

Sludge 연마입자를 이용한 STS304 파이프 내면의 자기연마

김희남 · 윤여권* · 이병우** · 유숙철** · 김상백 · 최희성

명지대학교 기계공학과 · *명지대학교 대학원 기계공학과 · **산업기술시험원

1. 서 론

현대산업의 고도화 추세에 따라 반도체를 비롯한 의료 및 식품위생기기 산업분야에 사용되는 부품의 고정도가 요구되면서 기존에 공구와 가공물이 직접 접촉하면서 절삭하는 가공방법으로는 절삭력에 의한 변형과 마찰열 등으로 인하여 고정도 가공의 실현에 어려움이 생기게 되었다. 그리고 의료 및 식품기기에 사용될 부품의 내면을 기존의 기계적 가공방법으로 가공할 경우 공작물 표면에 미소한 가공흔적이 남게되어 표면의 요철부분에 칩(chip)등의 불순물이 잔재할 우려가 있으며, 또한 요철 부분에 미생물이 번식할 경우 청정도가 떨어져 산업위생상의 문제점이 발생하게 된다.

일반적인 연삭가공은 슷돌형태인 공구가 공작물에 직접 연삭력이 가압되는 가공으로서 트리블(trouble)이 발생할 경우 슷돌의 파괴로 인한 산업재해가 발생할 수 있으며, 연삭열의 발생을 억제하기 위해 연삭유를 사용해야 함으로 인하여 산업위생상 고정정용 부품의 고품위 표면을 얻기 위한 가공으로는 적합하지 않다.

이러한 산업안전의 문제 해결과 함께 보다 더 우수한 표면의 품위를 얻기 위한 가공법중의 하나가 자기연마 가공법이다. 자기연마법은 자기력에 의해 자기연마재를 끌어당김으로서 가공물을 연마하는 방법으로서 자기연마장치 및 연마재에 관한 많은 연구들^{1)~6)}이 이루어져 왔으며, 이들은 주로 자기력과 자극의 배치 등이 자기연마효율에 미치는 영향과 고정도 재료인 세라믹이나 초경합금 등을 연마하기 위한 다이아몬드, CBN 등을 이용하여 연마재를 제조하거나 산화철과 알루미늄을 화학반응으로 제조하는 방법에 관한 연구이었으며, 가공물 표면의 청정가공과 고정밀도를 실현하기 위한 다양한 연구^{7)~12)}가 진행되어 왔다. 이러한 자기연마 기술에서 자기연마재는 가공의 주체로써 가공정밀도와 청정도를 좌우하며, 이러한 자기연마재를 이용한 효과적인 가공방식의 개발이 핵심요소이다. 본 실험에서는 제강공정에서 생성되어 산업폐기물로 버려지는 슬러지(sludge)와 WA, GC입자를 합성하여 제조한 자기연마재를 이용하여 STS304 파이프 내면을 자기연마 가공을 수행하였다. 특히 기존의 자기연마법에서 주로 사용한 연마입자인 WA 등을 이용하여 화학적인 방법으로 제조한 자성입자 또는 다이아몬드, CBN과 같은 고가의 연마입자를 대신하여 산업폐기물로 버려지는 슬러지를 자성재료로 사용한 자기연마재를 사용함으로써 자원의 활용도를 높일 수 있다. 본 연구에서는 기존의 범용 공작기계에 자기력 발생장치를 부착한 자기연마기구를 사용함으로써 장비의 활용도와 안전성을 높이고, 저가의 연마입자를 이용한 자기연마 가공에 있어서 효율적인 가공조건을 찾는 데 목적이 있다.

2. 자기연마 기구

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.⁷⁾

$$F_y = V\chi H(\partial H/\partial y) \dots\dots\dots (1)$$

$$F_z = V\chi H(\partial H/\partial z)$$

여기서, V는 자기연마 입자의 체적이고, χ 는 연마입자의 자화율, H는 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 외부에서 작용하는 강제력에 따라 자발적으로 일어나는 자성 입자의 자생 대체·교반(攪拌)거동이 생긴다.

