

Sr-Ferrite와 GC를 이용한 자기연마재 개발

윤여권[†] · 김상백^{*} · 김희남^{**}

유한대학 기계설계과 · ^{*}명지대학교 대학원 · ^{**}명지대학교 기계공학과
(2010. 5. 27. 접수 / 2011. 4. 8. 채택)

Development of the Magnetic Abrasive Using Sr-Ferrite and GC

Yeo-Kwon Yun[†] · Sang-Baek Kim^{*} · Hee-Nam Kim^{**}

Department of Mechanical Design, Yuhan University

^{*}Graduate School of Mechanical Engineering, Myongji University

^{**}Department of Mechanical Engineering, Myongji University

(Received May 27, 2010 / Accepted April 8, 2011)

Abstract : The magnetic polishing is the useful method to finish using magnetic power of magnet. That method is one of precision polishing techniques and has an aim of the clean technology using for the pure of gas and inside of the clean pipe. The magnetic abrasive polishing method is not so common for machine that it is not spreaded widely. There are rarely researcher in this field because of non-effectiveness of magnetic abrasive. Therefore, in this paper deals with development of the magnetic abrasive using Sr-Ferrite. In this development, abrasive grain GC used to resin bond fabricated low temperature. And Sr-Ferrite of magnetic abrasive powder fabricated that Sr-Ferrite was crushed into 200 mesh. The XRD analysis result show that only GC abrasive and Sr-Ferrite crystal peaks detected which explains resin bond was not any more chemical reaction. From SEM analysis it is found that GC abrasive and Sr-Ferrite were strong bonding with each other by bond. The magnetic polishing is performed by polishing the surface of pipe by attracting magnetic abrasives with magnetic fields. This can be widely applied for finishing machinery fabrications such as various pipes and for other safety processes. In this paper, we could have investigated in to 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 : Sr-ferrite, magnetic, polishing, abrasive, GC(green carborundum)

1. 서론

산업의 첨단화에 따라서 기존산업의 바탕위에 신 성장 분야의 산업도 괄목할 발전을 거듭하고 있다. 더불어 여러 산업분야에서 고정밀도, 고정정과 친환경적인 제품을 요구됨에 따라 높은 정밀도, 청정도, 친환경적 생산방식이 요구된다.

일반적으로 파이프의 내면을 가공하기위한 연삭 가공은 스톨이 공작물 표면에 연삭력이 작용하는 방법이다. 이로 인해 가공시 절삭력에 의해 가공물에 변형이 발생하고, 파이프 길이가 길어지면 파이프와 스톨차축의 치짐, 진동으로 인하여 가공물의 정밀도가 떨어지게 된다. 이러한 가공 트러블이 발

생하여 스톨파괴로 인한 산업재해 및 생산비용 상승이 발생할 수 있다.

또한 가공된 파이프 내면에 가공흔적이 남게 되어 표면 요철에 불순물이 존재할 가능성이 있고 그 불순물로 인하여 파이프 내면에 각종 오염문제가 발생할 수 있다. 제품에 높은 정밀도와 청정도를 실현하는 방법으로 전해연마가 활용되고 있으나, 복잡한 공정으로 인한 가공비용 상승과 폐전해액 등의 폐기물 처리와 직경이 작은 파이프에서는 불균 일한 연마의 문제점이 있다. 따라서 이를 보완할 수 있는 저렴하고 친환경적인 가공법이 필요하게 되었다. 이런 문제점을 해결하기 위한 여러 방법을 찾던 중 자기연마법을 이용하여 고정밀도와 고정정도의 제품 가공방법과 사용 후 폐기물을 재활용할 수 있는 부분에 적용하고자 연구하게 되었다.

[†] To whom correspondence should be addressed.
yunyk@yuhan.ac.kr

이러한 자기연마에 관한 연구는 자기연마 장치에 대한 연구, 자기연마에 사용될 자기연마재의 개발, 자기연마에의 활용 부분으로 나눌 수 있다.

