

자기연마를 이용한 STS304 파이프 내면의 초정밀 가공

김희남[†] · 윤여권^{*} · 심재환^{**}

명지대학교 기계공학과 · ^{*}명지대학교 대학원 · ^{**}신성네오테크(주)
(2002. 4. 17. 접수 / 2002. 8. 26. 채택)

Super Precise Finishing of Internal-face in STS304 Pipe Using the Magnetic Abrasive Polishing

Hee-Nam Kim[†] · Yeo-Kwon Yun^{*} · Jae-Whan Shim^{**}

Department of Mechanical Engineering, Myongji University
^{*}Graduate School of Myongji University · ^{**}Shinsung NeoTech Co.
(Received April 17, 2002 / Accepted August 26, 2002)

Abstract : The magnetic abrasive polishing is the useful method to finish using magnetic power of a magnet. It's not a long time this method was introduced to Korea as one of precision finishing techniques. 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. The mechanism of this R&D is dealing with the dynamic state of magnet-abrasive.

This paper deals with medioritizing magnetic polishing device into regular lathe and this experiment was conducted in order to get the best surface roughness at low cost. We need to continue the 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 magnetic abrasive are the particles of 150 μm , 250 μm .

Key Words : magnetic abrasive polishing, surface roughness

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. 일본 등에서는 파이프 내면의 경면과 초정밀 가공에 있어서 가공효율을 높이기 위하여 자극 회전방식을 이용한 자기연마법¹⁾에 관한 연구를 비롯하여 다양한 형태의 자극 배열과 여러 연마재를 이용한 자기연마에 대한 연구²⁻⁸⁾가 이루어져 왔다.

그러나 국내에서는 이러한 자기연마에 관한 연구

가 아직 미흡한 실정이며, 자기연마법을 이용한 초정밀 가공분야의 신기술 개발은 기존의 비효율적인 생산방식을 극복하고, 생산효율을 높임으로써 기술 경쟁력을 향상시킬 수 있을 것이다. 본 실험에서 사용한 파이프는 자동화기계의 공압 실린더로 쓰이는 STS304를 사용하였으며, 기존의 공압 실린더의 주된 마무리 가공법인 내면 버핑을 효율적으로 대체할 수 있는 자기연마에 대한 실험을 수행하였다.

특히 본 실험에서는 기존의 자기연마법에서 주로 사용한 연마입자인 산화철과 WA를 이용하여 화학적인 방법으로 제조한 자성입자 또는 다이아몬드, CBN과 같은 고가의 연마입자를 대신하여 산업현장에서 저가로 쉽게 구입할 수 있는 WC-Co를 연마재로 사용하여 자기연마를 수행하였다. 따라서 기존의 내면 버핑, 연마 후에 수반되는 이 물질에 의한 환경적인 요인을 없앨 수 있는 효과가 있다. 본 연구에서는 기존의 범용 공작기계에 자기연마 장치를

[†]To whom correspondence should be addressed.
hkim@mju.ac.kr

부착하여 사용함으로써 장비의 활용도와 안전성을 높이고, 저가의 연마입자를 이용한 자기연마 가공에 있어서 효율적인 가공조건을 찾는 데 목적이 있다.

2. 자기연마 메카니즘

본 실험에서는 단일 자극봉을 사용하였으며, Fig. 1은 자기연마 장치의 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. 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.²⁾

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

여기서, V 는 자기연마 입자의 체적이고, x 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.

