재질과 자기장 세기가 자기유변유체의 마찰 특성에 미치는 영향

장봉 · 이광희 · 이철희*

인하대학교 기계공학과

A Study on the Effect of the Material and Applied Magnetic Field Strength on the Friction Characteristics of Magnetorheological Fluids

Peng Zhang, Kwang-Hee Lee and Chul-Hee Lee[†]

Dept. of Mechanical Engineering, InHa University

(Received September 20, 2012 ; Revised December 1, 2012 ; Accepted December 10, 2012)

Abstract – Magnetorheological (MR) fluid belongs to the group of smart materials. In MR fluid, iron particles in base oil form chains in the direction of the applied magnetic field, thus resulting in a variation in the stiffness and damping characteristics of the fluid. Research is being carried out on controlling the stiffness and damping characteristics as well as the tribological characteristics of the MR fluid. In this study, the friction characteristics of MR fluid have been evaluated using three types of materials and magnetic fields of different strengths. The coefficients of friction of the three types of MR fluid are measured, and the relationship between the coefficient of friction and the strength of the applied magnetic field is obtained.

Keywords – magnetorheological (MR) fluid(자기유변유체), friction characteristics(마찰특성), smart materials(지능재료), magnetic field(자기장)

1. 서 론

자기유변유체(magnetorheological fluids)는 자기장의 유무와 자기장의 세기로 기계적인 성질을 제어할 수 있는 유체이다[1,2]. 자기장이 자기유변유체에 가해지게 되면 유체 내부의 철 입자가 자기장 방향에 따라 사슬 모양을 형성함에 따라 강성 및 댐핑 특성이 변하게 된다. Fig. 1은 자기유변유체가 자기장을 가할 경우에 내부의 철 입자가 사슬모양으로 배열되는 것을 나타낸 그림이다. 자기장을 인가하는 순간에 고체 철 입자가 순차적인 구조를 형성하고, 고체 입자의 유동성을 낮추어서 액체의 점성을 증가시키는 것이다. 자기유변유체는 현재 지능재료 연구분야에서 주

목받고 있으며 자동차의 댐퍼, 브레이크, 자동차 드라이브 샤프트의 진동 감쇠 장치 등의 다양한 분야에 적용하기 위해 적극적으로 연구되고 있다[3-5]. 이와 같은 분야에 자기유변유체를 적용하기 위해서는 마찰에 대한 연구가 필수적이다. 대부분 기계부품에서 일어나는 마찰은 두 부품 간의 왕복운동에 의한 마찰이 대부분이다[6]. 자기유변유체와 다른 기계부품이 왕복운동을 하게 될 경우에는 자기유변유체 내부에 포함되어 있는 철 입자가 다른 부품의 표면을 지속적으로 손상시키기 때문에 장치 표면의 마모가 빠르게 진행된다[7-9]. 그 대표적인 예로 자동차의 댐퍼에서는 지속적인 상하왕복운동에 의한 유체와 기계부품의 마찰이 계속적으로 이루어지고 있다. 그렇기 때문에 자기유변유체를 상용화하기 위해서는 높은 내마모성과

[†]주저자 · 책임저자 : chulhee@inha.ac.kr

Fig. 1. Schematic of chain of ferromagnetic particles, forming in the direction of the magnetic field.

내구성을 확보해야 하고, 이를 위해서 표면재료의 변화에 의한 마찰 마모 특성에 관한 연구가 필수적이다[10]. 기존의 자기유변유체에 대한 마찰특성에 관한 연구는 자기장을 가하지 않을 때에 자기유변유체의 마찰학적 성능에 대해서 활발히 이루어지고 있다[11,12]. 그러나 자기유변유체는 자기장의 유무와 세기에 따라서 기계적인 성질이 크게 변화하기 때문에 자기장을 인가할 때 자기유변유체의 마찰학적인 특성은 매우 중요한 요소다.

본 연구에서는 왕복 마찰실험장치를 통하여 자기장 세기, 자기유변유체의 종류, 디스크와 핀의 재질에 따라 각각 자기유변유체의 마찰계수를 측정하고 표면관찰을 통해 마모에 대한 특성을 분석하였다.

