

## 자유곡면의 밀링 자기연마 복합가공에 관한 연구

곽태경<sup>+</sup>, 김상오<sup>+</sup>, 곽재섭<sup>\*</sup>

(논문접수일 2010. 2. 3, 심사완료일 2010. 5. 26)

### Compound Machining of Milling and Magnetic Abrasive Polishing for Free Form Surface

Tae-Kyung Kwak<sup>+</sup>, Sang-Oh Kim<sup>+</sup>, Jae-Seob Kwak<sup>\*</sup>

#### Abstract

Automated magnetic abrasive polishing which can be applied after machining of the mold on a machine tool without unloading is very effective for finishing a complicated injection mold surface. This study aims to realize one step polishing of free form surface with the same machine tool. For this purpose, magnetic flux density according to the change of curvature radii was simulated for selecting polishing conditions and experimental verification was performed with a complicated mold of aluminum alloy. As a result, it was seen by the simulation that the magnetic flux density at a gradual curvature of the mold was higher than at a steep curvature and the higher magnetic flux density produced the better surface roughness in the experimentation. The deviation for the surface roughness of the mold decreased on the whole and the uniform mold surface was obtained after the automated magnetic abrasive polishing.

**Key Words** : Magnetic Abrasive Polishing(자기연마), Magnetic Flux Density(자속밀도), Curvature of Radius(곡률반경), Injection Mold(사출금형), Free Form Surface(자유곡면)

## 1. 서론

오늘날 기계 및 전기/전자 산업의 급속한 발전에 따라 고품위 제품을 요구하는 경향이 커지고, 금형산업도 미세/초정밀가공으로 발전하고 있다. 따라서 고품위, 초정밀 금형제작

을 위해 마무리 가공 공정으로서 연마가공은 중요성이 더욱 더 증대되고 있다<sup>(1)</sup>. 그러나 연마가공은 공작물의 형상이나 재질에 따라 가공이 불가능하거나 일정한 품질의 제품을 얻을 수 없다는 단점을 지니고 있다. 더욱이 수작업에 의존하고 있는 연마작업에서 자유곡면의 연마작업은 정밀도 면에

<sup>+</sup> 부경대학교 대학원

<sup>\*</sup> 교신저자, 부경대학교 기계공학과 (jskwak5@pknu.ac.kr)

주소: 608-739 부산시 남구 용당동 산 100번지

서 대단히 어려운 실정이다<sup>(2,3)</sup>.

이러한 한계를 극복하고자 제시된 방법 중 하나가 전자석을 이용한 자기연마법이다. 자기연마법은 자기장에 의해 형성된 자력선 방향으로 미세한 연마입자와 자성입자가 정렬하여 브러쉬(Brush)역할을 수행한다.

이러한 브러쉬가 금속표면을 연마하는 방법으로 공구의 형상이 유연성을 갖기 때문에 공작물 또는 가공부위의 형상에 구애를 받지 않는 장점을 지니고 있다.

기존 연구자들의 자기연마를 이용한 연구는 평면이나 경사면의 가공법으로 대상의 전체 영역을 가공하기에는 적합하지만, 특정 미소 영역의 단차나 곡률이 있는 부분을 작업하기는 어려운 점이 많다. 그 중 자유곡면에 대한 효율적인 연마 방법은 그 연구가 미진하다<sup>(4,5)</sup>.

따라서 본 연구에서는 자기연마법을 적용하여 자유곡면을 갖는 금형의 연마특성 평가를 위한 자기력 형성 분석 및 금형산업현장에서 수작업에 의존하고 있어 정밀도 면에서 대단히 어려운 마무리 폴리싱 작업을, CNC 머시닝센터에서 자기연마공구의 부착으로 형상가공 후 기존 CNC 수치제어 값을 활용하여 공작물 탈착 없이 연속적이고 효율적인 폴리싱 가공이 가능하도록 하였다.