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

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

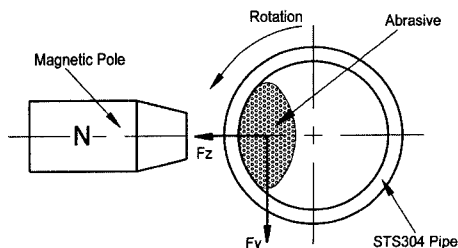


Fig. 1. Schematic for magnetic abrasive polishing of internal face in STS304 pipe

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

3.1.1. 자기연마 장치

본 실험에서 자기연마를 위한 장치를 설계·제작하였으며, 화천기계(주)에서 생산한 범용선반(WHL-380L)에 부착하여 자기연마 실험을 수행하였다. Fig. 2는 본 실험에 사용된 자기연마 장치의 개략도이며, Fig. 3은 실험장치의 사진이다. 자기연마에 필요한 자기력을 발생시키기 위한 자력발생 기구는 자속 밀도와 자기력을 향상시키기 위하여 다양한 형상으로 시험·검토한 후 제작하였다. 자극봉의 재질은 SM45C를 사용하였으며, 자기연마 가공시 발생하는 저항열에 충분히 견딜 수 있도록 코일은 ϕ 1mm 우레탄 피복동선을 사용하였다.

또한 자극의 세기와 자속밀도를 높이기 위해서 자극봉의 표면을 절연한 후 코일 감김수를 8500회로 하여 자기력 발생기구를 제작하였다.

3.1.2. 연마입자

본 실험에서 사용한 연마재는 탄화 텅스텐(WC)계 초경합금인 WC-Co로서 자성이 있으며 고온에서 내산화성이 우수한 TiC/TaC계 서멧이 첨가되었다.

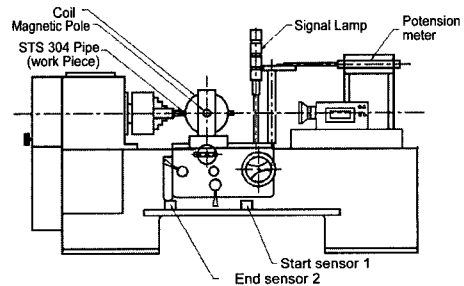


Fig. 2. Schematic of experimental set up

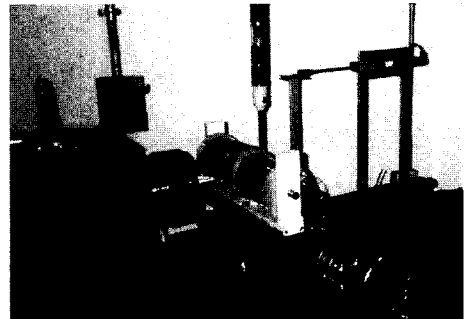


Fig. 3. Photo. of experimental equipment

연마입자의 평균 크기는 150 μm 와 250 μm 를 사용하였다. 그리고 본 실험에서 사용된 WC-Co 초경재료는 기존에 자기연마 가공에 주로 사용되어온 연마입자들 보다 가격이 저렴하며, 구입이 용이하고 재활용이 가능한 이점이 있다.

3.1.3. 시편

본 실험에 사용된 시편의 재료는 자동화 시스템을 구성하는 공기압 기기부품의 실린더로 이용되는 이음매 없는 STS304 파이프를 사용하였다. 자기연마 가공 전의 파이프 내면 표면거칠기는 평균 0.4 μm 이다.

시편의 화학적 성분은 Table 1에 나타내었으며, 시편의 형상과 치수는 Fig. 4와 같다.

3.2. 실험방법

WC-Co계 연마재를 이용한 STS304 파이프의 내면 자기연마에 있어서 연마속도 및 시간, 자속밀도가 가공효과와 표면거칠기 등에 미치는 자기연마 특성을 고찰하기 위하여 Table 2와 같이 실험조건을 설정하였다.

Fig. 4와 같은 STS304 파이프를 범용선반에 부착된 자기연마 기구에 장착한 후 파이프 외면과 자극봉 사이의 공극(air gap)을 1mm로 설정한 후 Table 2와 같은 가공조건으로 자기연마 실험을 수행하였다.

