

ER유체를 이용한 미세연마의 원리

김옥배*(연세대 대학원 기계공학과), 이상조(연세대 기계공학과)

The principle of a electrorheological polishing for a small part

W. B. Kim, S. J. Lee(Mech. Eng. Dept., Yonsei Univ.)

ABSTRACT

Two decisive mechanisms of the electrorheological polishing for a small part(for example, a aspherical surface in a micro lens) are explained. Firstly, non-uniform electric field generated in the polishing structure increases a shear stress of ER fluids which is maximized dramatically near the tool, therefore, substrate adjacent to the tool can be removed effectively by mixed abrasives in the ER fluid. Secondly, abrasives in a non-uniform electric field are governed by the dielectrophoretic phenomena. Abrasives move toward the tool because the field gradient is highest near the tool and then abrasives are actively holded in that area. This phenomena is observed and evaluated by the optical measurement.

Key Words : Electrorheological fluid(ER유체), polishing(연마), non-uniform electric field(불균일 전기장), micro machining(미세가공)

1. 서론

최근의 광학, 의료기기 분야에 있어서 소자나 부품의 미세화, 초정밀화에 대한 요구가 높다. 그러나 시장전반에서 급격하게 증가하는 수요에 비해 미세 부품 제작기술의 난이도는 여전히 높으며 이를 극복하는 세계적인 선도기술은 그리 흔하지 않다. 통상 MEMS 기술에 대한 높은 기대와 함께 최근에는 기존의 기계가공기술을 통한 부품의 미세화에 대한 연구가 활성화되고 있는데 이는 3차원형태의 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 여러 가지 어려움이 많다. 왜냐하면 3차원적 형상을 가지는 미세한 부품의 표면의 다듬질은 통상의 폴리싱에서 사용하는 패드 혹은 블럭을 제작하기 어렵고 설사 가능하다 하더라도 유효한 수의 연마 입자를 피 가공면에 지속적, 안정적으로 공급하는 것 역시 거의 불가능하기 때문이다.

최근 몇 년간 초정밀 비구면렌즈와 같은 3차원형

태의 미세 구조물 연마에 있어서 ER유체(Electrorheological fluid)를 이용한 연마 혹은 자성유체(ferrofluid or MR fluid)를 이용한 연마법 등이 제안되었는데 둘 다 공구-공작물의 접촉을 배제시켜 연마 표면의 품위를 높이고, 또한 전자기적으로 유체의 응력을 제어하여 표면에서의 가공력으로 활용하고자 하는 개념에서 출발하였다. 그러나 자기연마의 경우, 비자성체인 연마제가 자계의 세기가 약한쪽으로 밀려나기 쉬워 좋지못하다. ER유체를 이용한 연마의 경우 그 고유한 원리 및 주된 변수 등에 대한 고찰이 밝혀진 바 없다. 본 논문에서는 ER유체를 이용하여 글래스 재료를 미세 연마하는데 있어서 ER유체 및 추가적으로 분산된 연마입자를 중심으로 가공구조 내에서의 발생 전기장 및 ER유체의 특성에 따른 물성과 거동, 또한 연마입자의 거동과 그 전기적 원리에 대해 설명하고 그것을 실험적으로 증명하고자 한다.

2. 이론적 해석

2.1 가공구조와 전기장의 분포

미세한 표면을 국소연마하기 위한 구조는 Fig.1

에 나타난바와 같다. ER유체에 전기장을 인가하는데 있어서 피연마재의 전도성 여부에 따라 틀려지겠으나 본 연구에서는 비전도성소재인 글래스를 연마하기 위한 구조이므로 전도성 미세공구와 부가적인 전극을 필요로한다. 전도성 공구가 회전하면 ER유체 슬러리의 흐름으로 공구하부가 연마된다. 이 때의 전기장의 분포를 결정하기 위해서 전극과 공구의 형상이 동축 실린더와 같은 형태로 구성하고(Fig.2참조), 공구가 외부의 원형 전극에 대해 중심에서 운동한다고 하면 전기장의 분포는

$$E = \frac{V}{\ln(R_2/R_1)} \frac{1}{r} \quad (1)$$

와같고, 여기서 R_1 , R_2 는 각기 공구, 외부전극의 반경이며, E , V 는 전기장과 인가전압, r 은 공구를 원점으로 했을때의 반경방향의 거리이다. 이와같은 근사는 공구의 궤적이 대체적으로 외부의 원형전극의 중심부에 머물기 때문에 동축실린더의 전기장에서와 거의 일치한다. 식 (1)에서 나타난 바와같이 전기장은 반경방향 거리에 따라 변화하는 불균일 특성을 지니는데 이것은 ER유체 연마가 가능한 근원적 이유가 된다.

