

자기장 및 유동 해석을 이용한 자기유변 클러치의 성능 예측 및 검증

이우섭* · 김태균* · 허남건** · 전도영**
(2000년 1월 5일 접수)

Design Analysis and Experimental Evaluation of an MR Fluid Clutch

Woosub Lee, Taegun Kim, Namkun Hur and Doyoung Jeon

Key Words: MR Fluids(자기유변유체), MR Clutch(자기유변클러치), CFD(전산유체역학), FEM(유한요소법), Magnetic Field(자기장)

Abstract

An MRC(Magneto-rheological Clutch) has a great potential of application because of its good transmissibility, little wear-out and fast response to electrical control signal. Though many MRCs have been developed for years, there has not been an research on the method to predict the performance of MRC except the simplified mathematical models. But the simplified mathematical models do not fit well since their performance has close relations with shapes of clutches and viscosity distribution throughout the fluids caused by applied magnetic fields. In this study, the CFD and FEM analyses were applied to various shape of MRC and the methods were examined in experiments.

1. 서 론

MR 유체를 이용한 클러치는 기계식 클러치의 접촉/비접촉 방식과 달리 어떤 범위에서 제어신호에 따른 연속적인 전달력의 변화를 보일 수 있는 장점이 있어 그 응용가치가 매우 높다. 이러한 자기유변 클러치가 갖추어야 할 성능으로는 제어신호에 대한 빠른 응답과, 넓은 범위의 동력 전달비, 정확한 체결력 등인데, 자기유변 클러치가 쓰이는 환경은 매우 다양하기 때문에 그 환경마다 사용자가 필요로 하는 성능의 클러치를 설계하기 위해서는 형상과 자기유변 유체에 가해지는 자기장과의 관계를 통해서 자기유변 클러치의 성능을 예측할 수 있어야 한다.

지금까지 자기유변 클러치의 성능을 예측할 수 있도록 제시된 여러 가지 수학적인 모델들은 내부 유체의 유동이 일차원적인 흐름이라는 가정에서 유체의 유동을 간략화 시킴으로써 Disk Mode와 Bell Mode로 구분되는 형상에만 해석의 기반을 두고 있다.⁽¹⁾ 그러나 이러한 형상에 대한 해석에만 기반을 두고 있는 모델들은 제한된 유동의 조건하에서만 MR 클러치의 성능을 예측할 수 있으며, 만약 클러치의 형상이 제한된 조건을 벗어나는 유동을 형성하게 되면 실제에 가까운 결과를 예측할 수 없다는 단점이 있다. 또한 대부분의 간략화된 수학적인 모델에서는 유체의 점도가 위치에 따라 일정하다고 가정을 하지만 실제로 자기유변 유체에 작용하는 자기장의 세기는 위치에 따라 다르기 때문에 자기장에 따른 점도분포가 고려된 자기유변 유체의 유동을 구해야만 보다 정확한 성능 예측이 가능하다.

이번 연구에서는 먼저 간략화된 수학적인 해석 방법을 이용해서 자기유변 클러치의 성능을 예측

* 서강대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 서강대학교 기계공학과

E-mail : dyjeon@ccs.sogang.ac.kr

TEL : (02)705-8634 FAX : (02)712-0799

하여 실제 실험과 비교해 보며, FEM을 이용한 자기장 해석과 전산유체를 이용하는 유동해석을 통해서 자기유변 클러치의 성능을 좀더 실제에 가깝게 예측할 수 있는 방법을 모색해 보고 그 결과를 실험 결과와 비교해 봄으로써 타당성을 보이고자 한다.

2. 자기유변 유체의 특성 및 클러치의 형상

자기유변 클러치는 내부에 들어있는 자기유변 유체가 자기장에 반응하여 점도가 변하면서 토크 전달력의 변화를 보이기 때문에, 자기유변 클러치의 성능을 예측하기 위해서는 먼저 자기장과 자기유변 유체 점도와의 관계를 수식화 해야한다.

Fig. 1은 실험에 사용한 장치 구성도를 보여준다. 컴퓨터에서 나온 신호는 전류로 증폭되어 코일에 전달되고, 토크 센서를 통하여 측정된 신호는 컴퓨터에 기록된다.

