

마그네토리오메타 제작에 관한 연구

김영민*(충남대학교 대학원), 신영재, 이응숙(한국기계연구원)
김동우(인하대학교 대학원), 이동주(충남대학교 기계공학과)

A Study on the Fabrication of Magnetorheometer

Y. M. Kim(Mech. Eng. Dept., CNU), Y. J. Shin, E. S. Lee(Mech. Eng. Dept., KIMM)
D. W. Kim(Mech. Eng. Dept., IHU), D. J. LEE(Mech. Eng. Dept., CNU)

ABSTRACT

A new, commercially available polishing process called magnetorheological finishing is used to polish and figure precision optics. To understand and model this process correctly it is important to determine the mechanical properties of the fluid under the influence of the magnetic field. Magnetorheological (MR) fluids are commonly modeled as Bingham fluids, so one of the essential properties to measure is the yield stress. Since MR fluids are inherently anisotropic, the yield stress will depend on the mutual orientation of the magnetic field and the direction of deformation. The relative orientation of the field and deformation in polishing does not coincide with common rheological setups, so a new rheometer has been designed and tested. This new magnetorheometer design has been shown to give correct stresses during calibration experiments using Newtonian fluids with a known viscosity. The measured stress has also been shown to have a magnitude consistent with published finite element approximations for magnetic fluids. The design of the instrument was complicated because of the requirements imposed upon the magnetic field, and the difficulty in satisfying the no slip boundary condition. Our results show the importance of having a homogeneous field in the test region during measurements. The solutions to these problems and discussion of the measurements on nonmagnetic and magnetic fluids are given.

Key Words : Magnetorheological finishing (자기유변연마), Magnetorheological (MR) fluids (자기유변유체), Bingham fluid (빙햄유체), Magnetic field (전자장)

1. 서론

자기유변유체 (Magnetorheological fluids :MR fluids)는 기름과 물과 같은 비자성 유체에 철 (Iron) 과 같은 자기장에 민감한 자성물질이 혼합되어 떠다니는 현탁액으로 자장이 부과되면 유동특성이 변하는 지능 재료의 하나이다. 따라서 이 유체의 자장을 인가하여 유체의 응력과 전단력을 변화시켜 이를 표면에서의 가공력으로 활용하여 연마표면의 품질을 높이고자 비구면 렌즈 등의 가공에 시도되고 있다. 이러한 공정을 모델화 시키고 정확히 이해하기 위해서는 인가된 자장 하에서 유체의 기계적인 특성을 결정하는 것이 중요하다.

자기유변유체는 일반적으로 빙햄 유체 (Bingham

fluid)로 모델화 되는데 이러한 것들을 측정하기 위한 본질적인 특성 중의 하나가 항복 응력이라고 할 수 있는데 최근 이러한 기계적인 특성들을 향상시킨 여러 자기유변유체들이 개발되고 있다. 자기유변유체는 본래 이방성 재료이기 때문에 항복 응력은 자장과 변형 방향의 상호간 방위에 의존하는데 특히 연마 공정에 있어서 기존의 측정 기기로는 연마공정에서 일어나는 자장과 가공 방향의 상호 방향에 따른 정확한 기계적인 특성을 측정하지 못하기 때문에 다양하게 구성되는 자기유변유체 조직의 성상을 역학적으로 정확히 해석하기 위한 측정기기 (Magnetorheometer)를 설계하여 실험하였다. 설계된 전자석을 유한요소 프로그램인 Ansys를 이용하여 해석하였으며 가우스 미터를 이용하여 측정 후 해석값

과 비교를 하였고, 토크 센서를 이용하여 전압이 인가된 자기유변유체의 힘을 측정하여 응력 값으로 변환 시켰다. 따라서 제작된 Magnetorheometer를 이용하여 다양한 자기유변유체 및 여러 조건상의 실험을 통하여 연마 공정에서 이루어지는 자기유변유체의 전단력을 예측하고자 하였다.

