

소결재료의 기계가공성 향상방안에 대하여

정광철·양형도·박동규·이강률
가야에이엠에이(주) 연구소

A Scheme for Enhancing the Machinability of Sintered Materials

Kwang-Chul Jung, Hyung-Do Yang, Dong-Kyu Park and Kang-Yull Lee
R&D Center, Kaya AMA Inc.

1. 서 론

분말야금(Powder Metallurgy, P/M)공법은 다량생산성, 우수한 경제성 및 재료에 있어서의 높은 설계자유도 등 여러 가지 이점 때문에 자동차를 비롯하여 가전, 산업기계 등의 산업에서 부품을 제조하는 공법으로서 널리 적용되고 있다. 과거에는 오일레스 베어링(Oilless bearing)을 필두로 평기어(Spur gear)부품 등 기계가공(Machining)이 거의 필요가 없던 비교적 간단한 형상의 제품 생산을 위해 적용되었다. 그러나 분말야금공법이 자동차 부품에 적용되기 시작하면서 부품 형상의 복잡도가 크게 증가하였으며 치수정밀도가 증가되고, 고기능화가 요구되면서 기존의 금형형상, 또는 소결공정의 적용만으로는 성형이 곤란하거나 요구치수가 점점 까다로워지면서 기계가공이 필요하게 되는 경향도 증가되고 있다.

그것은 제품에 요구되는 기능이 고도화됨으로써 제품 형상에 요구되는 복잡도가 증가하고, 원가절감의 요구가 진전되면서 타 부품·기능과의 복합화가 진행됨에 따라 전반적인 제품 형상의 복잡화가 크게 증가되었기 때문이다.

또한 유사한 이유로 제품제조에 사용되는 재료도 고기능화 경향에 맞추어 점차로 고강도화됨으로써, 재료의 기계가공성(Machinability)이 점차로 저하되는 추세가 있다. 특히 고강도재료나 내마모재료에 있어서는 매우 높은 경도(Hardness)를 요구하기 때문에 더 많은 합금원소와 열처리 등의 부가적인 공정을 필요로 하게됨으로써 그러한 경향은 더욱 심각하게 되었다. 결국 재료 자체에 내재된 기공(Pore)으로 인하

여 일반 주·단조재에 비하여 기계가공성이 낮았던 분말야금 재료가 고객의 고기능성 요구로 인하여 더욱 기계가공성의 향상에 대한 필요성이 증대되는 추세에 놓이게 된 것이다. 이러한 경향을 Fig. 1에 요약해 놓았다.

기계가공성은 흔히 피삭성 또는 절삭성이라고도 하며 ‘얼마나 용이하고 안전하게 원하는 표면 상태와 재현성을 갖게 제거하고자하는 부분을 잘 제거할 수 있느냐하는 척도’를 말한다.¹⁾

상기에 서술된 것과 같이 분말야금 부품에 있어서 원가절감의 요구는 고기능성의 요구와 비례하여 증대되고 있는 데 이와 같은 상반된 요구는 결국 분말야금 제조자들에게 있어서 분말야금 재료의 기계가공성 향상이 제조용이성의 확보와 원가절감의 중요요인으로 작용되고 있음을 의미하고 있다.

조사에 의하면 현재 생산되고 있는 전체 분말야금

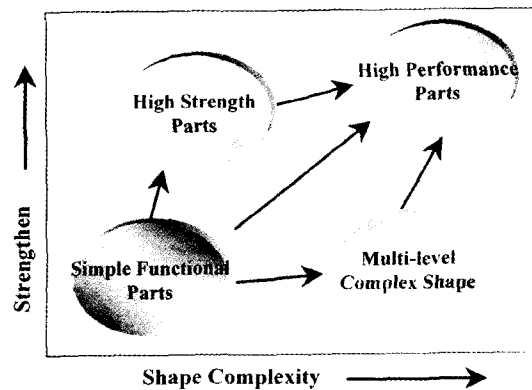


Fig. 1. Trends of development in P/M materials.

