

나노분말 기술의 현황 및 전망

박 종 구

한국과학기술연구원 재료연구부 나노재료연구센터

Current Status and Prospect of Nanopowder Technology

Jong-Ku Park

Nano-Materials Research Center Materials Science and Technology Division,
Korea Institute of Science and Technology (KIST)

1. 서 론

1.1. 나노분말 소재의 중요성

1.1.1. 기반성

나노분말 소재는 형태상으로는 0차원으로 분류할 수 있다. 나노분말은 그 자체로서 독립적인 소재이기도 하지만 보다 높은 차원의 소재(나노소재)를 제조하는데 쓰이는 원료소재이기도 하다. 나노분말은 1차원 소재인 나노섬유, 나노막대, 2차원 소재인 나노박막 또는 나노구조 후막, 3차원 소재인 나노벌크(소결체), 나노기공체, 나노복합체(나노나노 복합소재), 복합차원 소재(크게는 3차원 소재로 분류)인 다차원 복합소재의 제조를 위한 원료로 사용할 수 있다. 따라서 나노분말은 다양한 형태의나노소재 가운데서 가장 원천적인 성격을 갖는 소재라고 할 수 있다.

1.1.2. 특이성

나노분말 소재의 중요성은 기반성 외에도 물성 측면의 특이성 관점에서 설명할 수 있다. 나노분말 소재는 기존의 마이크론 또는 서브미크론 크기의 분말들에서는 관찰되지 않는 물성들을 나타낸다. (이는 나노소재가 나타내는 특이물성과 맥을 같이 하는 것이다.) 예를 들어 흰색 도료나 물감으로 많이 쓰이는 티타니아(산화티타늄) 분말은 마이크론 혹은 서브미크론 크기 영역일 때는 특이한 물성을 나타내지 않지만 분말의 크기가 수십 나노미터(nm) 영역으로 작아지면 자외선 파장대에서 광촉매 효과를 나타낸다. 이 광촉매 특성 때문에 티타니아 나노분말이 다양한 환경재료로 각광을 받고 있다.

또한 결정구조 측면에서 대부분의 분말은 크기가 대단히 작아지면 모세관력(표면장력)의 영향을 크게 받아 큰 크기일 때와는 다른 결정상(結晶相, crystalline phase)을 나타낸다. 예를 들어 지르코니아(산화지르코늄) 분말은 보통 크기(미크론 내지 서브미크론 크기)에서는 상온에서 단사정 구조(monoclinic phase)를 갖지만 30 nm 이하에서는 사방정 구조(tetragonal phase)를 갖는다. 알루미늄, 티타니아, 산화철 등 거의 모든 산화물계 나노분말에서 이러한 크기 감소에 따른 상전이 거동이 나타난다. 나노분말이 나타내는 특이한 물성은 이와 같은 새로운 상에 기인하는 경우도 많다.

1.1.3. 기술 성숙도

분말소재 기술은 나노기술이 주목을 받기 이전부터 분말 크기가 계속해서 작아지는 방향으로 발전해 왔다. 특히 일부 분말제조에 있어서는 이미 오래 전에 나노크기 영역으로 분류되는 직경 100 nm 한계 이하로 접어들었다. 열역학적(열적)으로 안정한 산화물계 세라믹 분말의 경우 공침법, 솔-젤법 등의 방법으로 나노분말이 대량으로 제조되어 사용되고 있다. 나노분말 소재는 여러 형태의 나노소재 중 기술적으로 가장 성숙되어 있으며 이를 활용할 수 있는 다양한 산업도 이미 존재하고 있다.

물론 전반적으로는 다른 나노소재에 비하여 기술의 성숙도가 높지만 나노분말이 갖고 있는 무한한 가능성에 비하여 아직까지 시장 확대속도가 그렇게 크지 않은 이유는 본격적인 활용을 위해서 극복해야 할 몇 가지 기술 장벽이 존재하기 때문이다.

