

원형관의 내면정밀가공용 순환식 자기입자분사가공 시스템 개발

Development of Magnetic Abrasive Jet Machining System for Precision Internal Polishing of Circular Tubes

강윤희<sup>1)</sup> \* · 김정두<sup>1)</sup> (한국과학기술원) · 배영한<sup>2)</sup> · 이수원<sup>2)</sup>(LG전자)

<sup>1)</sup>305-701 대전광역시 유성구 구성동 373-1 한국과학기술원 기계공학과 정밀가공 및 공작기계 연구실  
<sup>2)</sup>641-110 경상남도 창원시 가음경동 391-2 LG전자 생산기술센터 기술개발연구소

Youn-Hee Kang<sup>1)</sup> \* · Jeong-Du Kim<sup>1)</sup> (KAIST) · Young-Han Bae<sup>2)</sup> · Su-Won Lee<sup>2)</sup>(LG Electronics Inc.)

<sup>1)</sup>Lab. for Precision Machining & Machine Tools, Dept. of Mechanical Engineering, KAIST, Taejon, 305-701

<sup>2)</sup>Manufacturing Technology Center, LG Electronics Inc, Changwon, Gyeong Nam, 641-110

**Abstract :** A recently developed finishing process using rotating magnetic field is known to be very efficient for the finishing of parts such as vacuum tube, sanitary tube, etc., which are difficult to be finished by the conventional finishing methods as they are generally curved tubes. But, the finishing system using rotating magnetic field have the defect that is the cross section of workpiece only circle because of internal rotating tool. Therefore, new finishing process of the workpieces which cross section are not circle is important and required. Magnetic abrasive jet machining is a new concept finishing process. It is the precision internal finishing method using working fluid mixed with magnetic abrasives, which is jetted into the internal surface of tube. And magnetic poles are equipped on external surface of tube.

In this study, new concept finishing process or, magnetic abrasive jet machining system was developed. Machining condition was predicted using simulation and some characteristics of the finishing process was analyzed.

1. 서론

반도체, 전자, 통신, 의료기기등에 사용되는 핵심부품들은 매우 높은 표면정밀도를 요구하고 있으며 그 중에서도 기존의 래핑이나 폴리싱방법으로는 내면가공이 불가능한 형상을 가지고 있는 진공관(vacuum tube), 도파관(wave guide), 위생관(sanitary tube) 등은 내면의 표면 거칠기가 성능을 좌우할 정도로 중요시되고 있음에도 그 가공 공정의 개발이 미흡한 실정이다.

최근 반도체 제조용 고순도 가스공급관등의 내부를 자기장을 이용하여 능률적으로 고정도의 표면을 생성할 수 있는 새로운 다듬질 가공법인 자기입자가공(Magnetic abrasive machining)법에 대한 관심이 높아지고 있다. 이 가공법의 장점은 가공압력이 전자석 코일에 인가되는 전류에 의해 발생되고 그 크기도 인가된 전류의 크기에 의해 조절이 가능하기 때문에 가공공정을 제어하기가 용이하다는 것과 전자석이 직접 공작물과 접촉하지 않고 어느정도의 간격 즉, 가공공극이 허용되기 때문에 기존의 방법보다 공작물의 형상에 구애받음이 적어 복잡한 형상의 부름가공 및 가공의 자동화 가능성이 높다는 것이다. (1, 2) 이러한 자기입자가공의 장점을 이용하여 과거 수작업으로 이루어져 왔던 기존의 표면 다듬질가공, 버제거가공, 정밀 챔버링(chambering)을 자기입자가공으로 대체하기 위해 현재 많은 연구가 진행 중이다. (1-7)

기존의 적용사례를 보면 원통 외면가공(1), 평면가공(3), 에지(edge)가공(4), 튜브 내면가공(5-7) 등이다. Shimura(5-7)는 진공챔버, 위생튜브등의 비자성체인 공작물의 내면가공에 자기입자연마가공을 적용하였는데, 자극과 자극사이에서 자기 브러쉬(brush)를 형성시켜 공작물과의 상대운동을 위해 공작물을 회전시키면서 동시에 그와 수직인 방향으로 진동을 주며 가공하는 방법과 공작물의 회전이 불가능한 곡판의 경우는 회전자기장을 이용하여 공작물과의 상대운동을 일으켜 가공하는 방법을 연구하였다.

본 연구에서는 기존과 다른 새로운 개념의 내면가공용 자기입자분사가공 시스템을 개발하였고 시뮬레이션을 통하여 가공조건을 예측하였으며 가공실험을 수행하여 그 가공특성을 분석하였다.