Anzai¹⁴⁾는 자력을 이용한 티탄 평판의 경면연마에서 자기연마법이 가지고 있는 우수한 성질을 비자성재료에 적용하고, 독자적으로 개발한 자성분말을 사용하여 비교적 연마가 어려운 순 티탄 박판을 가지고 실험하여 자기연마법에 의한 기초적인 Ti의 연마특성에 대해서 조사하였다. 자기연마용 입자의 신제조 기술과 연마특성을 검토하기 위해서 자기연마법과 개발한 연마입자의 연마특성을 연구하였으며, 본 연구에 연마 메카니즘²⁾을 적용하였다.

Shinmura⁵⁻¹²⁾는 자극회전 방식을 사용한 새로운 연마장치를 제작하여 연마거동에 미치는 영향을 살펴보고 있으며, 다양한 부품에 적용할 수 있는 자기장치와 자극형상을 구상하여 자기연마 장치를 고안하는 등 다양한 연구가 이루어져 왔다. 또한 국내에서도 고정정 및 고정도가공에 자기연마법을 적용하기 위한 다양한 연구¹³⁻¹⁵⁾가 이루어져 왔다.

현재 수입되는 고가의 합금 파이프를 한번 사용한 후에 그냥 폐기하는 것은 경제적인 낭비요인이 되며, 실제 현장에서 재활용에 대한 요구가 증가하고 있다. 그중에서 티타늄 파이프는 사용 후 전량 스크랩으로 수출되거나 국내에서 합금을 만들기 위한 티타늄 스크랩으로 가공되어 사용되어지는 실정이다. 그런데 이런 스크랩은 부가가치가 낮기 때문에 경제성이 떨어지게 된다. 이러한 고가의 원소를 함유한 파이프를 재가공하여 재활용할 수 있다면 더 높은 부가가치를 창출할 수 있어 경제적으로 도움이 될 수 있을 것으로 기대된다. 파이프를 재활용함으로써 수입에 의존하는 티타늄의 수입량을 줄일 수 있어 외화절감과 티타늄 관련 산업의 원가 절감에 도움이 될 것으로 예상된다.

자기연마법은 전해연마와 화학연마의 문제점인 고비용과 폐 전해액의 처리의 어려움을 해소하고 고정밀도, 청정도, 친환경생산, 파이프의 재사용 등의 요구를 해결할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 티타늄 파이프 내면의 자기연마에 사용할 목적으로 Sr-Ferrite 자성체로 하고 연마입자로 GC(Green Carborundum)입자를 사용한 자기연마재 제조에 관한 연구를 수행하였다.

제조된 자기연마재에 대한 미세구조분석을 통해 연마가공에 적합한 형태인지를 평가하고, 성분 변화 여부를 XRD(x-ray diffraction)분석을 통하여 성분 변화 여부를 판단하였다. 또한 티타늄 파이프에

대한 기본적인 자기연마가공 실험을 통해 최적의 연마재 입도를 찾고자하였다. 이를 통해 자기력과 가공속도의 변화에 따른 연마재의 동적거동이 연마특성에 미치는 영향을 고찰하여 보다 안전한 방법으로 우수한 표면을 얻기 위한 효율적인 가공법으로의 가능성을 평가하는데 목적이 있다.

2. 자기연마재 제조 및 실험

2.1. 자기연마재 제조

자기연마재의 구성요소 중 자성재료로 사용한 Sr-Ferrite($SrFe_{12}O_{19}$)는 자기적 특성이 안정화되어 있고 가격이 저렴하며 구입이 용이한 장점이 있다.

연마입자로 사용한 GC는 경도가 높고 취성이 있어서 새로운 연마입자로의 자생이 용이하므로 고강도강 등의 연마에 적합한 특징이 있다. 입도 변화에 따른 자기연마재의 제조특성과 가공성을 평가하기 위하여 220, 320, 400 mesh의 GC 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. 이와 같이 액상수지를 결합제로 혼합된 자기연마재 원료를 일축나선형식으로 가압하여 성형한 연마재를 185℃의 온도에서 2시간 동안 합성하였다. 자기연마재는 분쇄과정을 거쳐 평균입자 1~2 mm의 크기로 선별하여 자기연마 가공에 사용하였다. 자기연마재의 제조과정 중 소결되는 과정에서 공정상의 영향과 결합제와의 화학반응 등을 통해서 성분 및 구성 비율 등의 변화를 알아보기 위해 XRD를 이용하여 성분 분석을 실시하였다.