## 2. 자유곡면 자기연마의 개요

### 2.1 자기연마 가공

자기연마법의 개략적인 가공 기구는 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1과 같이 철심에 코일을 감고 그 코일에 전류를 부가하면 패러데이의 법칙(Faraday's law)에 의해 자기력이 발생하는 공구가 된다. 공구의 끝단과 공작물 사이에 간극을 주고 그 공간에 자성체와 연마입자를 용융하여 분쇄한 후 각각의 자성입자와 연마입자를 일정 비율로 혼합한 혼합형 입자를 슬러리 형태로 공급한다. 전자석에 전류가 부가된 연마공

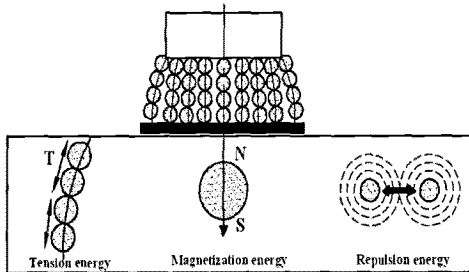


Fig. 1 Concept for magnetic abrasive polishing

구는 자성입자를 구속하게 된다. 연마공구와 공작물 사이의 자성입자는 사슬구조로 정렬되며 자성입자의 정렬로 인하여 연마 입자는 자성입자들 사이에 위치한다<sup>(6)</sup>.

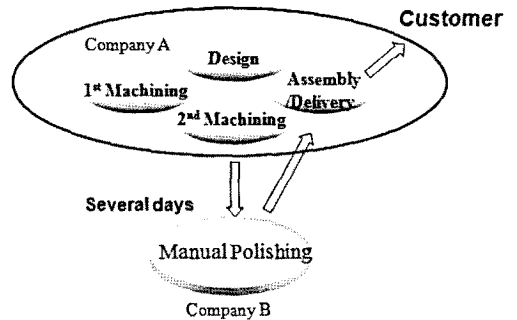
이처럼 사슬구조로 형성된 입자들은 유연성을 가지는 브러쉬 역할을 수행한다. 이 때 자기력이 발생된 철심에 부착된 연마입자와 자성입자들은 철심이 회전을 함으로 인해서 공작물을 가공 할 수 있는 연마가공을 수행하는 것이다.

### 2.2 금형의 자기연마가공 자동화

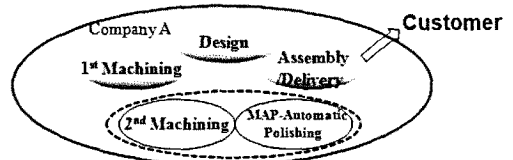
현재 자유곡면의 복잡한 형상을 가지는 금형의 연마작업은 숙련공의 감각에 의존하여 작업하고 있으며 전형적인 3D 업종으로 인력수급에 상당한 어려움이 있다.

Fig. 2는 기존 금형제작과정과 본 연구에서 제안하는 금형 제작과정을 비교하여 나타낸 공정흐름도이다.

금형제작과정에서 설계 및 1차 형상가공은 CNC 동작기계가공, 방전가공 및 와이어 가공 등으로 매우 복잡한 형상까지 가공이 가능하고 대부분이 자동화로 이루어져 있다. 하지만 연마가공은 품질향상을 위한 마무리 가공으로서 대단히 중요한 반면, 아직도 자동화가 이루어져 있지 않으며 인력수급 및 인건비 문제로 외주 처리하는 실정이다. 그러나 그것 또한 초단납기 금형제작의 걸림돌이 되고 있다<sup>(7)</sup>.



(a) Conventional process



(b) Novel process

Fig. 2 Comparison between conventional and novel mold manufacturing processes

본 연구에서는 자기연마법을 이용하여 2차 가공 후 공작물의 탈착 없이 동일한 기계에서 기존 NC 데이터를 이용하여 정밀하고 효율적인 연마가공으로 초단납기 금형제작이 가능함을 제안하였다.

### 3. 자기력 발생 특성

#### 3.1 위치에 따른 자속밀도 측정

자기연마 공정에서 연마력을 결정짓는 요소에는 자기연마 입자에 작용하는 자기력과 회전력이 있다. 그 중 자기력은 자기연마 공구에 인가되는 전류에 의해 발생하는 자기력에 따라 그 크기가 변화된다.