2. 자기입자분사가공 시스템의 구성 및 특징

Fig.1은 시스템의 전체적인 구성 개략도이다. 자기입자분사가공 시스템은 유체 및 자기입자 공급시스템, 유체와 자기입자 혼합부, 노즐, 전자석부, 자기장을 발생시키기 위한 직류전원(0~100V, 최대 5A), 혼합 유체 배출부, 자기입자 수거통등으로 구성되어 있다. 유체는 압축공기(최대 4~5 atm)를 이용하였으며 유량조절밸브로 유량(최대 250N/min)이 조절된다. 입자의 공급은 분사유체에 의해 자동적으로 이루어지고, 따라서 유체와 자기입자가 혼합하게 된다. 혼합된 유체와 자기입자는 노즐(φ10mm)을 통하여 분사되고, 배출관(φ50mm)을 통해 속도 및 압력을 낮춘뒤 배출된다. 입자수거통기에 수거된 입자는 입자 공급관을 통하여 다시 사용되게 된다.

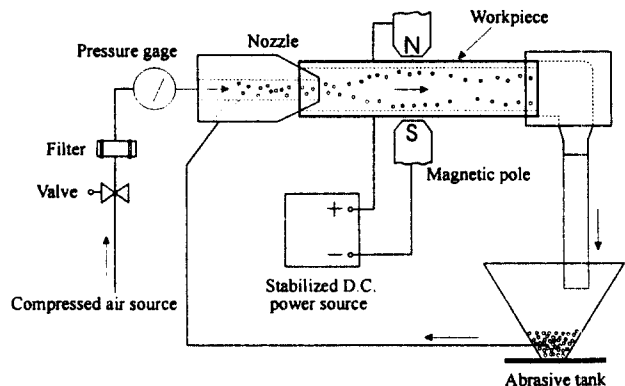


Fig.1 Schematic diagram of magnetic abrasive jet machining system

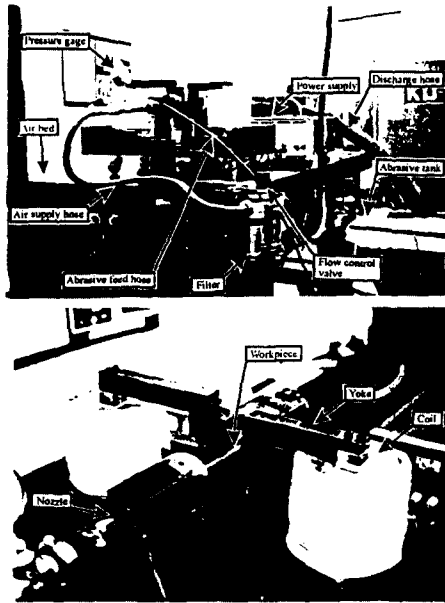


Fig.2 External view of experimental apparatus

전자석부는 코어 2개로 구성되어 있다. 코일에 3A를 인가해 줄 경우 가공공극에서 자속밀도가 최대 2.0T가 발생하도록 설계가 되었다. 코일은 직경 1mm의 구리선(copper wire)으로 코일의 권선수는 각각 약 5000번이다. 또한 전자석부에 바퀴를 달아 유체가 분사되는 방향으로 이동하게 하여 길이가 긴 튜브제품의 내면 폴리싱을 가능하게 하였다. 전자석의 세기는 코일에 인가되는 전류의 크기로 제어된다.

Fig. 2은 개발된 자기입자분사가공 시스템을 나타낸다.

### 3. 자기입자분사가공 시스템의 원리

시스템의 기본 가공원리는 자성연마입자를 압축공기에 혼합하여 공작물의 내면으로 고속으로 분사시키고 공작물의 외면에 자극을 설치하여 분사되는 자기연마입자를 공작물 내면의 표면쪽으로 끌어당기게 함으로써 연마입자들이 판내면을 치고 지나가도록하여 효율적이고 정밀한 폴리싱을 가능하도록 한다. (Fig.1 참조)

Fig. 3는 자기입자분사가공의 원리를 자세하게 설명하는 그림이다. 그림 (a)와 같이 기본적으로 가공은 전자석을 설치하지 않고 분사만 시켜도 이루어진다. 그림 (b)는 분사가공에 전자석을 설치했을 경우에 변화된 가공원리를 나타낸다. 전자석을 설치한 이유는 자기연마입자를 공작물의 내면쪽으로 끌어당기어 가공력을 크게하고 공작물의 내면에서의 자성연마입자의 분포를 증가시켜 효율적으로 폴리싱이 이루어지도록하는 것이다. 즉, 기본적인 가공은 분사가공으로 이루어지고 전자석의 역할은 가공효율을 증가시키는 것이다.

### 4. 가공조건 예측을 위한 시뮬레이션

전자석을 설치하지 않고 분사가공정만으로도 기본적으로 가공이 이루어져야하므로 가공이 일어날 수 있는 최소의 유속이 존재할 것이고, 전자석의 역할 즉, 가공의 효율성을 제한하는 전자석 세기의 범위 등 기본적인 가공조건 범위가 존재할 것이다. 그리고 그 범위에서 최적 가공조건 또한 존재할 것이다. 자기입자분사가공의 가공변수로는 유체의

