

## 전자기장 해석을 이용한 자기점성 유체 클러치 코일 작동부 설계

송 준 한<sup>1)</sup> · 최 득 환<sup>1)</sup> · 전 종 균<sup>\*1)</sup> · 권 영 철<sup>1)</sup> · 이 태 행<sup>2)</sup>

선문대학교 기계공학과<sup>1)</sup>, 공주대학교 신소재공학부<sup>2)</sup>

### Design of Magneto-Rheological Clutch Coil Operation Unit using Electro Magnetic Field Analysis

Jun-han Song<sup>1)</sup> · Dook-hwan Choi<sup>1)</sup> · Chong-keun Chun<sup>\*1)</sup> · Young-chul Kwon<sup>1)</sup> · Tae-haeng Lee<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Mechanical Engineering, Sunmoon University, Chungnam 336-708, Korea

<sup>2)</sup>Division of Materials Engineering, Kongju National University, Cheonan 330-717, Korea

(Received 7 August 2008 / Accepted 19 January 2009)

**Abstract** : Recently, there has been an active study about smart fluid to control the vibration, in which MR fluid is evaluated as most efficient because it can generate different bonding forces based on the intensity of the external magnetic fields. This paper attempts to find a mechanism that, under limited conditions during a clutch production that uses such dynamic characteristic, defects the maximum intensity of electromagnetism. Using the finite element analysis program, we predicted a change within the bonding force of the MR fluid occurring inside the clutch when it is subjected to an increased electric current. In addition, we analyzed the change in the magnetic intensity when the coil comprising the coil control center is switched to multiple lines from the standard single line, to find a mechanism that can maximize the effect. Based on this analysis, we developed the clutch and tested its function, hoping to widen future MR fluid's range of application.

**Key words** : Magneto-rheological fluid(자기 점성 유체), Clutch(클러치), Coil operation unit(코일 작동부), Electro magnetic field analysis(전자기장 해석), Magnetic flux density(자속 밀도)

#### Subscripts

$\tau$	: stress
$\tau_y$	: yield stress
$\dot{\gamma}$	: fluid shear rate
$\mu$	: viscosity
$JS$	: current density
$A$	: coil area
$N$	: number of turn
$I$	: current
$f$	: magnetomotive force

#### 1. 서론

자동차에 적용되는 변속기는 수동변속기와 자동 변속기 두 종류가 있다. 이들 변속기와 엔진을 연결 시켜 주는 장치가 클러치이다. 자동차용 오토클러치는 수동변속기에서 조작 시 클러치 조작을 자동화하여 운전자의 편의성을 향상시키고 연비를 기존의 방식과 동일하게 유지할 수 있다는 장점을 가지고 있지만 보급은 크게 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 그 이유는 기존의 오토클러치 시스템에는 기계적인 마찰클러치를 그대로 적용하여 제어성능이 미흡하기 때문이다.

본 논문에서는 최근 적용분야가 넓어지고 있는

\*Corresponding author, E-mail: ckchun@sunmoon.ac.kr

자기 점성 유체(Magneto-Rheological Fluid, MRF)를 매개체로 사용하는 새로운 방식의 클러치를 개발하고자 한다. MR 유체를 이용한 클러치는 기계적 마찰과 에너지 소모가 적으며 빠른 응답을 가지고 있다. 이러한 MR 유체 관련 기술은 화학, 기계, 항공 우주분야 뿐만 아니라 군수 사업에 이르기까지 그 적용 범위가 매우 광범위하고 낮은 원가로도 고부가가치 창출이 가능해 경제적 영향도 상당히 크다고 할 수 있다.<sup>1)</sup>

코일로부터 발생하는 자기장의 세기에 따라 결합력의 세기를 달리 나타내는 MR 클러치의 성능을 최대로 발휘하기 위해 전자기장 해석을 수행하고 그 결과를 토대로 제한된 조건하에서 최대의 자기장 효과를 나타낼 수 있는 설계 방법을 찾아 보고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 Magneto-Rheological Fluid