제품의 60% 정도가 기계가공에 의해 마무리되고 있으며 이 공정에 소요되는 비용이 전체 부품생산을 위한 제조비용의 20%를 점유한다는 보고가 있다. 적용되는 기계 가공의 종류도 선삭(Turning), 밀링(Milling), 연삭(Grinding), 드릴(Drilling), 태핑(Tapping)을 비롯하여 매우 다양하다.

2. 소결재료에 있어서의 기계가공성 향상 방안

2.1. 기계가공성에 영향을 미치는 요소

분말야금 재료에 있어서 일반 주·단조재보다 기계가공성이 낮은 근본적인 이유는 분말야금 재료에 내재되어 있는 기공(Pore)에 기인한다고 알려져 있다. Fig. 2 가공 모식도에 나타난 것과 같이 분말야금 재료의 절삭에 있어서 기공은 단속 가공(Interrupted machining)에 의해 공구에 충격을 주게 되고 이로 인해 절삭 충격에 의한 공구피로의 증가로 공구의 손상을 증가시킨다고 알려져 있다.²⁾

분말야금 재료에 있어서 기공(즉 밀도)은 기계가공성뿐만 아니라 모든 물리적인 특성과 상관적으로 관계에 있는데(Fig. 3 참조) 그것 또한 기계가공성과 무관하지 않다. 이와 같이 소결재에 있어서 기계가공성에 영향을 주는 인자는 단순하지는 않지만 대체적으로 소결 재료와 가공조건 및 가공공구로 대별될 수 있으며 그 예를 Fig. 4에 나타내었다. 밀도에서 주의를 기울이지 않으면 안되는 것은 밀도의 값과 함께 밀도의 편차이다. 가공되는 부분에서 밀도의 편차가

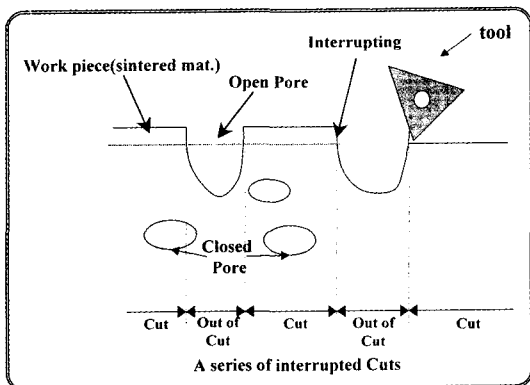


Fig. 2. Schematic diagram of machining in sintered material.

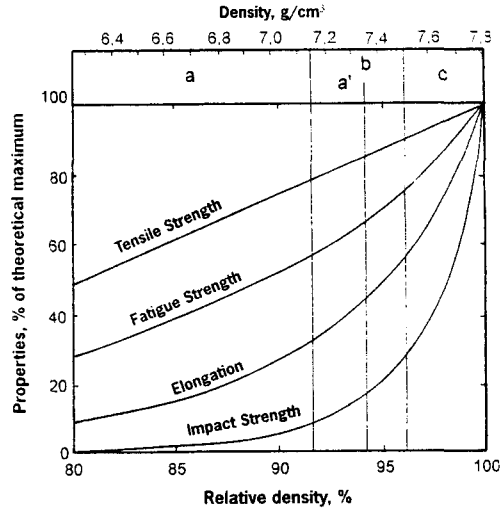


Fig. 3. Increase of sintered properties with sintered density. Schematically: a = compacting + sintering; a' = warm compacting + sintering + re-pressing + resintering; c = powder forging.

크면 제일 낮은 밀도를 갖는 부분의 영향을 받게 되어 전체적으로 기계가공성이 낮아진다. Fig. 5는 밀도가 낮을 경우에 가공성이 떨어지는 경향을 나타내고 있다.³⁾

소결 공정에서의 소결 조건 또한 기계가공성에 영향을 미치는 인자이다. 소결 조건에 따라 분말 입자간의 확산과 기공의 구형화가 진전되고 그에 따라 기계가공성이 영향을 받게 되며, 첨가원소의 확산에 의한 균질화 정도와 표면부의 탈탄, 침탄 혹은 산화에 대한 영향이 기계가공성에 크게 영향을 미치게 된다.

