

무한 소폭 전기유변 스퀴즈 필름 댐퍼 해석

정 시 영

인하공업전문대학 항공기계과

Analysis of Short Squeeze Film Dampers Operating with Electro-Rheological Fluids

Si-Young Jung

**Department of Aero-Mechanical Engineering, Inha Technical Junior College*

Abstract— This paper addresses the lubrication analysis of a short squeeze film damper operating with electro - rheological (ER) fluids which have large and reversible changes in yield shear stresses with respect to an applied electric field. The ER fluids are assumed to be modeled as Bingham fluids. The governing lubrication equation for the ER short squeeze film damper is developed on the basis of a Bingham fluid model, and the equation is subsequently solved in order to investigate the effects of the ER fluids on the damping capability of the damper. It is shown that a substantial increase in damping (both direct and cross coupled) is accomplished by increasing the yield shear stress of the ER fluids. This significant improvement of the damping capability suggests that the ER short squeeze film damper could be very effective for reducing the vibration and controlling the critical speeds of a rotor system.

1. 서 론

전기유변성(electro-rheological) 유체에 전기장을 주면 유체의 점성이 매우 크게 변화한다는 전기점성 효과를 Winslow[1]가 1949년에 처음 발표한 후 최근에 전기유변성 유체의 실용성을 인정받기 시작하면서 전기유변성 유체를 클러치, 제어밸브, 감쇠장치 등에 응용하는 연구가 활발히 진행되고 있다[2,3]. 전기유변성 유체는 전기장 무부하시에는 뉴우톤 유체의 거동 특성을 갖으나 전기장 부하시에는 매우 복잡한 거동을 하지만 일반적으로 비뉴우톤 유체 중 Bingham 유체의 거동특성을 갖는다[4,5]. 이때 Bingham 유체의 특성인 항복전단응력이 전기장의 크기에 따라 매우 크게 변화하며, 전기장에 대한 반응 시간도 1mS 이하이므로 전기장 변화에 대한 응답성도 매우 양호하다. 이러한 장점으로 인하여 회전체-베어링계 및 윤활분야에서도 전기유변성 유체의 응용연구를 최근에 시작하였다. 본 논문에서는 위와 같은 특성을 지닌 전기유변성 유체를 스퀴즈 필름 댐퍼(squeeze film damper; SFD)에 사용하여 SFD의

획기적 감쇠성능 향상을 도모하고자 한다.

현재 대부분의 항공기용 터보엔진에는 SFD를 장착하여 엔진 축의 진동감소에 커다란 효과를 얻고 있으며 아직도 SFD에 관한 많은 이론적, 실험적 연구를 병행하고 있다[6,7] 그러나 SFD의 형상과 운용조건에 따라 회전체의 진동을 오히려 악화시키는 비선형 진동현상이 발생함으로써 SFD 설계는 매우 까다로우며 또한 SFD의 사용범위에도 제한을 받고 있다[8]. 이러한 단점을 해결할 수 있을 뿐만 아니라 진동을 능동적으로 제어할 수 있는 전기유변 SFD 개발에 관한 기초적 연구도 최근에 발표되었다.

그리스(grease) 윤활을 해석하기 위하여 Wada[9, 10]가 개발한 Bingham 모델을 무한 폭 전기유변 SFD에 적용 해석함으로써 SFD의 감쇠성능을 매우 크게 향상시킬 수 있음을 Tichy[11]와 저자[12]는 각각 이론적으로 밝혔다. 또한 탄성 회전체에 전기유변 SFD를 장착한 진동실험을 통하여 전기유변 SFD의 감쇠성능이 매우 우수하며 회전체의 위험속도 조절도 가능함을 Morishita와 Mitsui[13]가 실험적으로 입증하였다. Dimarogonas와 Kollias[14]는 전

기유변성 유체를 저어널 베어링에 적용함으로써 베어링의 동특성 제어기능과 안정성 향상을 얻었다. Nikolajsen과 Hoque[15]도 여러장의 원판으로 구성된 전기유변성 댐퍼를 회전체에 응용한 실험을 수행함으로써 회전체의 위험속도 소멸 및 커다란 진동감소 효과를 발표하였다.

