

자기 연마법에 의한 질화 규소계 세라믹 파이프 내면의 경면 연마 특성에 관한 연구

朴 源 圭* · 進村 武男**

(2000년 1월 6일 접수)

A Study of a New Precision Finishing Process for Inside Surface of Silicon Nitride Fine Ceramic Pipe by Application of Magnetic Abrasive Machining

Won-Kyou Park and Takeo Shinmura

Key Words: Silicon Nitride Fine Ceramic Pipe(질화규소계 세라믹 파이프), Magnetic Abrasive Machining(자기연마법), Precision Finishing(경면연마)

Abstract

Results are presented of a new process for internal precision finishing of slender fine ceramic pipes using a magnetic field generated by a permanent magnets. For finishing the interior surface of a long pipe, a new type of finishing equipment was developed which can be very easily used in an industrial surrounding. In general, the pipe is so slender that a conventional finishing tool is hardly inserted into the pipe deeply, being impossible to finish. Therefore, a new technology has been considered to finish inside of a slender ceramic pipe by a simple technique. In this experimental, Magnetic Abrasive Machining is applied for the inner surface of silicon nitride fine ceramic pipe using ferromagnetic particles mixed with chromium-oxide powder. It is shown the initial roughness of $2.6\mu\text{m Ry}(0.42\mu\text{m Ra})$ in the inside surface can be precisely finished to the roughness of $0.1\mu\text{m Ry}(0.01\mu\text{m Ra})$. This paper discusses the outline of the processing by the application of magnetic abrasive machining and a few finishing characteristics.

1. 서 론

반도체 제조, 원자력, 의료, 항공 우주 관련 각종 산업 분야에서 초 고도화된 청정화 기술 중 하나로 청정 파이프의 제조 기술이 절실히 요구되고 있다. 또한 청정 파이프는 대부분 재질도 난삭재이면서 용도에 따라서는 극미세직경이거나 길고 구부러진 관 등이 많아 일반적인 내면 가공법의 적용이 어렵기 때문에 새로운 방법의 청정

파이프 내면 가공법에 대한 연구 개발이 필요하게 되었다. 대표적인 난삭가공재인 세라믹의 경우 일반적으로 다이아몬드 스톨을 이용해서 가공하고 있는데, 이 방법이 가공비 면이나 능률적인 면에서 최선인 것은 아니다. 그래서 용도에 따라서는 다이아몬드 스톨을 사용하지 않고 기계적인 메커니즘이 아닌 새로운 경면 가공법에 대해 연구하게 되었으며, 평면이나 원통 외면의 단순 형상에 대해서는 새로운 가공법이 개발되고 있다.⁽¹⁾

필자 외 1인은 자성스톨 입자를 이용한 자기 연마법의 개발 연구를 전개하여⁽²⁾ 현재에 이르고 있으며, 특히 스테인리스 청정 파이프 내면의 경면 가공에 자기 연마법을 적용한 연구를 진행하고 있다. 본 연구는 세라믹 파이프 내면의 자기 연마법에 있어서 연마 압력의 발생 메커니즘에

* 회원, 경기공업대학

E-mail : wkpark@kinst.ac.kr

TEL : (031)4964-725 FAX : (031)4964-725

** 日本 宇都宮大學 工學部

관하여 검토하고, 또 철분 혼합 산화 크롬 입자를 이용한 질화 규소 세라믹 파이프의 자기 연마 실험을 실시하여, 세라믹 파이프 내면의 경면 연마 가능성을 실험적으로 확인하였다.

