

ER 유체를 이용한 미세 3 차원 형상의 초정밀연마

김옥배*, 이상조**, 김용준**, 이웅숙***

Ultraprecision Polishing Technique for Micro 3-Dimensional Structures using ER Fluids

Wook-Bae Kim*, Sang-Jo Lee**, Yong-Jun Kim** and Eung-Sug Lee***

ABSTRACT

The ER fluid can be one of efficient materials in ultraprecision polishing for optics, ceramics and semiconductors because of electrically controllable apparent viscosity. To finish small 3 dimensional structures such as the aspherical surface in optical elements, the possible arrangement of a tool, workpiece and auxiliary electrode is described. We examined the influence of the addition of a few abrasive particles on the performance of the ER fluid by measuring yield stress, and observed the behavior of abrasive particles in the ER fluid by a CCD camera, which is also theoretically predicted from the electromechanical principles of particles. On the basis of the above results, the steady flow analysis around the rotating micro tool is worked out considering the non-uniform electric field. Finally, Pyrex glass is polished using the mixture of the ER fluid and abrasive particles, and the effect of the electric field strength is evaluated.

Key Words : Electrorheological fluid (ER 유체), Ultraprecision polishing (초정밀연마), Particle electromechanics (입자전기역학), 3-dimensional structure (3 차원구조물), Aspherical lens (비구면렌즈)

기호설명

E = electric field
 V = applied voltage
 r = radial position
 R_1, R_2 = radius of micro tool and outer electrode
 Ω = rotational speed of tool
 α, β = coefficients in approximation of yield stress
 ϵ = permittivity
 σ = conductivity
 η = viscosity

ρ = ER fluid density
 τ = shear stress
 ω = angular velocity of fluid

1. 서론

최근의 광학, 의료기기 분야에 있어서 소자나 부품의 미세화, 초정밀화에 대한 요구가 높다. 그러나 시장전반에서 급격하게 증가하는 수요에 비해 미세부품 제작기술의 난이도는 여전히 높으며 이를 극복하는 기술의 종류는 그리 흔하지 않다.

☞ 2002 년 6 월 27 일 접수
* 연세대학교 대학원
** 연세대학교 기계공학부
*** 한국기계연구원 정밀가공그룹

통상 MEMS 기술에 대한 기대가 높아진 반면에, 최근에는 기존의 기계가공기술을 통한 부품의 미세화에 대한 연구 역시 활성화되고 있는데 그 이유는 3 차원형태의 구조물 제작능력이 상대적으로 우수하고, 형상 및 표면에 있어서 부품의 품위가 높다는 점이 주된 이유라 할 수 있다. 특히 부가가치가 높은 금형 단품, 렌즈 등에서는 기존의 매크로한 가공에서와 마찬가지로 최종의 마무리 작업이 필요한데 이는 기술적으로 여러가지 어려움이 많다. 왜냐하면 3 차원적 형상을 가지는 미세한 부품의 표면의 다듬질은 통상의 폴리싱에서 사용하는 패드 혹은 블록을 제작하기 어렵고 설사 가능하다 하더라도 유효한 수의 연마 입자를 피가공면에 지속적, 안정적으로 공급하는 것 역시 거의 불가능하기 때문이다.

이와 같은 미세영역에서의 연마의 어려움을 극복하기 위한 방법으로서 전자기장을 활용하여 연마용 미립자를 제어할 수 있다. 서브미크론 규모의 연마입자 표면에 작용하는 전자기적 힘은 미세영역에서 입자의 운동을 제어하는데 적합하다. 전기영동(electrophoresis)을 이용한 평활면 연마가 그 대표적인 예이다^[1]. 최근에는 비구면렌즈와 같은 3 차원구조의 연마에 있어서는 전자기장 내에서 유체의 점도가 변화하는 ER/MR 유체를 사용하고자 하는 연구가 있었다^[2-4]. 즉 연마 미립자를 위 유체들에 첨가하여 사용하면 공구와 공작물간의 직접적인 접촉을 배제시켜 연마표면의 품위를 높이고 전자기적으로 유체의 점도 등의 물성을 제어하여 연마력으로 활용하고자 하는 개념이라 볼 수 있다. 그러나 자성유체를 이용한 연마의 경우 자기장을 효율적으로 구성하기가 비교적 어렵고 반자성(diamagnetic)의 성질을 가지는 연마입자가 자성이 집중되는 영역을 벗어나려는 경향(dimagnetophoresis or magnetic levitation)이 단점이 될 수있다고 생각된다^[5]. 한편 Kuriyagawa^[4] 등은 ER 유체(Electrorheological fluid)를 이용한 비구면 렌즈의 연마법을 제안하고 그 가능성을 최초로 제시하였으나 연마를 가능하게 하는 연마입자와 ER 유체의 역할에 대한 설명이 부족하였다. 본 논문에서는 불균일(non-uniform)한 형태의 전기장 하에서 ER 유체와 연마재의 거동을 설명하고 ER 유체의 유체역학적 거동을 기술하여 연마원리를 설명하고자 한다. 이를 위해 연마재 첨가가 ER 유체의 성능에 미치는 영향을 점도 변화를 통해서 시험하고, 연마

