

네오디뮴 자석을 이용한 라운드 엔드밀 타입 MR연마 시스템 개발

홍광표*, 신봉철⁺, 김동우⁺⁺, 조명우⁺⁺⁺, 제태진⁺⁺⁺⁺

(논문접수일 2011. 01. 14, 심사완료일 2011. 02. 10)

Development of a Round endmill Type MR Polishing System Using Neodymium Magnets

Kwang-Pyo Hong*, Bong-Cheol, Shin⁺, Dong-Woo Kim⁺⁺, Myeong-Woo Cho⁺⁺⁺, Tae-Jin Je⁺⁺⁺⁺

Abstract

Recently, it has been studied machining of micro parts with increasing demands for ultra precision parts. However, many engineering problems have already begun in polishing of optical parts or lens. As a method to overcome such problems, a new technology for the polishing of the target surface is being studied by controlling abrasives using MR fluids which are sensitive to magnetic fields. Since the current MR polishing system uses a big electromagnet, and is difficult to polish micro parts or spherical lens. Therefore, in this study, a round endmill type MR polishing system was developed to polish a three-dimensional structure which has spherical or inclined plane. And then, series of experiments were performed to verify the polishing performance of the developed round endmill type MR polishing system.

Key Words : Polishing(연마), MR Fluids(자기유변유체), Round Endmill(라운드 엔드밀), Magnetic Field(자기장), Neodymium Magnet(네오디뮴 자석)

1. 서론

급속한 산업 발달로 인해 고품질, 고정도 부품들은 높은 가공 정밀도를 요구하지만 기존의 기계적 가공 및 연마가공을 통한 부품의 제작기술은 (비)구면 렌즈의 초정밀 연마 가공에서 발생하는 최소 가공부 형성, 연마 압력의 조절, 패드의 마멸, SSD(subsurface damage), 마이크로 크랙 발생 등의 난 점과 같은 여러 가지 기술적인 문제가 발생하고 있으며 생산효율성을 저하시키는 요인으로 부각되고 있다⁽¹⁾. 이에 따라 최근 미세 부품의 연마에 대한 새로운 연구가 활발히 진행되고 있으

며^(2,3) 특히, 전자기적으로 유체의 농도를 조절하여 응력과 전단력을 변화시켜 연마표면 품질을 향상시키기 위해 MR유체를 이용한 연마방법이 연구되고 있다⁽⁴⁾. 특히, MR유체의 특성을 잘 이용한다면 효율적인 가공 결과를 얻을 수 있으므로 MR유체를 이용한 새로운 연마장치의 개발이 이루어지고 있다. MR유체를 이용한 연마방법 중 하나인 MR 제트(MR jet) 연마방법⁽⁵⁾은 현재 스팟(spot)가공을 하게 되며 다양한 가공 형상에 대한 연구가 이루어지고 있다. 하지만 스팟 가공으로 인해 3차원 형상의 면적을 가진 구조물의 가공은 가공시간이 길어지고 자화된 MR유체를 분사하는 노즐과 공작물 간의 간

* 인하대학교 기계공학과 (hkp0914@hanmail.net)

+ 교신저자, 인하대학교 기계공학과 (kenny77b@empal.com)

주소 : 402-751 인천광역시 남구 용현 4동 253

++ University of Waterloo

+++ 인하대학교 기계공학과

++++ 한국기계연구원 나노공정장비연구실

격 조절이 힘들고 이에 따른 가공량도 달라져 생산효율성에 영향을 미치게 된다. 또 다른 방법인 휠 타입 MR 연마시스템^(6,7)은 스팟(spot) 가공을 포함한 직선가공(groove)이 가능하지만 이 방법 역시 다양한 형상을 가진 구조물과 소형 구조물의 가공에는 한계를 가진다. 휠 타입 MR 연마시스템은 자기장 형성을 위한 전자석(electromagnet)의 크기가 상대적으로 커서 소형 및 구면 및 경사각을 가진 3차원 형상의 소형 구조물에 대한 연마가 제한적이며 시스템의 소형화가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 구면 및 경사각을 가진 소형 구조물의 연마를 위해서 기존 3차원 구조물 가공이 가능한 라운드 엔드밀 형상을 기본으로 라운드 엔드밀 타입의 MR 연마시스템을 설계 및 제작하였다. 본 시스템에서는 자기장 형성을 위해 전자석이 아닌 소형 네오디뮴 자석(NdFeB)을 활용하였으며, 이를 이용해 자기장 특성 분석 및 연마 특성 평가를 위한 기초 실험을 수행하였다.