1.2. 나노분말 소재 기술의 구분

나노분말 소재 기술은 크게 합성기술, 활용기술, 분석평가기술로 구분할 수 있다. 합성기술과 활용기술의 내용은 다음에서 자세히 설명될 것이다. 나노분말의 분석평가기술은 합성기술과 활용기술에 공통적으로 걸쳐있는 기술이다. 즉 나노분말 합성의 결과를 정확하게 분석하여야만 합성공정을 체계적으로 최적화할 수 있고 합성하는 분말의 특성을 정확히 제어할 수 있다. 또한 나노분말을 실제로 사용하기 위해서는 물성에 대한 객관화된 자료가 필요하다. 따라서 나노분말의 특성을 객관적으로 나타낼 수 있는 분석평가기술이 매우 중요하다.

나노기술에 있어서 나노분말 소재가 차지하는 영역은 다음의 그림 1과 설명할 수 있다. 크기 측면에서 하향식 접근법인 미세화공정(구조미세화(structure refinement) 혹은 미세패턴 가공(micro/nano-patterning, fabrication)) 및 상향식 접근법인 구축(조립)공정(assembly, growth)을 이용하여 나노분말을 제조하는 것이 가능하다. 나노분말 합성에 있어서 공정 및 재료(원료) 선택의 다양성을 고려하면, 향후에는 상향식 접근법인 구축(조립)공정이 나노분말 제조에 폭넓게 활용될 것이다. 그림 1에서 원자 혹은 분자를 나노미터 크기 영역으로 조립하거나 성장시키는 과정(assembly, growing)이 나노분말 합성(synthesis

of nanopowders)' 과정이며 나노구조체(여기서는 나노분말)를 나노구조를 가진 부품으로 만드는 과정(forming)에 필요한 기술이 나노분말 활용기술인 '나노분말공정(nanopowder processing) 기술'이다.

2. 나노분말 기술

2.1. 나노분말의 제조법

나노분말을 제조하기 위해서는 매우 다양한 방법들을 채택할 수 있다. 나노분말 제조방법의 선택에 있어서 고려하여야할 중요한 점은 경제성, 공정 적합성, 환경 적합성이다. 경제성 측면의 고려에는 수명을 고려한 장치 비용, 사용할 원료물질(전구체)의 가격, 에너지 비용, 합성효율(수율), 추가로 물성제어가 필요한 경우의 후처리 비용 등이 포함되어야 한다. 공정 적합성을 평가하기 위해서는 공정제어의 용이성, 공정(장치)의 확장성, 제조분말의 다양성(다양한 원료물질 사용의 가능성)에 대한 고려가 포함되어야 하며 환경 적합성의 평가에는 유해물질의 사용 여부 및 유해물질의 발생 여부에 대한 고려가 포함되어야 한다.

나노분말의 합성공정은 합성된 분말의 특성과도 밀접한 관련이 있다. 즉 공정특성에 따라 나노분말 물성 제어의 난이도가 다르다. 나노분말의 물성을 결정하는 특성결정 인자는 외형적인 요소를 포함하는 거

