

3차원 형상 연마를 위한 라운드 엔드밀 타입 MR연마시스템의 재료제거 특성에 관한 연구

홍광표*, 신봉철⁺, 김동우⁺⁺, 조명우⁺⁺⁺, 제태진⁺⁺⁺⁺

(논문접수일 2011. 02. 24, 수정일 2011. 06. 02, 심사완료일 2011. 06. 03)

A Study on the Characteristics of Material removal using a Round endmill Type MR Polishing System for 3D Shape

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

Abstract

Recently, it has been studying for the polishing process of micro parts widely. However, present MR polishing system, it is difficult to minimize electromagnet and to polish sphere or slope parts. Then, it can not be obtained demanded surface quality. In this study, material removal characteristics of BK7 glass using round endmill type MR polishing system were investigated through series of experiment. The experiments were investigated by changing imposed polishing conditions, such as rotational speed and polishing depth. As a results, very high material removal was obtained at 0.7mm gap distance, 1,980rpm.

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

1. 서론

최근 산업의 발달로 인한 항공 우주 산업, 반도체 산업, 의료 기기 산업 등에 사용되는 소형화된 정밀 기계 부품들의 수요가 증가하고 있고 이에 따라 높은 가공 정밀도 및 고품질 표면 품질이 요구되고 있다. 가공 정밀도는 현재 가공 기술로 각종 산업에서 요구하는 수준까지 가능하나 표면 품질 향상을 위한 기술은 부족한 실정이다. 최근 고품질 연마를 위해 인프로세스

드레싱(ELID), CMP(Chemical Mechanical Planarization) 등과 같은 새로운 연마 기술들이 연구되고 있다⁽¹⁾. 하지만 이러한 연마 방법은 접촉에 의한 연마로 SSD(subsurface damage), 마이크로 크랙(Micro crack) 등과 같은 문제가 발생하게 된다.⁽²⁾ 또한 구조적으로 광범위한 평탄화 작업에 적합하여 다양한 형상을 갖는 구조물에는 적용이 어렵다. 따라서 이러한 문제점을 보완하기 위해 전자기적으로 유체의 농도를 조절하여 응력과 전단력을 변화시켜 비 접촉 방식으로 표면 품질을 향상시키기

* 인하대학교 기계공학과
+ 교신저자, 인하대학교 기계공학과 (kenny77b@empal.com)
주소: 402-751 인천광역시 남구 용현동 253
++ University of waterloo
+++ 인하대학교 기계공학과
++++ 한국기계연구원 나노공정장비연구실

Table 1 Magnetic flux density comparison between electromagnet and permanent magnet

Electro magnet	Magnetic flux density	Permanent 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		

위해 MR유체를 이용한 연마방법 연구되고 있다^(3,4). Kim 등은 MR유체의 재료제거 메커니즘을 이용한 MR연마시스템을 개발하여 가공깊이, 회전속도, 자기장 세기, 슬러리 양과 같은 다양한 실험 조건에 따른 재료제거량 분석에 대한 연구를 수행하였다⁽⁵⁻⁷⁾. 그러나 기존 MR연마시스템은 전자석(electromagnet)을 이용하여 자기장을 생성하기 때문에 시스템의 소형화가 어렵고 소형 및 3차원 형상 구조물의 연마가 까다로운 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 네오디뮴 자석을 이용하여 3차원 형상 구조물의 연마가 가능한 라운드 엔드밀 타입 MR연마시스템을 제작하였고 이를 이용하여 가공깊이 변화 및 회전 속도 변화에 따른 재료제거량을 분석하였다.