2. 세라믹 파이프 내면의 자기 연마법

파이프 내면의 자기연마법에서는 비자성 파이프 외부에 설치한 자극에 의해 파이프 내부에 불균일 자장분포가 일어나 파이프 내부에 투입한 자성입자와 자극 사이에 가공압력이 발생하며 파이프를 고속회전 시키면 내면과 자성입자 사이에 상대운동이 발생되어 내면이 연마된다. 이 내면 자기 연마법을 세라믹 파이프 내면 경면 연마에 적용하기 위하여 먼저 다이아몬드 자성 연마입자를 개발하여,⁽³⁾ 경면가공의 가능성을 제시하였다.⁽⁴⁾ 그러나 전용 다이아몬드 자성 연마 입자는 구하기가 쉽지 않고 제작도 매우 복잡하며 극히 고가이다. 따라서 질화 규소 세라믹 평면 및 환봉 외면의 정밀연마에 있어서 철분 혼합 산화크롬 연마입자를 이용하는 방법, 즉 가공물보다도 연질 재료로 가공이 가능하다는 메카노 케미컬 폴리싱 원리를 자기 연마법에 적용하여 초정밀 연마의 가능성을 확인하였다. Fig. 1은 연질입자와 경질 가공물 사이에 발생하는 고상반응의 접촉모델도⁽⁵⁾이다.

Fig. 2는 자극을 정지시키고 세라믹 파이프를 고속회전 시키면서 내면 자기 연마를 하는 「자극 정지·파이프 회전방식 내면 자기 연마법」의 개념도 이다. 자력선 통과 작용 즉 불균일 자장분포 작용에 따라 파이프 내면에 충전된 자성 연마입자(철분+산화크롬)가 자력을 받아 연마 압력을

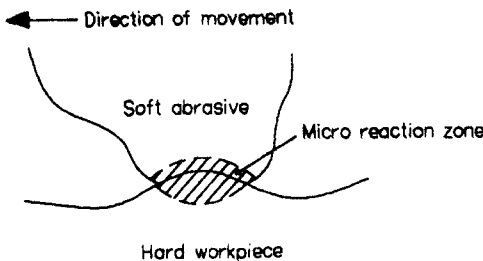


Fig. 1 Schematic view of workpiece-soft abrasive (Contacting model)

발생시킨다. 비자성 재료인 세라믹 자기 연마의 폐자기 회로 공극부분은 Fig. 2의 N-S 자극 사이로 자성 공작물의 경우에 비하여 자기저항이 높아지게 되고 자속 밀도가 떨어지며 동시에 자장 강도도 저하한다. 이 때문에 가공에 필요한 자력, 즉 연마압력을 얻기가 힘들다. 결과적으로 연마량이 감소하고 소정의 표면 거칠기를 얻는데 긴 시간이 필요하게 된다. 그래서 세라믹의 고능률 자기 연마법을 실현하기 위해 파이프 내면에 작용하는 자성 연마입자의 연마 압력을 증대 시킬 방안이 필요하다.

Fig. 2에서 연마압력은 자성 연마 입자가 자극에 흡인되는 자력으로 불균일 자장분포에 있어서 자성 연마 입자에 작용하는 자력선 방향 성분 자력 F_x 와 등자위선방향 성분 자력 F_y 의 합력 F 로 주어진다. 그리고 자력 F_x, F_y 는 다음 식으로 표시 할 수 있다.⁽⁶⁾

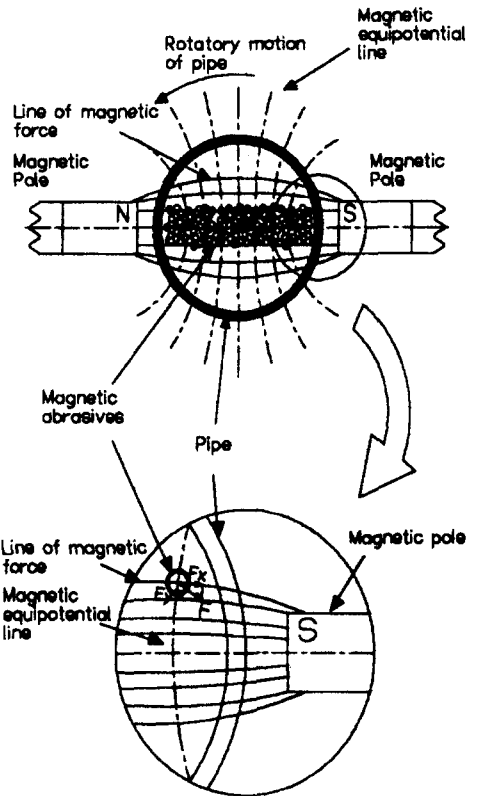


Fig. 2 Two dimensional magnetic field distribution and magnetic force acting on a magnetic abrasive particle

$$\begin{aligned} F_x &= kD^3\chi H(\partial H / \partial x) \\ F_y &= kD^3\chi H(\partial H / \partial y) \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서,

