

Ba-Ferrite 자성체를 사용한 자기연마 가공

윤여권*, 김희남⁺

(논문접수일 2010. 4. 1, 심사완료일 2010. 5. 12)

Magnetic Polishing Using Ba-Ferrite Magnetic Substance

Yeo-Kwon Yun*, Hee-Nam Kim⁺

Abstract

The magnetic polishing is the useful method to finish some machinery fabrications by using magnetic power. This method is one of the precision techniques and has an aim for clean technology in the clean pipes. The magnetic abrasive polishing method is not so common in the field of machine that it is not known to widely. There are rarely researcher in this field because of non-effectiveness of magnetic abrasive. This paper deals with mediocritizing magnetic polishing device into regular lathe and this experiment was conducted in order to get the best surface roughness at low cost. This paper contains the result of experiment to acquire the best surface roughness, not using the high-cost polishing material in processing. In this paper, We could have investigated into the changes of the movement of magnetic abrasive grain. In reference to this result, we could have made the experiment which is set under the condition of the magnetic flux density, polishing velocity according to the form of magnetic brush.

Key Words : Ba-Ferrite(바륨-페라이트), Magnetic flux density(자속밀도), Magnetic polishing(자기연마), GC(녹색탄화규소), CBN(입방정질화붕소), Surface roughness(표면거칠기)

1. 서론

기계공업의 발전과 더불어 사용되는 부품이 점차 고정도가 요구되면서 공구와 가공물이 직접 접촉하면서 가압하여 절삭하는 가공방법으로는 절삭력에 의한 변형과 마찰열로

인하여 고정도 가공을 실현하는데 어려움이 생기게 되었다.

이러한 가공법 중 연삭가공은 주로 가공물의 마무리에 이용되는 가공법으로서, 비교적 정밀하고 양호한 표면의 품질이 요구되어지는 부품의 가공에 이용되어왔다.

한편 유공압용 실린더의 재료로 사용되는 길이가 긴 튜브

* 유한대학 기계설계과 (yunyk@yuhan.ac.kr)
주소: 422-749 경기도 부천시 소사구 경인로 636
⁺ 명지대학교 기계공학과

의 내면을 연삭가공할 경우에는 슷돌 축 길이가 길어지면 진동발생 등으로 인해 적용에 제약이 따르게 된다.

또한 연삭열의 발생을 억제하기 위해 연삭유를 사용해 함으로 인하여 고청정용 소재의 고품위 표면을 얻기 위한 가공에는 어려움이 따르게 된다. 이러한 문제 해결과 보다 더 우수한 표면의 품질을 얻기 위한 가공법중의 하나로 자기 연마법이 대두되었다.

자기연마법은 자기력에 의해 자기연마재를 끌어당겨 가공물을 연마하는 방법으로서 비자성체 가공물 표면의 청정 유지와 고정밀도를 실현할 수 있다.

이러한 자기연마 가공에서 자기연마재는 가공의 주체로써 가공 정밀도와 청정도를 좌우하는 핵심요소이다. 그러므로 고품위의 표면을 얻기 위한 자기연마 가공을 위해서 가공효율이 뛰어난 자기연마재의 개발이 반드시 필요하다. 이러한 필요성에 의해 자기연마장치 및 연마재에 관한 여러 연구⁽¹⁻³⁾가 이루어져 왔으며, 자기력과 자극의 배치 등이 자기연마효율에 미치는 영향과 여러 형태로 자극을 배열하고 자기연마 효율을 개선시키기 위한 연구⁽⁴⁻⁵⁾가 이루어져왔다. 그리고 자기연마재 및 장치의 개발과 자기연마 가공에 관한 연구⁽⁶⁻⁹⁾가 국내에서 진행되었다.