2. 실험소개

2-1. 실험장치

Fig. 2(a)는 자기유변유체의 마찰계수의 변화를 측정하기 위한 실험장치이고 Fig. 2(b)는 세부 확대도이다. 실험장치는 DC 모터, 크랭크축 연동 장치, 자기력의 세기를 조절할 수 있는 전자석, 온도센서, 고정장치와 하중 시스템으로 구성된다. DC모터가 작동하면서 크랭크축 연동장치를 통해 핀이 시편 위에서 왕복 마찰 운동을 하게 된다. 디스크 위에 별도의 홀더를 장착하여 디스크 위에 자기유변유체를 올려놓고 핀과 디스크 사이에서 발생하는 마찰계수를 측정해서 데이터를 기록한다. 실험장치의 하부에 전자석을 배열하여 자기유변유체에 자기장을 가하도록 설치하였으며 자기선의 경로는 Fig. 2(b)와 같이 분포되어 있다.

Fig. 2. Reciprocating friction tester: (a) Schematic diagram of a tester; (b) Partial enlarged detail.

Table 1. Conditions of reciprocation test on three types of martials

Variable	Value
Type of MR fluid	132DG
Magnetic field (mT)	0 / 2
Oscillation frequency (Hz)	1
Time (min)	10
Load (N)	5
Material of pin and disk	Aluminum/Brass/Steel
Temperature (°C)	25

2-2. 마찰 재료 종류에 따른 마찰실험

다양한 재질 위에서의 자기유변유체의 마찰 특성을 알아보기 위하여 공학분야에서 광범위하게 쓰이는 철(SM45C), 구리(C2800), 알루미늄(AL6061)을 실험 재료로 채택하여 각각의 재료로 핀과 디스크를 제작하였다. 세가지 재료의 브리넬 경도는 각각 557, 420, 410 N/mm² 이다. 실험에 사용된 핀의 길이는 20 mm 이고 한쪽 끝이 반구 형태로 되어있으며 반구의 직경은 10 mm로 제작되었고, 디스크는 직경 60 mm, 두께 15 mm의 원판 형태로 제작하였다. 실험 1에서는 세가지 재료를 이용하여 자기장을 인가할 때와 인가하지

Table 2. Properties of MR fluids

Property	MRF-122EG	MRF-132DG	MRF-140CG
Appearance	Dark Gray Liquid	Dark Gray Liquid	Dark Gray Liquid
Viscosity, Pa-s @ 40°C (104°F) Calculated as slope 500-800 sec ⁻¹	0.042±0.020	0.112±0.020	0.280±0.070
Density, g/cm ³ (lb/gal)	2.28 (2.48)	2.95-3.15 (24.6-26.3)	3.54-3.74 (29.5-31.2)
Solids Content by Weight, %	72	80.98	85.44
Flash Point, °C (°F)	>150 (>302)	>150 (>302)	>150 (>302)
Operating Temperature, °C (°F)	-40 to +130 (-40 to +266)	-40 to +130 (-40 to +266)	-40 to +130 (-40 to +266)

Table 3. Conditions for reciprocation test on various strength of magnetic field

Variable	Value
Type of MR fluid	122EG/132DG/140CG
Magnetic field (mT)	2/3/4
Oscillation frequency (Hz)	1
Time (min)	10
Load (N)	5
Material of pin and disk	Aluminum
Temperature (°C)	25

않았을 때로 나누어서 각각 왕복 마찰 실험을 수행하였다. Table 1은 실험1을 수행한 실험조건이다. 실험조건은 마찰계수의 변화에 대한 경향을 알아보기 위해서 하중과 속도를 낮게 설정하였다. 실험 1에서는 자기장을 2 mT로 일정하게 가하며 자기장을 가했을 때와 가하지 않았을 때로 나누어서 시간에 따른 마찰계수의 변화를 통하여 실험 데이터를 분석하였다. 결과 그래프는 실험 데이터에서 나타난 마찰계수의 10초당 평균값을 구하여 만들었으며 실험 후에 광학 현미경으로 자기장 부하 유무에 따른 시편의 마모 상태를 관찰하여 비교하였다.

2-3. 자기장 세기에 따른 마찰실험

자기유변유체의 점성은 자기장의 세기에 따라 달라지므로 이는 마찰계수에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 실험 2에서는 자기장의 세기를 각각 2,3,4 mT로 설정하고, 자기유변유체의 종류에 따른 마찰계수 변화를 분석하였다. 실험데이터는 초당 1000개씩 기록하며 결과 그래프는 실험 1과 같이 마찰계수의 10초당 평균값을 구하여 만들었다. 실험 후에 광학현미경으로 디스크의

실험 전후의 마찰표면 흔적을 관찰하며 비교하여 마모 상태를 확인하였다. Table 2는 실험 2에서 사용한 자기유변유체의 물성치를 나타내며 Table 3는 실험 2를 실행한 실험조건을 나타낸 표이다.

