

## 나노금속분말재료의 연구현황



최철진

(KIMM 재료연구부)

'84 서울대학교 금속공학과(학사)  
'86 한국과학기술원 재료공학과(석사)  
'97 한국과학기술원 재료공학과(박사)  
'86 - 현재 한국기계연구원 책임연구원

김병기

(KIMM 재료연구부)



'81 한양대학교 금속공학과(학사)  
'87 미국 Rutgers대학 재료공학(석사)  
'89 미국 Rutgers대학 재료공학(박사)  
'89 - '91 Nanodyne사 연구원  
'91 - 현재 한국기계연구원 책임연구원

### 1. 서론

최근 전자, 정보통신 및 생명공학 산업의 급속한 발전으로 인해, 나노 기술에 대한 전세계적인 관심이 높아지고 있다. 나노기술은 소자, 가공 및 재료기술로 나눌 수 있으며 그중 나노 재료기술은 나노소자 및 나노가공의 기반이 되는 기술이다. 또한, 나노재료분야에서 가장 활발히 연구되고 있는 분야는 분말재료분야이며, 산업적 측면에서 응용범위가 높은 분야는 나노 금속재료분야이다.

지금까지 금속분말재료분야는  $\mu\text{m}$  order ( $10^{-6}$ )의 재료가 개발, 응용되어 왔으나, 보다 고특성의 첨단분말재료를 개발하기 위해 최근에는 nm order의 분말재료에 대한 연구가 급증하고 있다. 이 재료는 입자크기가 극미세해짐에 따라 일반 분말재료에서는 발견되지 않았던 특이한 기계적, 물리적 특성이 나타난다. 예를 들어, 구상 입자의 경우 원자반경을  $d$ 라 하고 입자반경을  $r$ 이라 하면 표면원자의 수는  $r^2/d^2$ 에 비례하고, 내부원자의 수는  $r^3/d^3$ 에 비례하게 된다. 따라서 전체 원자 수에 대한 표면원자의 비율은  $d/r$ 에 비례하게 되며 이는 일정하다고 볼 수 있으므로 입자의 반경, 즉 크기가 작아질수록 표면원자의 수는 상대적으로 증가한다.

따라서 입자의 크기가 작아질수록 체적특성은 감소하고 표면특성이 두드러지게 나타나기 시작한다. 이 결과 다음과 같은 효과가 기대되며, 표 1에 나타난 바와 같이 여러가지 예상치 못한

새로운 물성이 관찰됨으로써 전기, 전자분야는 물론이거니와 촉매, 분말야금, 의학 및 생명공학 등의 각종 산업분야에 걸쳐서 나노금속분말 재료의 응용이 기대된다.

- (1) 표면효과
  - 촉매 특성의 발현, 비표면적 증대에 따른 효과 (열전달, 흡수, 흡착 등)
- (2) 체적효과
  - 다결정체의 단결정화
  - 결정의 결합양식 변화 : 새로운 상의 출현, 용점저하 등
  - 광, 음파, 전자파 등의 흡수 및 산란 효과
  - 물질의 전자상태 변화
- (3) 입자간 상호 작용
  - 전기 및 열전달, 유동성, 혼합성, 압축성 및 고상반응성 등

표 1. 나노금속분말에서 관찰된 새로운 물성변화

물성변화	재료	직경(Å)	나노금속분말	체적특성
자기적성질향상	Fe	50	10300e	~4700e
용점 강하	Au	30	900K	1300K
	In	40	370K	430K
광흡수증가 (6~10μm)	Au	100	95%	2~5%
초전도전이온도 상승	Al	90	5.3K	3.4K
극저온에서의 열전도성 향상	Ag	100	2.0mK	20mK
소결온도의 저하	Ni	200	~200°C	700°C 이상
	W	220	~1000°C	2000°C 이상
촉매효과 증대 (As: 표준활성도)	Ni	10	6As	~3As

이와 같은 나노금속분말의 활용은 분말상태 또는 응용화 상태에 따라 그 분야가 달라지는데 그 응용례를 그림 1에 나타내었다.

이상과 같이 나노금속분말은 그 분말 입자가 特 轉

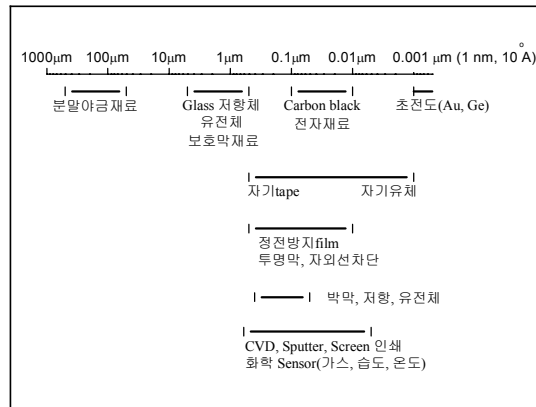


그림 1. 나노금속분말의 입경에 따른 응용예

가지는 고유특성에 의해 잠재적인 가능성이 풍부하여 새로운 첨단재료로서, 고온구조재료, 공구재료, 전기·자기재료, 필터 및 센서 등의 응용이 기대되고, 재료분야 뿐만 아니라 산업전반에 걸쳐 새로운 기술 및 신 산업수요를 창출할 것으로 예상된다.

따라서 본 고에서는 나노금속분말재료의 주요 기술, 이를 활용한 응용분야 및 국내외 연구현황에 대해 기술하고자 한다.

## 2. 나노금속분말재료의 주요기술

나노금속분말재료가 공업재료로서 중요한 위치를 점하기 위해서는 재료기술로서 제조공정기술의 확립이 필수 불가결한 요소이다. 나노분말재료는 동일재료라도 소결상태, 박막상태, 복합상태 등 이용상태의 차이에 따라 그 물성 혹은 역할을 크게 변화시킬 수가 있다. 제조공정의 고도화 및 새로운 재료의 발견을 통해 나노분말재료가 공업적 위치를 확고히 하기 위해서는 나노분말화라는 제조기술의 확립과 이를 응용화하는 기술이 충분히 이루어져야 한다. 여기서는 나노금속분말의 제조기술을 중심으로 나노금속분말의 성형 및 소결기술, 나노금속분말의 표면 코팅기술 등을 살펴보고자 한다.

## 2.1 나노금속분말의 제조

나노금속분말의 제조법은 기상을 이용한 제조법, 액체를 이용한 제조법과 기계적 제조법으로 나눌 수 있다. 기상을 이용한 대표적인 제조법에는 가스증발-응축법(Gas Evaporation Method)과 기상합성법(Mixed Gas Method) 등으로 나누어지며, 액체를 이용한 제조법에는 침전법(Precipitation)과 분무건조법(Spray Drying) 등이 있으며 기계적인 힘을 이용한 기계적 분쇄법(Mechanical Alloying)이 있다. 일반적으로 액체를 이용한 제조법은 기상을 이용한 제조법보다 균일한 분체를 생산할 수 있고, 또한 청정한 분체를 제조할 수 있는 장점을 가지고 있지만 개개 입자의 응집경향이 매우 강하며 또한 입자형상이 다소 불규칙하다는 단점이 있다. 또한 기계적 제조법은 제조과정 상에서 발생하는 불순물의 혼입에 문제점이 있고 응집화 현상이 심한 반면 여러 성분을 나노입자화할 수 있는 장점이 있다. 한편 기상반응을 통한 제조법은 제조분말의 입자크기의 균일성이 좋고 고순도의 입자를 제조할 수 있을 뿐만 아니라, 입자의 응집을 방지할 수 있어 장래 산업화를 위한 유망한 나노금속분말 제조법으로 각광을 받고 있다. 여기서는 각각의 공정의 특징을 개괄적으로 살펴보고 이들의 장단점에 대해 살펴보고자 한다.

