

자기유변유체를 이용한 연마가공 시스템

김영민*, 신영재⁺, 이응숙⁺, 이동주⁺⁺

A Magnetorheological Polishing System

Young-Min Kim*, Young-Jae Shin⁺, Eung-Sook Lee⁺, Dong-Ju Lee⁺⁺

Abstract

The Magnetorheological fluid has the properties that its viscosity has dramatic changed under some magnetic fields therefore, Magnetorheological fluids has been used for micro polishing of the micro part(for example, a aspherical surface in a micro lens). The polishing process may appears as follows. A part rotating on the spindle is brought into contact with an Magnetorheological finishing(MRF) fluids which is set in motion by the moving wall. In the region where the part and the MRF fluid are brought into contact, the applied magnetic field creates the conditions necessary for the material removal from the part surface. The material removal takes place in a certain region contacting the surface of the part which can be called the polishing spot or zone. The polishing mechanism of the material removal in the contact zone is considered as a process governed by the particularities of the Bingham flow in the contact zone. Reasonable calculated and experimental magnitudes of the material removal rate for glass polishing lens support the validity of the approach.

Key Words : Magnetorheological fluid(자기유변유체), Magnetic field(전자장), Bingham flow(빙엄 유동)

1. 서론

최근 첨단과학의 발전에 의해 공업기술의 향상과 더불어 광학, IT, 의학 등 여러 산업 분야에 있어서 신소재의 개발과 함께 광학 소자 및 부품의 가공 기술에 대한 관심이 매우 고조되고 있다. 초정밀 형상 부품의 수요가 급격히 증가함에 따라 광학 소자 및 부품의 초미세화, 고정밀화, 다기능화에 대한 요구가 높아지고 있는 실정이다.

하지만 현재, 미세 부품의 가공기술은 고도의 기술을 요하며 이를 해결하고자 하는 기술 또한 흔치 않다.

이러한 초미세 부품들은 3차원 형상을 가지고 있기 때문에 기존의 2차원적인 연마 방법으로 가공하기가 매우 곤란할 뿐만 아니라 연마 입자를 가공 면에 지속적으로 안정적으로 공급하는 것이 힘들기 때문에 요구되는 수준의 표면 조도를 얻기가 힘들다.

* 김영민, 충남대학교 대학원 기계공학과 (bbangkoo@kimm.re.kr)

주소: 대전광역시 유성구 궁동 220

+ 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부

++ 충남대학교 기계공학과

특히 대부분의 비구면 렌즈는 기존의 구면 렌즈에 비해 훨씬 뛰어난 광학성능과 영상 품질에도 불구하고 가공 난이도의 수준이 높음으로 많은 제한이 있다. 현재 대부분의 제조업체는 구면 렌즈용 연삭기라는 고정밀도의 값비싼 가공기를 사용하고 있으며, 최종 마무리 폴리싱은 수 시간 내지 수일에 걸쳐 이루어지고 있는 실정이다.

따라서 최근 고정밀도의 비구면 렌즈를 효과적으로 가공하기 위한 연구가 미국을 비롯하여 일본 등 여러 국가에서 활발하게 진행되고 있는 중이다. 기존의 비구면 렌즈의 초정밀 연마 가공에서 발생하는 최소 가공부 형성, 연마 압력의 조절, 패드의 마멸, SSD(Subsurface damage), 마이크로 크랙(Micro Crack) 등의 난점과 3차원의 미세 구조물 연마에 있어서 전자기적으로 유체의 농도를 조절함으로써 응력과 전단력을 변화시켜 이를 표면에서의 가공력으로 활용하며 연마 표면의 품위를 높이고자 자기유변유체(Magnetorheological fluids)를 이용한 연마가 시도되었다. 따라서 본 논문에서는 자기유변유체를 이용한 미세연마 시스템을 구축하고 MR유체를 이용한 연마가공 원리와 실험을 통하여 MR유체 및 공급되는 연마입자의 특성에 따른 거동에 대하여 설명하고자 한다.

