

## 플라즈마 용융법으로 제조된 Fe계 자성분말의 자기연마 특성

이영란 · 배승열 · 안인섭 · 이용철\*  
경상대학교 재료공학부, 생산기술연구소  
\*연암공업대학 정밀기계과

### Characteristics of Magnetic Polishing with Magnetic Abrasive Powder Fabricated by Plasma Melting Method

Young Ran Lee, Sung Yeal Bae, In Shup Ahn and Yong Chol Lee\*  
Division of Materials Science and Engineering & RIIT  
Gyeongsang National University, Chinju, Kyeongnam 660-701, Korea  
\*Department of Mechanical Design, Yonam College of Engineering  
(Received November 21, 2000)

**Abstract** Most of mold manufacturing procedures have been automated by the introduction of NC machine tool and CAD/CAM system. But the three-dimensional surface curvature of the mold must be done by hand work of well-skilled workers. Magnetic abrasive polishing powders were investigated for surface polishing for 3D curvature. This study aims to investigate homogeneously distributed hard phase in Fe matrix and strong bonding between Fe-matrix and hard phase. The NbC powder, B<sub>4</sub>C powder and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder were mixed in Fe-matrix respectively. Mixed Fe-hard phase powders were compacted by press and then these were melted by plasma melting. According to SEM, XRD and OM observation, Fe-NbC magnetic abrasive powder had the most homogeneous distribution and strong bonding. As a result of magnetic polishing, the surface roughness before magnetic polishing, 1 μm R<sub>max</sub>, was reduced to 0.2 μm R<sub>max</sub> over the entire inner surface of the tube.

### 1. 서 론

기기가공에 의해 생산되는 제품의 형상은 고속화에 의한 공정변화로 인하여 복잡한 형상을 갖는 자유곡면이 많으며 컴퓨터를 이용한 정밀 가공기기의 개발로 인하여 이러한 점을 해소할 수가 있다. 그러나 기기의 최종공정인 연마가공공정은 대부분이 숙련공의 수작업이나 연마용 로봇에 의존하고 있으므로 작업의 효율성, 제품의 정밀도 및 경제적 효율성이 떨어지는 단점이 있다. 이런 단점을 해결하기 위한 방법으로 자성지립을 이용한 기기가 연구되었다. 자기연마법은 구소련에서 착안되고 동구권을 중심으로 발전해 1980년대에 일본에 도입되었으며 국내에는 1990년대 초에 일부 도입되어 연구되고있다.<sup>1)</sup>

자기연마법의 원리는 연마공구와 가공물 사이에 수

mm의 간극을 주고 이 간극에 자성지립을 채우고 연마공구에 전류를 흘려주면 연마공구가 자성을 띠게 되며, 자성을 띠는 연마공구에 자성지립이 집중하게 되고 이런 상태에서 연마공구를 회전시키면 자성지립이 같이 회전하여 가공물의 표면을 연마하는 것으로 작업의 모식도를 그림 1에 나타내었다.<sup>2)</sup> 이러한 자기연마법은 고순도 가스를 공급하는 L자형 관이나 가느다란 관과 같이 기존의 연마방법으로는 연마하기 힘든 곳에 적용될 수 있다.<sup>3)</sup>

자기연마법에 사용되는 자성지립은 자성을 띠는 동시에 연마특성을 가져야한다. 연마재료는 주로 경도가 높은 탄화물 및 산화물이 사용되는데 이러한 연마재는 자성을 띠지 않으므로 자성을 띠는 친이금속 분말과 혼합하여 사용하여야 한다.<sup>4)</sup> 그러므로 연마재와 자성체 기지와의 계면 결합력과 기지 내에서의 연마재