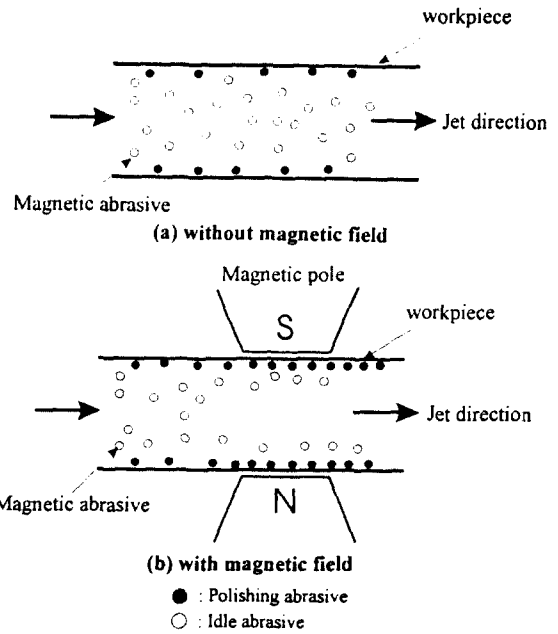


Fig.3 Schematic view of machining principle

유속, 전자석의 세기 그리고 자기입자의 크기로 대별된다. 최적의 가공조건은 자기입자가 공작물에 너무 강하게 붙지 않거나 그냥 지나치지 않고 적절한 가공력을 가질 수 있는 유속과 전자석의 세기의 조합이다. 이런 최적 가공조건을 실험적으로 구할 경우 이형판 내면을 측정하는 것이 어려울 뿐만 아니라 매우 비효율적이므로, 수학적 해석에 의해 가공조건을 예측하는 것이 필요하다.

시뮬레이션 절차는 자속밀도의 분포를 구하고 그 분포를 이용하여 자기입자의 궤적 해석을 하였다. 해석된 입자의 궤적과 가공공정의 모델링을 통하여 가공량을 예측하였다. 시뮬레이션에 사용된 상수는 Table 1과 같다.

#### 4.1 가공영역의 자속밀도 분포 해석

정적 자기장(static magnetic field)이 존재하는 공간에는 식(1)과 같은 라플라스 방정식이 성립한다.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\alpha^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\beta^2} = 0 \quad (1)$$

where,  $\phi$ =magnetic vector potential

해석공간의 경계조건을 이용하여  $\phi$ 의 분포를 알아내고, 그 분포를 이용하여식(2)의 자속밀도 B를 구한다.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{\phi} \quad (2)$$

또한 자기장의 세기(H)와 자속밀도(B)는 식(3)과 같은 관계를 가진다.

Table 1 The properties of magnetic abrasive, electromagnet, and workpiece and machining conditions for simulation

Magnetic Abrasive	Pure iron, Diameter $d=80,100,150,200\mu\text{m}$ Density $\rho=7.86 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$ Susceptibility $\chi_m=0.251 \text{ H/m}$
Electromagnet	Mild steel, Permeability $\mu=5000 \times \mu_0$ , Size of Magnetic Pole=10mm
Workpiece	SUS304, inner diameter=10 mm Density=7781.2 $\text{ kg/m}^3$
Working Fluid	Air(Max. 4~5atm, 250Nl/min)
Velocity of Abrasive	15, 25, 35, 45m/s
Magnetic Flux Density on magnetic pole	1T, 2T

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_1} \quad (3)$$

where,  $\mu_1$ =magnetic permeability

자기장이 존재하는 공간을 해석하기 위해서 사용된 그리드(grid) 및 경계조건은 Fig.4와 같다. 해석공간에 전자석의 일부분도 포함하고 자기입자가 분사되는 방향(x방향)으로 해석 공간을 크게 택하여 해석결과의 신빙성 보장과 경계조건 설정에 편리함을 도모하였다. 경계조건을 보면 3,7부분은 자극이 위치한 곳으로  $\phi=\phi_0$ 으로 일정하고 1,2,4,5,6,8부분은 자극에서 자극길이의 3배 정도로 충분히 떨어져 있으므로  $\phi=0$ 로 하였다. 11,12,13,14부분에서는 자속이 흐르지 못하게 절연되어 있어 자속의 손실이 없다고 보았다. 또한 9,10부분은 전자석과 공기의 경계로써 자력이 통과하고 매질이 바뀌는 경계이다.

#### 4.2 자기입자의 궤적 해석

자기입자의 궤적을 해석하기 위해 자기장내에서 하나의 자기입자가 받는 힘의 분포를 알아야 한다. 자기입자가 자기장내에 존재할 때 입자에 작용하는 힘은 식(4)과 같다. (1)

$$F_x = V_m \chi_m \mu_0 \left( H_x \frac{\partial H_x}{\partial x} + H_y \frac{\partial H_y}{\partial x} \right) \quad (4)$$

$$F_y = V_m \chi_m \mu_0 \left( H_x \frac{\partial H_x}{\partial y} + H_y \frac{\partial H_y}{\partial y} \right)$$

where,  $F_x$ =x component of magnetic force

$F_y$ =y component of magnetic force

$V_m$ =volume of magnetic abrasive

$\chi_m$ =magnetic susceptibility of the abrasive grain

$\mu_0$ =magnetic permeability in vacuum

이 힘으로 유체속의 자기입자가 공작물 내면쪽으로 끌리게 되어 가공효율을 높여준다. 이때 자기입자가 너무 강하게 끌리게 되어 공작물에 붙어 있는 경우나 너무 약하게 끌리어 공작물에 접촉도 하지 않고 지나가는 경우 등 바람직하지 못한 현상이 일어날 수 있다. 따라서 적절한 속도로 공작물에 붙어 지나가는 가공조건을 설정해야 한다. 이 힘의 분포 또한 유한차분법으로 구하였다.