3. 실험결과 및 논의

3-1. 시편 종류에 따른 마찰계수 변화

실험1에서 핀과 디스크 재질에 따른 자기유변유체의 마찰 특성을 조사하기 위해 온도를 25°C 상태로 유지하였으며 알루미늄, 구리, 철의 세가지 재료를 자기장을 가했을 때와 가하지 않았을 때로 실험을 진행하였다. Fig. 3는 시간에 따른 세 가지 재료의 마찰계수 변화를 나타낸 그래프이다. 전체적으로 자기장을 인가하지 않은 경우의 마찰계수보다는 자기장을 인가할 때의 마찰계수가 더 크게 나타나고 있다. 세가지 재료 중에서 구리의 마찰계수 변화가 가장 작고 알루미늄과 철의 경우는 자기장의 유무에 의한 마찰계수의 변화가 매우 크다. Fig. 4는 자기장 유무와 시편 재료 종류에 따른 평균 마찰계수를 나타낸 그래프이고, 자기장의 유무에 따라 재료의 평균 마찰계수가 변하는 것을 확인할 수 있다. 자기장을 인가하지 않은 경우에 마찰계수가 높은 순서는 철, 구리, 알루미늄이다. 하지만 자기장을 가한 경우에는 마찰 계수는 철이 가장 큰 마찰계수를 나타내고 있으며 다음이 알루미늄, 구리 순서로 큰 것을 확인할 수 있다. 자기장이 부하되는 경우에 자기유변유체 내부의 철 입자들은 디스크 표면에 정렬되며 이는 마찰 및 마모 특성에 큰 영향을 미친다. 특히 경도가 가장 낮은 알루미늄의 경우 이러한 철 입자들로 인해 자기장이 부하되는 경우 불규칙한 마찰계수 변화를 나타낸다. 철 재질의 경우에는 자기장을 가할

Fig. 3. Time histories of friction coefficients for different materials (time of 10 min, load of 5 N, oscillation frequency of 1 Hz, magnetic field of 2 mT).

경우에 시편 자체가 자화 된다. 이 때 자기유변유체 내부에 있던 철 입자들이 자화된 시편의 표면에 달라 붙게 된다. 이 철 입자들에 의해서 편이 시편의 표면을 움직일 때 저항을 받게 되므로 다른 재질에 비해서

Fig. 4. The average value of coefficient of friction with respect to material and magnetic field condition.

Fig. 5. Optical microscope micrographs of aluminum, brass, and steel disks after the tests: (a), (c), (e) without magnetic field; (b), (d), (f) under magnetic field.

마찰계수의 변화가 크게 나타났다고 볼 수 있다. 또한 자성체인 철의 상대투자율은 200~400이며 비자성체인 알루미늄과 구리의 상대투자율 1보다 훨씬 크기 때문에 철로 만든 디스크를 통과하는 자기장 세기를 감소시키므로 실험결과에 영향을 미칠 수 있다. 자기장을 가할 경우에 마찰계수가 크게 나타나는 이유는 다음과 같다. 실험의 윤활 상태는 경계윤활이며 외부 자기장이 인가 되면 자기유변유체 내부의 철 입자들이 자기장의 영향을 받아 Fig. 1과 같이 자기장의 방향에 따라 배열되

며 자기유변유체는 액체에서 반고체 상태로 전환된다. 자기유변유체의 상태가 변하기 때문에 자기유변유체의 철 입자들이 자유롭게 이동하지 못하게 되며 철 입자들이 시편의 표면에 붙어있게 된다. 즉, 마찰 시편들의 접촉 점 주위에 저항력을 갖고 있는 철 입자가 연속적으로 분포하게 된다. 이렇게 붙어 있는 철 입자가 판과 디스크 사이에서 일어나는 왕복 마찰운동에 영향을 주기 때문에 마찰계수가 증가된다고 볼 수 있다. Fig. 5는 실험 후에 광학 현미경을 이용하여 시편 표면의 마모흔적을 찍은 사진이며 마찰운동의 방향은 화살표로 표시되어 있다. Fig. 5중에 (a) (c) (e)는 각각 자기장을 부하하지 않았을 때 알루미늄, 구리, 철의 마모표면이고 (b) (d) (f)는 각각 자기장을 부하할 때 알루미늄, 구리, 철의 마모표면이다. 시편 표면은 왕복마찰운동으로 인해 운동방향으로 마모흔적이 형성된다. 자기장을 부하하면 자기유변유체의 유동성이 낮아지며 유체 내부의 철 입자들이 잘 움직이지 않게 되므로 철 입자들에 의한 마모 현상이 심해지므로 자기장을 부하하지 않을 때 보다 마모 표면의 흔적이 뚜렷하게 나타나며 자기유변유체의 철 입자의 흔적이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