구조상에서 ER 유체와 연마재의 상태를 가시적으로 측정하였다. 또한 미세 공구로 인한 불균일 전기장이 미치는 ER 유체의 흐름특성을 기술하여 국부적인 연마 원리에 대해 설명하고자 하였다. 마지막으로, 설명한 방법에 의거하여 Pyrex glass 를 국부적으로 연마하고 그 결과에 대해서 보고하고자 한다.

2. ER 유체의 특성

ER 유체는 전도성이 매우 낮은 미립자가 높은 비저항을 갖는 절연액속에 분산되어 있는 상태의 물질 구성을 이루며 1~5 kV/mm 정도의 전기장 하에서 전기장의 방향으로 입자들이 나란히 배열하는 특성을 지닌다(Fig. 1 참조). 즉 전기장으로 인해 입자가 분극(polarization)을 일으키는데 마치 입자 하나가 막대자석처럼 되는 현상이라 할 수 있다. 이에 따라 입자들 간에 전기장의 방향으로 인력이 발생하여 전극사이에 체인구조를 형성하게 되는데 이를 ER 효과라 한다. 이러한 체인구조 혹은 사슬구조의 형태로 인해 유체의 흐름은 방해되고 겔보 기점도(apparent viscosity)는 크게 향상된다. 이러한 반응은 매우 빠르게 일어나며 동시에 가역적이다.

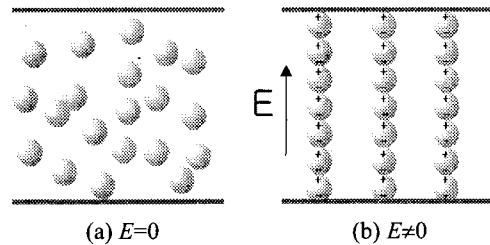


Fig. 1 The structure of particles in ER fluids

한편 ER 유체는 유체역학적으로 Newtonian fluid 와 구분되어 Bingham fluid 라고 불리는데 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$\tau = \tau_0(E) + \eta_p \dot{\gamma} \quad (1)$$

여기서 τ_0 는 항복응력으로서 전기장의 세기에 따라 증가한다. 즉 ER 유체에 전기장을 인가하면 Fig.1 에서와 같이 입자들의 전극간 사슬구조가 형성되는데 이것은 유동이 발생하는데 큰 저항으로 작용하며 그 대표값이 바로 항복응력이다. 한편 본 연구에서 사용한 ER 유체는 starch 입자가 실리

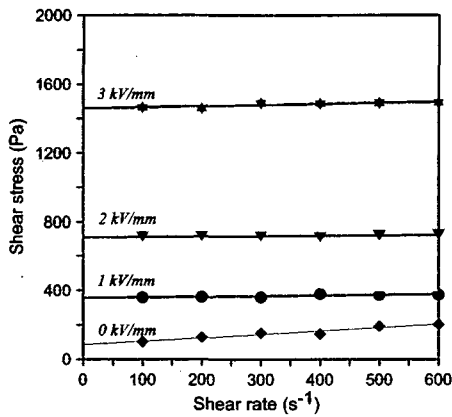
콘오일(silicone oil)에 분산된 것으로 입자의 평균 크기는 직경 10~15 μm 이며 실리콘 오일은 100cst 이다. Starch 입자가 실리콘 오일에 30wt% 첨가된 원통형 점도계를 이용하여 전단응력을 측정하고 Bingham model 로 근사하여 얻은 결과를 Fig. 2 에 제시하였다.

