

# 공구형상 최적화 및 비자성체의 자기연마 특성 연구

김상오<sup>+</sup>, 유만희<sup>+</sup>, 곽재섭<sup>\*</sup>

(논문접수일 2009. 06. 24, 심사완료일 2010. 05. 12)

## Tool Geometry Optimization and Magnetic Abrasive Polishing for Non-ferrous Material

Sang-Oh Kim<sup>+</sup>, Man-Hee You<sup>+</sup>, Jae-Seob Kwak<sup>\*</sup>

### Abstract

The magnetic abrasive polishing (MAP) process is used to achieve the nano-meter grade polishing results on flat or complicated surface. In previous study, polishing the stainless steel plate which is a non-magneto-material was tried. To polish non-magneto-materials using the MAP process was very difficult because the process was fundamentally possible by the help of a magnetic force. Therefore, it had lower efficiency than magneto-materials such as SM45C. In this study, optimization for tool geometry of the MAP was performed to improve the magnetic force between tool and workpiece. Moreover, a permanent magnet was installed below the non-magneto-material to improve the magnetic force. And then the design of experiments was carried out to evaluate the effect of the MAP parameters on the polishing results.

**Key Words** : Magnetic abrasive polishing(자기연마), Design of experimental method(실험계획법), Magnetic density flux(자속밀도), Magnetic force(자기력)

## 1. 서론

자기연마법은 기존의 연마방법과 다르게 매우 유연성을 지닌 공구를 사용하여 연마하는 방식이다. 이때 사용되는 공구는 자성 입자와 비자성의 연마입자를 용융결합 또는 단순

혼합하여 사용된다.<sup>(1)</sup> 자기연마입자는 전자기장의 영향으로 인해 공작물과 공구사이에 브러쉬 형태로 배열되고, 공구의 회전력에 의해 연마공정을 수행한다.<sup>(2)</sup> 가공은 공구의 회전력과 코일에 인가되는 전류에 의해 생성되는 자기력에 의해 진행되기 때문에 자기력의 세기는 자기연마의 성능과 매우 밀접한 관계를 가진다. 선행 연구를 통하여 전류의 공급

\* 교신저자, 부경대학교 기계공학과 (jskwak5@pknu.ac.kr)

주소: 608-739부산 남구 용당동 산 100번지

+ 부경대학교 대학원

량이 클수록 표면거칠기 및 MRR(Metal Removal Rate)이 개선된다는 것을 확인 할 수 있었다.<sup>(3)</sup> 그러나 스테인레스와 같은 비자성체의 자기연마공정에서는 자성체보다 자기연마공정의 효율이 현저히 감소함을 발견 할 수 있었다. 따라서 이번 연구에서는 자기연마 장치의 공구와 공작물 사이에 발생하는 자속밀도를 최적화하기 공구와 자속밀도 사이의 관계를 실험계획법을 통해 유한요소해석을 수행하고, 이 결과를 바탕으로 설계된 공구와 영구자석을 활용하여 자기력 세기를 극대화 시켰다. 이러한 환경에서 비자성 재료인 스테인레스(SUS316재료)에 대한 자기연마 특성을 평가하였다.

## 2. 자기연마의 이론적 배경

### 2.1 자기연마

자기연마법의 가공 기구를 개략적으로 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1과 같이 철심에 코일을 감고 그 코일에 전류를 부가하면 패러데이의 법칙(Faraday's law)에 의해 자기력이 발생하는 연마공구가 된다. 공구의 끝단과 공작물 사이에 간극을 주고 그 공간에 자성체와 연마입자를 용융하여 분쇄한 일체형 입자나 자성입자와 연마입자를 일정 비율로 혼합한 혼합형 입자를 슬러리 형태로 공급한다. 전자석에 전류가 부가된 연마공구는 자성입자를 구속하게 된다. 연마공구와 공작물사이의 자성입자는 사슬구조(Chain-like structure)로 정렬되며 자성입자의 정렬로 인하여 연마 입자는 자성입자들 사이에 위치한다. 이처럼 사슬구조로 형성된 입자들은 유연성을 가지는 브러쉬 역할을 수행한다.<sup>(4)</sup>