2. 라운드 엔드밀 타입 MR연마공정

본 연구에서 적용된 라운드 엔드밀 타입 MR연마공정은 기존 CNC에 장착이 용이하여 절삭가공 후에 MR유체를 이용한 연마공정을 절삭 공정처럼 수행할 수 있다. 본 시스템에서 MR유체는 항상 일정한 양으로 공급되어야 하며 동일한 형상과 두

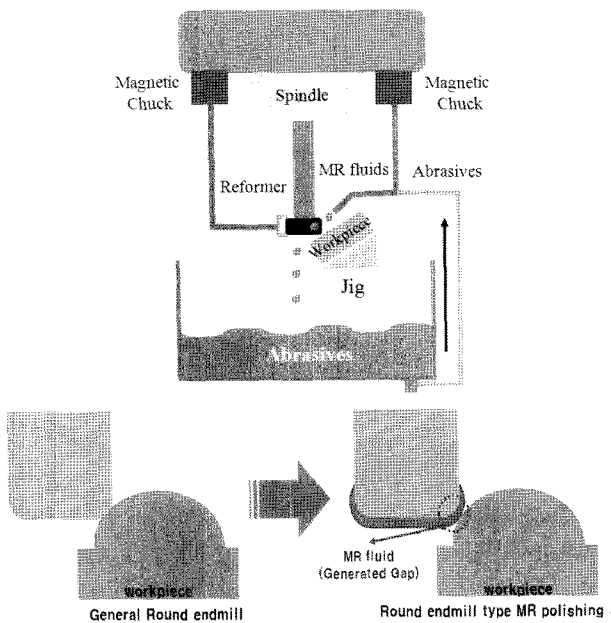


Fig. 1 Principle of round endmill type MR polishing

께를 유지하기 위해 리포머(Reformer)와 MR유체와 공작물 사이에는 연마 슬러리를 지속적으로 투입하는 장치가 필요하다 (Fig. 1).

라운드 엔드밀 타입 MR연마시스템 제작은 MR유체를 일정한 형상으로 유지하기 위해 네오디뮴 자석을 이용하였고 구성으로는 연마가 이루어지는 커버(Cover)부분, CNC 주축에 장착할 수 있는 스피indle 바디(Spindle body)부분으로 설계하였다. 각 부분의 재질은 MR유체와 연마슬러리로 인한 부식과 손상을 방지하기 위한 스테인리스강(stainless steel 304)로 하였다. 네오디뮴 자석은 직경이 Ø13.5, 두께가 2.0mm인 디스크 형태로 평균 자기장의 세기가 220mT인 것으로 사용하였으며 커버 부분은 일반 라운드 엔드밀 공구와 동일규격으로 설계되었다 (Fig. 2).

라운드 엔드밀 타입 MR연마시스템을 이용하여 연마공정을

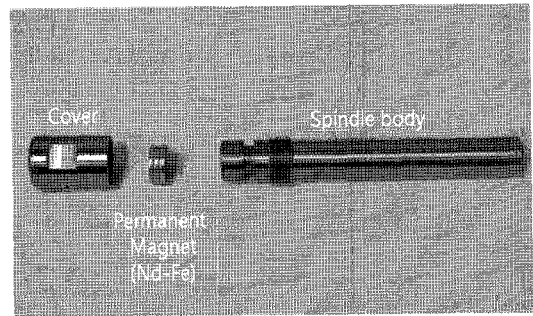
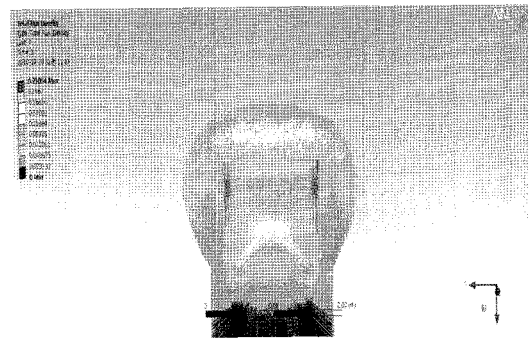
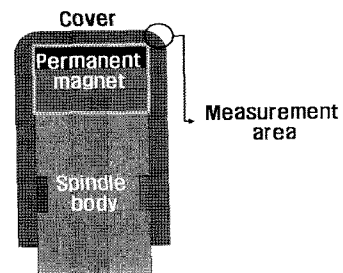


