

자성유체를 이용한 연마

신영재*, 이응숙(한국기계연구원 자동화연구부), 황경현(한국기계연구원),
김경웅(한국과학기술원 기계공학과)

Magnetorheological Finishing

Y. J. Shin, E. S. Lee(Automation Dept., KIMM), K. H. Hwang(KIMM),
K. W. Kim(Mech. Eng. Dept., KAIST)

ABSTRACT

Magnetorheological finishing(MRF) is a newly developed and recently commercialized for finishing optical components. The magnetorheological fluid consists of a water based suspension of carbonyl iron, nonmagnetic polishing abrasives, and small amounts of stabilizer. Theoretical analysis of MRF, based on Bingham lubrication theory, is illustrated and a correlation between surface shear stress on the workpiece and material removal is obtained.

Key Words : Abrasives(연마입자), Polishing(연마), Magnetorheological fluid(자성유체), Magnetorheological finishing(자성유체 응용 연마), Removal rate(제거율)

1. 서론

광학 부품은 절삭, 연삭, 그리고 사출성형으로 제작되고 있다. 다이아몬드 터닝 머신을 사용하여 플라스틱 혹은 비철금속을 직접 절삭가공하며, 유리나 금형강 등은 다이아몬드 스톨로 연삭한다.

다이아몬드 터닝 머신을 이용한 가공은 형상정도는 우수하나 표면거칠기가 만족할 수준에 도달하지 못하므로 공구 자국을 제거하는 수준으로의 연마를 통하여 최종 완성되고, 연삭에서는 스톨의 마멸에 의하여 형상정도가 만족할 수준으로 도달되기 어렵고 표면거칠기 또한 나쁘기 때문에 연삭 후 연마가 요구된다.

최근, 고정밀도 비구면 렌즈를 만들려면 시작부터 마무리까지 효과적인 방법으로 기계 가공할 수 있는 장치에 대한 연구가 미국, 일본에서 진행 중이다[1]. 기존의 초정밀 연마에서 나타나는 최소 가공부 형성, 연마압력 조절, 연마공구인 패드 마멸 등의 난점을 해결할 수 있는 자성유체에 의한 연마가 시도되고 있다.

자성유체에 의한 연마는 Fig. 1과 같이 우수한

가공품위(표면거칠기 1nm RMS)의 달성은 물론 15~30분으로의 비약적인 가공시간 단축 등의 장점에 의하여 렌즈 연마의 혁신적인 기술로 기대되고 있다.

자성유체를 이용한 연마에 의하여 렌즈 및 미러 등의 광학 부품, 세라믹, 웨이퍼 등과 같은 취성 재료의 표면거칠기를 향상시킴과 동시에 목표하는 형상으로 마무리 가공하는 연마 기술을 개발하기 위하여 본 연구에서는 자성유체를 이용한 연마시 재료의 제거율에 대하여 이론적으로 해석하며, 앞으로 연구방향에 대하여 분석한다.



Fig. 1 Examples of magnetorheological finishing

2. 자성유체

자성유체에 대한 최초의 발견과 개발 및 자성유체를 이용한 기구의 개발은 1940년대에 미국 표준청의 Jacob Rabinow에 의하여 이루어 졌다고 생각된다[2, 3]. 이 때 전기점성유체(electrorheological fluid)에 대한 연구도 Willis Winslow에 의하여 시작되었다[4]. 개발 초기를 제외하고는 한 동안 자성유체에 대한 연구가 진행되지 않다가 최근에 부활되고 있다 [5-7].

자성유체는 자장이 부과되면 자화되는 자성입자를 비자성의 유체 중에 다량으로 분산시킨 유체로, 자장에 따라 유동 특성이 실시간으로 제어되는 스마트(smart) 재료의 하나이다.

자장이 부과되지 않을 경우에는 Fig. 2(a)와 같이 상태로 뉴턴이언(Newtonian) 유체와 같은 거동을 한다. 자장이 작용하면 Fig. 2(c)와 같이 자성입자는 쌍극자의 상호작용에 의하여 자장의 방향으로 자성입자들이 연결 고리를 형성한다. 이러한 연결고리는 비자성 유체의 흐름을 방해하므로 항복전단응력을 증가시키는 작용을 한다. 자장을 증가함에 따라 유체의 항복전단응력이 증가하므로 자성입자의 연결고리를 형성하기 위한 기계적인 에너지도 증가한다.

