

전기점성 유체를 이용한 동력전달 장치에 관한 연구

주 동 우*, 이 은 준**, 박 명 관***

A Study on Torque Transmission Using Electro-Rheological Fluid

Dong-Woo Joo*, Eun-Jun Rhee**, Myeong-Kwan Park***

ABSTRACT

This paper provides an investigation of torque transmission system using ERF (Electro-Rheological Fluid). The torque transmission system using ERF is a new conception device because an apparent viscosity of ERF can be changed by applying an electric field. We use the coaxial cylinder type in which the ERF fills the annular space between a pair of coaxial cylindrical electrodes and experiment results show that the measured torque was increased with the increase of the electric field. These are analyzed to provide guidelines to assist in the development of practical ER devices

Key Words : ERF(Electro-Rheological Fluid)(ER 유체), apparent viscosity(가점도), torque transmission(토크 트랜스미션), coaxial cylinder type(원통형), electric field(전기장).

1. 서 론

산업의 급속한 발달에 따라 요구되는 동력전달 장치의 요구조건도 보다 다양해져가고 있다. 일반적으로 산업기에 사용되는 동력전달 장치는 동력원으로부터 발생하는 회전토크를 필요한 기계요소에 전달시키기 위해 클러치나 치차, 벨트 등의 기계요소를 사용하기 때문에 소음이나 진동, 부품의 마모 등의 문제를 야기 시킬 수 있으며 다양한 동력전달의 요구조건을 만족하기 위하여 동력전달 장치의 구조가 매우 복잡해지는 반면 이러한 복잡한 구조의 기계적인 장치로는 가변하는 동력전달의 정확한 제어에 많은 어려움이 따르고 장치의 복잡한 구조는 잦은

고장의 원인이 되기도 한다. 따라서 본 연구는 동력전달 장치의 설계에 있어서 전기장의 세기에 따라 점도가 변하는 전기점성 유체(Electro-Rheological Fluid)(5)(6)를 사용한 새로운 개념의 동력 전달 장치(1)(2)(3)(4)를 설계·제작하고 그 성능을 평가해 봄으로써 전기장 인가에 따른 ER효과를 확인하고 전기점성 유체의 특성을 고찰하여 전기점성 유체를 사용한 동력전달 장치의 최적의 설계 기준을 마련하며 기존의 동력전달 장치 보다 제작의 편리를 제공할 뿐 아니라 기어나 벨트, 치차 등의 기계요소를 사용하지 않고도 동력을 전달할 수 있는 동력전달 장치의 구현 가능성을 제시하고자 한다.

* 양산대학 자동차과
 ** 부산대학교 대학원
 *** 부산대학교 공과대학 기계공학부 및 기계기술연구소

2. ER유체의 일반적 특성

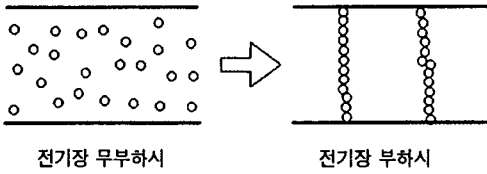


Fig. 1 전기장 부하에 따른 ER유체의 거동변화

ER유체에 전기장이 부하되면, (Fig. 1)에서와 같이 분극이 발생된 입자들이 서로 연결되어 전극을 향하여 사슬 구조를 형성하며 이로 인해 유체의 항복 전단응력이 변하게 된다⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾. 그 예로 절연유 중에 분산된 미립자에 대해 전기장을 인가하였을 경우 전계 사이에 처음 분산된 미립자들이 쌍극자 형태로 분산되고 그 분산된 미립자들은 반대 전하에 친화력을 가지게 되어 클러스터를 형성하게 되며 그 클러스터가 절연유의 흐름을 방해하여 점성이 증가하는 것이다.

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 유체 중에 분산된 입자가 사슬구조를 형성하여 유체가 항복 응력을 갖게되는 빙햄(Bingham) 유체상태로 변하게 되며 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다⁽⁹⁾.