일반적으로 SFD의 형상은 SFD의 구성부품인 롤링 베어링과 댐퍼의 냉각을 위하여 윤활유가 순환할 수 있도록 SFD의 양단이 열려 있는 무한 소폭의 형상을 갖고 있다. 따라서 본 논문에서는 실제 형상을 나타내는 무한 소폭 전기유변 SFD에 관한 새로운 윤활 지배방정식을 수립하고 해석한 후 감쇠계수를 계산하였다. 무한 소폭 전기유변 SFD를 해석하기 위하여 Wada의 Bingham 모델을 사용하였으며 전기장의 크기 즉 무차원 항복전단응력 변화에 따른 전기유변 SFD의 감쇠계수, 압력분포 및 전기유변성 유체 속도분포 등을 제시하였다.

2. 전기유변성 유체의 특성

전기유변성 유체의 가장 두드러진 현상은 전기장 무부하시 뉴우톤 유체의 거동을 하는 반면에, 전기장 부하시에는 유체입자의 전하가 전기장 방향으로 체인형 구조를 형성하므로 전기유변성 유체가 유동을 시작하기 위해서는 체인구조를 파괴할 수 있는 초기의 항복전단력이 필요하고 일단 체인구조가 파괴되면 전기유변성 유체는 일정한 점성을 지닌 뉴우톤 유체의 유동을 하는 것이다. 이와 같이 전기유변성 유체는 Bingham 유체와 매우 흡사한 유동특성을 갖고 있기 때문에 전기유변성 유체를 해석할 때는 아래와 같은 Bingham 모델 방정식을 사용한다[9,10]

$$\mu \dot{\gamma} = T - T_0 \quad (|T| \geq T_0) \quad (1a)$$

$$\mu \dot{\gamma} = 0 \quad (|T| < T_0) \quad (1b)$$

여기서 T_0 는 항복전단응력이며 μ 는 점성계수, $\dot{\gamma}$ 는 전단율이다. 전단응력의 절대값이 항복전단응력 보다 큰 부분은 일정한 점성계수를 갖는 뉴우톤 유체의 유동을 하고 항복전단응력 보다 작은 부분은 전단변형이 없는 고체상태의 core를 형성한다.

전기유변성 유체의 항복전단응력은 전기장의 크기에 따라 매우 급격히 변화하지만 점성은 전기장에 의해 거의 아무런 영향을 받지 않는다. 일반적으로 전기유변성 유체의 항복전단응력을 생성시키기 위해

필요한 전기장의 크기는 약 1~5 KV/mm(1 mm의 유막두께 당 1~5 KV의 전압)이나 전류밀도가 약 10 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 이하이기 때문에 실제 소요되는 전력은 매우 작다. 현재까지 개발된 대부분의 전기유변성 유체의 항복전단응력과 전압 및 간극과의 관계는 다음과 같은 실험식으로 표현하고 있다[4,5]

$$T_0 = \alpha \left(\frac{E}{H} \right)^\beta \quad (2)$$

여기서 E는 전압, H는 전극사이의 간극이며 α 와 β 는 실험상수로써 지수 β 의 값은 전기유변성 유체의 종류에 따라 $\beta = 1 \sim 2$ 정도의 값을 갖는다.

3. 무한 소폭 전기유변 SFD의 해석

Fig. 1에 보여준 무한 소폭 전기유변 SFD의 운동은 다음과 같다. 하우징(housing)은 고정되어 있으며 저어널(journal)은 회전하지 않으나 저어널 중심점이 하우징의 중심점을 중심으로 회전축과 같은 회전속도(ω)로 휘돌림 운동(whirling motion)을 한다. 즉 일정한 휘돌림 폭(e)의 동심원 궤도(circular centered orbit)를 따라 저어널 중심이 원운동을 하고 있다.

위와 같은 무한 소폭 전기유변 SFD를 해석하기 위하여 전기유변성 유체를 비압축성, 등점성 유체로 가정하고 SFD의 원주방향 성분을 무시할때, 정상상태의 층류 박막유동에 관한 무차원 연속 방정식과 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\partial w}{\partial \xi} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial \xi} = \frac{\partial \tau}{\partial \eta} \quad (4)$$

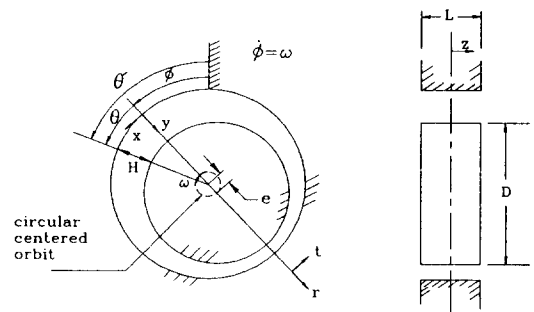


Fig. 1. Squeeze film damper geometry and coordinate system.