본 연구에서는 자기력 형성 특징 및 크기 분석을 위하여 Fig. 3과 같이 가우스 메타를 활용하여 직경이 30mm인 자기연마 공구의 끝단부위 중심부(P1)와 공구의 가장자리(P2, P3)의 자속밀도를 측정하여 Fig. 4와 같은 결과를 얻었다.

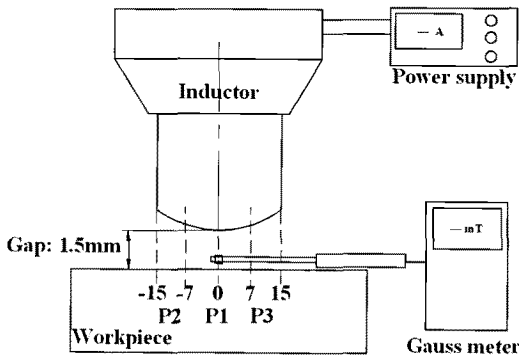


Fig. 3 Measuring method for magnetic flux density

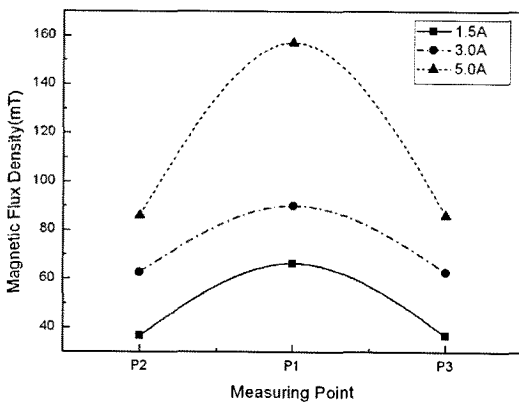


Fig. 4 Measured magnetic flux density

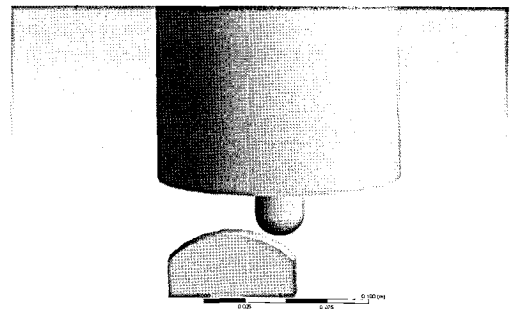
P3)의 자속밀도를 측정하여 Fig. 4와 같은 결과를 얻었다. Fig. 4에 나타난 결과와 같이 P1지점에서 자속밀도가 P2, P3지점보다 높게 나타나며, 공구에 인가되는 전류값이 증가할수록 자속밀도가 증가함을 확인 할 수 있다.

#### 3.2 곡률반경에 따른 자속밀도

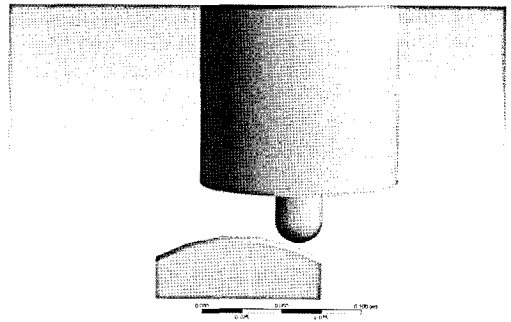
자유곡면에서의 자기력 형성 특징을 분석하기 위하여 본 연구에서는 ANSYS의 전자기장 해석 모듈을 활용하여 공구와 공작물 사이에 발생하는 자기력 형성 시뮬레이션을 실시하였다.

Fig. 5와 같이 공작물의 곡면이 R50일 때와 R100일 때 두 가지 경우에 해당하는 공작물과 자기연마 공구를 모델링하였다. 이때 적용된 공구의 형상은 직경이 30mm인 볼 형태를 취한다.

시뮬레이션의 결과는 Fig. 6과 같다. 곡률이 R50인 경우 최고 47.44mT가 작용하고, R100인 경우 최고 64.64mT가 작용하여 곡률 반경이 클수록 작용하는 최고 자속밀도 값이 커짐을 확인 할 수 있다. 시뮬레이션에 적용된 공구와 공작물 사이의 최소 간격은 1.5mm이다.