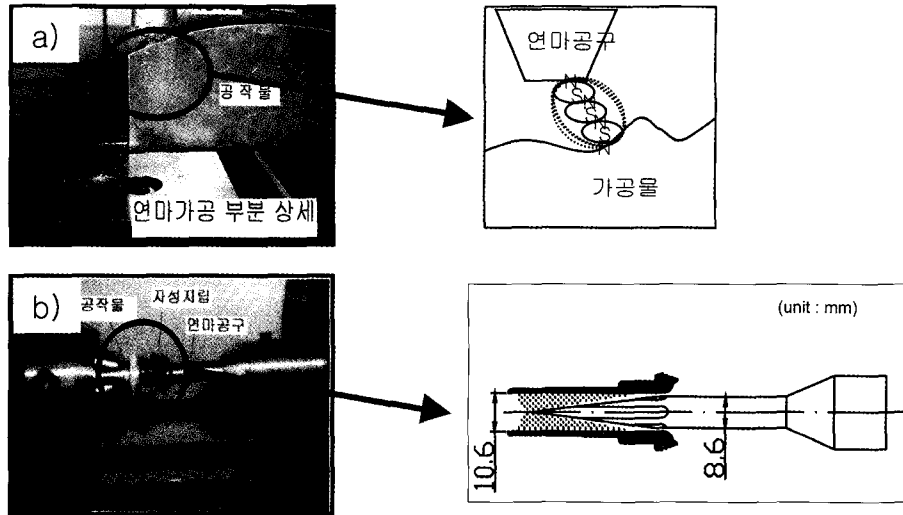


Fig. 1. Photographs of polishing test machines: (a) surface polishing machine, (b) internal polishing machine.

의 균일한 분포가 매우 중요하다. 연마재로는 NbC (Niobium Carbide), B<sub>4</sub>C(Boron Carbide), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 사용하였다. 기존의 연구결과에 따르면 Fe 기지에 연마재가 약 65 vol.%일 경우 가장 우수한 연마특성을 가진다고 알려져 있으나 기지와 연마재간의 결합이 약하다는 단점이 있다.<sup>5)</sup>

본 연구에서는 Fe 기지에 연마재를 60 vol.%를 첨가하여 플라즈마 용융법으로 제조된 분말의 특성과 분포를 관찰하였다. 기지와 연마재간의 강한 결합과 균일한 혼합에 의해 자성지립의 연마효율과 수명을 극대화 하고자 하였다.

## 2. 실험방법

자성지립 제조에서 기지재료는 Fe(CERAC Co., -325 mesh, purity 99.95%)분말과 연마재로는 NbC (CERAC Co., -325 mesh, purity 99.8%), B<sub>4</sub>C(CERAC Co., 5 μm purity 99.999%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(HANBO Co., 0.3 μm)분말을 사용하였다.<sup>4)</sup>

분말의 조성은 Fe 기지에 연마재를 60 vol.%로 칭량하여 사용하였다. 기지와 연마재간의 균일한 혼합을 위하여 볼밀링으로 단순 혼합하였다. 분말 혼합은 대기 중에서 150 rpm으로 30분간 행하였다. 단순 혼합된 분말은 양단 프레스를 이용하여 70kg/cm<sup>2</sup>의 성형압으로 성형체를 제조하였으며 제조된 성형체는 플

Table 1. Conditions of magnetic polishing for SUS316L(wt.%) sample

Work piece	inner dia. 10.6 mm
Tool diameter	8.6 mm
Polishing gap	1.0 mm
Tool revolution	2000 rpm
Polishing feedrate	30 mm/min
Magnetic abrasive	dia. 80-125 μm
Magnetic flux density	0.5T
Lubricant & slurry	Pure water + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Polishing time	2, 4, 6, 10, 15, 20 min

라즈마 용해로를 이용하여 아르곤 분위기하에서 Fe 기지를 용융시켜 복합체를 제조하였다. 제조된 Fe-연마재 복합체는 대기 중에서 냉각하였으며 자성지립으로 제조하기 위하여 Fe-연마재 복합체를 직접 파쇄법으로 파쇄하였다. 단계적인 연마를 위해 sieve를 이용하여 # 18~ # 140로 단계별로 분급하였다.

제조된 자성지립은 원통형 내면 연마기를 이용하여 표 1의 조건으로 습식 연마시험을 하였다. 가공물과 연마공구사이에 일정량의 자성지립을 충전시킨 후 연마공구와 가공물을 반대방향으로 회전시키면서 연마시간에 따른 가공물의 표면 거칠기와 경면을 관찰하였다. 자성지립을 수거하여 연마 전후의 자성지립의 형태나 크기의 변화를 관찰하였다.