따라서 자력선에 의해서 자장이 끌어당기는 힘에 의해 비자성체인 STS304 파이프 내면에 투입된 자기연마재가 파이프 내면에 밀착되면서 자기 브러쉬를 형성함으로써 자기연마 가공이 진행된다.

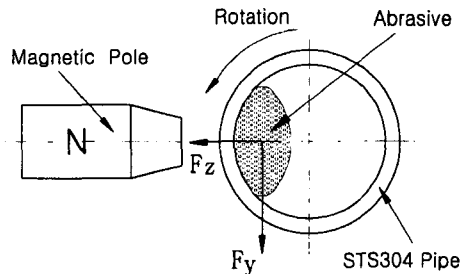


Fig. 1 Schematic for magnetic abrasive polishing of internal face in STS304 pipe

3. 실험장치 및 방법

3.1 자기력 발생장치

다양한 자기력 발생장치의 종류 가운데 전자석에 의한 자기력 발생장치가 현장에서 적용이 간단하고, 자기력의 조절이 용이하여 다양한 범위에서 자기력의 크기를 변화시키면서 자기연마재의 가공특성을 살펴볼 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서 사용한 자기력 발생장치는 D마그네틱(주)에서 제작한 고구배 전자석으로서 최대 자속 밀도를 1.5 T(tesla)까지 발생시킬 수 있도록 설계·제작되었다. 그리고 자극과 공작물 사이의 에어 갭(air gap)을 자유롭게 조절하기 위해서 자극이 시편의 직각방향으로 직선운동이 가능한 구조로 이루어져 있다.

또한 발생하는 자기력은 tesla meter(KANETEC Co., LTD., model TM-501)로 측정하여 소요의 세기로 조절하였다. Fig. 2는 본 실험에 사용된 자기력 발생장치를 보여주고 있다.

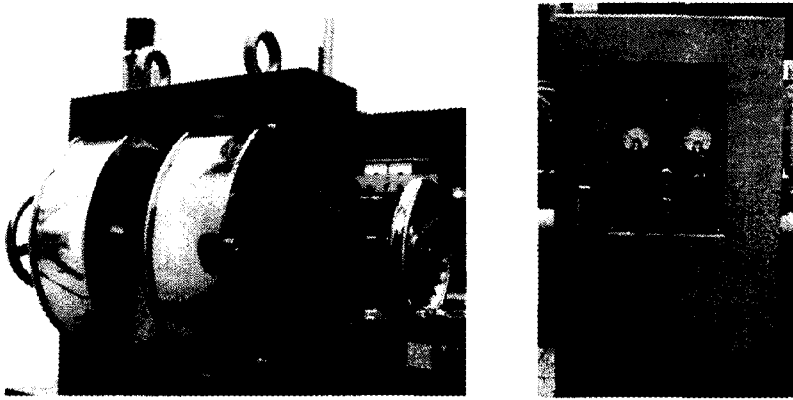
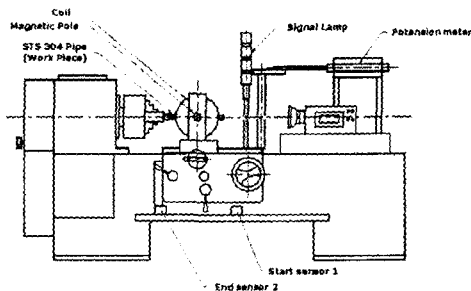


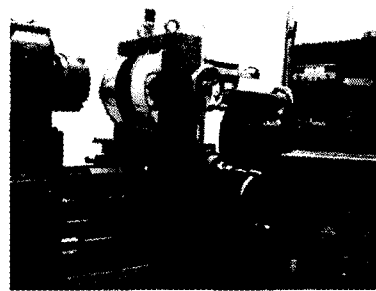
Fig. 2 Photographs magnetic force generator

3.2 자기연마 장치

본 실험에서 자기연마를 위한 장치를 설계·제작하였으며, 화천기계(주)에서 생산한 범용선반(WHL-380L)에 부착하여 자기연마 실험을 수행하였다. Fig. 3의 (a)는 본 실험에 사용된 자기연마 장치의 개략도이며, (b)는 자기연마 실험장치의 사진이다.



