

## 비자성 파이프 내면의 자기연마특성에 관한 연구

박원규\*, 노태우<sup>+</sup>, 최 환<sup>++</sup>

(논문접수일 2004. 9. 16, 심사완료일 2004. 10. 13.)

### The Magnetic Finishing Characteristics of Non-ferromagnetic Pipe Inside Polished

Won Kyou Park\*, Tae Woo Rho<sup>+</sup>, Hwan Choi<sup>++</sup>

#### Abstract

An internal finishing process by the application of magnetic abrasive machining has been developed as a new technology to obtain a fine inner surface of pipe. In this paper, the finishing process of a non-ferromagnetic pipe by a static magnetic field method is introduced and its finishing characteristics is discussed with effective factors by various experiments. From these experimental results, it is found that the magnetic abrasives inserted in the pipe are arranged according to the magnetic force line. Through the experimental, it is possible to estimate the proper supply volume of the abrasive, which in proportional to the diameter of pipe.

**Key Words :** Magnetic abrasive machining(자기연마), Internal finishing(내면연마), Non-ferromagnetic pipe(비자성 파이프), Magnetic abrasives(자성입자)

### 1. 서론

반도체 관련 산업뿐만 아니라 원자력 관련 의료, 항공, 우주 관련 각종 산업분야에서 종래의 방법으로는 가공이 곤란한 표면의 경면가공이나 정밀부품의 디버링 기술 등의 연구가 활발하게 진행되고 있다<sup>(1)</sup>. 또한 고성능제조 공정에서는 초정정화기술(Ultra clean technology)이 요구되며 이중 중요한 한 분야가 크린 파이프의 제조기술이다. 고 속도 가스나 초 순수 물질의 이송배관이나 용기 내면의 오염을 막

기 위하여 내면의 정밀도가 Ra 0.02 $\mu$ m 이하의 나노 메터 스케일의 초정밀 표면 상태를 필요로 하고 있다.

현재 이러한 크린 파이프의 내면연마는 전해연마법에 의해 연마가공이 주류를 이루고 있으나 전해연마는 가공 원리상 전 가공표면의 정밀도가 매우 중요하다. 또한 크린 파이프는 일반적으로 가늘고 길며(내경 0.2~150mm, 길이 2~8m), 엘보우 관 등의 여러 종류의 형상이 있기 때문에 전 가공방법의 선택이나 전해조건, 전극 설정 등 가공 조건의 선정이 쉽지 않으며 또한 환경을 고려해 폐용액의

\* 경기공업대학 (wkpark@kinst.ac.kr)  
주소 : 429-792 경기도 시흥시 정왕동 2121-3  
+ 브룩스오토메이션아시아(주)  
++ 금오공과대학교 기계공학부

처리문제도 중요한 과제로 대두되고 있다. 본 연구에서는 자장이라는 개념을 정밀연마가공에 응용한 자기연마법<sup>(2-4)</sup>을 이용하여 비자성 파이프(재료 SUS304) 내면의 자기연마 특성을 검토하고, 환경을 고려한 고품질의 크린 파이프 내면의 정밀연마 가능성을 확인하고자 하였다.

## 2. 파이프 내면의 자기연마 메카니즘

Fig. 1은 자극을 정지시키고 파이프를 회전시키는 정자장을 이용한 자기연마법에 관한 가공개념도이다. 자력선의 물체투과 작용 즉 불균일 자장분포 작용에 따라 파이프 내면에 충전된 자성입자는 자력을 받아 연마압력이 발생 되는데 연마압력이란 자성입자가 자극에 흡인되는 자력을 말하며

$$\begin{aligned} F_x &= kD^3\chi H(\partial H/\partial x) \\ F_y &= kD^3\chi H(\partial H/\partial y) \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서,

$k$  : 계수

$D$  : 구형으로 가정했을 때의 자성입자 직경

$x$  : 자성입자의 자화율

$xy$  : 자력선방향 및 등자위선방향의 좌표

$H(\partial H/\partial x), H(\partial H/\partial y)$  : 자력선방향 및 등자위선 방향의 자장강도와 그 변화율의 곱

