

자력에 의한 극청정 내면의 연마가공에 관한 연구

김정두* · 허강운**

(2000년 3월 25일 접수)

Polishing of Ultra-Clean Internal Surface Using Magnetic Force

Jeong-du Kim and Gang-woon Heo

Key Words: Internal Polishing(내면연마가공), Magnetic Abrasive(자기입자), Surface Roughness(표면조도), Magnetic Force(자력)

Abstract

Recently, the technology for internal polishing is needed for ultra-clean machining for the prevention of corrosion and pollution of parts is the area of high technology industries such as semiconductor, electronics, telecommunication, optics, aerospace, and motors. In this study, an internal polishing system using the magnetic force was developed for the production of ultra-clean tubes with averaged surface roughness ranging from $0.02\mu\text{m}$ to $0.05\mu\text{m}$ or less, and magnetic abrasives composed of WC/Co powder were developed. After finding the optimal condition on each, machining characteristics using newly developed abrasive were analyzed. From the results obtained by experimental design method, the optimal polishing condition was analyzed, and thereafter internal polishing was done.

기호설명

- B : 공극에서의 자석밀도 [T]
- F : 한 개의 자기입자에 작용하는 힘 [N]
- Ft : 공작물의 회전에 의한 마찰력 [N]
- H : 공극에서의 자기장 강도 [AT/m]
- N : 한 개의 자기입자에 작용하는 법선력 [N]
- V : 한 개의 자기입자의 부피 [m^3]
- td : 절삭깊이 [m]
- Δf : 한 개의 인선에 작용하는 힘 [N]
- α : 한 개의 자기입자에 작용하는 힘과 법선력 사이의 각 [deg.]
- 2θ : 인선이 이루는 평균각 [deg.]
- μ : 마찰계수
- μ_0 : 진공에서의 자기투자율 [wb/AT/m]

1. 서론

최근 내면연마가공 기술은 반도체, 전자·통신, 광학, 항공우주 및 자동차 등과 같은 첨단산업분야에서 사용부품의 부식방지 및 오염방지를 위한 극청정가공 요구가 급증하고 있다. 기존의 정밀가공 방법으로 초사상 및 연마가공 등이 있으나, 기계적인 연마가공법은 위와 같은 산업의 첨단 부품이나 진공관(vacuum tube), 도파관(wave guide), 위생관(sanitary tube)과 액체 파이핑 시스템 등의 가공표면을 고정도로 향상시키는데에는 한계가 있다. 따라서 극청정 제품에 요구되는 고정도의 내면을 얻지 못함으로 인해 생산현장에서 고품질의 부품을 고능률적으로 생산하는데 생산성 및 경제성 면에서 많은 문제점을 내포하고 있다.

현재 첨단분야의 핵심부품들은 수소, 산소, 질소 등의 내재기준량에 따라 극청정 내면을 요구하는 것이 중요하며, 부품의 부식 방지 및 오염방지를 위하여 표면조도 Ra $0.02 \sim 0.05\mu\text{m}$ 이하의

* 회원, 세종대학교 기계공학과
E-mail : jdkim@sejong.ac.kr
TEL : (02)3408-3770 FAX : (02)3408-3540
** 태양기연주식회사

평활화와 광택면이 요구되고 있다. 이러한 고정도의 제품을 얻기 위한 극정밀 내면연마가공 기술로서 전해 연마가공법과 여기에 자기에너지가 추가된 자기전해 연마가공법⁽¹⁾ 등이 있다. 이러한 방법은 고능률·고정밀 내면연마가 가능하며 극정밀 가공표면을 생성시킬 수 있어 고부가가치의 제품을 얻을 수 있다.

기존의 연구에서는 철계와 알루미늄 자기입자로 이루어진 혼합형 자기입자를 이용한 청정가스 용기의 내면 연마⁽²⁾와 영구자석을 이용한 극회전 시스템을 긴관의 내면 연마⁽³⁾에 적용하여 가공특성 및 극배열에 따른 영향을 분석하였다. 또한 철계에 다이아몬드입자가 소결된 자기입자를 이용한 MAP(Magnetic Abrasive Polishing)방법을 초지립휠의 드레싱(Dressing)에 적용하여 그 드레싱 효과를 분석한 연구⁽⁴⁾와 자기입자만을 사용한 경우와 마그네틱 지그(Jig)를 사용한 각 경우의 내면연마공정에서 표면형상의 미시적인 변화를 비교분석⁽⁵⁾해 보았고 회전자기장을 이용한 입자가공에서 실제 가공압력을 결정하는 자극 및 요크에서의 자속밀도분포를 FEM해석하여 가공특성을 분석⁽⁶⁾하여 발표된 연구자료들이 있다. 본 연구에서는 고능률 가공을 하기 위한 자력을 이용한 내면연마가공 시스템을 개발하였다.

