

연마입자의 전기적 분극성을 이용한 초정밀연마기술.

이승환*, 김옥배(연세대 대학원), 이상조(연세대 기계공학과)

Ultraprecision polishing for micro parts using electric polarization effect of abrasive particles.

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

ABSTRACT

New polishing technique for small parts has been tried out using the principle of particle electromechanics. Common fine abrasives such as alumina, diamond, silicon carbide are dielectric materials which are polarized under an electric field, and a non-uniform electric field makes abrasive particles translate along the field line. Using this principle, We make abrasive particles aggregate in the vicinity of the micro tool which is for the surface finishing of a small part without contact with it. The behavior of particles is optically measured, and the machined depth of glass is examined.

Key Words : Polarization effect(분극효과), Dielectrophoretic force(유전체 힘), Ultraprecision polishing(초정밀연마), Fine abrasive process(입자연마)

1. 서론

현재에 기계가공 기술의 화두로 대두된 각종 기계부품 생산기술의 미세화, 초정밀화에 맞추어 기존의 가공기술이 micro, sub-micro machining 기술로 대체 되어가고 있는 추세이다. 그러나, 이러한 micro machining 기술은 micro, sub-micro 크기의 미세 구조물을 가공해야 하므로 제작하고자 하는 제품의 정밀한 가공기술의 확보와 고품위의 표면을 얻는데 많은 기술적 어려움을 겪고 있으며 점차 개선되고 있다. 최근 고품위의 표면을 얻기 위한 초정밀 연마 중 기계적 제거가공과 화학적 제거가공을 하나의 가공 방법으로 혼합한 CMP 공정과 다이아몬드 스톨이나 주철본드 스톨들을 전해 방식으로 드레싱하는 ELID 연삭법, ER(electro-rheology)유체나 MR(magnetic-rheology)유체 등 기능성 유체를 이용한 초정밀연마방법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 기능성 유체에서 사용되는 연마입자에 전기장을 걸어주었을 때 연마입자 내에서 발생하는 분극효과에 의해서 연마입자들은 더 강한 전기장 밀도를 갖는 곳으로 이동하게 되는데 이를 DEP(Dielectrophoresis) 유전체 이동현상이라 한다. 인가된 전기장에 의해 분극된 연마입자들은 전하의 양에 의존하며 균일한 전기장보다 불균일한 전기장 내에서 전기장의 밀도가 높은 지역으로 이

동하는 경향성을 보인다. 본 연구에서는 이러한 유전체 이동현상을 이용하여 연마에 사용되는 공구 주변으로 연마입자들이 응집됨을 관찰하였으며 현재의 생산기술에서 요구된 미세부품의 초정밀 연마 기술에 접목시켜 연마입자들의 거동 및 원리에 대해서 설명하고 실험적으로 증명하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 Dielectrophoresis

H.A.Pohl 에 의해서 분극의 힘에 의한 대전되지 않은 유전체 입자들에 걸리는 힘을 DEP 라 정의하며 전기장이 불균일 할 때만 힘을 받는다. 전기장의 극성에 의존하지 않은 Dielectrophoretic force 는 AC/DC 의 전기장을 걸어주었을 때 관찰된다. 연마입자의 유전율을 ϵ_2 라 하고 연마입자를 포함한 용매의 유전율을 ϵ_1 라 했을 때 만약 $\epsilon_2 > \epsilon_1$ 일 때 입자들은 가장 센 전기장 쪽으로 끌려가고 가장 약한 쪽으로 밀려난다. 만약 $\epsilon_2 < \epsilon_1$ 일 때 입자들은 가장 약한 전기장 쪽으로 끌려가고 가장 센 쪽에서 밀려난다. 위의 경우를 positive DEP effect 라 하고 아래의 경우를 negative DEP effect 라 한다.

- particles exhibiting +DEP effect
- particles exhibiting -DEP effect

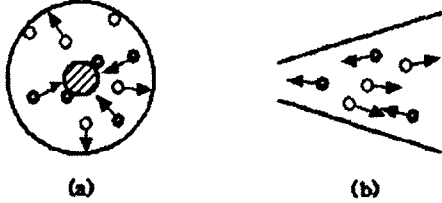


Fig. 1 Positive & negative dielectrophoretic effects in different electrodes.