이러한 가공효율을 높일 수 있는 여러 가지 자기연마재의 개발과 가공방법에 관한 연구를 통해 산업재해 감소를 꾀할 수 있을 것이며, 국내·외에서 사용되는 비자성체 튜브, 식품 위생기기, 의료기기 등의 청정생산기술을 비롯하여 각종 금형의 마무리가공 공정에도 활용이 광범위하게 확대될 것으로 기대된다. 본 연구에서는 자기연마 효율을 향상시키기 위한 목적으로 자성재료로 Ba-Ferrite를 이용하고 WA, GC, CBN 입자를 연마재로 사용하여 개발한 자기연마재⁽⁹⁾를 사용하여 자기연마 가공을 수행하였다. 본 실험에서는 범용선반에 자기력 발생장치를 부착한 형태의 자기연마 기구를 사용하여 자기연마가공을 수행하였으며, 이 실험을 통해 연마입자의 종류를 비롯한 연마속도 등의 조건이 자기연마재의 동적거동 및 표면 거칠기 등에 미치는 영향을 고찰하는데 목적이 있다.

2. 자기연마재 제조 및 자기연마

2.1 자기연마재 제조

2.1.1 자기연마재의 구성

본 실험에 사용된 자기연마재의 자성재료로 사용된 Ba-Ferrite는 산화철(Fe_2O_3)과 탄산바륨($BaCO_3$)이 기본원료이

며 $1,200^{\circ}C$ 에서 소결한 후 200mesh로 전통시킨 것을 사용하였다. Ba-Ferrite($BaFe_{12}O_{19}$)는 보자력이 높고 비중이 작으며 가격이 저렴한 장점이 있다. 또한 연마재로 사용된 WA입자는 좋은 결합성을 가지며 합금강 등의 연삭에 적합하고, GC입자는 WA보다 경도가 높고 취성이 있어서 새로운 연마입자로의 자생이 용이하여 탄소공구강, 고강도강 등의 연마에 적합하며, CBN 입자는 내화성이 우수하여 마모가 적고 연마면이 양호한 특징을 지니고 있다. 그리고 입자의 크기 변화에 따른 자기연마재의 제조특성과 가공성을 평가하기 위하여 1,000mesh, 4,000mesh, 8,000mesh의 WA, GC, CBN 입자를 사용하였다. 또한 결합제로는 우수한 입자 매트릭스(matrix)를 형성할 수 있으며 저온에서도 제조 가능한 지석용 액상수지를 결합제로 사용하였다. 자기연마재 조성비율은 Table 1과 같으며, 원료가 되는 각각의 첨가량은 무게비로 정량화 하였다.

2.1.2 Ba-Ferrite 자기연마재의 제조

Table 1과 같은 조성비율로 구성된 자기연마재의 혼합은 공업적인 대량생산을 위하여 단순혼합방법을 이용하였다.

Ba-Ferrite와 WA, GC 및 CBN 입자가 혼합되는 첨가비율의 변화에 따라 자기연마재가 가지게 되는 특성의 변화를 고찰하기 위하여 Table 2와 같이 혼합하였다. 이와 같이 혼합된 자기연마재 원료를 일축나선형식으로 가압하여 성형된

Table 1 Compositions of magnetic abrasive

Magnetic material	Abrasive	Grain mesh	Resin (ml/g)
Ba-Ferrite (200mesh)	WA	1,000	0.17
	GC	4,000	
	CBN	8,000	

Table 2 Compositions of the mixture rate

Composition	Resin (ml/g)	Synthesis temp. ($^{\circ}C$)	Synthesis time (min)
Ba-Ferrite:WA=1:1	0.17	185	120
Ba-Ferrite:WA=1:2			
Ba-Ferrite:GC=1:1			
Ba-Ferrite:GC=1:2			
Ba-Ferrite:CBN=1:1			
Ba-Ferrite:CBN=1:2			

연마재를 185℃의 온도에서 120분 동안 합성하였다. 이러한 저온합성은 산화방지를 위한 N2 분위기 조성이 필요치 않아 대량생산에 적합하며, 이러한 합성공정을 거친 자기연마재는 분쇄기를 통과하여 소요되는 크기의 미립으로 제조하였다.