(a) experimental set up



(b) experimental equipment

Fig. 3 Schematic of experimental set up and photo. experimental equipment

3.3 자기연마재

본 실험에서는 슬러지(sludge)를 자성재료로 하여 1,000 mesh의 WA와 GC 입자를 연마재로 이용하여 제조한 자기연마재를 사용하였다. 자기연마재의 형상이 가공효율 및 표면거칠기에 미치는 영향을 고찰하기 위해 합성공정을 거친 자기연마재를 분쇄기를 통해 평균 입도 30 mesh 크기를 가진 분말(grit)형태로 제조한 연마재와 평균 직경이 1.2mm인 볼(ball)형태의 슬러지에 각각 WA와 GC를 입자를 입혀 제조한 자기연마재를 사용하여 자기연마를 수행하였다. Table 1에 본 실험에 사용된 자기연마재의 구성비율을 나타내었다.

Table 1. Compositions of the mixture rate

Magnetic material	Abrasive grain	Composition	Resin (mℓ/g)	Synthesis temperature(°C)	Synthesis time(min)
Sludge	WA GC	Sludge : WA = 1 : 1 Sludge : G C = 1 : 1	0.20	185	120

3.4 자기연마 시편

본 실험에 사용된 시편의 재료는 자동화 시스템을 구성하는 공기압 기기부품의 실린더에 이용되는 이음매 없는 STS304 파이프를 사용하였다.

시편의 형상과 치수는 Fig. 4와 같으며, 연마가공 전에 파이프 내면의 표면거칠기는 Fig. 5와 같은 형상으로서 표면거칠기 값은 평균 $0.4\ \mu\text{m} \sim 0.45\ \mu\text{m}$ Ra의 범위에 존재한다.

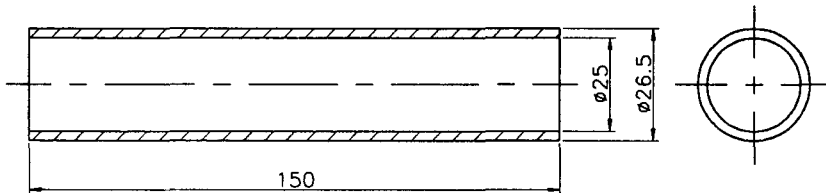


Fig. 4 Geometry and dimension of specimen

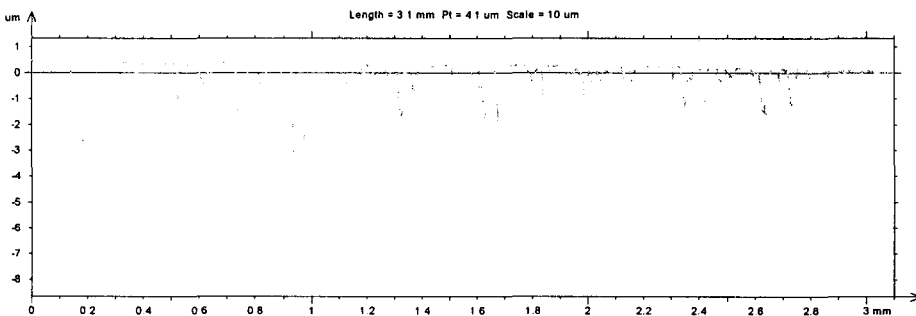


Fig. 5 Surface roughness curve of internal face in STS304 pipe

3.5 실험방법

Sludge와 WA 및 GC 연마입자를 이용하여 제조한 자기연마재가 STS304 파이프의 내면의 자기연마 가공에서 연마속도 및 시간, 자속밀도가 가공효율과 표면거칠기 등에 미치는 자기연마 특성을 고찰하기 위하여 Table 2와 같은 실험조건을 설정하였다.