위 Fig. 1 에서 (a)는 동심원 원통형 전극이고 유전체 입자들이 받는 힘과 전기장의 방향이 평행이며 (b)는 평행하지 않은 판 모양의 전극으로 유전체 입자와 전기장의 방향이 수직이다. 이를 통해 연마입자와 연마입자를 포함한 용매의 유전율과 전극의 형태로 연마입자에 거동을 제어할 수 있고 위 Fig. 1 (a)에서 +DEP 현상을 일으키는 조건으로 연마입자들을 응집시켜 이를 연마에 이용할 수 있다.

2.2 연마입자들의 거동

본 연구에서 쓰이는 연마입자들이 받는 힘 즉, Dielectrophoretic force 는 다음의 식으로 표현된다.

$$F_{DEP} = 2\pi\epsilon_1 R_0^3 \left(\frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} \right) \nabla E_0^2 \quad (1)$$

$$\left(\frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} \right) = K : \text{Clausius - Mossotti function} \quad (2)$$

$$E_0 = \frac{V}{\ln(R_2 / R_1) r} \quad (3)$$

위 식(1)은 연마입자가 포함된 매개체 안에서 연마입자에 의한 DEP 현상의 효과를 나타낸다. 위 식에서 연마입자들이 받는 힘은 입자의 부피에 비례하고 연마입자가 포함된 매개체의 유전율에 비례하며 연마입자의 거동은 2.1 절에서 설명하였듯이 K(Clausius - Mossotti function)의 크기와 기호 (+/-)에 의존함을 알 수 있다. 특히, 식(3)은 DEP force 에서의 전기장을 나타내며 Fig. 2 를 참조하여 R_1 , R_2 는 각각 공구, 외부전극의 반경이며, E_0 , V 는 전기장과 인가된 전압이며 r 은 공구를 원점으로 하였을 때의 반경방향의 거리이다. 이러한 전

기장은 반경방향 거리에 따라 변화하는 불균일 특성을 지니고 있으며 연마입자들이 공구주변으로 응집하는 근원적 이유이다.

3. 실험 및 결과

3.1 실험장치 및 방법

실험은 500 μm Pyrex glass 시편 위에 두께 45 μm , 직경 1.5mm 의 Si 전극을 설치한 시편을 제작하였고 다음 Fig. 2 과 같은 가공구조로 Pyrex glass 시편 가공하였다. 시편 위의 전극과 공구에 AC/DC 전원을 공급하여 AC/DC 전원을 주었을 때의 연마입자들의 거동을 살펴보고 연마재 별 가공량을 측정하였으며 이러한 결과를 바탕으로 최적의 표면품위를 갖는 연마조건을 찾아 실제 Pyrex glass 시편을 연마하였다.

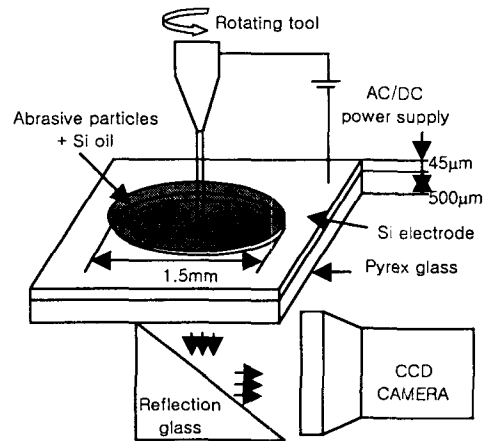


Fig. 2 The schematic of the optical measurement and experimental condition.