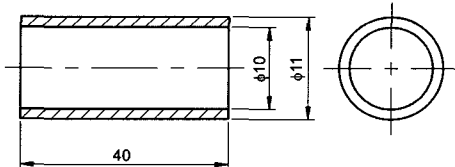


Fig. 4. Geometry and dimension of specimen

Table 1. Chemical compositions of STS304 (wt %)

Composite	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
Material	0.08 이하	1.00 이하	2.00 이하	0.05 이하	0.03 이하	8.00 ~ 10.50	18.0 ~ 20.0

Table 2. Polishing conditions

Workpiece	Polishing speed (m/min)	Grain size (μm)	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

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 자속밀도 변화의 영향

4.1.1. 자속밀도 변화에 따른 표면거칠기

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

Fig. 5와 Fig. 6은 입자크기가 각각 150 μm , 250 μm 일 때 자속밀도의 증가에 따른 표면거칠기를 비교한 것으로서, 자속밀도가 커짐에 따라 표면거칠기도 향상되는 것을 알 수 있다.

그리고 자속밀도 1550, 1850G에서는 거의 차이가 없었으며, 또한 각각 연마시간의 변화에 대해서 두드러진 표면거칠기의 변화를 볼 수 없었다. 그러나 자속밀도 2150G일 때 연마시간 10분 이상에서는 표면거칠기가 현저히 향상됨을 알 수 있었다.

이것은 자속밀도가 증가하면 연마력 F_y , F_z 가 커

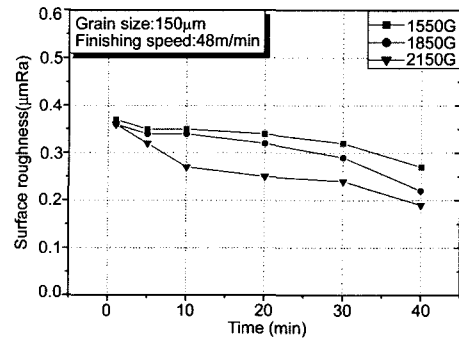


Fig. 5. Relation of surface roughness according to variation of magnetic flux density (grain size 150 μm)

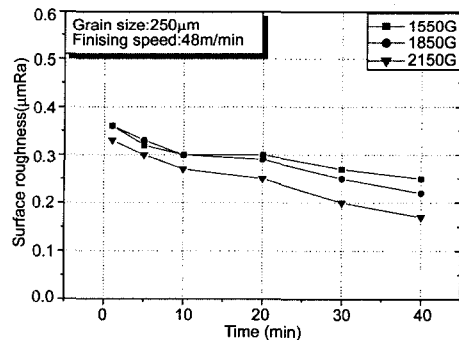


Fig. 6. Relation of surface roughness according to variation of magnetic flux density (grain size 250 μm)

짐에 따라 자기브러쉬의 형성이 우수하여 표면거칠기가 향상되는 것으로 판단된다.

즉, 자속밀도가 일정하고 입경이 크면 자극봉에서 발생하는 N극에 따라 연마입자는 SNSN... 상태로 자기브러쉬를 형성하여 탈락과 재생을 반복하면서 고속으로 회전하는 파이프 내면에 접촉한 연마입자는 내면과 마찰을 발생하며 새로운 연마입자로 자기브러쉬를 형성하게 된다. 이때 형성된 연마입자의 인선은 순간적으로 파이프 내면을 연마하게 되며 파이프와 연마입자는 연속적인 상대운동으로 표면거칠기를 향상시키게 된다.

4.1.2. 자기연마 입자의 동적거동

Fig. 7 과 Fig. 8은 각각 자속밀도 1850G와 2150G에서 연마입자의 동적인 거동을 나타낸 것이다. 자속밀도 1850G에서 자기브러쉬의 정적인 거동에서 브러쉬의 형상이 대단히 좋지만, Fig. 7과 같이 동적인 상태로 가면서 지나친 연마입자의 양은 오히려 막을 형성하는 방해현상으로 넘어가는 것을 관찰할 수 있었다. 자극봉에서 발생한 자기력이 파이프 내