2. 라운드 엔드밀 타입 MR 연마시스템 개발

2.1 라운드 엔드밀 타입 MR 연마시스템 설계

기존의 휠 타입의 MR 연마시스템의 경우에는 사용되는 연마 휠에 따라 대상 가공물의 형상 및 크기에 제약이 있기 때문에 자유곡면을 포함한 다양한 형상에 적용이 가능하기 위해서는 이를 고려한 새로운 형태의 연마시스템의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 CNC 공작기계에 장착하여 다양한 표면형상의 초정밀 연마가 가능하도록 영구자석을 이용한 라운드 엔드밀 타입의 MR 연마시스템을 개발하였다. 기존의 휠 타입 MR 연마시스템에서 사용되는 전자석은 CNC 공작기계에 장착이 어려우므로 본 연구에서는 MR 연마를 위한 자기장의 생성을 위해 디스크(disk)형 강력한 소형 네오디뮴 자석(NdFeB)을 사용하였다. 개발된 모델은 Ø18mm 라운드 엔드밀의 설계항목

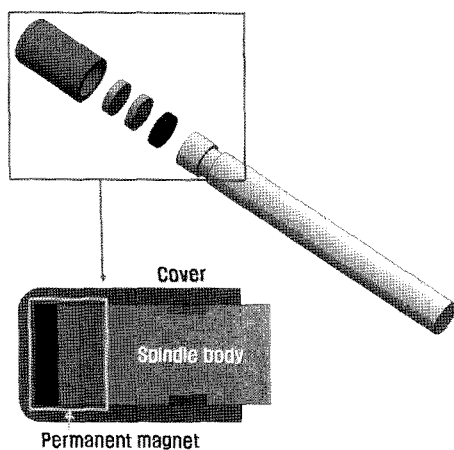
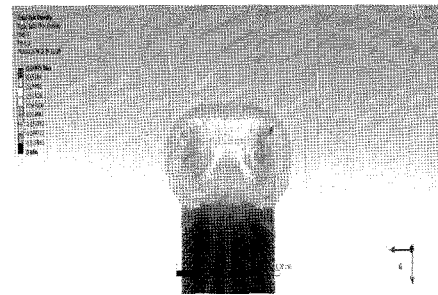


Fig. 1 3D modeling of a round endmill type Mr polishing system

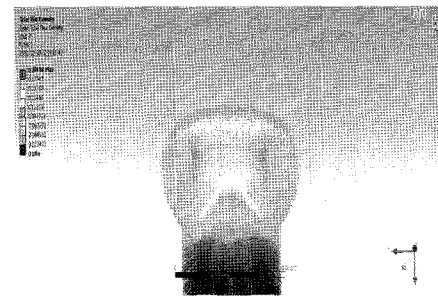
을 적용하여 제작하였으며, 스펀들 바디에 커버를 장착하는 형태로 구성되어 내부에 네오디뮴자석의 장착이 가능하도록 설계되었다. 커버는 외경 Ø18mm, 모서리 부분의 반경(R=3.0mm)을 가지도록 설계하였으며, 스펀들 바디는 외경 Ø13.5mm, 길이 120mm로 설계하였다. 커버내부에는 직경 Ø13.5mm, 두께 2mm의 디스크형 네오디뮴(NdFeB)자석을 최대 3개까지 장착 가능하도록 설계하였다(Fig. 1).