2.2. 자기연마 기구

Fig. 1은 자기력 발생장치에 전원을 공급하여 자극봉에 감겨진 코일에 형성된 자기력이 파이프 내부의 자기연마재를 끌어당김으로써 자기브러시가 형성되는 연마기구를 도식적으로 나타낸 것이다.

Table 1. Composition of magnetic abrasive

Magnetic material	Grain size (GC, mesh)	Mixture ratio (Sr-Ferrite:GC)	Resin (mL/g)	Composition temperature
Sr-Ferrite ($SrFe_{12}O_{19}$)	220	2:1	0.15	185℃
	320			
	400			

파이프를 회전시키면 자기연마 입자는 x방향과 y방향에 대해서 F_x, F_y (F = 합성력)가 각각 작용하며 식 (1)과 같이 표현²⁾할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_x &= V\chi H(\partial H/\partial x) - RF \cdot \mu \sin\theta \\ F_y &= V\chi H(\partial H/\partial y) - RF \cdot \mu \cos\theta \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, V 는 자기연마재의 체적이고, x 는 자기연마재의 자화율, H 는 파이프내면에서 자기장의 세기, $(\partial H/\partial x)$ 와 $(\partial H/\partial y)$ 는 자력선과 등전위선의 방향에서 자기장 세기에 대한 기울기이고, RF 는 파이프의 접선방향 분력, μ 는 파이프 표면 마찰계수, θ 는 y방향과 RF 접선방향의 사이 각을 나타낸다. Fig. 1과 같이 시편이 자력이 형성된 자극봉 주위를 빠른 속도로 회전함에 따라 시편 내부의 자기연마재는 외부에서 당기는 힘에 따라서 자발적으로 일어나는 자성입자의 원형이동, 즉 연마재의 순환대체 현상이 생긴다. 따라서 연마력은 자력선에 의해서 자장이 끌어당기는 힘에 의해 파이프 내면에 투입된 연마입자가 파이프 내면에 밀착되어 자기 브러시를 형성하고 파이프 회전에 의해서 자기연마재가 순환대체 현상이 발생하면서부터 자기연마가 진행된다. 식 (1)의 물리적 의미는 자기연마재가 받는 자력은 자기연마재 자체에 의한 영향과 자장분포에 의한 영향으로 크게 나뉘고, 파이프 내면에 미치는 연마력을 높이기 위해서는 자기연마재의 자기력 특성을 높이는 방법과 파이프 회전속도를 높이는 방법과 재료의 마찰계수를 조절하는 방법이 있다.

또한 자기력 발생장치의 자기장의 세기를 높여서 자극과 자기연마재 사이의 흡인력을 강화시켜서 파이프 내면에 연마력을 증가시킬 수 있다.

2.3. 자기연마 장치

자기력 발생장치는 자기연마 성능을 결정짓는 중

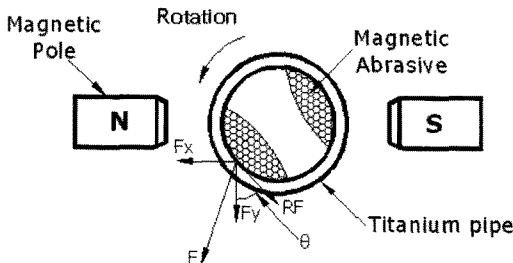


Fig. 1. Schematic for magnetic abrasive polishing of internal-face in Titanium pipe.

요한 요소 중 하나이다. 또한 적절한 자극의 형상과 배치는 자기연마가공에서 큰 영향을 미친다.