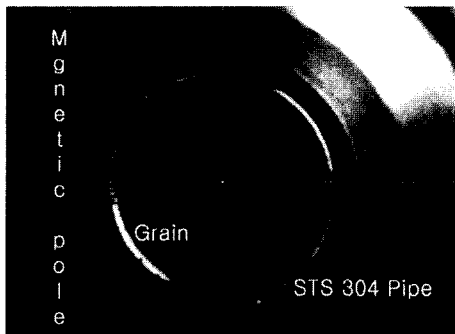


Fig. 7. Profile of magnetic brush (magnetic flux density 1850G)

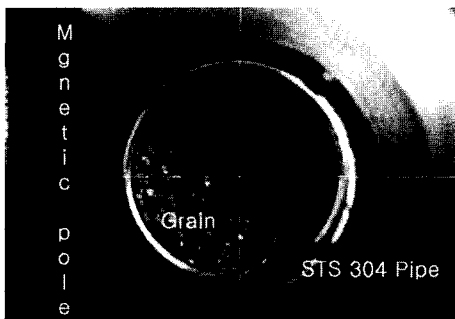


Fig. 8. Profile of magnetic brush (magnetic flux density 2150G)

면에 연마입자를 끌어당기는 자기력이 약하기 때문에 자기브러쉬 길이가 길어지며 또한, 파이프 내면에 연마입자의 접촉면적을 감소시키게 된다.

따라서 연마입자의 연결 길이가 길면 자기브러쉬의 운동이 둔하며 연마력도 감소하게 된다.

Fig. 8은 자속밀도가 2150G일 때의 자기브러쉬의 동적 거동 상태를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 동적인 거동상태가 자극을 중심으로 약간 아래쪽으로 자기브러쉬를 형성한다.

Fig. 7에 비교하면 Fig. 8과 같이 자속밀도가 증가함에 따라 자기브러쉬 형성이 작은 범위에서 분포함을 알 수 있었다.

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.

이와 같은 자기연마 장치를 범용 선반에 부착하여 활용함으로써 장비의 활용도를 한층 높일 수 있다. 또한 파이프 내면가공에 자기연마의 활용을 통하여 기존의 슛돌 형태를 사용한 내면연삭에서 나타날 수 있는 슛돌의 파괴 등 안전사고 요인을 제거함으로써 작업 안전성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

4.2. 연마 속도 및 시간에 따른 영향

자기연마 속도 및 시간의 변화가 파이프 내면의 표면거칠기에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 평균 입자 크기가 150, 250 μ m인 연마입자를 사용하여 자속밀도를 1850, 2150G로 하여 4, 9.6, 11.4, 17, 28, 48m/min의 연마속도로 각각 1, 5, 10, 20, 30, 40분간 자기연마를 수행하였다. Fig. 9와 같이 일정한 가공시간에서 연마속도가 증가함에 따라 표면거칠기가 대체로 향상됨을 알 수 있었으며, 48m/min의 가공속도에서 0.22 μ mRa의 양호한 표면을 얻을 수 있었다. 그리고 자속밀도가 1850G에서는 연마시간이 증가되어도 표면거칠기가 그다지 향상되지 않음을 볼 수 있다. 한편, Fig. 10에서 볼 수 있는 바와 같이 자속밀도가 2150G 일 때에 연마시간이 증가함에 따라 표면거칠기가 향상되는 것을 알 수 있는데 이는 자기연마에서 자속밀도가 표면거칠기에 미치는 영향이 큼을 말해주고 있다. 또한, Fig. 10과 같이 자속밀

도 2150G, 연마입자 크기 250 μm , 연마속도 48m/min로 40분 가공할 경우 0.17 μmRa 의 양호한 표면을 얻을 수 있었으나, 가공효율의 측면에서 고려해야 할 점이 있다.

이와 같이 자기연마 속도에 따라 표면거칠기가 크게 변화되는 이유는 일반적으로 금속의 가공속도를 증가시키면 변형저항이 많아지나, 자기연마의 경우는 자기력에 따른 연마재의 자기브러쉬 형성으로 연마를 하기 때문에 가공저항에 따른 가공면에 미치는 영향은 작은 것으로 생각된다.