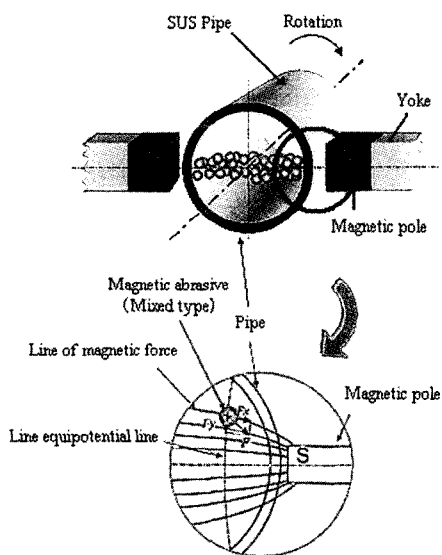


Fig. 1 Schematic of internal magnetic abrasive finishing

그러므로, 합력은 다음과 같다.

$$F = \sqrt{(F_x^2 + F_y^2)} \quad (2)$$

자성입자에 작용하는 자력선 방향 성분 자력을  $F_x$ 라 하고 등자위선 방향 성분 자력을  $F_y$ 라 했을 때 합력은  $F$ 로 얻을 수 있으며 자력  $F_x, F_y$ 는 다음 식으로 표시할 수 있다<sup>(5,6)</sup>. 이 양 자력은 식 (1)에서, 자성입자 직경  $D$ 의 3제곱과 자화율  $x$ 의 곱에 비례해서 증가한다.

자화율  $x$ 는 자성입자의 재질과 그 제조 과정에서 결정된다. 이에 비해 입자 직경  $D$ 는 임의의 값을 선정할 수 있다. 또, 자성입자의 작용압력은 자장강도  $H$ 와 그 변화율  $H(\partial H/\partial x), H(\partial H/\partial y)$ 의 곱(자장분포의 값)에 영향을 받는다. 그러므로 자성 입자직경을 크게 하므로서 작용압력을 높일 수 있고, 또 입자 직경이 일정하다면 작용 압력을 크게 하기 위해서는 자장분포의 값을 높일 필요가 있다.

## 3. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 내면 자기연마 실험장치로서는 소형선반(1.1kW)을 이용하였으며, 선반왕복대에 영구자석으로 구성된 자장발생요크(Yoke)를 Fig. 2와 같이 설치하여 파이프내면 연마실험을 하였다. 자극으로는 자력의 누속을 최소화하고 장치의 소형 경량화 및 자극의 극성교환 편의 등을 고려하여 Fe-Nd-B 영구자석을 사용하였다. 실험은 먼저 스텔레스 파이프를 선반 척에 고정하고, 철분과 자성입자를 파이프 내면에 일정 비율로 단순 혼합한 자성입자를 투입하고 파이프를 회전시켜 연마 실험을 하였다. Fig. 3은 실험에

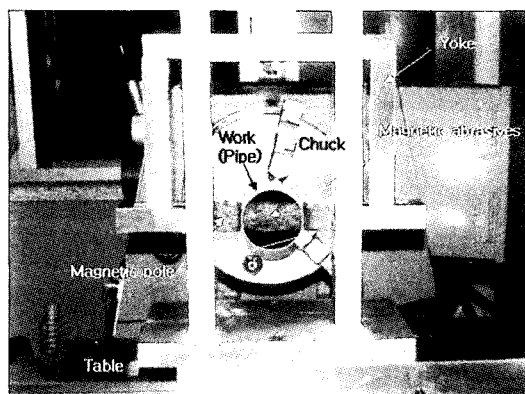
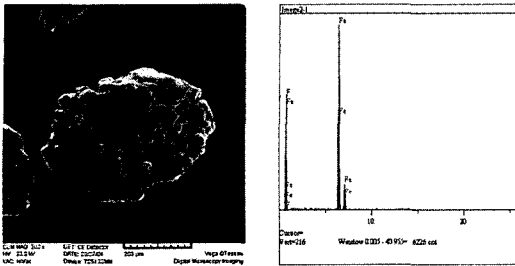
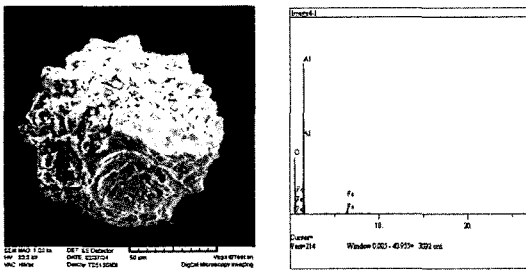


