

STS304 파이프 내면의 초정밀 자기연마

김희남(명지대 기계공학과), 윤여권(명지대 대학원), 심재환*(명지대 대학원)

Ultra Finishing by Magnet-abrasive Grinding for Internal-face of STS304 Pipe

H. N. Kim(Mech. Eng. Dept., MJU), Y. K. Yun(Mech. Eng. Dept., MJU), J. H. Shim(Mech. Eng. Dept., MJU)

ABSTRACT

The magnetic polishing is the useful method to finish using magnetic power of a magnet.¹⁾ The time hasn't been that long since the magnetic polishing method was introduced to Korea as one of precision polishing techniques. However, the reasons for not being spreaded widely are the magnetic polishing method don't have mediocrity for machine, the efficiency of magnet-abrasive is confined as a bad polishing, and there are not many researchers in this field. The mechanism of this R&D is dealing with the dynamic state of magnet-abrasive.

This paper deals with mediocritizing magnetic polishing device into regular lathe and this experiment was conducted in order to get a best surface roughness with low cost. Beside the subsidiary experiment was performed using the mixed magnet-abrasive with general alumina, barium. This paper introduced the main reason for difficulty using this method in industrial field. It needs more continues research on it.

This paper contains the result of experiment to acquire the best surface roughness, not using the high-cost polishing material in processing. The average diameters of magnet-abrasive are the particles of 150 μm, 250 μm.

Key Words : Magnetic polishing(자기연마), Magnet-abrasive(자성연마재), Surface roughness(표면거칠기)

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 기술적 인 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 극대화와 더불어 국가의 산업기술 경쟁력을 제고함에 목적이 있다. 특히, 본 실험에서 사용한 파이프는 자동화 기계의 공압 실린더로 쓰이는 STS304를 사용하였다.

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

또한 본 실험에서는 기존의 자기연마법에 사용한 연마입자인 산화철과 알루미늄을 이용하여 화학적인 방법으로 제조한 자성입자 또는 WA, CBN과 같은 고가의 연마입자를 대체하여 산업현장에서 저가로서 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 찾는 데 목적이 있다.

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.⁵⁾

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

여기서, V 는 자기연마 입자의 체적이고, χ 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. 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 브러쉬를 형성함으로써 자기연마가 진행된다.

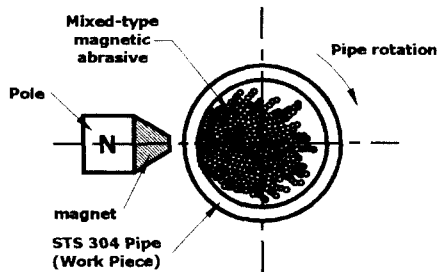


Fig. 1 Schematic for magnet abrasive finishing of internal face in STS304 pipe

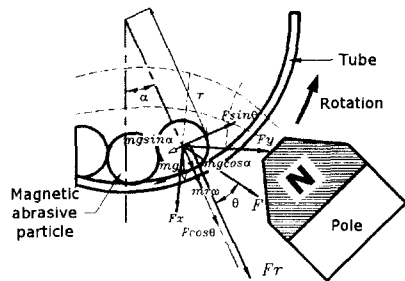


Fig. 2 Component of forces acting on magnetic abrasive particle

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.

$$F_r = F \cos \theta + mr\omega^2 + mg \cos \alpha \quad (2)$$

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.

$$f_t = \lambda F_r \quad (3)$$

수직자기력에서 중력을 뺀 값은 식 (4)로 표현되며 접선 연마력 보다 커야 한다.

$$f_t < F \sin \theta - mg \sin \alpha \quad (4)$$

따라서 연마입자는 실린더 파이프 내면에 밀착하여 회전하고 자기력에 의해서 발생한 연마력으로 그 표면을 연마하게 된다. 이러한 연마특성은 자기연마의 회전운동에 의해 영향을 받는다. 그러므로 식 (4)로 주어진 중심사이의 관계가 고려되어 연마특성에 영향을 준다. 2차원 자기연마기구에서 보여준 것처럼 길이가 긴 파이프 내면연마도 위에서 언급한 자기연마기구를 개발하면 보다 향상된 자기연마를 할 수 있을 것으로 기대된다.