### 2.1.1 증발-응축법에 의한 나노금속분말 제조

통상의 진공증착과 달리 진공 배기후 용기 내의 압력을 0.01~수백 torr의 범위 내에 설정한 후 He, Ar, Xe, Ne 등의 불활성가스 혹은 O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, NH<sub>3</sub> 등의 활성가스 중에서 증발원료를 가열 및 증발시켜, 증발시킨 증기를 이들 가스 중에서 응축시킴으로써 각종 나노금속분말을 제조할 수 있다.

제조방법은 가열방법에 따라 저항가열법, 플라즈마가열법, 유도가열법, 레이저가열법 등으로 나눌 수 있다.

저항가열법과 같은 실험실규모의 나노금속입자 제작장치에서는 1회의 증발로 수십~수백 mg의 나노금속입자밖에 제조할 수 없다. 반면 플라즈마 가열법에서는 평균 입경 20~30nm의 Ni 등의 나노금속분말을 0.8 g/min의 속도로 제작할 수 있다. 또한 증발원료에 전류를 유기시켜 금속을 용해시키는 고주파 유도가열법에서는 증발원료의 용적이 클수록 열효율이 좋아지므로 공업적으로 우수한 방법이다. 플라즈마 제트 가열법은 플라즈마 건 중에서 만들어진 고온플라즈마를 플라즈마 flame으로 분출시켜 증발원료를 가열증발시키는 것으로 W, Mo, Ta, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, C 등의 고용점, 저증기압의 재료도 안정적으로 증발시킬 수 있는 장점이 있다. 플라즈마의 종류에는 수소, 산소, 질소가 있으며 각각에 따라 생성되는 나노금속입자의 조성과 나노금속입자의 발생현상이 다르다.

CO<sub>2</sub> 레이저법은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, BN, MgO, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, MgSiO<sub>4</sub>, CaTiO<sub>3</sub> 등의 증기압이 낮은 물질이라도 안정적으로 증발시킬 수 있지만, 금속과 같이 반사율이 높은 재료는 그 효율이 떨어지는 단점이 있다. 또한 탄화물의 소재가 되는 금속(Si, Ti, V, Cr, Zr 등)과 탄소분을 접촉하여 접촉부에 100A 이상의 전류를 통전함으로써 소재로부터 증발된 증기를 Ar, CH<sub>4</sub> 혹은 C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> 등의 분위기 또는 수중에 응축시켜서 탄화물 나노금속분말을 제작하는 방법도 제안되고 있다.

최근에는 아크를 단순한 열원이 아닌 반응성이 풍부한 열플라즈마로서 이용하는 수소중 아크플라즈마법이 개발되어, 단상의 금속, 세라믹 나노금속분말 뿐만 아니라 혼합/복합 나노금속분말(Fe+Ni, Fe+Cr, Ni+ZrO<sub>2</sub>)이 제조되고 있다. 분위기가스로서 수소 이외에 N<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>+Ar의 혼합가스를 이용함으로써 순수 산화물뿐만 아니라 복합 질화물(TiN+Ni, TiN+Fe, TiN+Co) 나노금속분말입자의 제조 가능성도 제시되고 있다. 이 방법은 다른 방법에 비하여 입자크기가 크지만 생산성이 좋아 거의 모든 금속에 적용할 수 있는 것이 큰 장점이다.

2.1.2 기상합성법에 의한 나노금속입자 제조

기상합성법에 의한 나노금속입자 제조 원리는 CVD 공정의 precursor/carrier가스의 반응에 의한 금속 및 세라믹 박막 형성 공정을 응용한 것으로 1982년 W. R. Cannon에 의해 시도되었다. 가스와 고에너지/고밀도 레이저에 의해 형성된 플라즈마 내에 precursor/carrier가스를 통과시켜 나노금속크기의 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, SiC 등의 산화물, 질화물, 붕화물 분말들을 제조하였으며, 20nm이하의 입자가 상호 응집된 분말을 얻을 수 있었다. Mazdyasni 등은 상압 하의 hot wall reactor내에서 금속염 precursor를 열분해시켜 나노금속 크기의 산화물분말을 제조하였다. 최근에 나노금속입자간의 응집을 방지하고 분말 제조효율을 높이기 위한 연구가 진행되어, G. Skandan 등은 무응집 금속, 산화물, 탄화물, 질화물 나노금속 분말을 고효율로 제조할 수 있는 CVC(Chemical Vapor Condensation)법을 개발하였다.

CVC법은 감압 IGC법과 CVD법을 조합한 것으로 IGC법의 가열도가니 대신에 hot wall tubular reactor 내를 통과한 carrier가스를 hot wall reactor 혹은 연소 버너에서 열분해, 반응, 응축시켜 목적으로 하는 나노금속분말을 제조하는 방법으로 그 개략도를 그림 2에 나타내었다. CVC법에 의해 무응집 나노금속분말을 제조하기 위해서는 ①carrier 가스내의 낮은 precursor농도 유지, ②heating zone에서의 gas stream의 급격한 팽창, ③입자의 핵이 형성된 gas의 급격한 냉각, ④용기내의 낮은 dynamic 압력 유지가 요구된다.

현재 CVC법에 의해 나노크기(<10nm)의 산화물(SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 분말뿐만 아니라, doped 산화물(Tb/Eu/Ce:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 탄화물(SiC), 질화물(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) 및 금속(Si, Ge)분말들이 제조되어 있다. 현재 CVC법에 의한 산화물분말을 실험실적 규모로 제조되고 있으며, SiO<sub>2</sub>분말의 경우 그 생산성은 30~50g/h 에 달한다.