#### 4.3 가공량 예측

단일 입자의 절삭기구는 Fig.5과 같으며 입자가 가지고

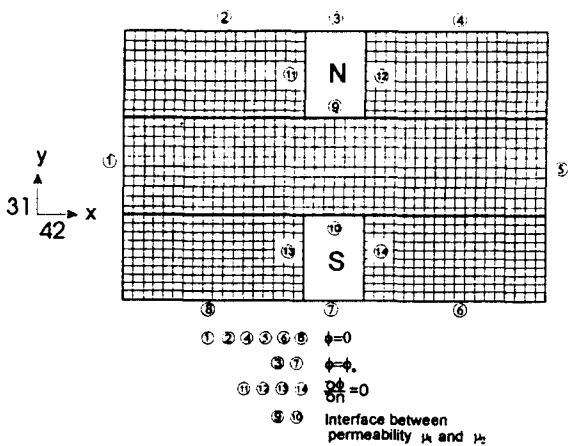


Fig.4 Grid and boundary conditions used for the finite difference solution

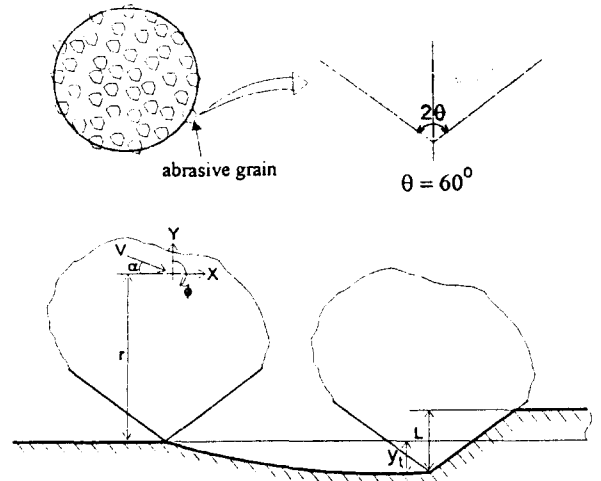


Fig.5 An idealized two-dimensional model of a rigid grain cutting into a ductile metal<sup>(9)</sup>

있는 판성력으로 주로 절삭이 일어난다<sup>(9)</sup>. Finnie의 절삭기구에 전자석의 영향을 고려하여 수정하면 자기입자의 운동방정식은 식(5)과 같다.

$$m\ddot{y} + \sigma_f K \psi b y = F_y$$

$$m\ddot{x} + \sigma_f \psi b y = F_x \quad (5)$$

$$I\ddot{\phi} + \sigma_f \psi b r y = 0$$

where,  $F_y$  = y component of magnetic force

$F_x$  = x component of magnetic force

#### 5. 시뮬레이션 결과 및 고찰

##### 5.1 가공영역의 자속밀도 분포 해석 결과

Fig.6은 자기포텐셜의 분포를 나타낸 것으로서, 유한차분법의 전체 해석공간중 공작물이 존재하는 부분 즉 가공이 발생하는 부분에서의 자기 포텐셜을 나타낸 것이다. 자기포텐셜은 자극부근에서 크고 자극에서 멀어질수록 작아짐을 알 수 있다. 또 자극에서는 직선으로 나타났고 자극에서 x축 방향으로 멀어질수록 감소되어 해석공간의 끝 부분에서는 0에 가까움을 알 수 있다. 경계조건에 부합되는 결과를 얻었다.

Fig.7는 자속밀도의 분포를 나타낸 것이다. 자극의 끝부분에서 자속밀도의 최대값이 존재함을 알 수 있다. 이것은 자극의 끝부분에서 자기 포텐셜의 변화율이 가장크기 때문이다. 자극부분에서 분포한 자속밀도의 평균이 1T 정도임을 알 수 있다.

Fig.8는 자기장에서 입자하나가 받는 힘의 분포를 나타낸다. 이것 또한 자극의 끝부분에서 최대값이 존재함을 알 수 있다.

##### 5.2 자기입자의 궤적 해석 결과

Fig.9은 분사위치에 따른 자기입자의 경로를 나타낸 것으로 수평축에 있는 띠가 전자석의 위치를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 분사위치에 따라 해석 영역안에서 공작물의 표면에 닿는 경우와 그렇지 않은 경우가 있음을 알 수 있다. 전자석의 자속밀도가 2T로 매우 크지만 상대적으로 유속 35m/s로 매우 커서 공작물의 표면으로부터 멀리 떨어진 곳에서 입사되는 자기입자는 공작물 표면에 닿기전에 해석영역을 벗어나게 된다. 반면에 공작물의 표면 가까스로 입사되는 입자는 공작물 표면에 닿아 가공을 일으킨다.