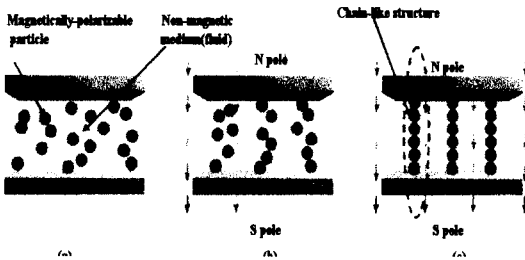


Fig. 2 Behavior of MR fluid

자성유체에는 마그네토레올로지컬 유체(Magneto-Rheological Fluid, 이하 MR유체)와 페로플루이드(ferrofluid)가 있다. 페로플루이드는 직경이 수 nm에서 수십 nm이며 마그네타이트, 망간페라이트, 니켈페라이트, 코발트페라이트, 바륨페라이트, 철, 니켈 등과 같은 강자성 미립자를 올레인산이나 리놀산과 같은 불포화 지방산으로 피복하여 물 또는 기름 등의 용매 중에 안정하게 분산된 콜로이드(colloidal) 상태의 유체이다. MR유체 입자 크기가 100 nm~10 μm 로 페로플루이드의 입자보다 천 배정도 크다. MR유체 입자인 철은 2.1 tesla 정도의 높은 자속밀도를 가지

며 구형의 철 입자는 아이언 펜타카보닐(iron pentacarbonyl)의 열분해에 의하여 제조된다. 2.4 tesla의 철보다 높은 철 합금 또는 코발트도 MR유체에 사용된다.

전형적인 MR유체의 특성은 Table 1과 같다. 보통의 MR유체에서는 150 ~ 250 kA/m의 자계강도가 부과될 때에 항복응력이 50 kPa을 넘어간다[17, 18].

자장이 부과되지 않을 때 25℃에서의 점도는 0.1 ~ 1.0 Pa · s 이다. 사용온도범위는 - 40 ~ 150 ℃ 이나 온도의 상한 값은 자성입자의 자화 메카니즘보다는 자성입자를 운반하는 유체의 휘발성에 의하여 결정된다.

MR유체 생산이나 사용시 유입되는 오염물이나 다른 성분의 입자에 둔감하고 자화 메카니즘이 첨가제나 계면활성제 등에 의한 영향을 받지 않으므로 MR유체 입자와 용매의 큰 밀도 차이에도 불구하고 액상과 고상으로 분리되지 않으며 MR유체를 안정되게 분산시킬 수 있다. 대부분의 MR유체의 밀도는 높으며 3 ~ 4 g/cm³ 정도이다.

η_p/τ_0^2 는 MR 유체 응용 기구에서 필요로 하는 MR 유체의 양을 결정하는 척도로 사용되고 통상적으로 2 ~ 50 watts의 전력이 소모된다.

Table 1 전형적인 MR 유체의 특성치

항목	전형적인 값
최대 항복 응력	50 ~ 100 kPa
최대 부가 자장	~ 250 kA/m
소성 점도	0.1 ~ 1.0 Pa · s
사용 온도 범위	- 40 ~ 150 ℃
오염물	거의 영향이 없음
응답시간	< 0.001 sec
밀도	3 ~ 4 g/cm ³
η_p/τ_0^2	10-10 ~ 10-11 s/Pa
최대 에너지 밀도	0.1 J/cm ³
동력	2 ~ 25 V @ 1~2 A

MR 유체의 용매로 물, 실리콘 오일, 합성유를 사용한 MR 유체들이 상용화되어 있다.

자성유체의 변화되는 항복응력을 갖는 Bingham 소성체로 나타내어지며[8], 자장에 의한 항복응력보다 큰 전단력이 가해질 경우에는 유동은 식(1)과 같은 Bingham 식으로 나타내어진다.

$$\tau = \eta_0 \dot{\gamma} + \tau_0(H) \text{sgn}(\dot{\gamma}), \quad |\tau| \geq \tau_0(H) \quad (1)$$

항복응력보다 작을 경우에는 자성유체는 식(2)와 같이 점탄성체로 거동한다.

$$\tau = G\gamma_o, \quad |\tau| \leq |\tau_o(H)| \quad (2)$$

여기서 τ 는 전단응력, η_o 는 소성 점도, β 는 전단속도, $\tau_o(H)$ 는 자장에 의한 전단력 즉 항복응력, G 는 컴플렉스 모듈러스(complex modulus)이다.

Bingham 소성체 모델은 제어 가능한 유체를 이용한 기구들의 특성분석과 설계에 유용하지만 실제 제어 가능한 유체의 거동은 이 모델과 다소 다르다. 이것은 자장이 부과되지 않을 경우에 나타나는 유체의 비 뉴턴니언 거동에 의한 것이다.

3. 자성유체에 의한 연마

MR유체에 의한 연마이란 Fig. 3과 같이 연마재를 첨가된 MR유체가 움직이는 벽면에 의하여 이송될 때 공작물과 벽면 사이의 좁아지는 틈새에서 가공영역(polishing spot)이 형성된다. 그리고 연마의 가공기구는 Fig.4와 같이 형성될 것이다. 자장의 형성 방법에 따라 가공영역의 크기가 작게 할 수 있으므로 비구면과 같은 복잡한 형상의 연마가 가능하며, 기존의 피치폴리싱과는 달리 비접촉식 가공이므로 피 가공물의 표면하층의 파손이 거의 없으며 연마량 제어의 재현성이 우수한 가공방법이다.