Fig. 2 Consist of Round endmill type MR polishing system



(a) Distribution of magnetic flux density



(b) measurement area

Fig. 3 Measurement area of magnetic flux density

수행하기 위해서는 커버 모서리 부분에 자기장이 형성되어야 되므로 Fig. 3과 같이 자기장 분포 시뮬레이션을 수행하였고 이 결과 커버 모서리 부분으로 자기장이 형성되는 것을 확인하였다. 실제 제작된 시스템에 네오디뮴 자석을 장착하여 커버 모서리 위치에서 가우스 미터(Gauss-meter, MG-10D)를 이용해 측정된 결과 0.075T가 나왔다. 기존 MR연마시스템에서 자기장의 세기를 0.013T~0.105T 범위에서 연마공정을 수행하므로 본 시스템의 자기장의 세기는 충분하다는 것을 확인할 수 있었다(Table. 1).

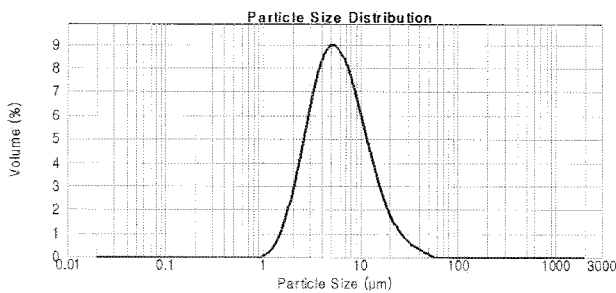
3. 라운드 엔드밀 타입 MR연마실험

3.1 MR유체 및 연마슬러리

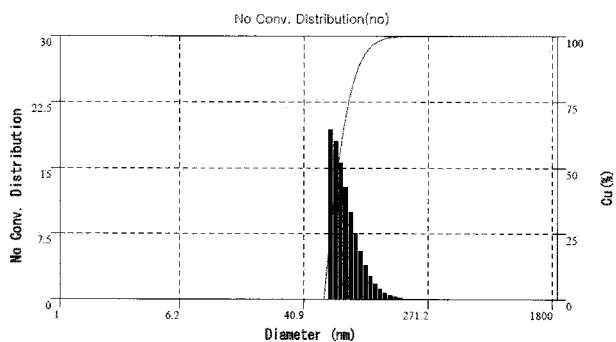
라운드 엔드밀 타입 MR연마시스템의 재료제거 특성을 고찰하기 위해 광학 부품 및 소자로 널리 이용되고 있는 BK7 glass를 시편으로 사용하였으며 실험에 사용된 MR유체는 자성입자(Carbonyl Iron powder), 운반유체(DI water), 소량의 분산안정제(glycerine)로 구성된다. 연마 공정에서 자성입자는 대기 중에 노출되고 이로 인해 산화가 이루어지는데 이는 연마효율을 저하시키는 요인이 된다⁽⁸⁾. 이 때 산화를 지연시키거나 방지

Table 2 Properties of MR fluids

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



(a) CI powder



(b) Nano ceria slurry

Fig. 4 Particle analysis graph

하기 위해 소량의 염기(Na₂CO₃)를 첨가하였다(Table. 2)⁽⁶⁾. 연마제로는 나노 세리아 슬러리(Nano Ceria Slurry)를 사용하였다. 이렇게 조성된 MR유체와 연마슬러리는 크기에 따라 재료 제거량이 차이가 날 수 있기 때문에 본 연구에 적용된 자성입자와 연마입자들의 크기를 확인하고 크기에 따른 입자들의 안정적인 분산성을 파악하였다. 입도분석 결과 CI powder는 Fig. 4a와 같이 2~6um 크기의 입자들이 다량으로 분포, 조성되어 있으며 연마재로 사용되는 나노 세리아 슬러리는 Fig. 4b와 같이 수십 nm 크기의 입자들로 분포, 조성되어 있음을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서도 동일한 MR유체 조성의 적용이 가능함을 알 수 있다.