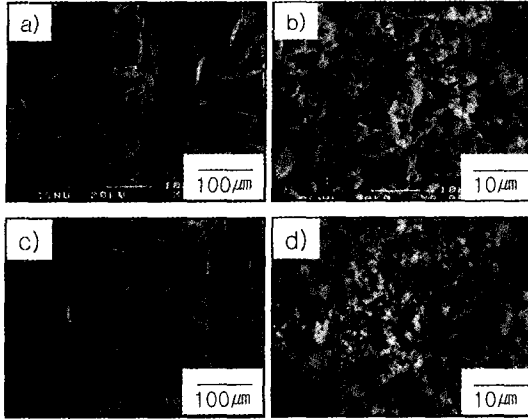


Fig. 2. SEM morphologies of raw powders: (a) Fe, (b) NbC, (c) B<sub>4</sub>C, (d) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

### 3. 결 과

#### 3.1 시초분말

자성지립의 제조에 사용되어진 시초분말을 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope: SEM)으로 관찰한 결과를 그림 2에 나타내었다. Fe와 B<sub>4</sub>C의 경우 평균 크기는 약 100 μm로 Fe는 판상형을 띄며, B<sub>4</sub>C는 각진 형태임을 확인할 수 있다. NbC의 경우 평균크기는 약 10 μm이하로 불규칙한 각진 형태를 나타내며, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 경우 미세한 입자가 서로 응집하고 있음을 관찰할 수 있다.

#### 3.2 자성지립의 조직

그림 3은 플라즈마 용융법으로 제조된 Fe-연마재 복합체를 직접 파쇄후 얻은 자성지립의 단면을 주사전자현미경으로 관찰한 결과이다. Fe-NbC 자성지립의 경우 Fe 기지에 구형의 NbC 입자가 균일하게 분포하고 있는 것을 확인할 수 있다. Fe-B<sub>4</sub>C는 Fe 기지에 B<sub>4</sub>C가 불규칙하게 분포하고 있는 것을 관찰하였다. 이는 플라즈마 용융시 주입되는 아르곤 가스의 압력으로 인하여 기지와 연마재 간의 계면 결합력이 매우 약해서 B<sub>4</sub>C의 대부분이 이탈되어 기지에 연마재가 불규칙하게 분포하는 것으로 사려된다. Fe-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 경우 역시 편석이 발생하였고 Fe와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 간의 계면결합력이 약해서 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 덩어리가 pull-out 되어 조대한 기공을 형성하고 있는 것을 확인하였다. 연마재가 B<sub>4</sub>C 및 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>인 경우 Fe 기지내에 분포

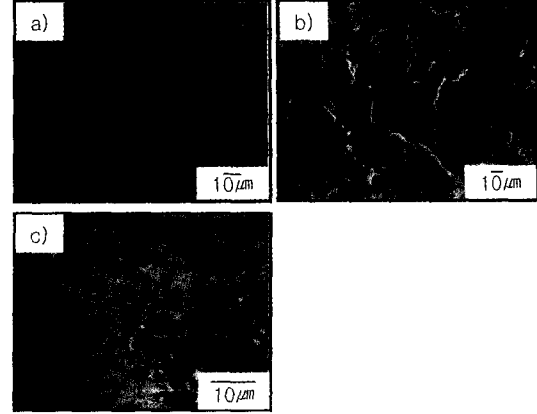


Fig. 3. SEM morphologies of magnetic abrasive powders: (a)Fe-NbC, (b)Fe-B<sub>4</sub>C, (c)Fe-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

하는 연마재의 양상이 매우 불규칙하게 나타나는 것은 Fe와 연마재 사이의 밀도차 때문인 것으로 사려된다. 즉, Fe와 NbC는 비중이 비슷하여<sup>4)</sup> 균일하게 NbC 입자가 분포되어 있으나 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>나 B<sub>4</sub>C의 경우는 비중차가 커서 편석이 크게 발생하였다. 따라서 비교적 균일하게 혼합된 Fe-NbC 자성지립을 이용하여 분석하였다.