Fig. 2 Experimental set-up



(a) Iron particle(330 $\mu$ m in mean dia.)



(b) WA magnetic abrasive(80 $\mu$ m in mean dia.)

Fig. 3 Mixed type magnetic abrasive

사용된 전해철분과 자력에 작용하는 WA 자성입자<sup>(7)</sup>의 현미경 확대사진과 성분 분석 결과인데 전해철분의 성분은 순수 철 성분으로 나타났으며 WA 자성입자는 철과 알루미늄이 결합된 형태의 성분인 것을 알 수가 있다 가공에 사용되는 단순 혼합 자성입자에서 WA 자성입자 만으로도 연마가공은 가능하나 파이프 내면에 작용하는 연마압력이 약하므로 연마효율을 높이기 위한 방안으로 전해철분을 혼합하여 좀 더 강한 연마압력을 얻어 연마가공실험을 하였다. Table 1에 실험조건을 나타내었다.

## 4. 실험결과 및 검토

### 4.1 혼합된 입자 공급량의 선정

실험에 사용된 공작물로서는 스테인레스 파이프의 직경 3 종류를 선택하였으며 투입할 자성입자는 전해철분과 WA 자성입자를 중량비 4:1로 단순 혼합하여 만들었다. 파이프 직경에 따른 적정 공급량을 선정하기 위한 실험조건은 Table 1과 같으며, 자극은 N-S 홀핀자장으로 설치하였다.

Fig. 4는 파이프 직경이  $\phi 23$ ,  $\phi 36$  및  $\phi 48$ mm 3가지 종류를 사용하고 자성입자 공급량을 2g씩 증가 투입시키면서

Table 1 Experimental conditions

Workpiece (mm)	SUS 304 stainless steel pipe D : $\phi 23$ , $\phi 36$ , $\phi 48$ L:100t:1
Mixed type magnetic abrasives	Iron particles 80wt.% (mean dia. : 330 $\mu$ m) WA magnetic abrasives 20wt.% (mean dia. : 80 $\mu$ m)
Pole	Fe-Nd-B permanent magnetic 18 $\times$ 18 $\times$ 20mm
Machining fluid	Straight oil type 5wt.%
Magnetic flux density	N-S : 0.45T, N-N : 0.35T
Finishing speed	1.7m/s
Pole arrangement	N-S 180 $^\circ$ , N-N 180 $^\circ$
Finishing time	1 ~ 15min.
Finishing gap	1mm

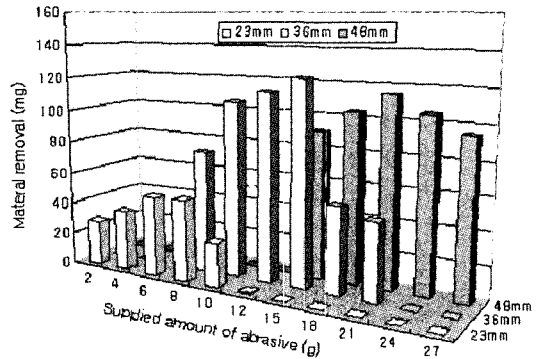


Fig. 4 The material removal quantity to the suppling quantity of magnetic abrasives and the diameter of pipe

