

## 자성유변연마의 컨디셔닝 기술

신영재\*, 이응숙(한국기계연구원), 김경웅(한국과학기술원 기계공학과),  
김영민(충남대학교 기계공학과)

### Conditioning of Magnetorheological finishing

Y. J. Shin, E. S. Lee(KIMM),  
M. W. Cho(Mech. Eng. Dept., KAIST) Y. M. Kim(Mech. Eng. Dept., Chungnam Univ.)

#### ABSTRACT

Magnetorheological finishing(MRF) is a newly developed and recently commercialized for finishing optical components. The magnetorheological fluid consists of a water based suspension of carbonyl iron, nonmagnetic polishing abrasives, and small amounts of stabilizer. This magnetorheological fluid is pumped from conditioner on the rotating wheel and suctioned back to the conditioner, where it cooled to setpoint temperature and evaporative losses are replaced. This method could produce some problems in suction. So newly designed MRF tools is proposed in which MR fluid is not circulated and conditioned by the slurry. The new polishing mechanism is experimented. Measured surface roughness supports the validity of this mechanism.

**Key Words** : Magnetorheological fluid(자기유변유체), Magnetorheological polishing(자기유변연마), Conditioning

#### 1. 서론

고정밀 광학부품을 연마하기 위하여 두 가지의 자기유변유체(magnetorheological fluid)가 자기유변연마(magnetorheological finishing)에 사용되고 있다. 수용성인 자기유변유체에 비자성체의 연마입자로 산화세륨을 함유한 조성은 거의 모든 연질 및 경질의 유리 및 저열팽창의 유리-세라믹들에 적용되고 있고, 비자성체의 연마입자로 나노 크기의 다이아몬드 입자를 사용한 두 번째 조성은 불화칼슘, IR 유리, 실리콘, 사파이어와 같은 경한 단결정과 실리콘 카바이드와 같은 아주 경한 다결정의 연마에 사용되고 있다. 자기유변연마의 다양한 재료로의 적용은 자기유변연마의 독특한 성격 때문에 가능하다. 즉 연마입자를 지지하는 자성입자는 가공물에 접촉하는 유연한 형태의 연마랩으로 생각할 수 있으며, 연마랩의 강도를 자성입자 농도 혹은 인가되는 자장 세기를 조절함으로써 증가시키거나 감소시킬 수 있다. 자기유변연마에 있어 비자성의 연마입자의 선택

은 종래의 피치(pitch)나 패드(pad) 연마보다 더 복잡하다. 연마입자의 경도와 화학적 요소가 가공물에 적절할 필요가 있으며, 연마입자의 형태(입자종양값의 크기, 표면의 화학적 상태)가 자기유변유체의 유변학적 특성에 크고 작은 영향을 주고 연마 중에 재료제거율을 일정하게 하기 위하여 자기유변(MR)유체의 특성을 일정하게 유지할 필요가 있다.

1998년에 QED Technologies사에서 STM (the spot-taking machine)이라고 하는 연마공구의 한 점에서 연마가 이루어지는 연마장치를 개발되었다. 이 장치의 개략도는 Fig.1과 같으며 자기유변유체를 순환시키는 위하여 펌프, 컨디셔닝을 위한 냉각장치, 휠 등으로 구성되어 있다. 자기유변유체가 휠에 의하여 전자석의 위 부분으로 오면 자기장에 의하여 자기유변유체의 점성이 증가되어 즉 연마랩으로 작용하는 형태를 취하고 있다. 이러한 장치로 구면 및 비구면을 연마하기 위해서는 4개의 이송축이 필요하고, 전자석에 의한 자장의 영향으로 흡입부가 막히는 현상이 발생되어 자기유변유체의 순환이 원활하

지 못하게 되는 단점이 발생한다. 본 연구에서는 Fig.2와 같은 자기유변유체 순환장치가 없는 형태로 개발하여 선반에 장착하여 연마를 수행할 수 있는 기구를 개발하였다. 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.