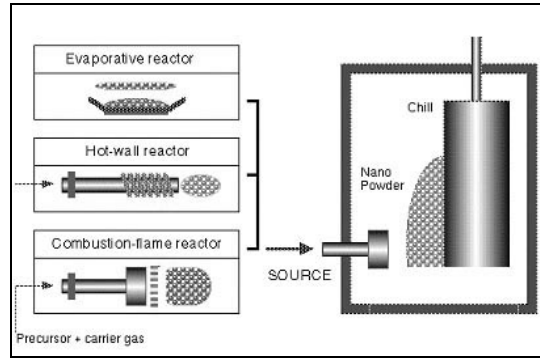


그림 2. IGC 및 CVC 장치의 개략도

2.1.3 침전법에 의한 나노금속분말 제조

금속염의 수용액에 침전제나 환원제를 가하여 수용액에서 금속이나 산화물의 분말을 제조하거나, 용융염에서 화학적 방법으로 금속이나 산화물의 분말을 얻는 방법으로 대체로 미세분말이 제조되며 그 생성 조건에 따라 그 특징이 다르다. 용액에서 침전을 생성시키는데 있어서 용액 중에 용해되어 있는 이온이나 분자로부터 핵이 생성되게 되는데 이 핵형성이 침전의 크기, 모양, 구조 등 원료분말의 특성에 크게 영향을 미친다. 용액 중에서 침전이 생성되는 과정은 과포화용액의 생성→ 결정핵의 발생과 성장→ 침전의 생성으로, 과포화용액을 만드는 주요방법으로는 ①온도에 의한 용해도의 변화방법, ②용매의 증발, 농축방법, ③다른 물질을 넣어 용질의 용해도를 낮추는 방법 등이 이용되고 있다.

침전법에 의하여 생성되는 입자의 크기와 모양은 용액의 과포화도에 의하여 좌우되는데 과포화도가 작은 용액으로부터 침전된 입자의 크기는 일반적으로 조대하며 다면체의 형상을 가지고 또한 결정상 구조를 가지게 된다. 과포화도가 큰 용액으로부터 침전된 입자의 크기는 작고 준결정상의 구조를 가지며 불규칙한 형상을 가진다.

2.1.4 분무열분해법에 의한 나노금속분말 제조

분무열분해법은 분무건조기를 이용하여 금속염이 녹아있는 수용액 중의 물(수용액이 아닐

경우에는 용매)을 제거하여 미세한 금속염의 분말을 제조한 후, 제조된 금속염의 분말을 환원/침탄/질화/산화 처리하여 나노크기의 금속, 세라믹 분말을 제조하는 방법이다. 분무열분해법은 나노크기의 입자들이 응집된 비교적 균일한 구형의 2차분말을 제조할 수 있으며, 분무열분해법의 공정은 크게 ①금속염이 녹아 있는 용액 준비, ②분무건조, ③염 제거 열처리, ④환원/침탄/질화/산화 열처리의 4단계로 나누어진다. 그중 분무건조 단계도 다음의 3단계로 나누어진다. 첫째, 미세한 분무를 일으키게 하기 위한 액체 원료의 회전분사, 둘째, 방사상으로 분사된 분무액과 더운 가스와의 접촉, 셋째, 용매의 급속한 증발과 원심력에 의한 가스 흐름으로부터 분리에 의한 구형입자 형성으로 나누어진다.

분사공정조건과 원액의 농도 등은 분말의 입자크기, 분포, 형상에 일반적으로 다음과 같은 영향을 미친다. 일반적으로 분사에너지(회전분사속도)가 증가할수록, 용액의 농도나 용액의 공급속도가 감소할수록 분말입자의 크기는 감소하며, 가스온도에 따른 증발속도의 차이에 따라, 생성되는 금속염분말의 수분 함량이 달라진다.

2.1.5 기계적분쇄법에 의한 나노금속분말 제조

기계적분쇄법은 용기 안에서 원료분말과 불이 충돌할 때마다 불 사이에 끼어 있는 분말 입자의 변형과 분쇄에 의하여 입자를 미세화시키는 방법으로써 초기에는 금속분말들이 냉간압접되어 판상화가 이루어지며 이때는 초기분말 직경의 2~3배가 되며 체적도 증가하게 된다. 이 압접된 분말들이 불에 의해 계속적으로 충격을 받아 압접층이 점점 미세해지며, 이로 인해 분말이 경화되면 압접된 분말은 파괴가 일어나게 되며 입자는 미세하게 된다. 응용 가능한 분야로는 ODS, superalloy, 금속간화합물, 비정질합금 등이나 기계적 분쇄법으로는 0.1 $\mu$ m 이하의 입자를 가진 초미립 분말의 제조가 불가능하며, 순도나 생산 효율 면에서 여러 문제점을 가지고

있어 현재 실용화가 어려운 실정이다.

2.2 나노분말의 성형 및 소결

◦ 극미세 분말은 기존의 미크론 분말에 비해 단순히 크기만 작아진 것이 아니라 분말의 입자 크기가 작아지면 비표면적이 분말 직경 변화의 제곱에 비례하여 증가하므로 대단히 넓은 표면적을 갖는다. 분말은 표면 활성이 대단히 강해져서 분위기 중의 다른 성분들을 흡착하게 되고 서로 달라붙는 경향이 강하게 된다. 따라서 분말 성형시에 유동성이 부족하여 건식 성형시 금형 내부를 효과적으로 채울 수 없게 되어 성형 밀도가 낮게 되는 문제점이 발생하게 된다. 극미세 분말의 성형밀도 향상을 위하여 먼저 충전 결함을 최소화하고자 하며 이를 위해 분말의 입도 분포가 가능한 좁고 미세하게 제어되어야 한다. 또한 분말의 표면층의 두께 및 구조를 파악하여 최적의 표면 개질층을 갖는 분말을 제조하고자 한다. 특히 분말 성형시 분말 입자간에 들어있던 공기가 쉽게 빠져나올 수 없는 문제점이 있기 때문에 분말 입도에 따른 충전 속도의 영향을 조사하여 충전 성형 변수를 최적화할 예정이다.

◦ 한편 극미세 분말의 건식 성형공정 개발과 병행하여, 액상의 매질을 이용한 슬러리 공정을 활용하여 성형성을 향상시키고자 한다. 그러나 극미세 분말의 슬러리 적용공정은 분말 입자의 분율이 높게 액상 매질에 골고루 분산시키는 것이 어려운 기술이며 또한 성형후 액상 매질의 제거에 의한 결함이 발생할 수 있는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 액상 매질내에 분산성 향상을 위해 극미세분말 표면의 전기이중층과 고분자 흡착층의 두께를 엄밀하게 제어하고자 하며 이를 위해 먼저 입자 크기에 따른 표면개질층의 두께 및 조직변화를 분석하고, 최적의 표면개질층을 갖는 CVC 공정제어를 유도할 예정이다. 특히 습식공정에 의한 극미세 분말

입자의 충전에서는 액상 매체의 제거공정이 무엇보다도 중요하다. 이를 위해 첨가하는 액상 매체의 선정, 분해온도에 미치는 공정변수의 영향 분석과 아울러 기공 크기조절을 위한 분말의 형상 및 입도를 제어할 계획이다.

- 극미세 분말의 특성을 벌크화된 소재에도 계속 유지시키기 위해서는 입자 성장이 억제된 완전치밀화 공정의 개발이 필요하다. 일반적으로 소결의 구동력은 분말 입자의 표면적의 크기에 비례하기 때문에, 극미세 분말의 경우 소결시 급격한 입자 성장이 일어날 가능성이 높다. 따라서 본 연구에서는 먼저 저온에서 완전치밀화할 수 있는 극미세 분말에 최적의 저온소결공정을 개발하고자 한다. 즉 급격한 입자성장이 일어나는 액상 온도 이하에서 입자성장을 최대한 억제하면서 치밀화할 수 있는 고상소결공정을 개발하고자 한다. 이를 위해 분말의 입도에 따른 소결온도의 변화를 파악하고, 소결후의 입도 및 밀도 변화를 조사할 예정이다. 또한 승온속도가 미세 분말의 소결에 미치는 영향 및 분말 크기가 소결 시간에 미치는 영향 등을 분석하여 소결공정의 최적화 스케줄을 개발할 예정이다.