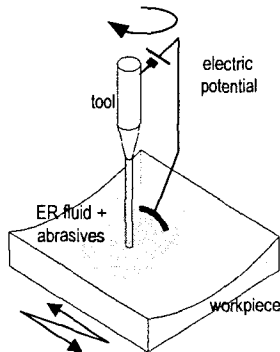


Fig. 1 The schematic of the polishing structure

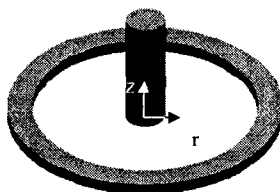


Fig. 2 The geometry of the tool and auxiliary electrode

2.2 ER유체의 흐름 특성

유체의 전단응력은 연마 입자가 표면에 전달하는 힘과 직접적인 연관이 있다. 큰 유체응력은 연마재

를 통해 큰 힘을 가공 표면에 전할수 있을 것이다. 본 연구에서와 같이 흐름 공간 내에서 반경방향에 따라 전기장의 변화가 크고 내부 실린더의 반경이 작은 경우는 물성도 공간상의 위치에 따라 매우 해가 달라지게 된다. 직관적으로 예측할 수 있는바와 같이 공구주변에서의 큰 전기장은 유체 응력의 최대화로 나타날 것이다.

단 ER유체의 흐름해를 구하는데 있어서 연속체 가정에 대한 논의나 자세한 기술은 생략하고자한다. 이는 보다 근원적인 문제이며, 본 연구에서처럼 입자의 크기에 비해 전극의 간극이 충분히 크다면 연속체 가정은 비교적 합당하다. 따라서 흐름에 의한 전단응력은 연마 입자에 유체 흐름시의 속도와 힘을 전달할 것으로 생각할 수 있다. 흐름의 기하적 상황은 Fig. 2와 같으며 내부 공구가 회전하거나 외부 전극과 연마표면이 회전할 수도 있다. 이 때의 전단 흐름(Couette flow)에서의 정상 해를 구하고자 한다. 물론 여기서는 ER유체에 대해 비압축성(incompressible), 등온(isothermal), 정상층류유동(steady laminar flow), 유체의 표면과의 마찰에 의한 손실등은 없음을 사전에 가정한다. 연속 방정식과 운동방정식을 총합규약에 의거하여 표기하면

$$\nabla \cdot v = 0, \quad \rho v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

여기서, ρ 는 유체밀도, v 는 유체속도, p 는 압력이다. Bingham 유체에 대한 응력성분 τ_{ij} 는 다음처럼

$$\tau_{ij} = \begin{cases} \left(\frac{\tau_e}{\dot{\gamma}} + 2\mu \right) e_{ij} & \text{for } \dot{\gamma} > \tau_e \\ 0 & \text{for } \dot{\gamma} < \tau_e \end{cases} \quad (3)$$

여기서 e_{ij} 는 전단율 성분, $\dot{\gamma}$ 는 전단율의 절대치, μ 는 절대점도이며 τ_e 는 ER유체의 항복응력이다.

윗 식을 원통형좌표계(cylindrical coord.)로 전환하고, ER유체에서 일반적인 전기장-항복응력 관계식

$$\tau_e = \alpha E^\beta \quad (4)$$

여기서 α 와 β 는 ER유체고유상수이다. 위 (2)-(4)식을 활용하여 내부 공구가 Ω 의 속도로 회전할때에 대해 정리하고 최종적인 전단응력식만 나타내면.

$$\tau_{r\theta} = \frac{2R_1^2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \frac{1}{r^2} \times \left[-\mu\Omega - \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{V}{\ln(R_2/R_1)} \right)^\beta \left(\frac{1}{R_1^\beta} - \frac{1}{R_2^\beta} \right) \right] \quad (5)$$

Fig. 3에 대체적으로 1kV/mm에서 500Pa정도가 되는 ER유체의 응력특성을 도시하였는데, 응력의 분포는 공구쪽으로 갈수록 급격히 높아짐을 알 수 있다. 이것은 R_1, R_2 사이 간격만큼의 균일전기장일 때보다 훨씬 크며 Newtonian 거동을 하는 유체와 지수적으로 유사한 거동을 보이나 그 크기는 그림에 나타난 바와같이 매우 다름을 알 수 있다.