3.2 시스템 구성

라운드 엔드밀 타입 MR연마시스템의 재료제거 특성을 분석하기 위해 본 시스템은 현대중공업(Hi Mac V-100) CNC에 설치하였다. MR유체의 일정한 형상과 두께의 보정을 위한 reformer와 연마슬러리 공급을 위한 pump(7ml/sec)의 노즐은 마그네틱 척을 이용하여 주축에 설치하였다.

공작물을 장착하기 위한 지그는 수조(Bath)안에 설치하였으며 슬러리 공급을 위해 pump와 수조를 연결하여 재사용하였다. 본 시스템에서 자기장의 집중은 커버 모서리 부분에서 생성되므로 지그는 45° 블럭을 이용하여 BK7 glass를 부착하여 실험을 수행하였다(Fig. 5).

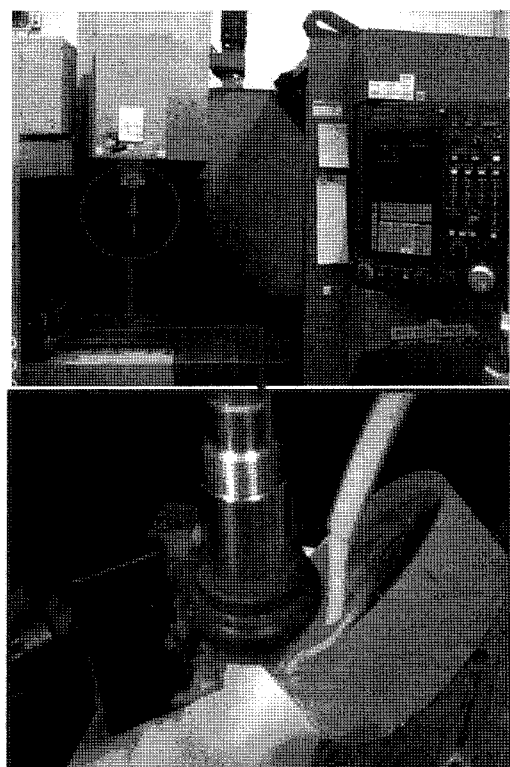


Fig. 5 Round endmill type MR polishing system

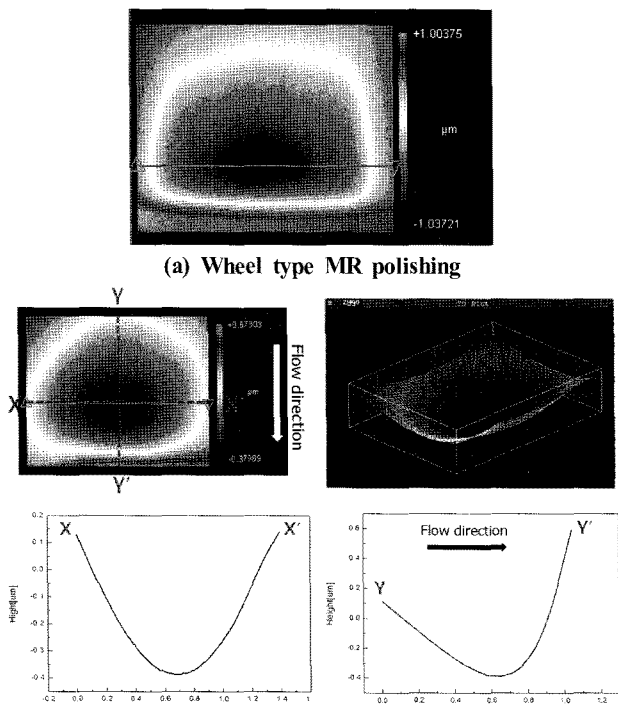
4. 실험결과 및 고찰

4.1 연마형상(spot)의 관찰

본 연구에서 MR유체를 이용한 라운드 엔드밀 타입의 연마 메커니즘을 분석하기 위해 기초실험을 통한 연마형상을 분석하였다. 실험 방법은 라운드 엔드밀 타입의 MR연마 장치를 이용해 BK7 glass에 1분 동안 연마를 수행하였다. 그 결과 Fig. 6에서와 같이 MR 유체가 투입과 배출되는 구간의 형상차이를 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 점성을 가진 MR유체가 미세한 틈(gap)으로 투입되고 배출되는 구간에서 회전에 의한 동압 효과가 발생하게 된다. 이로 인해 MR유체의 투입과 배출되는 흐름방향에 따른 연마형상이 차이가 나게 된다. 