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.

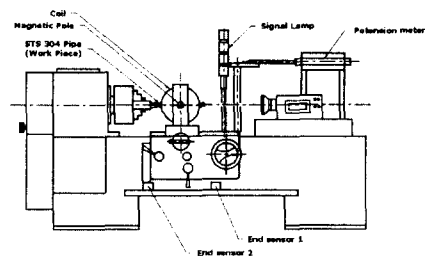


Fig. 3 Schematic diagram of experimental set up

자기연마기구는 자속밀도와 자기력을 향상시키기 위하여 다양한 형상으로 시험과 검토를 한 후 제작하였다. 자극봉의 재질은 SM45C를 사용하였으며, 코일은 ϕ 1mm 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.

3.1.2 연마입자

본 실험에 사용된 연마재는 WC-TiC-TaC/Co로서 입자의 크기는 150 μ m와 250 μ m를 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)

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 슛돌(CBN100NBG2-50W, 10065446)을 사용하여 길이 40mm로 절단하여 사용하였다. 시편의 형상과 치수는 Fig. 4와 같다.

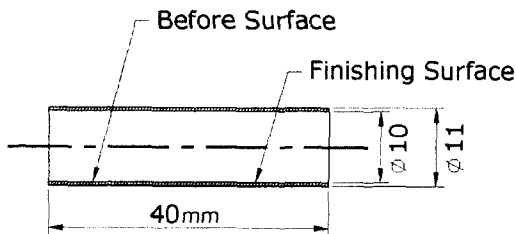


Fig. 4 Geometry and dimension of STS304 test specimen

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 %)

Composite Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
STS304	0.08	1.00	2.00	0.040	0.03	8.00	18.0
	이하	이하	이하	이하	이하	~ 11.00	~ 20.0

Table 2 Polishing conditions

Workpiece	Finishing speed (m/min)	Grain size (μ m)	Magnetic flux density (G)	Abrasive time (min)
STS304 pipe	4	150	1550	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

4.1.1 자속밀도와 표면거칠기의 관계

자속밀도가 파이프 내면의 표면거칠기에 미치는 영향을 알아보기 위하여 자속밀도를 1550, 1850, 2150G로 변화를 주고, 연마속도를 48m/min 건식으로 연마하여 자속밀도가 표면거칠기에 미치는 영향을 비교하였다.

Fig. 5~Fig. 7은 입자크기가 250 μ m일 때 자속밀도의 증가에 따른 표면거칠기를 비교한 것으로서, 자속밀도가 증가함에 따라 표면거칠기도 향상되는 것을 알 수 있었다. 1550, 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 F_r 가 커지고, 연마속도가 증가하면 접선연마력 f_t 도 커져 표면거칠기 값이 감소하는 것으로 판단된다.

즉, 자속밀도가 일정하고 입경이 크면 자극봉에서 발생하는 N극에 따라 연마입자는 SNSN...상태로

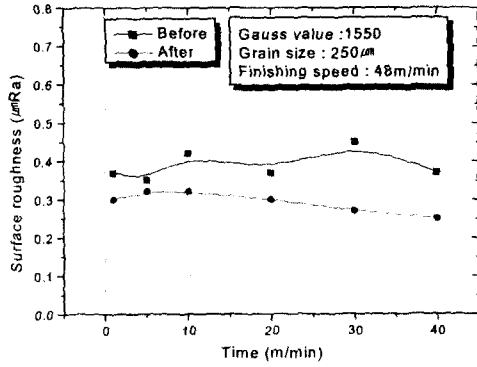


Fig. 5 Relation of surface roughness due to magnet finishing time by magnetic flux(1550G)

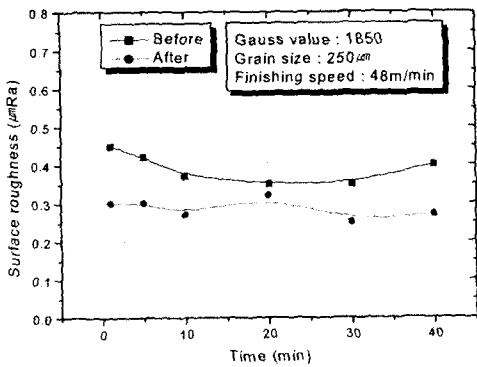


Fig. 6 Relation of surface roughness due to magnet finishing time by magnetic flux(1850G)