3.2. 자기장 세기에 따른 마찰계수변화

자기장의 세기가 마찰계수의 크기에 영향을 미치는 정도를 확인하기 위하여 실험 2를 수행하여 자기유변유체의 종류와 자기장의 크기에 따른 마찰계수 변화를 측정 및 분석하였다. Fig. 6은 자기장의 세기 변화에 따른 세 가지 자기유변유체의 마찰계수 변화를 나타내는 그래프이다. Fig. 6(a)에서는 122EG의 내부에 포함되어 있는 철 입자가 상대적으로 적기 때문에 자기장의 세기에 따라 마찰계수의 변화가 크게 나타나지 않는 것을 볼 수 있다. 132DG의 경우에는 자기장 세기는 2, 3 mT이었을 때 마찰계수가 크게 변화하지 않았지만 자기장 세기가 4 mT로 증가할 때 마찰계수는 0.2에서 0.4 이상으로 크게 증가하는 것을 나타냈다. Fig. 6(c)에서는 자기장의 세기가 커질수록 마찰계수가 커지는 것이 명확하게 나타나고 있다. 전체적으로 보면 자기장을 인가하였을 때, 모든 자기유변유체에서 자기장의 세기가 증가하면 마찰계수가 증가하고 자기장의 세기가 감소하면 마찰계수도 감소하는 현상이 나타나고 있다. 이와 같은 현상이 나타나는 이유는 자기장을 인가하는 경우 자기유변유체 내부의 철 입자들이 자기장 방향으로 정렬을 하게 되고 정렬되는 힘은 자

Fig. 6. Time histories of friction coefficients for different MR fluids and magnetic fields (time of 10 min, load of 5 N, oscillation frequency of 1 Hz).

기장의 세기와 철 입자의 수와 관계가 있기 때문이다. 따라서 자기장의 세기가 커지는 경우 철 입자들이 정렬되는 힘이 커지게 되고 시편 표면에 철 입자들이 강하게 부착되고 있으므로 이에 따라 마찰계수가 커지는 것으로 생각할 수 있다. 또한 철 입자의 수가 많을수

Fig. 7. Average value of friction coefficient with respect to types of MRF and the strength of magnetic field.

Fig. 8. Optical microscope micrographs of aluminum disks after the tests: (a) MR fluid 122EG; (b) MR fluid 132DG; (c) MR fluid 140CG.

록 자기장이 작용하였을 경우 시편 표면에 많은 철 입자들이 부착되어 저항력으로 작용할 수 있다. 이러한 원인에 의하여 핀과 디스크 사이의 마찰계수가 증가된다고 볼 수 있다. Fig. 7은 자기장의 세기 및 자기유변유체의 종류에 따른 평균 마찰계수를 나타내며 자기유변유체의 평균 마찰계수는 자기장의 세기가 커질수록 커지는 것을 확인할 수 있으며 자기유변유체의 마찰계수가 자기유변유체의 종류에 따라 달라지는 것을 확인할 수 있다. 각 자기유변유체 실험의 마찰계수의 크기 순서는 140CG, 132DG, 122EG이며 이는 Table 2와 같이 나타낸 자기유변유체의 철 입자의 함유량의 크기와 비례한다. 실험 후 다른 종류의 자기유변유체를 사용한 시편의 마모 상태를 Fig. 8을 통해서 확인할 수 있다. 마모표면 상태 분석을 통해 자기유변유체 내부에 철 입자의 함유량이 높은 자기유변유체를 사용한 시편의 표면에서 마모흔적이 뚜렷하게 관찰되며 표면마모 정도의 순서는 140CG, 132DG, 122EG로 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

이번 실험에서는 핀과 디스크의 재료 종류, 자기장의 세기와 자기유변유체의 종류에 따른 마찰 계수 및 표면을 측정하고 실험결과 비교분석을 통하여 자기유변유체의 마찰 및 마모 특성에 관한 연구를 하였다. 자기유변유체의 마찰 및 마모 특성은 다음과 같다.

1. 자기유변유체는 자기장을 인가하면 자기유변유체 내부의 철 입자들이 일정하게 배열하여 저항력이 증가하므로 자기장을 인가하지 않을 때보다 더 높은 마찰계수를 나타낸다.