나노구조재료의 대한 세계적인 관심이 날로 증가하면서 이를 제조·응용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 대부분의 연구가 세라믹 나노분말에 집중되어 있고, 금속분말에 관한 연구는 그리 흔치 않다. 이는 금속나노분말이 세라믹 분말에 비해 화학적으로 불안정하므로 표면산화나 편석과 같은 불순물을 제어하는 부대기술이 절실히 요구되기 때문이다. 나노금속분말에 대한 이러한 제한으로 인해 대부분의 연구가 분말합성기술의 개발에 치중되어 있다. 더욱이 나노분말이 갖는 많은 양의 표면적은 벌크화 단계에서 높은 구동력을 제공하기 때문에 분말상태의 입도를 유지하기 어려운 문제점이 여전히 남아 있다.

나노금속분말의 성형 및 소결기술은 아래와

같이 요약할 수 있다.

- 나노금속분말의 소결치밀화와 미세구조 제어기술 완전치밀화, 미세한 입도, 안정한 미세구조 : Hot-press, Spark plasma sintering 등
- 소결단계에서의 상변화 및 계면구조 소결단계에서의 상안정성 제어 및 건전한 입계/계면 구조분석
- 복잡·소형부품으로의 성형가공기술 분말사출성형(PIM)기술을 이용한 near net shaping 잔류불순물에 의한 소결거동

### 2.3 나노분말의 분산기술

세라믹 나노분말에 비해 상대적으로 불안정한 나노금속분말은 제조방법의 제한과 아울러 큰 애로기술이 바로 분산기술이다. 이는 전자기적으로 훨씬 활성화되어 있는 나노금속분말이 세라믹 나노분말에 비해 응집이 잘 일어나기 때문이다. 이러한 제조상의 한계는 나노금속분말의 후처리 기술에 관한 연구의 결여를 초래하여, 현재까지도 이와 관련한 연구는 활발하지 못한 실정이다. 반면 세라믹이나 폴리머 등의 분산기술은 졸-겔 및 콜로이드 관련분야에서는 많은 연구가 수행되었고, 현재도 활발한 연구가 진행되고 있다. 특히 이러한 분산기술은 최근의 반도체 산업의 발전과 아울러 반도체 기판 세정공정으로 CMP(chemical mechanical polishing) 공정이나, clean room과 같은 초청정 집진기술 분야에서 많이 이용되고 있다.

나노금속분말의 코팅을 이용한 분산화 혹은 유체화의 대표적인 기술은 세라믹/금속 나노복합 촉매재료와 금속입자를 단일자구화 함으로써 얻을 수 있는 초상자성 특성을 이용하는 자성재료 분야이다. 촉매재료는 본 내용의 다음에 기술되므로 생략하기로 한다.

나노금속분말의 코팅 및 균일분산기술의 대표적인 응용분야로서 자성유체를 들 수 있다. 자성유체는 강자성 입자(주로 마그네타이트)를 물

이나 유시용매에 분산시킴으로써 자기적으로 형체 및 기능을 제어하여 dustless 혹은 진공 sealing 재료나 스피커의 damper 재료로 이용되고 있다. 1930년대부터 시작된 자성유체에 관한 연구는 거의 철산화물인 마그네타이트가 주류를 이루고 있다. 왜냐하면 금속계 자성유체의 초미립자는 대기 중 혹은 액상 중에서 산화되어 자기적 성질이 급격히 저하되기 때문이다. 그러나 최근에는 자화값이 산화물보다도 월등히 우수한 초미립 철 분말의 표면에 내산화성이 우수한 실리카를 코팅한 금속계 자성유체가 개발중에 있다. 금속 철분말에 실리카를 코팅하는 기술에 대해서는 알려진 바 없으나, 기존의 마그네타이트 자성유체에 비해 2배 이상의 높은 자화값을 갖는 것으로 보고되었다.

자성유체 외에 나노금속분말의 분산기술을 이용한 전도성 도료나 전도성 고무, 플라스틱과 같은 화학공업분야에서도 많이 응용분야가 있다.

### 3. 나노금속분말의 응용

현재 나노금속분말재료는 재료구조의 미세화(100nm 이하)와 이에 따른 표면적의 증가로 인하여 기존의 재료에서는 얻을 수 없는 특이한 전·자기적, 기계적 및 촉매 특성을 나타낼 수 있으므로, 자성 부품, 센서, 필터, 촉매 등의 차세대 기능성 소재로써 산업전반에 걸쳐 새로운 수요를 창출할 것으로 기대된다. 따라서 나노금속분말 제조시의 생산성, 효율성, 공정의 안정성 등의 해결 및 나노금속분말의 응용화기술 등 기술적 문제점의 해결이 선행될 경우, 나노금속분말재료 자체가 가지는 고유특성에 의해 새로운 고기능성 재료로서 각광을 받을 뿐만 아니라, 의학 및 생명공학 등의 각종분야에 그 응용이 확대될 전망이다. 여기서는 나노금속분말의 응용가능분야를 각 특성에 따라 설명하고자 한다.

여기서는 나노분말의 기술적 과급효과가 큰 자성재료, 복합재료, 비정질재료, 에너지재료, 고

용점재료 및 촉매재료에 대해 기술하고자 한다.

#### 3.1 기계적 특성

고용점 재료를 바인더금속이 함유되어 있지 않는 구조재료로 이용하기 위해서는 고온에서 소결과정이 필요하며 고온소결후에 소결품에 미세기공이 존재하지 않아야 한다. 나노금속분말은 소결시에 표면에너지 증가에 의해 낮은 온도에서 고밀도의 소결체를 제조할 수 있으며 또한 기계적 특성면에서도 입자가 미세해짐에 따라 경도, 내마모 및 항절력 등의 특성이 향상되는 장점을 가지고 있으므로 고밀도의 고강도 분말 야금 제품에 활용될 수 있다.

나노 초고강도/고용점 재료는 표면 에너지의 증가에 따른 소결 특성 향상으로 낮은 온도에서의 소결로서도 고밀도화가 가능하며, 또한 입자의 미세화에 따른 경도, 항절력, 내마모 특성 등 기계적 특성이 향상되는 장점을 가지고 있으므로 고밀도의 고강도 분말 야금 제품에 활용될 수 있으며, 현재는 주로 초미립 WC/Co계 및 W/Cu에 대한 연구가 많이 진행되고 있다.