4. 재료 제거율의 해석

가공영역에서 유동은 유체운환의 기본적인 지배방정식인 레이놀즈(Reynolds) 식에 의하여 식(3)와 같이 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \quad (3)$$

여기서 $\partial p / \partial x$ 와 τ_{xy} 는 압력구배와 전단응력이다. 식(3)를 적분하면

$$\tau_{xy} = \frac{\partial P}{\partial x} y + C_1 \quad (4)$$

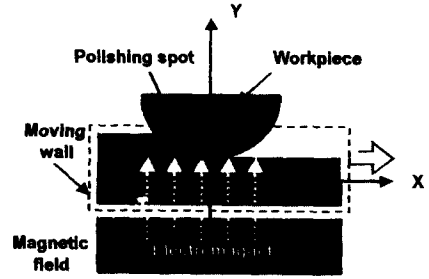


Fig. 3 Model of Polishing by MR fluid

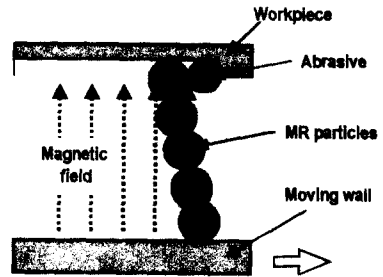


Fig. 4 Polishing Mechanism by MR fluid

여기서 C_1 은 적분 상수이다. 식(4)을 식(1)에 대입하고 적분하면

$$\frac{1}{2} \frac{\partial P}{\partial x} y^2 - \eta_o u \pm \tau_o(H) y + C_1 y + C_2 = 0 \quad (5)$$

경계조건인 $u = U$ (at $y = 0$), $u = 0$ (at $y = h(x)$)에 의하여 구해지는 적분상수 C_1, C_2 를 식(4)에 대입하면

$$\tau_{xy} = \frac{dP}{dx} \left[y - \frac{h(x)}{2} \right] - \frac{\eta_o U}{h} - \tau_o(H) \quad (6)$$

전통적인 연마가공을 모델링하기 위하여 식(7)의 프레스톤(Preston)의 경험식을 도입한다.

$$R = kP|U| \quad (7)$$

재료 제거율 R 은 가압력 P 와 공작물과 패드 사이의 상대속도 U 에 의하여 제어된다. 여기서 프레스톤 상수 k 는 연마재, 가공물, 패드 등에 의하여 정해지는 상수이다.

식(7)을 다음과 같이 유도하면

$$R = kPU = k \frac{L}{S} U = k \frac{F}{\mu S} U = k \frac{\tau U}{\mu} \quad (8)$$

여기서 L 은 수직력, S 는 연마가공이 일어나는 면적, F 는 공작물에 작용하는 마찰력, μ 는 마찰계수, τ 는 공작물 표면에서의 전단력이다.

식(6)와 식(8)에 의하여 재료 제거율 R 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R = k \frac{U}{\mu} \tau_{xy} = k \frac{U}{\mu} \left(\frac{dP}{dx} \left[y - \frac{h(x)}{2} \right] - \frac{\eta_o U}{h} - \tau_o(H) \right) \quad (9)$$

따라서 자성유체에 의한 재료 제거율 R 은 상대속도 U , 자장에 의한 전단력 $\tau_o(H)$, MR유체의 유막 두께에 의하여 제어됨을 알 수 있다. 그리고 자성입자, 연마입자, 비자성 유체의 혼합비와 물성, 자성입자와 연마입자의 형상 등에 의하여 프레스톤 상수 k 및 마찰계수 μ 가 결정됨을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 자성유체를 이용한 연마에 관한 자료조사·분석을 통하여 자성유체와 자성유체를 이용한 연마의 개략적인 특성을 알아보았다. 또한 프레스톤의 경험식을 이용하여 재료 제거율에 수식을 전개하였다.

후기

본 연구는 1999년도 선도기술 개발사업의 연구비에 의하여 연구되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] W. Kordonski, S.D. Jacobs, "Magnetorheological Finishing", Int'l J. of Modern Physics B, Vol.10 Nos. 23 & 24, 1996, pp.2837-2848
- [2] National Bureau of Standards Technical News Bulletin 1948;32(4):54-60.
- [3] Rabinow J. Proceedings of the AIEE Trans.,

1948. 67. p. 1308-1315.

- [4] Carlson JD, Chrzan MJ. US Patent 5,277,282 1994.
- [5] Carlson JD, Chrzan MJ, James FO. US Patent 5,284,330 1994.
- [6] Carlson JD, Weiss KD. Machine Design 1994; 8:61-6.
- [7] Carlson JD. Materials Technology 1998;13(3):96-9.
- [8] Phillips RW. Ph.D Dissertation, University of California, Berkeley 1969.