

# 전기점성 유체를 이용한 동력전달 장치에 관한 연구

## STUDY ON TORQUE CONVERTER USING ELECTRO-RHEOLOGICAL FLUID

이은준\*(부산대 대학원), 박명관\*\*(부산대), 주동우\*(양산전문대)  
 Eun-Jun Lee\*, Myeong-Kwan Park\*\*(Pusan national univ), Dong-Woo Joo\*(Yangsang college)

**Abstract** This paper provides an investigation of torque converter system using ERF (Electro-Rheological Fluid). The torque converter system using ERF is a new conception device because we can change an apparent viscosity of ERF by adapting an electric field. The device was designed by using the equations which were proposed by Carlson et al. The devices based on ERF generally assume one two possible forms. One is the parallel plate type in which the device elements are facing circular disks separated by a flat layer of ERF, The other is coaxial cylinder or Couette types in which the ERF fills the annular space between a pair of coaxial cylindrical electrode. The discussion on this study is specifically for the coaxial cylinder geometry and experiment results show that the measured torque was rapidly increased with the increase of the electric field.

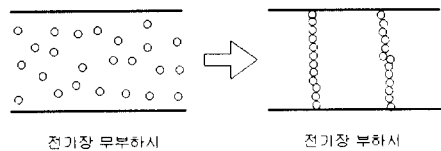
**Key Words** : ERF (Electro-Rheological Fluid), torque converter, apparent viscosity, yield strength, newtonian liquids, bingham liquids, parallel plate type, coaxial cylinder type

### 1. 서론

산업의 급속한 발달에 따라 요구되는 동력전달 장치의 요구조건도 보다 다양해져가고 있다. 일반적으로 산업기기에 사용되는 동력전달 장치는 동력원으로부터 발생하는 회전토크를 필요한 기계요소에 전달시키기 위해 클러치나 치차, 벨트등의 기계요소를 사용하며 이 때문에 소음이나 진동, 부품의 마모등의 문제를 가지고 있으며 다양한 동력전달의 요구조건을 만족하기 위하여 동력전달 장치의 구조가 매우 복잡해지지만 이러한 기계적인 장치로는 가변하는 동력전달에 대해 정확한 제어가 어려우며 잦은 고장의 원인이 되기도 한다.

따라서 본 연구는 동력전달 장치의 설계에 있어서 전기장의 세기에 따라 점도가 변하는 Electro-Rheological Fluid (이하 ER유체)를 사용한 새로운 개념의 동력 전달 장치를 설계·제작하여 그 성능을 평가해 봄으로써 기존의 기계 요소에 의해 동력을 전달 하였을 때 발생하였던 소음, 진동, 부품의 마모등에 관한 부분의 개선을 시도하고 동력전달 장치의 구조를 간단히 하여 제작을 편리를 제공하며 기어나 벨트, 치차등의 기계요소를 사용하지 않고도 동력을 제어할 수 있다는 가능성을 제시하고자 한다.

### 2. ER유체의 일반적 특성



[Fig. 1] 전기장 부하에 따른 ER유체의 거동변화

ER유체에 전기장이 부하되면, [Fig. 1]에서와 같이 분극이 발생된 입자들이 서로 연결하여 전극을 향하여 섬유상 구조를 형성하며 이로 인하여 유체의 항복 전단응력이 변하게 된다. 이와 같이 ER유체의 두드러진 특징은 바로 전기장이 가해짐에 따라 유체의 점성이 변화하는 것인데, 전기장 무부하 시에는 유체입자가 양극이나 음극으로 자유로이 운동하는 뉴토니안(Newtonian) 유체상태에서 전기장 부하시 유체중에 분산된 입자가 체인형 구조를 형성하여 유체가 항복 응력을 갖게되는 빙햄(Bingham) 유체상태로 변하게 되며 이를 수학적으로 표현하면 다음과 같다.

$$\tau = \tau_y(E) + \eta \dot{\gamma} = \alpha E^x + \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

여기서  $\tau$  는 유체의 전단응력,  $\tau_y(E)$  는 전기장(E)

의 함수인 항복전단응력을  $\eta$  는 전단속도비에 영향을 받는 용매의 가점도(apparent viscosity)를, 그리고  $\gamma$  는 전단속도비를 나타낸다. 또  $\alpha$  와  $x$  는 ER유체의 용매의 종류와 점도, 입자의 종류와 중량비, 입자의 수분함량 등 ER유체의 조성조건에 의해 달라지는 고유치이며 실험을 통하여 구할 수 있다.