3.2 연마입자의 거동 관찰

DEP 현상에 관한 이론과 같이 실제 연마 입자들의 거동을 보이는지 CCD 카메라를 이용하여 관찰하였다. 이러한 현상을 Fig. 2 와 같이 반사 거울을 통해서 연마입자 별로 거동을 살펴보았다. 본 실험에서는 연마입자로 알루미늄, 다이아몬드, 실리콘 카바이드를 사용하여 AC/DC 전압을 주었을 때, 각 전압에서 전압을 올렸을 때, 공구주변에서 연마입자의 거동을 살펴보았다.

다음의 사진들은 연마입자를 실리콘 오일에 3 wt% 첨가하여 실제 연마입자의 거동을 CCD 카메라로 찍은 사진들이다.

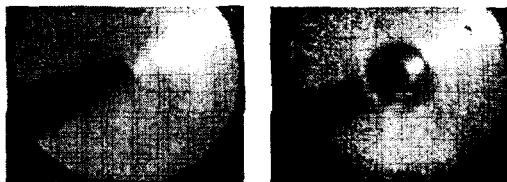


(a)0kV (b)0.5kV

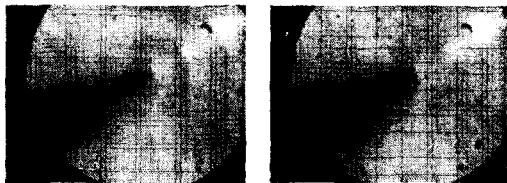


(c)1kV (d)1.5kV

Fig. 3 Al₂O₃ abrasive particles behavior by AC electric field.

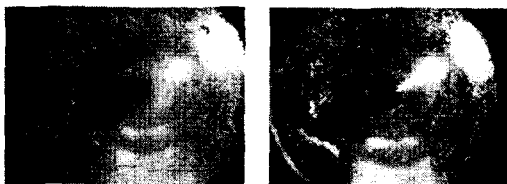


(a)0kV (b)0.5kV



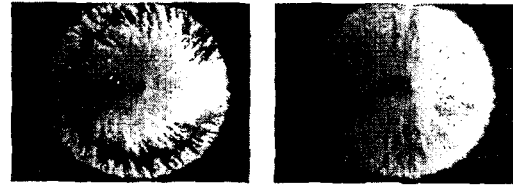
(c)1kV (d)1.5kV

Fig. 4 Al₂O₃ abrasive particles behavior by DC electric field.



(a)AC 1kV (b)DC 1kV

Fig. 5 Diamond abrasive particles behavior by electric field.



(a)AC 1kV (b)DC 1kV

Fig. 6 SiC abrasive particles behavior by electric field.

위 그림들을 통해 연마입자들은 같은 조건을 주었을 때 DC 전압을 주었을 때보다 AC 전압일 때 전압을 올려주었을 때 연마입자들이 공구 쪽으로 더 많이 모이는 현상이 관찰되었고 인가전압을 상승시켰을 때도 같은 현상을 보였다.

3.3 연마의 가공량

지금까지 각각의 연마입자와 실리콘오일의 혼합 용액에서 연마입자의 거동을 살펴보고 다음으로 이러한 Dielectrophoretic force 를 이용해 최적의 연마 조건을 알아보기 위해서 위 절에서 살펴본 3 가지의 연마재를 사용해 연마재 별로 가공량을 알아보았다.

Table 1. Experimental conditions

Gap (μm)	20
Abrasive Particles (wt%)	10
Time (min)	5
Voltage (kV)	0~3

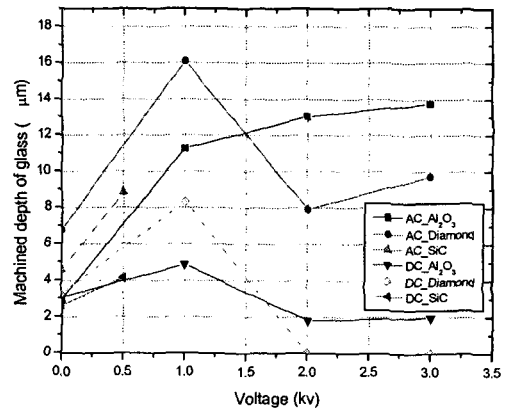
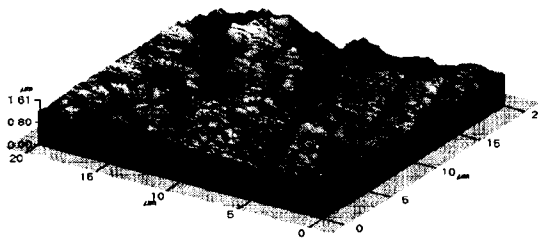


