

기계적 합금법에 의한 분말 처리 기술

황 연 · 이태근 · 박병규
서울산업대학교 재료공학과

Recent Advances in the Powder Processing by Mechanical Alloying

Yeon Hwang, Tae-Kun Lee and Byung Kyu Park
Seoul National University of Technology, Department of
Materials Science & Engineering

1. 서 론

기계적 합금법(mechanical alloying; MA)은 1970년대 Benjamin에 의해 개발된 독창적인 고상 합금화 기술로서 세라믹 입자를 금속 기지 내에 미세하게 분산시켜 기계적 강도와 내열성을 향상시킨 Ni-기 초합금 분말의 제조에 적용된 이래 분말원료를 사용하여 새로운 화합물을 제조하는 방법으로 확립되었다.^{1,2)} 이후 Table 1에 나타낸 것처럼 여러 가지 공정에 적용되어 발전되고 있다.

MA법은 합금의 구성 성분을 기계적인 에너지에 의해 혼합하여 원자 차원의 혼합상태로 만드는 방법이다(즉 합금화한다). 용해에 의한 합금화와 달리 고상에서 합금화가 진행되므로 Nb-Ni, Nb-Ge 등과 같은 고용점 금속의 합금화, Nb-Sn, Co-Mg 등의 용점차와 비증차가 큰 금속간의 합금화, Ti, Li, Mg 등

활성금속의 합금화가 비교적 쉽게 이루어진다. 용해에 의하여 화합물을 제조할 경우 용융 온도의 차이가 크면 금속원료를 혼합하여 용융 시켰을 때 액상에서는 고용되지만 냉각시 저 용점 금속이 석출되는 경향이 있어 균질한 합금을 만들기 어렵다. 그러나 MA법에서는 볼의 기계적 충격에너지에 의하여 금속분말이 파쇄되거나 압축되면서 다른 종류의 금속분말과 접합되는 과정을 반복하여 합금이 형성되므로 상온에서 WC와 같은 고용점 탄화물의 합성도 가능하다.

MA법과 비슷한 공정으로 기계적 분쇄법(mechanical grinding; MG)이 있는데, 이는 합금에 기계적 에너지를 가하여 내부 에너지를 축적시킴으로써 활성화시키는 방법으로 합금의 결정립을 미세하게 하거나 비정질화 하여 합금 분말의 소결성이나 반응성을 향상시키기 위하여 이용된다. MA나 MG의 적용범위는 비정질재료, 금속간 화합물, 고용합금 등 매우 다양하며, 나노결정이나 과포화 고용체 등 수많은 비평형상 및 준안정상 합금이 제조되었다. 본고에서는 MA의 주요 공정과 MA를 이용한 분말 및 재료 개발에 관하여 설명하고자 한다.

Table 1. Important milestones in the development of MA and MG

1970 Development of ODS (Oxide Dispersion Strengthened Material) nickel-base superalloys
1981 Amorphization of intermetallics
1983 Amorphization of blended elemental powder mixtures
1989 Occurrence of displacement reactions
1990 Observation of disordering of intermetallics

2. 기계적 합금화 기구

2-1. 기계적 에너지와 물리적 현상

볼밀로부터 기계적 에너지가 분말로 전달되면 온

Table 2. Several physical processes which occur during the application of mechanical energy

Physical Processes via Mechanical Energy
1. Heat Generation
2. Producing the Shear Stress
3. Pressure Increase
4. Amorphization and/or Phase Transformation
5. Emission of the Exo-electron
6. Tribo-plasma
7. Tribo-luminescence

Table 3. The kinds of solid activation by mechanical energy

Activation of Solids by Mechanical Energy
1. Lattice Imperfections: vacancies, substitution, dislocation, stacking fault
2. Surface Area: particle size reduction and creating the new surface by fracture
3. Surface Energy: distortion of surface atoms

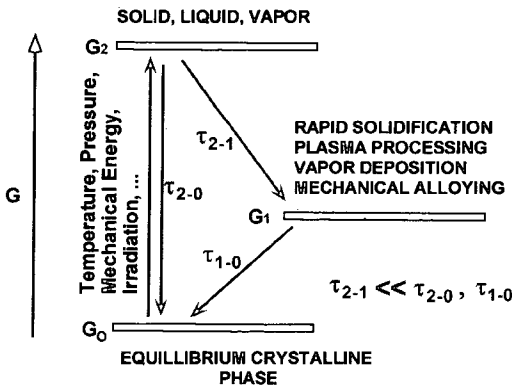


Fig. 1. The basic concept of energize and quench to synthesize non-equilibrium materials.