전자석을 이용한 자기력 발생장치는 구조가 복잡하고 제작비용이 높으며 전압의 변환장치 등이 필요한 단점이 있으나, 가공물의 특성에 따라 자기력을 조절할 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 실험에서는 전자석을 이용한 자기력 발생장치를 사용하였다. Fig. 2는 본 실험에 사용한 자기력 발생장치이다. 본 자기력 발생장치는 전자석 문제점의 하나인 코일에서 발생하는 열을 최소화하기 위해 코일 주변부에 냉각장치를 부착하여 열로 인한 자기력감소를 최소화하여 생산현장에서 적용이 가능하도록 하였다. 그리고 자기력 발생장치는 N-S극이 서로 마주보게 배치되어 있으며, 고구배 전자석으로 구성되어 있다. 또한 자극과 공작물 사이에 공극(air gap)을 자유롭게 조절할 수 있도록 자극이 시편의 원주방향으로 직선운동이 가능한 구조로 되어 있으며, N-S극을 근접하였을 때 최대 자속 밀도는 1.5 Tesla까지 발생시킬 수 있도록 제작하였다.

Fig. 3은 자기연마장치의 개략도로서 코일과 물탱크를 연결하는 파이프 중간에 펌프를 설치하여 냉각수가 지속적으로 순환이 되는 구조로 설계·제작하였다.

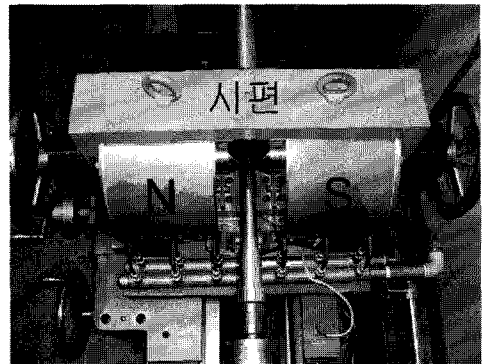


Fig. 2. Photograph of magnetic force generator.

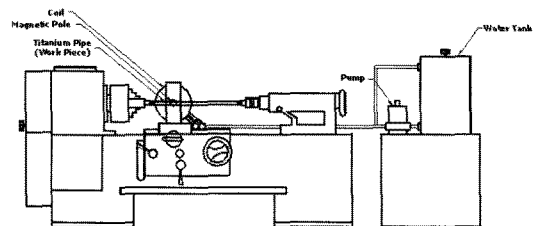


Fig. 3. Lay-out of magnetic abrasive system.

2.4. 자기연마 가공

자기연마 가공을 하기위한 구동장치로서 가공조건
의 다양성 부여와 일반화를 목적으로 범용선반
(화천WHL-380L)의 주축대와 왕복대를 개조하여
사용하였다. Fig. 4는 자기연마 장치를 보여주며, 자
기력 발생장치는 선반의 왕복대 위에 설치하여 자
극봉이 시편의 축 방향으로 이송이 가능한 구조로
장착하였다. 그리고 시편을 장착하기위한 장치는
알루미늄으로 제작하여 선반의 척과 심압대로의
자기력 손실을 최소화할 수 있도록 하였다.

Fig. 5에 시편으로 사용된 티타늄 파이프의 형상
과 치수를 나타내었다. 자기연마 가공 전의 파이프
내면의 거칠기는 평균 0.45 μmRa 이며, Table 2와
같은 조건으로 자기연마가공을 실시하여 자속밀도
와 이송속도가 표면거칠기와 자기연마재의 거동에
미치는 영향을 고찰하였다. 그리고 Fig. 5와 같은 시
편을 범용선반 단동척과 심압대의 고정장치에 설
치하여 파이프 외면과 자극봉 사이의 공극을 2 mm
로 맞춘 다음, 파이프 내에 자기연마재를 4 g 투입
하여 자기연마 가공을 수행하였다.

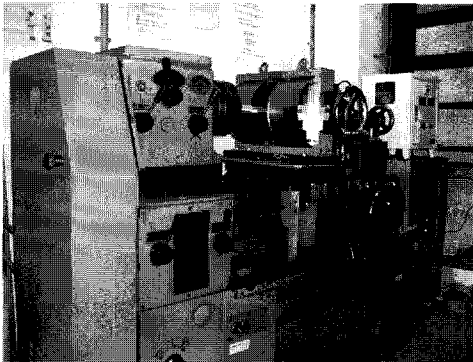


Fig. 4. Photograph of experimental set up.