자성입자의 공급량에 따른 연마량을 비교해본 결과이며 실험은 연마량을 mg 단위로 측정하였다. 자성입자 공급량에 따른 연마량을 살펴보면 자성입자의 공급량이 점차 증가함에 따라 연마량이 점차 증가하다가 어느 시점에 도달하면 오히려 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 경향은 파이프의 직경 변화에 따라서 모두 동일한 경향을 나타내었으며, 본 실험에서는 연마량이 최고로 도달된 경우를 적정 공급량으로 규정하였다. 이러한 적정 공급량을 각각의 파이프 직경 변화에 따라 살펴보면, 직경  $\phi 23$ mm 경우는 자성입자공급량 8g 정도에서, 직경  $\phi 36$ mm의 경우는 입자공급량이

15g 정도에서 그리고 직경  $\phi 48\text{mm}$ 의 경우는 입자공급량이 21g 정도에서 연마량이 가장 크다는 것을 알 수 있었다. Fig. 4에서 직경  $\phi 36\text{mm}$ 에 비해 직경  $\phi 48\text{mm}$ 의 연마량이 오히려 적은 이유는 자력의 세기와 관련이 있는 것으로 사료되며, 즉 파이프의 직경이 커질수록 입자의 보지력이 떨어져 연마압력이 저하하기 때문으로 생각된다.

이와 같은 현상을 규명하기 위하여 입자의 공급량 변화에 따른 입자거동을 살펴보았다. Fig. 5는 파이프 직경이  $\phi 36\text{mm}$ 인 경우, 입자의 공급량(Suppling Quantity : S.Q.로 표시)이 적은 경우(6g)와 적절한 경우(15g) 그리고 과다한 경우(21g)에 있어서 파이프의 정지 상태와 회전 상태에서 입자의 거동을 관찰하였다.

Fig. 5에서 입자의 공급량이 6g인 경우는 파이프의 직경에 비해 입자의 공급량이 적기 때문에 입자의 배열 띠(Abrasives bridge)가 이어지지 않아 파이프 내면에 작용하는 상대압력이 약하게 되고, 따라서 가공 시 입자들의 원활한 유동이 일어나지 않았고 연마 가공량도 적게 된다. 그러나 입자의 공급량이 15g인 경우는 입자의 배열 띠가 정지 시 매우 튼튼하게 보이고, 가공 시 입자 배열 띠가 8자 형태로 원활하게 유동됨을 알 수 있고 연마가공이 활발하게 이루어져 가공량이 많아지게 된다. 입자의 공급량이 21g으로 증가하게 되면 정지 시에는 입자의 배열 띠가 매우 두꺼워지지만 가공 시에는 과다한 입자량으로 인하여 파이프 내면에 입자가 짝 차면서 파이프와 같이 회전을 하는 현상을 관찰할 수




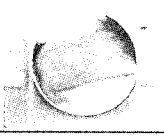


S. Q. (g)	Stopping	Rotating
6		
15		
21		

Fig. 5 The moving shapes of magnetic abrasive(Diameter of pipe:  $\phi 36\text{mm}$ )

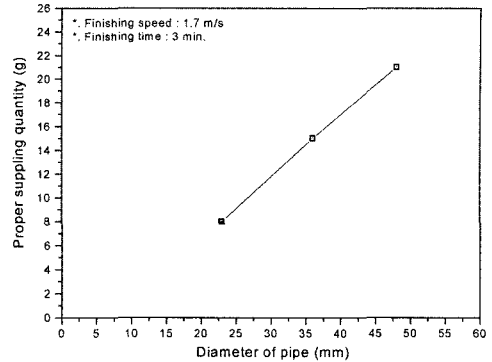


Fig. 6 A proper supplying quantity versus the diameter of pipe

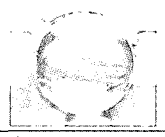

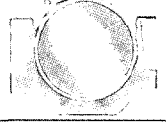
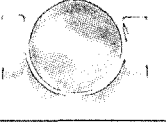
Poles	Stopping	Rotating
N-S		
N-N		