이 시스템은 가공압력을 생성하는 전자석 부분과 전동메커니즘 부분으로 구성된다. 튜브내면에 구속되어 있는 자기입자와 생성된 자력의 관계를 간단한 구성도를 통해 그 가공원리를 분석하였다. 또한 각각의 가공조건이 표면조도에 미치는 영향을 조사하여 입자의 가공특성을 분석하였다.

2. 이론적 기초

2.1 가공원리

Fig. 1은 내면연마가공 시스템의 구성도를 나타내고 있다. 자기입자가공의 기본적인 원리는 두 자극사이의 공극에 공작물을 놓고 자기장의 세기 및 자기장의 공간적 구배를 이용하여 가공력을 얻는 방법이다. 전자석 코일에 전류를 흘려주면 관 내부에 공급된 자기입자가 관 밖에 위치한 극에 의해 생성된 자기장 분포에 의해 연마가공 영역으로 집중된다. 이 때 각각의 자기입자가 받는 힘의 크기는 다음과 같다.⁽⁶⁾

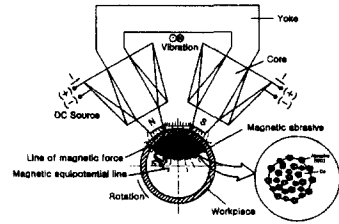


Fig. 1 Schematic view of internal polishing system

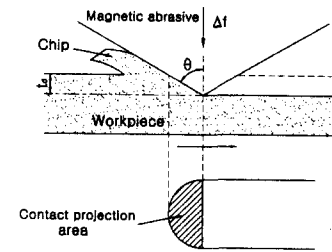


Fig. 2 Mechanism of magnetic abrasive machining

$$F_x \propto V H \frac{\partial H}{\partial x}$$

$$F_y \propto V H \frac{\partial H}{\partial y} \quad (1)$$

여기서 $\frac{\partial H}{\partial x}$, $\frac{\partial H}{\partial y}$ 는 x를 자력선의 방향, y를 등자위선의 방향을 나타낸다고 할 때 각각의 자기장 강도의 구배를 나타낸다. 식1에 따르면 각 방향에 대한 힘은 자기입자의 크기와 자기장 강도와 그 구배에 비례함을 보여주는데 이것은 실험을 통해 증명된다. 또한 공극에서의 자기장 강도와 자속밀도와의 관계는 다음과 같다.⁽⁷⁾

$$B = \mu_0 H \quad (2)$$

Fig. 2는 자기입자가공의 기본 메커니즘을 도식적으로 표현한 그림이다.

이 그림에서 자기입자의 인선은 2θ 를 가지는 원추형이라 가정되었으며, 전자석에 의해 형성된 자기장 내에서 하나의 인선에 작용되는 가공력(Δf)에 따라 일정한 절삭깊이(t_a)를 갖고 재료제거가 일어난다고 생각할 수 있다. 따라서 가공력은 원하는 절삭깊이를 제어하는 매우 중요한 인자로 생각할 수 있다.

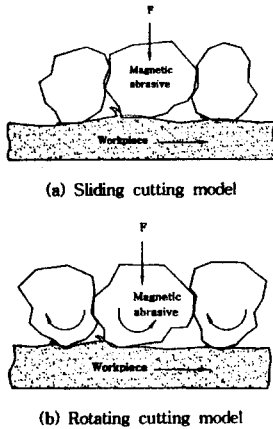


Fig. 3 Micro-cutting model

Fig. 3은 미소절삭모델을 표현한 그림으로서 전자석에 의해 생성된 자기장 내에서 공작물의 내면과 자기입자 사이에서는 크게 두 종류의 모델로 생각할 수 있다. 첫 번째로는 긁기 작용에 의한 미끄럼운동을 하면서 절삭이 이루어진다고 가정할 수 있는데 그림에서와 같이 공작물이 회전하는 동안 자기입자는 일정한 가공압력을 가진 상태에서 절삭이 이루어진다. 두 번째로는 회전운동을 하면서 절삭이 이루어지는 경우로서 공작물이 회전하는 동안 일정한 가공압력을 가진 자기 입자가 스스로의 회전운동을 하면서 절삭이 이루어진다.

2.2 자기입자의 특성

Table 1은 WC분말 Co분말 결합체를 가하여 액상소결한 입자의 물리적, 기계적 성질을 나타내고 있다.⁽⁸⁾ 자기입자의 무게는 20ml를 기준으로 하여 정밀저울을 이용하여 측정하였으며 측정오차는 ± 0.5g이다. 무게는 일반적인 철의 비중보다 약 2배정도 차이가 나므로 배로 무거우며 인성을 결정짓는 항절력은 일반적인 세라믹(Al_2O_3)보다 약 5배정도 차이가 나는데 이것은 입자의 수명이 수배 더 길어진다는 장점이 될 수 있다.