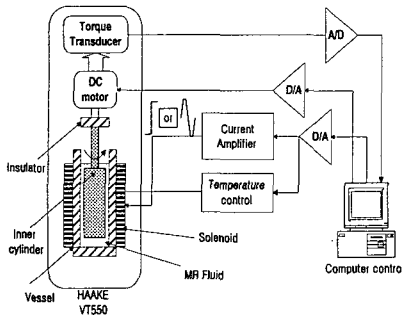


Fig. 1 The experimental apparatus for measuring MR fluid yield strength

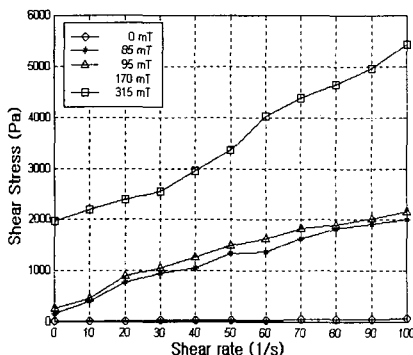


Fig. 2 The relation of shear stress and shear rate

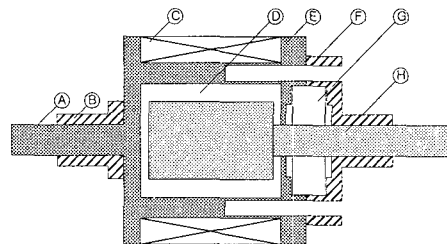
실험에서 구한 자기장 세기에 따른 자기유변 유체의 전단변형률과 전단응력의 관계를 Fig. 2에 나타내었다. 자기유변 유체가 일반적으로 빙햄유체의 특성을 가진다는 가정⁽²⁾에서 빙햄유체의 전단응력을 표현하는 식 (1)의 각 항은 Fig. 2에서 보이는 것처럼 전류가 변할 때 점도와 항복응력이 선형적으로 변하기 때문에 전류에 대한 선형적인 함수 식 (2)와 식 (3)로 정의를 할 수 있다. 이때 B는 자기장의 세기(mT), τ 는 전단응력, τ_0 는 항복응력, η 는 점도, $\dot{\gamma}$ 는 전단변형률 이다.

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} \tag{1}$$

$$\eta = 0.1864 \times B + 0.6067 \tag{2}$$

$$\tau_0 = 5.497 \times B \tag{3}$$

클러치는 내부에 있는 매개체를 통해서 입력축의 토크와 속도를 출력축으로 전달해 주는 장치로써, 자기유변 클러치는 내부에 있는 자기유변 유체의 전단응력을 이용한다. 일반적으로 자기유변 클러치는 회전축에 수직하게 연결된 디스크의 면적에 작용하는 유체의 전단응력에 중심을 두는 디스크 모드와, 회전축 방향에 평행한 실린더의 면적에 작용하는 전단응력에 중심을 두는 벨모드 방식으로 나눌 수 있다. 이번 연구에서는 벨모드를 중심으로한 클러치를 대상으로 했다. 제작된 자기유변 클러치의 형태는 Fig. 3과 같으며 H는 내부 회전체이고 외부회전체 A의 외곽 C에 코일을 감아 자기장이 발생되고 자기장의 세기는 코일에 입력되는 전류로 조절된다. 자기유변 유체는 D부분에 채워진다.



- A : Input member (Aluminum)
- B : Insulator
- C : Coil
- D : Magneto-Rheological fluid
- E : Cap (Aluminum)
- F : Insulator
- G : Rolling element bearing
- H : Output member (Stainless steel)

Fig. 3 Cross section of the MR Clutch

3. 자기유변 클러치 분석

자기유변 클러치의 회전하는 두 원통 사이에서 매개체 역할을 하고 있는 유체의 점성은 클러치의 토크 전달률을 결정하고, 점성은 작용되는 자기장의 형태와 크기에 따라 변하기 때문에 정확한 클러치의 성능 예측을 위해서 먼저 클러치 내부에 형성되는 위치 따른 자기장의 크기를 알아야한다. 이 때 작용하는 자기장은 클러치에 감겨있는 코일의 형태, 클러치 형상과 재질에 영향을 받아 다른 형태로 나타나게 되며 이러한 자기장은 Biot & Savart law의 일반화된 방정식인 식 (4)로 표현된다.⁽³⁾ 이때 B 는 자속 밀도, μ_0 는 재료의 유전율, I 는 전류, R 은 반경, a_R 는 원점에서부터 작용점까지의 방향 벡터이다.