2. 자기유변연마장치

2.1 자기유변유체

자기유변유체는 기름이나 물과 같은 비자성 유체에 철분말과 같은 자기장에 민감한 마이크로 크기의 자성물질이 혼합된 현탁액으로 자장이 부과되면 유동특성이 실시간으로 제어되는 스마트 재료의 하나이다. 일반적으로 자성입자들은 30나노 40퍼센트 정도의 부피 비율로 포함되어 있고 이 물질의 기본적으로 뉴턴 유체 성질을 띠지만 자기장을 부과하면 분산 입자가 분극현상을 일으켜 부하된 자기장과 평행한 방향으로 섬유질이 형성되어 전단력이나 유동에 대한 저항력을 가지게 되고 전단변형률이 없어도 일정한 항복응력을 발생시키는 식(1)과 식(2)로 묘사되는 빙엄(Bingham) 유체의 성질을 띠게 된다.

$$\tau = \eta_0 \dot{\gamma} + \tau_0(H) \operatorname{sgn}(\dot{\gamma}) \quad (1)$$

$$|\tau| \geq |\tau_0(H)|$$

$$\dot{\gamma} = 0 \quad (|\tau| \leq |\tau_0(H)|) \quad (2)$$

여기서, τ 는 전단 응력, η_0 는 소성 점도, $\dot{\gamma}$ 는 전단속도, $\tau_0(H)$ 는 자장에 의한 항복응력이다.

MR 효과라 불리는 이런 특징들은 자기장이 형성되면 입자들은 자성을 띄게 되고 형성된 자기장과 같은 방향으로 chain과 같은 구조를 형성한다. 유동에 대한 저항력을 갖는 특성은 댐퍼, 클러치, 브레이크 등에 이용되고 전단력을 갖는 특성은 연마에 이용되고 있다.

MRF에 이용되는 MR유체를 생산하기 위하여 쓰이는 자기장에 민감한 입자들은 carbonyl iron(CI) 분말이다. 이 분말은 iron pentacarbonyl을 분해할 때 생성되며 구형의 거의 순수한 철이며 수용성 또는 비수용성 운반유체, 첨가제, 비자성의 연마입자, 그리고 자기장을 활용한다.

자성 유체를 이용한 polishing의 표준 슬러리에 36vol% 자성입자, 연마입자 그리고 운반유체로 초순수로 구성되어 있으며, 여기에 약간의 분산 안정제가 첨가된다. polishing의 제거율을 높이기 위해 MR fluids는 cerium oxide 입자, diamond powder, Al_2O_3 입자같은 비자성 연마재를 함유한다. 따라서 슬러리를 적절하게 조성하고 제어하면 다양한 종류의 재료를 실용적인 재료제거율로 연마할 수 있으므로 매우 우수한 연마방법의 하나라 할 수 있겠다.

또한 자성 유체는 glycerol 같은 stabilizer를 함유하는데 이는 자성 유체의 viscosity를 더해주고 연마입자들과 magnetic particle의 혼합을 조절하는데 도움을 주지만 stabilizer의 과도한 양의 첨가는 glycerol의 영향이 물의 수화작용으로 인한 유리 표면의 연화를 방해한다.

녹은 자성 유체의 현 상태의 안정성 문제(stability problem)의 원인이 되는데 이는 유체의 수용성의 슬러리에서 미세하게 분해된 철 입자들을 취하기 때문이다. 산화된 철은 carbonyl iron에 비해 상당히 다른 magnetic properties를 가지기 때문에 부식된 자성 유체의 magnetic properties는 계속 변하게 되고 이로 인하여 부식이 MR finishing의 불예측 원인이 되는 것이다. 자성 유체는 부분적으로 대기에 노출되기 때문에 이는 carbon dioxide를 흡수하고 있는 유체의 pH 농도를 떨어트리는 원인이 된다. 또한 금속 산화의 원인이 되기도 한다. 운반액으로서 탈이온수의 사용은 부식을 늦추기는 하지만 이 방법이 완벽한 해답이 되지는 않는다. 따라서 이러한 문제 해결 방법의 하나로 pH를 약 10정도로 올리는 Na_2CO_3 같은 알카리의 첨가를 들 수 있는데 이는 제거율의 상승과 stability를 향상시키며 완충제의 역할도 한다.