그 외 열전도성과 경도, 영의 계수, 열팽창률의 값들이 나타나고 있다. 또한 자기입자의 중요한 성질로서 고온경도에 강하며 내마멸성이 우수하다는 점이며 특히 Co함유량이 증가할수록 인성과 내충격성이 증가하는 반면, 경도와 내마멸성이 감소하는 경향이 있다.

Table 1 Properties of WC+Co magnetic abrasive

Properties	WC+Co
Weight(g)	84.1± 0.5(ml)
Hardness(H _R A)	84
Young's modulus (× 10 ⁻³ kg/mm ²)	49
Transverse rupture strength (kg/mm ²)	246
Thermal expansion(10-6/ °C)	6.3
Thermal conductivity (cal/sec/ °C/cm)	0.17

3. 실험장치 및 방법

Fig. 4(a)는 가공이 이루어지는 부분을 확대한 사진으로서 전자석, 요크, 자극을 가지는 전자석 시스템과 진동 시스템, 공작물로 구성된다. 전자석 시스템에서는 공작물의 표면과 자극의 표면이 서로 평행면을 이루도록 하기 위해 자극의 끝부분을 오목하게 설계하였으며 이것은 일정한 자속 밀도를 균일하게 공작물의 내면에 있는 자기입자에 전달해야 하기 때문에 매우 중요하다. 실험에 사용된 각각의 전자석은 Ø 0.9인 에나멜선을 1500회 감아서 제작하였으며 공작물에 대해 V형을 갖도록 설계하였다. 코어, 요크 부분의 재질은 연강이며 진동시스템과 연결되는 부분은 알루미늄을 사용하여 누설자장이 생기지 않도록 하여 자력손실을 줄이도록 하였다. 진동시스템은 전자석 시스템과 일체형이며 공작물의 축 방향으로 진동을 주기 위해 제작되었다.

Fig. 4(b)는 본 연구에서 사용된 시스템의 전체적인 외관을 보여주고 있다. 그림에서와 같이 내면연마가공 시스템은 선반의 왕복대에 고정되어 있으며 공작물은 선반주축에 의하여 회전할 수 있도록 하였다. 여기에서 인버터1은 공작물의 연마가공 속도를 제어하기 위한 것이며, 인버터2는 진동시 모터의 회전속도를 제어하기 위해 사용된다. 가우스미터는 가공영역의 자속밀도를 측정하기 위하여 사용되며, 직류 전원 공급장치(DC Power supply)는 두 전자석에 각각 연결되어 코일에 전류를 공급하고 자력을 발생시키는데 사용

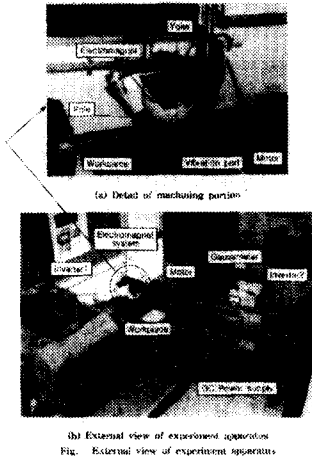


Fig. 4 External view of experimental apparatus

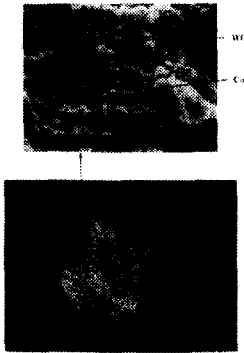


Fig. 5 SEM photograph of magnetic abrasive (WC+Co, #90)

Table 2 Experimental conditions

Workpiece	SUS304 (ϕ 38.1 \times 1.2 \times 40)	
Mean diameter of magnetic abrasive	WC+Co	#90, #240, #360
Supplied amount of magnetic abrasive	8 ~ 15 g	
Magnetic flux density	0.4T	
Polishing speed for workpiece	67 ~ 157 m/min	
Vibrational amplitude	7mm	
Vibrational frequency	1 ~ 5 Hz	
Machining fluid	light oil(0.4 ~ 1.6m ^l)	
Machining time	3 ~ 15 min	

된다. 공작물로는 SUS304(ϕ 38.1 \times 1.2t) 튜브를 사용하였다.

그 크기는 #90이고 WC 분말에 Co 분말 결합제를 가하여 액상소결시킨 것을 사용하였다.

Table 2는 본 실험에서 사용된 실험조건을 나타낸 것이다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 WC+Co입자의 가공특성

Fig. 6은 입자량을 변화시켜 가면서 표면조도를 분석한 경우로서 연마가공속도를 112m/min으로 한 실험결과이다. 측정값의 표준편차는 10mm를 가진다. #360입자는 입자량이 증가함에 따라 약간의 표면조도 향상은 있었으나 가공능력에는 커다란 영향을 미치지 않았다. #240입자는 공작물 내면에서 자기입자의 인선에 의한 스크래치를 형성하면서 미소 절삭이 이루어졌으며 10g 정도까지는 완만하게 증가하다가 10~13g 정도에서는 급격한 증가를 보였다. 그러나 과잉 공급된 입자는 주어진 자력에 대해 충분한 구속압력을 가지지 못하고 텀블링과 격심한 회전운동을 하면서 더 이상 표면조도 향상에는 기여하지 못하였다.