2.2 자기연마 가공

2.2.1 자기연마 매커니즘

Fig. 1은 자기연마기구의 자극봉과 연마입자가 자기브러시를 형성한 상태를 나타낸 것으로서 비자성체 파이프 내면의 좌측에 N극을 가진 자극봉을 설치하였다. 자기연마기구는 외부에서 전원을 공급받아 자극봉에 감겨진 코일에 전원을 인가하면 자기력이 형성되고, 이러한 자극에 의해서 발생한 자기력은 연마입자를 끌어당겨 파이프 내면을 연마하게 된다. 자기연마 장치에 자력을 발생시키면 자기력에 의해 연마입자는 y방향과 z방향에 대해서 F_y , F_z 가 각각 작용하며, 식 (1)과 같이 표현 할 수 있다.⁽⁵⁾

여기서, V 는 자기연마 입자의 체적이고, χ 는 연마입자의 자화율, H 는 자기장의 세기, $(\partial H/\partial y)$ 와 $(\partial H/\partial z)$ 는 자력선과 등전위선의 방향에서 자기장 세기에 대한 기울기를 나타낸다.

$$\begin{aligned} F_y &= V\chi H(\partial H/\partial y) \\ F_z &= V\chi H(\partial H/\partial z) \end{aligned} \quad (1)$$

Fig. 1과 같이 시편이 자력선이 형성된 자극봉 주위를 빠른 속도로 회전함에 따라 시편 내부의 연마입자는 외부에서의 강제력에 따라 자발적으로 일어나는 자성입자의 이동, 각 반지름인 자생각반 현상이 생긴다. 따라서 자력선에 의해서

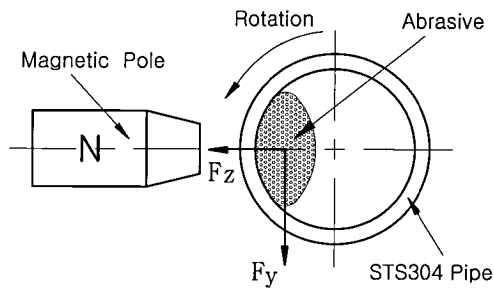


Fig. 1 Schematic for magnetic abrasive polishing of internal face in STS304 pipe

자장이 끌어당기는 힘에 의해 실린더 파이프 내면에 투입된 연마입자가 파이프 내면에 밀착되어 자기 브러시를 형성함으로써 자기연마가 진행된다.

2.2.2 자기연마 장치

본 자기연마 실험을 위한 자기력 발생장치를 설계·제작하였으며, 이 자기력 발생장치를 화천기계(주)에서 생산한 범용선반(WHL-380L)에 부착하여 자기연마 실험을 수행하였다. Fig. 2는 본 실험에 사용된 자기연마 장치의 개략도이며, Fig. 3은 자기력 발생장치가 범용선반에 장착된 모습을 보여준다. Fig. 3에 보여주는 자기력 발생장치는 최대 자속 밀도를 1.5 Tesla까지 발생시킬 수 있는 고구배 전자석으로서 D마그네틱(주)에서 설계·제작하였다. 전자석에 의한 자기력 발생장치는 자기력의 조절이 용이하여 자기력의 크기를 다양하게 변화시키면서 연마재의 자기적 특성을 고찰할 수 있는 장점이 있다. 그리고 자극과 공작물 사이의 공극(air gap)을 자유롭게 조절하기 위해서 자극이 시편의 직각방향으로 직선운동이 가능한 구조로 이루어져 있다.