도 상승, 압력 발생, 전자 방출 등과 같은 과정이 일어나고, 그 결과로 분말에서는 격자 결함, 비표면적 증가, 표면 에너지 증가 등에 의하여 에너지가 축적된다(Table 2 및 3). 이는 물질이 비평형 상태에 놓임을 의미하는데, 액상으로부터의 급냉 고화, 플라즈마 공정, 이온 조사, 진공증착 등과 같은 ‘energizing and quenching’ 공정과 동일한 것으로 취급할 수 있다.³⁾ 즉 Fig. 1에 나타난 것과 같이 용융, 증발, 충돌, 가압 등을 통하여 물질을 비평형 상태로 에너지를 높인 후 이를 동결시킴으로써 원하는 화학적 조성이나 미세구조를 얻기 위한 전구체를 제조한 후 열처

Table 4. Departure from equilibrium achieved in various processes

Process	Max. Departure from Equilibrium (kJ/N _a)
Solid-State Quench	16
Quench from Liquid (Rapid Solidification)	24
Condensation from Vapor	160
Irradiation/Ion Implantation	30
Mechanical Cold Work	11
<i>Mechanical Alloying</i>	30

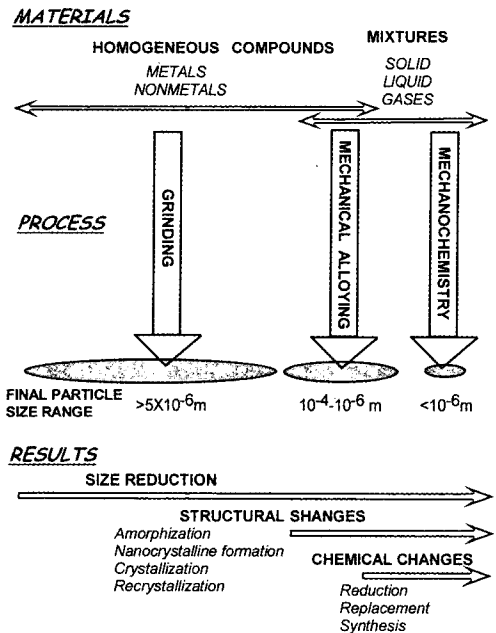


Fig. 2. A schematic impression of the range and type of materials which can be treated and synthesized by grinding, mechanical alloying and mechanochemistry.

리와 같은 공정을 통해 분말을 합성하게 된다. Table 4에서 보듯이 MA에 의하여 얻어지는 비평형의 정도는 급냉 고화법이나 이온 조사 공정에 필적하는 정도이며,⁴⁾ MA로 얻어지는 비정질 또는 미세결정질 물질은 각종 물리적, 기계적 특성이 우수함이 알려져 있다.

한편 Fig. 2에 나타난 것처럼 분말 입자의 미세화와 함께 발생하는 환원, 치환과 같은 화학반응에 주 관심을 두어 물질의 화학상태를 적극적으로 이용하는 것을 mechanochemistry라고 부르며,⁵⁾ MA 또는

MG와 혼용하여 용어를 사용하기도 한다.

2-2. 기계적 합금화 과정

MA 법에 의해 합금화되는 과정은 다음과 같이 3 단계로 진행된다. 첫째, 미시적으로 분말이 단조되는 단계로 원료분말 입자는 편평화되면서 냉간 가공에 의한 가공경화가 일어난다. 둘째, 가공경화된 입자의 파쇄 및 파편간의 접합에 의해 층상구조(lamella)가 발달하고 결정 조직이 미세해진다. 셋째, 층상조직이 등방성으로 변하여 균질화가 일어나고 수십 nm 정도의 결정 조직으로 미세화 또는 비정질화 되면서 합금화가 이루어진다.

제3단계의 합금화 과정은 확산 시 활성화 에너지의 저하, 국부적인 온도 상승, 합금 성분간의 확산 거리의 단축 등이 일어나는 것으로 추정되고 있다.⁶⁾ 또한 MA 과정에서 비정질 상이 형성되는 기구는 일반적으로 금속 다층 박막에서 관찰되는 고상 비정질화 반응(solid-state amorphization reaction; SSAR)에 의한 합성기구로 알려져 있다.⁷⁾ 분쇄가 진행됨에 따라 초기 결정상이 비정질화 되고, 분쇄가 더욱 진행되거나 열처리를 함으로써 비정질 상으로부터 최종 안정상을 얻게된다. 이러한 고상 비정질화 반응은 금속-비금속계에서도 알려져 있으며,⁸⁾ 비정질화에 미치는 요인으로는 화합물의 생성열 및 원자반경을 들 수 있다.⁹⁾

원료 분말에 연성 금속이 함유되지 않거나 소량 존재하는 경우는 위와 다른 과정을 거치게 되는데, 예를 들어 금속-비금속 분말의 경우는 비금속 분말이 분쇄되어 연성이 높은 금속조직 내에 분산되는 과정을 반복하여 화합물이 형성된다.

3. 실험 장치

각종 혼합분말을 특정한 재질 및 형상의 용기에 담아 기계적인 힘(에너지)을 가하여 MA 공정을 수행하게 된다. 이때 분말에 에너지를 전달하는 방법에는 여러 가지 형태가 있다. 가장 광범위하게 이용되는 것은 볼밀이며, 그 외에 압연기, 마찰장치, 분말단조기 등이 사용된다. Fig. 3에 대표적인 볼밀의 종류를 나타내었다. Fig. 4에는 볼밀을 이용하여 MA를

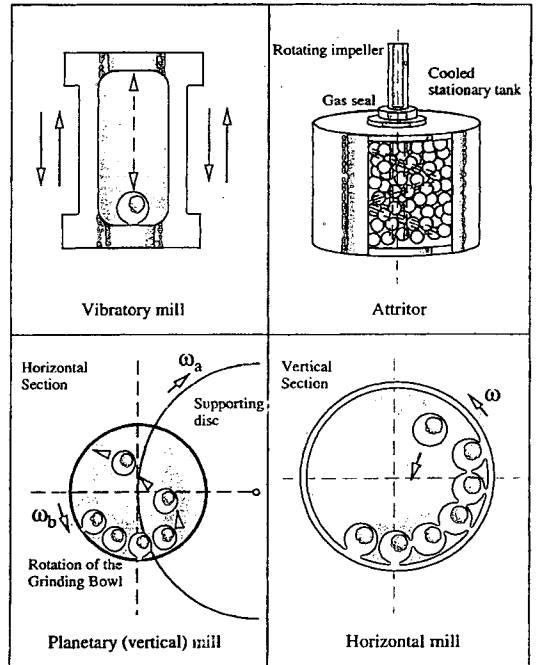


Fig. 3. Schematic representation of the different types of milling devices.