자기 점성 유체(Magneto-Rheological Fluid, MRF)는 작동 유체와 자화 성질을 가지는 직경 1~수십  $\mu m$  크기의 입자들로 이루어진 유체로서 자기장(Magnetic field)이 인가되지 않을 시에는 Fig. 1(a)와 같은 뉴토니안(Newtonian) 유체의 성질을 가지지만 외부로부터 자기장이 인가되게 되면 Fig. 1(b)와 같이 자기장의 흐름 방향에 따라 입자들이 체인을 형성하게 되고 그로 인해 전단 응력을 발생시키는 빙햄(Bingham) 유체의 성질을 가지는 유체를 말한다.<sup>2)</sup>

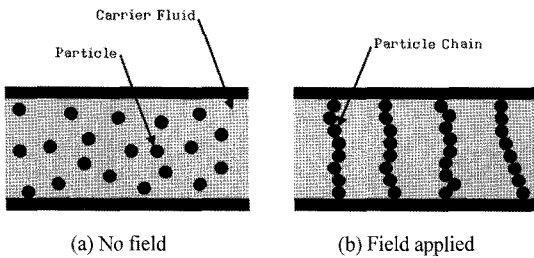


Fig. 1 Characteristic of MR fluid

Bingham 유체는 식 (1)과 같이 점성  $\mu$ 와 전단 변형률 속도인  $\dot{\gamma}$ 에 의해 생기는 응력과 자기장(H)의 함수형태로 나타낼 수 있다.

$$\tau = \tau_y(H) + \mu \dot{\gamma} \quad (1)$$

MR 유체는 작용하는 자기장에 대한 반응속도가 빠른 특징을 가지고 있으며 자기장의 변화에 대한 응답시간(Response Time)이 보통 수 msec로 알려져 있다. 그러므로 실시간 제어가 가능하며 생산 및 장치의 동작 시에 첨가될 수 있는 불순물의 영향이 적고 독성이 없어 어느 환경에서나 안전하다는 장점이 있다.

MR 유체의 항복 응력이 변화하는 메커니즘은 ER(Electro-Rheological Fluid, ERF) 유체와 유사하고 자장과 전장이라는 점이 다를 뿐이다. 특히 발생하는 항복 응력의 크기에 관해서는 MR 유체가 20~50 배 정도이고 고전압을 이용할 필요가 없는 점으로 MR 유체의 적용가능성이 높게 평가 되는 근거로 알려져 있다.<sup>3)</sup>

### 2.2 MR 클러치

MR 유체를 이용한 동력전달장치는 Fig. 2와 같이 원통형과 평판형의 형태로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 기존의 유체 클러치의 형상과 유사한 형태의 평판형 MR 클러치를 제작하였다.

MR 클러치는 하우징과 입·출력 축의 동력을 전

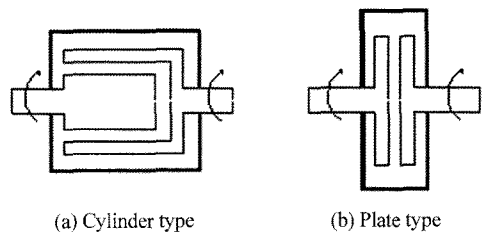


Fig. 2 Two types of MR fluid power train

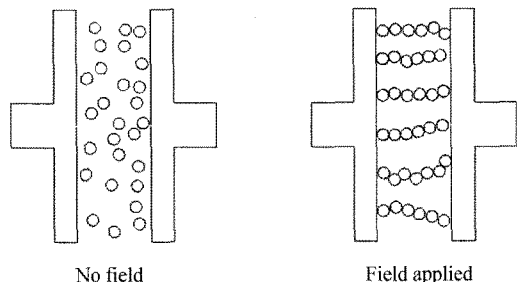


Fig. 3 MR effect in MR clutch

달하는 원판 디스크, 자기장을 형성해 주는 코일 작동부로 나눌 수 있다.