이러한 결과는 라운드 엔드밀 타입의 MR연마 시스템은 기존의 휠 타입의 연마 장치와 동일한 방법으로 연마가 수행된다는 것을 확인하였고 또한 연마 시스템의 효율성을 입증 하였다. Fig. 6은 연마형상을 측정된 결과이며 X-X', Y-Y' 방향으로의 표면형상을 각각의 그래프로 나타낸 것이다. 이를 통해 기존의 MR연마시스템을 이용한 연마형상과 비교할 때 유사한 연마형상을 나타내고 있음을 알 수 있으며 이는 라운드 엔드밀 타입 MR연마시스템의 적용이 가능함을 확인할 수 있었다.

4.2 가공깊이에 따른 재료제거 특성

MR유체를 이용한 연마 시스템은 체인 구조의 연마 패드와 시편 사이에 연마 입자의 공급으로 연마를 수행하게 된다. 따라



(b) Round endmill type MR polishing

Fig. 6 The shape of Polishing spot

서 기초 실험으로 본 시스템의 알맞은 가공깊이 분석을 위해 회전속도를 1,980rpm으로 고정하였고 가공깊이는 0.3mm~1.0mm로 조절하여 4회 반복 실험을 수행하였다(Table. 3). MR유체를 이용한 연마 시스템에서는 가공 깊이에 따른 재료 제거량은 미비하게 발생하므로 재료제거량의 변화를 크게 하기 위해 3개 네오디뮴 자석(0.135T)을 장착하여 자기장의 세기를 크게 하였다. MR유체는 일정량(3ml)을 투입하여 3mm의 두께로 MR유체가 형성되게 하였으며 공작물 표면과 MR유체가 접촉하는 지점을 원점으로 선정하고 절입 깊이를 조절하였다(Fig. 7).

Table 3 Experimental conditions

Permanent magnet [ea]	Magnetic flux density [T]	Gap (mm)	Time (min)
3	0.135	0.3~1.0	1.0

