

자성 유체를 이용한 미세연마가공의 원리

김동우*(인하대 대학원 기계공학과), 신영재(한국기계연구원 지능형정밀기계연구부)
이응숙(한국기계연구원 지능형정밀기계연구부), 조명우(인하대 기계공학과)

The Principle of Magnetorheological finishing for a micro part

D. W. Kim(Mech. Eng. Dept., INHA Uni), Y. J. Shin, E. S. Lee(KIMM),
M. W. Cho(Mech. Eng. Dept., INHA Uni)

ABSTRACT

The Magnetorheological fluid has the properties that its viscosity has drastic 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 ate 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. Resonable calculated and experimental magnitudes of the material removal rate for glass polishing lends support the validity of the approach.

Key Words : Magnetorheological fluid, polishing(연마)

1. 서론

최근에 들어 광학, IT 및 의학 분야에 있어서 급속한 발전과 더불어 산업 전반에 걸쳐 소자나 부품의 미세화, 초정밀화 및 다기능화에 대한 요구가 높아지고 있다. 이에 따라, 초정밀 형상 부품의 수요가 급속히 증가하고 있긴 하지만 미세 부품 제작의 기술은 매우 높으며 이를 해결하고자 하는 기술 또한 그리 흔하지 않다. 이러한 마이크로 부품들은 3차원 형상을 가지고 있기 때문에 기존의 연마에서 사용하는 방법으로 가공하기가 무척 어려울 뿐만 아니라 연마 입자를 가공 면에 지속적이면서 안정적으로 공급하는 것이 힘들기 때문에 요구되는 수준의 표면 조도를 얻기가 어렵다. 특히 반도체 제조 장비인 스테퍼용 비구면 렌즈를 제외한 대부분의 비구면 렌즈는 기존의 구면 렌즈에 비해 훨씬 뛰어난 광학성능과 영상품질에도 불구하고 가공 난이도의 수준이 높

음에 따라 사용이 제한되어 있다. 오늘날 대부분의 제조업체는 비구면 렌즈용 연삭기라는 고정밀도의 값비싼 가공기를 사용하고 있으며, 폴리싱인 최종 마무리는 수 시간 또는 수일에 걸쳐 이루어지고 있다. 따라서 최근 고정밀도 비구면 렌즈를 효과적으로 가공하기 위한 연구가 미국, 일본을 비롯하여 활발하게 진행 중이다. 기존의 비구면 렌즈의 초정밀 연마 가공에서 발생되는 최소 가공부 형성, 연마 압력의 조절, 패드의 마멸, SSD(Sub Surface Damage), Micro Crack 등의 난점과 3차원의 미세 구조물 연마에 있어서 전자기적으로 유체의 농도를 조절함으로써 응력과 전단력을 변화시켜 표면에서의 가공력으로 활용하며 공구와 공작물의 접촉을 배제시켜 연마 표면의 품위를 높이고자 ER유체를 이용한 폴리싱 또는 자기유체(magnetorheological)유체를 이용한 연마가 시도 되었다. 본 논문에서는 MR유체를 이용하여 글래스 재료를 미세연마 하는데 있어서 MR유체

를 이용한 연마가공 원리와 MR 유체 및 추가적으로 공급되는 연마입자의 특성에 따른 물성과 거동에 대하여 설명하고 실험적으로 보이고자 한다.

2. 이론적 원리

2.1 MR 유체의 특성

MR' 유체는 기름이나 물과 같은 비자성 carrier fluid에 iron과 같은 자기장에 민감한 micro size의 자성물질이 혼합되어 떠다니는 혼탁액으로 자장이 부과되면 유동특성이 실시간으로 제어되는 스마트 재료의 하나이다. 이 입자들의 직경은 수 마이크로미터 정도이고 30내지 40 퍼센트 정도의 부피 비율로 포함되어 있는데 이 물질의 기본적인 특성은 적절한 자기장이 형성되면 Newtonian fluid 상태로부터 강한 반고체의 상태로 급속하게 변하게 되어 혼탁액의 점성과 항복응력을 수 배 정도 빠르게 증가하게 된다. MR 효과라 불리는 이런 특징들은 자기장이 형성되면 입자들은 자성을 띄게 되고 형성된 자기장과 같은 방향으로 chain과 같은 구조를 형성한다. 이 구조와 같은 미세 구조물은 전단률에 대한 저항을 높이게 되며 이런 특징을 이용하여 댐퍼, 클러치, 브레이크 등에 이용되는 것이다. 이러한 자성유체의 변화는 항복응력을 갖는 Bingham 소성체로 나타내어지며 식 (1)과 (2)같이 나타내어질 수 있다.