하우징 내부에는 Fig. 3과 같이 MR 유체를 주입함으로써 자기장 인가 시 MR 유체의 결합력이 발생되고 그로 인해 입력 축의 회전을 출력 축으로 전달할 수 있게 한다.<sup>4,5)</sup>

### 3. 전자기장 해석

MR 클러치의 형상 설계 시 인가되는 전류에 따른 클러치 내부에서의 자로의 흐름, 자속 밀도의 비교를 통한 MR 유체의 결합력을 높일 수 있는 코일 작동부 설계를 위해 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS/Emag 2D를 이용하여 코일로부터 발산되는 전자기장 해석을 수행하였다.<sup>6)</sup> 전자기장 해석 시 사용한 각 자기회로의 물성특성은 계산의 편의를 위해 각 부분별로 동일한 물성치를 사용하였기 때문에 절대적인 값보다는 각 모델별 성능 비교가 바람직하다.

본 연구에서 설계한 클러치는 Fig. 4와 같이 2차원 축대칭(2-D Axisymmetrics) 형태인 점을 고려하여 유한요소해석을 위한 모델링 시 전체의 형상을 모델링하지 않고 Fig. 4와 같이 단면의 1/2 부분에 대한 모델링을 실시하여 해석을 수행한다.

외부에서 인가되는 전압에 반응하여 코일에서 발생하는 전자기장이 하우징을 통해 디스크 사이에 주입된 MR 유체에 도달하여 유체의 결합력이 발생

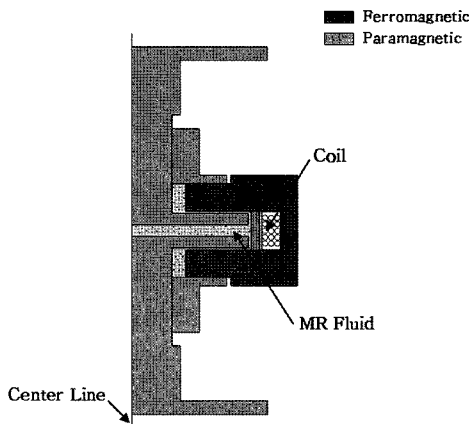


Fig. 4 Modeling for Finite Element Analysis (Case 1-single line)

Table 1 Type of magnetic substance and relative permeability of variety materials

Material	Type	Relative permeability
Water	Diamagnetic	0.99999
Copper	Diamagnetic	0.99999
Air	Paramagnetic	1.000004
Alluminum	Paramagnetic	1.000021
Nickel	Ferromagnetic	600
Mild steel	Ferromagnetic	2000

되면 입력 축의 회전을 출력 축으로 전달될 수 있도록 투자율이 높은 강자성체(Ferromagnetic)와 약자성체(Paramagnetic)를 적절히 사용해야 한다.

MR 클러치의 해석을 위해 2차원 8 절점을 갖는 magnetic solid element를 사용하였다. 이 요소는 Voltage와 Current를 바로 입력하는 해석과 회로연계해석(Circuit Coupling Features)에 사용할 수 있는 요소이다.

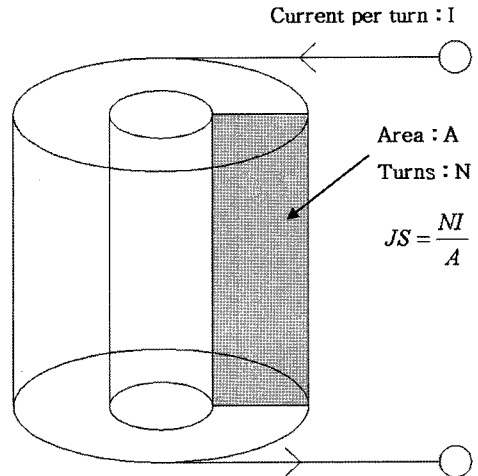


Fig. 5 Current fed electrical coil

외부로부터 인가되는 전류가 DC 전류인 MR 클러치의 경우 전자기장 해석을 위해서 전류밀도 (Current Density, JS)의 입력을 필요로 한다. 전자기장 해석 시 입력되는 전류밀도는 식 (2)와 같이 코일의 권선수(Number of turn, N), 전류(Current, I), 코일의 단면적(Coil Area, A)으로 계산되어 진다.