2. 이론적 원리

2.1 자기유변유체 (MR fluids)의 특성

자기유변유체는 비자성 유체에 철과 같은 자기장에 민감한 자성입자가 혼합된 현탁액이다. 자성 입자들의 직경은 수 마이크로미터 정도이고 30내지 40% 정도의 부피 비율로 포함되어 있는데 이 물질의 기본적인 특성은 적절한 자기장이 형성되면 Newtonian fluid 상태에서 강한 반고체의 상태로 급속하게 변하게 되어 현탁액의 점성과 항복응력은 수 배 정도 빠르게 증가하게 된다.

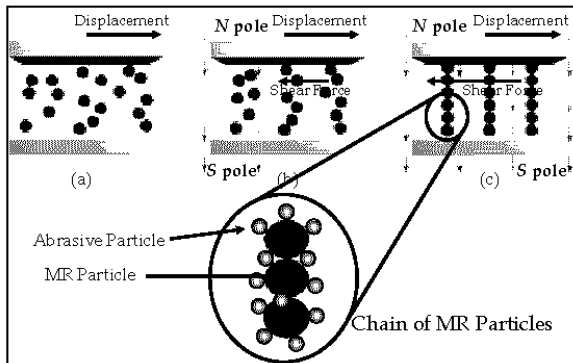


Fig. 1 Chain of MR particles

MR효과라 불리는 이런 특징들은 자기장이 형성되면 입자들은 자성을 띄게 되고 Fig. 1에 나타난 것처럼 자기장과 같은 방향으로 사슬 (Chain)과 같은 구조를 형성한다. 이 구조와 같은 미세구조물은 전단률에 대한 저항을 높이며 이런 특징을 이용하여 댐퍼, 클러치, 브레이크 등에 이용되는 것이다. 이러한 자성유체의 변화는 항복응력을 갖는 Bingham 소성체로 나타내어지며 식(1)과(2)같이 나타낼 수 있다.

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

$$(|\tau| \geq |\tau_0(H)|)$$

$$\dot{\gamma} = 0 \quad (|\tau| \leq |\tau_0(H)|) \quad (2)$$

여기서 τ 는 전단 응력, η_0 는 소성 점도, $\dot{\gamma}$ 는 전단 속도, $\tau_0(H)$ 는 자장에 의한 항복응력이다.

2.2 MR 유체를 이용한 연마원리

보통 MR 유체는 일정한 전단율 (Shear rate)이 일어나는 좁은 틈 (0.05~0.2mm) 사이에 Couette flow가 형성되는데 이 곳에 유동 방향과 유동 면에 수직인 자기력선의 일정한 자장이 있다. 따라서 Fig. 2에서 보여준 것처럼 전단을 Local Cartesian System (x, y, z ; i, j, k)에서 속도 분포 $\mu = \gamma y i$ 에 따라 간단히 표현할 수 있다.

일반적인 시스템이 $H=Hj$ 를 이루는데 이를 Case A라고 부른다면 따라서 Case B와 C의 경우는 $H=Hi$, $H=Hk$ 라고 상대적으로 정의할 수 있다. 대부분의 자성 유체를 사용하는 클러치, 브레이크 그리고 댐퍼 등은 아래의 그림에서 보여주는 것처럼 Case A인 경우이고, 개발된 MR finishing (이하 MRF) System의 경우는 Case C의 경우와 유사하다고 할 수 있다.

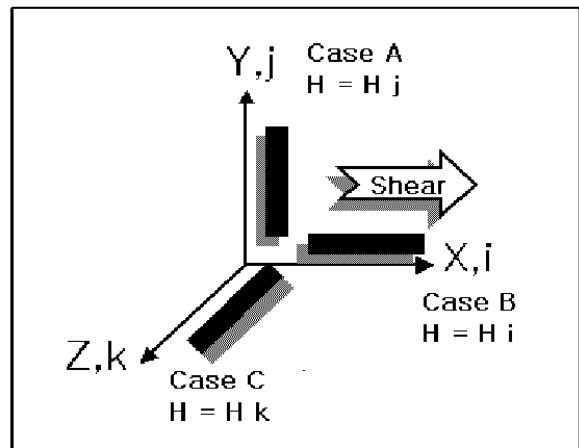


Fig. 2 Three fundamental orientations between magnetic field and shear directions