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint_c \frac{dl' \times a_R}{R^2} \quad (T) \quad (4)$$

식 (4)는 일반화된 방정식이기 때문에 제작된 자기유변 클러치에 형성되는 자기장형태를 수식으로 유도하는 것은 거의 불가능하므로, 본 연구에서는 자기장의 형태를 파악하기 위해 유한요소방법(FEM)을 이용한 ANSYS 프로그램을 사용했으며 제작된 자기유변 클러치의 형상을 ANSYS를 이용해서 해석한 후 결과를 가우스미터를 이용해서 몇몇 점에서 측정된 실험결과와 비교하였다.

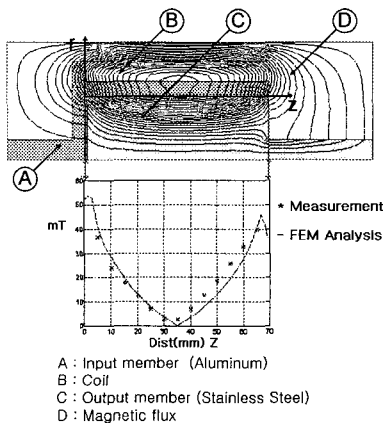


Fig. 4 Comparison of FEM analysis and measurement

Fig. 4에서는 상단에 표시된 Z축 방향으로 거리가 증가할 때 가우스미터를 이용해서 위치에 따라 측정된 수치와 ANSYS를 이용해서 예측한 수치를 비교한 것으로, 두 결과가 비슷하므로 ANSYS를 이용한 해석이 효과적임을 알 수 있다. 따라서 비슷한 형상의 자기유변 클러치의 해석에서도, 위치에 따른 자기장 값에 ANSYS에서 예측한 값을 사용했다. 일반적으로 자기장과 전류는 비례 관계에 있으므로, 0.75A에서 구해진 Fig. 4의 자기장의 크기를 두배로 하면 1.5A에서의 자기장 크기를 알 수 있다.

일반적인 유체의 유동을 나타내는 Navier-Stokes 방정식을 가지고 자기유변 클러치에서 생기는 유체의 유동 방정식을 직접 구하기는 매우 복잡하지만 제한된 조건을 부여함으로써 적절한 수식을 유도 할 수 있으며 자기유변 클러치의 경우에는 다음 조건에서 유도될 수 있다.⁽⁴⁾

- 1) 원통에서의 유동은 r만의 함수로 정의한다.
- 2) 축 방향의 유동은 존재하지 않는다.
- 3) 정상 상태이다.

Navier-Stokes 방정식을 위의 조건에 맞게 적분하여 제작된 자기유변 클러치의 경계조건을 대입하여 정리하면 전단 변형률은 식 (5)와 같으며, 이때 $\dot{\gamma}$ 는 전단 변형률, r_o 와 r_i 는 외경과 내경의 반지름, ω_o 와 ω_i 는 외경과 내경의 각속도이다.

$$\dot{\gamma} = 2 \frac{r_o^2 (\omega_o - \omega_i)}{r_i^2 - r_o^2} \quad (5)$$

여기서 구한 전단 변형률과 가해지는 평균자기장 값을 이용해서, Fig. 2로부터 전단응력을 구한 후 작용하는 안쪽축의 면적에 곱해주면 식 (6)의 형태로 간략화된 모델에서의 토크 예측값이 나온다. 여기서 T는 토크, r_o 와 r_i 는 외경과 내경의 반지름, τ 는 전단응력, L은 출력축의 길이이다.

$$T = \tau \times \text{면적} \times r_i = 2 \tau \pi r_i^2 L \quad (Nm) \quad (6)$$

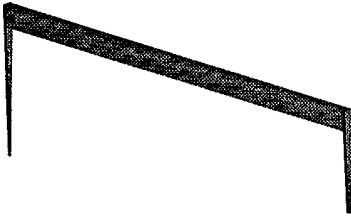


Fig. 5 Computational mesh (Gap=3.5mm)