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

- τ : 유체의 전체 전단응력,
- $\tau_y(E)$: 전기장 E 의 함수인 항복전단 응력
- η : 전단 속도비에 영향을 받는 용매의 가점도
- $\dot{\gamma}$: 전단 속도비

여기서 α 와 x 는 ER유체의 용매의 종류와 점도, 입자의 종류와 중량비, 입자의 수분함량 등 ER유체의 조성 조건에 의해 달라지는 고유치이며 실험을 통하여 구할 수 있다.

전기점성 유체는 크게 2 종류로 나눌 수 있는데, 분산 입자 표면에 수분을 포함한 함수계 전기점성 유체와 수분을 전혀 포함치 않는 비수계 전기점성 유체가 있다. 비수계 미립자나 함수계 미립자에서는 모두 전기분극 현상이

나타나지만 비수계와 함수계에서 발생하는 분극현상의 메커니즘은 각각 다르게 나타난다.

함수계의 전기점성유체의 메커니즘은 전기 이중층설로 설명이 되는데 무전계시에는 입자표면에 이온이 흡착한 상태로 존재하며 전기 이중층을 구성하며 여기에 전장을 인가하면 전하의 치우침이 생겨서 정전하 중심과 부전하 중심이 어긋나고 전기 쌍극자를 구성하여 Fig. 2와 같이 된다. 이 때문에 입자끼리 정전인력에 의해 결합하여 클러스터를 형성한다. 이에 비해 비수계 전기점성 유체는 전장 중에 두면 입자 자신이 분극하여 Fig. 3과 같은 클러스터를 형성한다. 함수계는 비수계보다 더 큰 전기점성 효과를 낼 수 있는 장점이 있으나 고온 상에서 수분의 증발로 인한 온도변화에 따라 성능의 변화가 생기는 단점이 있다.

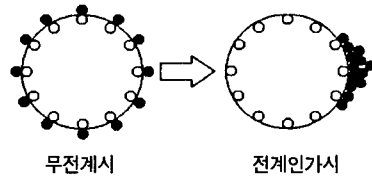


Fig. 2 함수계 ER유체의 분극현상

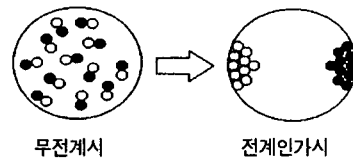


Fig. 3 비수계 ER유체의 분극현상

본 실험에서 사용된 전기점성 유체는 일본 BRIDGE-STONE사에서 제작된 미립자 분산형 ER유체이다. 이 분산형 ER유체는 직경이 수 μm (최소 1.5 μm)인 미립자가 분산되어 유체의 작동영역에서 안정성이 탁월하며 점도는 25 $^{\circ}\text{C}$ 에서 93mPa · s이다.

3 동력전달 장치의 이론적 배경

Fig. 4와 같이 본 연구에서 제작한 원통형(coaxial cylinder type)의 동력전달장치는 두 개의 원형 전극으로 구성되어 4개의 유체층이 생기도록 하였으며 원통형 동력전달장치의 설정 설계치에 대한 성능을 예측하기 위해 다음과 같은 관계식을 도출 할 수 있다. 여기서 h

$\ll R_{o1}, R_{o2}, h = h_1 = h_2$ 이면 즉, 간극의 크기에 비해 ER효과가 발생하는 동력전달장치 내 유체층의 반지름 R_{ok}, R_{ik} 의 크기가 간극 h 의 크기에 비해 훨씬 더 크고 간극의 크기가 모두 동일할 경우 $R_k \equiv R_{ik} \equiv R_{ok}$, 이라 할 수 있으며 원주 측면에서 발생하는 ER효과는 원주면에서 발생하는 ER효과에 비해 극히 작으므로 무시하고 동력전달 장치에 사용된 베어링의 마찰계수 또한 유체에서 발생하는 점성마찰에 비해 그 크기가 매우 작으므로 베어링 등의 기계요소로 인한 마찰저항을 무시하면 원주면에서 발생하는 ER효과에 대해서 아래와 같은 식을 유도해 낼 수 있다.