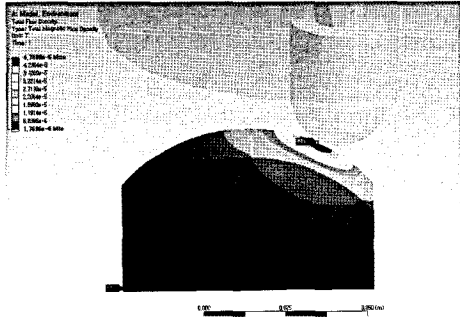


(a) Workpiece with radius of 50mm

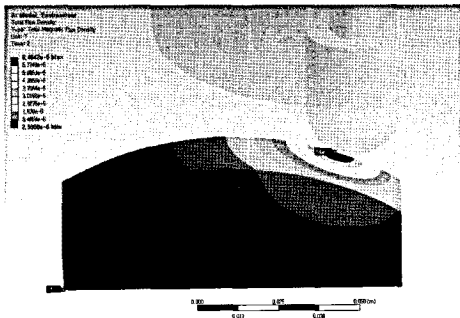


(b) Workpiece with radius of 100mm

Fig. 5 Geometrical modeling of mold and tool



(a) Workpiece with radius of 50mm



(b) Workpiece with radius of 100mm

Fig. 6 Magnetic flux density according to radii

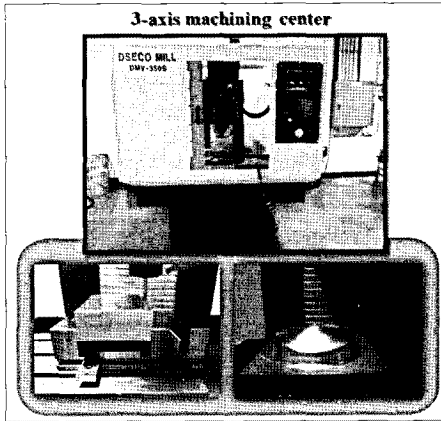


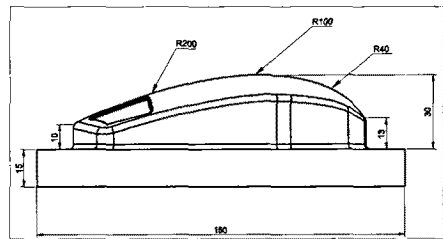
Fig. 7 Used CNC machining center

#### 4. 자유곡면 금형 제작

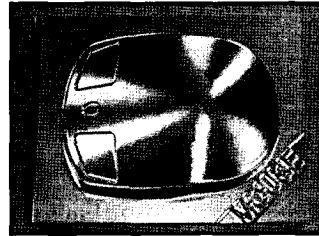
자유곡면 금형제작을 위하여 Fig. 7의 3축 CNC 머시닝센터를 활용하여 가공하였다. 가공은 UG CAM 소프트웨어를

Table 1 Experimental conditions for machining

Items	Roughing	Semi-finishing	finishing
Tool diameter (mm)	10	4	4
Length of tool (mm)	25	25	25
Spindle speed (rpm)	1200	1800	2000
Feed speed (mm/min)	300	200	200
Step over value	4	0.2	0.05
Residues (mm)	0.2	0	0



(a) Drawing of workpiece



(b) Photograph of workpiece

Fig. 8 Workpiece for experiments

활용하여 NC 데이터를 구성하였으며, 황삭과 중삭 및 정삭 과정별 가공조건은 Table 1에 나타내었다.

비자성체 자유곡면 금형을 제작하기 위해서 알루미늄 합금(AISI6061) 소재를 각 과정별 스피들 속도, 이송속도, 스텝오버값을 변경하면서 가공하였다.