그러나 이러한 방법은 제한된 조건에서만 성립하고, 만약 클러치의 내경과 외경의 차이가 커지게 되면 위에서 언급한 조건 외의 유동이 형성되면서 예측값의 오차는 커질 것이다. 또한 자기유변 클러치 내부 유동은 자기장 분포에 따라 점도가 변화하게 되고 이에 따라 속도장이 변화하기 때문에 전달되는 토크에 대한 정확한 예측을 위해서는 자기장 해석과 유동장 해석을 동시에 수행하여야 한다. 본 연구에서는 앞에서 설명한 ANSYS를 사용해서 구한 위치에 따른 자기반응 유체의 점도를 사용하며, 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)을 이용한 계산을 수행하여 자기유변 클러치에 걸리는 토크를 구하였다. 계산은 전산유체역학 상용 코드인 Star-CD를 이용하였으며, ANSYS의 자기장 해석 결과에 따른 점도의 변화는 Star-CD의 사용자 프로그램을 통하여 구현하였다.⁽⁵⁾

해석에 사용된 지배방정식은 비압축성 정상유동의 연속방정식과 운동량방정식이며 식 (7)과 식 (8)에 나타내었다. 여기서 ρ 는 밀도, u 는 속도, τ 는 전단응력, x 는 단위벡터, p 는 압력이다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (8)$$

유동해석은 정상 상태에서 안쪽 실린더의 속도가 바깥쪽 실린더와 이루는 속도차이가 0rpm 일 때부터 1500rpm 일 때까지 100rpm 단위로 수행하였다. 또한 바깥쪽 실린더와 안쪽 실린더의 간격이 1mm, 3.5mm, 6mm 8.5mm 일 때 계산을 수행하였으며, 자기장의 변화에 대한 것은 간격이 3.5mm 일 때 0A, 0.75A, 1.5A 의 경우에 대하여

계산을 수행하였다.

Fig. 5는 계산에 사용된 격자의 형상이다. 축사이의 간격이 1mm 일 때와 3.5mm 일 때는 약 40000개의 Cell을 이용하여 계산하였으며, 축사이의 간격이 6mm 일 때와 8.5mm 일 때는 약 80000개의 Cell을 이용하여 계산을 하였다. 유동은 원주방향으로 완전 발달 유동이 됨으로 원주방향으로 $\pi/60$ 의 크기를 선택하여 계산 Mesh를 생성하였으며. 경계조건으로는 원주 방향으로는 Cyclic 경계조건, 회전하는 축의 표면에는 Wall 경계조건을 이용하였다. 바깥쪽 실린더 표면의 속도를 1500rpm 으로 고정시키고, 안쪽 실린더의 표면 속도를 0rpm 에서 1500rpm 까지 바꾸어 가며 계산을 수행하였다.

실린더의 표면에 작용하는 전단응력은 앞에서 구한 점도 분포와 속도분포로부터 식 (9)를 이용해서 구할 수 있다. 여기서 τ 는 전단응력, η 는 점도, r 은 반경, v_θ 는 각도방향의 속도이다.

$$\tau = \mu \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\theta}{r} \right) \right] \quad (9)$$

Fig. 6은 안쪽과 바깥쪽 실린더의 간격이 3.5mm 일 때 바깥쪽 실린더와 안쪽 실린더의 속도차이가 1500rpm 에서 0rpm 까지 변화할 때 축방향으로 변하는 전단응력의 값이며 그림에 자기장의 분포도 같이 나타내었다. 그림으로부터 안쪽과 바깥쪽 실린더의 속도차이가 1500rpm 일 때의 전단응력이 가장 크며, 안쪽 실린더의 속도가 커짐에 따라 축에 작용하는 전단응력이 작아 짐을 알 수 있다. 또한 모든 경우에 있어서 축의 양 끝단에서 전단응력이 전반적으로 크게 나타나고 있다. 이는 양 끝단에서 자기장이 커지고, 이로 인해 점도가 상승하게 되고 또한 속도구배값이 실린더의 양 끝단에서 큰 값을 가지게 되기 때문이다.