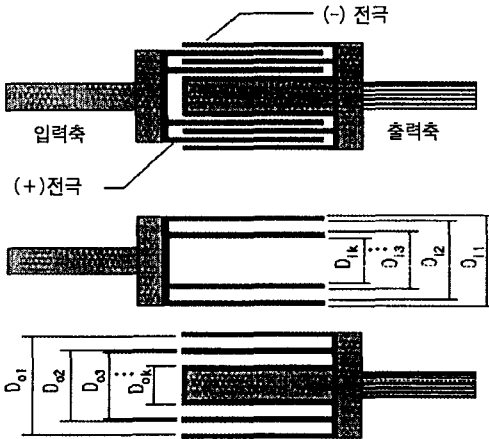


Fig. 4 동력 전달부의 상세도

$$T = T_{ER} + T_{\eta} \quad (2)$$

$$T_{ER} = 2\pi \tau_y(E) L \sum_{k=1}^n R_k^2 \quad (3)$$

$$T_{\eta} = \eta \frac{4\pi^2 f L}{h} \sum_{k=1}^n R_k^3 \quad (4)$$

$$V = \frac{\sum_{k=1}^n R_k^3 \sum_{k=1}^n R_k}{\sum_{k=1}^n R_k^2 \tau \sum_{k=1}^n R_k^2} \frac{\eta}{\tau_y(E)^2} \frac{T_{ER}}{T_{\eta}} P_{ER} \quad (5)$$

$$\frac{h}{\frac{\sum_{k=1}^n R_k^3}{\sum_{k=1}^n R_k^2}} = 2\pi f \frac{\eta}{\tau_y(E)} \frac{T_{ER}}{T_{\eta}} \quad (6)$$

$$R = \frac{h}{\left[\frac{\sum_{k=1}^n R_k^3}{\sum_{k=1}^n R_k^2} \right]} \quad (7)$$

$$P_E = V J E \quad (8)$$

$$P_{ER} = 2 \pi f T_{ER} \quad (9)$$

$$R_{ik} = D_{ik} / 2 \quad (10)$$

$$R_{ok} = D_{ok} / 2 \quad (11)$$

- E : 인가된 전기장의 세기
- f : 입력축의 분당 회전수
- h : 간극
- J : 전류밀도
- L : ER효과가 발생하는 부분의 길이
- R : 간극비
- P_{ER} : ER효과에 의해 수행되어지는 동력
- P_E : 이들 인가된 전기장의 세기와 전압에 의한 전기적 동력
- T : 동력전달 장치에서 발생하는 전체 토크
- T_{ER} : ER효과에 의해 발생하는 토크
- T_{η} : 고유점도 η 에 의해 발생하는 토크
- V : 동력장치 내의 실제 유체체적

위의 식을 통하여 다음과 같은 사실을 예측할 수 있다. 유체의 고유 점도 η 에 발생하는 토크 T_{η} 보다 전기장 인가에 의해 발생하는 토크 T_{ER} 를 훨씬 더 크게 하기 위해서는 간극비 R 을 더 크게 해야 함을 알 수 있는데, 간극이 커지면 커질수록 발생한 전체 토크 T 에 대해 유체의 점도 η 가 미치는 영향보다 전기장 인가에 의한 $\tau_y(E)$ 가 미치는 영향이 더 커짐을 의미한다. 또한 간극비 R 은 $\eta/\tau_y(E)$ 에 종속되고 유체의 실제 체적 V 는 $\eta/\tau_y(E)^2$ 에 종속되는데 이는 $\eta/\tau_y(E)$ 비는 클러치의 크기나 형상에 영향을 미치지만 $\eta/\tau_y(E)^2$ 비는 전력소모에 영향을 미치는 것을 의미한다. 따라서 주어진 유체체적에서 전기점성 유체에 의한 동력 P_{ER} 를 증가시키기 위해서는 $\eta/\tau_y(E)^2$ 비를 조절하거나 간극비 R 을 줄여서 T_{ER}/T_{η} 비를 감소시켜야 함을 알 수 있다.

