

STS304 파이프 내면의 초정밀 자기연마

김희남 · 윤여권* · 심재환*

명지대 기계공학과 · *명지대 기계공학과 대학원

1. 서론

산업의 급속한 발달과 함께 초정밀 가공분야의 신기술 개발이 활발히 진행되고 있다. 최근 자동화 기계, 반도체, 원자력, 의료장비, 항공우주 산업 등의 분야에 사용되는 파이프와 실린더 등의 내면을 정밀하고 신속하게 가공하는데 있어서 여러 가지 기술적인 어려움으로 인해 기계 장비 및 가공효율을 저하시키는 요인이 되고 있다.^{2),3),4)}

선진국에서는 파이프 또는 실린더 내면의 경면과 초정밀 가공에 있어서 가공효율을 높이기 위하여 자력을 이용한 자기연마법과 버어니싱을 활용하고 있는 예가 있으나, 국내에서는 아직 초보적인 단계에 머무르고 있는 실정이다. 이러한 자기연마법 등을 이용한 초정밀 가공분야의 신기술 개발은 기존의 비효율적인 생산방식을 탈피하여 생산효율의 극대화과 더불어 국가의 산업기술 경쟁력을 재고함에 목적이 있다. 특히, 본 실험에서 사용한 파이프는 자동화기계의 공압 실린더로 쓰이는 STS304를 사용하였다.

본 논문은 기존의 공압 실린더의 주된 마무리 가공법인 내면 버핑에 대한 효율적인 대체 가공법으로서 자기연마에 대한 건식연마법과 습식연마법의 실험을 수행하였다.

또한 본 실험에서는 기존의 자기연마법에 사용한 연마입자인 산화철과 알루미나를 이용하여 화학적인 방법으로 제조한 자성입자 또는 WA, CBN과 같은 고가의 연마입자를 대체하여 산업현장에서 저가로 쉽게 구입할 수 있는 WC-TiC-TaC/Co를 연마입자로 선택하여 실험을 수행하였다.

따라서 본 연구는 기존의 범용 공작기계에 부가적인 장치를 추가함으로써 기존의 내면 연마 후에 수반되는 이 물질에 의한 환경적인 요인을 없애고, 저가의 입자를 이용한 자기연마에 있어서 효율적인 가공조건을 찾으며, 가공에 있어서 안전성을 크게 도모하는 것을 목적으로 한다.

2. 자기이론 메카니즘

Fig.1은 자기연마장치의 자극봉과 연마입자가 자기브러쉬를 형성한 상태를 나타낸 것으로서 STS304 파이프의 좌측에 N극을 가진 자극봉을 설치하였다. 자기연마는 외부에서 전원을 공급받아 자극봉에 감겨진 코일에 전원을 인가하면 자기력이 형성되고, 이러한 자극에 의해서 발생한 자기력은 연마입자를 끌어당겨 파이프 내면을 연마하게 된다. 자기력이 발생하면 연마입자는 x방향과 y방향에 대해서 F_x , F_y (F =합성력)가 각각 작용한다. F_x , F_y 의 성분은 식 (1)과 같이 표현 할 수 있다.

$$F_x = V\chi H(\partial H/\partial x) \quad F_y = V\chi H(\partial H/\partial y) \quad (1)$$

여기서, V 는 자기연마 입자의 체적이고, λ 는 연마입자의 자화율, H 는 자기장의 세기, $(\partial H/\partial x)$ 와 $(\partial H/\partial y)$ 는 자력선과 등전위선의 방향에서 자기장 세기에 대한 기울기를 나타낸다. 건식연마법에서는 Fig. 1과 같이 시편은 자력선이 형성된 자극봉 주위를 빠른 속도로 회전함에 따라 시편 내부의 연마입자는 외부에서의 강제력에 따라 자발적으로 일어나는 자성입자의 이동, 각반거동인 자생각반 현상이 생긴다.