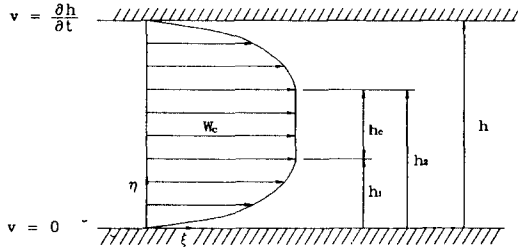


Fig. 2. Velocity profile of the electro-rheological fluid.

전기유변성 유체는 앞에서 서술한 바와 같이 Bingham 유체의 특성을 갖고 있으므로 전기유변성 유체에 관한 식 (1)을 무차원화하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial w}{\partial \eta} = \tau \mp \tau_0 \quad (|\tau| \geq \tau_0) \quad (5a)$$

$$\frac{\partial w}{\partial \eta} = 0 \quad (|\tau| < \tau_0) \quad (5b)$$

또한 전기유변성 유체의 무차원 항복전단응력 τ_0 는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\tau_0 = T_0 \frac{C}{\mu \omega R} = \frac{\tau_{0, avg}}{h^\beta} \quad (6a)$$

여기서

$$\tau_{0, avg} = \alpha \left[\frac{E}{C} \right]^\beta \frac{C}{\mu \omega R} \quad (6b)$$

위 식에서 보여주듯이 전기유변 SFD에 일정한 전압을 가하면 무차원 항복전단응력은 유막두께에 따라 변화하고 있다.

Fig. 2는 유막 중앙부분에 고체상태의 core가 형성되어 있는 전기유변성 유체의 전형적인 속도분포로써 유체속도 경계조건을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$w=0 \quad v=0 \quad (\eta=0) \quad (7a)$$

$$w=w_c \quad (\eta=h_1) \quad (7b)$$

$$w=w_c \quad (\eta=h_2=h_1+h_c) \quad (7c)$$

$$w=0 \quad v = \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\eta=h) \quad (7d)$$

여기서 w_c 는 전기유변성 유체의 core 속도이며, h_c 는 core의 두께를 표시한다.

식 (4)와 (5)를 적분한 후 경계조건 (7)을 적용하면 다음과 같은 각 구간별 유체속도를 구할 수 있다.

$$w_1 = \frac{1}{2} p'(\eta^2 - h_1 \eta) + \frac{w_c}{h_1} \eta \quad (0 \leq \eta \leq h_1) \quad (8a)$$

$$w_2 = w_c \quad (h_1 \leq \eta \leq h_2) \quad (8b)$$

$$w_3 = \frac{1}{2} p'(\eta - h)(\eta - h_2) - \frac{w_c}{h - h_2}(\eta - h) \quad (h_2 \leq \eta \leq h) \quad (8c)$$

여기서 p' 은 ξ 에 관한 압력구배를 나타낸다.

연속 방정식 (3)에 식 (8)을 대입한 후 유막두께 방향으로 적분하면 다음의 방정식을 얻는다.

$$\frac{d}{d\xi} \left[-\frac{1}{6} p' h_1^3 + w_c(h - h_1) \right] + \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (9)$$

core의 속도 w_c 는 앞에서 구한 속도 w_1 을 식 (5a)에 적용한 후 유막두께 h_1 에서의 전단응력이 항복전단응력과 일치하는 사실을 이용함으로써 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$w_c = -\frac{1}{2} p' h_1^2 \quad (10)$$

또한 유막 내에서 전단응력 분포가 유막 중심면에 대하여 대칭을 이루고 있으므로 core 형성이 시작되는 유막두께는 다음과 같다.

$$h_1 = \frac{h}{2} \pm \frac{\tau_0}{p'} \quad (11)$$

여기서 p' 값이 양수이면 - 부호를 선택하고, p' 값이 음수이면 + 부호를 선택한다. 식 (10)과 (11)에서 $h_1 = 0$ 이면 즉 유막 전체가 core로 변화하면, core의 속도 w_c 도 0이므로 전기유변성 유체의 흐름은 정지되고, 이 때의 압력구배 p'_c 는 다음과 같다.