제 4 장 동력전달 장치의 설계 및 제작

전기점성 유체를 이용한 실험용 동력전달 장치의 개략 도는 (Fig. 5)와 같다. 실험장치는 크게, 구동되는 구동축 부분(5)과 동력전달 부분, 전력을 공급하는 고전압 발

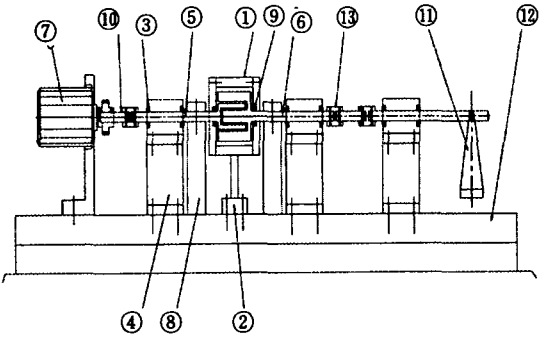
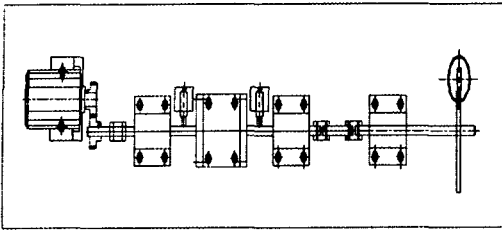


Fig. 5 실험장치 개략도

생장치, 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 길게 하고 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 회전이 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 연결방법을 채택하여 축 연

결 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.

제 5 장 실험결과 및 고찰

본 연구는 설정된 세 가지 간극에 대해 구동축 모터의 분당 회전수를 0rpm부터 10rpm 간격으로 50 rpm까지 변화시켜가며 각 인가된 전압의 크기에 대해 피동축에 전달된 토크를 측정하였다.

(Fig. 6)부터 (Fig. 8)까지는 각 간극에서, 입력축 모터의 회전수를 0rpm부터 50rpm까지 10rpm간격으로 증가시켰을 때 각 전압별로 발생한 토크를 나타낸다. 간극이 커질수록 같은 크기의 토크를 발생시키기 위한 전력 소모가 커진다는 사실을 알 수 있으며 이 결과는 식(5), 식(6)을 통해 예상되었던 간극이 크면 ER유체의 효과가

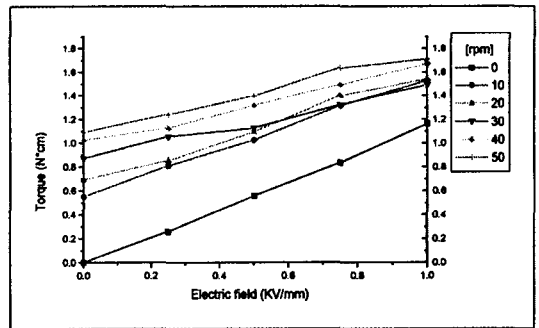


Fig. 6 전압에 의한 회전수별 발생 토크(gap 2mm)

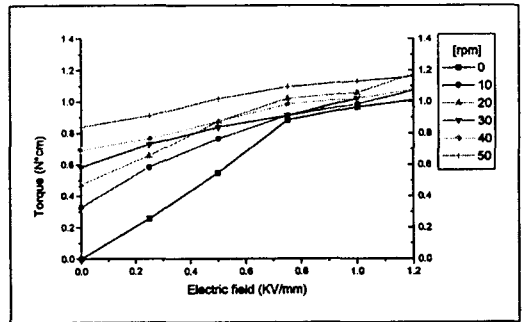


Fig. 7 전압에 의한 회전수별 발생 토크(gap 4mm)