Table 1 Analysis condition

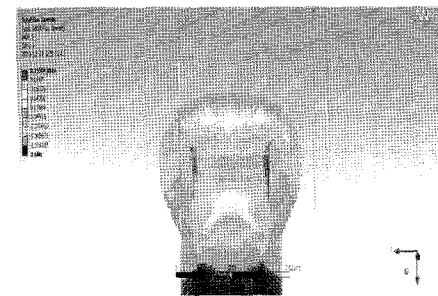
Contents	Conditions
Node	293046
Elements	157724
Mesh size	0.001



(a) 1 Neodymium magnet
ANSYS 0.079T / Gauss-meter 0.075T



(b) 2 Neodymium magnets
ANSYS 0.09T / Gauss-meter 0.120T



(c) 3 Neodymium magnets
ANSYS 0.120T / Gauss-meter 0.135T

Fig. 2 Analysis of magnetic flux density according to the number of Neodymium magnets

Table 2 Magnetic flux density comparison between electromagnet and neodymium magnet

Electro magnet	Magnetic flux density	Neodymium magnet	Magnetic flux density
0.5A	0.013T	1ea	0.075T
1.0A	0.045t	2ea	0.120T
2.0A	0.065T	3ea	0.135T
3.0A	0.105T		

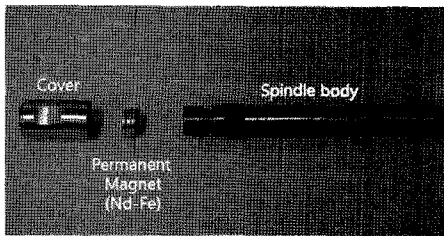


Fig. 3 Components of the round endmill type MR polishing tool

2.2 라운드 엔드밀 타입 MR연마 공구의 자기장 해석

설계된 모델에 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 연마공정이 이루어지는 커버 모서리 부분의 네오디뮴 자석 개수에 따른 자기장 해석을 수행하였다. 네오디뮴 자석의 잔류자속밀도(residual induction)와 항자기력(coercive force)을 220mT와 900KA/m으로 입력하여 연마공정이 이루어지는 커버의 모서리 부분에서 자기장의 세기와 분포를 분석하였으며, 해석에 적용된 조건을 Table 1에 나타내었다.

해석 결과 자기장은 라운드 엔드밀 형태인 커버의 모서리 부분으로 집중되어 형성되는 것을 확인할 수 있으며, 결과적으로 MR유체가 이렇게 형성된 자기장에 의해 모서리 부분에 집중적으로 부착되어 공작물의 표면연마 시 가공영역을 형성하게 된다(Fig. 2). 기존의 전자석을 이용한 MR연마 연구에 적용된 자기장의 세기는 0.013T~0.105T⁽⁸⁾이며, 본 연구에서 개발된 라운드 엔드밀 타입의 MR연마용 공구의 자기장의 실제 측정결과는 0.075T~0.135T로 MR연마를 수행하기에 충분하다는 것을 확인할 수 있었다(Table. 2).

2.3 라운드 엔드밀 타입 MR 연마시스템 제작

라운드 엔드밀 타입 MR연마시스템은 네오디뮴자석을 장착하고 자기장을 통해 MR유체를 형성시킬 수 있는 커버(Cover) 부분, CNC 주축에 장착이 용이하게 하기 위한 스피indle 바디(Spindle body)부분으로 구성하고 있다(Fig. 3).

Table 3은 라운드 엔드밀 타입 MR연마시스템의 설계치수 및 항목들을 나타내고 있다. 커버 내부에 장착하는 네오디뮴자석은 직경이 Ø13.5mm, 두께가 2.0mm인 디스크 형태로 평균 자기장의 세기 220mT로 사용하였다. 실제 연마 공정이 이루

Table 3 specifications of round endmill type MR polishing system

Contents	Spindle body	Cover	Permanent magnet
Length (mm)	120	30	-
thickness (mm)	-	-	2
External diameter (mm)	13.5	18	13.5
Internal diameter (mm)	-	13.5	-
Corner Radius (mm)	-	3.0	-
Type	Bar	Round endmill	Disk

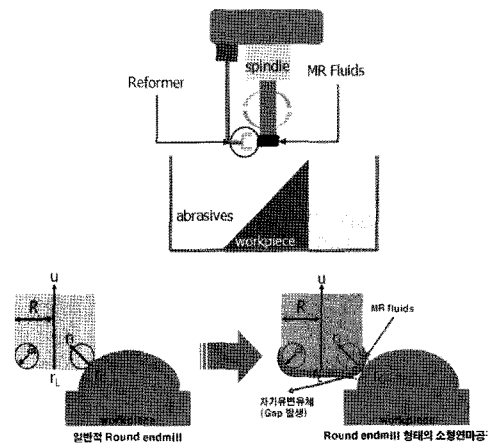


Fig. 4 Polishing principle of the round endmill type MR polishing system

어지는 커버부분은 MR유체와 연마재로 인한 표면의 부식과 손상을 방지하기 위해 부식에 강한 SUS304(Stainless steel 304)로 제작하였으며, CNC 머시닝센터의 주축에 장착하기 위한 홀더(holder) 부분은 콜렛(Collet, 내경 Ø13.5mm)을 이용해 장착 가능하도록 하였고, 커버와 동일 재질인 SUS304를 사용하였다.