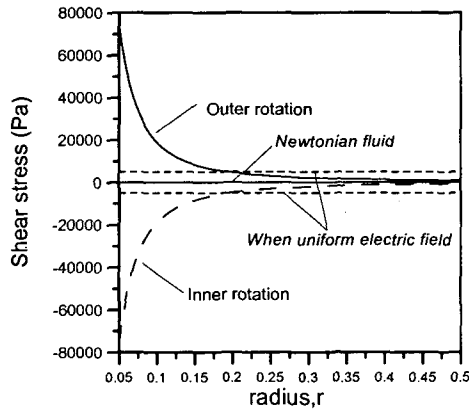


Fig. 3 Variation of a shear stress according to the radial location

2.3 연마입자의 거동: Dielectrophoresis

연마 입자는 공구의 궤적을 따라 집중적으로 분포해야 한다. 즉 공구주변에 높은 밀도를 가지고 존재해야 국부적인 미세 연마가 가능하다. 물론 언급한 바대로 공구의 중심을 기준으로 ER유체의 전단 응력이 큰 변화를 일으키기 때문에 연마재가 유체 내에 균일하게 분포한다고 하더라도 원하는 표면을 연마할 수는 있을 것이라 생각한다. 그러나 연마 입자 역시 어떤 경향성의 힘을 받을 수 있으며 본 연구에서와 같은 정도의 불균일 전기장 하에서는 dielectrophoresis가 발생한다. Dielectrophoresis란 불균일 전기장에서 분극 효과에 의하여 발생하는 것으로 전기적으로 중성인 입자의 병진 운동을 일컫는다 (Fig.4)

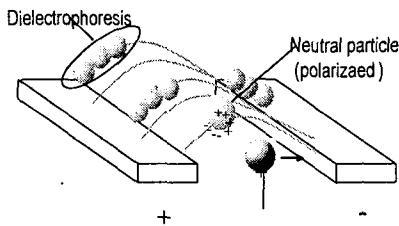


Fig. 4 Dielectrophoretic phenomena

즉 입자의 충전하가 존재한다면 전기장이 균일하건, 불균일하건 전기장의 힘을 받게되지만, 충전하가 0인 중성입자의 경우는 불균일 전기장에서만 힘을 받게된다. 이 힘의 방향과 크기는 전기장의 동작 주파수에서 유효 분극의 부호에 따라 결정된다. 즉 입자와 액체의 전기적 유전율과 전도도에 의해 결정되며 다음과 같다.

$$F_{DEP} = 2\pi R^3 \epsilon_f \text{Re} \left[\frac{\sigma_p^* - \sigma_f^*}{\sigma_p^* + \sigma_f^*} \right] \nabla |E|^2 \quad (6)$$

여기서 $\sigma^* = \sigma + j\omega\epsilon$ 이며 재료의 복소전도도(complex conductivity)이다. 또한 ω 는 인가전기장의 주파수, ϵ_f 는 액체의 유전율, 그리고 전기장 ∇E 는 전극과 절연체의 구조에 따라 결정되는 전기장 구배이다.

통상 연마입자로 사용되는 다이아몬드, 실리카 나노입자, 실리카 등과 ER유체의 연속상 물질로 사용되는 실리콘오일은 입자가 오일에 비해 전도도도가 모두 높으므로 D.C 전기장 하에서는 위의 dielectrophoresis를 일으킬 수 있으며 이것은 전기장의 세기가 높은 공구 주변으로 연마재를 집중시킬 것이다.

3. 실험

이론적 예측을 검증하기 위하여 광학적 방법을 이용하여 유체와 입자의 거동을 확인하고자 하였다. 그 방법은 Fig. 5에 나타낸바와 같이 가공구조와 동일한 상태에서 글래스 시편의 하부에서 CCD 혹은 고속디지털카메라를 이용하여 촬영하였다. 글래스 시편은 Pyrex이며 이에 부착된 전극은 직경이 1.5mm, 두께는 45 μ m이다. 공구의 끝단 직경은 100 μ m이다.

연마입자는 다수를 테스트하였으나 본 논문에서

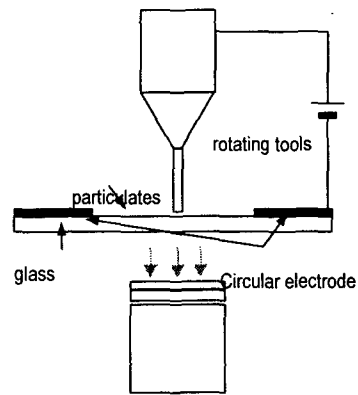


Fig. 5 The schematic of the optical measurement of the behavior of electrorheological slurry

는 다이아몬드와 실리콘카바이드의 결과만 제시하였다. 그 크기는 시각적인 효율성을 위해 다이아몬드는 직경10-20 μm , 실리콘카바이드는 #600(공구회전시)와 #2500(공구정지시)를 사용하였다. 사용되는 ER유체의 입자는 직경 2-4 μm 사이로 연마재에 비해 작다.

먼저 Fig. 6,7에 연마입자 2가지와 실리콘오일을 혼합하여 정적인 상태(공구의 움직임이 없는)의 촬영결과를 제시하였다. dielectrophoresis에 관한 이론에서 예측한바대로 전기장을 인가하면 자유롭게 분산되어있던 입자는 공구쪽에 집중됨을 볼수가 있는데 다이아몬드의 경우 그 집중 밀도가 더 높다.