Fig. 7 The moving shapes of magnetic abrasive according to magnetic poles(Diameter of pipe :  $\phi 36\text{mm}$ , S. Q. : 15g)

있었는데 이는 입자의 과다 공급으로 인해 자력이 흡인되어 작용하는 보지력 보다 파이프 회전에 의해 발생하는 원심력이 커서 입자가 파이프와 같이 회전하는 것으로 생각된다. 이런 경우는 연마가공이 거의 이루어지지 않게 된다. 따라서 Fig. 4와 Fig. 5의 결과로 볼 때 파이프 직경에 따라 적절한 입자의 공급량의 선택이 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 파이프 직경이  $\phi 23$ ,  $\phi 36$  및  $\phi 48\text{mm}$  3가지일 때 적정 공급량에 대한 결과인데 그림에서 보듯이 자력의 세기가 일정하다고 할 때 파이프 직경이 커질수록 입자의 적정 공급량은 거의 선형적으로 증가한다는 것을 알 수 있다.

#### 4.2 흡인자장과 반발자장의 영향

Fig. 7은 흡인 자장(자극:N-S)과 반발 자장(자극:N-N)의 경우 파이프 정지 상태와 회전 상태에서 자성입자들의 거동

을 관찰한 그림이다. Fig. 7에서 흡인자장과 반발자장의 차이에 따른 입자들의 분포를 살펴보면 흡인자장의 경우는 파이프내의 입자가 자력선의 분포에 따라 자성입자들이 일자로 배열 피를 형성하고 있으나 반발자장의 경우는 반발되는 자력선이 위아래로 뺏어 나가 자성입자들이 파이프 내벽에서 양편으로 폭넓게 퍼져 있음을 알 수 있다. 특히 가공시 흡인자장의 경우는 자성입자들의 거동은 자극 폭 만큼의 두께에 자성입자가 집중되 일자 형태의 배열 피가 원활히 8자 형태로 회전하면서 가공됨에 비해 반발자장의 경우는 반발되는 자력선에 따라 자성입자들이 자극 폭에 집중되지 않고 파이프 내면에 넓게 퍼져 가공됨을 알 수 있었다.

Fig. 8은 흡인자장과 반발자장의 경우를 Infolytica corporation 사의 Magnet라는 자장 해석 프로그램을 이용하여 해석한 그림으로 자극배열에 따른 자력선 방향의 변화와 각 부분의 자장강도를 시뮬레이션 한 결과의 그림인데 그림a)의 흡인자장에서는 자극 폭에 맞춰 자력선이 스텐레스 파이프를 거의 일직선으로 투과하고 있으며 반발자장에서는 위아래로 자력선이 뺏어 파이프 중심부는 자력선이 없어 중앙부는 자성입자가 없다는 것을 확인할 수 있다.

또한 자로에 흐르는 자력의 세기는 흡인자장의 경우가 반

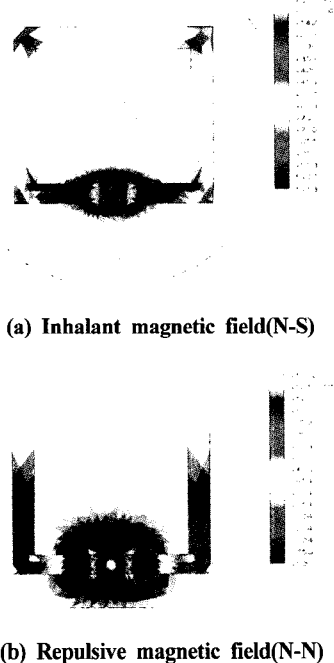


Fig. 8 The magnetic field(N-S and N-N)