$$JS = \frac{NI}{A} \tag{2}$$

### 3.1 단선 방식의 코일 작동부 해석

외부에서 인가되는 전류의 증가에 따라 디스크 사이(Fig. 6, Path A-B)를 통과하는 자속 밀도의 세기를 비교해보기 위해 전류의 세기를 0.2 A에서 2.0 A 까지 0.2 A씩 증가 시키며 해석을 수행했다. 해석을 통해 전류의 증가에 따른 결합력 증가의 타당성을 증명해 보기 위함이다.

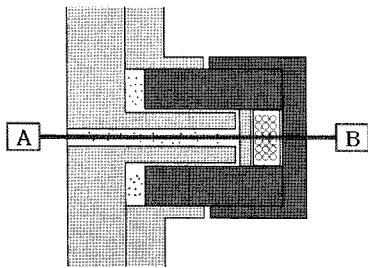


Fig. 6 Magnetic flux density measuring point

Fig. 7은 코일 작동기 내부에서의 자장의 흐름(2-D Flux Line)과 자속 밀도의 분포(Magnetic Flux Density Sum)을 출력한 그림이다. 해석 결과 인가되는 전류의 세기에 관계없이 자속 밀도의 분포나 자장의 흐름은 동일함을 알 수 있다. 코일에서 발생한 전자기장이 투자율이 높은 금속에 따라 이동하는 것을 확인 할 수 있고 MR 유체의 결합력에 관계하지 않는 부분에 대해서 손실이 없음을 알 수 있다.

측정 위치(Fig. 6, Path A-B)에서의 자속 밀도를 비교해 보면 전류의 세기가 증가함에 따라 디스크 사이를 통과하는 자속 밀도의 세기도 증가함을 알 수 있다(Fig. 8). 이는 입력되는 전류의 세기가 증가하면 유체의 결합력이 발생하여 축력 축으로 전달되는 입력 축의 전달률이 증가할 수 있다는 것을 보여 준다.

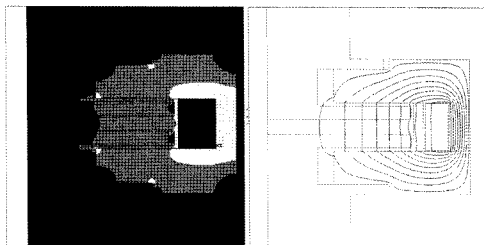


Fig. 7 Magnetic flux density and 2-D flux line in core (Case 1 at 2.0 A)

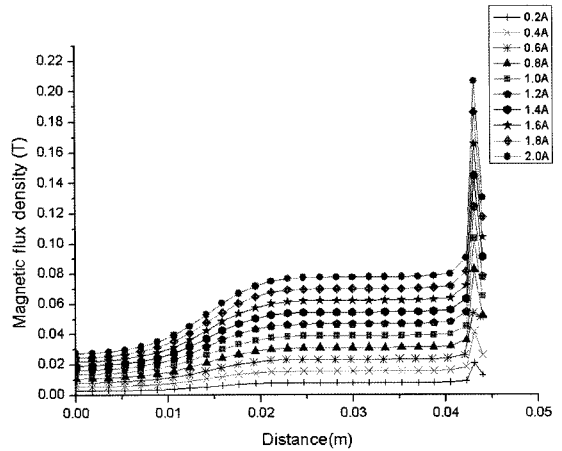


Fig. 8 Magnetic flux density at path A-B (0.2 A ~ 2.0 A)

실제 설계 시 코일의 권선수와 코일의 지름 등의 변수에 따라 코일 사용 길이가 정해지게 되고 그에 따라 코일 자체에서 발생하는 저항과 외부에서 전자기장의 형성을 위해 인가할 수 있는 전압의 제약으로 코일에 인가할 수 있는 전류의 세기가 한정되어 있다.