초미립 초경 합금은 사용 온도가 높지 않고 날카로운 모서리 등 내마모성과 인성 모두가 요구되는 용도에 사용될 수 있는데, PCB가공용 드릴과 같은 solid drill과 end mill, 절단 공구, 날카로운 모서리가 있는 고 정밀도 금형이나 편치용 재료로서 사용 가능하다. 초미립 공구 재료에 대한 연구는 외국의 경우에는 100~200nm 급의 초미립 분말을 사용하여 초미립 초경 제품의 상용화가 현재 진행 중에 있으며, 향후 초미립 초경 제품이 개발, 생산될 경우 초미립 공구 재료에 대한 수요는 전 세계적으로 급증될 것으로 예측된다.

초미립 W/Cu 복합 재료의 치밀화에 관한 연구는 국내외적으로 극히 제한적으로 보고되고 있다. 80년대 구 소련을 중심으로 미립 크기를 갖는 W/Cu복합 분말을 액상 소결을 이용하여 제조

하였고, 미국 Penn. State대학의 German 교수 연구팀에서 미립 W분말을 용침·소결하여 W-10~20%Cu 복합 재료를 제조하였으며, 또한 미국의 Materials Modification사에서는 W에 Cu가 코팅된 W/Cu복합 분말을 이를 열간 압축 소결하는 방안을 제시하였다. 그러나 여타의 해외 연구기관이나 산업체 등에서도 보고되고 있는 기술 수준은 위의 내용과 비슷한 실정이다.

국내에서는 현재 승립카본 및 대한중석 등에서 용침 공정에 의하여 W/Cu재료를 제조하고 있으나, 주로 전통적인 초고압 전기 접점 및 전극 재료 등 경제적인 부가 가치가 낮은 제품에 국한되고 있고, . 미립 복합화 재료 개발을 위하여 산화물 분말의 기계적 합금화 방법을 시도하였으나, 불순물 문제와 양산화 문제를 해결하는 데에는 한계가 있었다. 최근 한국기계연구원에서 나노 크기의 W/Cu 복합 분말을 제조하기 위하여 새로운 공정인 Mechanochemical process (MCP)을 개발하여 W/10~20wt.%Cu조성의 초미립 W/Cu 복합 분말 제조에 성공하였다. 현재 80nm 이하의 나노복합재료 분말을 제조하였으며, 초미립 W/Cu 합금의 고밀도 벌크화 공정 연구가 수행되고 있다.

또한 나노금속입자를 금속, 세라믹, 폴리머 기지에 분산, 복합화함으로써 기존 복합재료의 성능을 혁신적으로 향상시킬 수 있다. 현재까지 개발되어온 나노복합재료는 금속/세라믹, 금속/고분자, 세라믹/고분자 등의 주로 두가지 다른 상의 조합에 의한 이상복합재료로 주로 마이크로 스케일의 혼합 및 미세조직 제어에 의해 제조되며 구조용 소재, 전자용 소재 및 스포츠용품 등에 응용되고 있다. 그러나, 앞으로는 세 가지 상이 혼합되거나 조직이 엄격히 제어된 하이브리드 복합재료개념을 이용한 금속/세라믹/고분자 복합재료의 개발이 기대되고 있다. 또한 기존의 복합재료의 미세조직이 마이크로 스케일의 혼합에 의해 조절되는데 비하여 앞으로는 강화재와 기지입자를 미세화하여 나노 스케일의 강화재를 균일하게 분포시키거나 구조를 정밀제어 特 輯

하여 새로운 기능의 복합재료를 개발하려는 연구가 활발히 시도되고 있다.

나노복합재료의 응용현황을 정리해보면 다음과 같다.

- SiC/NiAl 나노복합재료 : 고내열성 가스터빈 용 소재
- CuO/Glass 나노복합재료 : Gas sensor
- Bi/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 나노복합재료 : Battery Electrode
- PSZ/SUS 나노복합재료 : 단열차폐재료
- HAP/Ti 나노복합재료 : 인공치아재료
- Polyimide/Al 나노복합재료 : 고내열성 전자 기관 재료
- Be<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/PbTe 나노복합재료 : 에너지변환 재료

### 3.2 자기적 특성

나노분말 자성체에 대한 지금까지의 연구 개발을 크게 구분하면, 주로 자기기록재료로 사용하기 위하여 꾸준히 진행되어 온 Fe, Co 등의 천이금속계에 대한 연구와, 90년대에 들어서 활기를 띠기 시작한 영구자석 제조용 희토류-천이금속 합금계에 대한 연구로 구분할 수 있다.

#### 3.2.1 Fe계 분말

최근 ferromagnetic metal의 nanocluster, 즉 nano 분말에 대한 연구가 상당히 많이 진행되고 있는데, 이것은 자기기록 매체의 예와 같이 이들이 갖는 실용적인 중요성 때문이다. Fe 분말을 nano화하였을 경우 최대 2.5 kOe의 보자력을 얻을 수 있다. 이는 Fe가 갖는 높은 포화자화 외에 bulk 상태의 Fe보다 훨씬 높은 보자력도 얻을 수 있다는 의미이기 때문에 매우 중요하다. 이러한 보자력은 입자의 크기가 single domain size에 근접함에 따라 가능한 것이다. 따라서 자성금속 분말의 nano화는 기존 자성재료의 응용 분야를 더욱 넓혀 주는 기회를 제공하게 될 것이다. 특히 Fe nano 분말 (또는 Fe-Co, Co 분말)은 고밀도 자기기록매체로서의



응용 가능성이 매우 큰데, 이것은 이 분말이 갖는 높은 포화자화값과 보자력에 기인한다.

한편 Fe보다 높은 포화자화값을 갖거나, 화학적으로 Fe보다 안정한 것으로 알려져 있는 Fe-Co, Fe-N 등의 나노분말을 개발하는 것도 필요하다. Fe-Co 합금의 경우 Fe보다 높은 포화자화값 (약 2.4 T)을 기대할 수 있으며, Fe<sub>3</sub>N이나 Fe<sub>4</sub>N은 Fe보다 안정한 것으로 알려져 있다. 만약 Fe<sub>16</sub>N<sub>2</sub>의 분말을 제조할 수 있다면 자성재료의 발전에 획기적인 사건이 될 수 있을 것이다. 전술한 바와 같이 이 물질의 포화자화값은 2.8 - 3.0 T로 밝혀져, 지금까지 알려진 물질로는 가장 큰 자화값을 갖는 물질이다. 불행히도 이 물질은 지극히 불안정하여 MBE에 의한 thin film의 제조 외에는 아직까지 실용적으로 안정하게 제조할 수 있는 방법이 없는 실정이다.

Fe계 나노분말의 응용 분야로서 가장 큰 것은 고밀도 자기기록 분야이다. 이것은 이 분말이 갖는 높은 포화자화값과 보자력에 기인하는 것으로서, 높은 포화자화값은 자기기록 강도를 증가시켜 주며, 높은 보자력은 internal demagnetizing field에 대한 저항성을 증가시켜 준다. 현재 초미립 자성분말을 사용한 도포식 자기 tape는 audio용과 video용이 주류를 이루고 있으나, 앞으로는 DCC, 8 mm video tape, VHS-C tape 등과 함께 HDTV 대응 VTR과 digital VTR용 tape의 수요가 증가할 것으로 예상된다.

Fe계 나노 자성분말의 응용성이 큰 또 하나의 분야는 자성유체로서, 그 응용 분야를 살펴보면 다음과 같다.