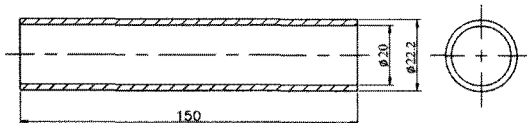


Fig. 5. Geometry and dimension of specimen.

Table 2. Magnetic polishing conditions

Polishing speed (m/min)	Magnetic flux density (G)	Feed rate (mm/rev)	Grain size (GC, mesh)	Pass number
20.7	1500		220	1
30.8	3000	0.15	300	
44.0	3000	0.55	400	
50.9	6000			

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 자기연마재의 성분 및 구조

Fig. 6은 Sr-Ferrite와 입도 400메시의 GC를 합성
하여 제조한 자기연마재에 대한 XRD 분석 결과를
보여준다. XRD 성분검사는 30 mA, 40 kV의 상태
에서, 주사속도 1.8°/min의 조건으로 실시하였다.

그림과 같이 자기연마재에서 Sr-Ferrite와 GC외
에 다른 성분의 피크(peak)는 나타나지 않았으므로
제조과정에서 결합제와의 화학반응으로 인한 성분
변화는 발생하지 않았음을 알 수 있었다. Fig. 7은
제조공정을 거쳐 제조된 자기연마재의 결합상태와
표면구조 등을 알아보기 위해서 SEM(Scanning Elec
tro Microscope)을 이용하여 미세구조를 살펴본 사
진이다. 그림에서와 같이 Sr-Ferrite자성체가 GC연
마입자가 균일하게 결합제를 통해 강한 결합이 이
루어진 것을 볼 수 있다. Fig. 8은 일정 가공조건에
의하여 자기연마 가공이 끝난 후 SEM을 통한 자
기연마재의 미세구조 상태를 나타낸 것이다.

Fig. 7과 Fig. 8에서와 같이 자기연마재가 분쇄
되는 공정과 연마재가 탈락하는 경우에 균열의 경
로가 결합제를 통해 발생하는 것을 볼 수 있다.

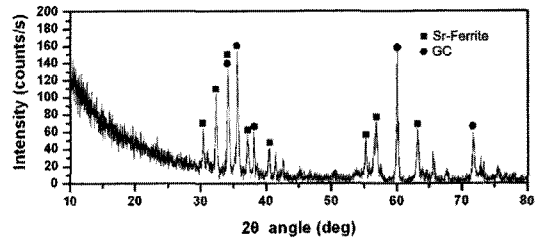


Fig. 6. XRD component analysis results.

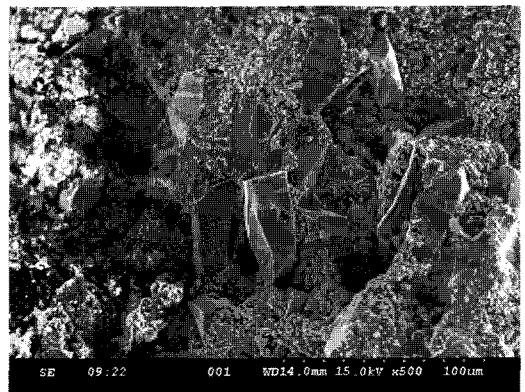


Fig. 7. SEM picture of magnetic abrasives in Non-MAP(Sr-Ferrite : GC = 2 : 1).