2. 실험 시편의 경도, 자기장의 투자율이 다르기 때문에 마찰계수의 변화가 다르게 나타나고 있다. 자기장을 인가하지 않은 경우에 마찰계수가 높은 순서는 철, 구리, 알루미늄이며 이는 재료 경도 크기의 순서와 일치한다. 자기장을 가한 경우의 마찰 계수는 철, 알루미늄, 구리 순서로 나타나며 철의 마찰계수 변화가 가장 크게 나타난다.

3. 자기장을 인가할 때 자기유변유체 내부의 철 입자들이 일정하게 배열하여 유체의 유동성이 제한되므로 철 입자가 마모에 많이 관여하게 된다. 이 때문에 자기장을 인가하지 않을 때보다 마모량이 많아져 시편에 뚜렷한 흔적을 나타낸다.

4. 서로 다른 세 가지 자기유변유체를 사용하여 자

기장을 2 mT에서 4 mT까지 부하하였을 때 각 자기유변유체의 마찰계수는 자기장 세기가 커질수록 증가 한다는 것을 알 수 있었다.

5. 자기유변유체 내부에 있는 철 입자의 비율은 마찰계수에 영향을 주는 주요 원인이며 실험결과에서 마찰계수는 MRF-140CG, MRF-132DG, MRF-122EG순서로 자기유변유체 내부에 포함되어 있는 철 입자의 함유량의 순서와 같다.

자기유변유체의 마찰 특성의 조사를 통해 자기유변유체와 관련된 연구 및 다양한 응용분야에서 자기유변유체의 마찰 특성을 효율적으로 발휘할 수 있다

감사의 글

본 연구는 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임. (2010-0025763) 또한 본 연구는 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략기술인력양성사업으로 수행된 연구 결과입니다.

참고문헌

1. Qiu. H. Z., Yan. H., Zhang. P., Liu. Q. and Tang L., "Friction Properties of Carbonyl Iron-based magnetorheological fluid," *Tribology*, Vol. 29, No. 1, pp. 61-67, 2009.
2. Song. W. L., Choi. S. B., Choi J. Y. and Lee C. H., "Wear and Friction Characteristics of Magnetorheological Fluid Under Magnetic Field Activation," *Tribology Transactions*, Vol. 54, No. 1, pp. 616-624, 2011.
3. Furst. E. M. and Gast. A. P., "Micromechanics of Magnetorheological Suspensions," *Physical Review E*, Vol. 61, pp. 6732-6739, 2000.
4. Bossisa. G., Lacisb. S., Meuniera. A. and Volkova. O., "Magnetorheological Fluids," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 252, pp. 224-228, 2002.
5. Song. W. L., Choi. S. B., Lee. D. W. and Lee. C. H., "Micro-precision Surface Finishing using Magnetorheological Fluid," *Technological Sciences SCIENCE CHINA*, Vol. 55, pp. 56-61, 2012.
6. Huang. J., Zhang. J. P., Yang. Y. and Wei. Y. Q., "Analysis and Design of Cylindrical Magneto-Rheological Fluid Branke," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 129, pp. 559-562, 2002.
7. Iyengar. V. R., Alexandridis. A.A., Tung. S. C. and Rule. D. S., "Wear Testing of Seals in Magnetorheological Fluids©," *Tribology Transactions*, Vol. 47, No. 1, pp. 23-28, 2004.
8. Ahn. K. K., Truang. D. Q. and Islam. M. A., "Modeling of a Magneto-rheological (MR) Fluid Damper using a Self Tuning Fuzzy Mechanism," *Mechanical Science and Technology*, Vol. 23, pp. 1485-1499, 2009.
9. Singh. A. K., Jha. S. and Pandey. P. M., "Magnetorheological Ball End Finishing Process," *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 27, pp. 389-394, 2012.
10. Wong. P. L., Bullough. W. A., Feng. C. and Lingard. S., "Tribological Performance of a Magneo-Rheological Suspension," *Wear*, Vol. 247, pp. 33-40, 2001.
11. Sohn. J. W., Choi. S. B., Lee. C. H. and Cho. M. W., "Wear Characteristics of Magnetorheological Fluid Under Boundary Lubrication," *Advanced Materials Research*, Vol. 79-82, pp. 83-86, 2009.
12. Seok. J. W., Lee. S. O., Jang. K. I., Min. B. K. and Lee. S. J., "Tribological Properties of a Magnetorheological (MR) Fluid in a Finishing Process," *Tribology Transactions*, Vol. 52, pp. 460-469, 2009.