3. 라운드 엔드밀 타입 MR연마 실험

3.1 라운드 엔드밀 타입 MR연마 공정

본 연구에서 개발된 라운드 엔드밀 타입의 MR연마 시스템은 CNC 공작기계에 장착하여 연마공정을 위해 생성된 G-code를 이용하여 형상연마가 가능한 시스템이다. 일반 절삭공정의 경우 공구는 공작물에 접촉하여 재료를 제거하지만 MR유체를 이용한 연마공정은 자장에 의해 일정한 MR유체

패드를 형성하여 이 패드의 상대운동에 의해 재료를 제거하는 가공이기 때문에 조건에 따라 정해진 간격(gap)을 유지하고 가공이 진행되어야 한다. 이를 위해 연마대상 곡면에 대한 오프셋 면(offset surface)을 계산하고 이 곡면 상에서 연마가 수행 되도록 경로를 결정한다. 적절한 연마를 위한 형상을 보정하기 위한 형상보정장치(reformer)를 부착하였으며, MR유체 위로 연마 슬러리를 투입하여 연마효과를 증대시키는 방법으로 실험이 수행되었다(Fig. 4).

3.2 MR유체 조성 및 연마제

개발된 MR연마시스템의 자기장 세기(네오디뮴자석 개수)에 따른 연마가능성을 고찰하기 위해 광학 부품으로 널리 이용되는 BK7 글래스(glass)를 시편으로 사용하였으며, 실험을 위해 적용된 MR유체는 자성입자(CI(carbonyl iron) powder), 운반유체(DI water), 자성입자의 산화로 인한 부식을 지연시키는 역할을 하는 염기(Na₂CO₃), 그리고 자성입자들 간의 점성을 유지시켜주는 분산안정제(Glycerine)로 구성되어 있으며, 사용된 MR유체의 조성을 Table 4에 나타내었다⁽⁸⁾. 연마재로는 일반적으로 유리연마에 탁월한 연마성능을 보이는 나노 세리아 슬러리(Nano Ceria Slurry, Celexis Cx 94s slurry)를 사용하였다. Fig. 5는 개발된 MR연마시스템에 적용되는

CI powder와 연마제의 입도분석 결과를 나타내고 있으며, 이를 통해 CI powder의 평균크기는 2 μ m~6 μ m인 입자들의 분포로 조성되어 있고 연마제 또한 수 nm 크기의 입자들이 분포해 있는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6은 MR유체로 사용된 CI powder의 SEM 이미지이며 이를 통해 입자들의 크기를 확인할 수 있다. 개발된 연마시스템의 성능평가를 위해 네오디뮴자

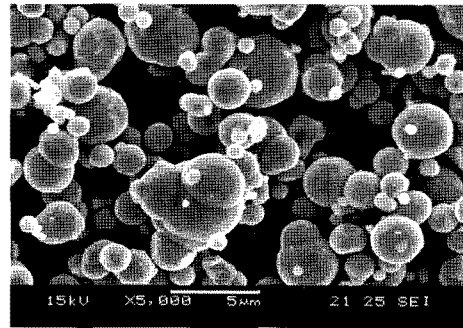
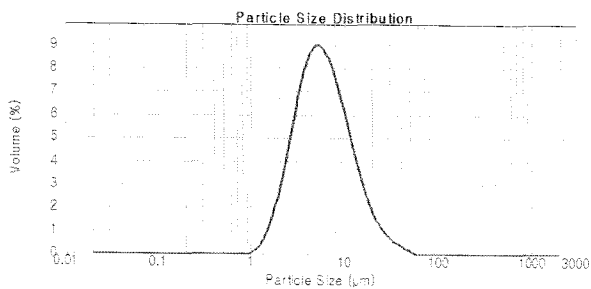