자유곡면을 만들기 위한 공작물의 형상은 Fig. 8과 같이 곡률값이 R40~R200으로 구성하여 가공하였다. 자기연마의 효율성 증대를 위하여 공작물의 표면을 최대한 고품질의 조도를 가질 수 있도록 황삭, 중삭, 정삭의 단계를 거치고 정삭의 단계는 Table 1에 나타낸 것과 같이 중삭단계와 비교하여 스텝오버값을 1/4로 설정하여 적용하였다. 자기연마에서는 이들 머시닝센터에 자기연마공구를 설치하여 실험하였다.

## 5. 곡면의 자기연마 실험 및 평가

### 5.1 실험장치의 구성 및 실험조건

Fig. 9는 CNC 머시닝센터에서 자기연마공구를 장착하여 곡면을 연마하는 개략도이다. 가공에 사용된 자기연마공구의 최대 자속밀도는 200mT이며 공구의 지름은 60mm이다. 자기연마입자는 100 $\mu$ m의 철 파우더와 입도 #800의 GC입자를 미량의 오일과 1:1의 무게비로 단순 혼합하여 사용하였다. 공구의 회전속도는 입자의 탈락을 방지하기 위하여 600rpm의 수준을 맞추어 진행하였고 이송속도 값은 20mm/min이다<sup>(8)</sup>. Table 2에 자기연마를 위한 실험조건을 나타낸다.

공작물의 자기연마를 위한 가공경로는 자기연마 공구의 지름에 맞추어 등고선 형태의 가공경로를 생성하였다. 공작물과 공구사이의 입자배열을 위한 공간은 최소 1.2mm에서 최대 1.5mm값이 적용될 수 있도록 경로를 구성하였다.

공작물에서의 곡률 반경은 최대 R200에서 최소 R40으로 구성되어 있다. Table 2의 실험조건에 따라 등고선 경로를 따라 R40~R200까지의 곡률반경을 20mm/min의 이송속도

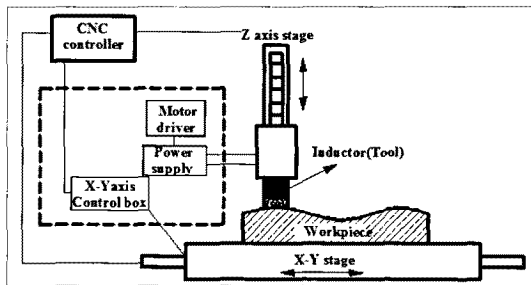


Fig. 9 Schematic of MAP for 3D mold surface

Table 2 Experimental conditions for MAP

Items	Conditions
Magnetic flux density	Max. 200mT
Traverse speed	20mm/min
Magnetic abrasive	Fe+SiC powder (#800)
Grain size	100 ( $\mu$ m)
Revolution speed	600rpm
Workpiece	AISI6061
Current	5.0A
Working gap	1.2~1.5mm

를 유지하며 가공을 실시하였으며 총 가공시간은 3시간이다.

Fig. 10은 자기연마공구에 부착된 자기연마의 입자의 형태와 자기연마 가공 중의 자기연마 공구와 공작물을 보여준다. Fig. 10에서 보이는 것과 같이 자기연마입자의 배열은 공작물이 비자성체인 알루미늄 합금이기엔 전체적으로 공구의 직경보다도 넓은 회전반경을 가지고 있다.

### 5.2 결과 및 평가

Table 2의 가공조건하에서 R40~R200까지의 곡률반경을 가공한 후의 중심선 평균 표면거칠기와 자기연마에 의해 가공한 후의 중심선 평균 표면거칠기 값을 Table 3에 각각 나타내었다.

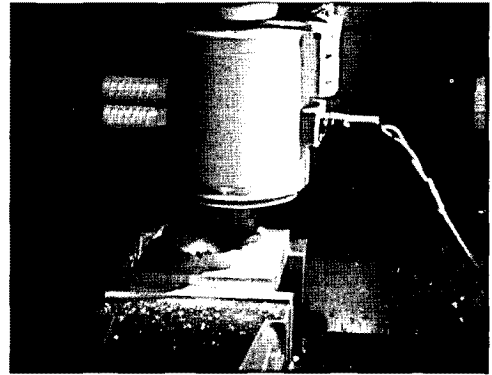
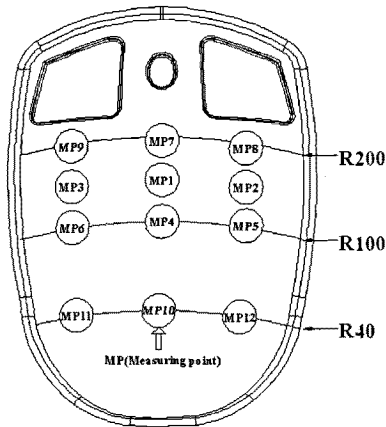