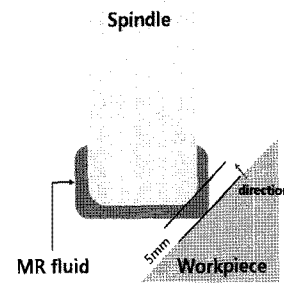


Fig. 7 Gap distance control

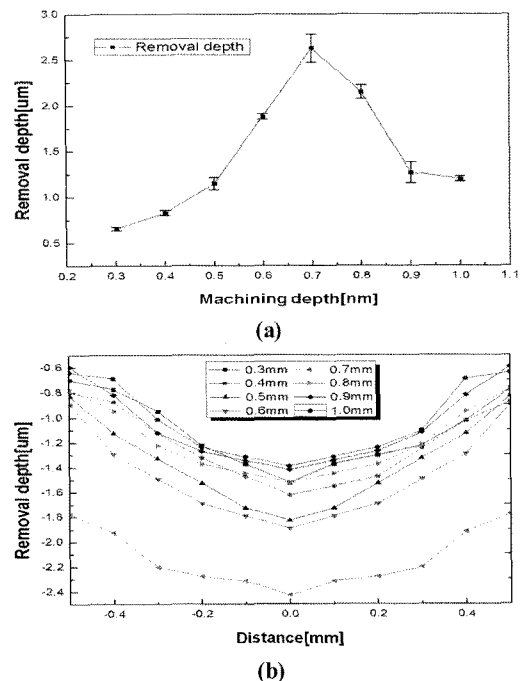


Fig. 8 Results of removal depth and profile according to gap distance

비접촉식 3차원 표면형상 측정기(ZYGO NV6200)를 이용하여 측정된 결과 가공깊이 0.3mm부터 0.7mm까지는 지속적으로 재료제거량이 증가하는 것을 알 수 있으며 가공깊이 0.7mm에서 가장 큰 재료제거량(2.63 μ m)을 확인할 수 있었다 (Fig. 8a). 또한 Fig. 8b는 중심에서 부더의 일정거리 떨어진 지점에서의 제거 깊이를 그래프로 나타낸 것이며 재료제거를

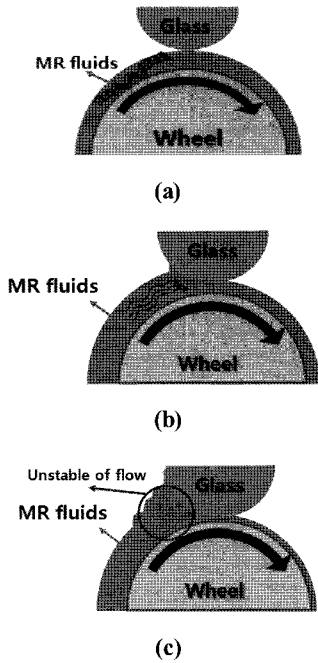


Fig. 9 The polishing mechanism between MR fluids and gap distance

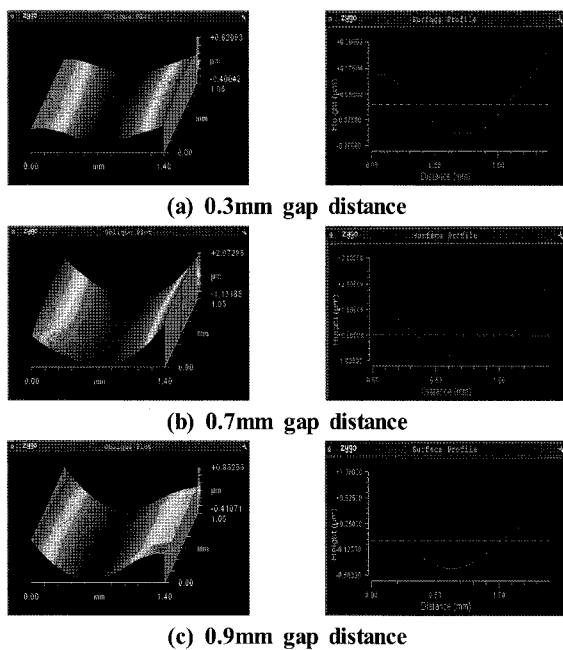


Fig. 10 Results of 3D plots and Surface profiles at 0.3mm, 0.7mm and 0.9mm gap distance

통해 연마형상이 생성된다는 것을 확인할 수 있었다. 본 시스템에서는 일반적인 MR연마공정과 같이 가공깊이가 증가하게 되면 자화된 MR유체와 공작물 표면 사이의 압력을 증가시키며 MR유체 표면으로 공급되는 연마슬러리 입자와 공작물 표면과의 접촉 면적을 증가시켜 재료제거량이 증가하게 된다. 하지만 그 이상의 가공깊이(0.8mm) 부터 재료제거량이 현저히 감소하는 현상은 일정 가공깊이 이상의 과도한 진입이 이루어지면 MR유체와 공작물 표면 사이의 압력 증가로 MR유체의 흐름이 차단되고 공작물 표면으로의 연마슬러리 투입이 원활하지 못해 연마슬러리로서의 역할을 수행할 수 없게 된다(Fig. 9). 이러한 결과는 Fig. 10의 3D plot과 표면형상(surface profile)을 통해 확인할 수 있다. 표면형상은 측정된 연마부위의 가운데 위치를 중심으로 생성된 위치 데이터를 연속적으로 나타내어 획득할 수 있다.