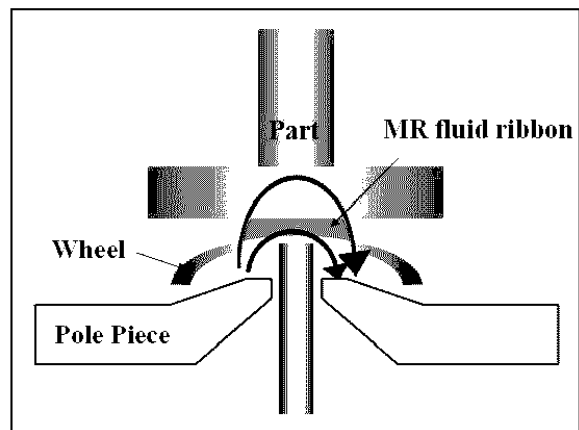


Fig. 3 Cutaway view of the MRF system

MR 유체에 의한 연마가공은 Fig. 3과 같이 연마 재가 첨가된 MR 유체의 띠가 공작물과 휠 사이에

좁아지는 틈새에서 가공영역 (Polishing Spot)이 형성되며 이루어진다. 가공영역의 크기가 작으므로 비구면과 같은 복잡한 형상의 연마가 가능하며, 기존의 피치 폴리싱과는 달리 비접촉식 가공이므로 피 가공물의 표면하층의 파손이 거의 없으며 연마량 제어의 재현성이 우수한 가공방법이다.

3. 실험장치 및 실험조건

3.1 Magnetorheometer 제작

자기유변 유체를 이용한 연마가공에 있어서 주된 관심 영역은 연마가 일어나는 자장내의 영역인데 자극은 자성 유체를 Stiffen하게 하기 위하여 자장을 제공하는데 자극 사이의 중앙부에서는 가장 강한 자장이 형성되고 수직방향으로 구배를 갖게 된다. 자장은 유리 표면보다 철의 표면이 높으므로 철의 표면에서는 자성 입자가 압축되어 비자성 연마입자를 유리 표면으로 밀어내는 역할을 하게 되는 것이다.

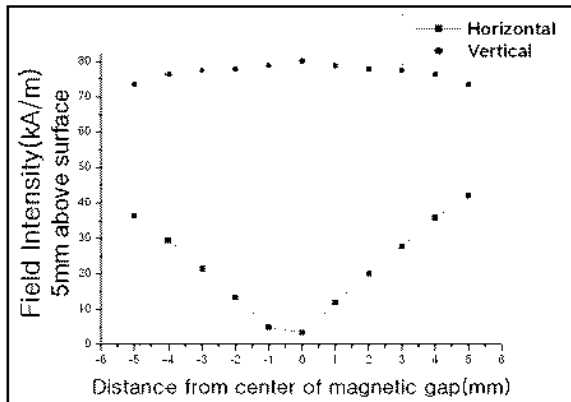


Fig. 4 The field distribution in the polishing zone

Fig. 4는 연마가 이루어지는 영역의 자장 분포를 가우스 미터(Gauss meter)를 이용하여 측정된 후에 수평과 수직 자장 분포를 나타낸 것으로 수직 방향에 대한 자장은 중심에서 거의 0을 나타내고 있지만 수평 방향 성분의 자장의 세기는 거의 최대값을 가지는 것을 볼 수 있다. 수직 방향의 자장 세기가 떨어지기 시작하는 위치에서 자성 유체에 의한 폴리싱이 이루어지기 때문에 결국 이 그림을 통해 가공영역에 있어서 수직 방향의 자장은 수평 방향에 비해 상대적으로 중요치 않다는 것을 알 수 있다. 하지만 기존의 여러 리올로지(Rheology) 측정기들은 Fig.2의 Case A와 같은 모델의 경우에 적합한 것으로 연마가공에 유효한 특성들을 이해하기 위해서는 Case C의 경우에 일어나는 여러 유동학적 특성들을 측정하기 위한 장치가 필요하다. 따라서 기존의 측정기기로선 항복응력 등 기계적인 특성을 측정하기에는 한