첨가 원소의 종류와 첨가량 또한 기계가공성을 좌우하는 중요한 요소이다. 합금원소는 기지에 녹아들어 기지를 강화시키고 다양한 미세구조를 형성하거나 변화시켜 변형에 대한 저항을 증대시키며 첨가 원소량이 많을수록 기계가공성에 대한 저항은 더욱 증대된다. 또 강화원소의 첨가량이 많은 경우와 적은 경우의 기계가공성 향상을 위한 첨가제, 또는 관련대책의 적용결과가 전혀 다르게 나타나는 경우가 많다. 따라서 기계가공성의 향상을 위한 대책 강구 시에는 그와 같은 점을 잘 고려해야 한다. 일례로 저 밀도, 저 합금성분계에서는 기계가공성 향상 효과가 두드러지지 않았던 MoS₂ 첨가의 효과가 합금성분이 다량 첨가된 경우에는 기계가공성 효과가 두드러지는

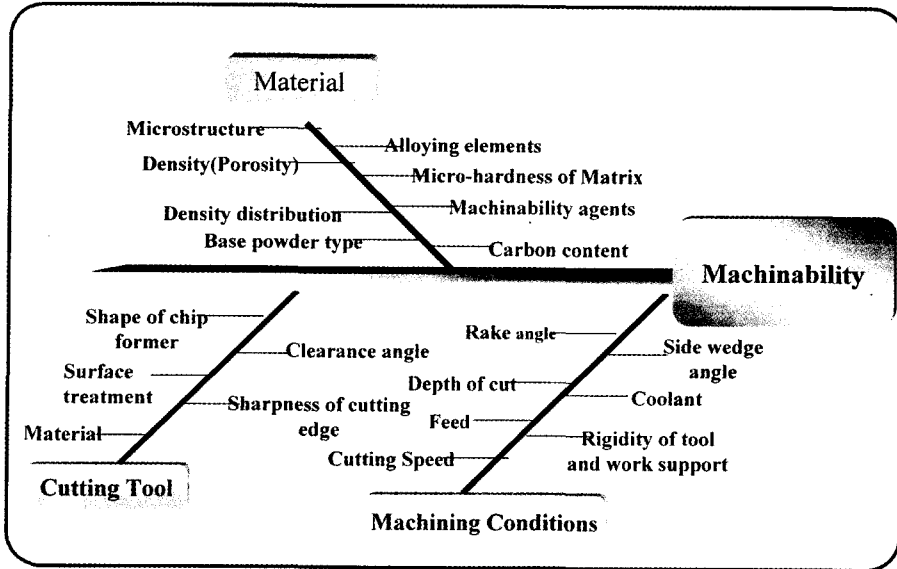


Fig. 4. Fundamental problems in machining and factors affecting the machinability.

경우도 있다.⁵⁾

2.2. 기계가공에 있어서의 문제점

선삭 가공시에 발생하는 칩의 발생과 관련된 모식도는 Fig. 6에 나타내었다.^{6,7)} 선삭가공 모식도에서 알수 있는 것처럼 공구에 의한 절삭 시에는 다음의 3가지 문제가 있다.⁷⁾

- 1) 절삭 칩의 형성과 배출
- 2) 사용된 공구의 수명문제
- 3) 제품의 표면 거칠기와 정도문제

결국 이러한 문제를 개선하여야만 품질과 효율의 개선이 얻어진다.

2.3. 기계가공성 향상을 위한 방안

소결제품의 기계가공성 향상은 재료, 공구, 가공조건 등 많은 요소에 의존한다. 그러나 이러한 요소 중에서 일반적으로는 기계가공성을 향상시키는 첨가제에 주의를 기울임으로써 가공성이 우수한 재료의 개발이 가능하다.

소결재에서의 기계가공성 향상방법을 Fig. 7에 나타내었다. 즉, 기계가공성향상을 위해서는 칩의 전단을 가속화시키는 방법(1)과 절삭공구와 칩 사이의 윤활 특성을 향상시킴으로써 마찰 저항을 낮추는 방법(2), 공구를 보호하는 방법(3), 기지의 취성을 증가시

켜 칩을 잘게 부수는 방법(4), 기공안에 기름이나 수지 등을 함침(Impregnation)을 시켜 단속가공을 줄이는 방법(5) 등이 있다.