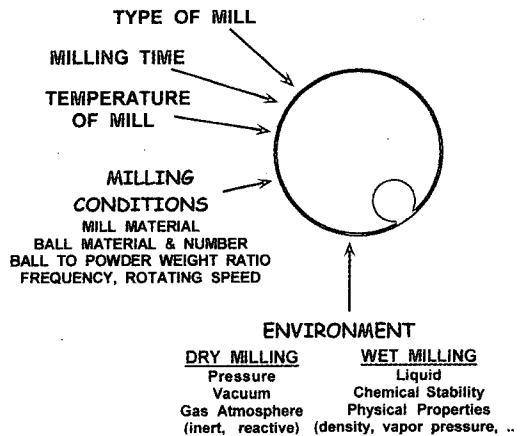


Fig. 4. An overview of the main factors to be considered in MA.

수행할 때 고려하여야 할 실험 변수를 나타내었다. 볼밀은 원래 분쇄를 목적으로 개발된 장치로서 MA와 분쇄기의 운전 조건(분쇄 조건)이 다르다. Table 5에 MA와 분쇄의 주요 차이점을 요약하였다. MA 공정에서는 볼밀 이외에도 분말의 전처리 및 후처리를 위한 글로브 박스, 열처리를 위한 진공로 또는 분

Table 5. Major differences between mechanical alloying and milling processes

	MA	Milling
Milling Atmosphere	Inert gas, Vacuum	Air, Water, Alcohol etc.
Powder/Ball Weight Ratio	Powder/Ball =1/3~1/100	Almost the same volume of ball and powder
Milling Time	Long	Short

위기로 등의 장치가 필요하다.

3-1. 유성밀(planetary mill)

유성밀은 MA에 사용되는 대표적인 밀이다. 소량의 분말로 가능하므로 연구용으로 적합하다. 분말과 볼을 담은 용기가 회전하고, 용기를 지지하는 테이블이 그와 반대 방향으로 회전한다. 충격 에너지는 보통 볼밀의 중력에 의한 가속도보다 40배 정도 커서 단시간에 MA가 가능하다.

3-2. 교반밀(attritor)

기계적인 마모를 이용한 분쇄방법이며, 실험실 규모에서 수 kg 정도까지 사용된다. 용기 벽, 축, 볼 등에서 마모가 크기 때문에 불순물 혼입이 문제가 된다. 중력에 의하여 용기의 아래와 위의 분말이 다르게 분쇄되는 것을 방지하기 위해 축을 수평으로 회전시키는 방법도 있다.

3-3. 진동밀(vibratory mill)

3축 방향으로 1200 rpm 정도의 진동수로 흔들어서 분쇄하며, 높은 충격 에너지를 발생시킨다. 적은 양의 분말을 분쇄하는데 적합하다. 밀을 회전시키지 않으므로 밀링 중의 온도계측, 분위기 조절 등이 용이하다.

3-4. 회전 볼밀(rotating ball mill)

분쇄시 사용되는 가장 일반적인 형태의 밀이다. 구조가 단순하고 장치가 저렴하므로 양산화 시 장치의 대형화에 유리하다. 미국 Inco Alloy 사에서는 세라믹 입자를 분산 강화시킨 초경분말의 제조 시 1.0 ton 규모의 대형 회전 볼밀을 사용한다.¹⁰⁾

회전 볼밀은 중력을 이용하기 때문에 시료에 전달

되는 에너지가 낮아서 영구자석을 부착하여 강자성 체로 제조된 볼의 충격 에너지를 증진시키는 형태의 볼밀도 개발되어 있다. 자석의 위치, 개수 등을 조절하여 볼이 움직이는 궤적을 조절할 수 있고, 충격 에너지의 분포가 균일한 것이 특징이다.¹¹⁾

4. 기계적 합금법의 공정

4-1. 분위기 조절

MA 중에 분말의 산화나 오염을 방지하기 위하여 불활성 가스 분위기 또는 진공에서 행한다.¹²⁾ 또한 MA 도중 원료분말과 기체의 반응을 일으키는 반응성 분쇄(reactive milling)를 위하여 암모니아나 질소 가스를 도입한다.

4-2. 볼/분말의 무게 비

볼/분말 무게비가 클수록 단위 시간당 충돌 회수가 증가하고 충격시의 온도 증가가 높기 때문에 MA 공정 시간이 단축된다. 일반적으로 10:1에서 20:1이 사용되는데, shaker 볼밀 에서는 5:1까지도 가능하다. 볼/분말 무게비가 증가하면 분말 표면에서 소성변형을 촉진하기 때문에 분말의 microhardness가 증가한다. 용기의 구석에는 볼이 자주 접촉하지 않는 공간이 생기기 쉬워서 합금화가 진행되지 않을 우려가 있으므로 밀용기의 크기에 따라 볼의 크기를 선택하여야 한다.