2.2 자기유변연마 장치

실험에 사용된 자기유변장치는 Fig.1과 같고, 여기에 사용된 전자석의 구조는 Fig.2와 같다. 이 장치에서는 자기유변유체가 순환되지 않으므로 연마 중에 수분 증발 및 가공열에 의하여 자기유변유체의 특성이 변하게 되므로 자기유변유체의 유변학적 특성을 일정하게 유지하기 위하여 냉각액 공급을 최적화할 필요가 있다.

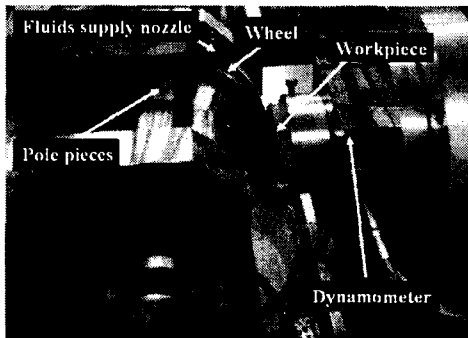


Fig.1 Photograph of the MRF system

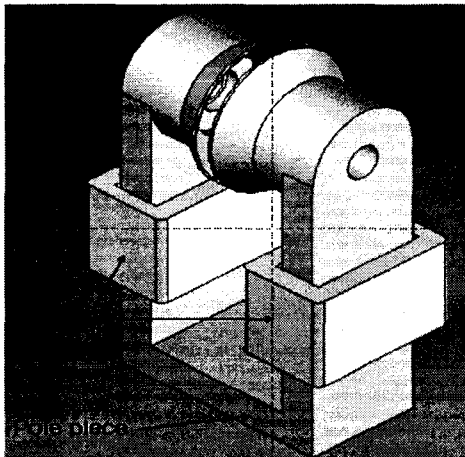


Fig.2 Structure of electromagnet

2.3 MR 유체를 이용한 Polishing의 구조

MR Finishing(MRF)의 공정은 다음의 그림과 같이 일어나는데 전형적으로 0.04와 0.1Pa·s(shear rate $800s^{-1}$ 의 경우 40에서 100cps)의 점성을 갖는 유체가 약 1.9m/s의

속도로 움직이는 vertical rotating wheel의 표면 위에 공급된다. 이 휠은 직경 180mm구의 부분 정도이며 MR유체의 띠가 자기장의 영향을 받는 휠의 면위에 공급이 되면서 유체의 점성은 수 밀리 초 동안에 세 단위 이상 증가하여 Bingham plastic 유체가 된다. 이 MR유체는 자기장에 의해 휠의 면에 부착이 된 상태로 계속적인 회전을 하게 되는데 이 유체위로 연동펌프에 의해 초순수와 연마재의 혼합물을 계속적으로 공급함으로써 glass의 수화작용과 연마에 의해 생기는 온도상승의 냉각효과를 주고 연마 입자를 보충한다. 따라서 convex 형태나 Flat 형태의 공작물이 moving wall(wheel)사이의 gap으로 이동을 하게 되는데 자기장의 gradient가 높으면 비자기성을 가지는 abrasive 입자들은 폴리싱 입자 띠의 상부 부분으로 격리되면서 이 연마 입자들이 공작물의 표면을 polishing 하게 된다. 공작물의 표면은 보통 0.5mm 깊이로 wheel의 그 부분으로 잠기게 되어 광학물질의 구경에 준하는 polishing을 지속적으로 할 수 있게 된다. 이렇게 제거되는 interferometrically 하게 측정되는 작은 양을 "spot" 라고 부른다.

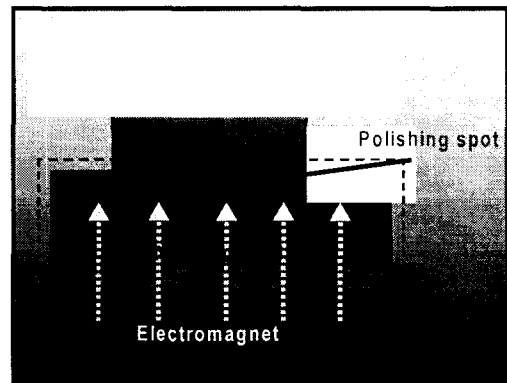


Fig. 3 Schematic diagram of the mechanism for the MR

3. MR유체를 이용한 polishing 실험

3.1 실험 장치 및 실험 조건

Fig.1의 자기유변연마장치를 사용하였으며, 기초 가공 실험의 재질은 BK-7을 사용하였고 Table 1에 BK-7의 물성치를 나타내었다.