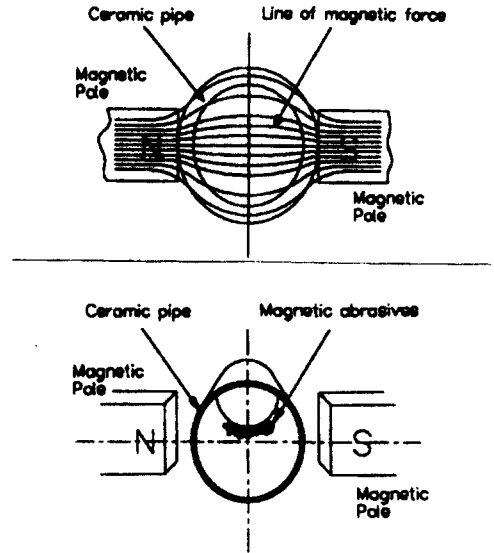
- k : 계수
- D : 자성연마입자를 구형으로 가정했을 때의 입자 직경
- χ : 자성 연마 입자의 자화율
- x, y : 자력선방향 및 등자위선방향의 좌표
- $H(\partial H / \partial x), H(\partial H / \partial y)$: 자력선방향 및 등자위선방향의 자장강도와 그 변화율의 곱

그러므로, 합력벡터는 다음과 같다.

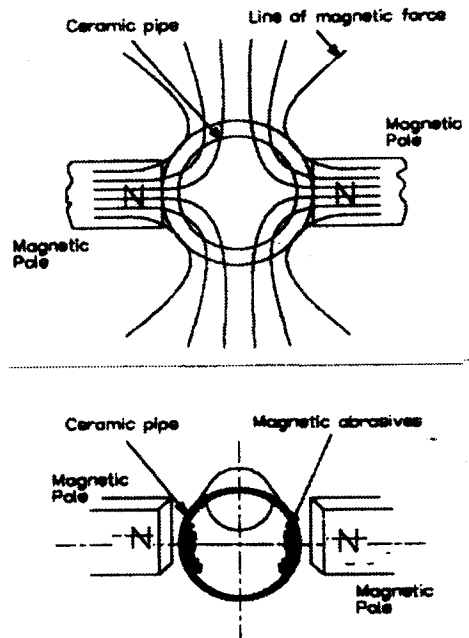
$$F = \sqrt{(F_x^2 + F_y^2)} \quad (2)$$

이 양자력은 자립 입자 직경 D 의 3제곱과 자화율 χ 의 곱에 비례해서 증가한다. 자화율 χ 는 자성 연마입자의 재료와 그 제조과정에서 결정된다. 이에 반해 입자직경 D 는 임의의 값을 선정할 수 있다. 또 자성 연마입자의 작용압력은 자장강도 H 와 그 변화율 $(\partial H / \partial x), (\partial H / \partial y)$ 의 곱(이 곱을 자장분포의 값이라 부른다)에 영향을 받는다. 그러므로 자성 입자직경을 크게 하므로써 작용압력을 높일 수 있고, 또 입자 직경이 일정하다면 작용압력을 크게 하기 위해서는 자장분포의 값을 높일 필요가 있다. 파이프 내면의 자장분포값을 높이기 위해서 자속누출을 최소화하여야하며 영구자석을 이용하여 자장분포값을 크게 하는 방법이 있다. 또한 자극 배치를 N-S흡인자장 또는 N-N 반발자장으로 하느냐에 따라 자장분포값이 변하는데 이 영향에 관해서는 실험에 의해 확인한다.

Fig. 3의 (a), (b)는 흡인자장과 반발자장의 자력선 분포도와 그에 따른 자성연마입자 분포의 모형도이다. 반발자장의 자장 변화율은 크지만 자장강도는 흡인자장 분포값에 비하면 작다.



