

ER유체를 이용한 미세 연마 가공

김옥배, 이성재(연세대 대학원), 박철우(한국산업기술대), 이상조(연세대)

Micro Polishing using Electrorheological fluid

W. B. Kim, S. J. Yi(Mech. Eng. Dept, YSU), C. W. Park(KPU), S. J. Lee(Yonsei Univ.)

ABSTRACT

It is well-known that Electro-rheological(ER) fluid is a material(suspension) which shows the dramatic change of rheological properties under an electric field. Using these properties, the concept that variable apparent viscosity of ER fluid could be applicable to the polishing for micro parts was introduced. It was investigated that how it works for polishing and how it affects ER effect when abrasives were mixed with an ER fluid. Therefore a few structures for polishing using ER fluid was suggested and evaluated by means of experiments. In this paper, fundamental mechanism and experimental results are described.

Key Words : Electrorheological fluid(ER 유체), Apparent viscosity(겉보기 점도), Shear stress(전단응력), Abrasives(연마재), Micro parts(미세부품), Polishing(폴리싱), Ultra precision machining(초정밀가공)

1. 서론

최근의 서브 밀리미터 규모의 부품 가공은 전통적인 기계적 가공법에 재료과학적 측면을 고려하여 전기적, 화학적 반응을 복합시키는 추세이다. 이러한 예로 방전가공, 다양한 형태의 기계·화학적 가공을 들 수 있는데 이러한 가공기술은 1차원적인 가공형태 및 가공성을 확인하는 정도에서 점차 2차원적 패턴 혹은 3차원적인 슬롯, 자유곡면, 표면 연마 등 초정밀 부품의 형상 가공에 도전하고 있다. 그러나 서브 마이크론, 혹은 서브 밀리미터 규모의 가공영역에서는 통상의 정밀가공에서와는 중요하게 다루어야 할 부분이 다르다. 그래서 아직까지 해결하지 못한 과학적, 기술적 장벽이 많다. 미세 가공공구의 마모나 강성저하 문제, 피가공물에 있어서의 가공품질의 저하는 그 일례라 할 수 있다.

이와같은 미세 가공의 영역에서는 해당 가공형태에 따라 다양하고, 복합적인 원리를 잘 구현할 필요가 있다. 본 연구에서는 이러한 시각으로 새로운 폴리싱을 제안하고 그 기초적인 연구결과를 보고하고자 하였다. 그것은 점기점성유체(Electrorheological

fluid) 혹은 전기유변유체라고 불리는 ER 유체를 이용하는 것이다. ER 유체는 전기장을 인가하면 그 점도가 크고 빠르게 변하므로, 이러한 특성을 이용하여 연마재를 미세 가공에 적합하게 제어하고자하는 개념이다. 이것은 통상의 자유입자가공(Free abrasive machining)이나 장원용가공(Field-assist process)와 유사하지만 가공영역은 표면 평탄화나 조도향상이 아니다. 즉 CMP와 같은 기계화학적 폴리싱, 점성유체의 흐름을 이용한 폴리싱(Viscoelastic flow machining)^[1] 그리고 MRF(Magnetorheological finishing)^[2]와 같은 입자가공법은 다양한 소재에 대해 미소한 가공량을 효율적으로 제어할 수 있다는 장점이 있지만 그 가공범위는 주로 초정밀 표면의 광역평탄 연마에 한정되어지고 있다. 이와같이 연마입자를 이용한 가공의 장점을 흠이나 자유표면과 같은 미세 형상가공에 응용하고자 하는 것이 본 연구의 주된 목적이다.

ER 유체를 이용한 폴리싱은 Akagami^[3]의 hole cleaning, Kuriyagawa^[4] 등의 비구면형태의 금형가공 등에 시도된 결과가 있으며 각기 그 방법이 다르다. 그러나 미시적 관점에서 ER 유체와 연마재의 상호 거동에 대한 이해와 가공기구와 피가공물의 가공품

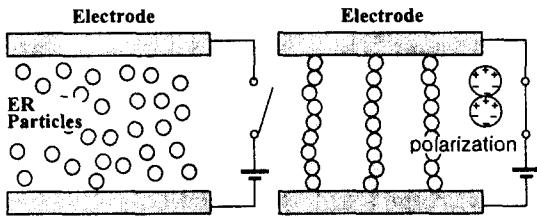
위에 대한 설명이 부재한 상태이거나^[4], 가공 방법 및 영역에 있어서 큰 장점이 없고^[6] 이론적/실험적 근거가 부족한^[5] 등의 문제가 있다. 단 Kuriyagawa의 경우는 직경 300미크론, 깊이 20 미크론 정도로 유리 소재를 비구면형태로 가공하여 그 가능성을 제시하였다.