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

Table 2. Polishing conditions

Workpiece	Polishing speed (m/min)	Feed rate (mm/rev)	Magnetic flux density (G)	Pass number	Grain type
STS304 pipe	31.8	0.15	3,000	5	grit
	54.9				
	63.6				

4. 실험결과 및 고찰

4.1 연마조건과 연마입자의 변화에 따른 표면거칠기

연마속도와 자속밀도 등의 연마조건이 표면거칠기에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 Table 2와 같은 조건으로 자기연마 가공을 수행하였으며, 또한 연마입자의 종류에 따른 표면거칠기 변화를 비교하였다. Fig. 6은 WA와 GC 입자를 사용하여 30mesh 크기의 분말(grit)형태로 제조한 자기연마재로 가공하였을 경우에 연마조건의 변화에 따른 표면거칠기를 보여주고 있다. Fig. 6의 (a)는 WA 연마입자를 사용한 자기연마의 경우로서 일정한 자속밀도에서 연마속도가 증가함에 따라 표면거칠기가 향상되는 경향을 볼 수 있다. 특히 연마속도가 63.6 m/min일 때 표면거칠기가 현저히 향상된 것을 볼 수 있는데, 이는 자기연마재의 자생교반이 활발히 진행되면서 새로운 연마입자로 대체되어 신생되는 자기 브러시(brush)에 의해 연마효율이 증가되는 것에 의한 것이다.

Fig. 6의 (b)는 GC 연마입자를 사용한 자기연마재로 가공한 표면의 거칠기 변화를 나타낸 것이다. 전반적인 연마조건에서 WA 연마입자의 경우보다 표면거칠기가 저하되는 경향을 나타내는 것으로 보아 GC 입자가 WA 입자보다 가공도가 다소 떨어지는 것으로 판단된다. Fig. 7은 WA와 GC 입자를 사용하여 평균 직경이 1.2mm인 볼(ball) 형태로 제조한 자기연마재를 사용하여 자기연마 가공하였을 경우에 가공조건의 변화에 따른 표면거칠기를 보여주고 있다. Fig. 7의 (a)는 ball 형태의 WA 연마입자를 사용한 자기연마의 경우로서 grit 형태의 자기연마재를 사용한 경우보다 표면거칠기가 저하되는 것을 볼 수 있는데, 이는 grit 형태의 자기연마재가 가공효율이 더 좋음을 의미한다. 또한 일정한 연마속도에서 자속밀도가 증가할수록 표면거칠기도 좋아지는 것을 볼

수 있는데, 이는 ball 형태의 자기연마재에서는 비교적 높은 자속밀도에서 가공해야 가공도가 증가함을 나타낸다. Fig. 7의 (b)는 ball 형태의 GC 연마입자를 사용하여 가공한 경우로서 WA를 사용한 경우와 큰 차이를 발견할 수 없는 것으로 보아 STS304 파이프 내면의 자기연마에 있어서 ball 형태의 자기연마재는 가공도가 높지 않아 그다지 적합하지 않음을 알 수 있었다.

그리고 Fig. 5에서 볼 수 있는 바와 같이 본 실험에 사용한 이음매 없는 STS304 파이프는 산(peak)은 거의 없고 골(valley)이 깊게 파인 표면구조를 가지고 있다. 이러한 표면구조는 베어링롤이 높아서 표면거칠기를 향상시키기 위해서 많은 절삭량을 가져야만 한다. 따라서 자기연마 가공법을 이용한 초정밀 미세가공을 통한 표면거칠기 향상에는 매우 불리한 표면구조를 지니고 있음을 알 수 있었다.