$$p'_c = \mp \frac{2\tau_0}{h} \quad (12)$$

다시 말하면 유체유동 시작에 필요한 최소의 압력구배 절대값은 p'_c 의 절대값 보다 약간 더 큰 값이어야 한다. 최종적으로 식 (10)과 (11)을 식 (9)에 대입하고, $\partial h / \partial t$ 는 Fig. 1의 좌표계에서 보여주는 바와 같이 $-dh/d\theta$ 로 대치할 수 있어 식 (9)는 무한 소폭 전기유변 SFD에 관한 새로운 윤활 지배방정식으로 다음과 같이 변환된다.

$$\frac{d}{d\xi} \left[\frac{(hp' \pm 2\tau_0)^2 (hp' \mp \tau_0)}{12p'^2} \right] = -\frac{dh}{d\theta} \quad (13)$$

위 식에서 $\tau_0=0$ 이면, 위 식은 뉴턴 유체의 무한 소폭 SFD 지배 방정식과 일치한다.

뉴턴 유체를 사용한 무한 소폭의 SFD 경우에는 SFD 양단의 압력이 대기압과 일치한다는 압력 경계 조건으로 부터 축방향의 유막 압력분포는 포물선 형상을 이루어 중앙($Z=0$)에서의 축방향 압력구배는 0의 값을 갖는다. 그러나 전기유변성 유체를 사용한 전기유변 SFD의 경우에는 축방향의 전기유변성 유체 유동이 발생하기 위해 최소한의 압력구배가 필요하다. 즉 축 중앙에서의 압력구배 값은 식 (12)의 값 이상이 되어야 한다. 따라서 전기유변 SFD의 축 중앙과 양단에서의 유막 압력 경계조건은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dp}{d\xi} = p'_c \quad (\xi=0) \quad (14a)$$

$$p=0 \quad (\xi=\pm L/D) \quad (14b)$$

식 (13)을 적분한 후 압력 경계조건 식 (14a)를 적용하면 아래와 같은 축방향의 압력구배에 관한 3차 방정식을 얻는다.

$$p'^3 - 3 \left[\frac{p'_c}{2} - \frac{4}{h^3} \frac{dh}{d\theta} \xi \right] p'^2 + \frac{p'^3_c}{2} = 0 \quad (15)$$

위 식의 3개의 근 중 유체유동에 필요한 최소 절대값 p'_c 보다 큰 값을 선택하여 압력 경계조건 식 (14b)를 적용함으로써 전기유변성 유체의 압력분포를 얻을 수 있다. 이 압력분포로부터 무한 소폭 전기유변 SFD의 반경 방향과 접선 방향의 무차원 유막력은 다음과 같이 각각 계산할 수 있다.

$$f_r = \frac{F_r}{C_t} = \frac{D}{L} \int_0^{L/D} \int_{\psi}^{2\pi} p \cos \theta d\theta d\xi \quad (16a)$$

$$f_t = \frac{F_t}{C_t} = \frac{D}{L} \int_0^{L/D} \int_{\psi}^{2\pi} p \sin \theta d\theta d\xi \quad (16b)$$

여기서 C_t 는 무차원 유막력 상수이며, $\psi=0$ 이면 동공현상이 없는 2π 유막해이고, $\psi=\pi$ 이면 동공현상을 고려한 π 유막해이다.

위와 같이 구한 유막력은 저어널 중심이 무차원 접선속도 $v_t=\varepsilon$ 의 운동으로 인하여 발생한 유막력이므로 전기유변 SFD의 무차원 감쇠계수는 다음과 같다.

$$C_{tt} = -\frac{f_t}{v_t} = -\frac{f_t}{\varepsilon} \quad (17a)$$

$$C_{rr} = -\frac{f_r}{v_t} = -\frac{f_r}{\varepsilon} \quad (17b)$$

4. 해석 결과 및 고찰

전기유변성 유체($\tau_{0,avg}>0$)를 적용한 무한 소폭 전기유변 SFD와 뉴턴 유체 ($\tau_{0,avg}=0$)를 적용한 기존의 SFD와 비교 검토하기 위하여 유막 압력분포, 속도분포 및 감쇠계수를 해석하였다.