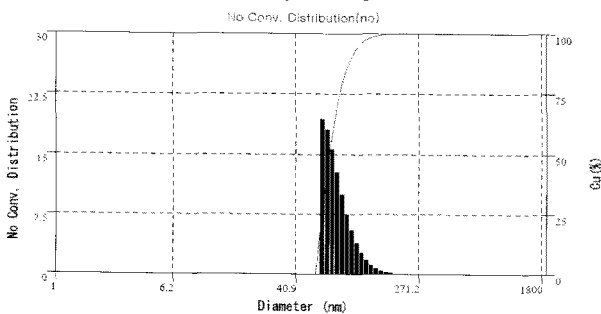
Fig. 6. SEM image of CI powder

Table 4 Properties of MR fluids

CI powder	DI water	Na ₂ CO ₃	Glycerine
40wt%	57.7wt%	2wt%	0.3wt%



(a) Carbonyl iron powder



(b) Nano ceria slurry

Fig. 5 Polishing principle of the round endmill type MR polishing system

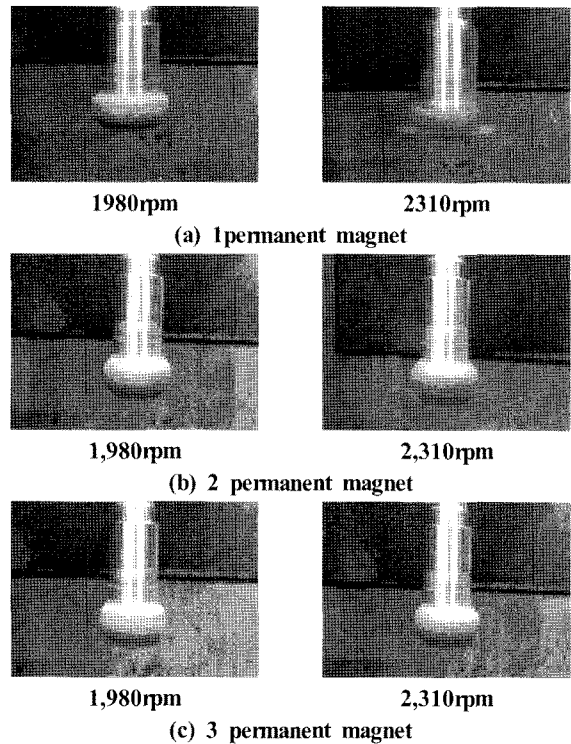


Fig. 7 Formed MR fluid pad according to the number of revolution and permanent magnet

Table 5 Experimental condition

No.	Neodymium magnet	Magnetic flux density	Spindle speed	Abrasives
1	1ea	0.075T	1,980rpm	Nano ceria slurry
2	2ea	0.120t		
3	3ea	0.135T		

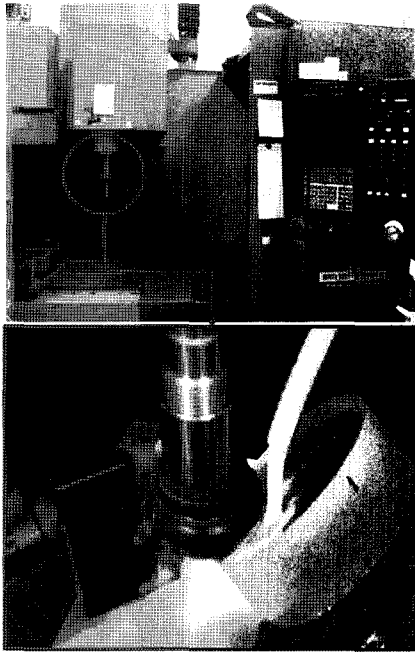


Fig. 8 Round endmill type MR polishing system

석의 개수와 가공조건을 변화시키며 이에 따른 재료제거량의 변화를 고찰하였다.

기존의 연구에서 주축의 회전속도가 증가할수록 동일한 가공시간에 대해 재료제거량이 증가하나, 회전속도가 일정 속도 이상 지나치게 증가하면 원심력에 의한 MR유체의 탈락으로 인해 연마기능이 오히려 저하되는 경우도 발생한다⁽⁹⁾.