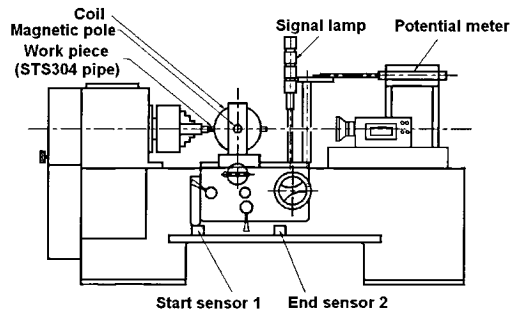


Fig. 2 Schematic of experimental set up

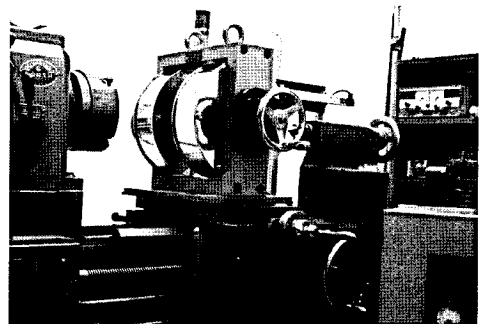


Fig. 3 Photo. of experimental equipment

Table 3 Polishing conditions

Abrasive material	Abrasive size (mesh)	Flux density (G)	Polishing speed (m/s)	Polishing time (min)
WA	1,000	1,500	0.42	1
GC	4,000	3,000	0.73	2
CBN	8,000	6,000	1.46	5

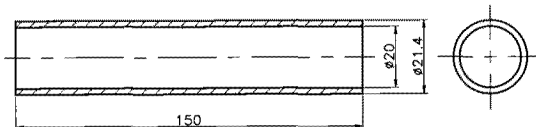


Fig. 4 Geometry and dimension of specimen

2.2.3 자기연마 가공

Ba-Ferrite를 자성체로 하여 WA, GC와 CBN 입자를 연마재로 합성하여 제조한 자기연마재를 사용하여 비자성체(STS304) 파이프의 내면을 자기연마 가공하였을 때, 자속밀도와 연마속도 등이 가공물 표면에 미치는 영향을 고찰하기 위해 Table 3과 같은 조건으로 자기연마 가공실험을 수행하였다. 본 실험에서 자기력은 Cobra3 Digital Gauss Meter로 측정하여 소요의 세기로 조절하였다. 그리고 본 자기연마 가공실험에 사용된 시편은 공기압부품의 실린더 재료로 많이 사용되는 STS304 파이프이다. 실험에 사용된 시편의 형상과 치수를 Fig. 4에 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 자기연마재의 동적거동

Fig. 1과 같이 자극에서 발생된 자기력에 의해 파이프 내면의 자기연마재에 작용하는 자기력(F_z)이 연마력의 기초가 되며, 자기연마재 입자가 파이프 내면에 대해 작용하는 상대운동이 연마특성에 직접 관계되는 인자이다. 이러한 자기연마재의 파이프 내면에 대한 상대운동 거동은 접선력(F_y)에 의해서 변화된다. 자기력과 연마속도에 따라 변화되는 자기연마재의 상대운동에 대한 거동을 고찰하기 위하여 Table 3과 같은 조건으로 자기연마가공을 수행하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 자기력 1,500G에서 각각 0.73m/s, 1.46m/s의 속도로 자기연마가공을 할 때, 파이프 내면에서 자기연마재의 상대운동 거동상태를 나타낸 것이다. Fig. 5에서 자기브러시를 형성하는 자기연마재는 자기력과 접선연마저항에 의해 파이프

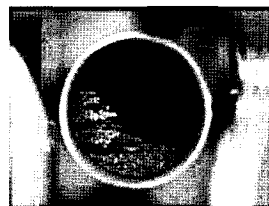
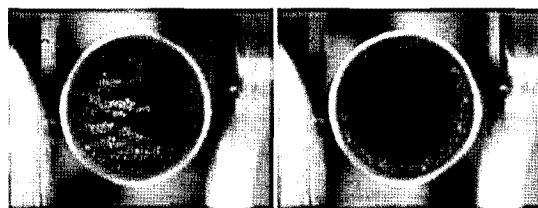


Fig. 5 Photo. of magnetic abrasive inside STS304 pipe (flux density 1,500G, polishing speed 0.73m/s)



(a) (b)

Fig. 6 Photo. of magnetic abrasive inside STS304 pipe (flux density 1,500G, polishing speed 1.46m/s)