본 연구에서는 일본 BRIDGESTONE사의 ER유체를 사용하였다. 유체의 점도는 25°C에서 93mPa·s 이고 항복응력은 3KV/mm, 25°C에서 1052 Pa이며 전류밀도는 3KV/mm, 25°C에서 12.3  $\mu A/cm^2$ 이다.

### 3 동력전달 장치의 이론적 배경

본 연구에서 제작한 원통형(coaxial cylinder type) 동력전달장치의 성능을 예측하기 위한 다음과 같은 관계식을 도출하였다.

$$V = \left( \frac{\eta}{\tau_y(E)} \right) \left( \frac{T_{ER}}{T_\eta} \right) P_M \quad (2)$$

$$\frac{h}{R} = 2\pi \left( \frac{\eta}{\tau_y(E)} \right) \left( \frac{T_{ER}}{T_\eta} \right) f \quad (3)$$

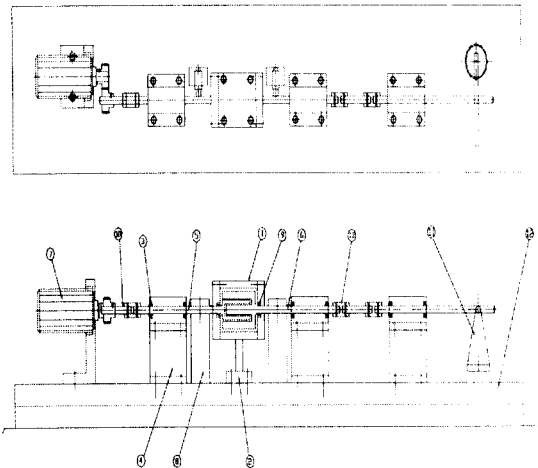
$$P_E = V \cdot J \cdot E \quad (4)$$

여기서  $V$  는 동력장치 내의 실제 유체체적을,  $E$  는 인가된 전기장의 세기(volt/m)를,  $J$  는 전류밀도 ( $A/m^2$ )를 그리고  $P_E$  는 이들 인가된 전기장의 세기와 전압에 의한 전기적 동력( $W$ )을 각각 나타낸다. 이 식들에 의해  $T_\eta$  보다 훨씬 큰  $T_{ER}$ 을 얻기 위해서는  $h/R$ 의 비가 커져야 함을 알 수 있고, 따라서 간극이 크면 클수록 ER유체에 의한 효과가 떨어짐을 알 수 있다. 또  $h/R$ 의 비는  $\eta/\tau_y(E)$ 비에 비례하고, 동력전달 부분에서 유체가 차지하는 체적  $V$ 가  $\eta/\tau_y(E)$ 비에 비례한다는 것을 알 수 있는데 이것은  $\eta/\tau_y^2(E)$ 비가 커지면 체적  $V$ 가 커지게 되어 동력소모가 커지게 된다는 것을 의미한다.