### 2.2 자기연마의 절삭력과 에너지

자속밀도는 자기장 안의 어떤 점에서 자기장에 수직인 단위면적당의 자기력선의 수를 나타낸다. 즉, 전류의 세기가

증가할수록 자속밀도는 증가하기 때문에 식 (1)의 관계가 성립한다.

$$B = \mu H \tag{1}$$

여기에서  $B$ 는 자속밀도(Tesla),  $\mu$ 는 투자율(H/m),  $H$ 는 자장의 세기(A/m)를 나타낸다. 또한 자속밀도는 자장의 세기에 따라 이력곡선(Hysteresis loop)을 따른다. 이러한 자력에 의한 힘의 특성과 공구의 회전력에 의한 접선방향의 힘의 특성이 동시에 작용하여 실제적인 연마가공을 수행한다. 따라서 자기연마에서는 공구의 회전속도와 공구에 인가되는 전류의 세기에 따라 그 성능에 영향을 미치게 된다.

Fig. 2에 도시한 것과 같이 자기연마입자에 의해서 공작물에 작용하는 법선 방향의 전체 힘  $f_n$  과 공구의 회전에 의해 발생하는 접선 방향의 전체 힘  $f_t$  의 합력  $f$  를 받게 된다. 이때의 힘  $f$  에 의해 연마 가공이 이루어진다.

가공 중 실제 공작물의 표면을 연마하는 요소는 연마입자이다. 이러한 연마 입자 1개는 법선방향의 힘  $P_n$ 과 접선방향의 힘  $P_h$ 를 받는다. 따라서 연마 입자군이 공작물에 미치는 힘은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$f_n = mP_n, f_h = mP_h \tag{2}$$

여기서  $m$ 은 가공 중 공작물에 접촉하는 총 연마입자의 개수를 나타낸다.

또한 여기에서 자성연마 입자군과 공작물 사이에 발생하는 전체 법선 방향의 힘  $f_n$ 은

$$f_n = \frac{B^2}{2\mu_0} \left(1 - \frac{1}{\mu_{fm}}\right) S \tag{3}$$

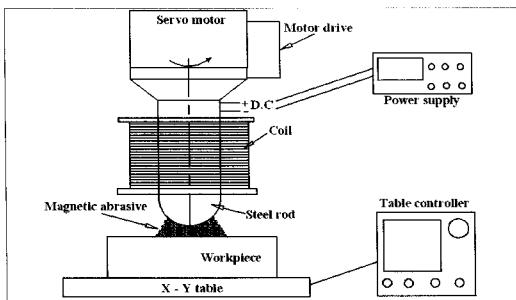


Fig. 1 Configuration of magnetic abrasive polishing

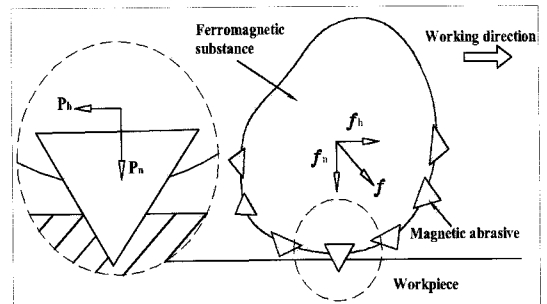


Fig. 2 Cutting force in magnetic abrasive polishing

로 나타낼 수 있다. 여기서  $S$ 는 자성연마 입자와 공작물이 접촉하는 전체 면적을 나타낸다.<sup>(5)</sup>

그리고 자성연마 입자군과 공작물 사이에 발생하는 전체 접선방향의 힘  $f_h$ 는

$$f_h = \frac{dW}{dx} \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서  $x$ 는 자력이 발생하는 공구의 중심에서 원주 방향의 거리를 나타낸다.