이러한 설계상의 제약을 고려하여 식 (3)을 통해 보면 알 수 있듯이 코일 작동기를 한 줄의 코일만을 사용하는 것보다 지름이 작은 두 줄의 코일을 사용함으로써 코일의 권선수(N)에 비례하여 증가하는 자기력의 세기(Magnetomotive Force,  $f$ )의 특성을 이용하여 강한 결합력을 가지는 클러치를 설계할 수 있을 것으로 기대된다.

$$f = NI \tag{3}$$

### 3.2 다선 방식의 코일 작동부 해석

제한된 조건 하에서 강한 결합력을 발생시키기 위해서 코일 작동부를 기존의 단선 방식이 아닌 다선 코일 방식으로 설계하고자 한다.<sup>7)</sup>

전자기장 해석을 통해 기존 단선 방식(Case. 1)과 다선 방식(Case. 2)의 성능 비교를 위해 Fig. 9와 같은 모델링을 실시하였다. 이는 앞서 수행한 해석과 코일 작동부를 제외한 부분에 대한 치수와 재료의 물성치, 인가되는 전류의 세기는 동일하게 수행하였다.

앞서 수행한 해석과 동일한 면적을 가지는 코일 작동부를 두 부분으로 분리시킨 후 지름이 작은 코

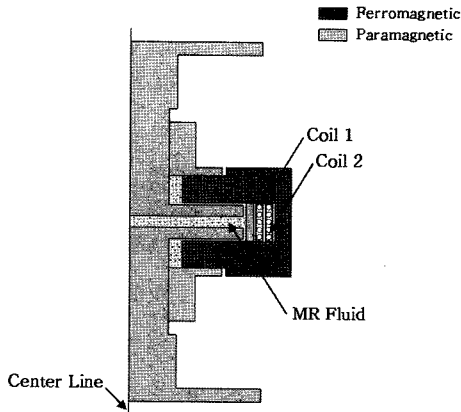


Fig. 9 Modeling for Finite Element Analysis (Case 2-dual line)

일을 두 가닥 사용하는 경우에 대한 해석을 수행하였다. 코일의 지름이 작아지게 되면 코일 자체의 저항은 높아지게 되지만 한 가닥의 코일이 가지는 권선수가 단선 방식에 비해 작아지게 되기 때문에 한 가닥의 코일에서 발생하는 코일의 저항은 결과적으로 작아지는 설계가 가능하다.

다선 방식의 코일 작동부는 같은 공간에서 단선 방식의 지름이 큰 코일보다 권선수를 증가시킬 수 있기 때문에 단선 방식에 비해 강한 기자력의 생성을 기대할 수 있다. 해석 결과 클러치 내부에서 일어나는 자속 밀도의 분포나 자장의 흐름은 Fig. 10에서 확인 할 수 있듯 앞서 수행한 해석과 동일하게 나타났다. 자속 밀도가 MR 효과를 나타낼 수 있는 방향으로 분포 되었고 MR 효과에 영향을 미치지 않는 부분으로의 손실이 없다.

자속 밀도의 비교를 위해 앞서 Fig. 6의 A-B 와 동일한 위치에서 측정하였다. Fig. 11의 그래프를 통해 확인 할 수 있듯이 두 번째의 경우(Case 2)가 첫 번째 경우(Case 1) 보다 강한 자속 밀도를 생성하고 있다. 이를 토대로 다선 방식의 코일 작동부를 가지는 경우가 클러치의 결합력을 더욱 강하게 발생 시킬 수 있을 것으로 기대된다.

앞서 언급했듯 두 가닥의 경우(Case 2)는 첫 번째의 경우(Case 1)보다 코일 자체의 저항을 줄일 수 있으므로 제한된 전압에서 인가 시킬 수 있는 전류의 세기를 증가시킴으로써 MR 유체의 동적 특성을 잘 이용할 수 있음을 확인하였다.