4-3. 표면 흡착제

MA 공정은 분말의 파쇄(fracture) 및 접합(cold welding)이라는 두 가지 과정이 어우러져 진행되고, MA가 성공적으로 이루어지기 위해서는 파쇄 및 접합이 균형을 이루어야 한다. 금속과 같이 연성이 있는 물질은 파쇄가 일어나기 보다 접합이 주로 일어나기 때문에 볼의 표면에 분말이 입혀져서 크기가 증가하기 쉽다. 그 반면에 파쇄만 발생하면 서로 다른 성분간에 접촉하여 합금화가 진행될 가능성이 낮아진다. 유효제나 분산제와 같은 유기물은 분말의 표면에 흡착하여 표면장력을 낮춤으로써 입자끼리 접촉하여 접합되는 것을 막는다.¹³⁾ 분쇄에 필요한 에너지는 새로이 생성되는 면적과 표면장력의 곱으로 주어지므로 표면장력의 감소는 분말 입경의 감소로 이

Table 6. Typical properties of process control agents¹⁴⁾

Generic Name	Chemical Formula	Melting Point (°C)	Boiling Point (°C)
Stearic Acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₆ CO ₂ H	67-69	183-184
Heptane	CH ₃ (CH ₂) ₅ CH ₃	-91	98
Ethyl Acetate	CH ₃ CO ₂ C ₂ H ₅	-84	76.5-77.5
Ethylenebidi-steramide	C ₂ H ₂ -2(C ₁₈ H ₃₆ ON)	141	259
Polyrthylene Glycol	H(OCH ₂ CH ₂) _n OH	59	205
Dodecane	CH ₃ (CH ₂) ₁₀ CH ₃	-12	216.2
Hexanes	C ₆ H ₁₄		68-69
Methyl Alcohol	CH ₃ OH	-98	64.6
Ethyl Alcohol	C ₂ H ₅ OH	-130	78

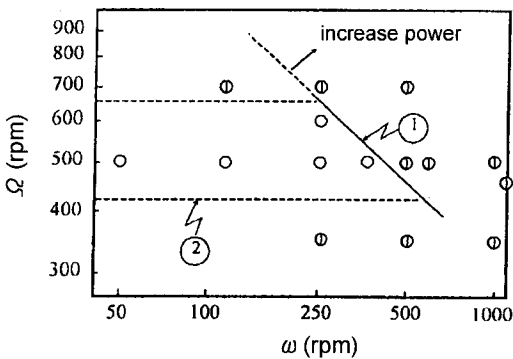


Fig. 5. Dynamic equilibrium of the amorphous phase in Ni₁₀Zr₇ system using a planetary mill.¹⁵⁾

어진다. Table 6에 표면 흡착제로 사용되는 물질의 특성을 나타내었다.

4-4. 분쇄 에너지

분쇄 에너지는 볼/분말의 무게 비, 볼 재료의 밀도, 밀의 회전 또는 진동 속도 등의 조절로 증가시킬 수 있다. 분쇄 에너지가 작으면 분말의 비정질화에 오랜 시간이 걸리고, 너무 큰 에너지는 볼의 충격 시 온도의 상승으로 비정질 분말의 재결정화를 촉진한다. Fig. 5는 유성밀의 자전 및 공전 속도에 대하여 합성된 분말의 상 변화를 나타낸 그림이다.¹⁵⁾ 분말의 비정질화는 일정한 회전 영역에서 일어남을 알 수 있다.

4-5. 합성 분말의 회수

기계적합금법으로 합성된 분말에는 상당한 내부에너지가 축적되어 있어서 mechanochemical 활성 상태에 놓인다. 이러한 분말을 통상 나타내지 않는 거동을 보이는 경우가 있는데, 예를 들어 대기 중에서

산화하기 어려운 금속도 급격히 산화하거나, 고온에서 일어나는 반응이 실온 근처에서 발생하기도 하고, 물이나 알콜 등의 용매와 반응하기도 한다. 이와 같은 일이 예상되는 경우는 합성 분말을 불활성 가스가 순환되는 글로브 박스 내에서 다루어야 하고, 분말을 대기 중에 노출시키기 전에 진공이나 불활성 가스 분위기에서 열처리하여 활성을 낮추거나 표면을 약간 산화시켜야 한다. 또한 급격히 산화 또는 질화되지 않는 분말이라도 장기간에 걸쳐 반응이 일어나는 경우가 있으므로 보존에 주의하여야 한다.

5. 기계적 합금법의 응용

5-1. 산화물 분산 강화 재료(Oxide Dispersion Strengthened Material)

MA의 최초의 공업적인 응용은 산화물을 분산시켜 강화한(ODS 합금) 비행기용 엔진재료용 Ni-기 합금에서 이루어졌다.¹⁾ 현재는 그 외에도 다양한 합금에서 이용되고 있다.¹⁶⁾

알루미늄은 금속공업에서 철 다음으로 많이 사용되는 금속인데, 밀도가 2.7 g/cm³에 불과한 경금속의 하나이다. 알루미늄은 무르고 연성이 크며 강도가 약하다. 그러나 기계적 강도는 Cu, Mg, Mn, Zn, Sn, Li 등의 합금을 첨가하여 크게 증진시킬 수 있다. 1970년대에 Benjamin이 MA를 이용하여 ODS Al 합금을 제조한 이래 여러 가지 조성에 대하여 연구가 진행되었고 Table 7에 요약하였다.