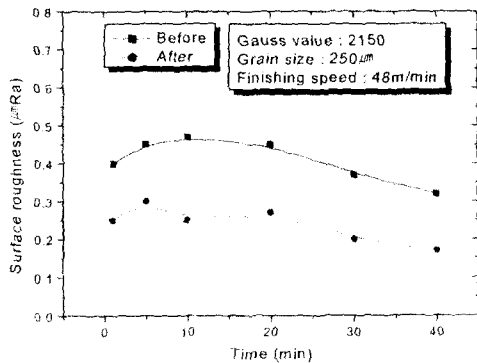


Fig. 7 Relation of surface roughness due to magnet finishing time by magnetic flux(2150G)

자기브러쉬를 형성하여 탈락과 재생을 반복하면서 파이프 내면에 접촉하여 수직연마력 F_r 과 접선연마력 f_t 의 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.

4.1.2 자속밀도에 따른 자기브러쉬 동적거동

자속밀도 1850G에서 연마입자의 정적인 거동상 태는 자기브러쉬의 형상이 대단히 좋지만, Fig. 8과 같이 동적인 상태로 가면서 지나친 연마입자의 양은 오히려 막을 형성하는 반해현상으로 넘어가는 것을 관찰할 수 있었다. 자극봉에서 발생한 자기력이 파이프 내면에 연마입자를 끌어당기는 자기력이 약하기 때문에 자기브러쉬 길이가 길어지며 또한, 파이프 내면에 연마입자의 접촉면적을 감소시키므로 수직연마력 F_r 는 감소하게 된다. 따라서 연마입자의 연결 길이가 길면 자기브러쉬의 운동이 둔하며 수직연마력도 감소하게 된다. Fig. 9는 자속밀도가 2150G일 때의 자기브러쉬의 동적거동 상태를 나타낸 것이다. 동적거동에서는 2150G일 때 자극을 중심으로 약간 아래쪽으로 자기브러쉬를 형성한다. Fig. 8과 같이 자속밀도가 1850G일 때보다 Fig. 9와 같이 자속밀도 2150G일 때 자속밀도가 증가함에 따라 자기브러쉬 형성이 작게 분포함을 알 수 있었다.

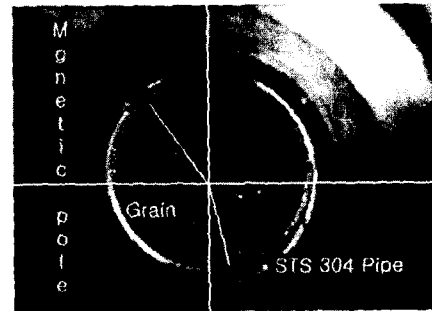


Fig. 8 Profile of magnetic brush (Finishing speed 48m/min, Magnet flux density : 1850G)

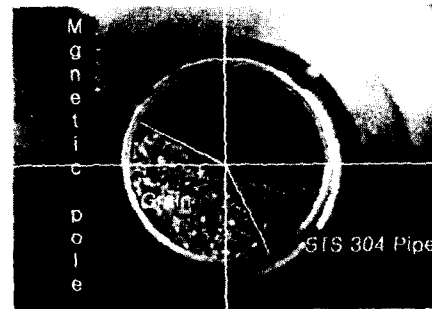


Fig. 9 Profile of magnetic brush (Finishing speed 48m/min, Magnet flux density : 2150G)

즉, 연마속도가 일정하고 자속밀도를 증가시키면 자기브러쉬의 동적거동은 길이가 짧아지면서 자기력에 따른 연마입자는 자기브러쉬를 조밀하게 하고 파이프 내면에 접촉하는 연마입자의 인선은 증가하게 된다. 또한, 자속밀도가 크면 자극봉에서 끌어당기는 자기력이 증가하여 자기브러쉬의 탈락과 결합이 빈번하게 이루어지며 자기연마를 촉진시킨다.