본 연구는 연마재를 혼합한 ER유체를 이용하여 미세 형상가공에 이용할 것을 목표로 하였다. 이를 위해 금속, 세라믹 소재에 대한 각각의 가공 형태를 제안하고, ER 유체에 연마재를 혼합하여 그 거동을 관측하였다. 또한 제안한 가공 형태에 ER 유체를 이용하여 얻은 기초적인 가공실험 결과를 제시한다.

2. 본론

2.1 ER 유체

ER 유체란 입자와 매질이 혼합된 서스펜션으로 강한 전기장을 걸어주면 유체가 급속히 굳어지는 현상을 보이는 유체이다. ER 유체는 전도성이 낮은 절연 유체에 반도체 고분자 혹은 적절한 유전상수를 가진 입자가 현탁된 유체이다. 이렇게 강한 전기장 속에서 유체가 굳어지는 현상은 이온, 전자, 쌍극자 등에 의한 전하 이동, 즉 분극현상에서 기인한다 (Fig.1).



(a) Without electrical field (b) With electrical field

Fig.1 Mechanism of electrorheological fluid

이러한 ER 유체의 거동은 각각의 ER 유체에 따라 조금씩 다르므로 그 역학모델 역시 Bingham-plastic model, Bi-viscous model등을 적용할 수 있으나 일반적인 응용 분야에서는 laminar flow로 가정하여 Bingham body로 모델링되며 Equation 1과 같다.

$$\sigma = \sigma_y + \eta_{pl} \dot{\gamma} \quad (1)$$

여기서 σ_y 는 static yield stress, η_{pl} 는 plastic viscosity, $\dot{\gamma}$ 는 shear rate이다. 높은 전기장을 인가할 때, σ_y 가 증가하여 전체적인 전단응력이 증가하게 된다. 일반적으로 ER 유체의 최대 항복응력은 3~4kPa 전후이며, 주 응용분야는 댐퍼, 클러치, 밸브, 액추에이터이다. 침전현상에 대한 대책, 저전류밀도, zero-field viscosity, 온도 변동, 내구성, 절연파괴 등에 대한 적절한 대책이 주요 설계 조건이 되고있다.

ER 유체를 폴리싱에 이용하기 위해서는 연마재를 포함하였을 때 ER 입자들의 클러스터(clusters) 혹은 브릿지(bridges)내에 연마재 입자가 고정되어야 하며 따라서 전체적인 걸보기 정도가 유지되어야 한다. 통상 ER 유체의 항복응력이나 작동 전단응력은 면압을 가하여 폴리싱할 때의 압력에 비해 상당히 낮은 점이 고려되어야 한다. 특히 연마재가 ER 입자의 배열을 끊는 역할을 할 수 있으므로 연마재 입자의 적절한 제어가 필요하다.

Figure 2에 1mm의 전극사이에서 ER유체와 연마재의 혼합물의 거동을 나타내었다. 전기장이 없을 때는 ER 매질(순수유체)내에서 자유롭게 이동하던 ER입자와 연마재(Diamond)는 전기장을 걸었을 때, 다수의 ER 연마재가 전기장에 따라 배향된 클러스터를 형성하며 다이아몬드 연마재를 고정시키고 있다