또 최근의 방법으로는 온간성형(Warm compacting) 등으로 기지의 성형강도를 증가시켜 보다 가공이 용이한 성형 상태에서 가공을 실시한 후 소결을 실시하거나 밀도가 높은 상태에서 예비소결 처리를 실시하여 어느 정도 강도를 부여한 후 기계가공을 실시하고 다시 소결하는 방법이 개발되어 있다. 그러나 취급 부주의에 의한 크랙 발생의 위험성이 있고 초기 설계 시부터 치수변화 등을 고려해서 개발하지 않으면 곤란하다는 문제가 있다.

2.4. 향상방안의 실례

(1) 기계가공성 향상제의 첨가

철계 소결재료에 있어서 기계가공성의 향상을 위하여 가장 오랫동안 사용되었던 원소는 황이다. 황 또는 황화물의 첨가는 주전단부(Primary shear zone)의 응력을 증가시켜 칩을 잘게 부수는 효과에 의해 기계가공성을 향상시킨다고 알려져 있다. 그러나 단체 황(S)의 경우는 소결 중에 상당량이 분위기 중의 수소 및 탄소와 반응하여 증발, 손실되고 오픈 방식(Open hearth type)으로 되어 있는 소결로의 내화물 내벽은 물론 내열강으로 되어 있는 경우 내열강까지

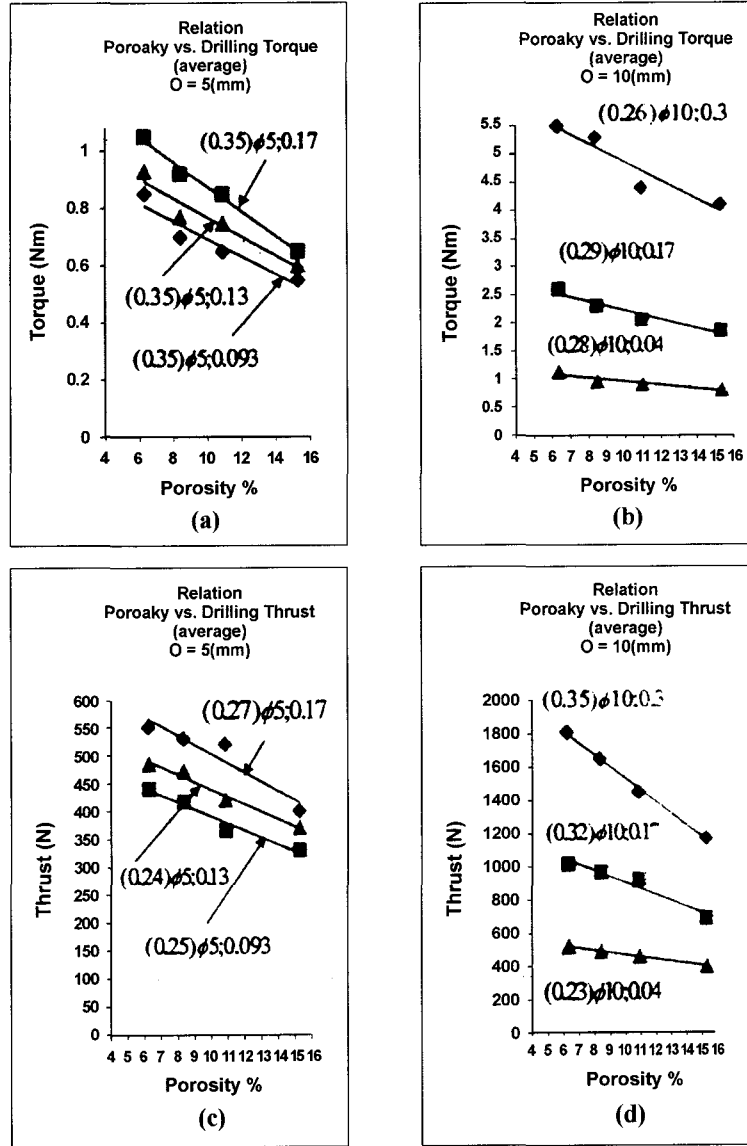


Fig. 5. Relation between porosity and machinability.