### 제 4 장 동력전달 장치의 설계 및 제작

ER유체를 이용한 실험용 동력전달 장치의 개략도는 [Fig. 2]과 같다. 실험장치는 크게 구동되는 구동축 부분(5)과 동력전달 부분, 전력을 공급하는 고전압 발생장치, 그리고 피동축 부분(6)등으로 구성되어 있다. 동력전달 부분에서 중공 원통은 황동(5)(6)으로 만들었으며 서로 겹쳐진 부분의 길이는 40mm로 고정시켰다. 두 원통 사이의 간극은 각각 2mm,

4mm, 6mm의 3가지로 제작하였으며 두 개의 중공 원통에 대한 동심원을 정확히 맞추기 위해 축을 길게하고 한 축에 대해 각각 2개의 베어링(3)을 설치하여 지지하였고 내부 유동을 육안으로 관찰할 수 있도록 동력전달 장치를 둘러싼 케이싱(casing)부분(1)을 투명한 아크릴 원통으로 제작하였다. 또한 케이싱의 상·하부에 플러그 홀(plug hole)을 뚫어 유체를 주입하거나 교체하는데 사용하였으며 동력장치의 축 회전시 발생할 수 있는 ER유체의 누유문제를 해결하기 위하여 하우징의 양 측면에 오일씰(oil seal)(9)을 설치하였고 고전압 발생에 의한 감전의 위험을 해결하기 위하여 실험장치의 베이스 부분(12)과 각 요소의 결합부분(2)(4)(10)의 재료는 절연체인 나일론 합성수지로 만든 재료를 사용하였다. 각 축 이음은 정확한 축 중심을 맞추기 어렵고 축 중심이 정확히 일치하지 않을 경우 축의 회전시 실험장치의 심한 진동이나 기계요소의 파손을 가져올 가능성이 있으므로 축과 축의 이음 부분은 모두 플렉시블 커플링(flexible coupling)(13)을 사용한 연결 방법을 채택하여 축 연결 부분에서 축 중심의 불일치로 인해 발생할 수 있는 문제점을 보완하였다. 그리고 동력전달 부분에 정확하고 안전한 전압공급을 위해 카본을 이용한 브러쉬(8)를 제작한 후 고전압 발생장치와 연결하여 전압을 공급하였다. 출력축의 끝단부에는 천칭(11)을 설치하여 인가된 전기장에 의해 발생된 토크를 측정하였다.



[Fig. 2] 실험장치 개략도

### 제 5 장 동력전달 장치의 성능시험 및 고찰

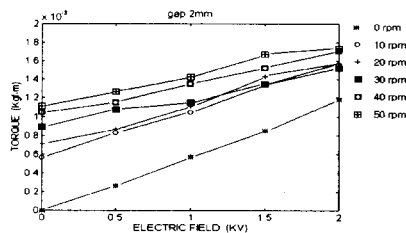
본 연구는 설정된 세 가지 간극에 대해 구동축 모터의 분당 회전수를 0rpm부터 10rpm 간격으로 50 rpm까지 변화시켜가며 각 인가된 전압의 크기에 대

해 피동축에 전달된 토크를 측정하였다.

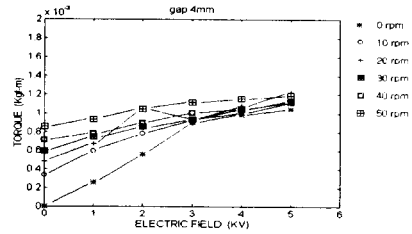
[Fig. 3]부터 [Fig. 5]까지는 각 간극에서, 입력축 모터의 회전수를 0rpm부터 50rpm까지 10rpm간격으로 증가시켰을 때 각 전압별로 발생한 토크를 나타낸다. 간극이 커질수록 같은 크기의 토크를 발생시키기 위한 전력소모가 커진다는 사실을 알 수 있으며 이결과는 식(2), 식(3), 식(4)를 통해 예상되었던 간극이 크면 ER유체의 효과가 떨어지고 전력소모가 커진다는 사실을 확인해 주고 있다.