5-2. 분말 합성

5-2-1. 분화물 분말 합성

Table 7. Examples of mechanically alloyed Al alloys

Material	Composition	Dispersoid	Ref.
Al	Al	Al_4C_3 , Al_2O_3	17-20
INCOMAP Al-9052	Al-4Mg-1.1C-0.8O	Mg_2Al_3 , Al_4C_3 , Al_2O_3	21-23
INCOMAP Al-9021	Al-1.5Mg-4Cu-1.1C-0.8O		
INCOMAP Al-905XL	Al-4Mg-1.5Li-1.2C-0.4O		
DISPAL 0	Al-2.5%O		
DISPAL 3	Al-3.0%C-0.8%O		
Al-Fe	Al-Fe	Al_3Fe , $Al_{13}Fe_4$, Al_4C_3 , Al_2O_3	24-26
Al-Fe-X (X=Ce, Gd, Mn, Mo, Ni, Si)	Al-Fe-Ce Al-Fe-Mn	Al_6Fe , $Al_{13}Fe_4$, $Al_{10}Fe_2Ce$, Al_4C_3 , Al_2O_3	27, 28
Al-Li	Al-Li	Al_4C_3 , Al_2O_3	29
Al-Li-X (X=Cu, Mg, Si)	Al-Li-Cu Al-Li-Mg	Al_4C_3 , Al_2O_3	30

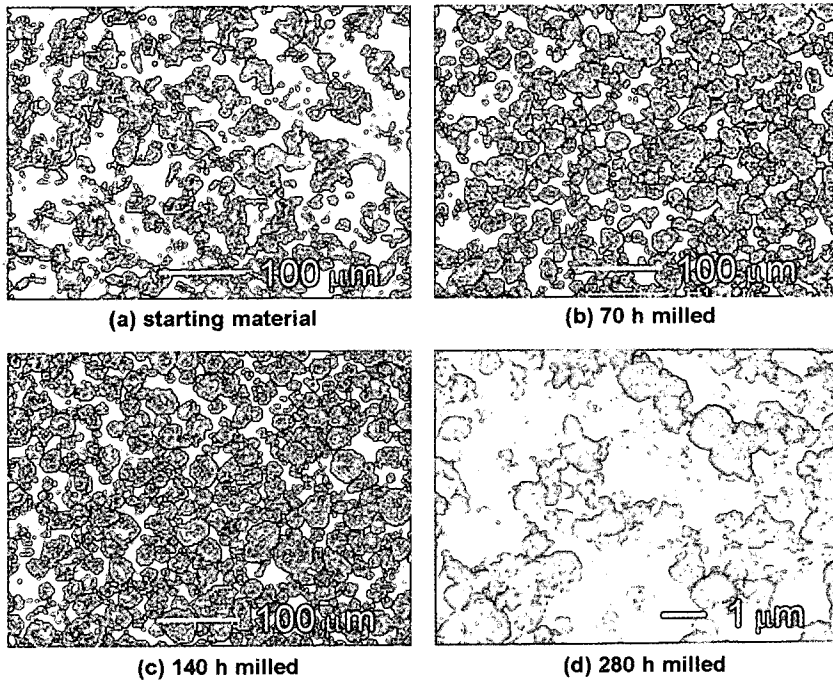


Fig. 6. Scanning electron microscopy images of (a) the starting material, (b) powders milled for 70 h, (c) 140 h, and (d) 280 h.³¹⁾

Fig. 6은 Ti과 B 분말을 MA 처리한 SEM 사진이다.³¹⁾ 출발원료인 Ti과 B 분말은 형상이 불규칙하고 입도 분포가 크다. 분쇄가 진행되면 입자모양이 구형으로 바뀌나 크기의 변화는 거의 없다. 2회중적으로

TiB₂ 상이 얻어지면 입자 크기는 급격히 작아지는데, 이와 같은 입자크기의 급격한 변화는 분말의 상 변화와 관계가 있다. 분말이 금속상인 경우는 금속이 갖는 연성 때문에 볼에 의하여 입자가 융합되고 구형

Table 8. List of some ceramics produced by mechanical alloying

Compound	Synthesis	ΔH_{298} (kJ/mol)	Ref.
TiB ₂	Ti+B	-323.8	32, 33
FeB	Fe+B	-71.1	34
Nd ₂ Fe ₁₄ B	Nd+Fe+B		35
TiC	Ti+C	-184.6	36-38
VC, V ₂ C	V+C	-117.2	39
BN	B+N ₂	-254.4	40, 41
CrN	Cr+N ₂		42
Cu ₃ N	Cu+N ₂		41
Mo ₂ N, MoN	Mo+N ₂ , Mo+NH ₃	-81.6	41, 42
NbN	Nb+N ₂	-235.1	42
Si ₃ N ₄	Si+N ₂	-744.8	39, 41
TaN	Ta+N ₂ , Ta+NH ₃	-252.3	39, 42
TiN	Ti+N ₂	-337.9	41, 43
VN	V+N ₂	-217.2	41, 42
WN, W ₂ N	W+N ₂		41, 42
ZrN	Zr+N ₂ , Zr+NH ₃	-365.3	39-42

으로 되기 쉽다. 그 반면에 TiB₂ 상으로 변환되면 입자의 취성으로 인하여 분쇄가 진행되고, MA에 의하여 TiB₂ 분말이 합성됨과 동시에 분쇄가 진행되어서 사진에서 보는 것과 같은 미세한 분말이 얻어진다.