### 2.3 비자성체의 자기연마

연마입자에 작용하는 자력선방향 성분 자력(법선방향)을  $f_n$ , 등자위선방향 성분 자력(접선방향)을  $f_h$ 라 했을 때 합력은  $f$ 로 얻을 수 있으며 자력  $f_n, f_h$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_n = V\chi H \left( \frac{\partial H}{\partial n} \right) \quad (5)$$

$$f_h = V\chi H \left( \frac{\partial H}{\partial h} \right) \quad (6)$$

이 식에서,  $V$ : 연마입자의 체적,  $\chi$ : 연마입자의 자화율,  $n, h$ : 자력선방향 및 등자위선방향의 좌표,  $H$ : 자장강도,  $\left( \frac{\partial H}{\partial n} \right), \left( \frac{\partial H}{\partial h} \right)$ : 자력선 및 등자위선 방향의 자장강도의 변화

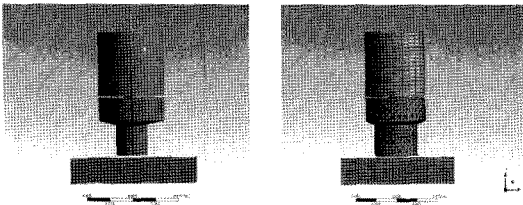


Fig. 3 Modeling and mesh condition (normal condition)

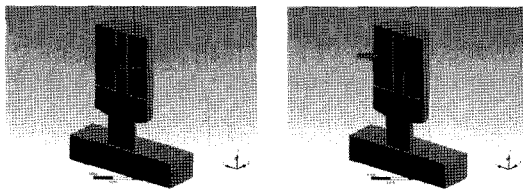


Fig. 4 Analysis boundary conditions

율을 나타낸다.

그리고 이 성분들의 합력은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$f = \sqrt{(f_n^2 + f_h^2)} \quad (7)$$

자성체와 마찬가지로 비자성체에도 식 (1)과 같은 등식이 성립한다. 하지만 비자성 재료는 투자율이 거의 0에 가깝기 때문에 인위적으로 자기력을 발생시키기 위해서는 자력을 발생시킬 수 있는 장치를 해줘야 한다. 본 논문에서는 비자성재료에서 자기연마 시 자기력 향상을 위해 인위적으로 자석을 설치하여 가공을 실시하였다.

## 3. 자기연마 공구의 최적설계

### 3.1 공구의 유한 요소해석 모델링

본 연구에서는 UG NX3를 이용하여 자기연마 장치의 인덕터를 모델링하고 ANSYS Workbench 10.0에서 제공하는 EMAG Solution<sup>(6)</sup>을 이용하여 자기연마 공구부분에 대한 시뮬레이션 작업을 진행하였다. 자기연마 공정에 적용되고 있는 인덕터는 공급되는 전류의 세기 및 코일 권선 횟수에 따라 자기력이 증감한다. 이에 따라 Fig. 3과 같이 인덕터의 헤드, 코일, 공작물을 현재 적용 중인 자기연마 시스템의 공구크기를 기준으로 모델링하고 Mesh 작업을 수행하였다. 그리고 Fig. 4와 같이 2A의 전류를 코일에 인가하였다. 공작물과 공구 사이의 거리는 1.5mm로 고정하였다. Table 1은 시뮬레이션 작업에 적용된 해석 조건 등을 나타내고 있다.

### 3.2 공구 형상 최적화

비자성 재료에서 공구와 공작물 사이에 발생하는 자속밀도 및 힘의 크기를 최대로 발생 시킬 수 있는 형상조건을 찾기 위하여 우선적으로 비자성재료에 대한 유한요소 해석을 수행하여 Fig. 5와 6과 같이 비자성체의 표면에 발생하는

Table 1 Analysis conditions

Items	Conditions
Node	99981
Element	61805
Mesh size	0.003mm
Current	2A
Mesh type	Tetra + Hex mesh