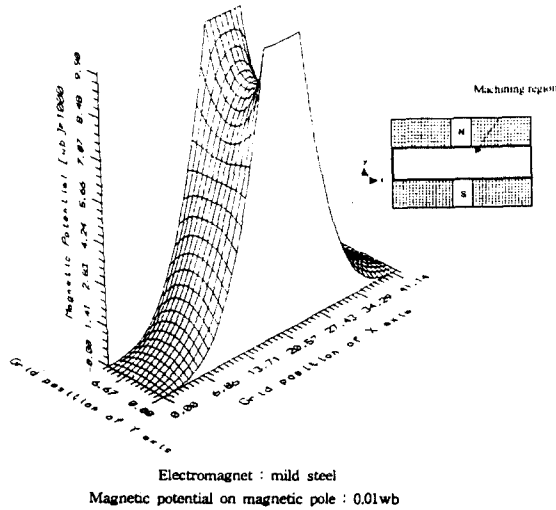


Fig.6 Distribution of magnetic potential in the machining region

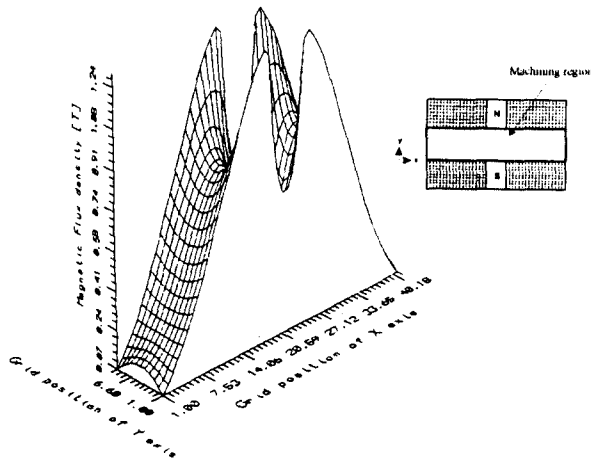


Fig.7 Distribution of magnetic flux density in the machining region

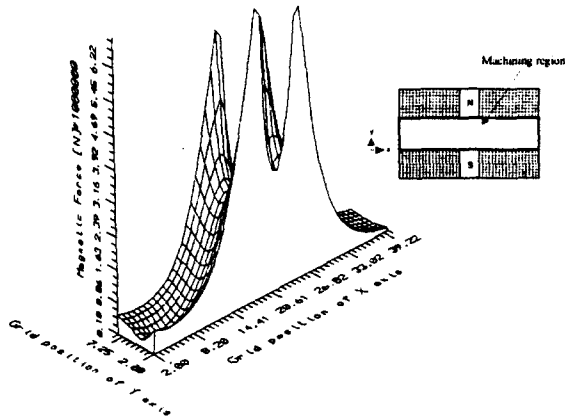


Fig.8 Distribution of magnetic force in the machining region

Fig. 10는 분사속도에 따른 자기입자의 경로를 나타낸 것으로 같은 위치에서 입사되는 속도가 작을수록 공작물의 표면쪽으로 빨리 끌리게 된다. 즉, 입자의 속도가 작은 경우는 전자석에 의한 힘을 더욱 오래 받기때문에 공작물의 표면에 급격히 끌리는 것이다. 입자의 속도가 어떤 임계 속도 이하로 내려가면 자기입자가 공작물에 붙어서 가공이 진행되지 않는 경우가 발생한다. 그 임계속도는 11m/s로 나타났다.

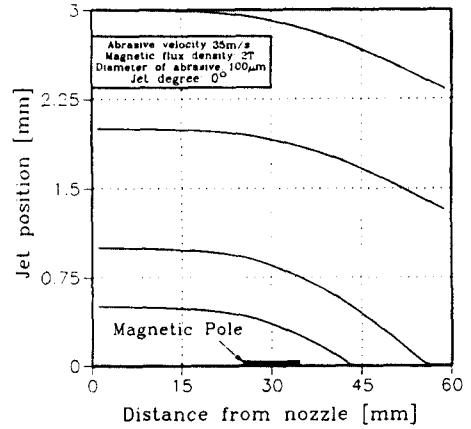


Fig.9 Magnetic abrasive path according to jet position

Fig. 11은 자기 입자의 크기에 따른 입자의 경로를 나타낸 것으로 입자의 크기에 무관하게 경로가 일정함을 알 수 있다.

### 5.3 가공량 예측 결과

Fig. 12는 자기입자의 가공경로를 나타낸 것이다. 자기입자로는 철구에 알루미늄이 소결된 것으로 직경 100 $\mu$ m인 것을, 공작물은 SUS304를 사용하였다. 또 가공조건으로는 초기 속도 35m/sec, 충돌각 2.318 $^{\circ}$ 으로 하였다. ①은 전자석의 영향을 고려하지 않은 경우이고 ②는 전자석의 영향을 고려한 것이다. 전자석의 영향을 고려한 ②의 경우가 고려하지 않은 ①의 경우보다 가공량이 매우 큼을 알 수 있다. 따라서 전자석의 역할은 공작물 표면에 입자의 분포를 증가시켜 줄 뿐만 아니라 가공력을 증가시켜 준다.