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

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

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

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

MRF에 이용되는 MR 유체를 생산하기 위하여 쓰이는 자기장에 민감한 입자들은 carbonyl iron(CI) 분말이다. 이 분말은 iron pentacarbonyl을 분해할 때 생산되며 구형의 거의 순수한 철이며 수용성 또는 비수용성 운반유체, 첨가제, 비자성의 연마입자, 그리고 자기장을 활용한다.^[1]

자성 유체를 이용한 polishing의 표준 슬러리에는 36 vol% 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 glycerol과 같은 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 유체가 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 이는 유체의 pH 농도를 떨어뜨리는 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]

2.2 MR 유체를 이용한 Polishing의 구조

MR Finishing(MRF)의 공정은 다음의 그림과 같이 일어나는데 전형적으로 0.04와 0.1 Pa·s(shear rate $800s^{-1}$)의 경우 40에서 100 cps)의 점성을 갖는 유체가 약 1.9m/s의 속도로 움직이는 vertical rotating wheel의 표면 위에 공급된다. 이 훨은 직경 180mm 구의 부분 정도이며 MR 유체의 띠가 자기장의 영향을 받는 훨의 면위에 공급이 되면서 유체의 점성은 수 밀리초 동안에 세 단위 이상 증가하여 Bingham plastic 유체가 된다. 이 MR유체는 자기장에 의해 훨의 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 wheel위의 그 부분으로 잡기게 되어 광학물질의 구경에 준하는 Polishing을 지속적으로 할 수 있게 된다. 이렇게 제거되는 interferometrically 하게 측정되는 작은 양을 "spot"이라고 부른다.

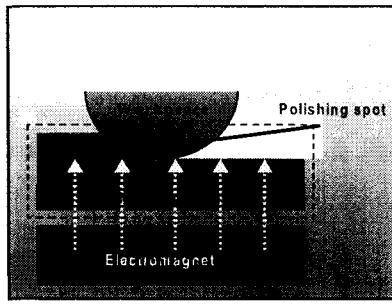


Fig.1 Schematic diagram of the mechanism for the MRF

2.2 MR 유체의 유동 특성

MRF는 회전하는 휠(moving wall)과 공작물의 표면사이에 형성되는 converging gap을 통과시 전자장에 의해 강성을 이루게 되는 자성 연마액체의 흐름의 상태가 된다. 이 유동은 유체 윤활의 기본적인 지배 방정식에 의하여 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \quad (3)$$

여기서 $\frac{\partial P}{\partial x}$ 와 τ_{xy} 는 압력 구배와 전단응력이다. 여기서 위의 식을 적분하면

$$\tau_{xy} = \frac{\partial P}{\partial x} y + C_1 \quad (4)$$

여기서 C_1 은 적분 상수이다. 식 (4)를 식(1)에 대입하고 적분하면

$$\frac{1}{2} \frac{\partial P}{\partial x} y^2 - \eta u \pm \tau_0(H)y + C_1 y + C_2 = 0 \quad (5)$$

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

경계조건인 $u=U(\text{at } y=0)$, $u=0(\text{at } y=h(x))$ 에 의하여 구해지는 적분상수 C_1 , C_2 를 식(4)에 대입하면

$$\tau_{xy} = \frac{\partial P}{\partial x} \left[y - \frac{h(x)}{2} \right] - \frac{\eta U}{h} - \tau_0(H) \quad (6)$$

이 된다. $h(x)$ 는 gap의 두께가 되며 U 는 wall velocity가 된다.^[3]

3. MR 유체를 이용한 Polishing 실험

3.1 실험 장치 및 실험 조건

Glass 가공을 위한 MR polishing 장치는 Fig. 2와 같이 나와 있으며 기초 가공 실험의 재질은 BK7을 사용하였고 Table 1에 BK7의 물성치를 나타내었다.



Fig.2 Photograph of the MR polishing process

Table 1 Physical properties of BK -7

material	structure	water solubility (g/100g)
BK-7	single-crystal cubic c-cut	0.0017
surface hardness(GPa)	young's module (GPa)	Fracture toughness
2.47	110	0.33

MR 유체를 이용한 연마 실험은 기초실험 단계로 standard한 MR 유체와 연마 입자 Al_2O_3 powder를 혼합한 DI water를 공급하고 가공물과 휠 사이의 간격은 0.5mm로 유지 시킨 후 휠의 스픈들은 150rpm 으로 고정시켰다. 전자장을 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 특성에 관하여 조사하였다. 밑의 Table에 MR 유체의 조성과 각 실험 조건표를 나타내었다.