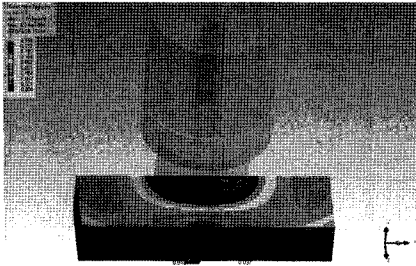


Fig. 5 Maximum magnetic flux density



Fig. 6 Maximum force and torque

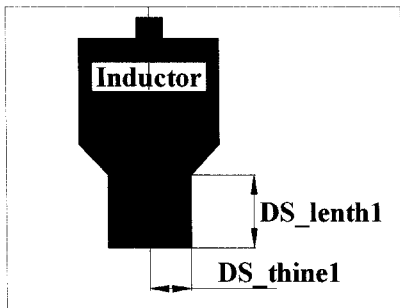


Fig. 7 Geometry parameter of MAP tool

최대 자속밀도 및 자기력에 의한 힘으로 나타내었으며, 공구의 중심에서 중간지점에 발생하며 최대 125mT가 발생하고 있음을 보여준다. 그리고 최대 힘은 0.0007N이 작용한다. 그러나 이와 같은 결과는 현재 공구의 직경을 24mm로 적용하였을 때의 값이다. 공구의 직경 및 길이에 따라 자속밀도 및 힘의 크기가 변화하게 된다. 따라서 Design Xplorer의 반응표면모델기법을 활용하여 공구의 직경 및 길이를 최적화 하고 이를 비자성체의 자기연마에 활용하였다. Fig. 7과 Table 2는 각각 적용된 공구의 직경 및 길이의 도식 그림과 실험계획법에 적용된 초기값, 최대값, 최소값을 나타낸다. 실험결과는 Table 3에 나타난 것과 같다. Fig. 8의 반응표

Table 2 Parameter range of MAP tool

Name	Initial value	Upper bound	Lower bound
DS_thine1	12.004	14.404	9.6029
DS_lenth1	23.414	28.097	18.731

Table 3 Analysis results for DOE

No.	Factor		Result	
	DS_thine1	DS_lenth1	Maximum flux density	Maximum force/torque
1	12.004	23.414	0.023373	0.0021643
2	9.6029	23.414	0.027743	0.0034478
3	14.404	23.414	0.019798	0.0013728
4	12.004	18.731	0.023009	0.0020973
5	12.004	28.097	0.023662	0.0022072
6	9.6029	18.731	0.027248	0.0033073
7	14.404	18.731	0.019519	0.0013327
8	9.6029	28.097	0.028211	0.0035402
9	14.404	28.097	0.019957	0.0013998

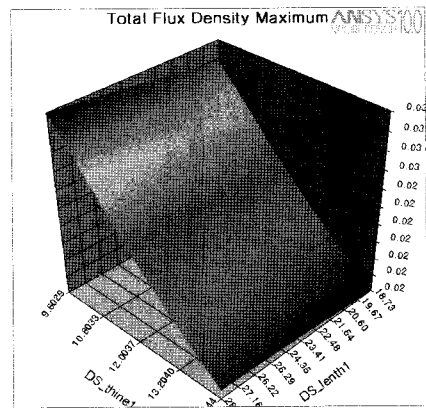


Fig. 8 Response surface model for analysis results

면모델을 통해 x, y축의 내용에 따라 공구의 표면적이 좁고, 공구 길이가 증가 할수록 최대 자속밀도(z축)가 증가하고 있음을 알 수 있었다. 또한, 공작물 표면에 발생하는 최대 자속 밀도에 가장 영향을 많이 미치는 요소는 공구의 표면적이라는 것을 Fig. 9를 통해 알 수 있다. 따라서 자기연마 공정 중에 공구와 공작물 사이에 발생하는 자기력 세기를 증가시키기 위해서는 공구의 직경을 줄이고, 길이를 늘려야 한다.

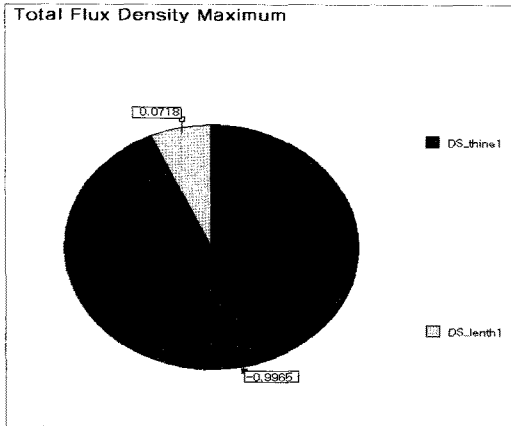


Fig. 9 Sensitivity for each parameter

Table 4 Goal for geometry optimization

Parameter	Desired Value	Importance
DS_thine1	Near upper bound(14.404)	Higher
DS_lenth1	Near lower bound(18.731)	Higher
Total Flux Density Maximum	Maximum possible	Higher
Directional Force/Torque Maximum	Maximum possible	Higher