#90입자는 자력에 의해 자기브러쉬를 형성하며 일정한 가공압력을 가지고 미소절삭이 이루어졌으며 처음 10g 정도까지는 완만하게 증가하다가 10~12g 정도에서는 급격한 표면향상이 이루어졌으며 그 이후로는 #240입자의 경우와 같이 자기입자 스스로 텀블링과 격심한 회전운동으로 인해 표면조도는 악화되었다.

그 원인은 자력과 깊은 관련이 있으며 또한 자극의 끝 부분과 입자가 위치하고 있는 거리와도 매우 관련이 깊다. 실제로 공작물벽면까지는 자력이 미치는 영향이 매우 강하나 벽면에서 멀수록 자력이 미치는 영향이 매우 작아지므로 과다한 입자가 공급되면 형성된 자기브러쉬의 끝부분에서는 쉽게 탈락이 일어나게 된다. 또한 탈락된 입자들이 공작물 내면을 따라 회전한 후 가공부위를 지나면서 가공능률을 떨어뜨리는 결과를 초래하므로 가공표면향상에 나쁜 영향을 미치게 된다. 또 결과에서는 일정한 자력에 대해 입자가 커질수록 가공능률이 향상됨을 나타내고 있는데 이것은 다음과 같이 고찰되었다.

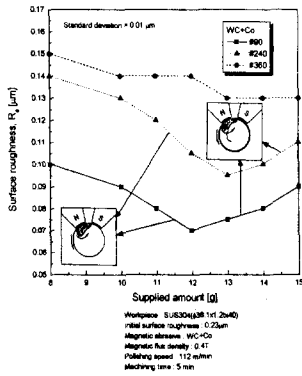


Fig. 6 Surface roughness according to supplied amount of magnetic abrasives

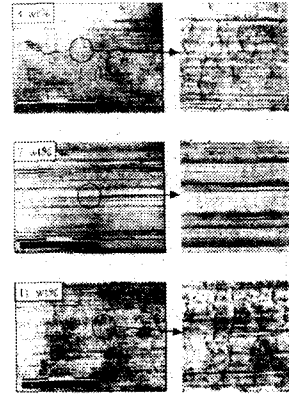


Fig. 8 Photograph of machined surface according to weight percent ratio

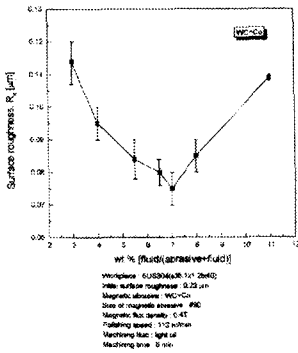


Fig. 7 Surface roughness according to weight percent ratio

식 (2)에 따르면 자력이 일정할 경우 일정한 자기장 강도를 가지게 되며 식 (1)에서와 같이 자기장 강도가 일정할 때 자기입자가 큰 것일수록 가공력이 증가하므로 공작물 내면에 구속되어 있는 자기입자의 가공압력이 상대적으로 높아지므로 어느 정도까지는 표면조도 향상에 많은 기여를 하게 된다고 할 수 있다. 특히 본 실험결과에서 입자량이 10~13g 정도에서 표면조도의 급격한 변화가 일어난 것으로보아 주어진 자력에 대해 적절한 가공압력을 가지는 것으로 생각되며 #90의 입자 12g을 사용하는 것이 가공능률성 면에서 타당함을 알 수 있었다.

Fig. 7은 입자량과 가공액량의 무게비에 따른 표면조도의 변화를 나타낸 것이다. 무게비가 3 wt%인 경우 Ra 0.114 μm이었으나 점차적으로 증

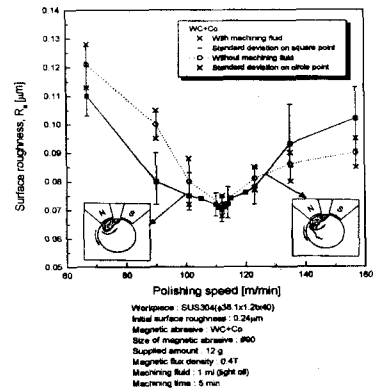


Fig. 9 Surface roughness according to polishing speed

가하여 7 wt%에서 Ra 0.075 μm의 양호한 표면조도를 나타내었다. 그러나 이후부터는 가공액의 과잉공급에 따라 표면조도가 더 좋아지지 않는 경향을 나타내었다. Fig. 8은 위의 결과에 대한 가공표면을 나타낸 사진이다. 3 wt%인 경우 확대된 사진에서 가공표면이 주름진 모양을 하고 있는데 이는 가공이 덜 진행된 상태를 나타내는 것이다. 7 wt%의 경우 확대된 사진의 가공표면에서 일정한 스크래치를 형성하고 있는데 자기입자에 의해 생성된 새로운 표면임을 보여주는 것이다. 그러나 11 wt%의 경우 확대된 사진에서는 거의 가공이 진행되지 않은 상태로 남아 있다. 이와 같이 가공액의 과잉사용은 처음 몇 분 동안은 가공액 중에서 자기입자가 부유하는 슬러리화