- Magnetic seal - 진공 시스템의 sealing.
- Bearing - audio, video, computer system의 정교한 spindle.
- Magnetic ink/suspension - 카드, 티켓 등의 자기테잎, 자장 패턴의 확인 등.
- Damper - speaker, printer, XY plotter, gauge, floppy disk head positioner, vibration isolator 등의 매우 다양한

분야에서 viscous damper로 사용될 수 있음.

- Grinding/Polishing - 세라믹볼, 디스크 등의 정밀한 연마.
- Magnetogravimetric separation - 금속 폐기물의 분리
- Inclinator/Accelerometer - 지진이나 자동차 사고 등의 충격 감지.
- Printer - magnetography, 분산성이 좋고 입자가 작아 해상도를 높일 수 있다. 색상이 문제이나 자성유체를 coloring하는 연구도 일부에서 진행되고 있음. 미래의 응용 분야.
- Magnetocalorimetric pump - solar system, snow melting, 냉각장치 등의 heat transfer에 사용될 수 있음. 발전용으로도 응용 가능한 것으로 알려져 있음, 미래의 응용 분야.
- 기타: actuator, stepper motor switch, optical switch 등에도 응용이 가능한 것으로 알려져 있음.

이 밖에 연자성재료로서의 응용을 생각할 수 있는데, 높은 포화자화 및 투자율 등을 이용하여 disc drive bearing support, VCM brake, ABS sensor ring, 전자점화 trigger, fuel injection sensor relay core, stepper motor pole shoe 등 다양한 분야에 응용될 수 있다.

### 3.2.2 희토류-천이금속 영구자석합금 나노분말

최근 전자통신산업 및 자동차산업의 발달에 따라 이에 요구되는 자석 부품들도 점차 고성능화, 소형화되어 가는 추세에 있다. 이와 같이 고성능화, 소형화되기 위해서는 자성분말의 화학적 조성은 물론, 입자 조정에 의한 자기 특성의 극대화를 도모하여야 하며, 이것은 자성체의 정확한 구조조정(structure control)에 의해서, 즉, 원하는 조성을 갖는 자성 분말의 초미립화에 의해서 가능할 수 있다.

만약 Nano 사이즈의 초미립 분말을 기계적 파쇄법이 아닌 화학적 방법으로 안정하게 제조할 수 있다면, 위와 같은 일반적 요구사항을 만족시키는 분말을 얻을 수 있을 것이다. 보자력과 잔류자화가 큰 초미립 자성체가 개발된다면, 그 자체를 보다 높은 에너지적을 갖는 본드자석을 제조하는데 활용할 수 있으며, 이는 본드자석의 응용 분야를 넓혀주는 원동력이 될 것이며, 나노자성분말은 고성능 소결자석의 제조에 더욱 필요할 것이다.

희토류-천이금속, 특히 Nd-Fe-B 자석은 소결자석, 본드 자석 모두 그 수요가 증가 일로에 있다. 이러한 증가 추세는 최근 더욱 두드러지게 나타나고 있는데, 이는 회로 설계의 발달과 함께 자성입자의 구조 조절을 통한 자기 특성 (structure controlled magnetic properties)의 조절과 향상이 가능해졌기 때문이다. 따라서 2005년쯤에는 전체 자석 시장의 50% 이상을 Nd 자석이 차지할 전망이다.

자석의 응용분야를 살펴보면 가장 많이 응용되는 분야는 motor, actuator와 같은 구동장치 분야로서 전체 약 50%를 차지하고 있다. 따라서 Nd-Fe-B 자석도 구동 장치에 가장 많이 사용된다. 소결자석의 경우 컴퓨터의 HDD drive motor 인 voice coil motor에 가장 많이 사용되고 있다. MRI에도 약 10% 정도가 사용되는데, 이것은 대부분 일본에서 응용되는 것이다. 본드자석의 경우에도 컴퓨터에 들어가는 각종 모터에 가장 많이 사용되며, 그 중에서도 motion control 용 stepper motor (HDD 및 CD-ROM)에 가장 많이 사용되고 있다. 특히 자성분말의 초미립화에 따른 자가특성의 향상으로 인하여 본드자석의 수요가 급증하고 있는데, 이것은 복잡한 형상도 정확한 치수로 제조 가능하며, 크기와 무게를 줄일 수 있는 등 본드자석이 갖는 여러 가지 장점들 때문이다. 전기자동차나 자기부상열차 등의 실용화에 따라서 미래에는 이들과 관련된 구동 motor, linear motor 등으로의 수요가 크게 증가하리라고 예상되므로, 이에 대비할 고성능 特 輯

나노자성체의 개발이 더욱 필요하다.

### 3.3 전기적 특성

나노금속분말을 이용하여 나노기공이 존재하는 소결체를 제조할 경우 일반분말의 소결체보다 표면적이 증가하기 때문에 기체나 액체중에 어느 특정한 성분을 용이하게 흡착할 수 있으며, 이 흡착성분과 반응하여 발생하는 전류변화를 이용하여 기체나 액체의 성분을 손쉽게 알아낼 수 있는 고감도의 센서재료 (가스, 온도, 습도) 및 도전재료 등에 이용될 수 있다. 감압하의 산소 가스분위기 중에서 수~수십Å 범위의 평균입경을 가지는 나노금속분말입자를 형성시켜, 형성된 나노금속분말입자를 특정 방향으로 배열시키며, 기판상에 부착시켜 특정의 막 조직을 가진 나노분말입자 가스 감응막을 형성시킴으로써, 종래에는 볼수 없는 독특한 특성을 가진 나노분말입자 가스센서를 제조할 수 있다.

또한 전기전도는 나노금속분말간의 접점을 통하여 이루어지지만, 이 접점은 조셉션 접점으로 작용하여 전기전도가 몇 개의 직렬 연결된 접점을 통하여 이루어지므로 매우 큰 전압을 발생한다. 이와 같은 현상을 이용한 전자파의 감지기 발전에의 응용이 기대된다.

저온소결방법을 개발한다면 현재 가장 우수한 전자냉각용 재료로 알려져 있는 p형  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$ 계 및 n형 또는  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Bi}_2\text{Se}_3$ 계 열전변환 재료 보다 성능지수와 냉각효율이 획기적으로 향상된 새로운 열전변환재료의 창출이 기대된다.

### 3.4 흡착특성

나노금속분말의 넓은 비표면적에 의하여 기공이 존재하는 소결체에 특정 기체나 액체를 통과시킴으로써, 고품성의 흡착력을 이용한 각종 필터, 열교환기 및 각종 흡수기 등에 광범위하게

이용될 수 있다.

기체, 액체를 나노금속분말의 성형체에 접촉 시킴으로써, 성형체의 방대한 표면에 기체, 액체 중의 특별한 성분의 흡착 혹은 반응에 의한 성형체의 전위변화 혹은 전류변화로부터 기체, 액체의 성분을 알아냄으로써 감지기의 고감도화, 극소형화가 기대된다.