Fig. 7 Photo. of magnetic abrasive inside STS304 pipe (flux density 3,000G, polishing speed 1.46m/s)



Fig. 8 Photo. of magnetic abrasive inside STS304 pipe (flux density 6,000G, polishing speed 1.46m/s)

내면의 가공영역을 이동하면서 연마가 끝난 입자를 뒤쪽의 새로운 입자가 자생적으로 대체하는 거동을 볼 수 있었다. 이러한 자발적으로 발생하는 자기연마재의 대체 거동에 의해 가공물 표면이 미세하게 가공되는 연마기구가 형성됨을

알 수 있다.

Fig. 6은 자기력 1,500G에서 1.46m/s의 속도로 자기연마 가공을 할 때의 사진이다. 가공 초기에는 자기연마재와 파이프가 상대운동을 하면서 연마기구를 형성하는 것 같았으나, 가공 후 약 40초 가량 경과하면서부터 (a)와 같이 원심력에 의해 접선력이 증가하여 접선연마저항이 점차 상실되면서 자기연마재가 파이프의 원주방향으로 이동되는 것을 볼 수 있으며, 이후에는 (b)와 같이 자기연마재가 파이프 내면에 대한 상대운동이 상실됨을 알 수 있었다. 이로 인하여 자기연마재는 파이프의 회전방향으로 링(ring)과 같은 형태로 파이프와 함께 회전하는 현상을 나타낸다. 이러한 현상은 자기연마재와 파이프 내면과의 상대운동을 상실시키면서 가공능률의 현저한 저하를 가져온다. 따라서 이와 같은 동적인 거동은 자기연마재가 연마를 수행할 수 있는 상대운동이 자기연마재에 작용하는 자기력의 크기와 파이프의 회전수에 따른 접선력의 크기에 따라 변화됨을 알 수 있다. 또한 Fig. 7과 Fig. 8은 각각 자기력을 3,000G, 6,000G로 하여 속도를 1.46m/s로 자기연마 가공할 때의 동적인 거동상태를 나타낸 것이다. Fig. 7과 Fig. 8에서와 같이 연마속도가 증가함에 따라 원심력이 증가하여도 자기력이 접선력을 지배하므로 자생대체현상이 활발하게 발생하여 연마기구가 형성되며, Fig. 6과 같은 링(ring)거동현상은 발생하지 않음을 알 수 있었다. 그리고 접선연마저항에 의해 축 방향으로 원과 같은 궤적을 가지고 자기연마재가 브러시를 형성하면서 회전하는 자생대체 거동이 나타남을 볼 수 있었다.

3.2 표면구조의 변화

본 실험에 사용한 STS 304는 인발(drawing)과 버니싱(burnishing) 공정을 거쳐 생산되는 비자성체 파이프이다. Fig. 9는 자기연마 가공 전(剪) STS 304 튜브 내면의 표면상태를 나타낸 것이다. 그림에서 버니싱 공정에서 생성된 표면의 ironing 흔적을 볼 수 있다. Fig. 10은 1,000mesh의 WA 입자를 사용하여 제조한 자기연마재를 이용하여 자속밀도 3,000G, 연마속도 0.73m/s, 이송속도 1.5mm/s로 5회 왕복하여 자기연마 가공한 후의 STS 304 튜브 내면의 표면을 나타내고 있다. 그림에서 자기연마로 인한 가공 결(lay)이 원주 방향으로 바뀌어 가공되었으나, 생산공정에서 발생된 ironing 흔적이 완전히 제거되지는 않았다. Fig. 11은 4,000mesh의 CBN 입자로 제조된 자기연마재를 사용하여 자속밀도 6,000G, 연마속도 0.73m/s, 이송속도 1.5mm/s로 5회 왕복하여 가공된 STS 304 튜브 내면의 표면을 나타내고 있다.