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

그러나 습식연마법에서는 그러한 자생각반현상이 생기지 않는다.

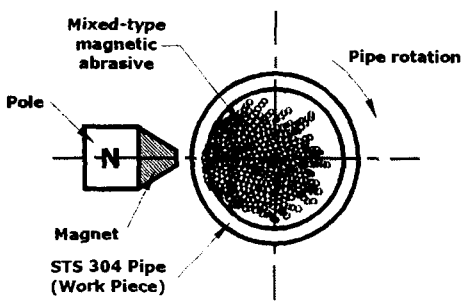


Fig. 1 Schematic for magnet abrasive finishing of internal face in STS304 pipe

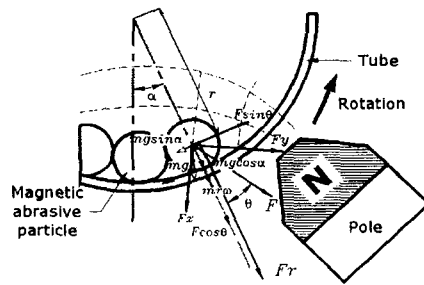


Fig. 2 Component of forces acting on magnetic abrasive particle

Fig. 2는 자기연마장치에서 자기력이 발생할 때 자극봉과 연마입자를 도식화한 것으로서 STS304 파이프 외측의 N극에 자기력을 인가할 때 힘의 역학적인 관계를 나타낸다. 자기연마의 수직 연마력 F_r 은 수직 자기력의 합성력으로 평가된다. 연마입자의 회전운동에 따라 관성력과 중력이 발생하며 식 (2)와 같이 표현된다.

$$F_r = F \cos \theta + m r \omega^2 + m g \cos \alpha \quad (2)$$

여기서, m 은 자기연마입자의 질량이고, r 은 연마입자에서 파이프 중심까지의 거리, ω 는 각 속도, g 는 중력가속도, α, θ 는 Fig. 2에서 연마입자가 위치한 각도를 표시한다. 연마력 비는 λ 로 나타내며 접선 연마력 f_t 는 식 (3)과 같이 주어진다.

$$f_t = \lambda F r \quad (3)$$

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

3.1.1 자기연마장치 및 기구

본 실험의 자기연마 장치를 위해 사용된 범용선반은 화전기계(주)에서 제작한 Model WHPL-380L을 사용하였다. Fig. 3은 본 실험에 사용된 자기연마 장치의 외관을 나타내었다.

자기연마기구는 자속밀도와 자기력을 향상시키기 위하여 다양한 형상으로 시험과 검토를

한 후 제작하였다. 자극봉의 재질은 SM45C를 사용하였으며, 코일은 $\phi 1\text{mm}$ 우레탄 피복동선을 사용하여 자기 연마시 발생하는 저항열에 충분히 견딜 수 있도록 설계하였다. 자극의 세기와 자속밀도를 높이기 위해서 자극봉 표면을 절연한 후 감김수를 8500회로 하여 감았다.

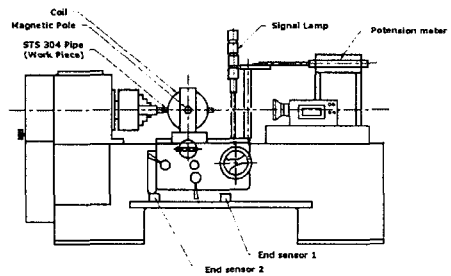


Fig. 3 Schematic diagram of experimental set up

3.1.2 연마입자

본 실험에 사용된 연마재는 WC-TiC-TaC/Co로서 입자의 크기는 $150\mu\text{m}$ 와 $250\mu\text{m}$ 를 사용하였다. WC-TiC-TaC/Co는 초경재료로서 인성이 있으며, 자성합금이다.