실제 자기유변 클러치의 동역학적인 해석에 필요한 토크의 값은 위에서 구한 전단응력을 면적에 따라 위와 같은 적분식 식 (10)으로 구할 수 있다. 이때 T는 토크, r은 반경, A는 면적, τ 는 전단응력이다.

$$T = \int r \tau dA \quad (10)$$

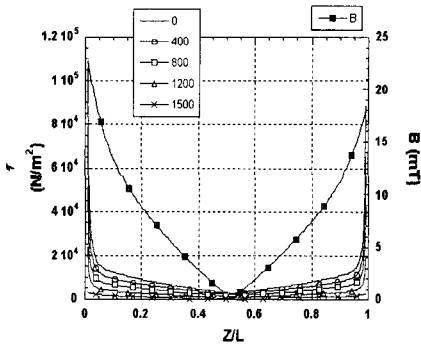


Fig. 6 Shear stress distribution along the axis of cylinder

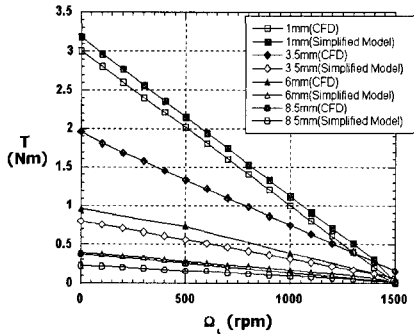


Fig. 7 Variation of transmitted torque for various rotating speed and gap size

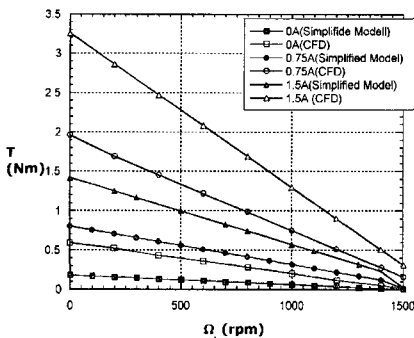


Fig. 8 Comparison of transmitted torque by CFD analysis and simplified model

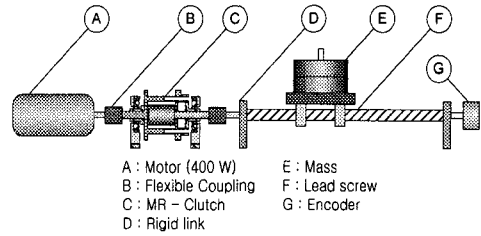


Fig. 9 Experimental set-up for torque measurement

Fig. 7에서는 바깥쪽 실린더와 안쪽 실린더의 간격과 안쪽 실린더의 회전속도 변화에 대한 토크의 변화를 나타내었으며, 전반적으로 축사이의 간격이 커지면 토크의 크기가 작아지는 것을 알 수 있다. 또한 안쪽 실린더와 바깥쪽 실린더의 속도 차이가 커질수록 토크의 크기는 거의 선형적으로 커지는 것을 볼 수 있다. 이것은 안쪽과 바깥쪽의 회전속도 차이가 커지면서 전단응력이 거의 비례하여 커지기 때문이다. 그림에 간략화된 모델의 토크 해석결과를 같이 보였으며, 간략화된 모델의 해석 결과는 간격이 1mm 인 경우에는 CFD를 이용하여 해석한 것과 비슷하지만 간격이 커질수록 값들이 크게 차이가 나고 있음을 볼 수 있다

Fig. 8은 인가된 전류의 크기에 따른 토크의 변화를 안쪽과 바깥쪽의 사이의 간격이 3.5mm 인 경우에 대하여 간략화된 모델과 CFD를 이용하여 해석한 것을 나타낸 그래프이다. 토크값은 회전속도가 변하면서 거의 선형적으로 변하는 것을 볼 수 있다. 전류가 인가되지 않은 경우, 즉 자기장이 없는 경우는 점도가 가장 적은 경우이므로 토크의 값이 가장 적게 됨을 알 수 있고, 전류의 세기가 커짐에 따라 자기장의 영향이 커지면서 점도가 커지게 됨으로 토크가 커지는 것을 알 수 있다.

4. 실험 결과

여러 가지 조건에서 자기유변 클러치의 성능을 측정하기 위해서 Fig. 9와 같은 장치를 구성했다. 이 실험장치는 자기유변 클러치의 입력축을 일정한 속도로 회전시켜줄 경우 자기유변 클러치에서 생기는 토크에 의해 나타나는 출력축의 속도를 측정함으로써 자기유변 클러치의 성능을 측정하는 것이다. 실험은 Fig. 3의 출력축(H) 지름이