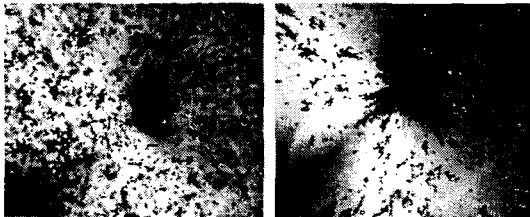


Fig. 6 Transitional motion of diamond particles as the electric field is supplied (from left to right)

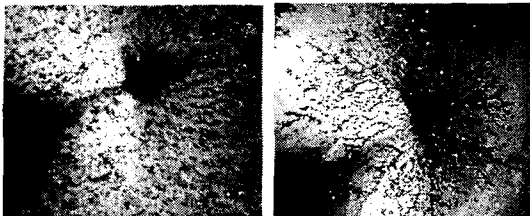


Fig. 7 Transitional motion of SiC particles as the electric field is supplied (from left to right)

다음으로 Fig. 8,9에 ER유체와 연마입자를 섞은 슬러리를 투입하고 공구를 회전할때의 촬영결과이다. 다이아몬드와 ER유체의 혼합물은 다이아몬드입자가 공구 주변에 모여있는것이 뚜렷하게 보인다. 이는 회전속도에 상관없이 전기장을 인가한 후 시간이 흐름에 따라 입자의 집중은 점점 두드러지는 결과를 보인다. 실리콘카바이드의 경우는 입자의 집중 현상이 Fig. 7에서 나타난것처럼 다이아몬드보다 다소 약하다. Fig. 8,9에서 공구회전속도의 차이가 다소 있으나 실제의 연마입자 거동과는 무관하다.

4. 결론

본 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 설계한 전극-공구 배치하에서 발생하는 불균일 전기장은 ER유체의 전단응력을 반경에 따라 다르게 하고 공구주변에서 최대로 된다. 이것은 공구의 궤적에 따라 표면을 연마하는 힘이 될 수 있다.

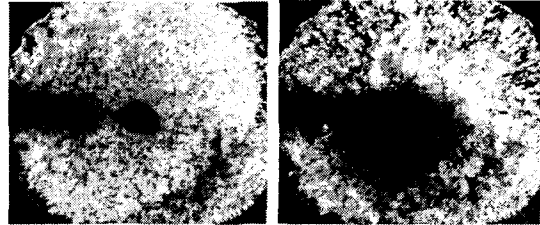


Fig. 8 Behavior of diamond particles in the ER fluid when the tool rotates (left: without electric field, right: with electric field)

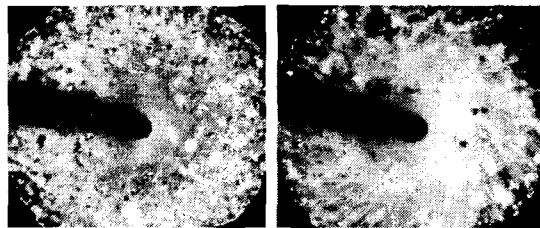


Fig. 9 Behavior of SiC particles in the ER fluid when the tool rotates (left: without electric field, right: with electric field)

2. 불균일 전기장에서의 dielectrophoresis에 연마재가 공구주변에 집중되게 한다. 이는 연마하고자 하는 미세한 영역에 연마 입자를 지속적으로 유지하게 할 수 있으므로 매우 중요한 의미를 갖는다.

3. 위의 두가지 원리, 즉 불균일전기장에서의 electrorheological effect와 dielectrophoretic effect가 복합적으로 작용하여 ER유체를 이용한 미세연마가 이루어 지게된다.

본 논문에서 제시하지는 않았으나 설명한 원리에 따라 실제 표면을 연마할 때, 다이아몬드 1-2 μm 을 사용한 경우 현재 분당 0.7 μm 의 가공깊이와 Ra 20nm 정도의 연마량을 보인다.

참고문헌

1. W.B.Kim and S.J.Lee, Characteristics of Electrorheological fluid assisted machining, 4th Conference on Advances in Abrasive Technology, 2001, pp.324-331, 2001
2. M.Parthasarathy and D.J.Klingenberg, "Electrorheology-mechanisms and models", Materials Science and Engineering, R17, 57-103, 1996
3. T.Kuriyagawa, K.Syoji, "Development of ER fluid assisted machining for 3-D small parts", J. of JSPE, V.65, N.1, pp. 145-149, 1999
4. H.A.Pohl, Some Effects of Nonuniform Fields on Dielectrics, Journal Applied Physics, V.29, 1958, pp.1182-1188