3.1.3 측정장치

- 자기력 : PHYWE SYSTEME GMBH
Measuring module. Tesla Cobra3,
Hall probe
- 표면거칠기 측정기
: Surftest-402(Mitutoyo)

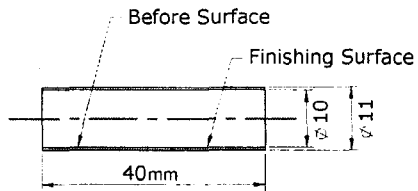


Fig. 4 Geometry and dimension of STS304 test specimen

3.1.4 시편

시편재료는 자동화 시스템을 구성하는 공압 기기 부품인 이음매 없는 실린더 파이프를 사용하였으며, 시편의 화학적 성분을 Table 1에 나타내었다.

시편은 효율적인 실험 데이터를 얻기 위하여 파이프의 양쪽 끝단에 버어(burr)가 발생되지 않도록 만능공구 연삭기에 절단용 숫돌(CBN100NBG2-50W, 10065446)을 사용하여 길이 40mm로 절단하여 사용하였다. 시편의 형상과 치수는 Fig. 4와 같다.

3.2 실험조건 및 방법

연마속도, 연마입자, 자속밀도, 연마시간에 따른 자기연마 특성을 고찰하기 위한 자기연마 조건은 Table 2와 같다.

Table 1 Chemical compositions of STS304 (wt %)

Com- posite Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
	STS304	0.08 이하	1.00 이하	2.00 이하	0.040 이하	0.03 이하	8.00 ~ 11.00

Table 2 Polishing conditions

Work piece	Finishing speed (m/min)	Grain size (μm)	Magnetic flux density (G)	Abrasive time (min)
STS304 pipe	4	150 250	1850 2150	1
	9.6			5
	11.4			10
	17			20
	28			30
	48			40

버어니싱 되지 않은 Fig. 4와 같은 STS304 pipe를 Fig. 3의 자기연마 장치에 장착한 후 Table 2와 같은 가공조건으로 자기연마 실험을 수행하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 자속밀도가 표면거칠기에 미치는 영향

자속밀도가 파이프 내면의 표면거칠기에 미치는 영향을 알아보기 위하여 자속밀도를 1850, 2150G로 변화를 주고, 연마속도를 11.4, 48m/min 건식으로 연마하여 자속밀도가 표면거칠기에 미치는 영향을 비교하였다.

Fig. 5 ~ Fig. 8은 입자크기가 250 μ m일 때 건식연마와 습식연마시 자속밀도의 증가에 따른 표면거칠기를 비교한 것이다. 건식연마는 자속밀도가 증가함에 따라 표면거칠기도 향상되는 것을 알 수 있었다. 1850G에서는 거의 변화가 없었으며, 또한 각각의 연마시간의 변화에 대해서 두드러진 표면거칠기의 변화를 볼 수 없었다. 그러나 Fig. 7에서 볼 수 있는 바와 같이 2150G에서는 현저히 표면거칠기가 향상되었음을 알 수 있었다. 이것은 자속밀도가 증가하면 수직연마력 Fr가 커지고, 연마속도가 증가하면 접선연마력 ft도 커져 표면거칠기 값이 감소하는 것으로 판단된다.

습식으로 인한 연마입자의 유체 입자와의 젖음 현상으로 인하여 접선연마력의 저하의 원인이 됨을 알 수 있었다. 이러한 접선력의 저하로 인한 현저한 거칠기 향상은 볼 수 없었다. 또한 작은 값의 자속밀도 변화는 표면거칠기에 두드러진 영향을 주지 않는 것으로 사료된다. 따라서 건식연마에 비하여 습식연마에서는 보다 높은 자속밀도를 요구하는 것으로 판단된다. 연마시간 10분 정도가 지나면 대체적으로 거칠기는 향상되기 시작하였다.