Fig. 13은 충돌각에 따른 재료제거량을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 충돌각 약 30 $^{\circ}$ 에서 최대 재료제거량이 나타남을 알 수 있다. 그러므로 이 각도로 입자를 충돌하게 만드는 것이 필요하다. 보통 워터젯가공(water jet machining)이나 입자분사가공(abrasive jet machining)에서는 SUS와 같은 연질의 공작물을 가공할 때 최대 재료제거량이 충돌각 18~20 $^{\circ}$ 에서 발생한다고 한다. (9) 최대 가공량을 갖는 충돌각의 이와 같은 차이는 본 연구에서 고려된 전자석의 영향이라고 사료된다.

Fig. 14는 자기입자의 크기에 따른 재료제거율을 나타낸 것이다. 단위 시간당 공급되는 입자의 수는 입자 크기에 따라 다르다. (9) 노즐에서 분사되는 입자의 분포를 일정하다고 보고 단위 시간당 공급되는 입자수와 입자의 크기 관계로부터 이와 같은 결과를 얻었다. 그림에서 볼 수 있듯이 재료제거율이 가장 높게 나타나는 입자의 직경은 약 300~400 $\mu$ m으로 나타났다.

Fig. 15은 분사속도에 따른 재료제거율을 나타낸 것으로 세 최대의 가공율을 갖는 분사속도가 존재함을 알 수 있다. 분사속도가 변하면 공급되는 입자의 갯수도 변하게 되고 공작물 내면으로 끌려 가공을 일으키는 입자의 갯수도 변하게 된다. 즉, 분사속도가 커지면 공급되는 입자의 수는 많아지지만 공작물 내면으로 끌 수 있는 입자의 범위(y축방향)는 감소하게 된다. 따라서 이 두가지 대립되는 조건을 고려하였고 그 결과 최대 가공량을 갖는 분사속도는 약 40m/s로 나타났다.

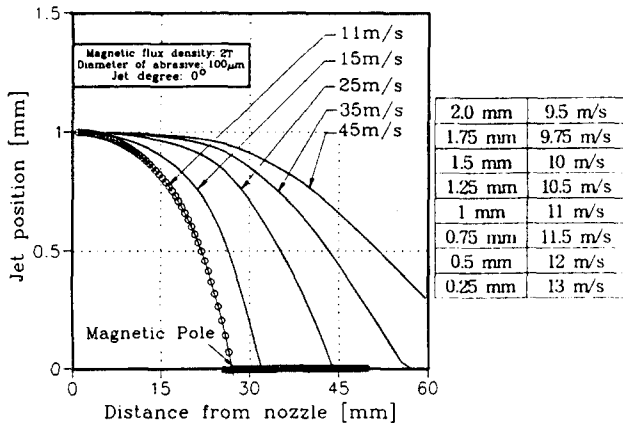


Fig.10 Magnetic abrasive path according to abrasive velocity

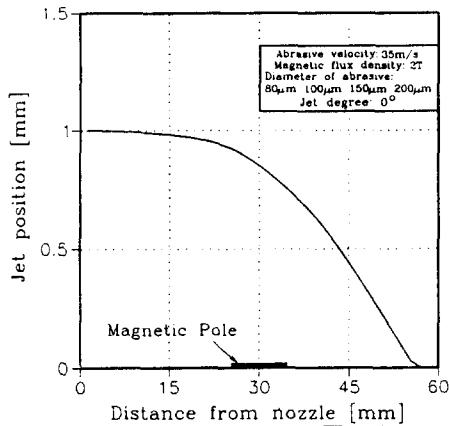


Fig.11 Magnetic abrasive path according to abrasive size

6. 자기입자분사가공 실험장치 및 방법

자기입자분사가공 실험장치는 Fig. 2와 같다. 공작물은 길이 200mm, 두께 1.2mm, 내경 12mm인 SUS304 직선 원형관을 사용하였고, 자기입자로는 그 크기가 #50 (500µm~210µm), #80 (297µm~125µm), #100 (210µm~74µm)인 것을, 재질은 철구에 알루미늄을 화학적으로 결합시킨 입자를 사용하였다. 분사속도는 약 20m/s~40m/s로, 자속밀도는 0.4T로 선정하였다. Fig. 16은 본 실험에서 사용된 자기입자의 SEM사진이다. 그림 (a)는 전체적인 모습이고 그림 (b)는 철구표면에 화학적으로 결합된 알루미늄을 나타낸다.

각각의 가공조건이 표면거칠기 및 가공량에 미치는 영향을 관찰하기 위한 실험을 수행하였다. 표면거칠기는 표면조도 측정기(stylus type, Rank Taylor Hobson)로 측정하였고, 가공량은 전자저울 (Ohaus, TP200)을 이용하여 측정하였다.

