성/친수성 표면 등에 활용될 수 있을 것으로 보인다.

참고문헌 (References)

- (1) Han, K., Kim, W., Yu, J., Lee, J., Lee, H., Woo, C. G. and Choi, M., 2012, "A Study of Pin-to-Plate Type Spark Discharge Generator for Producing Unagglomerated Nanoaerosols", *Journal of Aerosol Science*, Vol. 52, pp. 80~88.
- (2) Cha, S., Lee, D., Kim, M. C., Kim, D. S. and Choi, M., 2015, "Wire-in-Hole-Type Spark Discharge Generator for Long-Time Consistent Generation of Unagglomerated Nanoparticles", *Aerosol Science and Technology*, Vol. 49, pp. 463~471.
- (3) Suh, J., Han, B., Okuyama, K. and Choi, M., 2005, "Highly Charging of Nanoparticles through Electrospay of Nanoparticle Suspension", *Journal of Colloid Interface Science*, Vol. 287, pp. 135~140.
- (4) Sheen, S., Yang, S., Jun, K. and Choi, M., 2009, "One-step Flame Method for the Synthesis of Coated Composite Nanoparticles", *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 11, pp. 1767~1775.
- (5) Kim, H., Kim, J., Yang, H., Suh, J., Kim, T., Han, B., Kim, S., Kim, D. S., Pikhitsa, P. V. and Choi, M., 2006, "Parallel Patterning of Nanoparticles via Electrodynamic Focusing of Charged Aerosols", *Nature Nanotechnology*, Vol. 1, pp. 117~121.
- (6) 이기웅, 2015, 석사학위논문, 서울대학교(2015. 2.)

- (7) Jung, K., Hahn, J., In, S., Bae, Y., Lee, H., Pikhitsa, P. V., Ahn, K., Ha, K., Lee, J. K., Park, N. and Choi, M., 2014, "Hotspot-Engineered 3D Multipetal Flower Assemblies for Surface-Enhanced Raman Spectroscopy", *Advanced Materials*, Vol. 33, 5924~5929.
- (8) Ko, Y. S., Joe, Y. H., Seo, M., Lim, K., Hwang, J. and Woo, K., 2014, "Prompt and Synergistic Antibacterial Activity of Silver Nanoparticle-decorated Silica Hybrid Particles on Air Filtration", *Journal of Materials Chemistry B*, Vol. 2, pp. 6714~6722.
- (9) Jung, K., Song, H. J., Lee, G., Ko, Y., Ahn, K. J., Choi, H., Kim, J. Y., Ha, K., Song, J., Lee, J. K., Lee, C. and Choi, M., 2014, "Plasmonic Organic Solar Cells Employing Nanobump Assembly via Aerosol-Derived Nanoparticles", *ACS Nano*, Vol. 8, pp. 2590~2601.
- (10) 이동근, 2006. 나노 다공성 입자의 제조 및 열전달 향상을 위한 응용 연구, 젊은과학자 연구활동지원 사업. 과학기술부.
- (11) Lee, S. H., Choi, M., Kim, T. T., Lee, S., Liu, M., Yin, X., Choi, H. K., Lee, S. S., Choi, C. G., Choi, S. Y., Zhang, X. and Min, B., 2012, "Switching Terahertz Waves with Gate-controlled Active Graphene Metamaterials", *Nature Materials*, Vol. 11, pp. 936~941.
- (12) Suk, J. W., Lee, W. H., Lee, J., Chou, H., Hao, Y., Piner, R. D., Akinwande, D. and Ruoff, R. S., 2013, "Enhancement of the Electrical Properties of Graphene Grown by Chemical Vapor Deposition via Controlling the Effects of Polymer Residue", *Nano Letters*, Vol. 13, pp. 1462~1467.
- (13) Oh, M. J., Sun, F., Cha, H. R., Park, J. E., Lee, J. G., Kim, K. B., Kim, M. J., Kim, S. H., Lee, D. Y. and Lee, J. B., 2015, "Vertically Aligned Multi-Layered Structures to Enhance Mechanical Properties of Chitosan-Carbon Nanotube Films", *Journal of Materials Science*, Vol. 50, pp. 2587~2593.
- (14) 한방우, 우창규, 김용진, 2015, 고밀도 마이크로하전 무필터방식의 자동제정형 초미세입자 공기정화 기술 개발, 환경산업선진화기술개발사업, 환경부.
- (15) 김경호, 이호신, 최봉기, 강용수, 원종옥, 이건홍, 김교선, 김도향, 박종구, 이성훈, 고원배, 2002, 나노 소재 기술, 한국과학기술정보연구원.