기존의 연구결과와 비교하기 위하여 휠 타입 MR연마시스템에서 우수한 재료제거량을 얻을 수 있었던 300rpm을 본 연구에서는 동일한 원주속도를 얻을 수 있는 1,980rpm으로 변환하여 적용하였다⁽⁸⁾. Fig. 7에서는 1,980rpm과 2,310rpm에서의 MR유체 입자탈락 실험을 수행한 결과 2,310rpm에서 네오디뮴자석이 1개 일 때 MR유체의 탈락이 많이 일어났고 2개 일 때는 약간의 MR유체의 탈락이 발생하는 것을 확인하였고, 나머지 실험에서는 MR유체의 탈락이 거의 일어나지 않았다. 따라서 실험조건은 네오디뮴자석의 개수는 1~3개, 스피들 회전속도는 입자탈락이 일어나지 않는 1,980rpm으로 고정하였다(Table 5). 라운드 엔드밀 타입의 MR연마 장치는 수직형 CNC 머시닝센터(HiMac V100)에 설치하였으며, 마그네틱 척을 이용하여 reformer를 설치하였고, BK7 glass와 MR유체 사이에는 연마 슬러리는 지속적으로 공급하였다(Fig. 8). 본 시스템에서는 모서리 부분에서 연마를 수행하기 때문에 경사면을 가진 구조물 연마를 위해 BK7 glass를 45° 경사진 지그에 장착하여 실험을 수행하였다.

3.3 실험결과

네오디뮴자석의 개수에 따른 재료제거량의 관계를 분석하

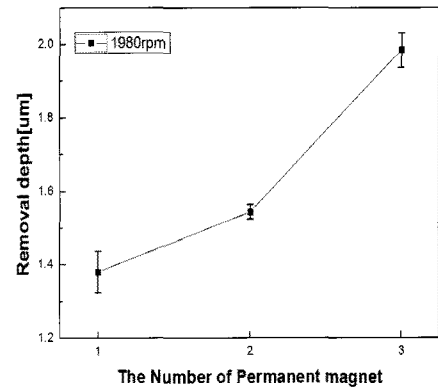


Fig. 9 Results of removal depth according to the number of permanent magnets

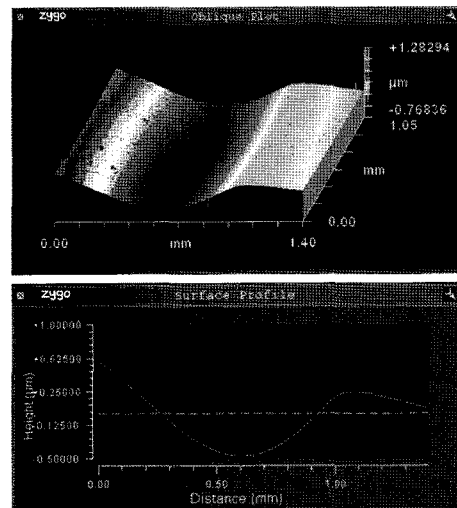


Fig. 10 Results of 3D plot and surface profile of machined surface

기 위해 네오디뮴자석의 개수를 조절하여 3회 반복 실험을 수행하여 비 접촉식 3차원 표면형상 측정기(ZYGO NV6200)로 측정을 수행하였다. 실험 결과 네오디뮴자석의 개수가 증가할수록 자기장의 세기도 증가하며 재료제거율이 점차 증가하는 것을 확인할 수 있었으며 네오디뮴자석의 개수가 3개 일 때 가장 큰 재료제거량(2.05μm)을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과는 자기장의 세기가 증가할수록 MR유체의 전단력 상승과 더불어 부양력을 높여 BK7 glass 표면의 압력을 상승시키게 되며 이 때 상승된 표면 압력은 투입되는 연마 입자와 BK7 glass 표면과의 접촉 면적을 크게 만들어 재료제거량이 향상되기 때문이라 할 수 있다(Fig. 9).