플라즈마 용융법으로 제조된 Fe-NbC 자성지립을 XRD 분석과 광학현미경을 관찰한 결과를 그림 4에 나타내었다. XRD 관찰결과 제2상의 생성없이 Fe와 NbC상만이 관찰되었다. 따라서 Fe와 NbC가 단순히 혼합되어 있는 것으로 사려된다. 광학현미경으로 관찰한 결과 초기 약 10 μm 이하의 작은 NbC입자가 용융후 약 20 μm로 조대화, 구형화된 것을 관찰할 수 있다.

#### 3.3 연마특성 분석

자성지립을 이용한 연마시험은 앞에서 언급한 표 1의 조건에 의해서 행하였다. 가공유를 사용하여 연마 시험을 하는 경우 가공유가 연마 입자 사이에 충전되어 자기 입자가 공작물 내면에서 분산되는 것을 막아 입자의 응집성을 증대시켜 일정속도까지는 가공 효율과 가공면의 조도가 향상된다. Tube형태의 가공물에 자성지립을 주입하면 자장에 의해 자성지립이 가공물의 내면 연마팁 하부에 밀집하여 연마력을 형성한다.<sup>6)</sup> 가공물이 고속으로 회전하면 tube와 자성지립 사이에서 상대적인 운동에 의해 가공물의 표면을

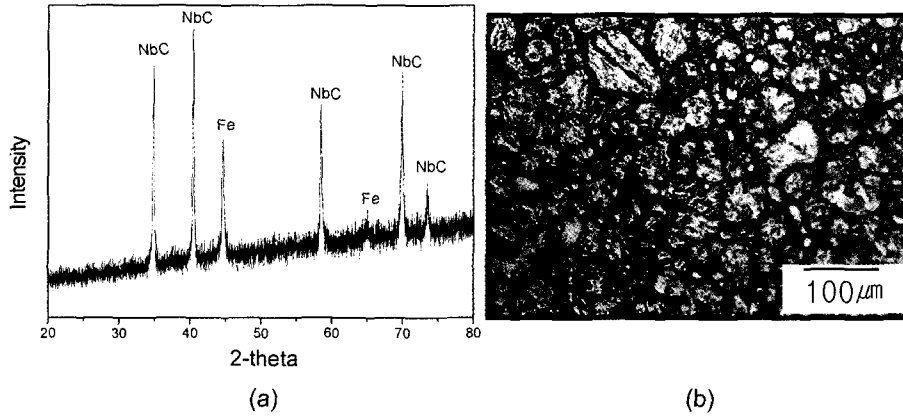


Fig. 4. XRD pattern (a) and microstructure (b) of Fe-NbC magnetic abrasive powder.

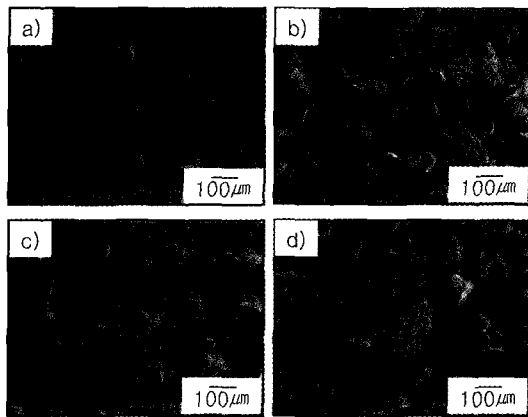


Fig. 5. SEM morphologies of Fe-NbC magnetic abrasive powders for various polishing time: (a) 0 min, (b) 10 min, (c) 15 min, (d) 20 min.