3. 연마입자와 ER 유체의 관계

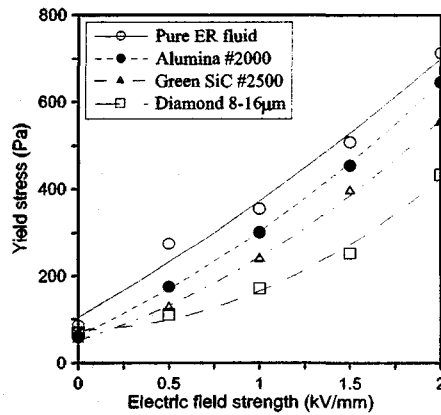
3.1 응력특성

일반적으로 유전체입자들은 전기장 내에서 입자의 유전율, 전도도 혹은 계면특성에 의해 분극을 일으키게 되는데 ER 입자들은 높은 분극특성을 보이고 입자간의 인력이 매우 강하게 발생한다. 연마재로 사용되는 알루미늄, 다이아몬드, 실리콘

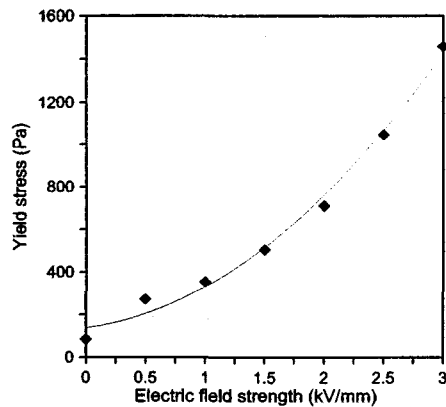
카바이드 등도 절연성 입자이므로 전기장내에서 분극하게 되는데, 알루미늄의 경우 미미한 ER 효과를 보이기도 한다. 그러나 대체로 단일 입자로 구성된 순수 ER 유체에 물성이 다른 입자가 첨가 되면 거시적인 응력특성이 저하된다. 즉 ER 유체를 연마 슬러리로 사용하고자할 때, 연마재를 별도로 포함시켜야하므로 이른바 연마재, ER 입자, 오일의 3 상(phase)의 시스템이 되고 그 때의 항복응력은 ER 입자와 오일로 구성된 ER 유체의 항복응력보다 작다. 순수 ER 유체에 알루미늄, 다이아몬드, 실리콘 카바이드를 소량 포함하였을 때 그 항복응력의 변화를 실험하여 Fig. 3 에 제시하였다. 각기 30wt%의 starch 가 첨가된 ER 유체에 4wt%의 연마 입자들을 첨가하였다. 전반적으로 ER 유체 고유의 항복응력이 저감되는데, 그 정도는 알루미



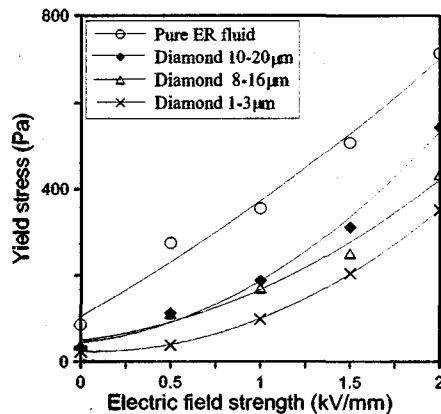
(a) Shear stress according to electric field strength



(a) Mixture of ER fluid and alumina, SiC, diamond



(b) yield stress of starch-based ER fluids



(b) Mixture of ER fluid & diamond having different size

Fig. 2 Results of induced stress measurement of ER fluid

Fig. 3 Yield stress of mixture of ER fluid & abrasives

나가 가장 낮고 다이아몬드가 가장 크다. 알루미늄의 경우 자체의 ER 효과를 생각해볼 때, 낮은 응력저하를 예측할 수 있다. 이론적으로 입자들의 전도도나 유전율 및 기타특징을 고려하여 예측하는 것은 지나치게 복잡하며 이를 각 물성의 추정을 통해 단순화하는 것은 무리가 따른다. Fig. 3(b)는 응력저감이 가장 큰 다이아몬드에 대해 그 크기를 달리하여 측정한 결과로서 입자의 크기가 작아질수록 항복응력이 작아짐을 알 수 있다. 이러한 결과는 연마재 크기가 작을수록 동일한 첨가질량에 대해 그 수가 많아지고, 작은 연마입자가 큰 ER 입자의 연결부위에 부착되어 입자간 인력을 저하시키는 것으로 생각된다.