Fig. 9와 Fig. 10에서 연마시간의 증가에 따른 표면거칠기는 연마시간 1분에서 20분까지는 다소 향상되는 것을 볼 수 있으며, 이후 연마시간이 증가함에 따라 표면거칠기가 두드러지게 향상되는 것을 알 수 있다. 이와 같이 연마시간이 증가하면 거칠기는 대체로 감소하지만, 주는 자속밀도와 연마속도에 따라 파이프 내면의 거칠기가 영향을 받는 것으로 판단된다.

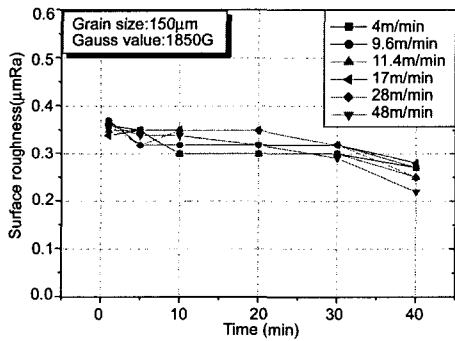


Fig. 9. Relation of surface roughness according to variation of polishing speed (grain size 150 μm , magnetic flux density 1850G)

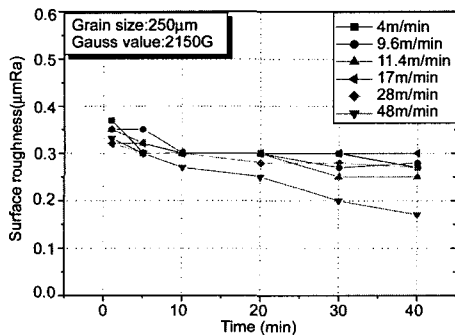


Fig. 10. Relation of surface roughness according to variation of polishing speed (grain size 250 μm , magnetic flux density 2150G)

또한, 연마속도가 증가하여도 연마입자가 자기브러쉬를 형성하고 있으며, 파이프 내면에 관성력과 마찰력이 발생하고 연마입자의 자화율이 증가한다. 따라서 자속밀도와 연마속도가 커짐에 따라 연마력도 증가하여 자기브러쉬의 탈락과 결합이 빈번하게 발생하고 새로운 자기입자의 인선이 형성되어 표면거칠기의 향상에 기여하는 것으로 판단된다.

5. 결론

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

- 1) 자속밀도가 증가함에 따라 표면거칠기는 향상되며, 특히 자속밀도 2150G에서 50%이상 향상된 표면거칠기를 얻을 수 있었다.
- 2) 자기브러쉬 동적거동은 자속밀도가 증가함에 따라 자기브러쉬가 짧아지고, 조밀해져서 연마입자의 인선이 증가하며, 이는 표면거칠기 향상에 기여한다.
- 3) 자기연마 가공에서 표면거칠기 향상을 위한 가공조건에서 자기력의 크기가 가장 중요한 인자이다.
- 4) 연마속도는 48m/min, 연마입자 250 μm 일 때가 연마효율이 우수함을 알 수 있었다.
- 5) 본 실험을 통하여 범용선반에 부가적인 장비를 설치함으로써 자기연마 가공이 가능함을 알 수 있었으며, 또한 이의 활용을 통하여 슛돌형태의 내면연마를 벗어나 작업 안전성을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글 : 본 연구는 산업자원부, 한국생산기술연구원, 국가청정생산지원센터의 2002년도 청정생산기술사업비의 지원에 의하여 수행되고 있는 연구과정의 일부로서 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- 1) H. amaguchi, T.Shinmura and T. aneko, "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.

- 2) 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.
- 3) Takeo SHINMURA, Yoshitaka HAMANO 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 第620号, pp. 312-318, 1998.
- 4) 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 第560号, pp. 293-299, 1993.
- 5) 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.
- 6) Hitomi Yamaguchi, Takeo Shinmura, “内面磁氣研磨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.
- 7) 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.
- 8) Masahiro ANZAI and Takeo NAKAGAWA, “磁氣研磨加工の高效率化,” 生産研究 第45卷 第12号, pp. 816-820, 1993.