Table 5 Optimized parameter values

Items	Conditions
DS_thine1	9.6053
DS_lenth1	18.736
Maximum flux density	0.027245(T)
Maximum force/torque	0.0033065

그러나 공구의 길이가 길어 질 수록 평면가공에서 공구의 효율성만 떨어뜨림으로 본 연구에서는 Table 4와 같이 최대 자속밀도를 가지는 조건에서 공구의 직경은 최대한 크고 길이는 짧은 목표값을 설정하여 적용하였다.

목표값에 따른 최적화 결과를 Table 5에 나타내었다. 결과적으로 최적화 프로그램은 9.6053mm의 직경과 18.736mm의 길이를 가질 때 목표값을 만족하는 자속밀도를 가진다.

Table 6 Experimental conditions

Items	Conditions
Traverse speed	9m/min
The number of machining	40th
Workpiece	SUS316
Workpiece size	35*25*12mm
Coolant	Continuance

Table 7 Factors and levels used in experiment

Sign	Factors	unit	Level		
			1	2	3
A	Rotational speed	rpm	900	1200	1500
B	Magnetic flux density (permanent magnet)	mT	52 (3EA)	79 (5EA)	82 (7EA)
C	Current	A	1.5	2.0	2.5
D	Working gap	mm	1.0	1.5	2.0

#### 4. SUS316의 자기연마 특성평가

##### 4.1 실험계획법

본 연구에서는 자기연마 공정에서 각각의 인자들이 어느 정도의 영향력을 가지는지를 평가하기 위하여 실험계획법을 이용하였다. Table 7은 본 실험에서 선택한 인자와 그 수준을 나타내었다. 최적조건의 인자를 찾기 위한 실험을 바탕으로 하여 인자들의 수준을 선택하였으며, 자기연마장치의 사용되는 인덕터의 전기용량을 고려하여 전류의 세기를 1.5, 2.0, 2.5A로 선정하였으며, 공구의 회전속도는 서보모터의 용량이 0~60Hz로 약 0~3700rpm까지 가능하다. 그러나 1500rpm 이상에서는 연마입자들의 이탈이 많이 발생하므로 가공이 어렵다. 이러한 점을 고려하여 회전속도를 1500rpm 이하로인 900, 1200, 1500rpm으로 선정하였다. 공작물과 공구 사이의 간격은 최적조건 실험데이터를 바탕으로 각각 1.0, 1.5, 2.0mm로 선정하였다. 또한, 자기력의 세기를 증가시키기 위해 Fig. 10과 같이 공작물의 반대편에 영구자석을 설치하고 영구자석의 개수에 따른 자속밀도를 각각 52mT(3개), 79mT(5개), 82mT(7개)로 측정하여 실험인자로 적용하였다.

Table 8은 본 실험에 사용된  $L_9(3^4)$  표준직교배열표를 나타낸 것이다. 직교배열표에는 4개의 열에 주요인자 및 상호작용이 예상되는 인자들을 배치하였고, 실험의 실시회수는

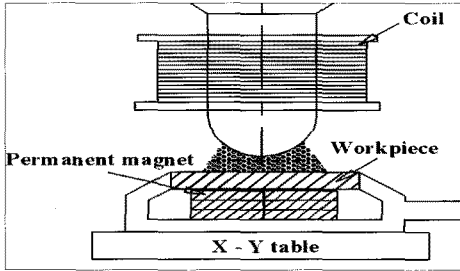


Fig. 10 Schematic of experimental method

Table 8 Orthogonal array table for  $L_9 (3^4)$

No.	Factor			
	A	B	C	D
1	900	52	1.5	1.0
2	900	79	2.0	1.5
3	900	82	2.5	2.0
4	1200	52	2.0	2.0
5	1200	79	2.5	1.0
6	1200	82	1.5	1.5
7	1500	52	2.5	1.5
8	1500	79	1.5	2.0
9	1500	82	2.0	1.0

9회로 하였다. 직교배열표에서 숫자 1, 2와 3은 각 인자들의 수준을 의미한다.