Fig. 3은 편심율 $\varepsilon=0.5$ 와 $\varepsilon=0.8$ 경우의 무차원 원주방향 압력분포를 보여 주고 있다. L/D 비율은 $L/D=0.25$ 이며, 전기유변성 유체의 실험지수는 $\beta=1$ 로 설정하였다. Lord[16]사에서 개발한 전기유변성 유체의 항복전단응력과 실제 SFD의 운영조건[17]을 기초로하여 식 (6b)의 무차원 평균 항복전단응력의

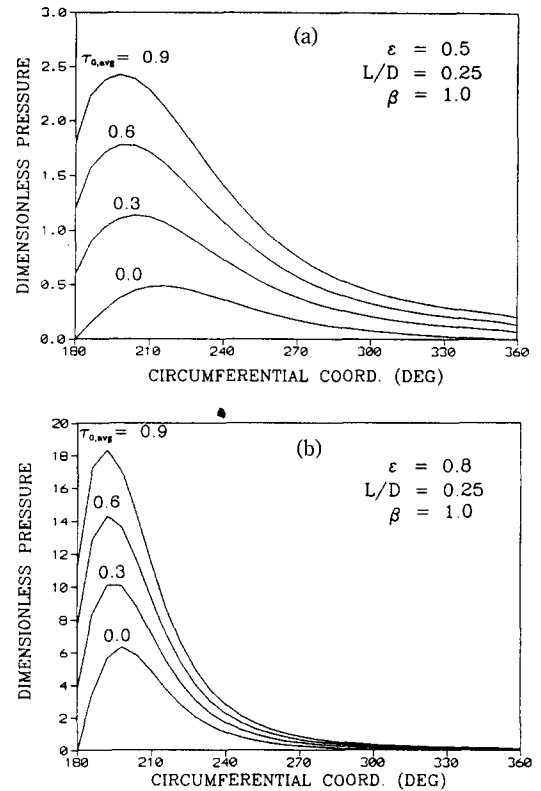


Fig. 3. Dimensionless pressure profiles for increasing averaged yield shear stress of the ER fluid, (a) $\varepsilon=0.5$, (b) $\varepsilon=0.8$.

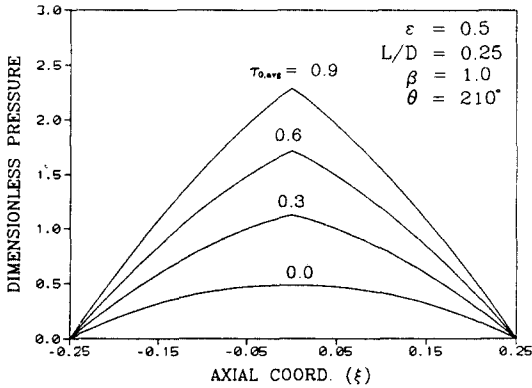


Fig. 4. Dimensionless axial pressure profiles at $\theta = 210^\circ$ for increasing averaged yield shear stress of the ER fluid, $\epsilon = 0.5$.

값을 계산하면 약 1.0 이하의 값을 갖는다. 따라서 평균 항복전단응력은 $\tau_{0,avg} = 0.3, 0.6, 0.9$ 의 값을 선택하였다. 평균 항복전단응력이 증가할수록 (즉 전기장의 크기가 증가할수록) 유막압력은 뉴우톤 유체($\tau_{0,avg} = 0$)의 경우 보다 매우 크게 증대하고 있다. 최소 유막두께 지점($\theta = 180^\circ$)에서 압력상승이 매우 크며 최대 유막두께 지점에서도($\theta = 360^\circ$) 0보다 큰 압력을 형성하고 있다. 이러한 압력상승은 전기유변성 유체의 축방향 유동 초기에 발생하는 항복전단 저항력 상승으로 인하여 형성된 압력이며, 식 (6)과 (12)에서 보여 주듯이 전기유변성 유체의 간극이 가장 작은 최소 유막두께 지점이 최대 유막두께 지점보다 전기장의 영향을 더욱 강하게 받아 항복전단응력이 더욱 클 뿐만 아니라 유체유동에 소요되는 최소 압력구배 값도 더욱 증대하기 때문에 최소 유막두께 지점에서 압력상승이 매우 크게 나타난다.