48mm, 43mm, 38mm, 33mm인 경우에 대해서 각각 실험을 했으며 점도에 따른 클러치의 반응을 보기 위해 각각의 경우 코일에 0A, 0.75A, 1.5A의 전류를 가해주어 반응을 기록하였다. 이러한 12가지의 조건에서 실험을 반복적으로 수행하고 그 평균값을 취함으로써 시뮬레이션과 비교하는 실제실험으로 사용하였다. 시뮬레이션을 하기 위해서 필요한 이 실험장치의 운동방정식은 식 (11)의 형태로 정의된다. 이때 $\dot{\theta}_{input}$ 은 입력축의 각속도, $\dot{\theta}_{output}$ 은 출력축의 각속도이다.

$$\begin{aligned}
 J_{eq} \ddot{\theta}_{output} + C_{f,eq} \dot{\theta}_{output} &= T_{MRC} + C_{b,eq}(\dot{\theta}_{input} - \dot{\theta}_{output}) \quad (11) \\
 &= T_{MRC} + T_{bearing} \\
 C_{f,eq} &: \text{Friction damping ratio on rigid link} \\
 C_{b,eq} &: \text{Friction damping ratio on bearing of} \\
 &\quad \text{MRC (Fig. 3 G part)}
 \end{aligned}$$

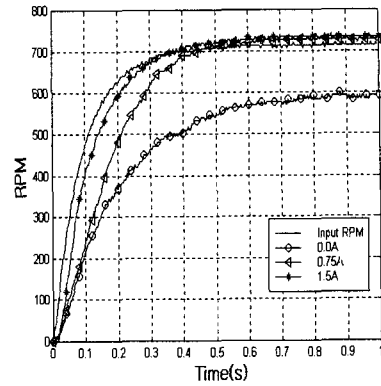
식 (11)에서 각 계수의 값은, 입력모터와 리드 스크류를 직접 연결한 뒤 토크모드 모터를 이용해서 정현파의 토크를 가한 후 구해진 토크와 각도 사이의 관계를 분석하여 식 (12)와 같은 전달함수를 구하며 이를 이용하여 구한다.

$$\frac{\theta_{output}}{T} = \frac{5160.6}{S^2 + 6.1956 S} = \frac{rad}{Nm} \quad (12)$$

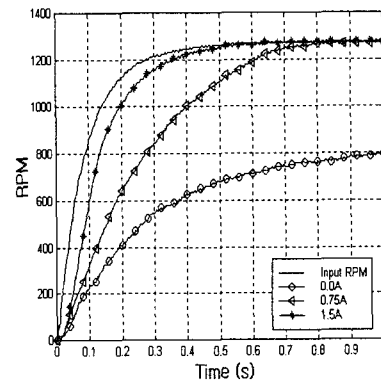
구해진 각 항의 값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 J_{eq} &= 0.00019378 \text{ (kg} \cdot \text{m}^2\text{)} \\
 C_{f,eq} &= 0.0012 \text{ (kg/s)} \\
 C_{b,eq} &= 0.00046251 \text{ (kg/s)}
 \end{aligned}$$

식 (12)의 토크(T)는 자기유변 클러치에 의해서 생성되는 토크 (T_{MRC})와 클러치 내부에 있는 베어링의 마찰력에 의해서 생기는 토크 ($T_{bearing}$)로 구분된다. 참고로 $C_{b,eq}$ 의 값은 실험을 통해서 구했다.

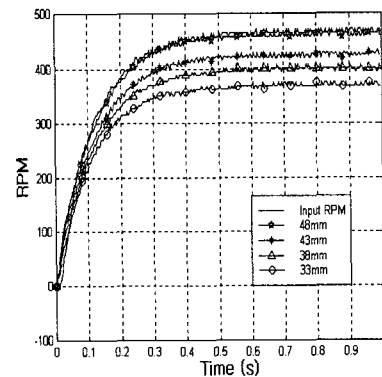


(a) At 735rpm



(b) At 1300rpm

Fig. 10 Response of outer cylinder with different input currents (0A, 0.75A, 1.5A)



(470rpm, 0.75A)

Fig. 11 Response of outer cylinder with different inner cylinder diameters (48, 43, 38, 33 mm)