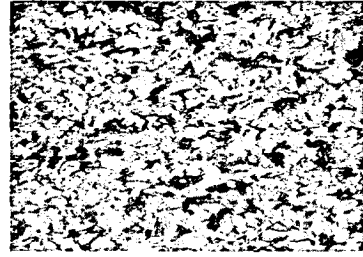


Fig. 9 Photo. of surface structure before magnetic polishing

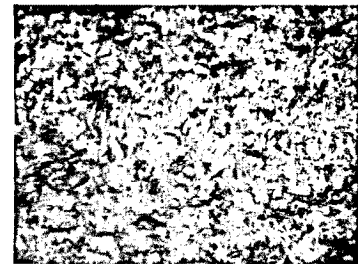


Fig. 10 Photo. of surface structure after magnetic polishing (B=3,000G, V=0.73m/s, F=1.5mm/s)

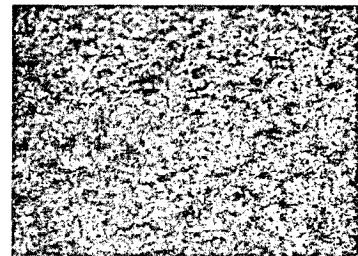


Fig. 11 Photo. of surface structure after magnetic polishing (B=6,000G, V=0.73m/s, F=1.5mm/s)

그림에서 볼 수 있는 바와 같이 자기연마로 인한 가공 결(lay)도 완전히 원주방향으로 바뀌었으며, 전(剪) 공정에서 생긴 ironing 흔적이 거의 다 제거되었음을 볼 수 있다. 이로 인하여 표면 거칠기의 현저한 향상을 가져옴을 알 수 있다.

3.3 표면거칠기의 변화

본 실험에 사용한 STS 304 파이프 내면의 평균 거칠기는 0.4~0.5 μ m Ra이다. 자기연마 가공 후의 표면거칠기 변화를 평가하기 위하여 Table 3과 같은 조건으로 자기연마 가공을 수행하였다. Fig. 12는 자기연마 가공전의 STS 304 파이프

내면의 거칠기를 보여준다. 그림의 거칠기 곡선에서 ironing으로 인하여 산(山)과 같은 피크(peak)는 거의 없으며, 골(valley)이 깊게 파인 표면 구조를 가지고 있음을 알 수 있다. 이는 표면거칠기의 향상을 위해서는 매우 많은 절삭량을 가져야만 가능함을 의미한다. 따라서 자기연마 가공을 이용한 초정밀 미세 가공을 통한 표면거칠기 향상에는 매우 불리한 표면구조를 지니고 있음을 알 수 있다.

Fig. 13은 Fig. 10과 같은 조건에서 자기연마 가공 후 표면거칠기 측정결과를 나타낸 것으로서 다소의 거칠기 향상을 가져왔음을 볼 수 있다.

Fig. 14는 Fig. 11과 같은 조건에서 자기연마 가공 후 표

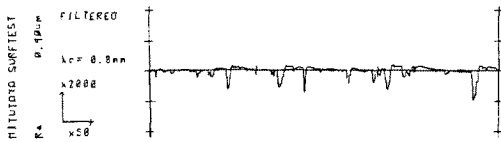


Fig. 12 Surface roughness of internal face in STS304 pipe



Fig. 13 Surface roughness after magnetic polishing (B=3,000G, V=0.73m/s, F=1.5mm/s)



Fig. 14 Surface roughness after magnetic polishing (B=6,000G, V=0.73m/s, F=1.5mm/s, CBN)



Fig. 15 Surface roughness after magnetic polishing (B=6,000G, V=1.46m/s, F=1.5mm/s, CBN)

면거칠기 측정결과를 나타낸 것으로서, 표면구조의 사진과 같이 가공 후 표면거칠기가 0.07 μ m Ra로 현저하게 향상되었음을 알 수 있다. 또한 Fig. 15는 4,000mesh의 CBN 입자로 제조된 자기연마재를 사용하여 자속밀도 6,000 G, 연마속도 1.46m/s, 이송속도 1.5mm/s로 5회 왕복하여 자기연마 가공한 STS 304 튜브 내면의 거칠기를 나타낸 것이다. 이 조건에서 자기연마 가공한 표면거칠기가 0.17 μ m Ra로 Fig. 14의 경우보다 크게 나타나는 것은 3.1절에서 자기연마재의 동적저동에 대해 언급한 바와 같이 연마속도가 증가함에 따라 원심력이 증가하여 접선연마 저항이 감소하여 가공도가 낮아짐에 기인되는 것으로 판단된다.