#### 4.2 실험 및 결과

직교배열표에 따라 9번의 실험을 실시하고 표면거칠기의 향상정도를 측정했으며, 이 결과를 다시 S/N비로 변환하였다. 여기서 S/N비는 표면거칠기의 향상정도는 그 값이 증가하면 할수록 좋은 값이므로 망대특성치를 이용하여 계산하였다. 그 결과를 Table 9에 나타내었다. 계산된 S/N비를 이용하여 각 인자가 결과에 미치는 영향력정도를 확인하기 위해 각 인자에 대한 S/N비로 환산하여 Fig. 11에 나타내었다. 여기서 B인자인 영구자석의 자속밀도가 결과에 가장 큰 영향을 미치고 있는 반면 C인자인 전류의 세기가 가장 작은 영향력을 미치고 있음을 보여준다. 또한 이번 실험에서 표면거칠기를 향상시킬 수 있는 최적의 가공 조건은  $A_3B_3C_1D_2$  일 때이다. 즉, 인덕터의 회전수가 1500rpm, 영구자석의 자속밀도가 82mT, 전류의 세기가 1.5A, 간극이 1.5mm일 때

Table 9 Experimental results and S/N ratios

No.	Before	After	Difference	S/N ratio
1	0.41	0.34	0.06	-24.437
2	0.33	0.28	0.05	-26.0206
3	0.34	0.27	0.07	-23.098
4	0.38	0.32	0.06	-24.437
5	0.33	0.30	0.03	-30.4576
6	0.42	0.37	0.07	-23.098
7	0.45	0.37	0.08	-21.9382
8	0.41	0.36	0.05	-26.0206
9	0.45	0.39	0.06	-24.437

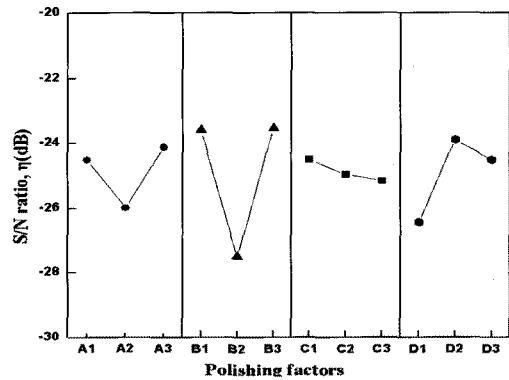


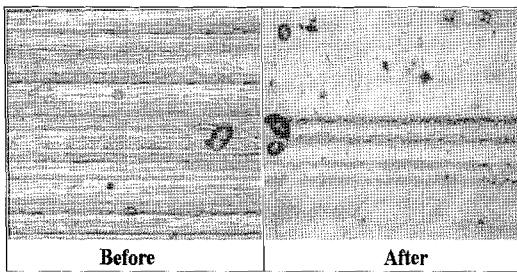
Fig. 11 Influence of factors on the surface roughness improvement (Ra)

가장 최적의 조건이 된다. 이를 토대로 분석하면 영구자석을 설치할 경우 표면거칠기의 향상은 전류세기 변화에는 영향을 매우 적게 받으며 영구자석의 세기와 전류의세기가 적절할 때 좋은 결과를 얻을 수 있음을 나타낸다.