액체 He 온도 이하의 냉동기의 효율은 냉각되어 팽창된 가스와 압축을 위해 도입된 가스와의 열교환 효율이 좌우한다. 그러나 이와같은 저온에서는 고체재료의 열교환 효율이 현저하게 저하한다. 따라서 열교환을 위해서는 고온과 저온의 냉매기체 사이의 장벽과 냉매간의 접촉면적을 크게할 필요가 있으며, 나노금속분말의 성형체를 이용하면 저온 열교환 효율의 향상이 기대된다. 실제 700Å의 Ag 나노 분말의 성형체는 He 희석 냉동기에 이용되어 시판되고 있다. 그 효율향상은 표면적의 증대뿐만 아니라 나노금속분말의 성형체 자체가 kapitza저항을 나타내는 것에도 관계가 있을 것으로 생각되어져, 재료의 선택에 따라 향후 기초 및 응용분야의 발전이 기대되는 분야이다.

### 3.5 촉매특성

촉매효과는 물질의 표면격자의 부정합부분을 활성중심으로 하여 반응이 진행된다. 단순히 표면적이 클 뿐만 아니라 표면의 곡률이 매우 큰 나노금속분말입자는 고효율의 촉매재료로서 응용이 기대된다. 특히 나노입자의 크기가 매우 작으므로 액체 혹은 기체 반응계에 직접 나노금속분말입자 촉매를 분산시켜 사용할 수 있는 장점이 있다. 실제 로켓트 고체연료에 촉매를 이용함으로써 성능향상이 보고되고 있다. 또한 액체연료에도 적당한 물질의 나노금속분말입자 촉매를 분산시킴으로써, 엔진의 효율을 향상시키고 배기가스 성분의 제어가 기대된다.

촉매로서의 이용은 반응계에 분산시키는 방법

뿐만 아니라, 나노금속분말 성형체와 같은 벌크 형태 및 박막 형태로도 그 응용이 기대된다.

나노분말이 가지는 거대한 양의 표면적 특성을 이용하는 촉매재료는 화학, 연료, 환경 및 재활용 산업분야에서 큰 영역을 차지하고 있으며, 이들 분야의 시장은 날로 증가하고 있는 추세이다. 1990년 미국 MIT에서 조사·보고한 바에 따르면, 자국내의 연간 총 세수수익중, 화학 및 연료산업분야가 2100억 달러에 달하며, 1930년에서 1980년대까지 개발된 주요 생산품 중 60%이상, 새로운 공정기술중의 90% 이상이 촉매재료와 밀접한 관련을 가지고 있다고 한다. 한편 1989년 미국 내에서만 촉매관련 산업의 총생산량은 1조 달러에 이르는 것으로 조사됨으로써 이 분야가 산업전반에 미치는 파급효과는 매우 크다. 촉매재료 개발을 위한 중요기술은 크게 1) 촉매 활성의 극대화화 2) 폭넓은 선택성, 3) 반응 후 고체 입자의 분리기술이다.

현재까지 개발된 금속계 촉매재료는 담체금속 촉매가 대부분이다. 나노금속입자는 산화물 촉매재료에 비해 균일하게 분산시키는데 많은 제한이 따르므로 일반적으로 알루미늄이나 제올라이트와 같은 담체의 표면에 혹은 내부층상구조로 분산시켜 이용되고 있다. 그러나 이러한 담체금속촉매의 경우, 금속과 담체와의 강한 상호작용으로 인해 금속의 촉매특성이 저하되는 경우가 있다. 따라서 담체의 영향을 제거하기 위해서는 나노금속입자가 균일하게 분산된 촉매재료의 개발이 필수적이다. 나노금속분말을 이용한 촉매재료의 응용에는 적다. 일반적으로 나노금속촉매는 기상법(불활성 기상응축법, IGC)을 이용하여 제조되는데, 이 경우, 나노금속입자는 순도가 높고 거의 구형의 미세기공이 없는 분말로 제조할 수 있다. 입자내부에 미세기공이 없으므로 반응의 1차생성물의 이탈이 쉽고, 계속되는 반응이 억제되므로 높은 선택성을 얻을 수 있다. 약 34nm의 크기를 갖는 Ni 초미립자는 에탄올 용액중의 1,3-cyclooctadien을 수소화할 때, cyclooctane까지 수소화하는 것을 억제하는 선

택적 촉매로 이용되고 있으며, 액체상 탈수소촉매로서 화학-열 펌프에 이용되기도 한다 Zn-Cu 초미립자는 액체상에서의 메탄올 합성용 촉매로 이용되며, Pd 초미립자는 배기나 배수 중에 포함된 유기물의 연소처리용 촉매로 이용된다. 나노금속촉매의 또 다른 제조법으로 콜로이드 촉매를 들 수 있다. 이는 2종의 금속용액에서 합금콜로이드를 제조하는 방법으로 단일분포의 나노금속분말을 얻을 수 있다. 이 경우, 입자미세화에 따른 광투명도를 얻을 수 있으므로 광반응의 촉매로 많이 이용되고 있다. Rh 콜로이드 촉매는 수소화반응에서 높은 선택성을 나타내며, Pt 콜로이드 촉매는 물을 광분해하여 수소를 만드는 수소연료전지의 연구가 활발히 진행되고 있다.

### 3.6 기타

의학·생물공학분야의 응용으로 100Å 이하의 나노입자는 혈액의 혈구보다 작으므로 혈관중을 자유롭게 이동할 수 있으므로, 각각의 물질의 나노입자를 혈관에 주입하여 치료에 이용할 수 있다. 또한 박테리아나 세포의 나노입자에 대한 반응을 이용하여 분열, 배양의 제어/분리 등도 고려되고 있다.

또한 whisker는 단결정 섬유로서 재료의 이론 인장강도를 향상시킴으로써, 섬유강화재료의 강화재로서 각광을 받고 있다. 이와같은 whisker의 생성핵으로서 나노금속분말이 이용되고 있으며, 향후 나노금속분말의 새로운 응용분야로서 주목되고 있다.

## 4. 국내의 연구동향

나노금속분말재료에 관한 연구는 1980년초부터 독일의 H. Gleiter에 의하여 본격적으로 시작되었으며, 특히 일본에서 과학기술청의 창조과학기술 추진과 통산성의 차세대 산업기반기술

분야로 선정됨으로써 주목을 받기 시작하였다. 최근 90년대에 들어와 나노구조재료의 합성 및 구조·물성에 관한 연구가 재료과학의 새로운 연구분야로 큰 관심을 모으고 있다. 일례로 1992년 나노구조재료에 관한 국제학술대회가 시작되면서 재료, 물리, 화학 분야 과학자들의 관심속에 합성, 공정, 분석평가, 구조해석, 열역학, 물성 및 상변태 등 전분야에 대하여 나노금속분말 재료가 갖는 특이한 특성을 이용하여 차세대 재료로서 실용화하고자 하는 연구개발이 기초연구와 더불어 활발히 진행되고 있다.