계가 있다. 그 때문에 다양하게 구성되는 자기유변 유체 조직의 성상을 역학적으로 정확히 해석하기 위해 새로운 Magnetorheometer를 설계 제작하였다. 설계된 Magnetorheometer는 크게 토크센서, DC 모터, 원통형 전자석, 자성유체를 담은 원통과 Ring 형의 플레이트로 이루어져 있다. Fig.5의 개략도에 나와 있듯이 자성유체는 원형의 전자석 위에 올려져 있는 원형통의 Shaper에 담겨져 있게 된다. 전자석에 전류가 인가되어 자장이 형성하게 되면 Shaper 안의 자성 유체는 MR Polishing의 가공영역에 나타나는 Fig.2의 Case C와 같은 형태로 띠를 이루게 되고 이 때 모터에 의해 회전하는 Ring plate가 자성 유체에 접촉하면서 토크센서에 의해 측정된 값을 통하여 연마 공정 중에 일어나는 자성 유체의 점성과 전단력을 예측하도록 하였다. Fig. 6은 실제 제작된 장치이다.

magnetorheometer

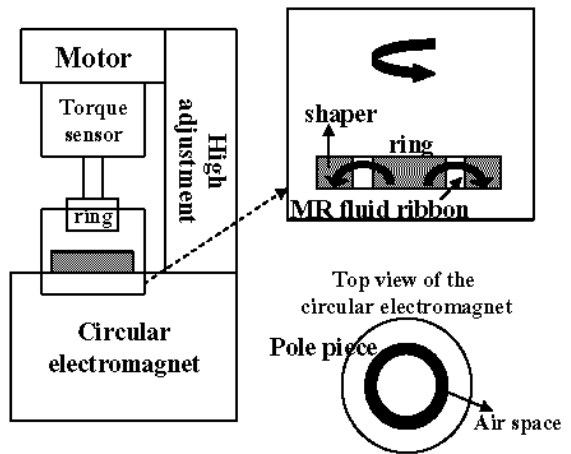


Fig.5 Schematic diagram of the Magnetorheometer

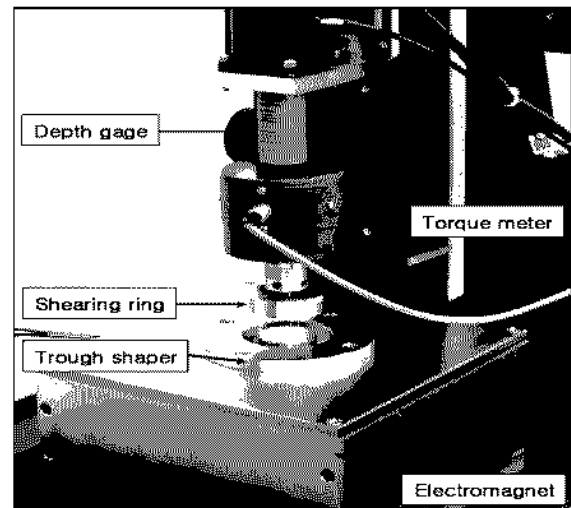


Fig. 6 Photograph of the Magnetorheometer

3.2 전자석의 해석

Fig. 7은 설계된 전자석을 Ansys를 이용하여 연마가 이루어지는 영역의 자장분포를 해석한 것이고, 가우스 미터를 이용하여 측정한 후, Fig. 8에 수평과 수직 자장분포에 대한 값을 Ansys로 해석한 값과 비교하여 나타내었다. 전자석은 2930회 정도의 코일을 감고 1A의 전류를 흘려 측정한 것으로 수평 방향에 대한 자장의 세기는 중심에서 가장 최대값을 나타내고, 수직 방향에 대한 자장의 세기는 자극에서 멀어질수록 자장의 세기가 약해지는 것을 볼 수 있다. Fig. 8과 같이 Ansys로 해석한 값과 가우스 미터를 이용해 측정한 값이 거의 동일하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