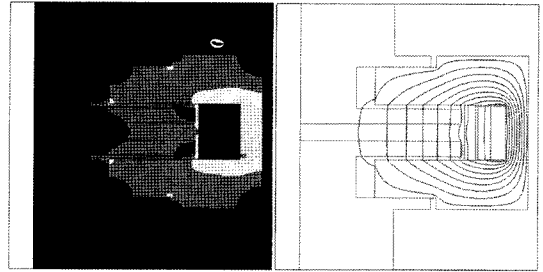


Fig. 10 Magnetic flux density and 2-D flux line in core (Case 2 at 2.0 A)

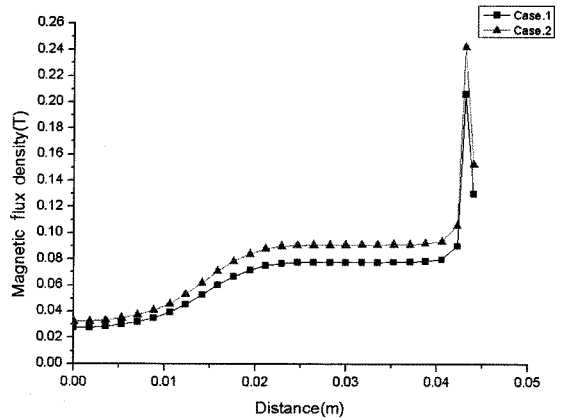


Fig. 11 Comparison of Magnetic flux density at path A-B (2.0 A)

#### 4. 클러치 제작 및 성능 실험

전자기장 해석을 통해 제한된 크기의 코일 작동부에서 코일로부터 발생하는 전자기장의 세기를 최대한 발휘시키기 위해 코일 작동부 내부를 다선 방식의 코일을 사용함으로써 기존의 단선 방식보다 강한 자기력을 생성시킴을 입증하였다.

전자기장 해석을 기초로 하여 다선 방식의 코일 작동부를 가지는 MR 클러치를 제작하여 실제 차량 엔진 실험 장치에 장착하여 그 성능을 확인하고자 한다.

##### 4.1 MR 클러치 형상

Fig. 12는 본 연구에서 실험을 위해 제작한 클러치의 형상이다. 앞서 언급한바와 같이 평판형의 클러치를 기본으로 하며 전류 인가 시 MR 유체의 결합력으로 입력 축의 회전력을 출력 축으로 전달할 수 있는 형태이다. 코일 작동부는 앞서 수행한 전자기장 해석에 기초하여 지름 0.35 mm의 두 가닥의 코

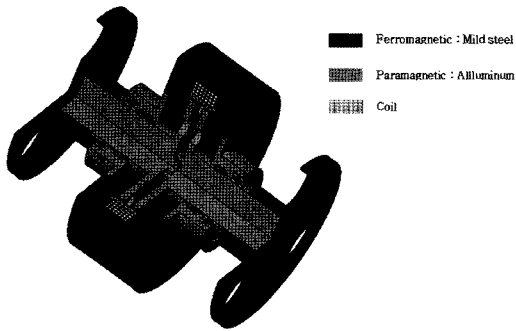


Fig. 12 The final shape of MR clutch

일을 사용하여 설계하였으며 MR 효과를 위한 자로의 형성을 위해 코일 작동부 주위의 재료는 투자율이 높은 순철을 사용하여 코일에서 발생하는 자기장이 원활하게 흐를 수 있도록 설계하였으며 나머지 부분은 투자율이 낮은 알루미늄 소재를 사용하였다. 소재의 적절한 사용으로 원하는 자기장의 흐름을 구현할 수 있고 불필요한 부분으로의 자기장 손실을 막을 수 있다.