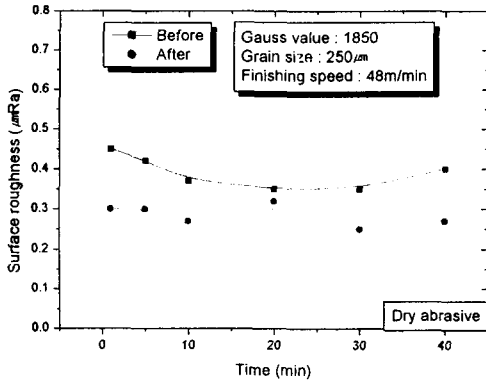


Fig. 5 Relation of surface roughness due to magnet finishing time by magnetic flux(1850G)

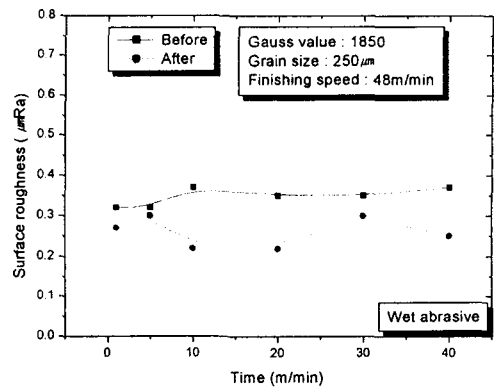


Fig. 6 Relation of surface roughness due to magnet finishing time by magnetic flux(1850G)

즉, 자속밀도가 일정하고 입경이 크면 자극봉에서 발생하는 N극에 따라 연마입자는 SNSN...상태로 자기브러시를 형성하여 탈락과 재생을 반복하면서 파이프 내면에 접촉하여 수직연마력 Fr과 접선연마력 ft의 힘의 균형을 유지하려고 하지만 파이프는 고속으로

회전하기 때문에 내면에 접촉한 연마입자는 내면과 마찰을 발생하며 새로운 연마입자로 자기브러쉬를 형성하게 된다. 이 때 형성된 연마입자의 인선은 순간적으로 파이프 내면을 연마하게 되며 파이프와 연마입자는 연속적인 상대운동으로 표면거칠기를 향상시키게 된다. 하지만 습식연마에서는 이러한 자기브러쉬의 탈락과 재생의 반복이 순조롭지 못하다.

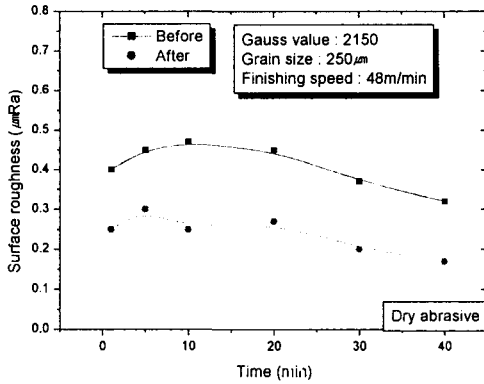


Fig. 7 Relation of surface roughness due to magnet finishing time by magnetic flux(2150G)

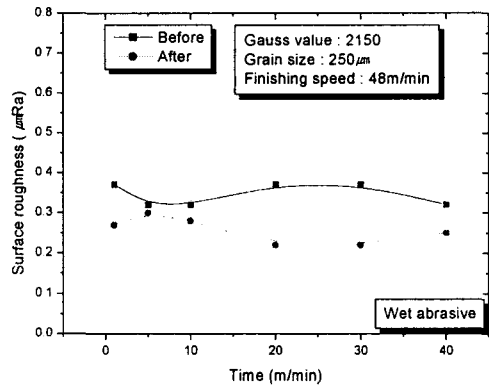


Fig. 8 Relation of surface roughness due to magnet finishing time by magnetic flux(2150G)