Table 2 Composition properties of the MR fluids used for material removal experiment

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

Table 3 Experimental condition of Abrasive-DI water according to Vol(%) of Al_2O_3 (1um)

Abrasive Vol %	DI water Vol %
Al_2O_3 4.4 %	95.6 %
Al_2O_3 8.7 %	91.3 %
Al_2O_3 17.3 %	82.7 %

Table 4 Experimental condition of Abrasive-DI water according to Al_2O_3 particle size

Abrasive particle size (17.3 % Vol)		
0.005 um	0.3 um	1 um

3.2 실험 결과

각 실험 조건에 의하여 Polishing을 수행한 후 표면 조도 측정기(Veeco NT-1000)을 이용하여 다음 그림 Fig3에서 Fig.6에 나타낸 것처럼 연마된 면을 측정하였다.

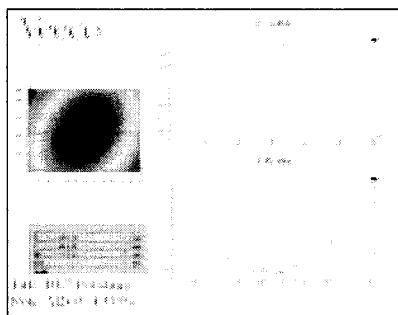


Fig.3 Surface contour plot of spot & 2D analysis(Al_2O_3 :Vol 4.335%)

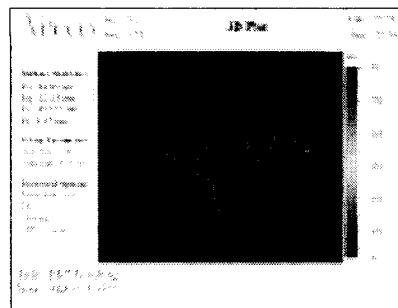


Fig.4 Measured surface roughness of spot (Al_2O_3 :Vol 4.335%)

각각의 실험 조건에 의하여 polishing된 BK7의 가공면에 대한 표면조도의 측정 결과는 아래의 그림 Fig.4와 Fig.5에 나타내었으며 실험 결과 알루미나 파우더의 사이즈가 1um의 경우 연마된 가공의 표면조도가 다른 particle size(0.3um, 0.05um)의 경우보다 훨씬 좋은 결과를 나타내었음을 알 수 있다. 또한 연마재의 함량이 17.34%인 경우 그 보다 적은 함량의 경우보다 우수한 표면 조도를 얻었다.

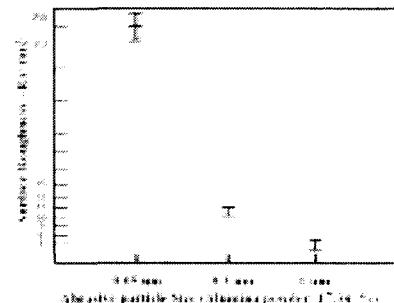


Fig.5 result of surface roughness according to abrasive particle size

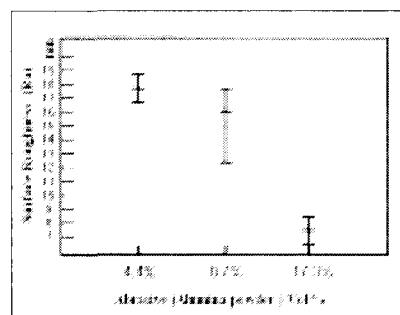


Fig.6 Effect of adding abrasive to MR polishing (Al_2O_3 Vol %)

4. 결 론

본 연구에서는 MR 유체를 이용한 Polishing의 원리를 밝히고자 하였다. 또한 MR 유체에 연마입자로 알루미나 파우더(Al_2O_3)를 사용하여 BK7에 평탄화 가공을 통하여 연마재의 함량과 particle size에 따라 표면조도가 변하는 것을 알 수 있었다. 특히 particle size 1um의 알루미나 파우더(Al_2O_3)를 17.3 Vol% 첨가하여 가공조건에서 연마를 하였을 경우 약 Ra 6nm 정도의 표면 조도를 얻음으로서 미세 부품 및 렌즈 연마에 대한 평탄화가 충분히 가능하리라는 것을 볼 수 있었다.

5. 참고 문헌

- [1] D.Golins et al., "MRF in commercial precision Optics Manufacturing," to be published in Optical Manufacturing and Testing III, edited by H.P. Stahl, Vol 3782
- [2] W.I Kordonski, S.Gorodkin,... US Patent 5,577,948
- [3] W.I Kordonski and S.D. Jacobs., "Magnetonreological Finishing", International J. of Modern Physics B, 10(1996) 2837