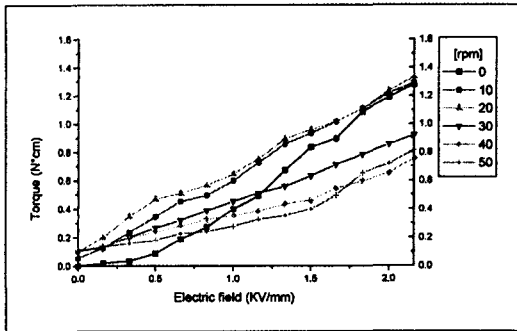


Fig. 8 전압에 의한 회전수별 발생 토크(gap 6mm)

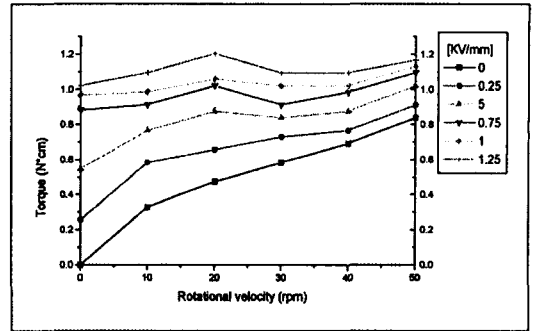


Fig. 10 회전수에 의한 전압별 발생 토크(gap 4mm)

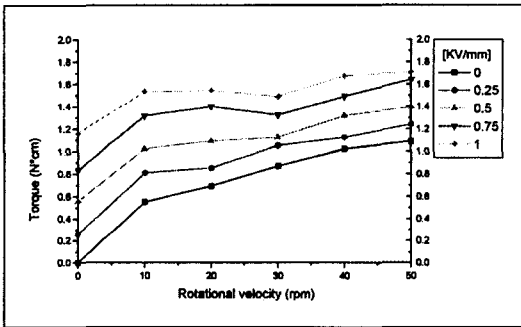


Fig. 9 회전수에 의한 전압별 발생 토크(gap 2mm)

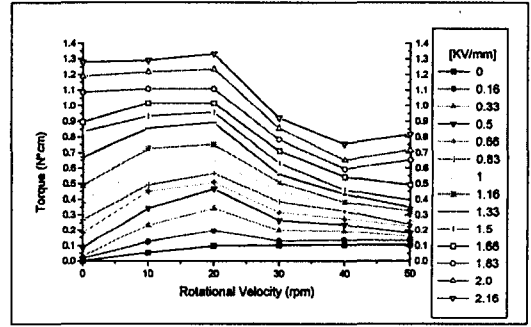


Fig. 11 회전수에 의한 전압별 발생 토크(gap 6mm)

떨어지며 전력소모가 커진다는 사실을 확인해 주고 있다.

(Fig. 9)부터 (Fig. 11)은 각 간극에서, 인가 전압을 0 KV부터 서서히 증가시켰을 때 모터의 각 입력 회전수별로 발생하는 토크를 나타낸다. 이 들 그래프를 통해 두 가지 사실을 알 수 있는데 첫 번째는 간극비가 커질수록, 유체의 점도가 전체 발생 토크에 미치는 영향보다 전기장 인가에 의해 발생한 전단 변형율이 전체 발생 토크에 미치는 효과가 더 커진다는 것이며 이는 앞서 예측한 사실을 증명해 주고 있다. 두 번째는 입력 회전수가 작을수록 인가 전압에 의한 토크 증가율은 크지만 회전수를 증가시키면 인가 전압에 의한 토크 증가율이 둔화되는 현상을 볼 수 있다. 그러나 전체적으로는 모터의 입력 회전수가 증가할수록 그리고 인가전압의 크기가 클수록 발생하는 토크도 증가하는 것을 알 수 있다. 특이할만한 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. 그러나 입력 회전수가 일정량보다 커지게 되면 감소하던 토크가 다시 증가하는 현상을 보는데 이것은 회전수가 일정 속도보다 빨라지면 파괴되었던 사슬구조가 다시 생성되어 회전에 의해 파괴되는 사슬구조의 수보다 많아지는 것으로 추정된다.