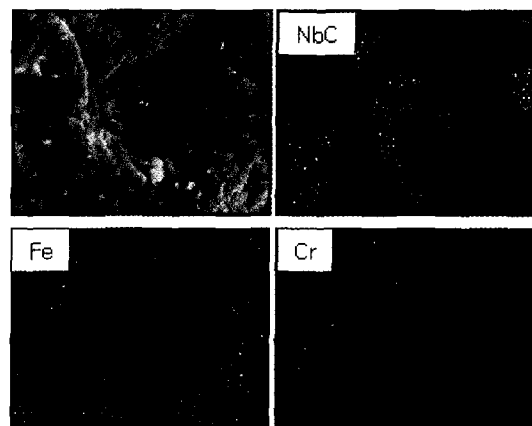


Fig. 6. EDS mapping of Fe-NbC magnetic abrasive powder after 20 min polishing.

매끄럽게 만든다.<sup>1)</sup> 본 연구에서는 연마공구의 직경은 8.6 mm이고 가공물의 내경이 10.6 mm인 원통형 내면연마기를 이용하였다.

내면연마기와 가공물 사이의 간극은 연마효율을 높이기 위해서는 가공간극이 작을수록 좋으나 가공간극 사이에 일정량 이상의 자성지립이 충전되어야 하므로 제약이 따른다. 또 연마공구의 회전수가 높을수록 연마효율이 높게 나타나지만, 너무 높으면 오히려 표면 거칠기가 증가하여 연마효율이 떨어진다.<sup>1)</sup> 따라서 본 연구에서 가공간극은 1.0 mm이고, 연마공구의 회전속도는 2000 rpm으로 행하였다. Polishing test에 사용된 자성지립의 직경은 80~125 μm이었으며, 연마시간은 2분에서 최대 20분까지 행하였다.

그림 5(a)의 사진은 연마하기 전의 자성지립의 형상을 보여주는 것으로 자성지립의 크기는 약 120 μm이며, 불규칙한 형태를 띠고 있음을 알 수 있다. b), c), d)는 각각 10분, 15분, 20분 자성연마후의 자성지립의 형상을 보여주는 것으로 연마시간 10분, 15분, 20분 후에도 자성지립의 크기와 형태에 크게 변화가 없는 것을 확인할 수 있다. 그러나 연마시간이 증가할수록 자성지립의 표면형상이 거칠어지는 것을 확인하였다. 이는 연마시 자성지립이 가공물을 연마시키면서 기지가 떨어져 나가거나 떨어져 나온 가공물이 지립의 표면에 부착한 것으로 사려된다.

그림 6은 자성지립의 수명을 관찰하기 위하여 최대 20분까지 자기연마된 자성지립을 EDS Mapping

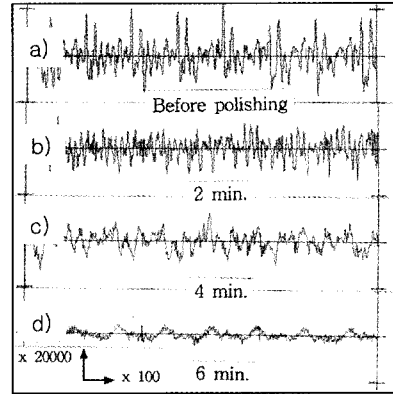
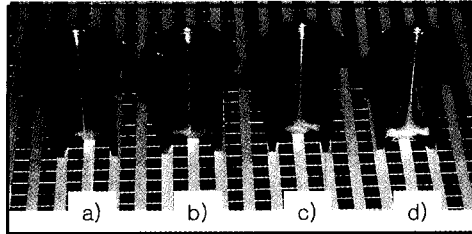


Fig. 7. Photograph and surface roughness after various polishing time: (a) 0 min, (b) 2 min, (c) 4 min, (d) 6 min.

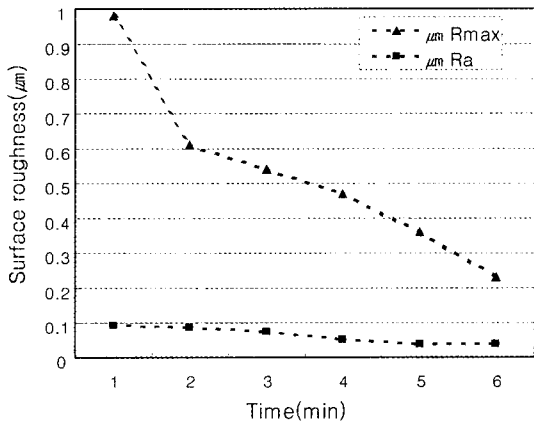


Fig. 8. Polishing time-surface roughness curve of Fe-NbC magnetic abrasive powder.