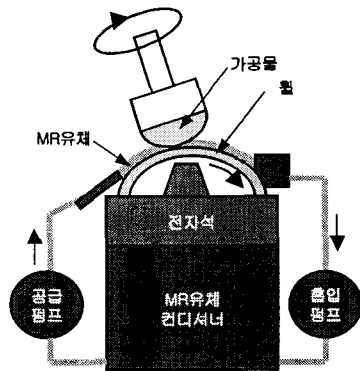


Fig.1 Schematic view of QED Technologies

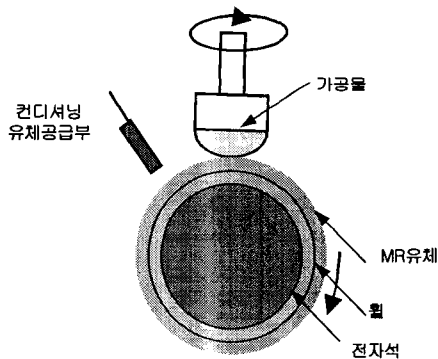


Fig.2 Schematic view of KIMM

## 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 30내지 40 퍼센트 정도의 부피 비율로 포함되어 있고 이 물질의 기본

적으로 뉴턴 유체 성질을 띠지만 자기장을 부과하면 분산 입자가 분극현상을 일으켜 부과된 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. 유동에 대한 저항력을 갖는 특성은 댐퍼, 클러치, 브레이크 등에 이용되고 전단력을 갖는 특성은 연마에 이용되고 있다.

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

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

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

여기서,  $\tau$ 는 전단 응력,  $\eta_0$ 는 소성 점도,  $\dot{\gamma}$ 는 전단속도,  $\tau_0(H)$ 는 자장에 의한 항복응력이다.

### 2.2 자기유변연마장치

Fig.2의 자기유변유체의 순환장치가 없는 자기유변연마장치는 Fig.3과 같고, 여기에 사용된 전자석의 구조는 Fig.4와 같다.



Fig.3 Photograph of the MR polishing process

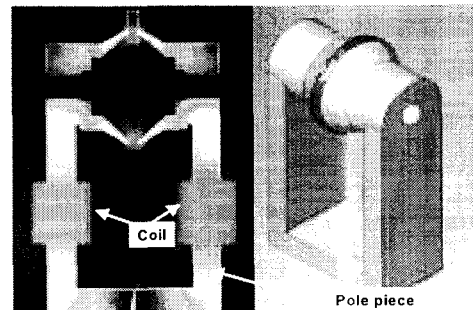


Fig.4 Structure of electromagnet

### 3. MR 유체를 이용한 Polishing 실험

#### 3.1 실험 조건

Fig.3의 자기유변연마장치의 휠에 부착된 자기유변유체의 컨디셔닝을 위하여 온도가 조절된 슬러리를 Fig.2에서와 같이 자기유변유체에 단위 시간당 일정량을 공급하는 방법을 사용하였다. 이와 같은 방식의 평가방법으로는 재료제거율, 표면 거칠기, 가공면적 혹은 체적이 있으나, 여기서는 표면 거칠기만을 측정하였다. 공작물로 광학유리인 BK7을 사용하였고 Table 1에 BK7의 물성치를 나타내었다. 자기유변유체에 사용된 카보닐철은 ISP사의 모델명이 R-2430이며 조성은 Table 2와 같다<sup>[1,2]</sup>. 연마재로는 알루미늄( $Al_2O_3$ )을 사용하였으며 조성은 Table 3, 4와 같다. Table 3은 평균입자경이 1  $\mu m$ 인 알루미늄의 농도를 변화시킨 것이며, Table 4는 알루미늄의 평균 입자경의 크기를 변화시킨 것이다. 각각의 조건에서 20분간 가공한 다음의 세척하여 표면 거칠기를 측정하였다.

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 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  $Al_2O_3$ (1 $\mu m$ )

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)		
0.05 $\mu m$	0.3 $\mu m$	1 $\mu m$

#### 3.2 실험 결과

표면 거칠기 측정기(Veeco사의 NT-1000)을 이용하여 측정결과를 Fig. 5 ~ 8에 나타내었다. Table 3에서의 알루미늄 농도가 4.4%에 대하여 폴리싱 자국의 최정점 부분의 형상을 측정한 결과를 Fig. 5에, 표면 거칠기를 Fig. 6에 나타내었다. Table 3의 조건에 대한 실험결과를 Fig. 7에, Table 4의 조건에 대한 결과는 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7을 보면 연마제인 알루미늄의 농도가 높을수록 표면 거칠기가 향상됨을 알 수 있다. Fig. 8을 보면 평균입자경이 크면 클수록 표면 거칠기 향상됨을 알 수 있다. 따라서 평균 입자경이 작으면 농도를 증가시킬 필요가 있음을 예측할 수 있다.