전체 길이는 클러치가 회전체임을 감안하여 회전에 영향을 주지 않는 범위 내에서 설계하였으며 전체 외경과 디스크의 외경은 코일의 저항이 불필요하게 커지지 않고 높은 기자력 효과를 나타낼 수 있는 범위로 설계 하였다.<sup>8)</sup>

### 4.2 실험 장치 구성

제작된 MR 클러치의 성능실험은 실차 엔진 실험 장치를 이용하여 실시하였다. 엔진 측에서 발생하는 회전율을 MR 클러치에 인가되는 전류의 세기에 따라 출력 측으로 전달되는 정도를 측정해 볼 수 있다. 테스트 장치는 엔진 작동부와 입력 측의 센서 출력 측의 다이노미터로 구성하였다.

Fig. 13은 실험의 대략적인 구성을 나타낸다. 외부에서 12 V의 전압을 공급하게 되면 파워서플라이에 연결된 전류 제어기를 통해 MR 클러치에 전류를 공급하게 된다. 입·출력 측의 회전율은 입·출력 측의 센서로부터 나오는 신호를 데이터 수집 장치로 전송하고 수집함으로써 측정할 수 있다.

### 4.3 실험 결과

실험은 정확한 측정을 위해 시스템의 안정성을 고려하여 엔진 측의 회전수가 250 rpm일 경우와

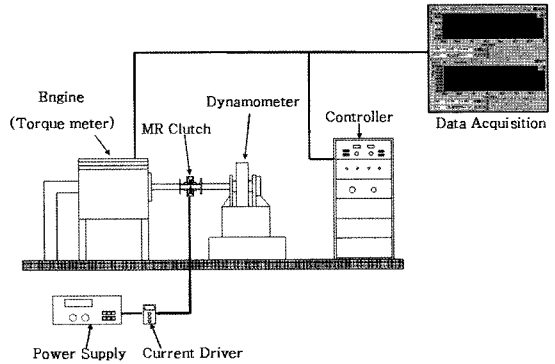


Fig. 13 Composition of engine experimental equipment

1070 rpm일 때 MR 클러치로 인가되는 전류가 0 A에서 2.5 A까지 0.5 A씩 증가시켜가며 출력 측의 회전율을 측정하는 실험을 수행 하였다.<sup>9)</sup>

실험 결과 인가되는 전류가 증가함에 따라 높은 결합력을 나타내는 MR 유체의 특성에 따라 입력 측에서 출력 측으로 전달되는 회전수가 증가함을 알 수 있다. 입력 측에서 출력 측으로 전달되는 회전수는 인가되는 전류의 세기에 따라 일정한 속도로 수렴하게 되는 지점을 가지게 된다. 수렴 시간은 인가되는 전류의 세기가 증가할수록 빨라짐을 실험 결과 그래프(Fig. 14, 15)를 통하여 확인 할 수 있다.

이는 앞서 수행한 전자기장 해석의 결과에서 살펴본 바와 같이 코일에 인가되는 전류의 세기가 증가하면 코일에서 발생하는 자기력의 세기도 증가하게 되고 그에 따라 MR 유체의 결합력이 강해지기 때문에 클러치의 회전에 변화를 가져온다는 것을 알 수 있다.

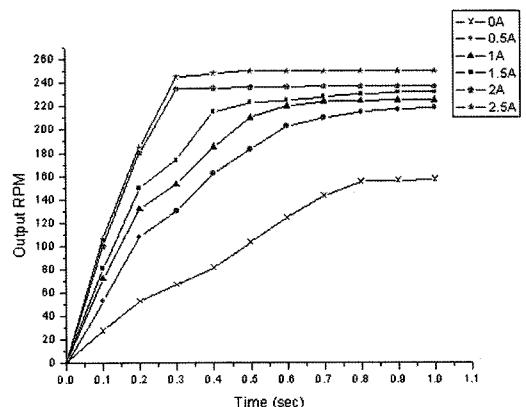


Fig. 14 Experimental result (input 250 rpm)