4.2 연마시간이 표면거칠기에 미치는 영향

Fig. 9과 Fig. 11의 건식 연마에 비하여 Fig. 10와 Fig. 12의 습식 연마의 결과에 나타나 듯이 거칠기 향상을 기대하기 어렵다. 건식연마에서는 가공시간의 증가에 따라 거칠기는 일정하게 향상되는 것을 알 수 있다. 건식연마에서는 연마시간이 증가하면 거칠기는 선형적으로 감소하지만, 습식연마에서는 그러한 점을 찾아보기 어렵다. 건식연마는 연마입자와 연마속도에 따라 파이프 내면의 거칠기에 영향을 받는 것으로 판단된다. 하지만, 습식연마에서는 유체에 의한 연마입자 질량의 증가, 유체로 인한 자기력에 따른 연마입자의 자기브러쉬의 형성이 제대로 이루어지지 않는다. 연마지립 표면의 불안정성으로 인한 유체와의 결합이 이루어지는 젖음 현상이 발생한다. 따라서 식 (2)항에서 연마지립의 젖음에 대한 값이 추가적으로 들어가야 하겠다. 식 (2)는 건식연마에서의 기체와의 젖음은 그다지 큰 영향을 주지 않았지만, 습식연마에서는 유체와의 젖음이 식 (2)에 의해 해석하기 어려운 것으로 판단된다.

연마입자 WC-TiC-TaC/Co와 유체와의 젖음이 어떻게 이루어지는지 연마입자에 대한 좀더 구체적인 실험을 해야 할 것으로 판단된다. 건식연마에서는 앞에서 언급한 자기기구의 역학에서 연마입자의 성분은 식 (1)과 같이 F_x 와 F_y 의 벡터성분으로 분리가 되고, 자기력에 의해 생성되는 수직연마력 F_r 는 식 (2)로 표현되어 자기장의 세기가 2150G로서 일정하므로 수직연마력 F_r 도 일정하다. 또한, 연마속도가 증가하여도 연마입자가 자기브러쉬를 형성하고 있지만, 파이프 내면에 관성력과 마찰력이 발생하고 연마입자의 자화율이 증가한다. 따라서 수직연마력 F_r 가 일정하게 압력을 가한 상태에서 접선연마력도 증가하여 자기브러쉬의 탈락과 결합이 빈번하게 발생하고 새로운 자기입자의 인선이 형성

되어 표면거칠기의 향상에 기여하는 것으로 판단된다. 그러나 습식연마에서의 자기브러쉬의 형성을 위해서는 건식연마에 비하여 높은 자기력을 요구하는 것으로 판단된다. 그러므로 자기연마는 사용되는 재질과 표면거칠기에 영향을 주는 인자들과의 최적조건을 찾는다면 청정파이프로 요구되는 표면거칠기를 얻을 것으로 판단된다.

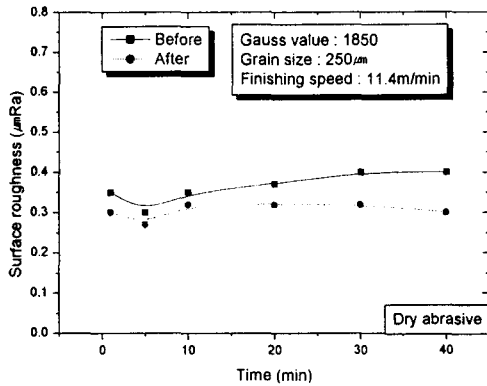


Fig. 9 Relation of surface roughness due to magnet finishing time by finishing grain (WC-TiC-TaC/Co)

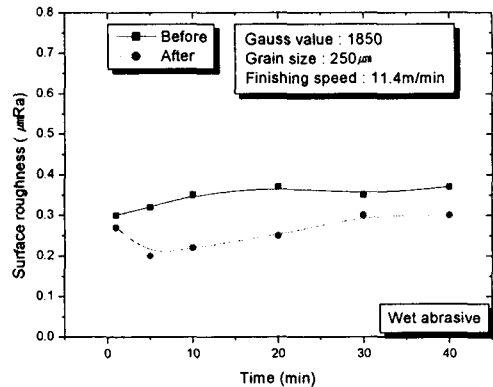


Fig. 10 Relation of surface roughness due to magnet finishing time by finishing grain (WC-TiC-TaC/Co)