거의 모든 재료를 침식시키거나 손상을 주게 되어 사용이 매우 제한적이다. 또한 표면에 탄소의 응집에 따른 외관상의 얼룩이나 검댕이현상(Sooting)을 나타내게 하여 P/M 제조자들을 어렵게 한다.

황과 함께 널리 사용되고 가장 큰 효과를 나타내는 것이 황화망간(MnS)이다. MnS는 거의 모든 소결 재료에 있어서 기계가공특성의 향상을 가져올 뿐만 아니라 다른 기계·물리적 특성도 거의 저하시키지

않는 것으로 다수 보고되고 있다.⁴⁻⁷⁾ 그 정도는 약하지만 단체 황의 경우와 같이 소결 후 표면에 외관적인 문제와 소결 설비에 악영향을 미치고 있다. 또한 소결 분위기와 반응하여 H₂S, CS₂ 등의 가스상의 화합물을 형성할 경우 인체에도 해로운 것으로 알려져 있다.

Pb, Bi, Se, Te 등의 원소가 기계가공성의 향상을 위해 첨가되기도 하나 대부분 유해원소로서 취급에

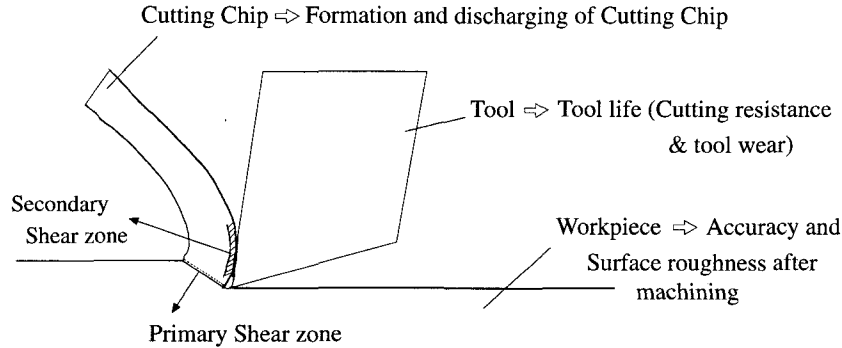


Fig. 6. Schematic diagram of cutting action.

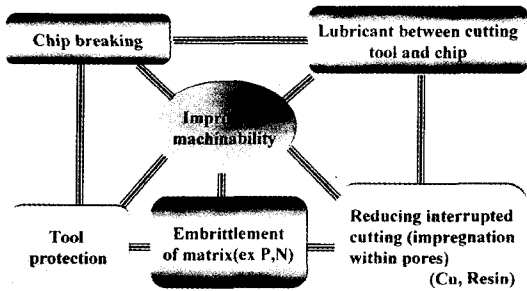


Fig. 7. Methods of improving machinability in sintered materials.

주의가 필요하고 소결 중에 증발되어 인체에 악영향을 주게 되므로 매우 제한된 경우만 사용된다.

CaF₂와 같은 불화물도 사용되나 그 역시 일부 가공에서는 효과가 거의 없으며,⁹⁾ 실제 사용시 소결분위기와 반응하여 HF와 같은 유해한 화합물을 형성하게 되므로 가급적 사용이 자제되고 있다.