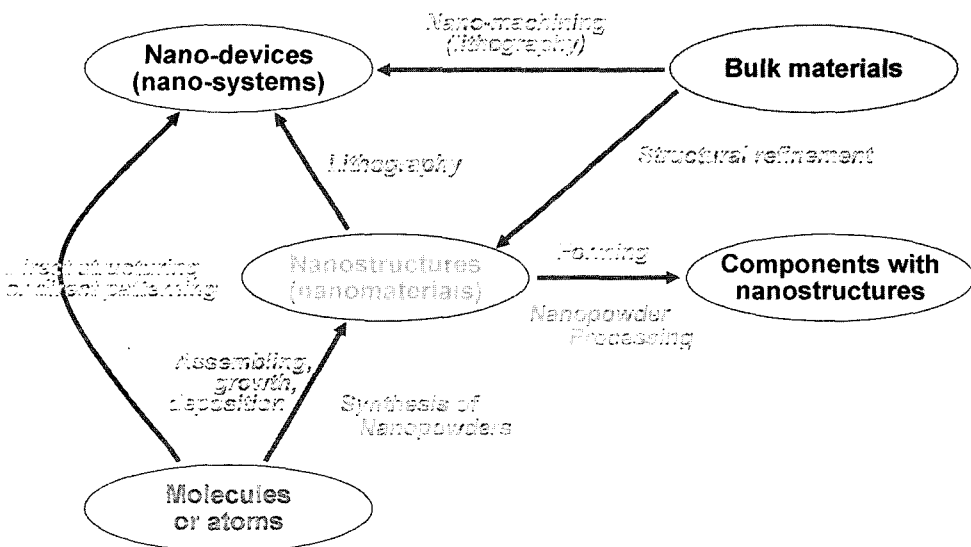


그림 1. 나노기술에서 기술요소간 연관관계 및 나노분말 기술(나노분말 합성 및 나노분말 공정)의 위치.

시적 인자와 원자스케일의 배열(불순물의 존재 형태 등을 포함)을 포함하는 미시적 인자로 구분할 수 있다. 거시적 인자는 나노분말을 사용하는 후속공정의 변수(충진성, 분산성, 유변특성, 소결성 등)에 주로 영향을 미친다. 거시적 인자에 속하는 것은 나노분말의 크기 및 크기분포, 형상, 응집도 등이다. 미시적 인자는 나노분말이 나타내는 물성(구조적, 전자적, 광학적, 화학적 물성)에 영향을 미친다. 미시적 인자에 속하는 것은 나노분말 내부의 상(상), 결합(점/선/면 결합), 성분의 균일성, 표면의 미시적 구조 등이다. 합성공정에 따라 거시적, 미시적 결합을 제어할 수 있는 정도가 달라진다.

2.2. 나노분말의 응용기술

나노분말을 실제로 응용하기 위해서는 이에 필요한 기술을 확보하여야만 한다. 나노분말의 응용 형태는 분말 자체(건식성형 포함), 분말입자의 분산체, 분산체를 이용한 성형, 나노분말 소결체 등이다.

2.2.1. 나노분말 자체를 응용하는 경우

나노분말을 그대로 이용하는 경우는 기존의 분말 이용과 큰 차이가 없다. 기존 분말과 차이가 나는 점은 분말입자가 대단히 작기 때문에 분말입자간 모세관에 분위기(대기) 중의 수분이 응결(capillary condensation)되어 분말입자를 응집시키는 현상이 발생한다는 점이다. 응집된 나노분말 입자는 개별 분말입자의 거동을 어렵게 하기 때문에 충진밀도가 떨어지고 건식성형 시 입자간 또는 분말-금형벽간의 마찰력 증가로 층상균열(lamination)이 발생하게 된다. 이러한 문제를 막기 위해서는 나노분말 입자 표면을 소수화(疎水化)하거나 疎水性 소재로 코팅하는 기술이 필요하다.

2.2.2 나노분말의 분산

나노분말은 합성 또는 보관 중의 응집, 대단히 큰 계면(표면/부피) 효과로 인하여 일반적으로 액상 매체 중에 잘 분산되지 않고 분산이 잘 되는 경우도 고상분말의 분율(solid fraction, solid loading)을 높이는 것이 어렵다. 서브미크론 분말을 분산시키는 기술을 적용하여 분말 분율을 높이는 것에는 한계가 있다. 가장 중요한 기술적 문제는 분산체의 안정성(colloid stability)을 어떻게 확보할 것인가와 고상 분율을 어떻게 높일 것인가 하는 점이다. 나노분말 분산체가 최종 제품이 되는 CMP(chemical mechanical

planarization)용 슬러리(slurry), 화장품, 도료 등에서는 특히 장기 안정성이 매우 중요하다. 후속공정(코팅 및 성형)을 위한 중간제품인 경우는 고상분율을 높이는 것이 무엇보다 중요하다. 높은 고상분율을 갖는 균일한 나노분말 분산체를 필요로 하는 다양한 후속 공정을 감안하면 나노분말의 분산기술은 나노분말 응용 기술에 있어서 가장 핵심적인 부분이라고 할 수 있다. 아직까지 나노분말 분산을 체계적으로 설명하고 해결책을 제시할 수 있는 이론적 체계는 확립되어 있지 않다.