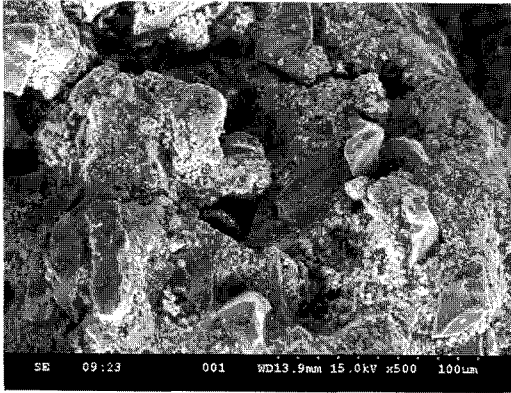
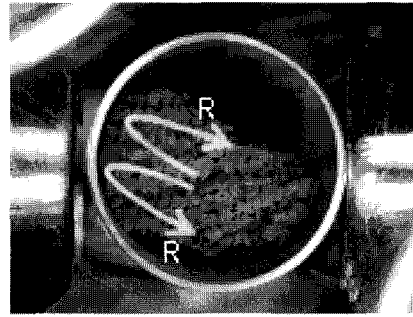


Fig. 8. SEM picture of magnetic abrasives in MAP(Sr-Ferrite : GC = 2:1).

이것은 강력한 자기력의 발생에 의해 자기연마재가 브러시를 형성하면서 가공 중에 입자의 마모, 탈락, 생성의 자생작용을 함으로써 연마능력을 지속적으로 유지할 수 있는 것으로 판단된다.

3.2. 자속밀도와 연마재 입도의 영향

Fig. 9는 자기력을 인가하여 브러시를 발생시키고 파이프를 44 m/min의 가공속도로 회전시키면서 자기연마가공 중에 있는 동적인 상태를 고속카메라를 이용하여 촬영한 사진이다. Fig. 9의 (a)에서와 같이 자기연마재 브러시의 동적인 거동을 살펴보면, 파이프 내면에서 처음 접촉하여 가공을 마친 연마재는 R방향으로 이동하고 뒤쪽의 새로운 연마재가 가공을 수행하는 반복적인 연마재 대체거동을 살펴볼 수 있다. Fig. 1과 Fig. 9를 비교해 보면 자극에서 발생하는 자기력에 의해 자기연마재에 작용하는 힘(Fx)이 연마력의 기초가 되어 자기연마재 입자의 파이프 내면에 대한 상대운동이 연마특성에 직접 관계되는 인자이다. 이러한 자기연마재의 파이프 내면에 대한 상대운동 거동은 접선력(RF)와 Fy에 의해서 변화된다. 따라서 Fig. 9와 같이 가공속도가 동일할 때 자속밀도가 증가할수록 시편내의 자기브러시도 강하게 형성되는 것을 볼 수 있었다. 또한 시편 내에서 자기브러시를 형성하는 자기연마재는 자기력과 접선연마저항에 의해 파이프 내면의 가공영역을 이동하면서 연마가 끝난 입자를 뒤쪽의 새로운 입자가 자생적으로 대체하는 거동을 볼 수 있었다. 이것은 자기력에 의해 발생하는 자기연마재의 대체 거동이 발생하게 되고 가공물 표면이 미세하게 가공되는 연마가 이루어짐을 알 수 있다.



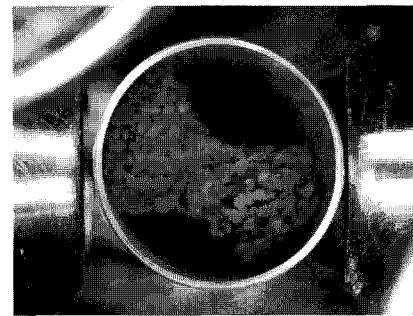
(a) 1,500 G dynamic state



(b) 3,000 G dynamic state



(c) 4,500 G dynamic state



(d) 6,000 G dynamic state

Fig. 9. Photograph of magnetic brush.

이것은 가공속도가 증가하여 접선방향 회전력이 증가되어도 자기력이 접선력을 지배하므로 자기연마재의 자생 대체현상이 활발하게 발생하여 연마가공이 수행됨을 의미한다. 또한 자기연마재는 축

방향으로도 원과 같은 궤적을 그리며 자기브러시를 이루는 연마입자가 회전하는 거동이 나타남을 볼 수 있었다. Fig. 10의 (a)와 (b)는 연마입자의 크기와 자속밀도의 변화에 따른 표면거칠기의 변화를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 연마속도, 자속밀도, 이송속도가 동일할 때 연마재의 입도가 커지게 되면 표면거칠기가 저하되는 것을 알 수 있다.