한편 나노금속분말재료분야의 국내연구현황은 극히 최근에서야 시작되어 초보적 개념정리단계로서, 나노분말제조, 응용화기술 및 특성평가에 대한 연구는 선진외국에 대해 극히 미미한 실정이나, 최근에 한국기계연구원에서 Spray Conversion Processing에 의한 초미립 WC/Co분말(WC size $\cong$ 50nm) 및 W/Cu분말제조공정 확립 연구를 진행 중에 있으며, 기술개발의 성공에 따라 새로운 Venture기업이 설립되어 나노분말 양산화 및 산업화를 추진하고 있다.

또한 수 10nm 이하 나노 크기의 분말합성 분야의 연구는 1996년부터 과학기술부에서 주관하고 있는 극미세 구조기술 사업단 사업 중에 하나의 프로그램으로 한국기계연구원의 주관하에 국내출연연구소 및 여러 대학이 참여하여 연구를 수행한 결과, 기상 및 액상공정에 의한 산화물계 무응집/극미세 분말합성 및 벌크화공정을 확립하였다. 또한 향후 수요의 급격한 확대가 예상되는 금속계 나노분말의 제조공정에 관한 연구를 진행하여, 현재 CVC(Chemical Vapor Condensation)법에 의해 평균 입자크기 10 nm급의 Fe, Fe-Co계 나노분말제조에 성공하였으며, 현재 제조된 나노분말의 산업화 기술에 관한 연구도 추진되고 있다.

외국의 경우, 나노분말의 산업화를 추구하고 있으나 아직 나노금속분말제조 공정의 불안정 및 복잡성, 특성평가의 미흡 등으로 인하여 아직 제조공정기술의 개발 단계에 있는 수준이다.

특히 세라믹 분말의 경우에는 일부 특수분말의 경우만이 상용화되고 있으며, 금속분말의 경우에는 기존의 제조 방법으로는 한정된 종류의 금속분말 밖에 제조할 수 없어 새로운 제조 방법의 개발이 요구되고 있다.

한편 선진외국의 경우에는 개발된 독자기술에 의해 일부 나노금속분말들이 소량 다품종 형태로 제조 판매하는 venture 기업이 설립되어 이 분야의 산업 변화를 주도하고 있으나, 국내의 경우 기술개발 단계로서 아직은 산업화가 이루어지기에는 많은 자체적인 기술의 개발이 요구된다. 표 2는 나노분말과 관련된 국외 venture 기업의 현황을 나타내었다

표 2. 나노금속분말의 국외 Venture 기업현황

국명	Venture 회사명	대상품목
미국	NEI사 Nanodyne사	◦ 초미립 분말 ◦ 구조용 나노금속분말
독일	Hertel사	◦ 고강도/내마모용 나노금속분말 ◦ 내열용 고기능 나노금속분말
일본	니혼 아도마이즈	◦ 초미립 분말 - 내열도료, 전자과 shield용 분말
오스트리아	APT	◦ 초미립 분말

현재 나노금속분말재료에 관한 연구는 나노분말이 가지는 특이한 특성으로 인해 잠재적 수요가 풍부하여 나노금속분말을 활용한 기술개발은 선진각국에서 더욱 치열해질 것으로 추정되나 국내의 기술수준은 초보단계로써 향후 21세기 기술 집약적 산업사회에서 선진외국과의 기술경쟁을 위해서는 국내에서도 이러한 나노금속분말 제조 기술, 소결기술, 평가기술 및 나노금속분말 응용화기술 등의 첨단기술의 조속한 확보가 요망된다.

## 5. 결 론

나노금속분말재료는 그 분말 입자가 가지는

고유특성에 의해 잠재적인 가능성이 풍부한 새로운 기능 재료로서 고온구조재료, 공구재료, 전기·자기재료, 필터 및 센서 등에의 응용이 기대되고, 재료분야 뿐만 아니라 산업전반에 걸쳐 새로운 기술 및 신 산업수요를 창출할 것으로 예상된다. 현재 선진국에서는 세라믹분말에는 활용이 활발한 반면, 금속분말의 경우는 대부분이 개발단계에 있으며 수 년내에 실용화되어 사용되어질 전망이다. 그러나 국내에서는 나노금속세라믹 분말을 선진국으로부터 수입하여 일부 대학이나 연구소에서 기초실험을 하고 있는 실정이고, 나노금속분말에 대한 연구 개발은 거의 전무한 단계이다.

따라서 국내에서도 무한한 응용가능분야를 가진 나노금속분말재료의 실용화를 조기에 정착시키기 위해서 산·학·연의 유기적 공동연구에 의한 나노금속분말의 경제적인 제조기술, 응용화 기술 및 특성평가기술에 대한 체계적이고 지속적인 기술 개발이 절실히 요청된다.

## 참 고 문 헌

1. R. Birringer, H. Gleiter, H. P. Klein and P. Marquardt : Phys. Lett., A102 (1984) 365.
2. C. Voßloh and H. Micklitz : Nanostructured Materials, 6 (1995) 815.
3. P. R. Strutt, K. E. Gonsalves and T.D. Xiao : Nanostructured Materials, 1 (1992) 21.
4. S. Bhaduri and S. B. Bhaduri : J. of Metals, Jan (1998) 44.
5. Y-J. Chen, N. G. Glumac, G. Skandan, and B. H. Kear : Mater. Lett., 34 (1998) 148.
6. B. K. Kim, G. G. Lee, H. M. Park and N. J. Kim : Nanostructured Materials, (1999) to be printed.
7. S. E. Pratsinis : Prog. Energy Combust. Sci., 24 (1998) 197.

8. N. G. Glumac, Y-J. Chen and G. Skndan : J. Mater. Res., 13(9) (1998) 2572.
9. Y. Chen, N. Glumac, B. H. Kear, and G. Skandan : Nanostructured Matererials, 9 (1997) 101.
10. K. Niihara : J. Ceram. Soc. of Japan, 99 (1991) 974.
11. N. G. Glumac and D. G. Goodwin : Combustion and Flame, 105 (1996) 321.
12. D. R. Gaskel : Introduction to Metallurgical Thermodynamics (2nd. Ed.), McGRAW- HILL, New York (1981) 167.
13. 김태형, 최철진, 김병기 : 한국분말야금학회지, 6(1) (1999), 75.
14. R.M. German : Powder Metallurgy Science 2nd ed., MPIF Princeton, NJ (1994) 69.
15. S. Panda and S. E. Pratsinis : Nanostructured Materials, 5 (1995) 755.
16. S. K. Friedlander and C. S. Wang : Smoke, Dust and Haze, Wiley, New York, (1977).
17. P. C. Reist : Aerosol Science and Technology(2nd. Ed.), McGraw-Hill, Inc., New York, (1993) 227.
18. T. Seto, M. Shimada and K. Okuyama : Aerosol Sci. Tech., 23 (1995) 183.
19. K. H. Ahn and B. Y. H. Liu : J. Aerosol. Sci., 21 (1992) 249.
20. 박종구 : 대한금속학회회보, 12(5) (1999) 555
21. M.S. Multani and P. Ayyub : Condensed Matter News, 1(1) (1991) 25.
22. R. C. Garvie : Am. Chem. Soc., 82(2) (1978) 219.
23. N. M. Hwang, G. W. Bahng and D.N. Yoon : Diamo