5-2-2. 탄화물 분말 합성

MA에 의한 탄화물 합성은 일반적으로 금속 분말과 탄소 또는 흑연 분말을 혼합하여 출발한다. 가장 먼저 TiC 분말의 합성이 시도되었고, 그밖에 SiC, VC 등의 탄화물 분말이 합성되었다.

5-2-3. 질화물 분말 합성

질화물 합성은 고온에서의 직접 질화법이 종종 사용되는데, MA법은 상온에서 질화물의 합성을 가능케 한다. 금속 분말을 질소 또는 암모니아 가스와 함께 분쇄하여 TiN, ZrN, VN, BN, Mo₂N, Si₃N₄, Cu₃N, Mg₃N₂, W₂N 등의 질화물이 합성된다. 붕화물, 탄화물 및 질화물의 합성에 대하여 Table 8에 요약하였다.

5-2-4. 복합재료(composite)

금속과 산화물, 탄화물, 질화물과 같은 세라믹을 복합화하면 강화된 재료를 제조할 수 있다.⁴⁴⁾ 분말야금법으로 composite를 제조할 경우에 나타나는 문제점으로는 분말 크기의 차이와 분말의 대전에 기인하는 응집이 있다. MA에 의한 composite 제조는 이와

같은 문제점을 해결할 수 있으며, Al-SiC, Al-Ti-B 등의 계에 대하여 적용되었다.

5-2-5. 금속간 화합물(intermetallics)

MA를 이용하여 금속간 화합물을 제조할 수 있는데, Ti-Al 계(Ti₃Al, TiAl 및 TiAl₃), Ni-Al 계(Ni₃Al, Ni₂Al₃ 및 NiAl), Mg₂Si 등에 대하여 보고된 바 있다.⁴⁵⁻⁴⁷⁾

5-3. 비정질화(amorphization)

종래의 비정질 제조법은 급냉 응고, 기상 증착, 레이어 공정 등과 같이 액상이나 기상으로부터 매우 빠른 냉각속도로 급냉 시키는 것인데 반하여 MA나 MG에 의한 비정질화는 다음과 같은 과정을 거쳐서 고상으로부터 비정질 재료가 제조된다.

[Ordered Phase] → [Disordered Phase]

→[Fine Grained (Nanocrystalline) Phase]

→[Amorphous Phase]→[Recrystallization]

용융물을 급냉시켜 비정질을 얻는 경우는 공용점 부근의 조성에서만 가능한데 비하여 MA로 비정질화가 가능한 조성 영역은 훨씬 넓고, 지금까지 많은 계에 대하여 적용되었다.⁴⁸⁻⁵²⁾ 일반적으로 높은 분쇄 에너지(높은 분쇄말의 무게 비, 높은 회전수 등)는 분말에 더 많은 변형이나 결함을 유발시키므로 비정질화를 촉진시키리라고 예상된다. 그러나 높은 에너지는 많은 열을 발생하여 온도를 높이므로 재결정화를 일으킬 수 있다. 따라서 두 가지 효과의 경합이 최종 합성 상을 결정하며, 재료에 따라서 비정질화에 필요한 에너지의 크기가 달라진다.⁵³⁾

고상반응에 의한 비정질화가 일어나기 위한 조건으로 첫째 두 원소는 비정질 상태에서 큰 음의 혼합열을 가져야 하고, 둘째 두 원소의 원자반경 차이가 커야 한다.⁵⁴⁾ 첫째 조건은 반응이 일어나기 위한 열역학적 조건이고, 두 번째 조건은 확산을 촉진시키기 위한 동력학적 조건이다. 이와 같은 두 가지 인자로 인하여 비정질 상의 자유에너지가 혼합된 결정상의 그것보다 낮아질 수 있다.

5-4. 나노 구조 재료(nano-structured materials)

MA가 진행됨에 따라 분말의 결정립 크기는 나노 구조로 가까워지며, 몇몇 합금의 경우 분쇄시간에 따

라 결정립의 크기는 지수함수적으로 감소한다.⁵⁵⁾ 나노 구조는 비정질 물질을 열처리하거나 MG 처리하여 얻을 수도 있다.⁵⁶⁾ MA에 의한 나노 미세구조의 개발은 희토류 원소를 주성분으로 하는 교환스프링 자석,⁵⁷⁻⁵⁹⁾ HDDR (hydrogenation, disproportionation, desorption and recombination) 공정^{60,61)} 등에 적용되고 있다.

5-5. 광물 및 폐기물 처리

MG 처리는 광물 처리공정에 이용되는데, 광물을 미세하게 분쇄하면 화학적 활성이 높아져서 고가의 성분을 쉽게 추출해낼 수 있으며, 철광석의 환원반응 촉진에도 이용된다.⁶²⁾ 또한 폐기물에 적용하는 경우도 있는데 예를 들어 석탄회를 분쇄하면 포졸란 반응성이 향상되고, 중유를 연소한 EP-dust 중에 함유된 바나디움을 효율 높게 회수할 수 있다.⁶³⁾ 특정 성분을 제거하거나 추출하기 위한 반응물과 광물을 함께 분쇄하면 화학반응이 촉진되기도 한다.