(a) N-S attractive magnetic field distribution

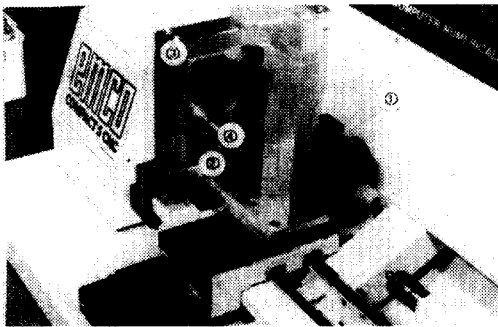


(b) N-N repulsive magnetic field distribution

Fig. 3 Arrangement of the magnetic poles

3. 연마장치 및 연마방법

Fig. 4는 실험에 이용한 가공장치 전체의 외관 사진이다. 내면연마 장치로서 CNC 소형탁상선반을 이용하였고, 선반 왕복대를 개조하여 영구자석으로 구성된 자장발생장치를 탑재하여 실험하였다. 자속누출의 최소화, 장치의 소형 경량화, 자극의 극성교환 등을 고려해서, 자극으로는 Fe-Nb-B영구 자석을 사용하였다. 세라믹 파이프는 선반 척에 고정하고 고속회전 시켜 가공하였다. Fig. 5는 자극의 형상 및 치수이며 간극은 파이프의 떨림을 고려한 최소값을 설정하였다. 실험에 사용한 세라믹 파이프는 $\phi 30$ 으로 경질 고무금형에 의해 성형 소결된 그대로의 내면을 전 가공표면[표면거칠기 $2.6 \mu\text{m Ry}$ ($0.42 \mu\text{m Ra}$)]으로 실험하였다. 자성 입자로는 전해 철분에 산화 크롬 연마입자(평균 입자 직경 $3 \mu\text{m}$)을 단순히 혼합한 철분혼합 산화크롬 연마입자를 이용하였다.



① CNC Lathe ② Magnetic
③ Yoke ④ Material

Fig. 4 External view of experimental set up

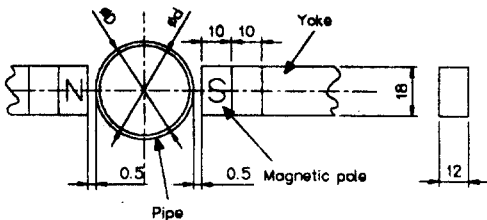


Fig. 5 Schematics of magnetic pole arrangement and size

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 입자공급량에 따른 연마량의 변화

세라믹 파이프는 고가이며 내면의 연마량은 극히 미소량이어서 연마량의 측정이 극히 곤란하고 가공조건 변경에 따른 연마량의 대소를 비교할 목적이라면 비자성 금속파이프를 사용해도 그 경향을 파악할 수 있으므로 본 절의 실험에서는 비자성 황동 파이프 (C3601 $\phi 32 \text{ mm}$, t:1 mm)와 철분 혼합 자성연마입자(철분 : 평균입자직경 $510 \mu\text{m}$, 자성연마입자 : 평균입자직경 $80 \mu\text{m}$)을 사용해 시험하였다. Fig. 6은 철분 혼합 자성연마입자의 공급량에 따른 연마량 변화를 회전수 별로 실험한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 파이프 회전수에 따라 차이는 보이지만 공급량이 2.5 g 정도가 연마량이 많은 것으로 보여 진다. 공급량이 적을 때는 가공에 관여하는 자성연마입자의 수가 적기 때문이며, 공급량이 과다할 경우에는 자성 연마입자에 미치는 자력보다 회전력이 커져 자성 연마입자가 회전하는 파이프와 같이 회전하게 되어 파이프 내면과의 상대운동이 일어나기 어렵고 결과적으로 연마량이 감소하는 것으로 생각된다.