3.2 입자들의 거동

앞 절에서 말한 바와 같이 연마 입자 역시 ER 유체가 작동하는 전기장의 크기 범위에서 적절한 힘을 받는다. 입자와 오일의 물성을 기준으로 살펴보면 입자의 전도도(σ_p)와 유전율(ϵ_p)이 오일의 그것(σ_o, ϵ_o)보다 큰 경우는 전기장의 방향에 따라 입자간의 인력 혹은 척력이 발생한다. 그 근원은 입자 안팎의 전위 분포(potential distribution)의 차이로 인하여 입자가 전기장내에서 역학적 힘을 받는 것으로서, 각 입자를 쌍극자(dipole)로 취급하면 입자간의힘을 다음처럼 근사할 수 있다.

$$F(R, \theta) = \frac{3}{16} \pi \epsilon_0 \epsilon_1 d^2 \beta^2 E^2 \left(\frac{d}{R} \right)^4 \times [(3 \cos^2 \theta - 1)e_r + \sin(2\theta)e_\theta] \quad (2)$$

여기서 ϵ_0 은 진공유전율, d 는 입자의 직경, β 는 $(\epsilon_p - \epsilon_o) / (\epsilon_p + 2\epsilon_o)$, R 은 입자중심간 거리, θ 는 전기장 방향과 두 입자의 중심간 직선이 이루는 각도이며 e_r, e_θ 는 2차원 좌표계의 단위벡터이다. θ 가 0에 가까우면 전기장 방향으로 $F > 0$ 이되어 인력이, θ 가 90도에 가까우면 $F < 0$ 이되어 척력이 발생한다. 식(2)는 같은 물성을 가진 입자끼리 해당되는 식이지만 비슷한 형태로 다른 물성을 갖는 입자에도 적용이 된다. 따라서 ER 유체내의 고유한 입자들과 첨가되는 연마입자의 거동은 전체적으로 Fig. 1과 같은 ER 입자끼리의 거동과 유사하다고 예측할 수 있다. 이를 증명하기 위하여 ER 유체내에 연마재를 첨가하고 전기장이 인가되었을 때의 두 입자들의 거동을 촬영하였고 그 사진을 Fig. 4에 제시

하였다. 그림에서 흰색 큰 입자가 ER 유체용 입자이며 군데군데 ER 입자에 결합되어있는 검은색 작은 입자들이 다이아몬드 연마재 #2000이다. 연마재들이 ER 유체의 입자들과 함께 전기장의 방향으로 사슬 기둥을 형성하고 있음을 알 수 있다. 이렇게 연마입자와 ER 유체입자의 결합력으로 인해서 서로 떨어지지 않으며 ER 유체의 항복응력이 높다면 두 입자의 결합력도 동시에 높아지게 됨을 유추할 수 있다.

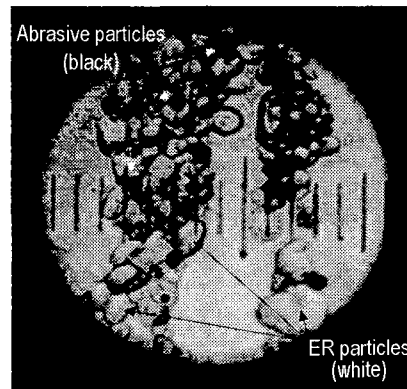


Fig. 4 Behavior of ER & abrasive particles under e-field

4. 가공구조와 ER 유체의 유동

4.1 가공구조

글래스를 비구면과 같은 표면형상에 따라 3차원적으로 연마하기 위한 구조를 Fig. 5에 나타내었다. 미세 공구를 한쪽 전극으로 하고 부가적인 전극을 설치하여 다른 전극으로 사용한다. ER 유체를 공급하고 전기장을 인가한 후에 공구가 회전하면 ER 유체 슬러리에 의해 공구하부가 연마된다. 부가전극의 형태는 Fig. 6과 같이 공구의 외곽에 원형으로 하였다. 전극을 원형으로 한 이유는 전기장을 공구쪽에 집중시키기 위한 것이다. 즉 공구로 집중되는 전기장에 의해 ER 입자와 연마재의 밀도가 공구측에서 가장 높아지고 특히 공구주변에 전기장의 세기가 가장 크게된다. 원형공구로부터 반경방향에 따른 전기장의 분포는

$$E = \frac{V}{\ln(R_2/R_1) r} \quad (3)$$

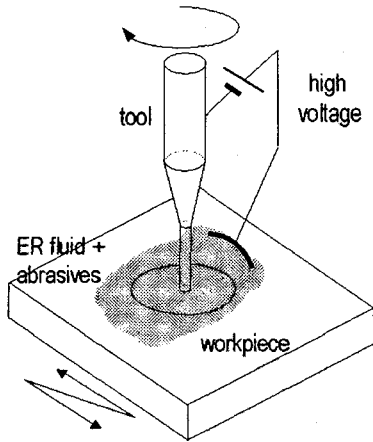


Fig. 5 The schematic of the polishing structure

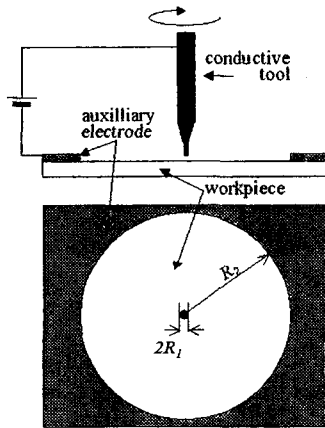


Fig. 6 The geometry of the tool and auxiliary electrode

와 같으므로 반경이 가장 작은 공구측에서 입자가 받는 전기적 힘이 공간상에서 상대적으로 가장 크게 된다.