4.2 연마속도가 표면거칠기에 미치는 영향

자기연마 속도의 변화에 따른 파이프 내면의 표면거칠기 변화를 비교하기 위하여 자기연마 속도는 4, 9.6, 11.4, 17, 28, 48m/min, 연마입자는 150, 250 μ m를 사용하였으며, 자기력은 1850, 2150G로 변화시켜 실험을 하였다.

Fig 10과 같이 일정한 가공시간에서 연마속도가 증가함에 따라 표면거칠기도 향상됨을 알 수 있었으며, 48m/min의 가공속도에서 0.25 μ mRa의 양호한 표면을 얻을 수 있었다. 또한, Fig 11에서 볼 수 있듯이 연마속도 48m/min로 40분 가공할 경우 0.17 μ mRa의 우수한 표면을 얻을 수 있었으나, 가공효율의 측면에서 고려해야 할 점이 있다.

자기연마 속도의 변화에 따라 표면거칠기가 크게 변화되는 이유는 금속의 연마속도를 증가시키면 변형저항이 낮아지지만 자기연마의 경우는 자기력에 따른 연마재의 자기브러쉬 형성으로 연마를 하기 때문에 가공저항에 따른 가공면에 미치는 영향은 작을 것으로 생각한다.

4.3 연마시간이 표면거칠기에 미치는 영향

Fig. 12와 Fig. 14를 비교하면 연마속도에 따른 거칠기 향상을 기대하기는 어렵다. Fig. 13과 Fig. 15를 비교하면 Fig. 15에서 가공시간의 증가에 따라 거칠기는 일정하게 향상되는 것을 알 수 있다. 또한 1분에서 20분까지는 비슷한 결과를 나타내나, 이후 연마시간의 증가에 따라 양호한 거칠기 값을 얻을 수 있었다. 연마시간이 증가하면 거칠기는 선형적으로 감소하지만, 연마입자와 연마속도에 따라 파이프 내면의 거칠기에 영향을 받는 것으로 판단된다. 즉, 앞에서 언급한 자기기구의 역학에서 연마입자의 성분은 식 (1)과 같이 F_x 와 F_y 의 벡터성분으로 분리되고, 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 형성되어 표면거칠

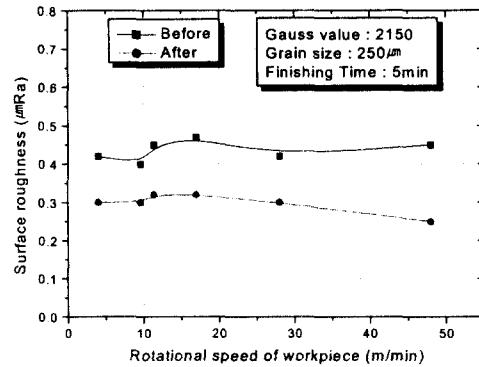


Fig. 10 Relation of surface roughness due to magnet finishing time by finishing grain (WC-TiC-TaC/Co)

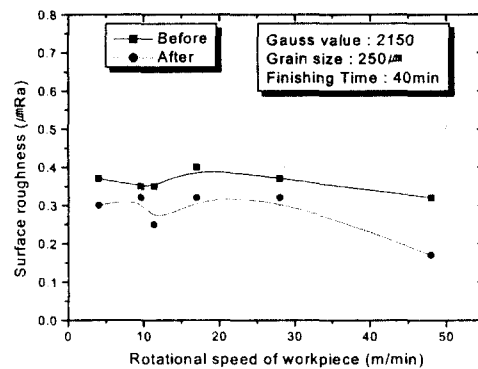


Fig. 11 Relation of surface roughness due to magnet finishing time by finishing grain (WC-TiC-TaC/Co)

기의 향상에 기여하는 것으로 판단된다. 그러므로 자기연마는 사용되는 재질과 표면거칠기에 영향을 주는 인자들과의 최적조건을 찾는다면 청정파이프로 요구되는 표면거칠기를 얻을 것으로 판단된다.