를 유발시키며 공작물과 접촉되는 부위에서는 윤활작용이 활발해짐으로 마찰력이 감소하게 되어 표면조도가 향상되지 않는다.

또 일정시간이후에는 가공액 내의 열이 제거되는 가공액의 응고화가 발생하는데 이 현상은 공작물의 표면에 스크래치를 생성하는 결과와 같다. 결과적으로 실험에 의해 결정된 무게비는 7 wt% 정도가 적당함을 알 수 있었다.

Fig. 9는 연마가공 속도와 가공액의 유무에 따른 표면조도의 변화를 나타낸 실험결과이다. 그림에서 두 곡선의 공통적인 현상으로 연마가공 속도가 증가할수록 가공효율이 증가하므로 표면조도가 향상되었다. 그러나 일정속도이상에서는 가공표면의 향상을 방해하는 고속회전에 의한 마찰력의 영향하에서 자기입자가 공작물과 함께 회전하기 시작하게 된다. 또한 같은 속도에서 가공액을 사용한 경우가 그렇지 않은 경우보다 표면조도가 더 좋아짐을 알 수 있는데 이것은 자기입자 미소절삭모델로부터 설명될 수 있다.

우선 가공액을 사용하지 않은 경우는 건식 모델로 생각하면 일정한 가공압력에 의해 구속된 자기입자는 공작물이 회전함에 따라 일정속도까지는 적당한 마찰력을 가지면서 Fig. 3(a)과 같은 굽기 작용과 미끄럼운동이 일어나면서 미소절삭을 한다고 생각할 수 있다. 그러나 일정속도이상에서는 자기입자가 Fig. 3(b)과 같은 회전운동과 약간의 미끄럼운동만을 반복하게 되므로 더 이상의 표면조도 향상에는 기여하지 못하게 된다. 또한 가공액을 사용한 경우는 습식모델로 생각하면 가공액이 입자사이에 충전되어 이웃한 입자들과의 응집력을 증가시켜 하나의 입자덩어리와 같은 효과를 나타내게 되므로 일정한 가공압력에 대해 굽기작용에 의한 미소절삭이 주로 일어나게 되므로 가공효율성이 증가하며 가공표면조도가 향상된다.

그러나 일정속도이상에서는 건식모델과 마찬가지로 회전에 의한 마찰력의 영향하에 커다란 입자덩어리는 공작물이 회전하면서 내면에서 회전운동을 하게 되며 또 공작물과 접촉한 부위에서는 고온의 마찰열에 의해 윤활작용이 촉진되므로 공작물과 자기입자 사이의 마찰력이 감소되어 미끄럼운동이 발생하게 되므로 표면조도 향상에 기여를 하지 못하게 된다.

Fig. 10은 연마가공 속도에 따른 가공표면을 나

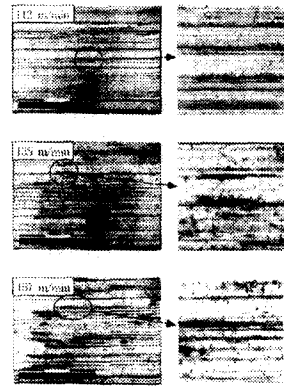


Fig. 10 Photograph of machined surface according to polishing speed

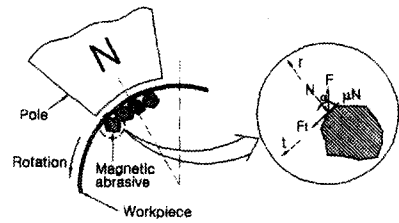


Fig. 11 Freebody diagram on a magnetic abrasive in machining area

타낸 사진이다. 연마가공 속도 112 m/min인 경우 가공표면은 대체적으로 일정한 스크래치가 형성되어 있으나 속도가 증가하면 가공표면에 15 μ m 정도의 표면손상이 나타나는데 이는 공작물의 고속회전에 대한 자기입자 스스로의 회전이 상대적으로 매우 느리기 때문에 생긴 결과라 추측되며 자기입자의 예리한 인선이 표면을 따라 일정길이의 스크래치를 형성시킨 후 회전하여 미끄럼운동을 한 것으로 사료된다. 이는 Fig. 11에서와 같이 공작물벽면에 구속되어 있는 하나의 자기입자에 대하여 자유물체도를 그린 후 다음과 같은 식을 유도할 수 있다. 여기서 자기입자 하나의 무게는 매우 작으므로 중력에 대한 영향은 무시한다. 반경방향의 힘들은 다음의 조건을 만족한다.

$$fr = F\cos\alpha - N = 0 \quad (3)$$

따라서 $N = F\cos\alpha$ 가 된다. 그리고 접선방향의 힘들은 다음과 같다.