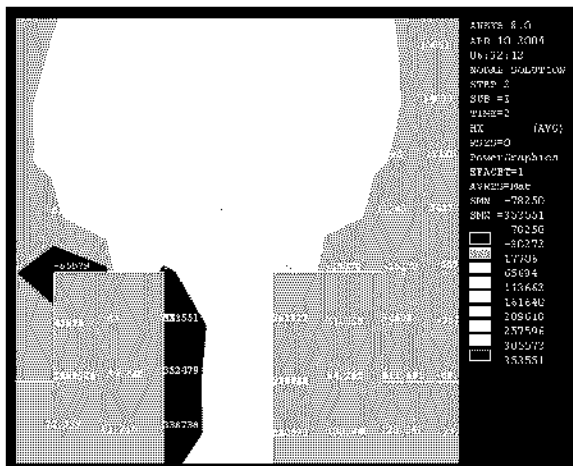


Fig.7 Analysis of the electromagnet which used a Ansys

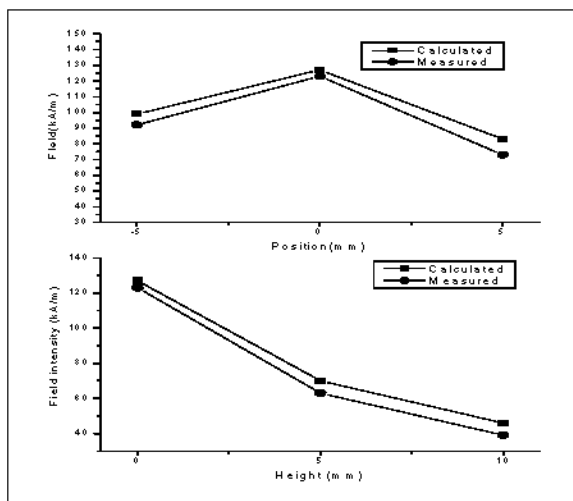


Fig. 8 Composition of Ansys analysis & measurement

3.3 실험조건

Fig. 6의 Magnetorheometer를 사용하여 MR유체의 전단력 실험을 하였다. Table 1에 MR유체의 물성치를 나타내었고, Table 2에는 CI의 함량별 조성을 나타내었으며, Table 3에는 Ampere와 RPM, CI함량에 따른 전단력값을 나타내었다. 전자장을 가하는 전류치는 각각 1A, 2A, 3A를 주고, RPM도 4단계로 나누어 실험하였다. CI의 함량에 따른 전단력 변화, RPM에 따른 전단력의 변화, 그리고 Ampere의 변화에 따른 전단력을 측정하였다.

Table 1 The properties of the iron powder

Micro powder iron	
Color	Gray
Apparent density	2.0~3.0
True density	7.7 Maximum
Average particle diameter	4~6 microns
% iron	99.5 max
% carbon	0.05 max
% oxygen	0.5 max
% nitrogen	0.1 max

Table 2 Composition properties of the MR fluids used for material removal experiment

CI Powder	DI Water	Glycerin	Na_2CO_3
20 %	77.7 %	2 %	0.3 %
30 %	67.7 %	2 %	0.3 %
40 %	57.7 %	2 %	0.3 %

Table 3 The measurement results of shear rate that used a torque

rpm \ amp	CI 20 %			CI 30 %			CI 40 %		
	1A	2A	3A	1A	2A	3A	1A	2A	3A
50	191	382	458	292	726	1019	700	993	1210
100	203	407	484	305	713	1031	713	1031	1133
150	171	382	471	318	751	1057	751	1006	1171
200	191	394	496	356	777	1044	815	1070	1159

4. 실험 결과

Fig. 9와 Fig. 10에서 RPM과 Ampere, CI의 함량에 따른 전단력의 변화를 측정하였다.