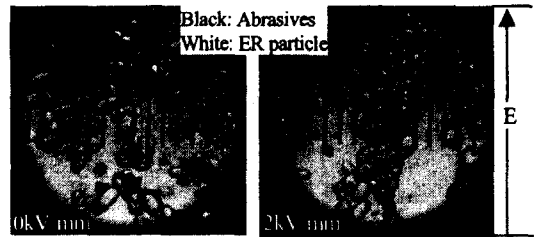


Fig.2 Behavior of ER fluid & abrasives with and without electric field

2.1 가공원리

ER 유체를 폴리싱에 응용하는 형태는 전극의 배치와 형상, 별도의 공구 장치 여부에 따라 다양한 가공법을 제시할 수 있다. 본 연구에 적용한 가공 방법을 Figure 3에 제시하였다. 가공물(Pyrex 7740)위에 전극(doped silicon)을 접합하고 또 다른 전극인 미세공구(Stainless steel)를 이용한다. 미세공구와 실리콘전극간에 전기장을 인가하면 연마재가 혼합된 ER 유체는 점성을 갖게 된다. 이 때, 연마재는 ER 입자 사이에서 고정되며, 미세공구 아래쪽에서 유체가

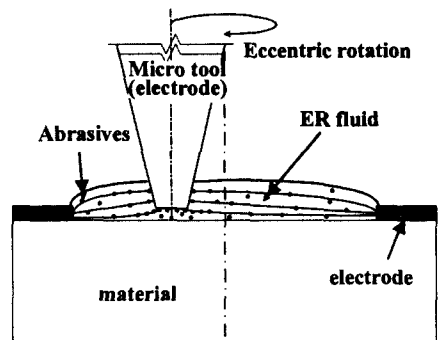


Fig. 3 Polishing structure

전단을 일으킬 때 표면을 *scratching* 할 것으로 예측된다. 전기력선(Electric field line)에 따라 ER 입자와 연마재가 분포한다고 생각할 수 있고, 다이아몬드나 알루미늄과 같은 연마재가 침전되지 않고 ER 입자와 함께 클러스터를 형성하여 응집된다. 특히 고전계에서 나타나는 ER 유체의 전기영동현상 및 전극 부근의 입자분포밀도가 높은 이유 때문에 미세 공구 주변은 연마재에 의해서 가공을 하는 가상층을 형성할 것으로 생각한다(Fig. 4). 이 때 미세 공구를 전극간의 중심에서 편심을 가하여 회전하고 편심량과 공작물과 공구간의 높이를 조절하면 비구면 형상을 가공할 수 있다. 이후로는 XY 방향의 운동제어를 이용할 예정이다.

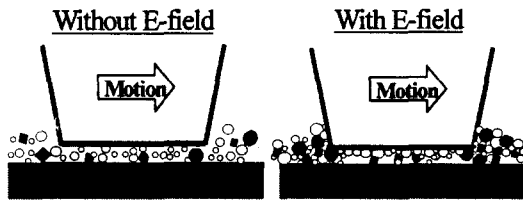


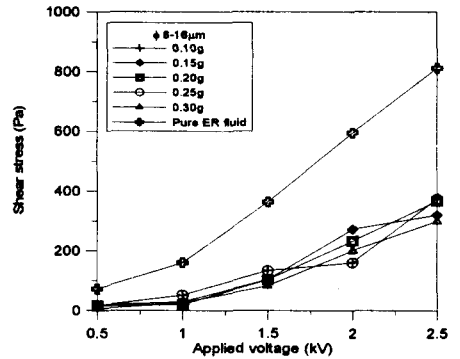
Fig. 4 Behavior of particles of the mixture around tool

2.3 ER 특성의 실험결과

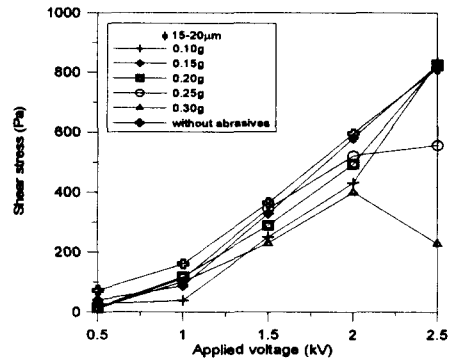
ER 유체의 선정은 폴리싱에 있어서 가장 큰 제어변수라고 할 수 있다. 폴리싱을 위한 ER 유체의 연구를 위해서 실린더형 ER 점도계를 제작하였다.