Fig. 7 Diagram of machined depth of glass by voltage

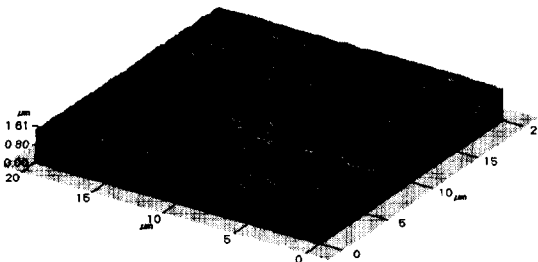
위의 Table 1 에 가공량 평가를 위한 조건들을 나타내었고 Fig. 7 은 각각의 연마재를 AC/DC 전압을 주었을 때와 각 전압에서 전압의 크기에 변화를 주었을 때 Pyrex glass 시편의 가공 깊이를 측정하여 나타내었다. 3.2 절에서 관찰한 연마입자들의 거동에서 전압이 높아짐에 따라 공구주변으로 연마입자들의 밀도가 높아지고 다른 조건들은 변화하지 않는 상태에서 인가된 전압만을 높여 주었을 때 가공량은 거의 선형적인 변화를 보일 것으로 예상하였지만 실제 가공량은 예상했던 것과 많은 차이를 보였다.

3.4 연마된 표면

앞에서 살펴본 데이터를 바탕으로 Fig. 2 와 같은 실험조건에서 Pyrex glass 를 연마하였다. 연마를 위해 먼저 시편을 $\phi 1\sim 3 \mu\text{m}$ 다이아몬드로 랩핑하고 전극의 직경은 1.5 mm 이며 사용된 공구직경은 100 μm 를 사용하였다. 가공조건은 0.3 μm 알루미늄과 100cst 실리콘 오일 (혼합비 20wt%)를 사용하였고 가공시간은 12 min, 간극은 5 μm , 공구의 회전속도 2500 rpm, 전기장은 AC 2kv 로 연마하였고 다음 Fig. 7 과 같은 결과를 얻었다.



(a) Before polishing surface
(Rmax : 0.591 μm / Ra: 0.098 μm)



(b) After polishing surface
(Rmax : 0.096 μm / Ra: 0.013 μm)

Fig. 7 Polishing surface used DEP fluid.

4. 결론

본 연구에서는 연마입자의 전기적 분극성을 이용한 초정밀연마법에 대해서 살펴보았고 다음과 같은 결론을 얻었다.

불균일한 전기장 하에서 전기적으로 분극된 연마입자들은 DC 보다 AC 에서 더 많은 가공량과 공구주변에서 높은 응집밀도를 보였으며 각각의 연마입자들이 가지고 있는 특성도 초기에 예상했던 것보다 연마에 많은 영향을 미쳤다. 앞으로 DEP 현상을 이용한 초정밀 연마에 대해 더 많은 연구가 이루어져야 하고 이렇게 연마입자의 전기적 분극효과를 효과적으로 이용한다면 3 차원 표면을 가진 미세구조물의 연마에도 적용될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. T.B. Jones, "Electromechanics of particles", Cambridge university press, 1995.
2. T.B. Jones, "Liquid dielectrophoresis on the microscale", Journal of electrostatics, Vol 51-52, pp.290-299, 2001.
3. M.P.Hughes, "Dielectrophoretic behavior of nonaspheres", Colloid and interface science, Vol 250, pp.291-294, 2002.
4. W.B.Kim and S.J.Lee, "Characteristics of electrorheological fluid assisted machining", 4th Conference on Advances in Abrasive Technology, pp.324-331, 2001.