Table 1 Physical properties of BK-7

Structure	single-crystal
Water solubility	0.0017
Surface hardness(GPa)	2.47
Young's module(GPa)	110
Fracture toughness	0.33

Table 2 The properties of the iron powder

Micro powder iron	
Color	Gray
Apparent density	2.0~3.0
True density	7.7 Maximum
Average particle diameter	4-6 microns
% iron	99.5 max
% carbon	0.05 max
% oxygen	0.5 max
% nitrogen	0.1 max

Table 3 Composition properties of the MR fluids used for material removal experiment

CI powder	DI water	글리세린	Na_2CO_3
30%	67.7%	2%	0.3%

Table 4 Experimental condition of Abrasive-DI water according to according to vol(%) of $Al_2O_3(1\mu m)$

	Abrasive	DI-water
Condition 1	Al_2O_3 4.4%	95.6%
Condition 2	Al_2O_3 8.7%	91.3%
Condition 3	Al_2O_3 17.3%	82.7%

Table 5 Experimental condition of Abrasive-DI water according to Al_2O_3 particle size

	Abrasive	DI-water
Condition 1	Al_2O_3 4.4%	95.6%
Condition 2	Al_2O_3 8.7%	91.3%
Condition 3	Al_2O_3 17.3%	82.7%

MR 유체를 이용한 연마 실험은 기초실험 단계로 일정 조성으로 혼합된 MR 유체와 연마 입자 Al_2O_3 powder를 혼합한 DI water를 공급하고 가공물과 휠 사이의 간격은 0.5mm로 유지 시킨 후 휠의 스피드는 150rpm 으로 고정시켰다. 전장장을 가하기 위한 전류치는 3A를 주고 각 가공 시간은 20분으로 고정하여 연마 입자의 조성에 따른 실험과 연마 입자의 크기에 따른 실험을 각 조건별로 3번씩 실험을 하여 그 결과치를 나타내고자 하였다. Table 2와 3에는 MR 유체 조성에 사용된 자성 입자(International specialty products Co.)의 물성치와 조성을 Table 4와 5 에는 각 연마재로 사용되는 알루미늄 파우더의 함량과 입자 사이즈에 따른 실험 조건을 나타내었다.

4. 실험 결과

자기유변유체를 이용한 polishing 실험에서 각각의 실험조건에 따라 가공한 후 3차원 표면조도 측정기(Veeco NT-2000)을 이용하여 연마된 가공면의 조도를 측정하였다.

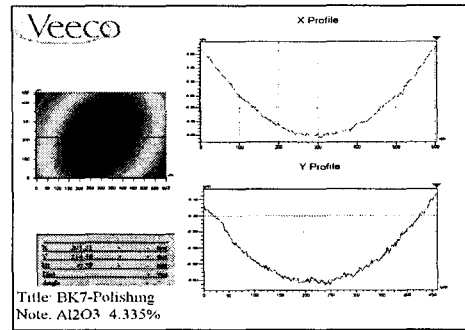


Fig.4 Surface contour plot of spot & 2D analysis(Al_2O_3 :Vol 4.335%)

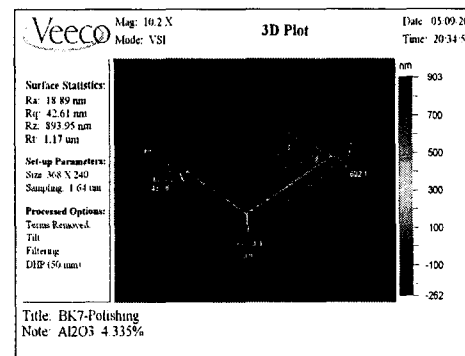


Fig.5 Measured surface roughness of spot (Al_2O_3 :Vol 4.335%)

Fig.4와 5에서 입자 크기(particle size) $1\mu m$ 의 알루미늄 파우더를 4.335% 첨가하여 가공을 한 후 가공 형상과 표면 조도를 측정하였다.