Fig. 4에서도 축방향 유막압력에 미치는 평균 항복전단응력의 영향을 보여 주고 있다. 뉴우톤 유체($\tau_{0,avg} = 0$)의 경우는 잘 알려진 포물선 형태의 압력분포를 갖으나, 전기유변성 유체의 경우에는 평균 항복전단응력이 증대하면서 축방향의 압력구배가 더욱 큰 압력분포를 형성하고 있다. 특히 축 중앙지점($Z = 0$ 또는 $\xi = 0$)에서는 압력곡선의 불연속점이 존재하며 이 지점의 압력구배는 p_c' 의 값과 같다. 식 (15)에 $\xi = 0$ 를 대입함으로써 $p' = p_c'$ 의 결과를 손쉽게 얻을 수 있으며 유막압력 경계조건 식 (14a)를 만족시키고 있다.

Fig. 5는 $\epsilon = 0.5, L/D = 0.25$ 인 SFD의 경우로서 원

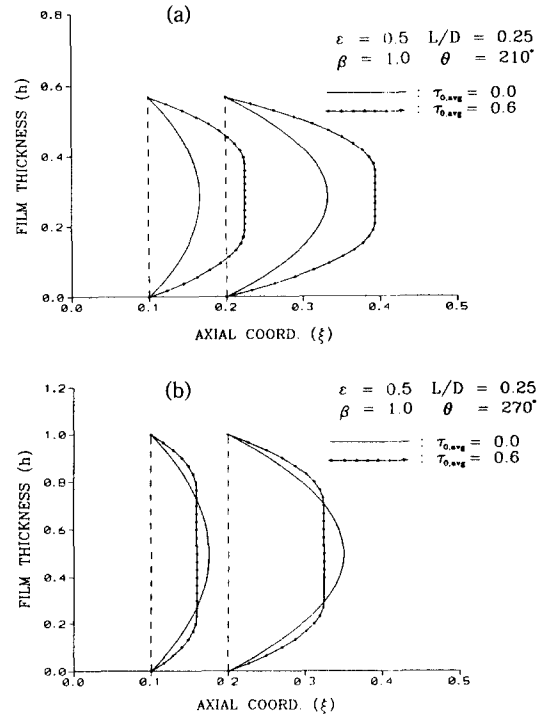


Fig. 5. Dimensionless velocity profiles of the ER fluid film, $\epsilon = 0.5, \tau_{0,avg} = 0.0$ and 0.6 , (a) $\theta = 210^\circ$, (b) $\theta = 270^\circ$.

주방향 $\theta = 210^\circ, \theta = 270^\circ$ 에서 각각 축방향 $\xi = 0.1, 0.2$ 지점의 뉴우톤 유체($\tau_{0,avg} = 0$)와 전기유변성 유체($\tau_{0,avg} = 0.6$)의 속도 분포도를 작성한 것이다. 전기유변성 유체의 경우는 유막 중앙부분에 고체상태의 core가 형성되어 있으며 core의 유동속도는 식 (10)의 값을 갖는다. 또한 core가 형성되기 시작하는 유막두께는 식 (11)로부터 구할 수 있다.

Fig. 3과 4에서 보여준 유막압력으로 부터 전기유변성 유체의 유막력을 계산한 후 전기유변 SFD의 감쇠계수를 구하였다. 동심원 궤도를 따라 저어널이 원운동을 하는 SFD(Fig. 1)는 저어널의 원주속도 없이 유막력을 생성시키지 못하기 때문에 감쇠계수는 없으며 오직 감쇠계수만을 갖는다[18] 따라서 전기유변 SFD의 감쇠계수 C_{tt}, C_{rn} 만을 각각 Fig. 6과 7에 나타내었다. 전기유변 SFD의 유막은 동공현상을 고려한 π -유막으로 가정하였으며 전기유변성 유체의 실험지수는 $\beta = 1$ 로 선정하였다. 무한 소폭 전기유변 SFD의 감쇠계수 C_{tt}, C_{rn} 는 평균 항복전단응력 증가에 따라 매우 크게 증가하고 있다. 뉴우톤 유체($\tau_{0,avg} = 0$)

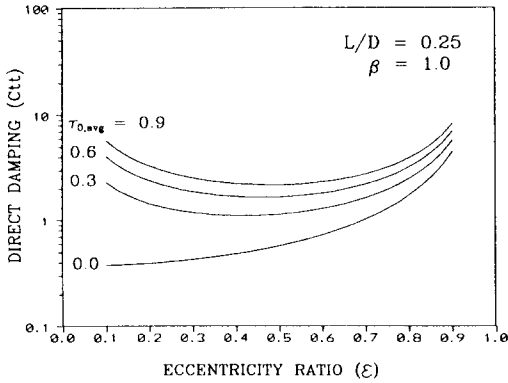


Fig. 6. Dimensionless direct damping coefficients (C_{D}) for increasing averaged yield shear stress of the ER fluid, π -film solution.