Table 1 Experimental conditions

Work	C3601 : Brass Pipe
	$\phi 23 \times \phi 30 \times 70 \text{ mm}$
Mixed type Magnetic abrasive	Supply amount : 1~7 g Iron particles : 50 wt% ($510 \mu\text{m}$ in mean dia.) Magnetic abrasive : 50 wt% ($80 \mu\text{m}$ in mean dai.)
	Pole
Magnetic flux density (inside tube)	Fe · Nd · B permanent magnet 0.47 T
Work revolution	500, 1000, 2000 rpm
Lubricant	Straight oil : 10 wt% supplied
Finishing time	2 minutes

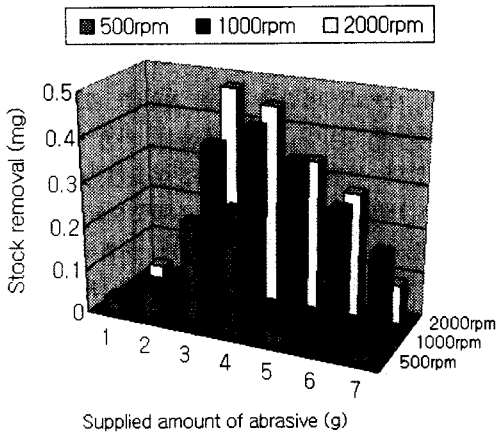


Fig. 6 Change in material removal with supplied amount of abrasive

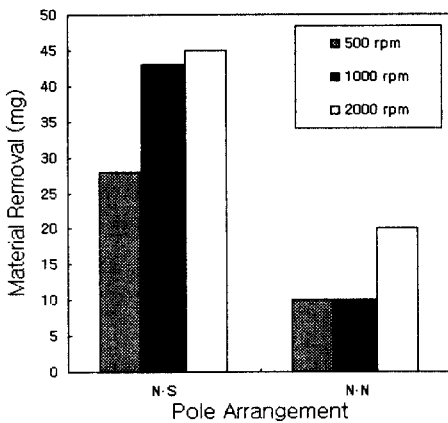


Fig. 7 Changes in material removal with magnetic pole arrangement [conditions] mixed type magnetic abrasive supplied amount : 4 g

4.2 N-S흡인자장 및 N-N 반발자장에서의 연마량

Fig. 7은 N-S 흡인자장 분포 및 N-N 반발자장 분포가 연마량에 미치는 영향 즉 Fig. 3(a), (b)에 대응하는 연마실험의 결과이다. 이 실험에서는 N-N반발자장 분포에 있어서 철분 혼합 자성연마 입자의 거동은 가공면적이 넓게 퍼지기 때문에 공급량을 4 g으로 약간 늘려서 실험하였다. 어느 회전수에서나 N-S 흡인자장분포가 N-N 반발자장 분포에서의 연마량 보다도 크다는 것을 실험 결과로 알게 되었다.

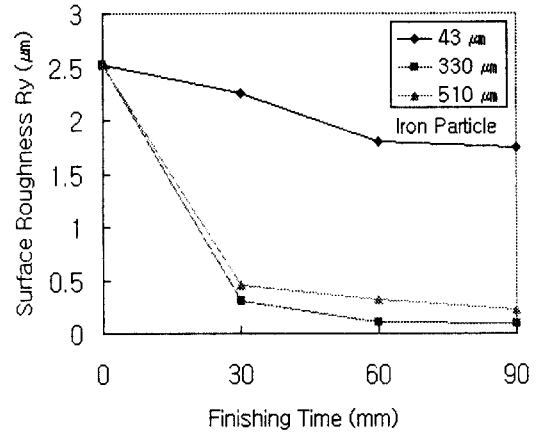


Fig. 8 Change in surface roughness with finishing time

Table 2 Experimental conditions

Work	Si ₃ N ₄ Ceramic Pipe
	φ23×φ30×70mm Hv1450
Mixed type Magnetic abrasive	supply amount : 2.5 g
	Iron particles : 80 wt% (330 µm in mean dia.)
	Cr ₂ O ₃ : 50 wt% (3 µm in mean dai.)
Pole	Fe · Nd · B permanent magnet
Magnetic flux density (inside tube)	0.34 T
Work revolution	500, 1000, 1800 rpm
Lubricant	Straight oil : 10 wt% supplied

4.3 철분의 입자직경 및 혼합비가 연마속도에 미치는 영향

Fig. 8은 혼합되는 철분의 입자직경이 파이프 내면의 연마속도에 미치는 영향을 실험한 결과이다. 또한 Table 2는 그 때의 가공조건이다.