Fig. 10은 라운드 엔드밀 타입 MR연마시스템을 이용한 연마에서 재료제거량이 최대인 2.05μm일 때의 3D plot 및 surface profile을 나타내고 있다. 본 연구를 통해 개발한 라운드 엔드밀 타입 MR연마시스템의 소형화를 시도하였으며 이를 통해 재료제거를 통한 연마가능성도 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 구면 및 경사면을 가진 구조물의 형상연마를 위해 네오디뮴자석을 이용한 라운드 엔드밀 타입 MR연마시스템을 개발하였으며 기초실험을 수행하였다. 그 결과 네오디뮴자석의 개수에 따른 재료제거량의 변화를 통하여 개발된 MR연마시스템의 연마가능성을 확인할 수 있었다. 본 연구의 수행 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 구면 및 경사면을 가진 형상의 연마를 위해 기존 CNC에 장착이 가능한 라운드 엔드밀 타입 MR연마시스템을 개발하였다.
- (2) ANSYS를 이용해 라운드 엔드밀 타입 MR연마시스템 개발을 위한 자기장 해석을 수행하였으며, MR유체가 커버 모서리 부분에 집중되어 연마공구로서의 역할을 할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.
- (3) 네오디뮴자석의 개수(자기장의 세기)에 따른 연마실험을 통해 개수가 증가할수록 MR유체의 전단력과 연마입자와 공작물과의 압력이 증가하며 BK7 glass의 재료제거 향상됨을 확인하였다.

본 연구를 통하여 개발된 라운드 엔드밀 타입 MR연마시스템은 소형화를 통한 연마가능성을 확인할 수 있었다. 향후 3차원 형상의 초정밀 연마를 위한 라운드 엔드밀 타입 MR연마시스템의 성능향상을 위한 지속적인 실험 및 연구가 필요하다.

후 기

본 논문은 지식경제부 주관 전략기술개발사업 “마이크로 기능성 초정밀 핵심요소부품 제조기반기술개발”의 제 4세부 “기능성 초정밀 핵심 요소부품 제조 초정밀 금형 기술개발”의 결과임.

참 고 문 헌

- (1) Shin, Y. J., Kim, D. W., Lee, E. S., and Kim, K. W., 2004, “The Development of Polishing System a Magnetorheological Fluids,” *J. KSPE*, Vol. 21, No. 7, pp. 46~52.
- (2) Kordonski, W., and Golini, D., 1999, “Progress Update in Magnetorheological Finishing,” *Int. J. of Mod. Phys. B.*, Vol. 13, No. 14, 15 & 16, pp. 2205~2212.
- (3) Kim, D. W., Shin, Y. J., Lee, E. S., and Cho. M. W., 2003, “The Principle of Magnetorheological Finishing for a Micro Part,” *Proc. the KSPE*, pp. 300~304.
- (4) Ahn, B. W., Lee, S. J., and Park, S. J., 2004, “Ultra Precision Polishing of Micro Die and Mold Parts using Magnetic-assisted Machining,” *Proc. the KSPE*, pp. 1832~1835.
- (5) Kordonski, W., and Shorey, A., 2007, “Magnetorheological Jet Finishing Technology,” *J. Int. Mat. Stru.*, Vol. 18, No. 11, pp. 1127~1130.
- (6) Lee, J. W., Kim, D. W., Cho. M. W., Cho. W. S., and Shin. Y. J., 2008, “A Study on the Improvement in Ultra-Precision Surface of Si3N4 using Al2O3 Slurry in MR Polishing,” *Proc. the KSMTE*, pp. 238~243.
- (7) Degroote. J. E., Marino. A. E., wilson. J. P., Bishop. A. L., Lambropoulos. J. C., and Jacobs. S. D., 2007, “Removal Rate Model for Magnetorheological Finishing of Glass,” *App. Opt.*, Vol. 46, No. 32, pp. 7927~7941.
- (8) Kim. D. W., 2007, *Development of a Ultra Polishing System using Magnetorheological Fluids and Analysis of and its Effect on Material Removal Mechanism*, A Thesis for a Doctorate, Inha University, Republic of Korea.
- (9) Jung. B. S., Jang. K. I., Min. B. K., Lee. S. J., and Seok. J. W. 2009, “Magnetorheological Finishing Process for Hard Materials using Sintered Iron-CNT Compound Abrasives,” *Int. J. Mach. Manu.*, Vol. 49, No. 5, pp. 407~418.

(1) Shin, Y. J., Kim, D. W., Lee, E. S., and Kim, K. W.,