전기장의 불균일한 특성에 따른 ER 유체의 물성의 공간적 차이는 다음절에서 그 응력특성을 기술하여 구체화할 수 있다.

4.2 ER 유체의 흐름특성

유체의 전단응력은 연마 입자가 표면에 전달하는 힘과 직접적인 연관이 있다. 항복응력이 크면 연마재를 통해 보다 큰 힘을 가공 표면에 전할 수 있을 것이다. 즉 공구주변에 집중된 전기장은 ER 유체의 항복응력을 최대화하게 되고 유동시 전단응력이 매우 커지므로 표면에 가해지는 마찰힘

도 커지게 되리라 생각한다. 즉 이를 위해 Fig. 5에 있어서 불균일 전기장에 의한 공구 회전시의 ER 유체와 연마재가 혼합된 슬러리의 정상 유동(steady flow)을 해석하고자 한다. 해석을 위하여 ER 유체와 연마재의 혼합 슬러리를 연속체, 비압축성, 등은 흐름을 사전에 가정한다. 단 유체의 반경방향에 따라서 해석을 행하되 공구끝단과 피연마 표면사이의 유막에서의 유동은 고려하지 않았다. 이는 공구의 직경이 작아짐에 따라 공구하부의 유동은 반경방향으로 공구 주변의 흐름상태와 동일시 될 수 있기 때문이다. 또한 ER 입자의 직경과 유막두께가 비슷한 규모이고 공구직경도 매우 작으므로 이러한 경우에서의 유체흐름은 전체적인 가공원리에 기여하는 바가 낮은데 비해 해석은 매우 복잡하다. 이러한 이유로 공구하단의 유체흐름은 해석대상에서 제외하였다.

연속 방정식과 운동방정식에 따라 동축 실린더 사이에서의 Bingham 유동은

$$\tau_{r\theta} = \tau_e \operatorname{sgn}\left(\frac{d\omega}{dr}\right) + \eta r \frac{d\omega}{dr} = \frac{T}{2\pi L r^2} \quad (4)$$

여기서, T 는 내부원통(공구)회전시의 인가토크이며 τ_e 는 항복응력이다. L 은 공구길이이다. L 은 토크에만 영향을 주며 유동장과는 상관이 없다. 한편 윗식에서 항복응력은 전기장 세기의 함수로 다음식과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau_e = \alpha E^\beta \quad (5)$$

여기서 α, β 는 실험상수이다. 이러한 항복응력의 전기장에 대한 지수적 비례 특성은 기존의 대다수 연구결과¹⁶⁻⁷⁾에 의한 일반적인 경향이며 Fig. 2(b), Fig. 3에서의 결과에서도 추정할 수 있다.

식(3),(4),(5)와 경계조건으로서 no-slip condition, $\alpha(R_1)=\Omega$ 및 $\alpha(R_2)=0$ 를 함께 고려하면 다음과 같이 반경방향에 따른 유동의 각속도와 전단응력을 구할 수 있다.

$$\eta\omega(r) = \frac{T}{4\pi L} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{r^2} \right) + \frac{\alpha}{\beta} \left[\frac{V}{\ln(R_2/R_1)} \right]^\beta \left(\frac{1}{R_1^\beta} - \frac{1}{r^\beta} \right) \quad (6)$$

여기서

$$T = \frac{4\pi L R_1^2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \left[-\tau \Omega - \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{V}{\ln(R_2/R_1)} \right)^\beta \left(\frac{1}{R_1^\beta} - \frac{1}{R_2^\beta} \right) \right] \quad (7)$$

가 되고 $\dot{\gamma} = r \partial \omega(r) / \partial r$ 이므로 식(6),(7)을 이용하여 전단율을 구할 수 있다. 따라서 전단응력은

$$\tau_{r\theta} = \frac{2R_1^2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \frac{1}{r^2} \left[-\tau \Omega - \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{V}{\ln(R_2/R_1)} \right)^\beta \left(\frac{1}{R_1^\beta} - \frac{1}{R_2^\beta} \right) \right] \quad (8)$$

3.1 절의 결과에서 ER 유체와 다이아몬드의 혼합슬러리의 항복응력 곡선을 추정하여 $\alpha=89, \beta=2$ 로 결정하고 $\Omega=2000\text{rpm}, R_1=0.05\text{mm}, R_2=0.75\text{mm}$ 로 하였을 때 Fig. 7 과 같이 결과를 도출할 수 있다.