6. 맺는 글

MA는 처음에 ODS 합금의 제조로부터 시작되었으며, 그 후 여러 가지 신재료 및 비정질 상의 합성에 이용되면서 최근에는 연간 500편 이상의 논문이 발표되고 있다. MA를 적용할 수 있는 새로운 재료를 찾기 위한 노력이 끊임없이 이루어지고 있으며, 특히 기계적인 에너지가 고체 분말에 가해질 때 발

생하는 물리적, 화학적 물성 변화의 이론적인 고찰은 많은 반응이 동시에 발생하는 관계로 아직 미약한 편이다. Fig. 7에 나타난 것처럼 MA/MG 법은 다양한 분야에 이용이 가능하고 그 범위가 점차 넓어지고 있는데, 상업적으로 이용하기 위해서는 대량생산 기술 및 그에 따르는 오염 문제를 해결해야 한다.

참고문헌

- 1) Benjamin, J. S., *Metall. Trans.*, **1**, 2940 (1970).
- 2) Benjamin, J. S., *Scientific American*, **234**, 40 (1976).
- 3) Turnbull, D., *Metall. Trans.*, **12A**, 695 (1981).
- 4) McCormick, P. G. and Froes, F. H., *J. Metals*, **50**, 61 (1998).
- 5) Lin, I. J., Nadiv, S. and Grodzian, D. J. M., *Mater. Sci. Eng.*, **7**, 313 (1975).
- 6) Benjamin, J. S., *ASM Metals Handbook*, Vol. 7, Powder Metallurgy, p. 185 (1985).
- 7) Hellstern, E. and Schultz, L., *Appl. Phys. Lett.*, **48**, 124 (1986).
- 8) Calka, A. and Radlinski, A. P., *Appl. Phys. Lett.*, **58**, 119 (1991).
- 9) Hen, Z., *J. Phys., Condens. Matter* **5**, L337 (1993).
- 10) Schaffer, G. B. and McCormick, P. G., *Mater. Forum*, **16**, 91 (1992).
- 11) Calka, A. and Radlinski, A. P., *Mater. Sci. Eng.*, **A134**, 1350 (1991).
- 12) Gilman, P. S. and Nix, W. D., *Metall. Trans. A*, **12A**, 813 (1981).
- 13) Gilman, P. S. and Benjamin, J. S., *Ann. Rev. Mater. Sci.*, **13**, 279 (1983).
- 14) Aldrich, *Handbook of Fine Chemicals*, Aldrich Chemical Company, Inc., WI 53233, USA, 1992.
- 15) Martin, G. and Gaffet, E., *Coll. Phys.*, **C4**, 71 (1990).
- 16) deBarbadillo, J. J. and Smith, G. D., *Mater. Sci. Forum*, **88-90**, 167 (1992).
- 17) Wagendristel, A. and Tschegg, E., *Aluminium*, **48**, 357 (1972).
- 18) Singer, R. F., Oliver, W. C. and Nix, W. D., *Metall. Trans.*, **11A**, 1895 (1980).
- 19) Gurjar, M. V., Murty, G. S. and Upadhyaya, G. S., *J. Mater. Sci.*, **28**, 5654 (1993).
- 20) Enzo, S., Cocco, G. and Macri, P. P., *Key Eng. Mater.*, **81-83**, 49 (1993).

