

연마공정에서 MR 유체의 트라이볼로지적 성질에 대한 연구

이성오*, 장경인, 민병권, 이상조 (연세대학교 기계공학부)
석종원 (중양대학교 기계공학부)

A Study on Tribological Properties of Magneto-Rheological Fluid (MRF) in Polishing Process

S. O. Lee*, K. I. Jang, B.-K. Min, S. J. Lee (School of Mechanical Engineering, Yonsei University)
J. Seok (School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University)

ABSTRACT

Tribological properties of a Magneto-Rheological(MR) fluid in a polishing process are studied. For this polishing process abrasive wear model is proposed as a function of shear force, normal force and actual mean velocity of MR particles at workpiece surface. Experimental conditions are changed by varying the gap distance between workpiece and tool and the rotational speed of tool. From the experimental results, a modified Stribeck curve is obtained, and the friction coefficient turns out to have linear relationship with a modified Sommerfeld number. The validity of the wear model is supported by additional experiments performed for measuring material removal rates.

Key Words : Magneto-Rheological Fluid Polishing (자기유변유체 연마), Material Removal Rate (재료 제거율), Wear Model (연마모델), Preston Equation (프레스톤 방정식)

1. 서론

자기유변유체(Magneto-Rheological Fluid, MRF)을 이용한 실리콘 표면의 연마 공정은 대상물의 표면 거칠기 뿐만 아니라 3 차원 미세 구조물의 형상 정밀도를 유지하면서 연마가 필요할 때 사용할 수 있는 선택성을 높인 연마 방법이다. 이러한 MRF 를 이용한 연마 방법은 자석에 인가되는 자기장 및 유동장의 세기나 형태에 따라서 상이한 특성을 보이기 때문에 화학적-기계적 연마(Chemical Mechanical Polishing, CMP) 공정과 같이 공정의 입출력 변수간의 함수 관계가 명확히 규명 되어 있지 않고 가공 중의 변수를 설정하는 어려움이 있다^{1,2}.

이 논문에서는 MR 연마공정을 표현하기 위해 마모에 의한 연마모델(abrasive wear model)을 제시하고 실험결과를 CMP 등의 연마공정에서 재료제거율(Material removal rate, MRR)을 표현하는데 쓰여지는 프레스톤 방정식(Preston equation)과 비교함으로써 제시한 연마 모델이 타당함을 증명하고자 한다.

2. 실험 장치 구성

MR 연마 공정 중 변수를 바꾸면서 연마 공정의 여러 물리적 변수들(전단력, 수직력 및 슬립)을 측정하기 위해서 고안된 장치이다. Figure 1 과 Fig. 2 에서 보는 것과 같이 전단력(Shear force)와 수직력(Normal force)를 측정하기 위해 3 축 공구동력계(Dynamometer)를 사용하였으며 MR 유체가 시편의 표면에서 움직이는 속도를 측정하기 위해 초고속

카메라(High-speed camera)를 사용하였다.

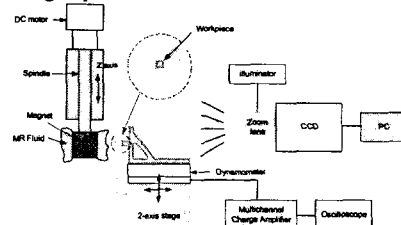


Fig. 1 Schematic of experimental setup



Fig. 2 Photographs of experimental setup

Figure 3 은 시편의 표면에서 MR 입자의 속도를 측정하기 위해 유리 웨이퍼(Glass wafer) 후면에서 MRF 속에 첨가한 추적물(Tracer)을 초고속 카메라를 사용해 찍은 사진이다.

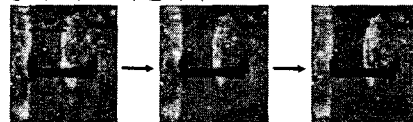


Fig. 3 Pictures for particle velocity measurement

3. 결과

MRF 를 이용한 연마 공정은 자기장 및 유동장의 세기나 형태에 따라 상이한 특성을 보이며 반경

r_T 인 자석공구(Magnet tool)에 근접할수록 MR 입자들 사이의 자기력은 더 강해진다.

Figure 4 는 자석공구와 시편과의 가장 가까운 거리를 Gap distance(d_G)라고 할 때 Gap distance 와 자석공구의 회전 속도(ω_a)가 달라짐에 따라 전단력, 수직력 및 입자의 평균속도(V_p)를 측정 한 값이다. 이러한 데이터를 바탕으로 수정된 스트라이벡 곡선 (Modified Stribeck curve)을 그리면 수정된 좀머펠트 수(Modified Sommerfeld number) V_p/P 와 마찰계수 (friction coefficient : μ)와의 관계식을 알 수 있다.