칼슘산화물도 칼슘알루미노실리케이트(Calcium aluminosilicate)의 형태로 사용되고 있다. 이 산화물은 이차 전단부(Secondary shear zone)의 강도를 저하시키고 공구와 칩의 마찰을 줄여주는 효과로 공구 마멸도 줄이고 절삭온도의 상승을 줄이는 효과를 가

Table 1. Features and selection of machinability agents

Material	Machinability agents	Effect	Problem
metal	Pb, Bi, Se, Te	Lubrication Chip breaker	Harmful material Vaporization during sintering
Sulfied	MnS, FeS, CuS, MoS ₂	Lubrication Chip breaker	Harmful material, Vaporization Inhibit sinterability (Ex.) $2MnS = 2Mn + S_2(g)$ $2H_2 + S_2 = 2H_2S(g) \uparrow$ $2CO(g) + S_2 = 2COS(g) \uparrow$ $C(s) + S_2(g) = CS_2(g) \uparrow$
Oxide	CaO, SiO ₂ , MgO, Enstatite (MgSiO ₃)	Chip breaker Tool protection	High safety SiO ₂ , MgO : High tool wear CaO : High hygroscopicity (Ex.) $MgSiO_3 = MgO + SiO_2$
Fluorite	CaF ₂	Chip breaker	Resolving durering sintering (Ex.) $CaF_2 = CaO + F_2(g)$ $H_2 + F_2 = 2HF(g) \uparrow$
Others	BN Graphite precipitation or dispersion	Lubrication Tool protection	Resolving durering sintering (Ex.) $BN + H_2O = B_2O_3 + NH_3(g) \uparrow$

⇒ Magnesium metasilicate-base oxide : Enstatite (MgSiO₃)

저온다. 그러나 CaO는 흡습성이 높은 단점을 갖고 있다.

최근의 진보로서 Enstatite(Magnesium metasilicate-base oxide[MgSiO₃])와 같은 산화물이 사용되고 있다. 이것은 공구와 칩의 마찰을 줄여주고 칩을 잘게 부수는 효과가 있어 소결 중에 기계적 물성을 거의 손상시키지 않고 기계가공성을 향상시키는 것으로 알려져 있다.

그 요약을 표 1에 나타내었다.

(2) 함침방법

소결재에 존재하는 기공에 의한 단속가공을 감소시킬 목적으로 기공을 메우는 방법이 시도되고 있다. 이러한 공정의 하나로 기공에 구리를 용침(Infiltration)시켜 기공을 메울 경우 단속가공에 의한 손상을 받지 않고 동시에 Cu 및 일부 CuO의 윤활 작용에 의해 기계가공성이 증가된다. 그러나 구리 용침의 경우 기계적 특성이 향상되고 열전도도가 증가되는 등 여러 가지 우수한 점이 있지만 용침 시에 치수변화가 크고 비경제적이라는 점 때문에 신중한 고려를 하여야 한다.

금속의 용침공정 이외에 수지(Resin)를 함침(Impregnation)시켜 기공을 메우는 방법도 일부 활용되고 있다. 수지를 기공에 함침하는 경우 구리를 용침하는 경우와 마찬가지로 단속 효과가 줄어들고 윤활 효과가 늘어나기 때문에 재료에 따라서는 MnS를 첨가한 경우보다 가공성의 향상효과가 뛰어나다고 알려져 있다.(Fig. 8) 그러나 수지 함침 역시 부가적인 공정이 추가되고 경제적인 부담이 크기 때문에 기공을 메워서 도금(Plating)처리를 해야하는 경우이거나 기밀성을 요하는 경우 이외에 기계가공성의 향상만을 위해서는 그다지 바람직하지 않은 것으로 알려져 있다.

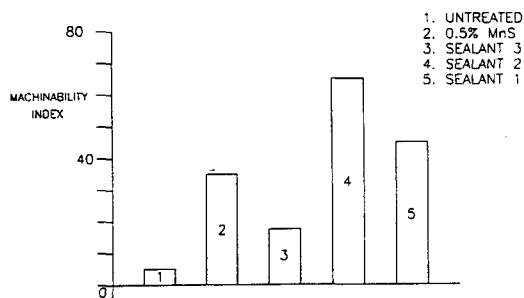


Fig. 8. Machinability Index in impregnation materials.

Table 2. Traditional Impregnation Process

1	Vacuum(or vacuum/pressure) impregnation with a liquid sealant.
2	Drainage/recovery of excess sealant.
3	Washing to clean residue from machined surfaces, tapped holes, etc.
4	Hardening of liquid sealant by polymerisation or reaction to give a solid seal.