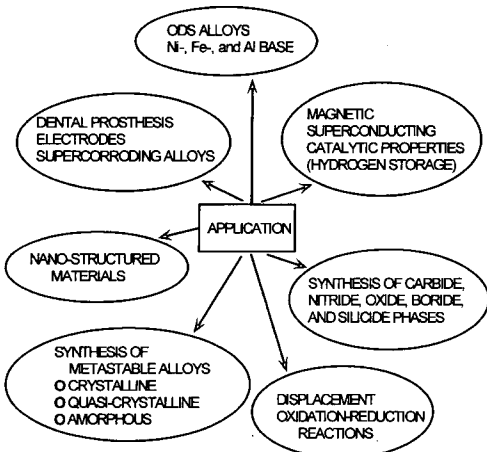


Fig. 7. Typical applications of the MA and MG.⁶⁴⁾

- 21) Jagg, G., Slesar, M., Besterci, M., Durisin, J. and Schroder, K., *Powder Metall. Inter.*, **21**, 25 (1989).
- 22) Kim, Y. W. and Bidwell, L. R., *Scripta Metall.*, **16**, 799 (1982).
- 23) Renard, A., Cheng, A. S., de la Veaux, R. and Laird, C., *Mater. Sci. Eng.*, **60**, 113 (1983).
- 24) Fadeeva, V. I. and Leonov, A. V., *Mater. Sci. Forum*, **88-90**, 481 (1992).
- 25) Niu, X., Froyen, L. and Delaey, L., *J. Mater. Sci.*, **29**, 3724 (1994).
- 26) Mukhopadhyay, D. K., Suryanarayana, C. and Froes, F. H., *Metall. Mater. Trans.*, **26A**, 1939 (1995).
- 27) Le Brun, P., Froyen, L. and Delaey, L., *Mater. Sci. Eng.*, **A157**, 79 (1992).
- 28) Niu, X. P., Le Brun, P., Froyen, L., Peytour, C. and Delaey, L., *Powder Metall. Inter.*, **118**, 120 (1993).
- 29) Narayanan, G. H., Graham, W. H., Quist, W. E., Wingert, A. L. and Ronald, T. M. F., Proc. of Structural Metals by Rapid Solidification, Ed. F. H. Froes and S. J. Savage, ASM Intern. Mater. Park, OH, p. 321, 1987.
- 30) Layyous, A., Nadiy, S. and Lin, I. J., *Powder Metall. Inter.*, **22**, 21 (1990).
- 31) Hwang, Y., Kang, E. S. and Lee, H. S., Proceedings of the 15th International Korea-Japan Seminar on Ceramics, Kyungju, Korea, pp. 321-325, 1998.
- 32) Radlinski, A. P. and Calka, A., *Mater. Sci. Eng.*, **A134**, 1376 (1991).
- 33) Park, Y. H., Hashimoto, H. and Abe, T., *Mater. Sci. Eng.*, **A181/A182**, 1291 (1994).
- 34) Hwang, Y., Lee, H. S., Chung, H. S., Kim, T. S., Oh, S. J. and Kwon, S. J., *J. Kor. Phys. Soc.*, **35**, S236 (1999).
- 35) Schultz, L., Schnitzke, K. and Wecker, J., *J. Appl. Phys.*, **64**, 5302 (1988).
- 36) Teresiak, A., Mattern, N., Kubsch, H. and Kieback, B. F., *NanoStructured Mater.*, **4**, 775 (1994).
- 37) Huang, J. Y., Ye, L. L., Wu, Y. K. and Ye, H. Q., *Metall. Mater. Trans.*, **25A**, 1 (1995).
- 38) Liu, Z. G., Guo, J. T., Ye, L. L., Li, G. S. and Hu, Z. Q., *Appl. Phys. Lett.*, **65**, 2666 (1994).
- 39) Calka, A. and Kaczmarek, W. A., *Script. Metallurgica*, **26**, 249 (1992).
- 40) Calka, A., *Key Eng. Mater.*, **81-83**, 17 (1993).
- 41) Calka, A. and Williams, J. S., *Mater. Sci. Forum*, **88-90**, 787 (1992).
- 42) Ogino, Y., Yamasaki, T., Atzumi, N. and Yoshioka, K., *Mater. Trans., JIM*, **34**, 12 (1993).
- 43) Chen, Y. and Williams, J. S., *Mater. Sci. Forum*, **179-181**, 301 (1995).
- 44) Ibrahim, I. A., Mohamed, F. A. and Lavernia, E. J., *J. Mater. Sci.*, **26**, 1137 (1991).
- 45) Suryanarayana, C., Chen, G. H., Frefer, A. and Froes, F. H., *Mater. Sci. Eng.*, **A158**, 93 (1992).
- 46) Pyo, S. G., Yasuda, H. and Yamane, T., *Mater. Sci. Eng.*, **179/180**, 676 (1994).
- 47) Bhattacharya, A. K. and Artz, E., *Scripta Metall. Mater.*, **127**, 635 (1992).
- 48) Petzoldt, F., *J. Less-Common Met.*, **140**, 85 (1988).
- 49) Schwartz, R. B., Petrich, R. R. and Saw, C. K., *J. Non-Cryst. Solid*, **76**, 281 (1987).
- 50) Hellstern, E. and Schultz, L., *J. Appl. Phys.*, **63**, 1408 (1988).
- 51) Nasu, T., Nagaoka, K., Sakurai, M. and Suzuki, K., *Mater. Sci. Forum*, **179-181**, 97 (1995).
- 52) Hellstern, E. and Schultz, L., *Mater. Sci. Eng.*, **93**, 213 (1987).
- 53) Koch, C. C., *Scripta Mater.*, **34**, 21 (1996).
- 54) Schwartz, R. B. and Johnson, W. L., *Phys. Rev. Lett.*, **51**, 415 (1983).
- 55) Sundereson, R. and Froes, F. H., *Key Eng. Mater.*, **199**, 29 (1989).
- 56) Eckert, J., Schultz, L. and Urban, K., *J. Mater. Sci.*, **26**, 441 (1991).
- 57) Smith, P. A. I., McCormick, P. G. and Street, R., *Mater. Sci. Forum*, **179-181**, 527 (1995).
- 58) Gong, W. and Hadjipanayis, G. C., *J. Appl. Phys.*, **75**, 6649 (1994).
- 59) O'Donnell, K., Kuhrt, C. and Coey, J. M. D., *J. appl. Phys.*, **76**, 7068 (1994).
- 60) Harris, I. R. and McGuinness, P. J., *J. Less. Common Met.*, **172-174**, 243 (1992).
- 61) McGuinness, P. J., Short, C., Wilson, A. F. and Harri, I. R., *J. Alloys Comp.*, **184**, 243 (1992).
- 62) Saito, F., *Shigen-to-Sozai*, **111**, 515 (1995).
- 63) Filio, J. M., Kasai, E. and Saito, F., *J. Chem. Eng. Japan*, **27**, 492 (1994).
- 64) Suryanarayana, C., *Met. Mater.*, **2**, 195 (1996).