[Fig. 6]부터 [Fig. 8]은 각 간극에서, 인가 전압을 0 KV부터 서서히 증가시키며 모터의 각 입력 회전수별로 발생하는 토크를 나타낸다. 이 들 그래프를 통해 회전수가 작을수록 인가 전압에 의한 토크 증가율이 크지만 회전수가 올라갈수록 인가 전압에 의한 토크 증가율이 둔화되는 것을 알 수 있다. 그러나 전체적으로는 모터의 입력 회전수가 증가할수록, 인가전압의 크기가 클수록 발생하는 토크도 증가하는 것을 볼 수 있다. 특이할 만한 사실은 입력 회전수가 증가하면 토크 증가율이 감소하는 현상이 발생하고 간극이 커질수록 이런 현상이 두드러지게 나타난다는 것인데 이는 입력 회전수가 커지면 전기장 인가에 의해 생성되는 ER유체의 사슬구조가 파괴되어 일어나는 현상으로 추정된다.

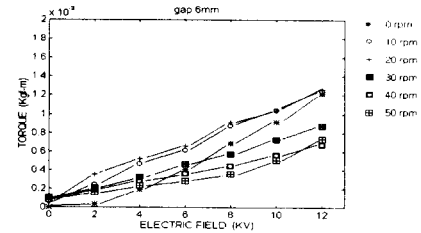
[Fig. 9]부터 [Fig. 14]까지는 입력 회전수를 0rpm부터 10rpm 간격으로 50rpm까지 증가시켜, 입력 회전수의 증가에 따른 인가된 전압의 크기와 발생한 토크의 크기를 각 간극별로 구별하여 나타낸 그래프이다. 간극이 작을수록 인가된 전기장의 세기에 의한 토크 증가율이 커진다는 것을 알 수 있다. 입력축의 회전수를 증가시키면, 간극이 작을 때에는 토크의 증가율이 일정하지만 간극이 커질수록 토크의 증가율이 떨어지는 것을 볼 수 있는데 이같은 사실은 앞서 언급한 바와 같이 회전수가 일정한 속도 보다 커지게 되면 유체 내부에서는 ER유체의 입자에 의한 사슬구조가 급격히 파괴되기 시작하여 유체의 고유점성에 의한 동력전달 밖에 이뤄지지 않는다는 사실은 입증하고 있다.



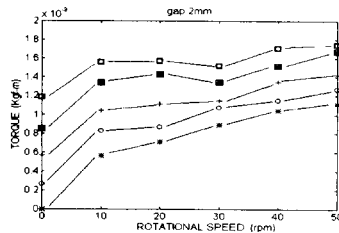
[Fig. 3] 전압에 의한 회전수별 발생 토크(2mm)



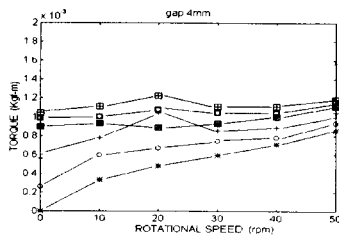
[Fig. 4] 전압에 의한 회전수별 발생 토크(4mm)



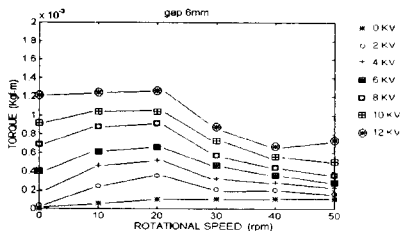
[Fig. 5] 전압에 의한 회전수별 발생 토크(6mm)



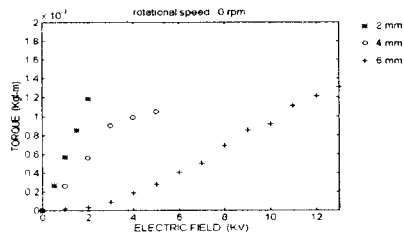
[Fig. 6] 회전수에 의한 전압별 발생 토크(2mm)



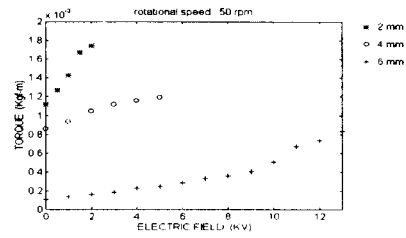
[Fig. 7] 회전수에 의한 전압별 발생 토크(4mm)