발자장의 경우보다 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 흡인자장과 반발자장의 가공 성능을 서로 비교 검토하기 위하여 파이프의 직경을 또한  $\phi 23$ ,  $\phi 36$  및  $\phi 48$  mm 3종류를 연마속도는 1.7m/s로 3분간 연마하여 변화에 따른 연마량을 측정된 결과이다. Fig. 9의 결과에서 연마량은 흡인자장의 경우보다 반발자장의 경우가 더 많게 나타났는데 이것은 Fig. 8에서 살펴본듯이 반발자장의 경우가 흡인자장보다 자력선의 집중도는 떨어지나 퍼지는 자력선에 작용하는 자성입자의 분포 폭이 훨씬 넓게 퍼져있어 연마되는 면이 넓어져 연마량이 많기 때문이라 생각된다.

### 4.3 연마시간에 따른 표면 거칠기의 변화

Fig. 10은 연마조건을 흡인자장을 이용하여 입자공급량을 8g 투입하여 1.7m/s의 회전속도로 가공하여 연마시간에 따른 표면 거칠기의 변화를 살펴본 결과이다. 실험 결과에서

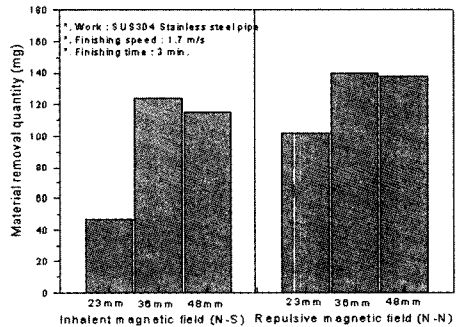


Fig. 9 The material removal quantity according to magnetic poles arrangement(N-S and N-N)

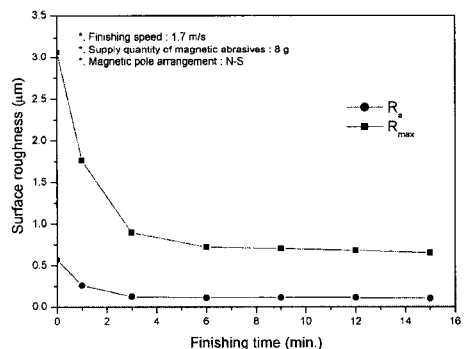


Fig. 10 The surface roughness according to the finishing time(Diameter pipe :  $\phi 23$ mm)

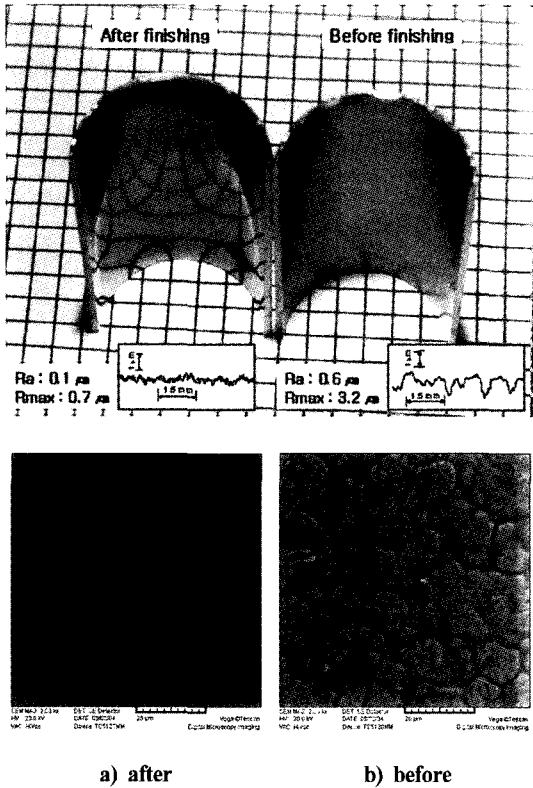


Fig. 11 Photograph of inner surface of pipes before and after finishing(Pipe length : 50mm, dia. : 23mm, finishing time : 6min, S.Q. : 8g, pole arrangement : N-S)

알 수 있듯이 표면 거칠기는 연마시간이 약 6분 정도까지는 급격히 개선되다가 그 이후부터는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 따라서 가공효율을 고려해 볼 때 본 실험의 범위 내에서 가공시간은 약 6분 정도가 적절하다고 할 수 있다.