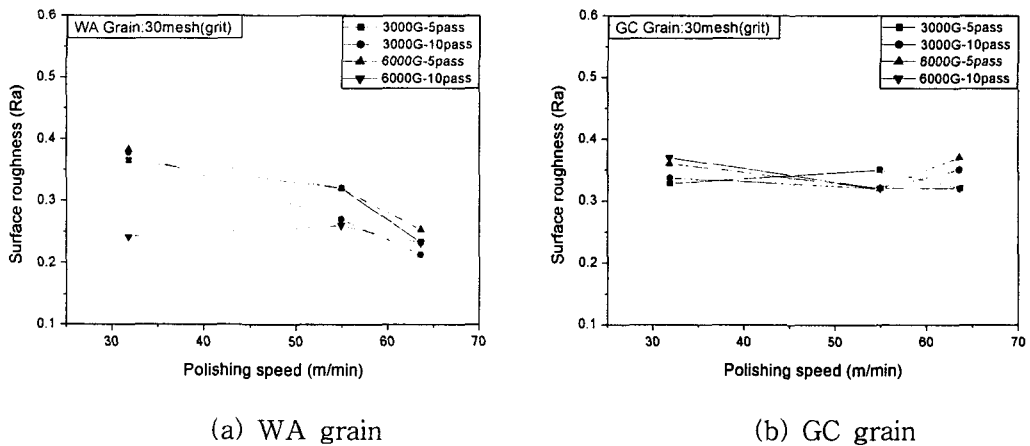


Fig. 6 Surface roughness according to variations polishing condition (grit type magnetic abrasive)

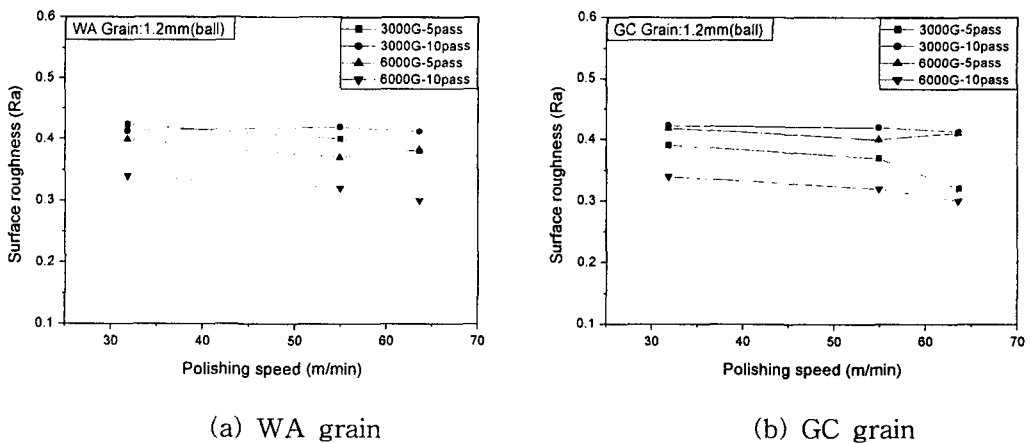
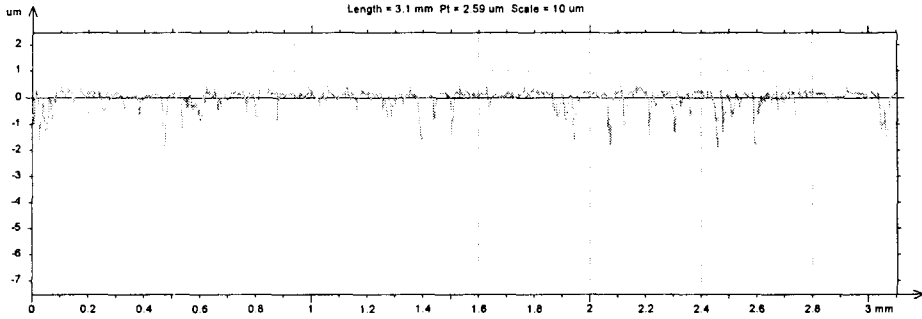
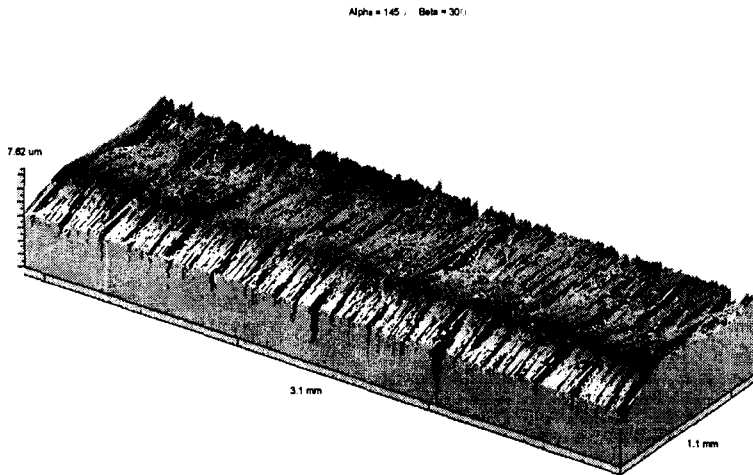