Fig. 10 Workpiece and MAP tool

Table 3 Experimental results of surface roughness, Ra

	Before MAP ( $\mu$ m)	After MAP ( $\mu$ m)
MP 1	0.6	0.55
MP 2	1.05	0.65
MP 3	0.92	0.61
MP 4	0.64	0.57
MP 5	0.97	0.62
MP 6	0.73	0.62
MP 7	0.74	0.65
MP 8	0.83	0.61
MP 9	0.72	0.44
MP 10	0.58	0.54
MP 11	0.68	0.54
MP 12	0.78	0.61



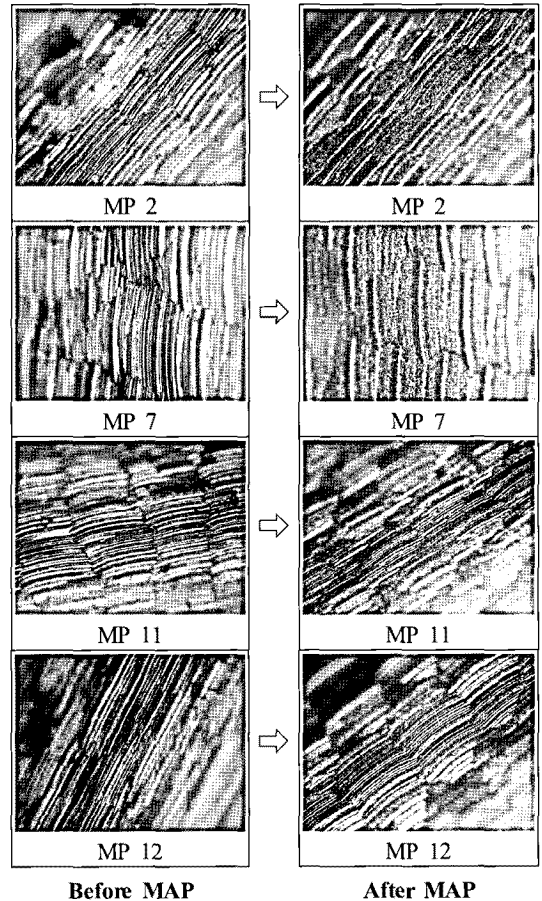
**Fig. 11** Measuring points for surface roughness and TEM images after magnetic abrasive polishing

Fig. 11은 가공물의 측정위치(MP: Measuring Point)를 나타내었다. 측정위치에 따른 표면거칠기는 전체적으로 자기연마 전보다 후의 표면거칠기가 향상되었음을 나타내고 있다. 특히 MP 1~MP 9까지의 R100~R200의 곡률에서는 평균 35%로 향상되어, MP 10~MP 12의 R40 곡률에서의 평균 21% 보다 다소 높게 나타남을 확인 할 수 있었다. 또한 MP 1~MP 9까지의 완만한 경사에서도 중심을 기준으로 좌우의 곡률에서 보다, 중심곡면에서 표면거칠기가 크게 향상됨을 확인할 수 있었다.

또한 각 곡면 지점에 대한 TEM 이미지 촬영 결과를 통해서 더욱 확실한 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 12에서 나타난 것과 같이 전체적으로 자기연마에 의해 표면의 거친 모양이 완만한 형태로 변형되고 있음을 나타내며, 앞의 곡률반경에 따른 자속밀도 시뮬레이션과 잘 일치하여 실험에서도 곡률이 R40보다 R200으로 갈수록 자기연마에 의한 표면향상 정도가 높아지고 있음을 확인 할 수 있다.