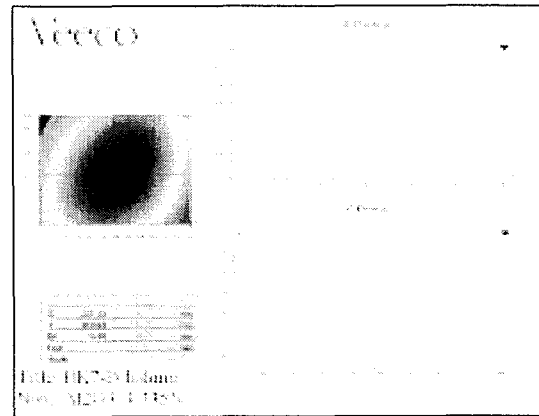


Fig.5 Surface contour plot of spot & 2D analysis( $Al_2O_3$  :Vol 4.335%)

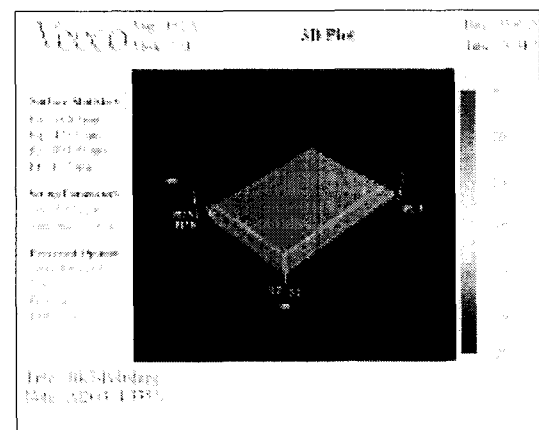


Fig.6 Measured surface roughness of spot ( $Al_2O_3$  :Vol 4.335%)

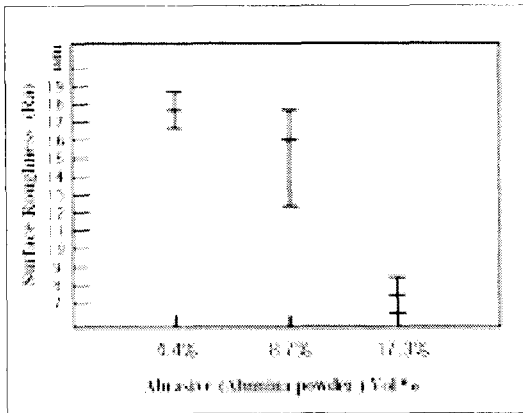


Fig.7 Effect of adding abrasive to MR polishing ( $Al_2O_3$  Vol %)

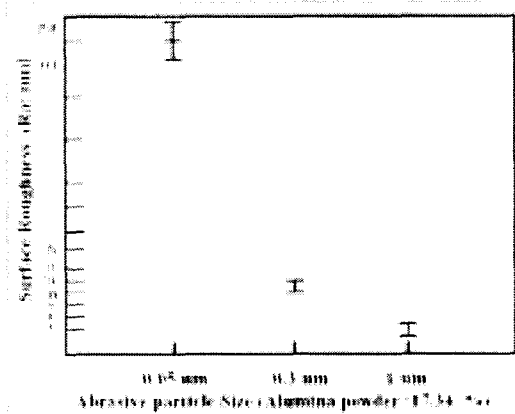


Fig.8 Result of surface roughness according to abrasive particle size

#### 4. 결론

본 연구에서는 슬러리를 통한 자기유변유체의 컨디셔닝에 의한 연마의 가능성을 밝히는 작업으로 기본적인 연구를 수행하였다. 실험조건별로 표면 거칠기의 분포가 일정하게 나오므로 이와 같은 방법이 유효함을 알 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