7. 실험결과 및 고찰

Fig. 17은 분사압력에 따른 가공량을 입자크기별로 나타낸 것으로 압력이 커질수록, 입자크기가 커질수록 가공량이 증가함을 볼 수 있으며 이 결과는 시뮬레이션 결과와 부합됨을 알 수 있다.

Fig. 18은 분사압력에 따른 표면조도를 입자크기별로 나타낸 것으로 압력이 커질수록, 입자의 크기가 커질수록 표면거칠기가 증가함을 알 수 있다.

Fig. 19는 가공시간에 따른 표면거칠기의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 18에서 입자와 압력이 작을 수록 표면거칠기가

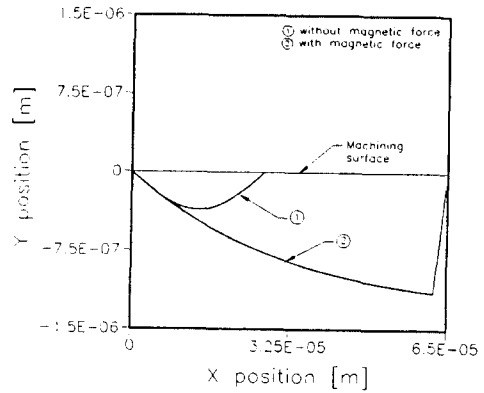


Fig.12 The machining path of magnetic abrasive

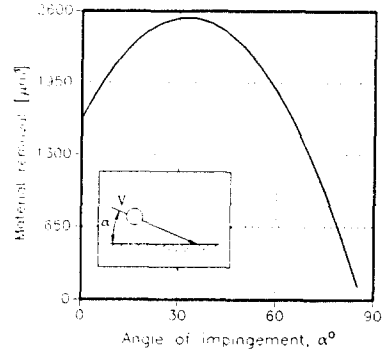


Fig.13 Material removed as function of angle of impact

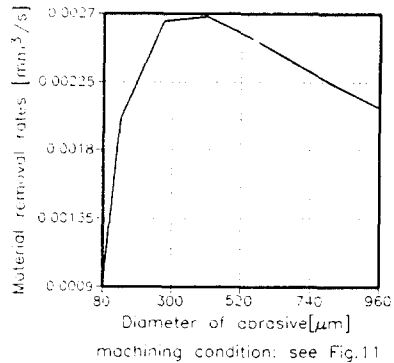


Fig.14 Material removal rates according to abrasive size

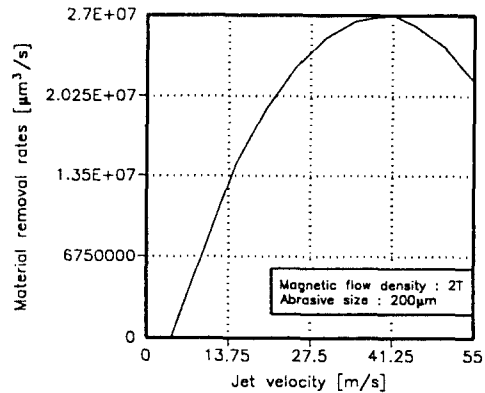
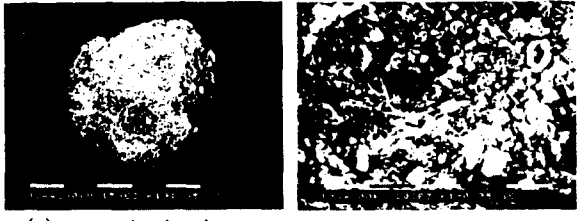


Fig.15 Material removal rates according to jet velocity

향상되었으므로 가공조건을 가공압력 2atm, 입자크기 #100으로 선정하였다. 가공이 진행함에 따라 표면거칠기의 향상을 볼 수 있으며 가공시간 10min까지는 급격히 향상되고 그 이후에는 거의 일정함을 알 수 있다.

Fig. 20은 SUS304 판내면을 관찰하기 위한 SEM사진으로써 그림 (a)는 가공전이고, 그림 (b)는 가공후의 사진이다. 우선

그림에서 알 수 있듯이 가공이 일어났음을 알 수 있다. 그림 (b)의 스크래치는 자기입자의 알루미늄이 지나간 자리를 나타낸다.



(a) magnetic abrasive (b) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on magnetic abrasive