결론적으로 공작물의 곡률반경과 회전하는 공구의 중심선 방향 불일치와 불균일한 자력이 원인인 것으로 사료되어진다. 그럼에도 불구하고 CNC 가공 후 MP 1~MP 12에서 표면거칠기의 편차가 크게 나타났으나, 자기연마 후 공작물의 곡률에 상관없이 평균화된 표면거칠기 값을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 이를 통해 곡률에 따른 자기연마 성능편차가 있을 수 있으나 전체적으로 자유곡면의 연마에 우수한 성능을 발휘 할 수 있음을 알 수 있었다.

특히 실험에서 공구의 유연성만으로 자유곡면을 쉽게 연마할 수 있어 CNC 머시닝센터에서 자기연마공구의 부착으



**Fig. 12** TEM image of workpiece surface (magnification: 400)

로 형상가공 후 연속적으로 효율적인 연마가공을 할 수 있음을 확인할 수 있었다.

## 6. 결론

본 연구에서는 자유곡면을 갖는 금형의 자기연마 특성 평가를 위해, 곡면에서의 자기력 형성 특성을 시뮬레이션하고 자기연마 실험을 실시하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

- (1) 자기력형성 시뮬레이션 결과 곡률반경이 R50인 경우 자속밀도는 최고 47.44mT가 작용하고, R100인 경우 최고 64.64mT가 작용하여 곡률반경이 클수록 작용하는 최고 자속밀도 값이 높아짐을 확인 할 수 있었다.

- (2) 곡률반경이 R100~R200인 곳에서는 대략 35%의 중심선 평균 표면거칠기 향상을, 곡률반경이 R40인 곳에서는 약 21%의 중심선 평균 표면거칠기가 향상됨을 확인하였다.
- (3) 자유곡면의 CNC 가공 후 공작물의 각 위치에 따라 측정된 중심선 평균 표면거칠기 값은 큰 편차를 보였으나, 자기연마 후 공작물의 곡률반경에 상관없이 평균화된 표면거칠기 값을 나타내고 있음을 확인 할 수 있었다.
- (4) 공구의 유연성만으로 자유곡면을 쉽게 연마할 수 있어 CNC 머시닝센터에서 자기연마공구의 부착으로 형상 가공 후 공작물의 탈착 없이 연속적으로 효율적인 연마 가공을 할 수 있음을 확인할 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입(No. 2009-0065020).

## 참 고 문 헌

- (1) Choi, Y. C., Masahir, A., and Takeo, N., 1996, "A Study on Improving the Efficient of Magnetic Abrasive Polishing for Die & Mold Surfaces," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 13, No. 6, pp. 102~107.
- (2) Kim, S. O., You, M. H., and Kwak, J. S., 2008, "Performance Evaluation of Magnetic Abrasive Polishing by Design of Experiments," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 17, No. 4, pp. 35~41.
- (3) Lee, H. C., 2007, "A Study on Optics Polishing Technology by Adaptive Tool and Eccentric Motion Mechanism," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 16, No. 6, pp. 133~139.
- (4) Park, W. G., Roh, T. W., and Choi, H., 2004, "The Magnetic Finishing Characteristics of Non-ferromagnetic Pipe Inside Polished," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 13, No. 6, pp. 74~80.
- (5) Cho, C. R., Yang, S. C., and Jung, Y. G., 2006, "A Study on the Improvement of Performance for High Speed Croting Tool Using Magnetic Fluid Polishing Technique," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 15, No. 1, pp. 32~38.
- (6) Park, W. G., Roh, T. W., and Cho, H., 2005, "The Effect of Vibratory Magnetic Pole by Magnetic Abrasive Finishing," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 4, No. 1, pp. 7~12.
- (7) Kim, J. D. and Noh, I. H., 2007, "Magnetic Polishing of Three Dimensional Die and Mold Surfaces," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 33, No. 2-1, pp. 18~23.
- (8) Singha, D. K., Jaina, V. K., and Komandurib, R., 2005, "Analysis of Surface Texture Generated by a Flexible Magnetic Abrasive Brush," *Wear*, Vol. 259, No. 7-12, pp. 1254~1261.