Fig. 7 Surface roughness according to variations polishing condition (ball type magnetic abrasive)

Fig. 8에 WA 연마입자를 사용하여 grit형태로 제조한 자기연마재로 63.6 m/min의 연마속도로 가공한 0.21 μmRa 의 거칠기 곡선과 표면 형상을 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 자기연마 가공에 의해 새로운 형상의 표면이 생성되었으나, 깊은 골(valley)에 의해 거칠기 측정값이 크게 나타남을 알 수 있다.



(a) Surface roughness curve



(b) Surface roughness profile

Fig. 8 Surface roughness profile after magnetic polishing

4.2 자기연마재의 거동

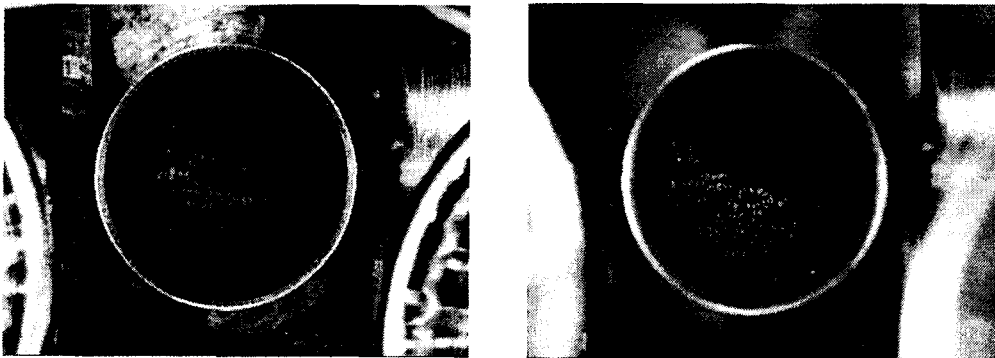
자기연마 가공은 자력을 발생시키는 자극과 자기연마재 사이에 위치한 피가공물을 자기흡인력을 이용하여 표면을 가공하는 방법이다. 따라서 자극에서 가해지는 자기력과 연마속도에 따라 피가공물 내부에서 변화되는 자기연마재의 거동은 자기연마의 가공능률을 결정짓는 중요한 인자이다. 본 연구에서는 비자성체 재료인 STS304 내면의 자기연마 가공시 자기연마재의 거동을 고찰하였다. 자기연마 가공에 있어서 자기연마

재의 거동은 동적인 상태에 있으나, 종래의 연구에서는 주로 정적인 상태에서 검토함으로써 실제의 상황에 접목하기에는 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 자기연마 가공 중에 있는 연마재의 동적인 거동을 고찰하였다.

Fig. 9는 자기연마 장치에 STS304 파이프를 장착하고 자속밀도를 3,000 G로 설정한 다음 연마재를 투입하여 자기연마 가공을 진행하고 있는 상태를 보여준다. Fig. 9의 (a)는 자기력만 인가한 정적인 상태에서의 연마재 거동을 나타낸 것으로서 전자석에서 발생된 자기력에 의해 자기 브러시가 형성되어 파이프 내면으로 자기연마재를 강하게 끌어 당겨진 형상을 볼 수 있으며, (b)는 63.6 m/min의 연마속도로 파이프가 회전하면서 가공이 진행되는 동적인 상태에서의 자기연마재 거동을 보여주고 있다.