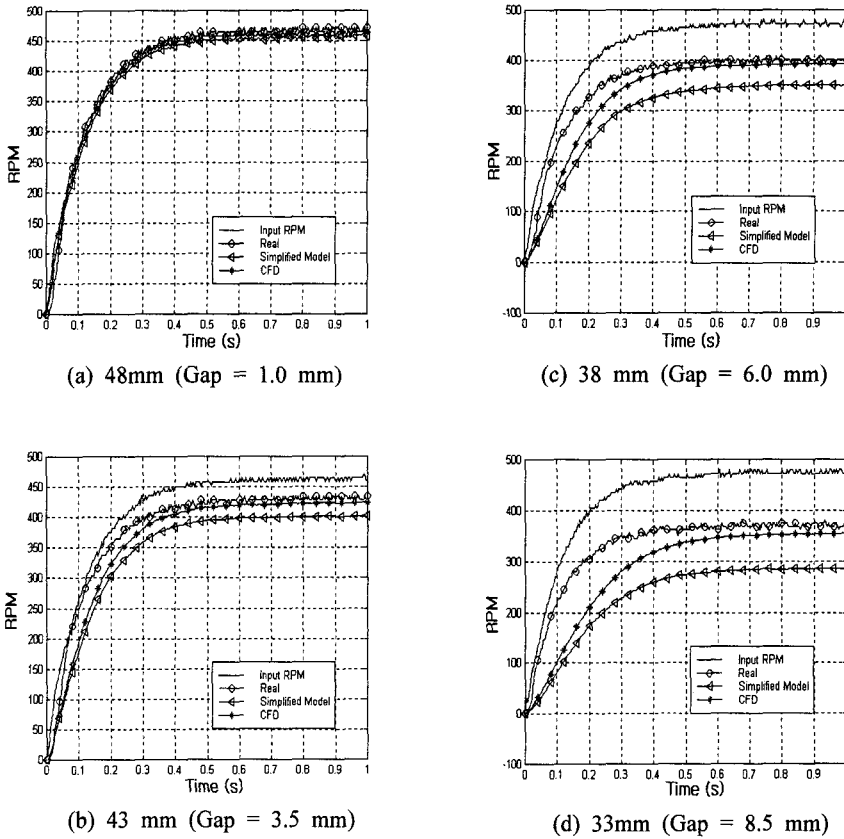


Fig. 12 Comparison of outer cylinder velocity in Experiment, CFD and Simplified Model

시뮬레이션은 앞에서 구한 운동방정식을 룬지-쿠타 방법을 사용해서 구했으며 T_{MRC} 의 항목에 해당하는 토크는, 간략화된 모델에서는 식 (6)을 이용해서 구한 값을, CFD에서는 Fig. 7과 Fig. 8에서 자기장과 상대속도에 대한 각각의 경우에 해석된 토크의 값을 선형보간하여 넣었다.

실험방법에서는 자기유변 클러치에 가해지는 자기장과 입력축의 속도에 따라 변화되는 출력축의 반응을 확인하기 위해 0rpm, 220rpm, 470rpm, 735rpm, 1030rpm, 1300rpm 으로 입력축을 회전시켜 주고, 각각의 경우에 0.0A, 0.75A, 1.5A 로 전류를 가한 후 출력축의 속도를 측정했다. 또한 위의 조건에서 수행하는 실험을 축의 지름이 48mm, 43mm, 38mm, 33mm 인 경우로 변형시키면서 반복적으로 수행하여 형상에 따른 클러치의 반응 관계를 확인해 보았다.

먼저 자기장에 대한 클러치의 반응을 살펴보기 위해서 735rpm, 1300rpm 의 동일한 입력 속도로

입력축을 돌려주고 코일에 0A, 0.75A, 1.5A 로 전류를 변화시켰다. Fig. 10에서 살펴보면 자기유변 클러치는 입력되는 전류에 비례해서 토크가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 코일에 걸리는 전류가 커지면 자기장이 증가하여 유체의 점도가 커지고 이로 인해 동일한 전단변형율에서 발생하는 전단응력 즉 작용하는 토크의 크기가 커지기 때문이다.

다음으로 클러치의 형태에 따른 전달력을 살펴 보기 위해서 470rpm 의 입력속도와 0.75A 의 자기장에서 축의 내경이 감소할 때 출력축 회전속도를 측정하였다. Fig. 11에서 알 수 있듯이 동일한 입력속도와 자기장에서도 출력축의 내경이 작아지면 클러치의 전달력이 감소하며, 그 이유는 같은 크기의 자기장 즉 점도라 해도 내경이 작아지면 출력축의 표면에 생성되는 전단변형률은 작아지게 되고 이로 인해서 전단응력이 작아지기 때문이다. 또한 전단응력을 토크로 변화시켜주는

출력축의 표면적이 줄어들기 때문에 최종적으로 전달되는 토크는 감소하게 되는 것이다.