Fig. 11은 비자성 파이프의 자기연마 성능을 살펴보기 위하여 직경 23mm, 길이 50mm의 스텐레스 파이프를 약 6분간 가공해, 전과후의 가공표면사진을 나타낸 것이다.

Fig. 11에서 가공후의 파이프 내면 표면거칠기는 Ra 0.1 μm, Rmax 0.7 μm로 가공전의 표면 거칠기인 Ra 0.6 μm, Rmax 3.2 μm에 비해 매우 개선된 값을 나타냈으며, 가공면을 확대한 현미경 사진을 보면 자성입자에 의해 고르게 굽힌 연마 자국을 확인할 수 있다. 따라서 이러한 결과로부터 자기연마법에 의한 비자성 파이프 내면의 정밀연마 가능성을 확인할 수 있었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 자기연마법을 이용한 비자성 파이프 내면의 연마특성을 파악하기 위해 정자장 방식으로 스텐레스 파이프의 내면연마를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 파이프내의 자성입자는 자력선의 방향에 따라 배열된다는 것을 확인하였다.
- (2) 파이프의 연마량 실험을 통하여 자성입자의 적정 공급량을 파악할 수 있었으며, 적정 공급량은 자력의 세기가 일정할 경우 파이프 직경증가에 따라 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있었다.
- (3) 본 실험에서는 N-S 흡인자장 분포의 연마량 보다 N-N 반발자장 분포의 경우가 연마량이 높게 나타났다.
- (4) 연마시간이 증가할수록 표면 거칠기는 가공초기(본 실험에서는 6분까지)에 급격히 개선되다가 이후로는 거의 미소하게 감소하는 경향을 나타내었다.
- (5) 영구자석을 이용한 간단한 자기연마 장치를 이용하여 파이프 내면의 정밀연마가 가능함을 알 수 있었다.

## 후기

본 연구는 2004 경기공업대학 교육인적자원부 특성화 재정지원 사업에서 일부 연구비를 지원 받았습니다.

## 참고 문헌

- (1) Shinmura, T., 1998, "Magnetic Abrasive Finishing Process and its Application," *Tool engineer*, Vol. 42, No. 5, pp. 13~17.
- (2) Shinmura, T., Takazawa, K., and Hatano, E., 1986, "On Process Principle and the Few Finishing Characteristic," *JSP*, Vol. 52, No. 5, pp. 851~857.
- (3) Shinmura, T., and Yamaguchi, H., 1994, "A New Process for Internal Finishing of Tube by the Application of Magnetic Field," *JSGE*, Vol. 38, No. 1, pp. 15~18.
- (4) Lee, Y. C., Anzai, M., and Nakagawa, T, 1996, "A Study on Improving the Efficiency Magnetic Abrasive Polishing for Die & Mold Surface," *KSPE*,

Vol. 13, No. 6, pp. 59~65.

- (5) Shinmura, T., and Yamaguchi, H., 1995, "Study on a New Internal Finishing Process by the Application of Magnetic Abrasive Machining," *JSME*, Vol. 38, No. 4, pp. 798~804.
- (6) Yamaguchi, H., Shinmura, T., and Kaneko, T., 1996, "Development of a New Internal Finishing

Process Applying Magnetic Abrasive Finishing by use of Pole Rotation System," *Int. J. JSPE*, Vol. 30, No. 4, pp. 317~322.

- (7) Shinmura, T., Takazawa, K., and Hatano, E., 1995, "Study on Magnetic Abrasive Finishing," *Annals of the CIRP*, Vol. 39, No. 1, pp. 325~328.