2.2.3. 나노분말의 코팅 및 성형

나노분말을 사용하여 직접 성형하거나 코팅하는 것은 나노분말의 낮은 충진밀도 때문에 거의 불가능하다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 나노분말 분산체를 이용한다. 고상분율이 높은 나노분말 분산체는 박막 또는 후막 코팅(주로 표면코팅)을 가능하게 한다. 또 나노분말 분산체를 주조(casting)하거나 사출(injection molding), 압출(extrusion)하여 일정한 형상의 부품을 성형할 수 있으며 분무건조로 제조한 과립(granule)을 건식성형이나 용사코팅(이때는 열처리된 강한 과립을 사용)에 활용할 수 있다.

나노분말 분산체를 이용한 코팅이나 성형에서 중요한 점은 사용한 용매를 건조시키는 과정을 고려한 분산조건의 확보이다. 근본적으로 나노분말의 고상분율이 낮고 모세관이 대단히 미세하기 때문에 코팅체나 성형체(분무과립)가 건조될 때 용매 이동(capillary migration)의 제어가 용이하지 않다. 즉 건조결합의 발생 가능성이 매우 높다.

2.2.4. 나노분말 성형체의 소결(치밀화 기술)

나노분말을 사용하여 소결체를 만들고자 하는 목적은 소결 후 나노결정립을 갖는 소결체를 제조하기 위함이다. 나노분말 성형체는 높은 표면에너지 및 넓은 표면적을 갖기 때문에 미크론 내지 서브미크론 분말 성형체보다 낮은 온도에서 치밀화된다. 치밀화 측면에서는 나노분말이 장점이 있지만 치밀화 시에 빠른 결정립 성장을 동반한다는 문제점이 있다. 치밀화의 목적은 달성되지만 나노결정립 소결체의 목적 달성은 쉽지 않다.

최근의 연구에 의하면 나노분말 성형체의 낮은 성형 밀도가 완전치밀화와 동시에 나노결정립 소결체 제조의 목적 달성을 어렵게 하는 요인이다. 두 가지 목적을 동시에 달성하기 위해서는 성형밀도를 이론밀도의 75%

이상으로 높이는 것이 필요하다고 보고되고 있다.

3. 나노분말 기술의 전망

3.1. 시장 전망

세계에서 가장 큰 미국의 분말시장의 예측을 보면 아래의 표 1과 같다(BCC(Business Communication Company, Inc.)의 2003년도 보고서). 2002년 현재 나노분말은 기존의 세라믹분말 시장에 비해 중량 면에서는 3% 미만, 금액 면에서는 약 10% 정도의 규모를 형성하고 있다. 2007년경에는 세라믹분말 시장에 비하여 중량 면에서 3%를 약간 상회할 전망이며 금액 면에서는 약 12% 정도의 규모가 될 것으로 예측하였다. 2002년에서부터 2007년까지 5년 동안 연평균성장률(AAGR)은 세라믹분말의 경우가 7.1%인데 비하여 나노분말의 경우는 9.3%로 약간 더 높다.

3.2. 산업 전망

EU 역내의 나노소재 형태별 사업체의 수 및 산업 영역별 시장점유 비중을 표 2에 나타내었다. 전체 321개의 업체 중 반에 해당하는 160개 업체가 나노분말 관련 업체이다. 플러렌(C60) 등 나노분말 유사업종을 포함시킬 경우 그 비중은 더욱 커진다. 나노소재 관련 시장을 보면 가장 큰 비중을 차지하는 세가지 시장은 의료/제약, 화학 및 첨단 나노소재, IT 산업이다. 이들 중 적어도 의료/제약 분야는 나노분말 기술과 밀접한 관련이 있으며 에너지, 자동차, 농업 등 여러 분야가 나노분말 기술과 관련이 있다.