주축 서보모터는 정격 3000rpm으로 전단율을 최대 4500/sec까지 구현할 수 있으며, 토크센서는 0.21Nm 이 측정이 가능하다. 고압 전원은 최대 전압 5kV, 허용 전류 100mA의 사양을 가진 내압시험기를 이용하였다. ER 유체는 실리콘 오일을 분산매로 구성한 것이며 ER 거동의 계측 결과로 인가전압에 따른 유체의 항복 응력을 측정하였으며 이를 바탕으로 전단율이 800/sec일 때의 결과를 Fig. 5에 연마재 포함한 경우와 함께 제시하였다.

연마재는 폴리싱에 사용되는 다양한 소재들이 있으나 본 연구에서는 Diamond에 의한 실험 결과만 보고한다. 사용된 Diamond 연마재의 종류는 직경 8~16 μ m와 15~20 μ m 각기 1종을 사용하였다. 각 크기별 첨가량에 따른 ER 유체의 응력값을 Fig. 5에 나타내었다. 이 때의 응력값은 항복응력이 아닌 전단율이 800/sec일 때의 전단응력으로서 이것은 가공 환경이 정지와 운동의 반복 상태가 아닌 연속적인 유동 상태를 고려한 것이다. 결과에서 보이는 것처럼 연마재의 크기가 15-20 μ m일 때, 전단응력이 더 크며 이것은 연마재와 ER입자가 공구회전에 의한 전단에서 탈락하지 않고 지속적으로 fibriform의 형태를 유지하고 있음을 나타내는 것이다. 이것은 본문에 제시하지 않은 WA의 경우도 마찬가지였고 ER 특성에



(a) Diamond ϕ 8-16 μ m



(b) Diamond ϕ 15-20 μ m

Fig. 5 Influence of abrasives size & amount on shear stress of fluid (Diamond, $\gamma=800s^{-1}$)

손상을 입히지 않는 첨가량이나 연마재 크기의 최적값이 존재함을 알 수 있다. 그 양과 크기의 정도는 WA와 다이아몬드가 서로 유사하였다. 이는 ER 유체의 특성에도 의존하므로 지속적인 연구가 필요하다. 단, Fig. 6에서 순수 ER 유체의 같은 전단율에서의 전단응력이 0.8kPa 정도이므로 직경이 15-20 μ m인 다이아몬드의 경우 ER 효과의 손실이 거의 없다. 그러나 전압이 2.5kV 이상 인가되었을 때는 0.25g, 0.3g 함유된 ER 유체의 특성이 나빠졌는데 이러한 특성은 높은 유체 응력을 요구하는 폴리싱 기구상 큰 단점이 된다. 직경 8-16 μ m인 다이아몬드의 경우는 손실량이 상대적으로 많으며 첨가량에 따른 정도가 유사하다. 사용된 ER 입자의 크기가 평균 10 μ m 내외에 최대 30 μ m 정도인데 ER 입자 및 연마재 입자 크기의 상대비에서 ER 특성이 영향을 받으리라 생각된다.

2.4 가공실험결과

앞에서 설명한 바와 같은 방법으로 가공실험을 행하였다. 실험 조건은 Table 1과 같다. Figure 6에 2가지 가공결과를 나타내었다. 2가지 모두 전기장을 인

Table 1 Specifications for simple experiment of ER polishing

탐침끝단 직경	100 μ m
탐침 소재	High speed steel
전극배치	parallel / gap : 2mm
전극 소재 / 두께	Electron-doped silicon/45 μ m
피가공물	glass (Pyrex)
전극공작물간 거리	25 μ m- (fixed)
편심반경	약 400 μ m
연마재	Diamond / dia. : 15-20 μ m
연마재/ER유체비율	0.25g / 9cc
회전속도	1500rpm
가공시간	15min