(Fig. 12)부터 (Fig. 17)까지는 입력 회전수를 0rpm 부터 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 훨씬 쉽게 식별할 수 있으며, 입력축의 회전수를 증가시키면 간극이 작을 때에는 토크의 증가율이 일정하지만 간극이 커질수록 토크의 증가율이 떨어지는 것을 볼 수 있는데 이와 같은 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 보여주고 있다.

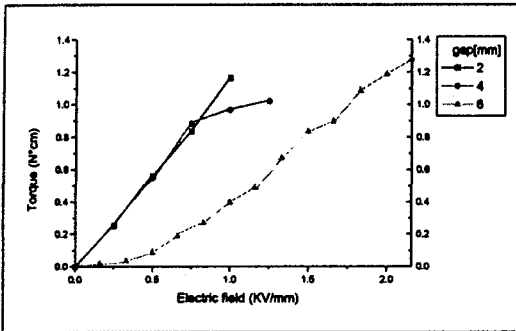


Fig. 12 간극별 전압에 의한 발생 토크(rpm 0)

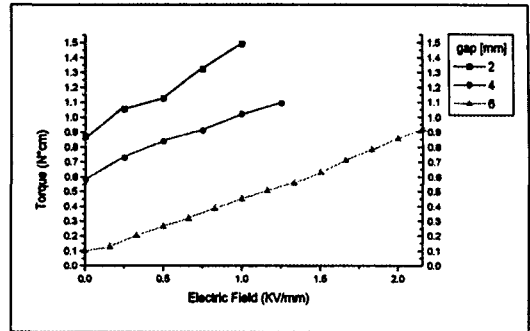


Fig. 15 간극별 전압에 의한 발생 토크(rpm 30)

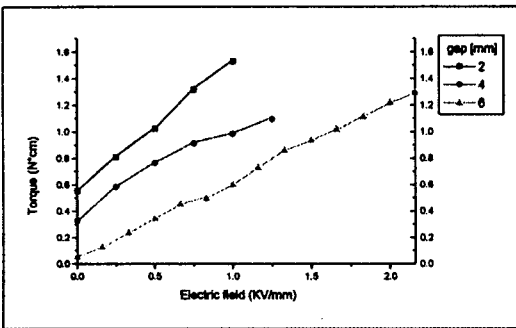


Fig. 13 간극별 전압에 의한 발생 토크(rpm 10)

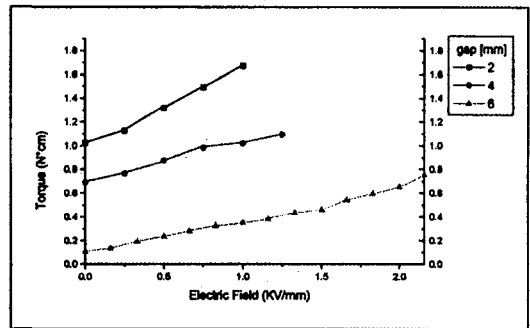


Fig. 16 간극별 전압에 의한 발생 토크(rpm 40)

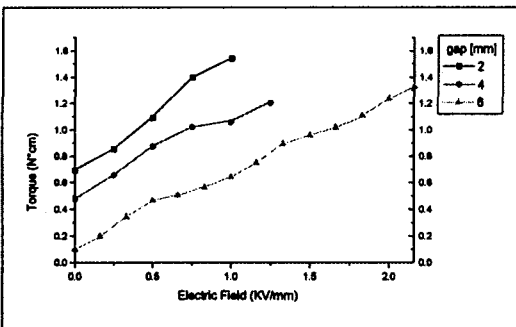


Fig. 14 간극별 전압에 의한 발생 토크(rpm 20)