표 3은 나노분말이 현재 활용 중이거나 미래에 활용될 분야를 정리한 것이다. 주요 활용분야는 전력/에너지, 보건/의료, 공학, 소비재, 환경, 전자 등이다. 여러 분야에 이미 나노분말이 활용되고 있거나 활용에 필요한 기술들이 이미 개발되었음을 알 수 있다. 가까운 미래에 시장에 진입할 기술들도 상당히 많다.

표 1. 첨단 세라믹분말 및 나노분말의 미국 시장 (2002-2007, 단위: 백만)

구 분	2002		2007		AAGR% (2002-07)
	중량(파운드)	금액(\$)	중량(파운드)	금액(\$)	
세라믹분말	894.95	1,452.22	1,130.07	2,048.85	7.1
나노분말	23.32	154.46	36.18	241.29	9.3
합 계	918.27	1,606.68	1,166.26	2,290.14	7.3

* AAGR: 평균 연간 성장률

** 출처: BCC, Inc. (2003)

표 2. 주요 나노소재 형태별 사업체 수 및 시장점유 비중 (EU)

제품형태	사업체 수	주요 시장	비 중
나노분말	160	의료/제약	30
나노튜브	55	화학 및 첨단 나노소재	29
나노기공체	22	IT 산업	21
플러렌(C60)	21	에너지	10
양자점	19	자동차	5
나노구조 소재	16	우주항공	2
나노섬유	9	섬유	2
나노캡슐	8	농업	1
나노선	6		
덴드리머	5		
합 계	321		

* M.J. Pitkethly, Materials Today, 7(12), 20 (2004).

표 3. 나노분말을 활용한 현재 및 미래의 응용분야

응용분야	개발중인 소재	상품화된 소재	개발완료 소재
전력 /에너지	2차전지용 나노결정질 니켈 및 금속수소화합물 TiO ₂ 를 사용한 염료감응형 태양전지 금속수소화합물을 이용한 수소저장 SOFC용 양극 및 음극 소재 Cu를 이용한 열전달 유체	환경촉매 (디젤엔진의 CeO ₂)	자동차용 촉매
보건 /의료	손쉬운 흡착을 위한 나노결정질 약품 경구투입 인슐린 생체친화형 Si를 이용한 현재의 주사제를 경구 투입하기 위한 나노구형화 골 성장 촉진제 양자점을 이용한 바이러스 검출 항암치료 이식재료의 코팅(예: 하이드록시아파타이트)	ZnO 및 TiO ₂ 를 이용한 자외선 차단제 CdSe 양자점을 이용한 분자 표시 저수용성 약물용 수송체	Ag 항박테리아 상처 드레싱, ZnO 항균제 생체 표시 및 탐 지를 위한 Au 초상자성 산화 철 분말을 이용한 MRI 조영 제
공 학	절삭공구: WC, TaC, TiC, Co 금속 및 세라믹 나노분말을 이용한 방전 플러그 에어로졸 기반 고효율 단열체용 실리카 나노기공체 제조제 및 살충제의 전달 제어 화학센서 분자체(molecular sieves)	내마모코팅(Al ₂ O ₃ , g-ZrO ₂) 구조적 특성이 향상된 고분 나노점도 강화 고분자 복합재 열용사코팅 재 운환/유압유 첨가물(Cu, TiO ₂ , TiC-Co 등) MoS ₂ 도료 TiO ₂ 를 이용한 自淨 유리 추진제(Al)	잉크(금속분말을 이용한 도 전성, 자성 등)
소비재		위조방지 기구	실리카이트를 이용한 포장재 스키 왁스 흰색 상품 TiO ₂ 를 이용한 눈부심 방지, 김서림 방지 거울 스포츠 용품 (나노점토를 이용한 테니스 볼 및 라켓) 방수 또는 방오 섬유
환 경		수질개선용 알루미늄이 섬유 TiO ₂ 기반 나노구조 코팅에 의한 自淨 유리 TiO ₂ 를 이용한 수질정화 광촉매 반사방지 코팅	알루미늄 등으로 코팅된 타일 위생도기 Fe를 이용한 토양 복원
전 자	고밀도 자료저장용 자성 나노입자 전도성 및 자성 재료를 이용한 전자파 차폐 Cu, Al을 이용한 전자회로, NRAM 전도성 산화물을 이용한 전계방출 소자를 포함한 디스플레이 기술	자성 소재를 이용한 자성 유체 희토류 원소가 도핑된 세라 믹을 이용한 스위치와 같은 광전소자 희토류 원소가 도 핑된 세라믹을 이용한 도전 성 코팅 및 직물	화학기계적 연마 (Al ₂ O ₃ , CeO ₂)