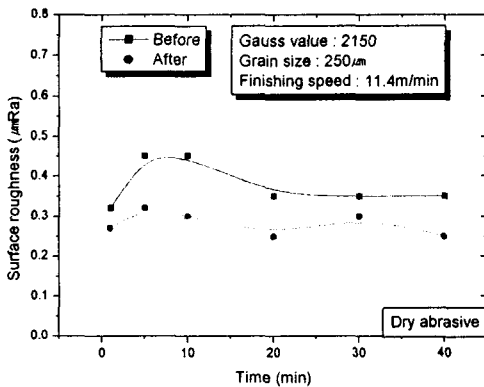


Fig. 11 Relation of surface roughness due to magnet finishing time by finishing grain (WC-TiC-TaC/Co)

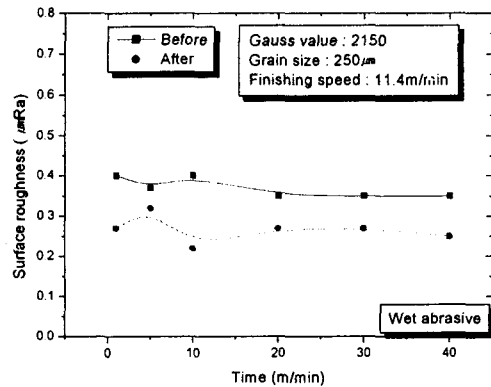


Fig. 12 Relation of surface roughness due to magnet finishing time by finishing grain (WC-TiC-TaC/Co)

5. 결론

WC-TiC-TaC/Co 연마입자를 사용한 STS304 파이프 내면의 자기연마에 있어서 가공조건이 표면거칠기에 미치는 영향을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 건식연마에서는 자속밀도가 증가함에 따라 표면거칠기는 향상되며, 특히 자속밀도 2150G에서는 표면거칠기가 두드러지게 향상됨을 알 수 있었다. 습식연마에서는 자속밀도 1850G에서 2150G의 변화에 대해서는 비슷한 양상을 띠었다.

2. 건식연마는 자속밀도에 따른 연마입자 분포의 확대, 탈락이 용이함에 비하여 탈락시 연마입자의 누수가 많았으나, 습식연마는 그와는 상이 하였으며. 가공중의 안정성과 연마입자의 회수가 편리하였다.
3. 본 실험에서 건식연마에서 연마속도는 48m/min, 연마입자 250 μ m일 때가 연마효율이 우수함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Masahiro ANZAI 外 2 人, "磁氣研磨用砥粒の新製造技術とその研磨特性", 生産研究 第43卷 第11号, pp.13-22(1991)
2. Takeo SHINMURA 外 1 人, "磁氣研磨法による内面の平滑加工に関する研究", 日本機械學會論文集 第59卷 560号, pp.293-299 (1993)
3. Takeo SHNMURA and Toshio AIZAWA, "磁氣研磨法による非磁性圓管内面の平滑加工に関する研究", JPSE-54-04-767
4. Takeo Shinmura, "磁氣研磨法による円管内面のバリ處理技術", 機械技術, 第44卷, 第2号, pp.24-28(1996)
5. Noritsugu Umehara, "磁性流体研磨", トライロスト 第41卷 6号, pp.476-481 (1996)
6. Takeo Shinmura 外 2 人, "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)", 日本機械學會論文集 第64卷 620号, pp.312-318 (1998.4)
7. Kiyoshi Suzuki, "最近の特殊研磨加工技術", 機械と工具, pp.9-12 (1998.5)