Table 3. Important properties of sealant

Polymer		Monomer	
1	Temperature resistance	1	Vapour pressure
2	Chemical resistance	2	Viscosity
3	Shrinkage on polymerisation	3	Surface tension
4	Adhesive strength	4	health and environmental aspects
5	Tensile strength		
6	Hardness		

표 2에 수지 함침 공정순서를 나타내고 있다.¹¹⁾

특별하게 기공속에 납(Pb)을 함침하는 경우도 있다. 납 함침의 경우는 납의 높은 점성 때문에 진공-가압 방식의 전용설비가 필요하고, 기계가공 시 칩에 납이 포함되어 칩의 처리가 단순하지 않다는 점과 처리 비용의 비경제성 때문에 밸브 시이트(Valve seat) 등 특별한 경우 이외에는 잘 사용되지 않는다.

그밖에 기공에 단순히 기름을 함침하거나 아니면 기름에 침적시킨 후에 기계 가공을 하는 경우가 있으며 이 경우 경제적인 투입에 비하여 효과가 뛰어나 실제적으로 분말야금 부품을 가공하는 업체에서 많이 사용되고 있다.

(3) 치밀화 및 공정 변경

앞에서 언급한 방안과는 반대로 인위적으로 기공을 메우는 방법이 아니라 소재 자체의 기공을 줄여 기계가공성을 향상시키고자 하는 노력도 있다. 고강도 제품의 경우 최근에 개발된 온간 성형 공법을 적용함으로써 성형성이 낮은 동일한 원재료를 사용하더라도 종래의 상온 성형에 비해 0.2~0.4 g/cm³ 정도의 밀도를 더 높일 수가 있다. 이와 같이 성형 밀도를 높일 경우 성형상태의 강도가 증가되기 때문에 고온에서 소결하지 않고서도 성형상태 또는 700~950°C 정도의 낮은 온도에서 예비소결 처리만 실시한 후에

도 기계가공을 할 수 있다. 이러한 방법은 재료가 완전한 강성을 갖기 이전에 가공을 실시하기 때문에 기계가공이 용이하다는 이점이 있고 기계가공 후에 재차 본 소결을 통하여 원하는 강도를 얻을 수 있기 때문에 상당히 긍정적인 효과가 기대된다.

그러나 밀도가 상대적으로 낮은 상온 성형의 경우에는 적용하기가 어려운 면이 있다. 그래서 개발된 방법이 일반 성형과 소결을 실시한 후 연화(Softening) 또는 풀림(Annealing)처리에 의해 소재를 연하게 하여 기계 가공을 실시하고 다시 열처리를 하여 강화시키거나 다소 강도가 낮은 상태에서 사용하

는 방법이다.¹¹⁾ 고강도를 요구하는 경우에는 반드시 열처리를 후속적으로 실시하여야 하기 때문에 비경제적이 될 수 있다. 고강도재료의 경우 비교적 경화 원소의 함량이 높아 기계가공성이 매우 열악하고 따라서 기계가공비가 비약적으로 높아지기 때문에 연화열처리비용이 기계가공성이 향상됨으로써 절약되는 비용보다 더 적은 경우에만 제한적으로 적용된다.

2.5. 최근의 개선된 사례

(1) 첨가제의 개선

전술한 바와 같이 최근에는 황화물 외에 Enstatite 와 같은 산화물을 부분적으로 사용하기 시작하고 있으며, 황화물도 더욱 안정적인 형태로 하여 사용하고 자하는 경향이 있다. 황화물이 더 안정적일 경우 기계가공성 향상효과는 동일하지만 소결로의 머플(Muffle), 메쉬벨트(Mesh belt), 열선(Heating element), 내화물 등의 수명이 늘어나는 부수적 효과가 있다.