4.3 회전속도에 따른 재료제거 특성

본 실험에서는 가공 조건인 회전속도에 따른 라운드 엔드밀 타입 MR연마시스템의 재료제거 특성을 분석하기 위해 Table. 4와 같은 실험조건을 적용하여 3회 반복실험을 수행하였다. 가공 깊이는 기초 실험에서 선정된 0.7mm로 실험을 수행하였다. 실험결과 실험 회수에 따라 양간의 오차는 존재하였지만 A구간에서는 회전속도가 증가할수록 재료제거량이 증가하다가 마지막 B구간에서는 오히려 감소하는 경향을 보였다(Fig. 11). Fig. 12는 A구간의 시작(660rpm)과 끝(1,980rpm), B구간에서의 3D plot과 표면형상(surface profile)을 나타내고 있으며 각 조건에서의 재료제거량의 차이를 확인할 수 있다. A구간의 경우 회전속도 증가로 인해 MR유체와 시편 사이에 공급되는 연마 입자수의 상승과 더불어 전단력 상승을 통하여 1,980rpm까지는 지속적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 B구간인 2,310rpm에서 재료제거량이 감소하는 이유는 과도한 회전속도가 유발하는 원심력으로 인해 MR유체 입자들의 체인 구조(chain-like structure)의 연결고리를 끊어버리는 결과를 초래하게 된다. 또한 이러한 입자들의 탈락으로 연마입자는 공작물 표면과의 충분한 접촉이 이루어지지 않아 재료제거를 위한 전단력을 상실하게 되기 때문이라 예상된다. 이러한 현상을 분

Table 4 Experimental condition according to rpm, permanent magnet, magnetic flux density

No.	rpm	Permanent magnet [ea]	Magnetic flux density [T]	Abrasive
1	660	1ea	0.075T	Nano ceria slurry
2	1,320			
3	1,980			
4	1,980			