연마재의 입도가 커지면 자기연마재에 함유된 연마재의 입자의 양은 상대적으로 적어진다. 같은 무게의 연마재를 보면 입자의 크기가 커지는 것은 수량이 작아지는 것이며, 자기연마재 표면에서 보면 단위 연마입자당 연마할 수 있는 가공량이 줄어들게 되어 표면거칠기가 저하되는 것으로 판단된다. 또한 연마입자의 크기가 동일할 때, 자속밀도가 증가하게 되면 연마력의 기초가 되는 힘(Fx)이 커져 가공도가 향상되어 표면거칠기가 좋아지며, 이송속도가 빨라지면 새로운 표면을 생성시키는 가공접촉시간이 충분하지 못하여 표면거칠기가 저

하되는 것으로 판단된다. 향후 본 연구를 통해 제조한 자기연마재를 이용하여 다양한 가공조건으로 티타늄 등 여러 가지 비자성체 재료에 대한 가공 실험을 통해 본 연마재의 가공특성을 더 깊게 고찰할 필요가 있다.

4. 결론

자성체로 Sr-Ferrite를 사용하고 연마입자로 GC를 합성하여 제조한 자기연마재 개발에 대한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) Sr-Ferrite자성체로 사용하고 연마입자로 GC를 저온 합성하여 제조한 자기연마재에 자기력을 인가하면 강력한 자기 브러시를 형성하며 Ti파이프 내면을 가공할 수 있었다.
- 2) 제조된 자기연마재에 대한 성분분석 결과 화학적인 변화는 발생하지 않았으며, 미세구조 분석을 통해 자기연마재의 분쇄 균열 경로가 결합체를 통하여 이루어짐을 알 수 있었다.
- 3) 자기연마 가공을 진행하면 자기연마재는 자기 브러시를 형성하고, 자극 봉의 이송방향을 따라가며 파이프의 축 방향으로 원과 같은 형태의 궤적을 가지고 회전하면서 입자가 반복 교체되는 거동을 나타낸다.
- 4) 자속밀도, 이송속도가 동일할 때, 연마입자의 입도가 커지면 자기연마재에 함유된 연마재의 입자의 양은 상대적으로 적어지게 되고, 단위 입자당 가공량이 감소되어 표면거칠기가 저하된다.

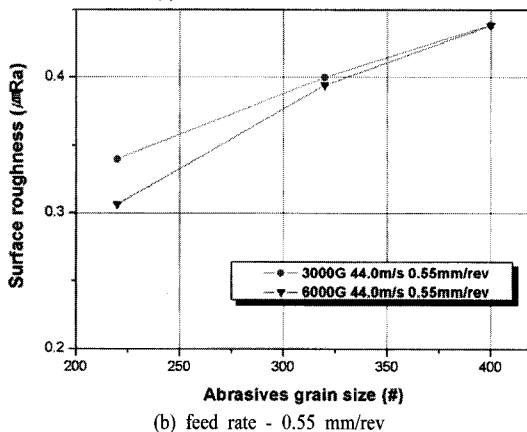
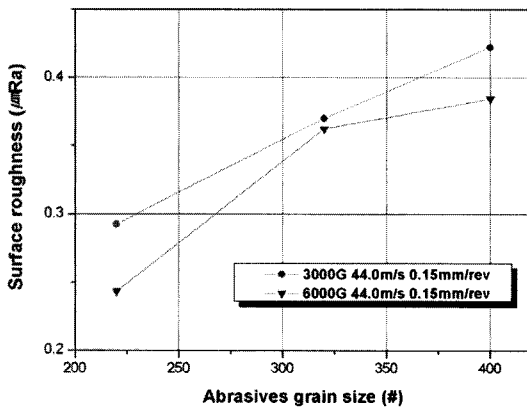


Fig. 10. Surface roughness due to abrasive grain size and magnetic flux density.