Fig.16 Photograph of a magnetic abrasive particle observed by SEM

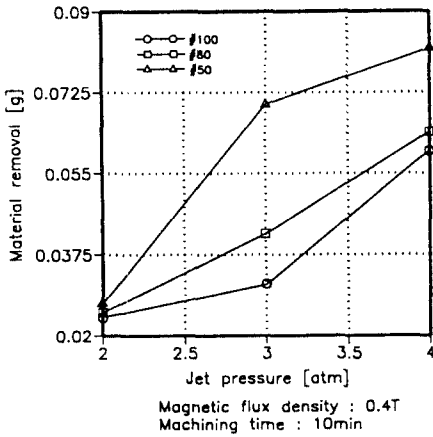


Fig.17 Relationship between material removal and jet pressure

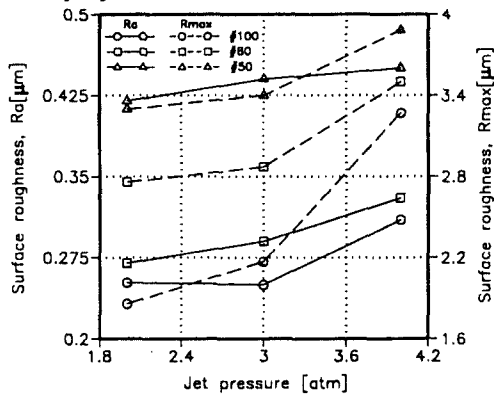


Fig.18 Relationship between surface roughness and jet pressure

8. 결론

자기입자분사가공 시스템의 가공영역을 2차원으로 모델링하여 시뮬레이션하고 시스템 제작 및 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 개발된 자기입자분사가공 시스템의 가공 가능성을 시뮬레이션을 통하여 알 수 있었고 실험을 통하여 그 가능성이 확인되었다.
- (2) 분사되는 입자의 약 30%를 가공에 이용과 효율적인 가공을 하고자 할때 분사속도는 최소 13m/s 이상이어야 한다.
- (3) 가공량을 최대로 하는 자기입자의 크기가 존재하며 시뮬레이션 결과 약 300-400μm로 나타났다.
- (4) 입자의 속도에 따라 최적의 충돌각이 존재하며, 속도가 35m/s인 경우 그 값은 25-30°로 나타났다.

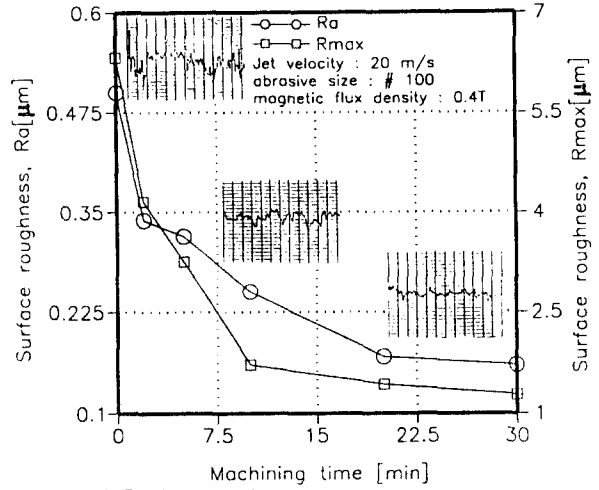
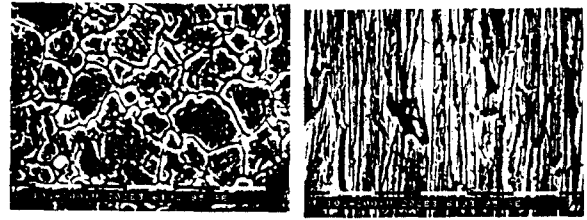


Fig.19 Surface roughness according to machining time



(a) before machining (b) after machining

Fig.20 Photograph of machined surface observed by SEM

References

- [1] T. Shinmura et al., "Development of Spindle-Finish Type Finishing Apparatus and its Finishing Performance using a Magnetic Abrasive Machining Process", 1986, JSPE, Vol. 20, No. 2, pp 79-84
- [2] T. Shinmura et al., "Study on Magnetic Abrasive Finishing Process", 1989, JSPE, Vol. 23, No. 3
- [3] T. Shinmura et al., "Study on Magnetic Abrasive Process-Application to Plane Finishing", 1985, JSPE, Vol. 19, No. 4, pp 289-291
- [4] T. Shinmura et al., "Study on Magnetic Abrasive Process-Application to Edge Finishing", 1985, Vol. 19, No. 3, pp 218-220
- [5] Takeo Shinmura, Toshio Aizawa, "Study on Internal Finishing of a Non-ferromagnetic Tubing by Magnetic Abrasive Machining Process", 1989, Bull. JSPE, Vol. 23, No. 1, pp 37-41
- [6] Takeo Shinmura, Hitomi Yamaguchi, Yoshinori Shinbo, "A New Internal Finishing Process of a Non-ferromagnetic Tubing by Applying a Rotating Magnetic Field", 1992, Int. J. JSPE, Vol. 26, No. 4, pp 302-304
- [7] Takeo Shinmura, Hitomi Yamaguchi, Toshio Aizawa, "A New Internal Finishing Process of a Non-ferromagnetic Tubing by Application of a Magnetic Field", 1993, Int. J. JSPE, Vol. 27, No. 2, pp 132-137
- [8] Matthew, N. O. Sadiku, "Numerical techniques in Electromagnetics", 1992, CRC
- [9] Marian Mazurkiewicz, "Material Removal by Hydro-Abrasive High-Pressure Jet Mechanism Study", 1989, SME, MS89-S11
- [10] Frank M. White, "Fluid Mechanics", 1986, McGraw-Hill
- [11] T. Shinmura, "Study on Magnetic Abrasive finishing", 1990, CIRP Annals, Vol. 39, No. 1, pp 325-328