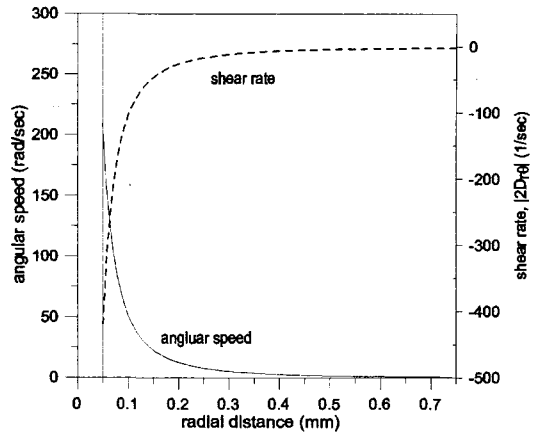
ER 유체와 연마재의 혼합 슬러리의 유동 속도와 전단율은 Fig. 7(a)에서 나타나는 바와 같이 회전공구축에서 빠르게 흐르고 전단율도 높다. 그 결과 Bingham body 로 모델링된 유체의 전단응력은 전기장의 세기에 따라 전단력이 일반적인 Newtonian fluid 와 달리 공구주변에서 큰 기울기로 상승함을 Fig. 7(b)를 통해서 알 수 있다. 언급한바와 같이 공구와 외부 원형전극에 의한 불균일 전기장으로 인해 ER 유체의 불균일 점도 상승효과는 공구주변에서 연마 입자에 큰 힘을 전달 할 수 있으므로 가공에 유효할 것이다.

Fig. 8 에, ER 유체에 연마 입자를 소량 첨가한 슬러리를 Fig. 6 에서 나타난 연마구조에 투입하고 하부에서 CCD camera 를 이용하여 촬영한 결과를 제시하였다. 가운데의 작은 원이 회전중인 직경 $100\mu\text{m}$ 의 미세공구이며 외곽의 원이 전극으로서 직경 1.5mm 이다. ER 입자들이 공구중심부를 향하여 체인형태를 구성하고 있으며 공구중심부에서 단연 입자 밀도가 매우 높음을 알 수 있다.

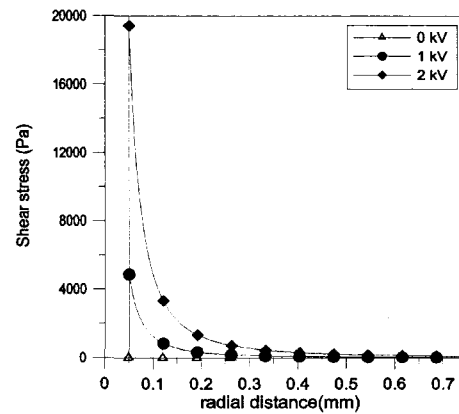
5. 연마실험

5.1 실험방법

Fig. 5 와 Fig. 6 에 나타난 가공구조에 의해 연마실험을 행하였다. 실험에 있어서는 ER 유체를 사용하여 글래스의 표면연마 성능여부를 검토하고, 가공속도, 전기장에 따른 연마능력의 차이가 있는 지에 대해 주안하여 검토하고자 하였다. 실험장치는 소형 xy 테이블 및 정밀스핀들을 부착한 $0.1\mu\text{m}$ 분해능의 z 축 이송장치로 구성되었으며, 실험조건



(a) Distribution of angular speed & shear rate



(b) Distribution of shear stress

Fig. 7 Solution of steady flow of the mixture of ER fluid and abrasive particles

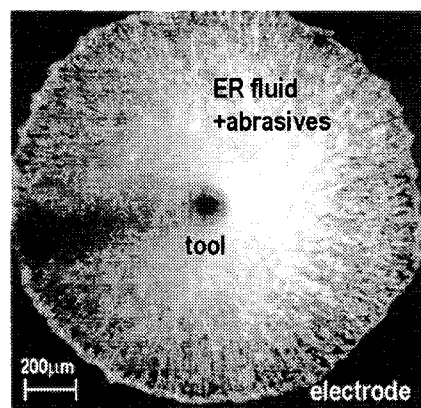


Fig. 8 Photograph of the mixture of the ERF and abrasive particles around the tool (rotating speed=1500rpm)