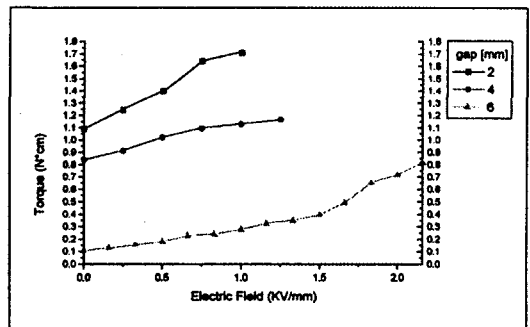


Fig. 17 간극별 전압에 의한 발생 토크(rpm 50)

제 6 장 결 론

본 연구는 전기장 세기의 변화에 따라 점성이 변화하는 전기점성 유체를 이용한 동력전달 장치를 설계 및 제작하여, 전기장만으로 동력을 전달할 수 있는 새로운 개념의 동력전달 장치를 제시하였으며 동력전달 장치에 전압을 인가하여 발생하는 토크의 크기를 측정하여 장치의 성능

을 평가하고 전기점성 유체의 특성을 고찰하여 동력전달 장치로서 사용할 수 있다는 가능성을 제시하였다. ER유체에 전기장을 인가하였을 경우 발생하는 특성을 요약하면 다음과 같다.

1. 간극이 크면 전기장 인가에 의한 토크 증가율이 떨어지며 일정량의 토크를 발생시키기 위하여 소모되는

- 전력이 간극이 작을 때보다 커진다.
2. 간극비 R 이 커질수록 T_{ER} / T_{η} 비가 커진다.
 3. 입력 회전수를 증가시키면 인가전압에 의한 토크 증가율이 부분적으로 감소하며 회전수가 일정량 보다 커지면 토크 증가율은 다시 증가한다.

그러나 본 연구에서 사용한 ER유체는 전기장 인가에 따른 항복전단 응력의 증가가 매우 낮으므로 향후 적은 전기장 인가에도 높은 항복전단 응력의 증가율을 가지는 ER유체의 개발이 필요하며 이 들 연구에 의해 ER효과에 의한 동력전달에 의해 각속도나 토크의 제어가 가능하다.

감사의 글

본 연구는 부산대학교 기성회 학술연구 조성비로 진행 되었습니다. 연구지원에 진심으로 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김상국, 정동운, 최운대, "전기유변 유체를 동작매체로 하는 실험용 토크전달 장치 제작 및 성능 평가," 대한기계학회 논문집 제18권 제10호 pp. 2706 - 2711, 1994.
2. 김기우, 최승복, 정재천, "ER 브레이크 시스템의 능동 장력 제어," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 pp. 805 - 809, 1995.
3. J. David Carlson and Theodore G. Duclos,

"ER Fluid Clutch and Brakes - Fluid Property and Mechanical Design Considerations," Proc. 2nd Int. conf. Electrorheological Fluid. Technomic publ. co., pp. 353-367, 1989.

4. Masami Nakano, "ER Effects of an ER Damper and Its Application to Active Vibration Control," JSME, P-SC221, 1996. 7
5. Therese C. Jordan and Montgomery T. Shaw, 1989, "Electrorheology," IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 24 No 5, pp. 849 - 878, 1989.
6. W. M.. Winslow, "Induced fibrillation of suspensions," J. Appl. Phys. Vol. 20, No. 12, pp. 1137-1140, 1949.
7. T. C. B. McLeish, T. Jordan, M. T. Shaw, "Viscoelastic response of electrorheological fluids. I . Frequency dependence," J. Rheol, 35(3) pp. 427-448, 1991.
8. T. Jordan, M. T. Shaw, T. C. B. McLeish, "Viscoelastic response of electrorheological fluid. II . Field strength and strain dependence," J. Rheol, 36(3), pp. 441-463, 1992.
9. Steven L. Ceccio, Alan S. Wineman, "Influence of orientation of electric field on shear flow of electrorheological fluids," J. Rheol, 38(3), pp. 453-463, 1994.