4. 결론

Ba-Ferrite를 자성체로 사용한 자기연마 가공을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) Ba-Ferrite 자성체를 사용한 자기연마재를 사용하여 자기연마 가공함으로써 표면거칠기를 0.07 μ m Ra까지 향상시킬 수 있었다.
- (2) 자기연마 가공 중에 자기브러시를 형성하는 자기연마재는 자기력과 접선연마저항에 의해 파이프 내면의 가공영역을 이동하면서 연마가 끝난 입자를 뒤쪽의 새로운 입자가 자생적으로 대체되며, 자기연마재가 브러시를 형성하고 회전하면서 교반(攪拌)되는 거동이 나타남을 볼 수 있었다.
- (3) 비교적 낮은 자속밀도에서 연마속도를 빠르게 가공할 경우 원심력에 의해 접선연마저항이 점차 상실되면서 자기연마재는 파이프의 회전방향으로 링(ring)과 같은 형태를 이루며 파이프와 함께 회전하는 현상을 나타낸다.
- (4) 가공물 표면의 피크(peak)와 골(valley)의 높이가 일정한 형태를 가진 표면구조의 피가공물을 자기연마 가공할 경우 연마효율은 더욱 향상될 것으로 기대된다.

참고 문헌

- (1) Shinmura, T. and Aizawa, T., 1987, "Study on Internal Finishing of a Non-ferromagnetic Tubing by Magnetic Abrasive Machining Process," *Journal of JSPE*, Vol. 54, No. 4, pp. 767~773.
- (2) Shinmura, T. and Yamaguchi, H., 1993, "Study on a

- New Internal Finishing Process by Applying Magnetic Abrasive Machining,” *Journal of JSME*, Vol. 59, No. 560, pp. 293~299.
- (3) Shinmura, T., Hamato, Y., and Yamaguchi, H., 1998, “A New Precision Deburring Process for Inside Tubes by the Application of Magnetic Abrasive Machining,” *Journal of JSME*, Vol. 64, No. 620, pp. 312~318.
- (4) Anzai, M., Sudo, T., and Nakagawa, T., 1991, “Development of Magnetic Abrasive and It’s Finishing Characteristics,” *J. SEISAN KENKYU*, Vol. 43, No. 11, pp. 13~22.
- (5) Anzai, M. and Nakagawa, T., 1993, “Improve the Efficient of Magnetic Finishing,” *J. SEISAN KENKYU*, Vol. 45, No. 12, pp. 816~820.
- (6) Kim, H. N., Yun, Y. K., and Shim, J. W., 2002, “Super Precise Finishing of Internal-face in STS304 pipe Using The Magnetic Abrasive Polishing,” *Journal of the Korean Institute of Industrial Safety*, Vol. 17, No. 3. pp. 30~35.
- (7) Kim, H. N., Yun, Y. K., Kim, S. B., Choi, H. S., and Ahn, H. J., 2004, “Development of The Magnetic Abrasive Using Sludge,” *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 19, No. 2, pp. 6~10.
- (8) Kim, H. N., Yun, Y. K., Kim, S. B., and Choi, H. S., 2004, “Magnetic Abrasive Polishing for Internal Face of Seamless Stainless Steel Tube Using Sludge Abrasive Grain,” *Transactions of KSAE*, Vol. 12, No. 6, pp. 151~157.
- (9) Kim, H. N. and Yun, Y. K., 2008, “Development of The Magnetic Abrasive Using Ba-Ferrite and GC, CBN,” *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 23, No. 5, pp. 43~48.