으로 분석한 결과이다. 20분의 연마 후에도 Fe기지에 NbC 입자가 균일하게 분포되어 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 자성지립의 표면에 다수의 Cr이 관찰되었는데 이는 SUS 316L가공물을 연마시 가공물에서 떨어져 나온 미세chip이 자성지립의 표면에 부착되어 이로 인해 자성지립의 표면형상이 거칠게 변하는 것으로 사려된다.

Fe-NbC 자성지립을 이용하여 자기연마 후 가공물의 표면 거칠기를 분석한 결과를 그림 7에 나타내었다. Tube 형태의 가공물은 내면을 연마후 절단하여 경면의 무늬를 관찰하였다. 자기연마전에 매우 거칠던 표면이 연마 4분 후부터 경면의 무늬가 나타나기 시작했으며, 연마 6분 후에는 경면의 무늬가 매우 선명한 것을 관찰하였다. 또한 표면의 거칠기를 관찰한

결과 연마전에는 매우 불규칙한 표면 거칠기를 보이던 것이 연마 시간이 증가할 수록 표면조도가 규칙적으로 되는 것을 확인할 수 있다.

그림 8은 시간에 따른 표면거칠기를 그래프로 나타낸 결과이다. 그래프에서 R<sub>max</sub> 값은 최대 표면 거칠기이며 Ra 값은 평균 표면 거칠기이다. 연마 전에 1 μm에 가깝던 최대 표면 거칠기가 연마 시작후 2분까지 급격히 감소하는 것을 알 수있다. 즉, 2분 정도의 연마로 전체 최대 표면조도의 50%를 증가시킬 수 있었다. 연마 초기에는 가공물의 조대한 요철을 제거하여 표면 조도를 향상시키고 연마시간이 증가하면서 낮은 요철을 제거, 평균화시킴으로써 경면의 표면으로 만들어 가는 것을 확인할 수 있다. 연마 6분 후에는 최대 표면 거칠기가 0.2 μm임을 관찰하였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서 Fe 기지에 다양한 연마재를 분포시켜 자성지립을 제조하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 플라즈마 용융법으로 제조된 Fe-B<sub>4</sub>C, Fe-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 경우 비중 차이로 인하여 자성지립의 제조가 곤란하였다.
2. NbC 연마재를 이용하여 자성지립을 제조하였을 경우 기지와 연마재간의 균일한 분포와 강한 결합을 형성하였다.
3. Fe-NbC 자성지립은 20분간의 연마 후에도 초기 지립의 크기에는 크게 변화가 없었으나 가공물에서 떨어져 나온 원소 물질이 자성지립의 표면에 부착되어 자성지립의 표면형상에는 변화를 가져왔다.

4. Fe-NbC 자성지립의 경우 2분간의 연마로 큰 요철들의 급격한 감소가 일어났으며, 연마 6분 후부터 경면에 가까워졌으며 최대 거칠기는 0.2  $\mu\text{m}$ 이었다.

### 참고문헌

1. Hitomi Yamaguchi, Takeo Shinmura: *Wear* **225-229** (1999) 246
2. Hitomi Yamaguchi, Takeo Shinmura: *Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology* **24** (2000) 237
3. 鈴木清: *The Monthly Magazine for Ceramics* **8** (1995), 142
4. T. Shinmura, H. Yamaguchi: *JSME Int. J., [C]* **38**(4) (1995) 798
5. Koichi Masati, Masahiro Anzai and Takeo Nakagawa: *JSPE*, **56** (5) (1990) 935
6. H. Yamaguchi, T. Shinmura, K. Kuga, *Trans. Jpn.Soc. Mech. Eng.* **62** (600) (1996) 3313