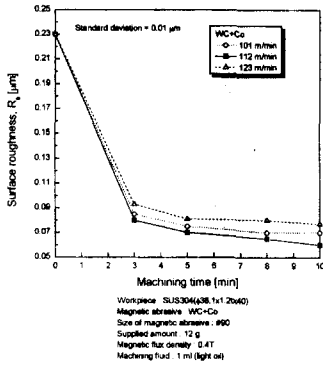


Fig. 12 Surface roughness according to machining time

$$f_t = Ft - \mu N = Ft - \mu F \cos \alpha \quad (4)$$

식 (4)에서 $f_t \leq 0$ 이면 자기입자가 Fig. 3(a)과 같이 긁기 작용에 의한 미끄럼운동을 한다고 할 수 있으며 이러한 조건은 저속회전과 최적의 회전속도에서 나타나며 자기입자들이 공작물의 회전에 의해 생기는 마찰력에 대하여 자력에 충분히 이끌리면서 스크래치를 형성한다고 생각할 수 있다. 따라서 연마가공 속도가 증가하면 표면조도도 함께 향상된다고 할 수 있다. 반대로 $f_t > 0$ 이면, 자기입자가 Fig. 3(b)과 같이 미끄럼운동과 회전운동을 한다고 볼 수 있으며 이러한 조건은 고속회전인 경우에 나타나는 현상으로 자기입자들의 공작물 회전에 의해 생기는 마찰력에 비해 자력에 이끌려 스크래치를 형성하기 위한 힘이 상대적으로 작기 때문에 부분적인 스크래치만을 생성시키면서 입자들 스스로 회전운동을 하게 되며 공작물에 접촉된 부근에서는 고온의 마찰열에 의해 윤활작용이 촉진되어 마찰력 감소에 의한 미끄럼운동이 발생하여 일정회전속도 이상에서는 오히려 표면조도가 급격히 감소하게 된 것이다.

Fig. 12는 이상의 실험결과로부터 얻어진 연마가공 속도 112 m/min의 부근에서는 표면조도에 어떤 영향을 주는지를 알아보기 위하여 가공시간에 따른 표면조도를 측정 한 결과이다. 여기서 측정된 표준편차는 0.01 μm를 가진다. 그림에서 가공시간에 따라 표면조도가 향상되고 있으며 연마가공 속도가 123 m/min인 경우보다 101 m/min

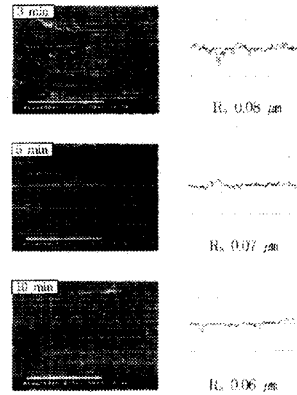


Fig. 13 SEM Photograph of machined surface according to machining time(112m/min)

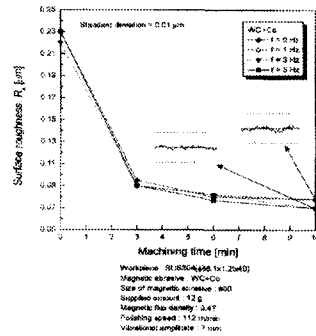


Fig. 14 Surface roughness according to vibrational frequency

인 경우가 112 m/min의 경우와 거의 비슷한 정도의 표면조도 향상에 기여하고 있음을 알 수 있었다. Fig. 13은 112 m/min의 연마가공 속도에 대하여 가공시간에 따른 가공 후 표면을 전자현미경 촬영한 사진이다. 처음 3분이 경과된 후의 표면에서는 가공이 진행된 흔적이 남은 스크래치들이 형성되어 있으나 아직 가공이 진행되지 않은 표면하층이 존재하고 있다. 5분이 경과된 후의 표면에서는 가공이 진행되지 않은 표면하층이 존재하고 있다. 가공시간 10분이 경과된 후의 표면은 가공시간 5분에서 나타난 표면과 비교해 보면 스크래치 형상의 골과 산 부분의 높이 차가 줄어들어 전체적인 평활화작용이 일어났음을 알 수 있다.