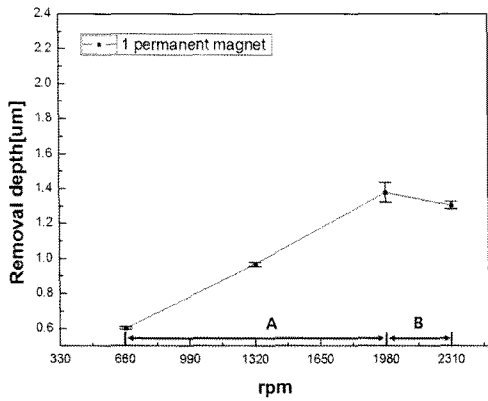


Fig. 11 Results of removal depth according to rpm

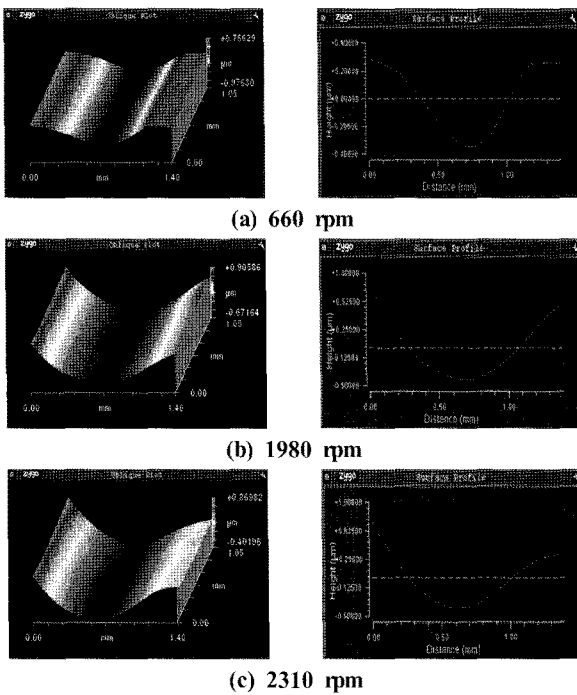


Fig. 12 Results of 3D plots and Surface profiles at 660rpm, 1980rpm and 2310rpm

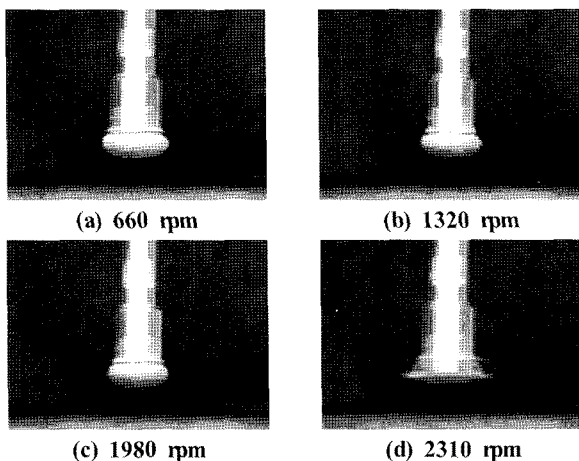


Fig. 13 MR particle failed according to the number of revolution

석하기 위해 reformer를 제거한 상태에서 회전속도 변화에 따라 MR유체의 변화를 측정하였다. 이 결과 660rpm~1,980rpm까지의 회전속도에서는 MR유체 입자탈락이 발생하지 않았지만 2,310rpm에서는 회전에 의한 원심력을 통해 입자탈락이 발생하는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 13). 따라서 본 시스템에서 네오디뮴 자석 1개를 사용하여 생성된 자기장에서는 회전속도가 1,980rpm일 때 최대 재료제거량 획득할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 3차원 형상을 가진 소형 구조물 연마를 위해 CNC에 장착이 가능한 라운드 엔드밀 타입의 MR연마시스템을 적용하였으며 본 시스템의 재료제거 특성평가를 위해 가공 깊이 및 회전속도를 실험조건으로 선정하여 연마성능을 평가하였다.

- (1) 본 시스템에서 가공깊이에 따른 실험결과, 0.7mm에서 가장 큰 재료제거량(2.63um)을 나타내지만 0.7mm 이상이 되면 재료제거량이 저하되는 것을 확인할 수 있었다.
- (2) 회전속도 1,980rpm까지 증가하였을 경우 연마 입자의 공극을 지속적으로 증가시켜 재료제거량이 상승하는 결과를 확인하였다.
- (3) 네오디뮴 자석 1개를 사용하여 생성된 자기장으로 MR유체의 체인을 형성할 수 있는 구간은 1,980rpm까지이고 그 이상에서는 입자탈락을 확인할 수 있었다.

본 연구를 통해 라운드 엔드밀 타입 MR연마시스템의 다양한 실험조건에 대한 연마성능을 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국 과학재단의 지원을 받아 수행된 연구의 일부입니다(No. 2009-0074199).

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) Akami, Y., and Asari, k. L., 1998, "Characterization of Particle Motion for Polishing and Texturing under AC Field by using Particle Dispersion Type ER Fluid," *J.*

- Int. Mat. Sys. Struc.*, vol.9, No. 8, pp. 672~675.
- (3) Kordonski, W., and Golini, D., 1999, "Progress Update in Magnetorheological Finishing," *Int. J. Mod. Phys. B*. Vol. 13, No. 14, 15 & 16, pp. 2205~2212.
- (4) Kim, D. W., Shin, Y. J., Lee, E. S., and Cho. M. W., 2003, "The Principle of Magnetorheological Finishing for a Micro Part," *Proc. KSPE*, pp. 300~304.
- (5) 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. KSMTE*, pp. 238~243.
- (6) 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.
- (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. K. D., 2000, "A Controllable Micro Damper using Magneto-Rheological Fluids," *J. KSPE*, Vol. 17, No. 8, pp. 44~45.