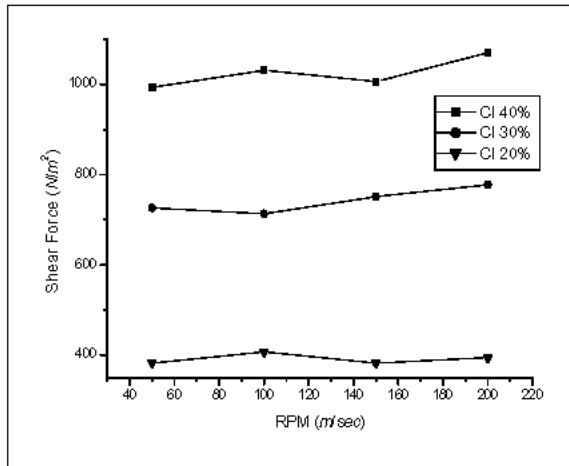


Fig. 9 The results of shear rate by RPM

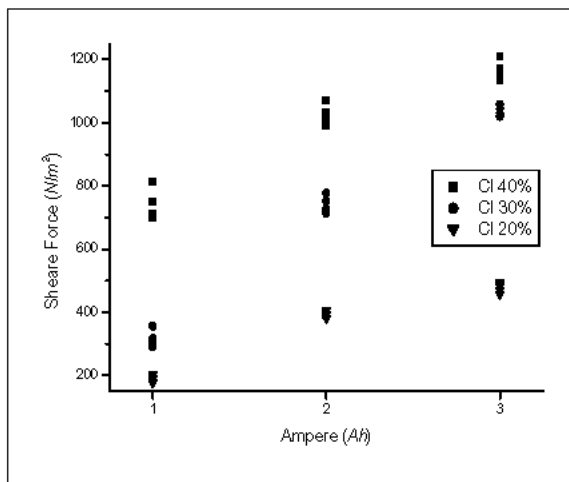


Fig. 10 The measurement results of shear rate by experiment condition

Fig. 9에서는 RPM의 변화에 따른 전단력을 측정 한 것이다. 측정결과 RPM의 속도와는 관계없이 전 단력이 거의 일정하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10에서는 Ampere의 변화와 CI의 함량에 따 른 전단력을 측정한 결과값이다. Ampere를 높일수록 전단력도 비례 상승하고 있음을 알 수 있다. 또한 CI 의 함량에 따른 변화에서는 CI의 함량이 20%나 30% 일 때 보다 40%일 때가 전단응력이 월등히 높게 나 타나고 있음을 알 수 있었다.

따라서 CI의 함량을 적절히 조절하고, Ampere를

적합한 수준으로 조정할 수 있다면 원하는 전단력의 크기조절이 가능해져 자기유변유체에 의한 연마가공 시 아주 좋은 표면을 얻을 수 있을 것을 예상한다.

5. 결론

본 연구에서는 MR유체를 이용한 연마가공에서 기존의 측정기기로는 연마공정에서 일어나는 자장과 가공 방향등 기계적인 특성을 측정하지 못하기 때문 에 다양하게 구성되는 자기유변유체 조직의 성상을 역학적으로 정확히 해석하기 위한 측정기기 (Magnetorheometer)를 설계하여 실험을 통해 전단력을 예측하였다. RPM, Ampere 및 CI함량 등 여러 실험조건들을 변화시키며 전단력을 측정한 결과 CI함 량이 40%이고 3Ampere일 때, 전단응력이 약 1200N/ m² 정도로 가장 높게 나타났다. 이로서 광학 소자 및 부품 등의 고정밀도 평탄화를 위해서 전단력의 조절이 가능하리라 생각되고, 지속적인 연구를 통하여 안정된 시스템을 구축하고 전단력 및 기계적인 특성 의 최적조건을 찾는다면 비구면 렌즈의 평탄화가 가 능할 것이라 예측한다.

후기

본 연구는 국가과학지정연구소의 지원을 통해 수 행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Aric B. Shorey, William I. Kordonski, "Design and testing of a new magnetorheometer," American Institute of Physics, Vol. 70, pp. 4200-4206, 1999.
2. W. I Kordonski, D. Golini, "Progress updata in magnetorheological finishing," Int. J. Mod. Phys B, Vol. 13, pp. 2205-2212, 1999.
3. W. I Kordonski, S. D Jacobs, "Magnetorheological Finishing," Int. J. Mod. Phys B, Vol. 10, pp. 2837-2848, 1996.
4. Cl.Korrmann, H.M.Laun, H.J.Richer, "MR Fluids with nano-magnetic particles," International Journal of Modern Physics B, Vol. 10, pp. 3167-3172, 1996.
5. S.D. Jacobs, S. R. Arrasmith, I. A. Kozhinova, L.L. Gregg, A. B. Shorey, H. J. Romanofsky, D. Golini, "Studies of Material Removal in MRF from Polishing Spots," in Symposium D: Finishing of Advanced Cramics and Glasses, edited by R. sabia, V. A. Greenhut, and Ceramic Transactions, Vol. 102 pp. 185-199, 1999.