을 Table 1 에 요약하였다. 연마시에 미세공구를 움직임은 없으며 회전운동만 일어나게 하였다. 한편 연마재는 2 종을 사용하였는데 실제의 표면거칠기의 개선 여부를 파악하기위한 실험에서는 알루미늄나 $\phi 0.3\mu\text{m}$ 를 사용하고, 연마량(가공깊이)을 평가하기 위해서 다이아몬드 $\phi 1\mu\text{m}$ 을 사용하였다. 연마재의 종류에 따라 가공량의 차이도 존재하리라 생각되나 본 연구에서는 고려하지 않았다. 연마량은 surface profiler 로 가공 부위를 스캔하여 제거된 부위의 깊이를 측정하여 평가하고자 하였다.

Table 1 Experimental condition

ER fluid	starch-based 30wt% silicone oil 100cs
Abrasives	diamond $\phi 1\sim 3\text{mm}$ alumina $\phi 0.3\text{mm}$
Amount of abrasives	4wt%
Dia. of tool	100 μm
Dia. of auxiliary circular electrode	1.5mm
Thickness of auxiliary Circular electrode	45 μm
Rotation speed of tool	1500~2500rpm
Gap b.w. tool & workpiece	10 μm ~16min
Machining time	~2kV
Applied voltage	
Workpiece	Pyrex7740 (borosilicate)
hardness	418kgf/mm ²

5.2 실험결과

Fig. 9 에 다이아몬드 $\phi 1\mu\text{m}$ 을 ER 유체와 혼합한 슬러리를 이용하여 전기장의 세기에 따른 글래스 표면의 가공깊이를 표시하였다. 연마시간은 5분이다. 전기장의 강도가 증가할수록 가공깊이가 깊어져서 재료제거량이 높아지게 되는데 앞 절의 입자간 힘 및 유체 흐름에 있어서 예측한 바와 같이 전기장의 세기를 통해 재료제거량을 조절할 수 있음을 알 수 있다. 한편 공구와 표면의 간극도 중요한 변수인데, 간극이 작을수록 재료제거량이 많아진다. 그러나 간극이 연마입자보다 커야 경면 연마가 가능하며 그렇지 않으면 공구에 의한 래핑 효과가 나타나므로 바람직하지 않다. 그 외 회전 속도 등의 변수들도 영향을 미치는데 자세한 설명

은 생략한다.

Fig. 10 에 알루미늄나 $\phi 0.3\mu\text{m}$ 을 ER 유체와 혼합한 슬러리를 이용하여 연마를 실시한 표면을 AFM(Atomic Force Microscopy)을 이용하여 측정하였다. 가공조건은 2000rpm 으로 10 분간 연마하였다. 초기표면은 글래스를 SiC #8000 으로 래핑(lapping)하여 준비하였으며, 연마결과 1/10 에 가까운 표면조도의 향상을 볼 수 있었다.

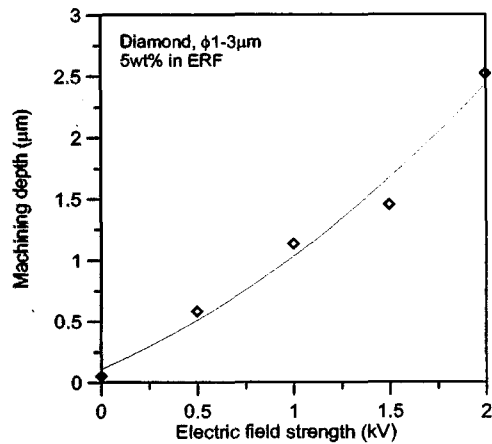
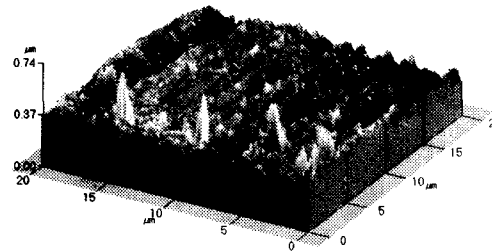
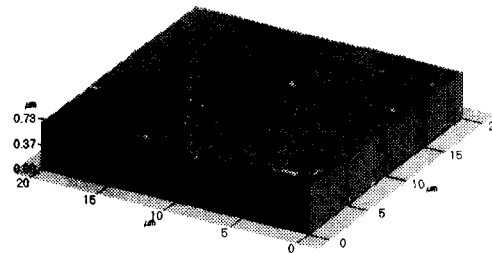


Fig. 9 Machined depth according to field strength



(a) Initial surface (Ra : 28nm, Rmax : 0.15 μm)



(b) Polished surface using ER fluid & 0.3 μm alumina (Ra : 3nm, Rmax : 18nm)

Fig. 10 Polished surface topography by AFM

이 결과를 통해 ER 유체를 이용한 미세연마방법이 유리등의 미세구조물의 연마에 매우 효율적임을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 ER 유체를 이용한 글래스의 미세영역 연마에 있어서 그 원리와 결과를 제시하였다.