Fig. 14는 진동수에 대한 영향을 분석하기 위

Table 3 Experimental variables and levels

Effect	Variables	Levels		
		1	2	3
A	polishing speed	90 m/min	112 m/min	135 m/min
	weight percent ratio	5 wt%	7 wt%	9 wt%
C	polishing time	5 min	10 min	15 min
Commo n	magnetic flux density	0.4T		

Table 4 Design and result(3^{3-1} design)

Run	A	B	C	Ra(μ m)
	1	2	3	
1	1	1	1	0.080
2	1	2	3	0.078
3	1	3	2	0.090
4	2	1	2	0.075
5	2	2	1	0.072
6	2	3	3	0.080
7	3	1	3	0.085
8	3	2	2	0.083
9	3	3	1	0.107

한 실험결과를 나타내고 있다. 측정값의 표준편차는 $0.01\mu\text{m}$ 를 가진다. 빠른 연마가공 속도에 대하여 일정한 면적의 원주방향의 스크래치만이 존재한다고 가정할 때 축 방향으로의 진동을 추가함으로써 보다 능률적이며 원주방향에 대한 스크래치뿐만 아니라 축 방향에 대한 스크래치 형성에 의해 평활화 작용이 활발히 진행된다고 할 수 있다. 실험결과에서는 진동수가 증가할수록 표면조도의 향상이 미소하게 나타나고 있으며 진동수가 0 Hz인 경우와 5 Hz인 경우를 비교할 때 진동효과에 있어서 미소한 차이를 보이고 있다.

4.2 실험계획법에 의한 검증

Table 3은 실험을 통해 얻은 결과를 가지고 실험계획법(9-11)의 적용을 위해 나타낸 실험변수와 수준을 각각 보여주고 있다. 여기서는 실험계획법의 적용을 위한 각각의 인자에 대한 실험범위를 나타내었고 실험계획법을 통해 최적조건을 얻는데 목적을 두고 있다. 또한 얻어진 실험 결과의 최적조건에 대한 통계적인 유의성을 검증하는데에도 그 중요성이 매우 높다.

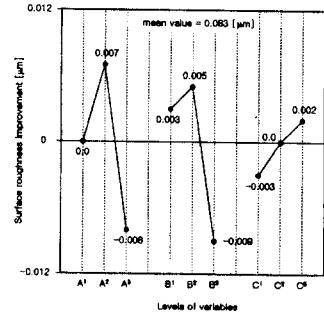


Fig. 15 Surface roughness improvement v.s levels for each variable relative to mean value

Table 5 Analysis-of-variance table

Effect	Sum of square ($\times 10000$)	Degree of freedom	Mean square ($\times 10000$)	Fo
A	3.86	2	1.93	7.42 °
B	3.73	2	1.87	7.19 °
C	0.45	2	0.23	0.88
Error	0.52	2	0.26	-
Total	8.56	8		

Table 4는 3^{3-1} 디자인에 기초한 직교배열표와 그 실험 결과를 나타내고 있다. 여기서 실험을 통해 얻어진 결과를 가지고 분산 분석하였다. Fig. 15는 Table 4를 통한 실험결과와 평균값에 대한 표면조도 향상량을 그래프로 나타낸 것이다.

Table 5는 Table 4의 실험결과 값을 가지고 분산 분석한 결과를 보여주고 있다. 여기에서 수준 $\alpha=0.25$ 에서 $F_{0.25,2,2}=3$ 이므로 연마가공 시간을 제외한 모든 효과는 통계적으로 유의하다고 볼 수 있으며, 연마가공 시간의 경우 다른 값들과 비교할 때 $F_{0.25,2,2}=3$ 보다 작으므로 통계적으로 유의하지 않으며 오차에 포함시킬 경우 Table 5를 통해 얻어지는 각 인자의 최적조건은 $A^2 B^2$ 가 된다. 이 중에서 가장 영향력이 있는 실험변수는 가공 속도와 가공액에 대한 입자량의 비임을 알 수 있으며 경제성과 편리함을 고려하여 적절한 값을 선택하면 된다.