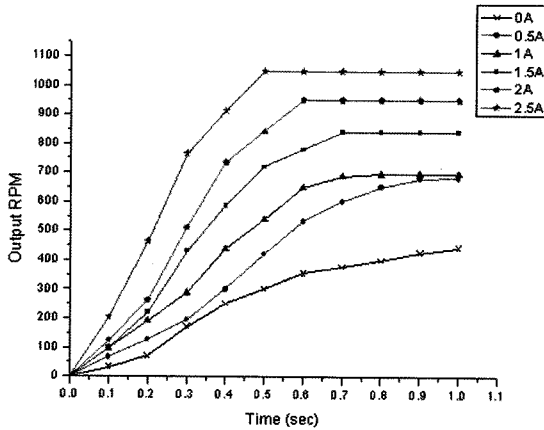


Fig. 15 Experimental result (input 1070 rpm)

### 5. 결론

MR 유체의 결합력에 따라 다른 효과를 나타내는 MR 클러치의 성능을 최대한으로 발휘하기 위해 전자기장 해석을 통한 코일 작동부의 해석을 실시하였다. 해석을 통해 외부에서 인가되는 전류의 세기가 증가할수록 MR 유체의 결합력을 증대시켜 MR 클러치의 성능을 향상시킴을 입증하였고 설계상의 제약과 한정된 전압 사용으로 인한 코일의 한계를 극복할 수 있는 방안으로 다선 방식의 코일 작동부에 대한 해석을 수행하였다. 시작품 제작을 통해 그 성능과 실현 가능성을 입증하였다.

전자기장 해석 근거를 토대로 차후 MR 유체 응용 장비 설계 시 원하는 사용 범위에 대한 코일 작동부 설계 방법의 대안을 제시하였다.

해석 후 제작한 클러치를 실차 엔진 실험 장치에 장착 후 실험을 수행하여 그 성능을 입증하였지만 실제 차량에 장착하기 위해서는 차량이 주행하게 되는 노면의 상태나 차량의 상태, 운전자의 습관에 따른 능동적인 대응을 할 수 있는 클러치에 관한 연구가 추가적으로 요구된다. 이를 위해 완성차 제조업체와 협력을 통한 연구가 필요하다.

### References

- 1) M. R. Jolly, J. W. Bender and J. D. Carlson, "Properties and Application of Commercial Magneto-Rheological Fluids," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.10, No.1, pp.5-13, 1999.
- 2) R. W. Phillips, *Engineering Applications of Fluids with a Variable Yield Stress*, Ph. D. Dissertation, University of California, Berkeley, 1969.
- 3) Y. K. Ahn, "A Modeling of a Variable damping Mount Using MR Fluid," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol.10, No.4, pp.1338-1343, 2000.
- 4) D. Lampe, A. Thess and C. Dotzauer, "MRF Clutch Design Considerations and Performance," *Proc. Actuator 98*, Bremen, 1998.
- 5) J. S. Lee, K. K. Kim, H. J. Kim, and H. S. Kim, "Analysis of 4WD Viscous Coupling Characteristics at Steady State," SAE No.98370025, pp.21-31, 1998.
- 6) W. H. El-Aouar, *Finite Element Analysis Based Modeling of Magneto Rheological Dampers*, M. S. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2002.
- 7) S. P. Kelso, "Experimental Characterization of Commercially Practical Magnetorheological Fluid Damper Technology," *Proceedings of SPIE Conference on Smart Materials and Structures*, San Diego, 2001.
- 8) B. Kavlicoglu, F. Gordaninejad, C. A. Evrensel, N. Cobanoglu, M. Xin, C. Heine, A. Fuchs and G. Korol, "A High-Torque Magneto-Rheological Fluid Clutch," *Proceedings of SPIE Conference on Smart Materials and Structures*, San Diego, 2002.
- 9) W. S. Lee, T. G. Kim, N. K. Hur and D. Y. Jeon, "Design Analysis and Experimental Evaluation of An MR fluid Clutch," *Trans. KSME(B)*, Vol.24, No.8, pp.2143-2150, 2000.