자극에 의해 발생된 자기력이 자기연마재에 작용하는 힘(F_z)이 연마력의 기초가 되며, 자기연마재 입자의 파이프 내면에 대한 상대운동이 연마특성에 직접 관계되는 인자이다. 이러한 자기연마재의 파이프 내면에 대한 상대운동 거동은 접선력(F_y)에 의해서 변화된다. 따라서 여기서는 자기력과 연마속도에 따라 변화되는 자기연마재의 상대운동에 대한 동적인 거동을 고찰하였다. 동적인 상태에서 자기브러시를 형성하는 자기연마재는 자기력과 접선연마저항에 의해 파이프 내면의 가공영역을 이동하면서 연마가 끝난 입자를 뒤쪽의 새로운 입자가 자생적으로 대체되며, 또한 접선연마저항에 의해 축방향으로 원과 같은 궤적을 가지고 자기연마재가 브러시를 형성하면서 회전하면서 교반(攪拌)되는 거동이 나타남을 볼 수 있었다.

이러한 자발적으로 발생하는 자기연마재의 자생 대체·교반 거동에 의해 가공물 표면이 미세하게 가공되는 연마기구가 형성됨을 알 수 있었다.



(a) static state

(b) rotation state

Fig. 9 Photo. of magnetic brush (magnetic flux density 3,000G)

5. 결론

Sludge 연마입자를 이용한 STS304 파이프 내면을 자기연마 가공을 통하여 다음과

같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 연마속도와 자속밀도가 증가함에 따라 표면거칠기는 향상되는 경향을 나타낸다.
- 2) Sludge와 WA 연마입자를 사용하여 제조한 자기연마재가 GC입자를 사용한 경우보다 자기연마 능력이 우수한 결과를 나타내었다.
- 3) 분말(grit)형태로 제조한 자기연마재가 볼(ball)형태의 자기연마재 보다 가공능률이 우수하다.
- 4) 동적인 상태에서 자기 연마재는 자기력과 접선연마저항에 의해 가공영역을 이동하면서 연마가 끝난 입자는 뒤쪽의 새로운 입자로 자발적으로 대체되며, 축방향으로 원과 같은 자취를 그리면서 브러시가 회전하며 교반되는 거동이 나타남을 알 수 있었다.
- 5) 범용선반에 자기연마 장치를 부착하여 자기연마 가공이 가능함을 알 수 있었으며, 이를 활용함으로써 슷돌형태의 내면 연마를 벗어나 작업 안전성을 높이고, 청정가공을 통해 산업위생에 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 산학협동재단의 2003년도 학술연구비 지원에 의하여 수행된 과제로서 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- 1) 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.
- 2) Masahiro ANZAI and Takeo NAKAGAWA, "磁氣研磨加工の高效率化," 生産研究 第45卷 12号, pp.816-820, 1993.
- 3) 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.
- 4) 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 620号, pp.312- 318, 1998.
- 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) 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.
- 7) 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.

- 8) Hitomi Yamaguchi, Takeo Shinmura, “内面磁気研法における磁性砥粒の特異な挙動と加工能率向上効果,” 機械と工具, pp.89-93, 1999.
- 9) 김희남, 윤여권, 심재환, “STS304 파이프 내면의 초정밀 자기연마”, 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp.947~952, 2001.
- 10) 김희남, 윤여권, 심재환, “STS304 파이프 내면의 초정밀 자기연마”, 한국산업안전·위생학회 공동학술대회 논문집. pp.179~185, 2001.
- 11) 김희남, 윤여권, 심재환, “자기연마를 이용한 STS304 파이프 내면의 초정밀 가공”, 한국산업안전학회지, Vol. 17, No. 3. pp.30~pp.35, 2002.
- 12) 김희남, 송승기, 정윤중, 윤여권, 김희원, 조상원, 심재환, “Ba-Ferrite를 이용한 자기연마재 개발”, 한국산업안전학회지, Vol. 18, No. 2. pp.46~pp.49, 2003.