각각의 실험 조건에 따라 연마된 BK-7의 표면조도 측정 결과를 Fig.6과 7에 나타내었다.

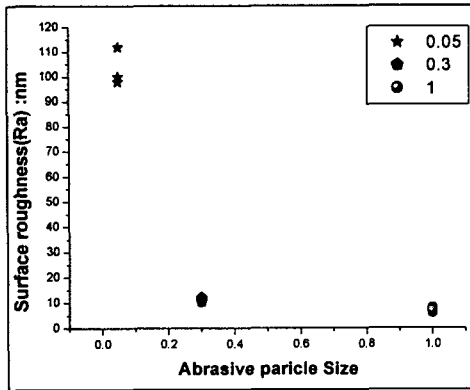


Fig.6 Result of surface roughness according to abrasive particle size

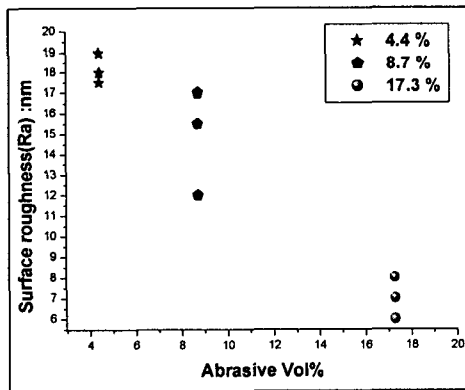


Fig.7 Result of surface roughness according to Al_2O_3 abrasive volume(size : $1\mu m$)

실험 결과 $1\mu m$ 크기의 알루미늄파우더의 경우 표면조도가 약 7nm로 각 다른 크기 $0.3\mu m$, $0.05\mu m$ 의 경우보다 훨씬 좋은 결과를 나타내었으며, $1\mu m$ 의 알루미늄파우더의 경우 함량이 증가할수록 우수한 표면 조도를 얻었다. 따라서 연마입자 크기를 적절히 조절하고, 연마 슬러리의 함량을 증가시킨다면 지금보다 더 좋은 표면 조도를 얻을 수 있음을 예상할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 MR유체를 이용한 연마 가공 시스템을 개발하였다. 전자석을 이용하여 MR유체에 자화를 걸어주면 패드와 같은 역할을 하고 연마 슬러리가 BK-7을 연마하는 것을 실험을 통해 검증하였다. 알루미늄 파우더의 입자 크기와 조성을 변화시키며 연마 가공을 한 결과 17.3%의 Al_2O_3 를 사용한 경우 약 Ra 6nm 정도의 우수한 표면 조도를 얻을 수 있었다. 이로서 광학 소자 및 부품 등의 고정밀도 평탄화가 가능하리라 생각되고, 지속적인 연구를 통하여 안정된 시스템을 구축하고 MR유체 및 연마 슬러리의 최적조건을 찾는다면 비구면 렌즈의 평탄화가 가능할 것이라 예측한다.

참고 문헌

1. W.I Kordonski, D.Golini, "Progress update in magnetorheological finishing," Int. J. Mod. Phys. B, Vol.13, Nos 14,15&16, pp.2205-2212, 1999.
2. Y.Akami, K.Asari, "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, pp.672-675, August, 1998.
3. Kim, K. D., "A Controllable Micro Damper Using Magneto-Rheological Fluids," J. of the KSPE, Vol. 17, No. 8, pp. 41-45, 2000.
4. Cl.Kormann, H.M.Laun, H.J.Richer, "MR Fluids with nano-magnetic particles," International Journal of Modern Physics B, Vol. 10, pp. 3167-3172, 1996.
5. W.I Kordonski, S.D. Jacobs., "Magnetorheological Finishing," International J. of Modern Physics B, Vol. 10, Nos. 23 & 24, pp 2837-2848, 1996.
6. D.Golini, W.I Kordonski, Paul Dumas, Steve Hogan, "MRF in commercial precision Optics Manufacturing," Optical Manufacturing and Testing III, Vol. 3782, pp. 80-91, 1999.