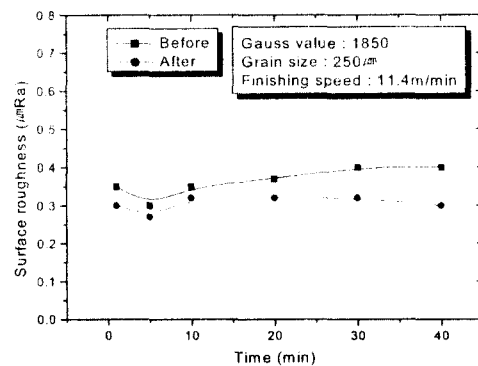


Fig. 12 Relation of surface roughness due to magnet finishing time by finishing grain (WC-TiC-TaC/Co)

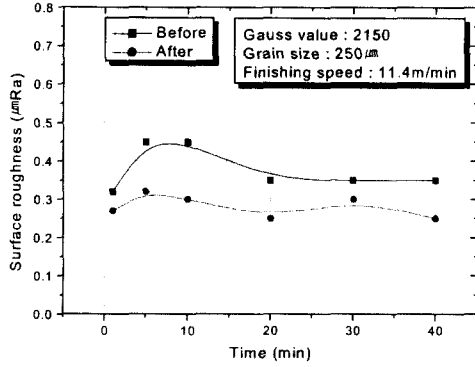


Fig. 13 Relation of surface roughness due to magnet finishing time by finishing grain (WC-TiC-TaC/Co)

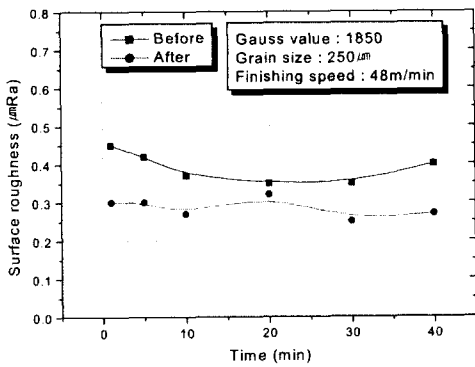


Fig. 14 Relation of surface roughness due to magnet finishing time by finishing grain (WC-TiC-TaC/Co)

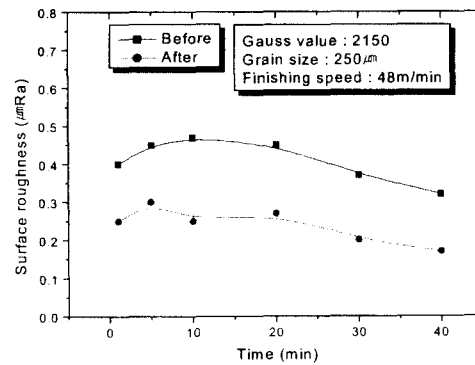


Fig. 15 Relation of surface roughness due to magnet finishing time by finishing grain (WC-TiC-TaC/Co)

5. 결론

WC-TiC-TaC/Co 연마입자를 사용한 STS304 파이프

프 내면의 자기연마에 있어서 가공조건이 표면거칠기에 미치는 영향을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 자속밀도가 증가함에 따라 표면거칠기는 향상되며, 특히 자속밀도 2150G에서는 표면거칠기가 두드러지게 향상됨을 알 수 있었다.

2. 자기브러쉬 동적거동은 자속밀도가 증가함에 따라 자기브러쉬가 짧아지고, 조밀해져서 연마입자의 인선이 증가하며, 이는 표면거칠기 향상에 기여한다.

3. 자기연마에서 표면거칠기 향상을 위한 가공조건 중 연마입자의 크기와 자기력과의 관계가 가장 중요한 인자이다.

4. 연마속도는 48m/min, 연마입자 250µm일 때가 연마효율이 우수함을 알 수 있었다.

6. 참고문헌

- Masahiro 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", 生産研究 第43卷 第11号, pp.13-22(1991)
- Takeo SHINMURA and Hitomi YAMAGUCHI, "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)
- Takeo SHINMURA 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
- 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)
- H. Yamaguchi, T. Shinmura and T. 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.
- Hitomi Yamaguchi, Takeo Shinmura, "内面磁氣研法における磁性砥粒の特異な舉動と加工能率向上効果", 機械と工具, pp.89-93 (1999.3)
- 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)", 日本機械學會論文集 第64卷 620号, pp.312-318 (1998.4)
- Masahiro ANZAI and Takeo NAKAGAWA, "磁氣研磨加工の効率化", 生産研究 第45卷 12号, pp.816-820 (1993)