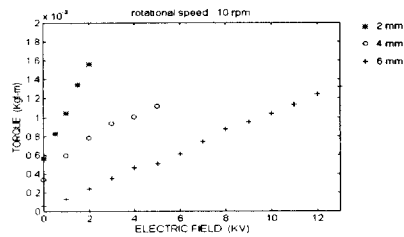
[Fig. 8] 회전수에 의한 전압별 발생 토크(6mm)



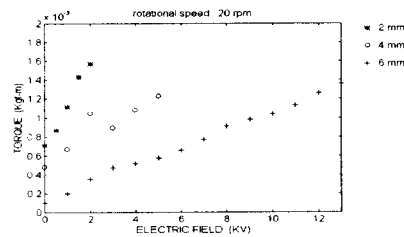
[Fig. 9] 간극별 전압에 의한 발생 토크(0rpm)



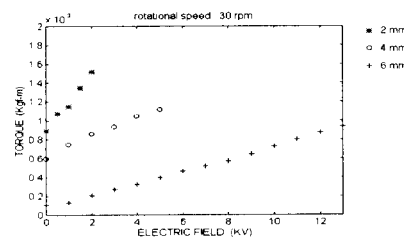
[Fig. 14] 간극별 전압에 의한 발생 토크(50rpm)



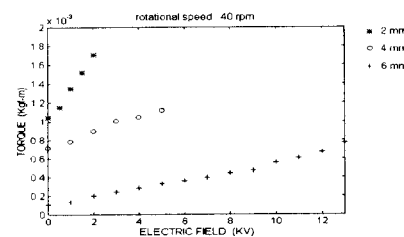
[Fig. 10] 간극별 전압에 의한 발생 토크(10rpm)



[Fig. 11] 간극별 전압에 의한 발생 토크(20rpm)



[Fig. 12] 간극별 전압에 의한 발생 토크(30rpm)



[Fig. 13] 간극별 전압에 의한 발생 토크(40rpm)

## 제 6 장 결론

본 연구는 전기장 세기의 변화에 따라 점성이 변화하는 전기점성 유체(Electro - Rheological Fluid)를 이용한 동력전달 장치를 설계 및 제작하여, 전기장만으로 동력을 전달 할 수 있는 새로운 개념의 동력전달 장치를 제시하였다. 또 동력전달 장치에 전압을 인가하여 발생하는 토크의 크기를 측정하여 장치의 성능을 평가하고 ER유체의 특성을 고찰하여 동력전달 장치로서 사용할 수 있다는 가능성을 제시하였다. 그러나 본 연구에서 사용한 ER유체는 전기장 인가에 따른 항복전단응력의 증가가 매우 낮으므로 향후 적은 전기장 인가에도 높은 항복전단응력의 증가율을 가지는 ER유체의 개발이 필요하며 이 들 연구에 의해 ER효과에 의한 동력전달에 의해 각속도나 토크의 제어가 가능하다.

## 참고 문헌

- (1) 김상국, 정동운, 최윤대, 1994, "전기유변유체를 동작매체로 하는 실험용 토크전달 장치 제작 및 성능 평가", 대한기계학회 논문집 제18권 제10호 p 2706 - 2711
- (2) 김기우, 최승복, 정재천, 1995, "ER 브레이크 시스템의 능동 장력 제어", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 p 805 - 809
- (3) J. David Carlson and Theodore G. Duclos, 1989, "ER Fluid Clutch and Brakes - Fluid Property and Mechanical Design Considerations" Proc. 2nd Int. conf. Electrorheological Fluid. Technomic publ. co., p 353-367
- (4) D. L. Hartsock, R. F. Novak, and G. J. Chaundy, 1991, The Society of Rheology, Inc. J. Rheol 35(7), October, 1991, p 1305 - 1326
- (5) Therese C. Jordan and Montgomery T. Shaw, 1989, "Electrorheology", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 24 No 5, October 1989, p 849 - 878