* M.J. Pitkethly, Materials Today, 7(12), 20 (2004)

특히 개발 중인 기술들에는 향후 대단히 큰 시장을 형성할 분야들을 포함하고 있다. 표 2와 표 3에서 알 수 있는 점은 나노분말 기술은 미래의 기술이 아니라 현재 기술이며 현재는 물론 미래에 상당히 여러 산업 분야에 영향을 미칠 기술이라는 것을 알 수 있다.

4. 요 약

나노분말 기술은 나노기술이 성숙단계에 접어들 것으로 예상되는 2012년 내지 2015년경에 성숙될 기술이 아니라 이미 산업화가 빠른 속도로 이루어지고 있으며 나노기술의 산업화를 선도할 기술이다. 나노분

말 기술은 에너지/환경은 물론 IT, BT 산업 등 거의 모든 신산업 분야에 활용되고 있거나 활용될 전망이다. 이러한 이유로 거의 모든 국가들이 수행하고 있는 나노기술개발 프로그램에 나노소재 기술이 중요한 분야로 다루어지고 있고 나노분말 소재기술 분야는 빠지지 않는 기술 분야이다. 우리나라의 나노기술 개발 프로그램에서도 예외는 아니다. 많은 수의 연구 과제들이 수행되고 있으며 일부 상업화에 접어든 기술들도 있다. 미국, 일본 등 거의 모든 나라에서 다수의 벤처기업들이 나노분말 기술의 상업화에 뛰어 들고 있다. EU의 경우는 전체 나노소재 관련 사업체 중 절반에 해당하는 업체들이 나노분말 업체라는 점은 눈여겨 볼만하다.

앞서 살펴보았듯이 나노분말 기술은 그 자체가 하나의 산업을 이끌어낼 기술인 동시에 기존산업을 포함한 소재산업은 물론 나노기술 산업을 바탕으로부터 지탱해줄 기반기술이다. 그만큼 많은 가능성을 갖고 있으며 기술적인 장애가 하나씩 극복될 때마다

기술의 발전속도는 빨라질 것이며 시장 또한 빠르게 확대될 것이다.

참고문헌

1. 박종구 : 대한금속학회회보, **12** (1999) 555.
2. 박종구 : 나노소재의 필요성 - 왜 나노소재인가?, 재료마당, **14**(2001) 4.
3. 이해원, 김주선 : 나노분말의 성형, 재료마당, **14** (2001) 35.
4. 안재평, 박종구 : 기상합성 공정에 의한 나노분말 합성기술의 개발동향및 전망, 세라미스트, **5**(4) (2002) 27.
5. 김경호, 강상규, 박종구, 이호신 : 나노분말소재 (심층정보분석보고서 BA016), 한국과학기술정보연구원 (2002).
6. Business Communication Company, Inc. (2002); (2003).
7. European White Book on Fundamental Research in Materials Science, Max-Planck-Institute (2002).
8. WTEC Workshop Report: R&D Status and Trends in Nanoparticles, Nanostructured Materials, and Nanodevices in the United States, January (1998).