(2) 표면에 BN의 도포에 의한 확산제어

붕소(Boron)는 소결 과정 중에 철 기지에 확산되어 탄소의 확산을 억제시키고 웨라이트의 생성을 촉진시키는 원소로 알려져 있다.⁷⁾ 이와 같은 원리를 이용하여 최근 자동차 부품인 베어링 캡(Cap Bearing)의 가공성을 획기적으로 개선시킨 사례가 있다. B₂O₅를 이용하여 성형품의 표면에 침투시켜 소

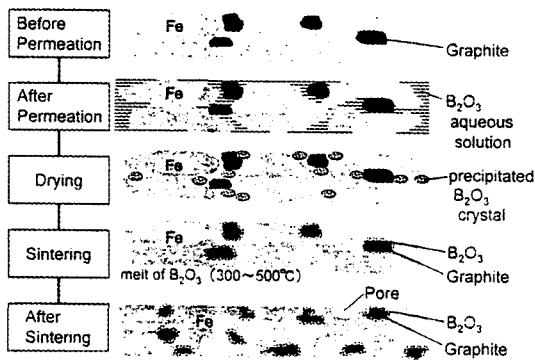


Fig. 9. Mechanism of inhibiting diffusion of added graphite using B₂O₃.

	Conventional	MnS added	Developed (with B ₂ O ₃ permeated)
Density (g/cm ³)	6.73	6.72	6.72
Hardness HRB	67(63~72)	67(62~71)	28(22~35)
Micro-structure			

Fig. 10. Material characteristics and microstructure.

결중에 탄소의 확산을 표면부만 제어함으로써 표면의 경도를 대폭적으로 낮추고 표면부의 기계가공성을 개선시킨 사례이다.(Fig. 9,10)

3. 결 론

현재 국내 분말야금 공업도 비약적인 발전을 거듭하여 적용 품목에 있어서는 거의 선진국의 수준에 근접하고 있다. 또한 국내의 가공공구산업도 국내의 초경산업의 탄탄한 연구 인프라를 배경으로 하여 많은 진보를 하고 있다. 그러나 아직도 분말야금 제품의 가공에 대해서는 전문적으로 연구하는 예가 전무하다시피 한 것이 국내의 현실이다. 다만 국내의 산업체에서 개별 품목별로 소규모적인 조사와 실험이 이루어지고 있으며 그나마 발표되는 경우는 거의 없었다. 본고가 그런 관점에서 국내에서도 체계적으로 관련 연구나 조사가 이루어지는 불씨가 되었으면 한다.

참 고 문 헌

1. Höanä Handbook for machining guidelines, Höanä, Sweden, (1998) 5
2. H.E. Boyer, Metals handbook, 7, 9th ed., ASM, (1984) 451
3. B. Kubicki, Cutting forces investigation by tapping and drilling of the P/M materials, JSPM, Proceedings of PM Kyoto, (2000) 1544
4. U. Enströ, Machinability of Sintered steel, Höanä PM81-5, 1981
5. R. Johansson, Different methods to improve machinability of high strength sintered steel, MPIF, Princeton, NJ, Morden developments in P/M 21, (1988) 381
6. 김낙수 외, 공업재료가공학, 2판, 반도출판사, 서울, (1991) 414
7. K. Ishii, Development of high machinability sintered material for p/m machine parts, JPMA session 1 in PM Kyoto, JPMA, (2000) 1
8. 전기서 6, 450
9. S. Ashok, Effects of machining aids on the machinability of steam treated P/M parts, JSPM, Proceedings of PM2000, (2000) 1548
10. S.F. Claeys, Enhanced machinability and oxidation resistance of p/m steel using modified MnS additions, The int. journal of P/M, 34 (1998) 29
11. F.B. Fletcher, Annealing P/M forgings for machinability, MPIF, Princeton, NJ, Morden developments in P/M 10 (1977) 453
12. N.H. Hewett, Advanced in chemicals and processes for the impregnation of P/M parts, Advanced in P/M, MPIF, Princeton, NJ, 1, (1990) 497
13. K.S. Chopra, Manganese sulfide in machining grade ferrous P/M alloys, MPIF, Princeton, NJ, Morden developments in P/M 21, (1988) 361
14. A. Benner, Machinability of warm compacted P/M steels in case of green tapping, JSPM, Proceedings of PM2000, (2000) 1556
15. 일본분말야금공업회, 燒結機械部品, 技術書院, (1987) 62