참고문헌

- 1) Masahiro Anzai, Hiroshi Endo, Toru Sudo and Takeo Nakagawa, “磁氣を利用した チタン板の鏡面研磨(자기를 이용한 티탄 판의 경면연마)”, 鐵と鋼, Vol. 78, No. 2, pp. 141~143, 1992.
- 2) Mashahiro Anzai, Toru Sudo and Takeo Nakagawa, “磁氣研磨用砥粒の新製造技術とその研磨特性(자기연마용 지립의 신제조기술과 그 연마특성)”, 生産研究, Vol. 43, No. 11, pp.13~22, 1991.
- 3) Mashahiro Anzai, Takeo Nakagawa, “磁石を利用した金型磨き自動化の試み(자석을 이용한 금형마무리 자동화의 시도)”, 機械と工具, Vol. 40, No. 6, pp. 41~46, 1992.
- 4) Yong Chul Lee, Mashahiro Anzai and Takeo Nakagawa, “A study on Improving the Efficiency of Mag-

- netic Abrasive Polishing for Die & Mold Surfaces”, Journal of the KSPE, Vol. 13, No. 6, pp. 59~65, 1996.
- 5) Takeo Shinmura, Eiju Hatano and Koya Takazawa, “平面磁氣研磨裝置の開發とその研磨性能 (평면자기연마장치의 개발과 연마성능)”, Journal of JSPE, Vol. 52, No. 6, pp. 148~154, 1986.
 - 6) Takeo Shinmura, “磁氣研磨法による曲面の平滑加工に関する研究(第1報, 基礎實驗) (자기연마법에 의한 곡면의 평활가공에 관한 연구)”, Journal of JSME, Vol. 53, No. 485, pp. 202~208, 1987.
 - 7) Takeo Shinmura, Eiji Hauano, and Koya Takazawa, “磁氣研磨法を利用した Spindle-finish方式研磨裝置の開發とその研磨性能 (자기연마법을 이용한 Spindle-finish 방식 연마장치의 개발과 연마성능)”, Journal of JSPE, Vol. 53, No. 2, pp. 263~268, 1987.
 - 8) Takeo Shinmura, “磁氣研磨法とその應用 (자기연마법과 응용)”, 機械の研究, Vol. 40, No. 10, pp. 47~52, 1988.
 - 9) Takeo Shinmura, “円筒磁氣研磨法 (원통자기연마법)”, 機械技術, Vol. 44, No. 8, pp. 108~112, 1996.
 - 10) Takeo Shinmura, Yoshitaka Hamato and Hitomi Yamaguchi, “磁氣研磨法による 内面の精密バリ取りに関する研究(第1報) (자기연마법에 의한 내면의 정밀 거스러미 제거에 관한 연구)”, J. of JSME, Vol. 64, No. 620, pp. 312~318, 1998.
 - 11) Hitomi Yamaguchi, Takeo Shinmura and Tafehiro Kaneko, “Development of a New Internal Finishing Process Applying Magnetic Abrasive Finishing by Use of Pole Rotation System”, Int. J. Japan Soc. Prec. Eng, Vol. 30, No. 4, pp. 317~322, 1996.
 - 12) Hitomi Yamaguchi, Takeo Shinmura, Atsuchi Kobayashi, “Development of an Internal Magnetic Abrasive Finishing Process for Nonferromagnetic Complex Shaped Tubes,” JSME International Journal, Series C, Vol. 44, No. 1, 2001.
 - 13) 김희남, 윤여권, 심재환, “자기연마를 이용한 STS 304 파이프 내면의 초정밀 가공”, Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 17, No. 3, pp. 30~35, 2002.
 - 14) 김희남, 윤여권, 김상백, 최희성, 안효중, “Sludge를 이용한 자기 연마재 개발”, Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 19, No. 2, pp. 6~10, 2004.
 - 15) 김희남, 윤여권, 김상백, 최희성, “슬러지 연마입자를 이용한 이음매 없는 스테인리스강 튜브 내면의 자기연마” Transactions of KSAE, Vol. 12, No. 6, pp. 151~157, 2004.