4.3 내면연마가공

Fig. 16은 앞에서 수행한 실험계획법에 의한 최

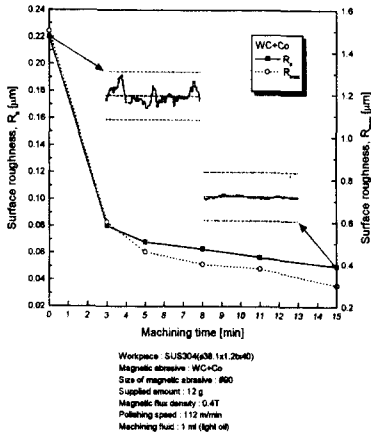


Fig. 16 Surface roughness according to machining time

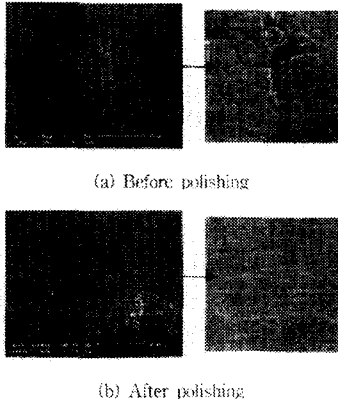


Fig. 17 SEM Photograph of surface before and after polishing

적조건을 적용하여 내면연마가공한 결과이다. 그림에서 가공시간 3분이 경과된 후 표면조도가 급격히 향상되었고 그 이후로는 점진적으로 향상되고있음을 알 수 있다. Fig. 17은 연마가공 전후의 표면을 나타낸 전자현미경 사진이다. 부분 확대시킨 사진에서 연마가공 전의 표면에는 중간중간 조직이 분리되어 있으나 연마가공후의 표면에는 위와 같은 형상이 완전히 제거되어 새롭고 매끄러운 표면이 생성되어 있음을 나타내고 있다. 가공 후 표면형상에서 나타나고 있듯이 최초 표면조도가 R_a 0.22 μm 에서 연마가공후 R_a 0.05 μm 로 향상된 결과를 얻었다.

5. 결론

자력을 이용한 내면연마가공 시스템과 새로운 분말입자(WC+Co)를 개발하여 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

고능률 가공을 위해서는 자력에 충분히 이끌려야 하므로 #90입자와 같이 큰 것이 적합함을 알 수 있었으며 공급된 입자량도 표면조도를 향상시키는 데 있어서 매우 중요한 인자임을 알 수 있었다.

가공액과 입자량과의 무게비에 의존하여 표면조도가 크게 변화함을 확인할 수 있었으며 7 wt%일 때 표면조도(R_a 0.075 μm)를 얻을 수 있었다. 가공액을 주입함으로써 자기입자가 공작물내면에서 분산되는 것을 억제하며 입자의 응집성을 증대시켜 일정속도까지는 가공효율성이 향상됨을 알 수 있었다. 그러나 일정속도이상에서는 고온의 마찰열에 의해 윤활작용이 촉진되어 마찰력을 감소시켜 표면조도 향상을 저해하는 요인으로 작용하였다.

본 실험에서 축 방향으로의 진동 효과는 가공능률 면에서 매우 경미하게 나타났다.

본 실험에서 자력을 0.4T로 일정하게 유지시킨 후 실험계획법을 통해 검증해본 결과 연마가공속도 112 m/min, 가공액에 대한 입자량에 대한 비 7 wt%의 최적조건이 얻어졌으며 이 조건으로 15분동안 연마가공한결과 R_a 0.05 μm 의 양호한 가공표면이 얻어짐을 알 수 있다.

참고문헌

- (1) 김정두, 1999, "고능률· 고정밀 전해연마 가공 기술 및 장치개발에 관한 연구(최종보고서)," 산업자원부, K-MOTIE/KAIST-99/005, pp. 91 ~ 125.
- (2) Shinmura, T. and Yamaguchi, H., 1995, "Study on a New Internal Finishing Process by the Application of Magnetic Abrasive Machining (Internal Finishing of Stainless Steel Tube and Clean Gas Bomb)," *JSME*, Vol. 38, No. 4, pp. 798 ~ 804.
- (3) Yamaguchi, H., Shinmura, T. and Kaneko, T., 1996, "Development of a New Internal Finishing Process Applying Magnetic Abrasive Finishing by Use of Pole Rotation System," *JSPE*, Vol. 30, No.

- 4, pp. 317~322.
- (4) Suzuki, K., Takeuchi, K., Uematsu, T. and Makizaki, T., 1999, "A New Dressing Method for Superabrasive Wheels Utilizing Magnetic Abrasive Polishing," *JSPE*, Vol. 33, No. 1, pp. 27~31.
- (5) Yamaguchi, H., Shinmura, T., 1999, "Study of the Surface Modification Resulting from an Internal Magnetic Abrasive Finishing Process," *WEAR* 225-229, pp. 246~255.
- (6) 김정두, 1995, "자기장을 이용한 입자가공 시스템 개발에 관한 연구(최종보고서)," 한국과학재단, K-KOSEF/KAIST-95/044, pp. 84~105.
- (7) Roters, Herbert C., 1970, *Electromagnetic Devices*, John Wiley & Sons, New York.
- (8) Yih, Stephen W. H. and Wang, Chun T., 1979, "Tungsten; Sources, Metallurgy, Properties, and Applications," Plenum press New York and London.
- (9) Montgomery, D. C., 1976, "Design and analysis of experiments," *Wiley*, New York.
- (10) Box, G. E., Hunter, W. G. and Hunter. J. S., 1978, "Statistics for Experimenters," *Wiley*, New York.
- (11) 김정두, 최민석, 1994, "반응표면분석법에 의한 화인세라믹스(Al_2O_3) 원통래핑의 최적화에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제18권, 제4호, pp. 856~865.