식 (1)로부터 철분의 입자직경이 43 µm으로 작은 경우에 연마압력은 작아지고 연마량도 극소량인 것으로 추정되어 가공면은 그다지 연마되지 않는다는 것을 알 수 있다. 또한 입자직경이 330µm,

510 μm 로 커지게 되면 연마속도가 빨라지는 것을 알 수 있는데, 이것은 식 (1)에 의하여 자성연삭 입자 1개에 작용하는 자력이 입자직경의 3제곱에 비례하여 결정되기 때문이라 생각된다. 그리고 철분과 산화 크롬연마입자의 중량 혼합비를 [4:1] 과 [3:2] 2종류로 하여 파이프 회전수 1800 rpm, 연마시간 30분, 그 외의 조건은 Table 1과 같게 연마 실험한 결과 2.6 μm (0.42 μm Ra)의 전가공 표면 거칠기가 각각 0.33 μm (0.44 μm Ra) 및 0.35 μm Ry(0.05 μm Ra)로 되었다. 큰 차이는 보이지 않았으나 [4:1] 혼합비의 경우의 연마속도가 약간 빠르다는 것을 알았다. 그래서 이하의 실험에서는 [4:1] 혼합비를 이용하여 실험을 진행하였다.

4.4 회전수가 내면의 연마속도에 미치는 영향

Fig. 9는 파이프의 회전수가 내면의 연마속도에 미치는 영향을 실험한 결과이다. 기본적으로 파이프 회전수의 영향은 가공거리에 관계하기 때문에 전가공의 거친 표면이 제거되고 있는 가공의 진행 중에는 회전수가 높으면 높은 만큼 단시간에 연마가 가능하다는 것을 알았다. 회전수가 영향을 주는 시간범위는 30분 정도이고, 그 이후의 영향은 적어지며 연마 정밀도는 시간에 대하여 거의 평행적으로 되어 매우 작은 변화밖에 없다는 것을 알 수 있다.

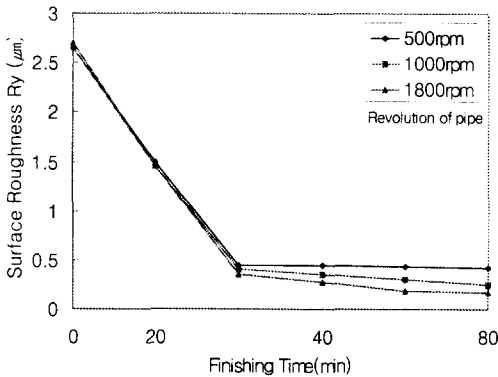


Fig. 9 Change in surface roughness with finishing time [conditions] iron particle diameter : 330 μm

4.5 자기연마법으로 얻어진 세라믹 파이프 내면 표면 거칠기의 한계치

철분 혼합 산화크롬 연삭입자를 이용하여 질화 규소 세라믹 파이프 내면을 도달 가능한 표면 거칠기의 한계치를 얻기 위해 충분한 가공시간을 주어 자기 연마 실험을 하였다. 실험조건은 파이프의 회전수 1800 rpm, 연마시간 180분으로 하고 그 외의 조건은 Table 2와 동일하게 실험하였다. 실험결과 가공전의 표면 거칠기 2.6 μm Ry(0.42 μm Ra)가 0.1 μm Ry(0.01 μm Ra)로 되었다. Fig. 10(a), (b)는 파이프 내면의 가공전과 가공후의 표면상태를 비교하기 위하여 격자 무늬의 판 위에서 찍은 외관 사진이다. 가공후의 내면은 격자 무늬가 선명하게 반사되어 경면으로 정밀연마 되었음을 쉽게 알 수 있다.

본 실험에서는 파이프에 회전운동만을 주어서 가공을 하였고 자장 발생장치의 이송이나 축 방향의 진동운동은 주지 않았다. 그래서 연마시간을 충분히 하였어도 회전방향의 가공흔적은 제거되지 않았고 최종 한계치가 0.1 μm Ry(0.01 μm Ra)에 머문 것으로 판단된다. 현재 연마 속도와 정밀도를 향상 시키기 위한 방안으로 축 방향의 진동운동을 중첩 시켰을 때의 연마 특성을 실험 중에 있으며 좋은 결과가 기대된다.