지금까지는 자기유변 클러치의 특성을 결정하는 자기장과 형상을 변형시킬 때 나타나는 출력축의 반응을 확인했으며, 이러한 자기유변 클러치의 반응은 간략화된 수식적인 모델과 CFD를 이용한 방법을 통해서 예측이 가능하다. 이 때 CFD를 이용한 예측에서는 ANSYS를 이용해서 구한 위치에 따른 자기장의 분포와 점도 분포를 고려해 줌으로써 유체의 유동을 실제에 좀더 근접하게 해석했다.

Fig. 12는 입력축의 각속도가 470rpm 이고 전류가 0.75A 일 때, 실제실험결과와 두 가지 방법으로 예측한 수치를 비교한 것으로, 간략화된 모델의 예측 결과는 내경이 작아지면 정상상태에서는 상대적으로 값이 작아지지만, CFD를 사용해서 예측한 결과는 내경의 지름이 작아져도 정상상태에서는 실제 반응에 가까운 결과를 보이고 있다. 이것은 우리가 예상한 것처럼 내경과 외경의 차이가 커질수록 간략화된 모델에서는 생각하지 않는 방향의 유동 영향이 커지는 것이기 때문이며, CFD를 사용한 방법에서 구한 결과는 정상상태의 실제결과에 근접한 반응을 보이게 된다. 두 가지 예측 방법이 모두 다 실제 실험 결과와 차이를 보이는 지점은 출력축 속도가 수렴해 가는 부분까지이며 이 부분에서의 유동은 유체에 생성되는 상대속도 즉 전단변형률이 계속적으로 변하는 전이상태에 있게 된다. 간략화된 모델과 CFD 예측 방법에서는 유체의 유동이 정상상태라는 가정에서 자기유변 클러치에서 생기는 토크를 구하였기 때문에 유동이 전이 상태에 있는 부분에 대한 예측에서는 오차를 가지게 된다.

5. 결론

기존의 간단한 수식적인 방법으로 클러치의 성능을 예측 할 경우에는 내경과 외경의 차이가 벌어질수록 실험치와 예측치의 차이가 커지는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 오차의 원인은 간략화된 방법에서는 위치에 관계없이 유체의 점도가 일정하다고 가정을 하지만, 실제 유체에는 위치에 따라서 자기장의 분포가 다르기 때문에 점도=

도 위치에 따라 다른 값을 가지게 되기 때문이다. 또한 축 간격이 넓어지면서 점도분포가 위치마다 다른 유체에서 생기는 복잡한 유동을 r방향만의 함수만으로는 정확하게 표현할 수 없기 때문에 간략화된 모델에서의 예측방법으로는 실제 결과에 근접한 결과를 얻을 수 없다.

이 문제를 해결하기 위해서 먼저 ANSYS를 이용하여 각각의 위치에 작용하는 자기장의 크기를 계산해 주고, 이 결과에서 실제 위치에 따른 자기유변 유체의 점도분포를 구한 뒤, CFD를 사용하여 클러치 내부의 유동을 위치에 따른 점도 차이를 포함하여 실제에 근접하게 모든 방향에 대해서 고려해 주면, 클러치의 출력축에 대한 예측값은 기존의 간략화된 수식적인 방법의 예측값과 비교할 때 정상상태의 실제 실험 결과에 매우 근접하다는 것이 확인되었다.

후 기

본 연구는 1998년도 한국학술진흥재단 과학기술기초중점연구(1998-018-E00010)의 지원으로 되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Lampe D., Thess A., Dotzauer C., 1998, "MRF-Clutch-Design Consideration and Performance," *Proceeding of 6th International Conference on New Actuators*, pp. 449~450.
- (2) Weiss Keith D., Duclos Theodore G., Carlson J David, Chrzan Michael J., and Margida Anthony J., 1993, "High Strength Magneto-and Electro-rheological Fluids," *SAE Technical Paper Series*, 932451.
- (3) Cheng D. K., Field and Wave, 1989, *Electromagnetics 2nd Edition*, Addison Wesley, pp. 234~236.
- (4) White F. M., 1989, *Fluid Mechanics 3rd Edition*, McGraw-Hill, pp. 238-239.
- (5) *Computational Dynamics*, 1994, Star-CD version 2.3 manuals.