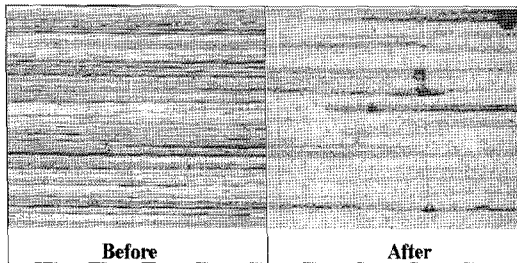
즉, 비자성체의 자기연마에서 자기력 향상을 위해 공구의 형상을 최적화하고 영구자석을 부가적으로 설치한 경우, 공작물의 반대편에서 작용하는 자기력의 세기에 따라 공작물의 표면거칠기가 증감 할 수 있음을 알 수 있었다. Table 10은 실험계획법에 대한 분산분석 결과를 보여준다. 여기서 SS는 측정치의 산포를 제공합한 변동을 나타내고 DOF는 인자의 자유도를 나타내며, V는 변동을 자유도로 나누어 준 값으로 제공평균(mean square)이고,  $F_0$ 는 제공평균비를 나타낸다. 또한 Fig. 12는 각 실험에 대한 공작물의 TEM Image를 나타내고 있다. 자기연마 후의 공작물 표면이 평탄화 되었음을 알 수 있다.

Table 10 ANOVA for each factor

	SS	DOF	V	F <sub>0</sub>
A	5.817367	2	2.908683	8.861202
B	30.82273	2	15.41137	46.95019
C	0.656499	2	0.328249	
D	12.00838	2	6.004191	18.29156
E	0.656499	(2)	0.328249	
Total	37.2966	8		



(a) No.3 experiment (magnitude: 100)



(b) No.9 experiment (magnitude: 100)

Fig. 12 TEM image of SUS316 before and after MAP

## 5. 결론

본 연구에서는 비자성 재료(SUS316)의 자기연마에서 자기력 향상을 위하여 자기연마 공구의 형상을 최적화하고 이를 활용하여 비자성 재료의 자기연마 특성평가를 수행하였다.

- (1) 자기연마 공구와 공작물 사이에서 발생하는 최대 자속 밀도는 공구의 직경이 작고, 길이가 길수록 증가한다.
- (2) SUS316의 자기연마에서 표면거칠기의 향상은 전류세기의 변화에는 큰 영향을 받지 않으나 자기력의 세기를 증가시키기 위한 영구자석은 실험결과에 가장 큰 영향

을 미쳤음을 알 수가 있었다.

- (3) 본 연구에서 수행된 SUS316의 자기연마 특성평가에서는 회전속도가 1500rpm, 연구자석의 개수가 7개(82mT), 전류의 세기가 1.5A, 공구와 공작물 사이의 거리가 1.5mm 일 때 가장 좋은 표면거칠기를 얻을 수 있음을 알 수가 있다.

## 후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입(No. 2009-0065020).

## 참 고 문 헌

- (1) Chang, G. W., Yan, B. H., and Hsu, R. T., 2002, "Study of Cylindrical Magnetic Abrasive Finishing using Unbonded Magnetic Abrasives," *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, Vol. 42, pp. 575~583.
- (2) Singh, D. K. and Jain, V. K., 2005, "Analysis of Surface Texture Generated by a Flexible Magnetic Abrasive Brush," *WEAR*, Vol. 259, pp. 1254~1261.
- (3) Shaohui, Y. and Takeo, S., 2004, "A Comparative Study: Polishing Characteristics and its Mechanisms of Three Vibration Modes in Vibration-assisted Magnetic Abrasive Polishing," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, pp. 383~390.
- (4) Ko, S. L., Baron, Yu M., and Park, J. I., 2007, "Micro Deburring for Precision Parts Using Magnetic Abrasive Finishing Method," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 187-188, pp. 19~25.
- (5) Shimura, T. and Aizawa T., 1988, "Development of Plane Magnetic Abrasive Finishing Apparatus and its Finishing Performance (2nd Report, Finishing Apparatus Using a Stationary Type Electro-magnet)," *Journal of Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 54, No. 5, pp. 928~933.
- (6) Kim, S. O. and Kwak, J. S., 2008, "Improvement of Magnetic Force and Experimental Verification

for Magnetic Abrasive Polishing of Aluminum Alloy,”  
*Transactions of the Korean Society of Machine Tool  
Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 23~29.

(7) Singh, S. Shan, H. S., and Kumar, T., 2002, “Parametric optimization of magnetic-field-assisted abrasive flow machining by the taguchi method,” *Quality and reliability engineering international*, Vol. 18, pp. 273~283.