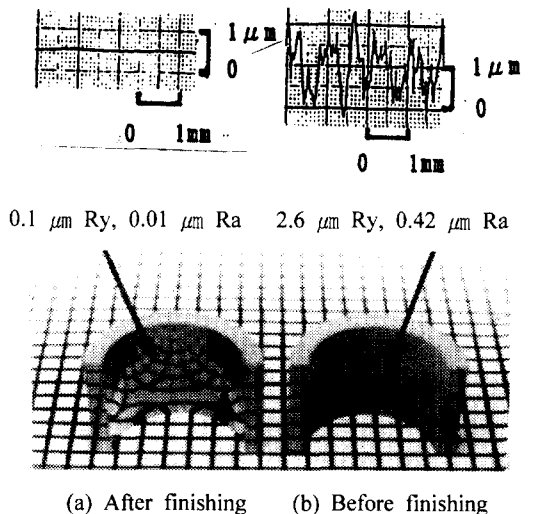


Fig. 10 Photograph of inner surface of tubes before and after finishing

5. 결 론

본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) N-S 흡인 자장 분포에 있어서의 연마량은 N-N반발자장 분포에서의 연마량 보다 높게 나타났다.
- (2) 파이프 내부에 투입하는 철분혼합 자성연마 입자의 공급량에는 최적치가 있으며 본 실험조건에서는 2.5 g이 최적치 이다.
- (3) 질화규소 세라믹 파이프 내면을 고 능률로 연마하기 위해서는 혼합하는 철분 입자직경이 330 μm 이상이 되어야 한다.
- (4) 세라믹 파이프 내면의 연마속도에 미치는 회전수의 영향은 근소하지만 본 실험에서는 높은 회전수에서 연마능률이 향상되었음을 알 수 있었다.
- (5) 영구자석을 이용한 간단한 장치로서 질화규소 세라믹 파이프 내면의 전가공 표면 거칠기 2.6 μm Ry(0.42 μm Ra)를 0.1 μm Ry(0.01 μm Ra)의 초정밀 경면으로 가공할 수 있다는 것을 확인하였다.

후 기

마지막으로 실험에 사용한 질화규소 세라믹 파이프의 일부는 일본 특수요업 주식회사로부터 제공받았고, 실험의 일부는 한일 산업기술 협력재

단과 일본 중소기업 창조기반기술 연구사업의 보조금을 받아 실시하였다. 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) 北嶋弘一, 車全浩, 鈴木清, 植松哲太郎, 1994, “ラツビグテープによるセラミックスのメカノケミカルポリ싱,” 砥粒加工學會誌, Vol. 38, No. 3, pp. 159~165.
- (2) 進村武男, 1996, “磁氣研磨,” 機械技術, Vol. 44, No. 1, pp. 49~60.
- (3) 進村武男, 會澤利夫, 1992, “磁氣研磨法によるファインセラミックスの平滑加工-ダイヤモンド磁性砥粒の開発とその研磨性能,” 砥粒加工學會誌, Vol. 36, No. 2, pp. 91~99.
- (4) 進村武男, 王鳳輝, 會澤利夫, 1993, “磁氣研磨法によるファインセラミックスの平滑加工に関する研究-強磁性體粒子混合ダイヤモンド磁性砥粒の研磨能率向上效果,” 日本精密工學會誌, Vol. 59, No. 8, pp. 1251~1258.
- (5) 安永, 今中, 1974, “メカノケミカル現象を應用した結晶材料の精密研磨法,” セラミックス, Vol. 9, No. 4, pp. 21~28.
- (6) 進村武男, 山口人見, 1993, “精密研磨法による内面の潤滑加工に関する研究-ステンレス鋼圓管内面及びクリンカスボンベ内面の精密研磨,” 日本機械學會論文集(C 編), Vol. 59, No. 8, pp. 1261~1267.