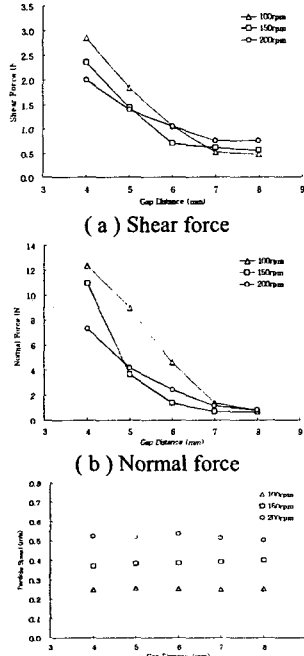
$$\mu = K \frac{(1-S)V_a}{P} + a, \quad K: \text{slope}, \quad a: \text{int ercept} \quad (1)$$

$$S = (V_a - V_p)/V_a, \quad V_a = (r_T + d_G)\omega_a \quad (2)$$

여기서 P 와 τ 는 각각 수직력 및 전단력을 시편의 면적으로 나눈 값이다. MR 연마의 특성을 고려하여 재료 제거 메커니즘(Material removal mechanics m)을 마모에 의한 연마(Abrasive wear)라고 가정하면 MRR 은 다음의 전단응력 (Shear stress)과 가공물 표면에서의 MR 입자의 평균속도와와의 관계식으로 유도 할 수 있다.

$$\alpha \cdot MRR = \frac{K}{a} (1-S)^2 V_a^2 + P(1-S)V_a \quad (3)$$

한편 Preston 방정식은 식(3)에서 $K=0, S=0$ 인 경우를 의미한다.



(c) Mean particle speed at workpiece surface
Fig. 4 Measured force and velocity profiles in polishing process

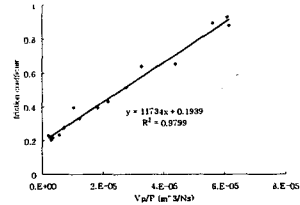


Fig. 5 Modified Stribeck curve

식(3)은 MR 연마공정이 마모에 의한 연마과정이라고 가정하고 수정된 스트라이벡 곡선으로부터 얻은 마찰계수와 수정된 좀머펠트 수와의 관계를 이용하여 얻은 것이다. 이의 타당성을 증명하기 위해 두 가지 입력 조건 (Gap distance, tool speed)을 변화시키며 MRR 을 측정하는 실험을 수행하였다. Figure 6 은 MRR 식의 비례 상수를 구하기 위해 식(3)의 우변과 이 실험으로부터 구한 MRR 과의 관계를 도시한 그림이다.

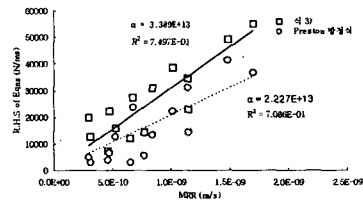


Fig. 6 Graph to obtain proportional coefficient (α)

이 결과에서 알 수 있듯이 식(3)은 실험결과를 비교적 잘 표현해 주고 있으며 마찰계수가 일정한 경우 주로 적용되는 프레스턴 방정식(Preston equation)보다 새로 제안된 식이 MR 연마공정을 더 잘 표현해 준다는 것을 나타내고 있다.

4. 결론

이 논문은 MR 연마에 쓰이는 재료제거율에 대한 관계식을 유도하여 이의 타당성을 실험적으로 검증하였다. 또한 본 연구의 결과로 MR 연마공정에서 재료제거율이 단지 압력과 속도의 곱에 비례하는 프레스턴 방정식과 달리 표면에서의 입자의 평균속도(V_p)의 자승에 비례하는 항과 수직응력과 입자의 속도의 곱($P \times V_p$)에 비례하는 항의 합으로 표현 되어질 수 있음을 알 수 있다.

후기

본 연구는 산업자원부가 지원하는 산업기술기반 조성사업 중 마이크로 나노 점 선 가공기반 구축 사업단의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 황봉하, 민병권, 이상조, 석종원, "자기유변유체를 활용한 연마공정에 대한 기초연구," 춘계정밀공학회 학술대회, pp. 464-467, 2005.
- 김용재, "자기유변유체 연마 공정을 이용한 곡면 가공에 관한 연구," 석사학위논문, 연세대학교, 2005.