연마 슬러리로서 ER 유체와 연마재 혼합물의 거시적인 점성을 평가하였으며 전기장 하에서의 입자거동에 대해 논하였다. 또한 미세공구에 의한 불균일전기장에서 ER 유체-연마재 혼합슬러리의 유동해석을 행하였고 연마결과를 제시하였다. 이 기술의 특징은 입자의 전기적 효과를 이용하여 초정밀 연마에 적용하고자 하는 연구로 특징지을 수 있으며 본 영역에 해당하는 기존의 연구와 비교해 볼 때, 방법과 원리가 상당히 다르다.

본 논문에서의 연구 결과를 통한 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 미세 연마에 있어서 ER 유체의 효용은 2 가지로 정리할 수 있다. 첫번째는 연마하고자 하는 영역에 지속적으로 연마 입자를 공급, 유지할 수 있다는 것인데, ER 입자들은 전기장의 방향으로 연마 입자에 대해 인력을 발생시켜 연마 입자가 ER 입자들과 접촉상태를 유지할 수 있고 마치 ER 입자인 것처럼 거동하기 때문에, 전도성 공구의 주변에서 연마입자가 지속적으로 위치할 수 있다. 두번째는 ER 유체의 항복응력이 증대될수록 연마 입자에 전달되는 힘이 커지게 되어 표면 연마 효율이 커지게 된다. 간단히 표현하면 ER 유체의 전기장에 따른 점성 가변 특성이 가공량의 제어를 가능하게 한다.

2. 미세공구를 이용한 연마방법은 필연적으로 불균일 전기장을 유발하게 되는데 이것은 자연히 ER 유체 응용에 있어서 유리한 조건이 된다. 미세공구주변에 직선형의 전극이나 본 연구에서처럼 원형의 전극을 배치하면 공구 주변으로 전기장이 집중되어 공구벽면과 하부에서 ER 유체의 물성이 극대화된다. 즉 입자들이 받는 힘이 공구측에서 멀어질수록 작아지고 공구측에 가까울수록 커진다. 특히 ER 입자와 연마재로 구성된 입자의 체인구조

가 미세공구로 집중되므로 공구주변에는 입자수의 밀도가 매우 높다.

본 연구에서 제시한 연마 방법은 3 차원 미세구조물의 연마방법 중에 한가지로서 비구면렌즈 등 각종의 유리나 세라믹스 소재로 제작되는 미세 부품의 최종 연마에 적용가능성이 많다고 생각된다. 특히 ER 유체에 대한 지속적인 연구와 높은 성능의 ER 효과가 일부 연구에서 보고되고 있는 것을 감안해 볼 때 미세연마에 있어서 활용성이 높을 것이다.

후 기

본 연구는 산업자원부 Milli-structure 생산기술개발사업에 의해 지원되었습니다.

참고문헌

1. J.Suzuki, T.Uematsu, T.Kurobe, N.Yasunaga, Electrophoresis-Polishing with A Partial Electrode Tool, 2nd Conference on Advance in Abrasive Technology, pp. 48-52, 1997.
2. N.Umehara, K.Kato, S.Mizuguchi, S.Nakamura, "Micro Surface Polishing Using Magnetic Fluid in Local Area," J. of JSPE, Vol. 60, No. 11, pp. 1606-1610, 1994.
3. W.I.Kordonski, S.D.Jacobs, "Magnetorheological Finishing," Proceedings of 5th International Conference on ER Fluids and MR suspensions, pp. 1-12, 1995.
4. T.Kuriyagawa, K.Syoji, "Development of ER fluid assisted machining for 3-D small parts," J. of JSPE, Vol. 65, No. 1, pp. 145-149, 1999.
5. T.B.Jones, Electromechanics of particles, Cambridge university press, pp. 181-216, 1995.
6. M.Parthasarathy, D.Klingenberg, "Electrorheology : mechanisms and models," Materials Science and Engineering, R17, pp. 57-103, 1996.
7. R.J.Atkin, S.Xiao, W.A.Bullough, "Effect of non-uniform field distribution on steady flows of an electro-rheological fluid," Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 86, pp. 119-132, 1999.