가한 경우이며 표면의 크랙이 보이지 않고, 연성상태로 가공이 이루어진 경우와 취성파괴 혹은 마이크로 크랙이 발생한 경우도 있었다. 가공 형태는 가운데 부분이 깊고 양 에지 부분이 얇은 오목한 형태인데 이는 공구의 원형 에지 주변에서 뿐 아니라 끝면 하부에서도 가공이 발생했기 때문이다. 연성모드로 가공된 표면의 깊이는 1.2 μ m 정도이며 AFM 측정사진을 Fig. 7에 제시하였다. 가공량이 다소 작은 이유는 공구 공작물간 높이를 고정된 영향으로 생각된다. 취성파괴가 발생한 이유는 공구-공작물간 거리가 안정화되지 못하여 래핑한 효과가 나타난 경우와 공구끝단의 가공단차가 영향을 미친 경우로 생각된다. 이 때의 가공깊이는 8-9 μ m 정도이다. 가공상태는 피가공물이 boro-silicate 계열의 유리인 점, ER유체의 매질이 Oil인 점을 생각할 때, 대체적으로 oil에서 가공속도가 높지 않다고 알려져 있는바, ER 유체의 선정에서 고려해야 할 부분이므로 이후 계속적으로 연구할 예정이다.

3. 결론

본 논문에서는 ER 유체를 이용한 미세 형상의 연마가공 방법을 제안하고 그 가공성에 대해 기초적

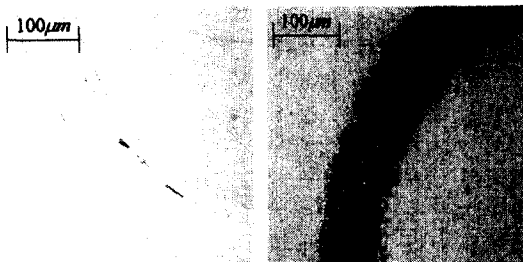


Fig. 6 Polishing result with ER fluid & abrasives (2kV applied, fixed height 25 μ m, 1500rpm)

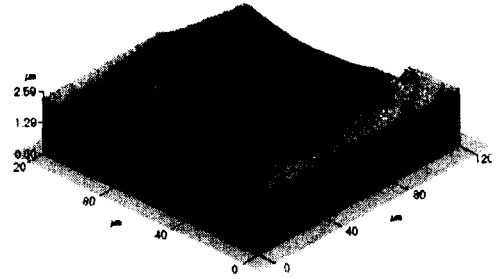


Fig. 7 AFM image of ductile mode machining

인 연구를 수행하였다. 단순한 패턴의 가공실험을 통해 가공성을 확인하였으며, 이러한 가공 방법이 지니는 장단점 및 주요 가공 변수들을 파악할 수 있었다. ER유체에 다이아몬드 연마재의 크기가 영향을 파악하고 보다 높은 응력을 갖도록 하였고, 제시된 가공 방법에 의거하여 가공 실험을 행한 결과 공구의 궤적을 따라서 2가지 형태의 가공 모드가 발생하였음을 확인하였다. 이후에 ER유체부터 설계변수로 삼고, 가공변수 및 환경에 대한 안정화를 통하여 가공 특성 및 모드를 제어할 예정이다.

가공 효율 및 정도에 영향을 미치는 주 변수들은 ER 유체의 특성이 가장 결정적이며 연마재의 종류와 첨가량, 전기장의 세기, 전극-공구의 형상·배치·간극, 회전속도, 온도 등이 될 수 있다. 현재까지는 상관관계에 대한 해석이 부족한 실정이지만 위와같은 다양한 변수들에 대한 최적화를 구현한다면 milli-structure 규모에서 경취성 재료의 금형 가공에 적용할 수 있는 좋은 방법이 될 것이다.

참고문헌

1. R.Komanduri, et al. "Technological advances in fine abrasive process", Annals of CIRP, vol.46, no.2, pp545-596, 1997
2. W.Kordonski, D.Golini, "Progress update in magnetorheological finishing", Int. J. Mod. Phys. B, vol.13, nos 14,15&16, pp2205-2212, 1999
3. Y.Akagami, K.Asari, "Characterization of particle motion for polishing and texturing under AC field by using particle dispersion type ER fluid", J. Int. Mat. Sys. Struc., vol.9, pp672-675, August. 1998
4. T.Kuriyagawa, K.Syoji, "Development of ER fluid assisted machining for 3-D small parts", JSPE, vol.65, no.1, pp145-149, 1999
5. T.C.Jordan, M.T.Shaw, "Electrorheology", IEEE Transactions on Electrical insulation, vol.24, no.5, October 1989