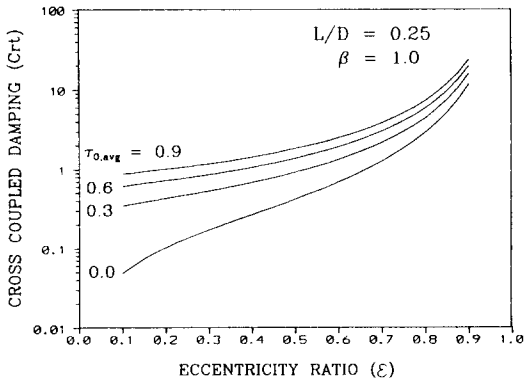


Fig. 7. Dimensionless cross coupled damping coefficients (C_{C}) for increasing averaged yield shear stress of the ER fluid, π -film solution.

의 SFD와 전기유변성 유체($\tau_{0,avg}=0.9$ 의 경우)의 SFD와 비교할 때 감쇠계수 C_{D} , C_{C} 모두가 작은 편심율에서 최대 10배, 큰 편심율에서 최대 2배 정도의 증가율을 보여 주고 있다. 일반적으로 SFD를 회전체에 장착한 후 회전체 진동을 해석하면 감쇠계수 C_{D} 는 순수한 감쇠역할을 하고 감쇠계수 C_{C} 는 강성역할을 한다[18]. 그러므로 C_{D} 의 증가는 회전체의 진폭 감소에 직접적인 영향을 주며, C_{C} 의 증가는 회전체의 위험속도 상승을 유발한다. Morishita와 Mitsui[13]의 회전체-전기유변 SFD계 실험에서도 전기장 부하시, 즉 전기유변성 유체의 항복전단응력을 증대시켜 회전체의 제 1, 2 위험속도의 현격한 증가와 매우 큰 감쇠율을 얻었다.

Table 1. Increment rates of dimensionless damping coefficients with $\beta=1$ to those with $\beta=2$

ϵ	C_{D}			C_{C}		
	$\tau_{0,avg}$			$\tau_{0,avg}$		
	0.3	0.6	0.9	0.3	0.6	0.9
0.2	2.8%	3.2%	3.4%	38.8%	43.8%	46.1%
0.4	10.0%	12.4%	30.5%	43.3%	53.0%	57.6%
0.6	22.7%	30.8%	35.0%	58.6%	77.1%	86.8%
0.8	50.5%	74.4%	88.8%	98.9%	142.0%	167.3%

다음으로 전기유변성 유체의 실험지수의 영향을 조사하였다. $\beta=1$ 인 전기유변 SFD의 감쇠계수를 기준으로 하여 $\beta=2$ 인 전기유변 SFD의 감쇠계수 C_{D} , C_{C} 의 증가율(%)을 Table 1에 수록하였다. 실험지수가 증가하면 전기유변 SFD의 감쇠계수 C_{D} , C_{C} 모두가 증가하며, 특히 평균 항복전단응력과 편심율이 클수록 감쇠계수 증가율도 크게 증가하고 있다. 또한 감쇠계수 C_{C} 의 증가율은 감쇠계수 C_{D} 증가율의 약 2배 이상으로써 감쇠계수 C_{C} 는 더욱 크게 증가하고 있다.

5. 결 론

전기장의 크기에 따라 항복전단응력이 변화하는 전기유변성 유체를 SFD에 적용하여 무한 소폭 전기유변 SFD의 유막압력 및 감쇠계수를 이론적으로 해석하였다.

전기유변성 유체의 항복전단응력이 증가함에 따라 축방향의 압력구배가 증가한 유막압력 분포를 형성하여 전기유변 SFD의 감쇠계수 C_{D} , C_{C} 모두가 급격히 증대하였다. 감쇠계수 C_{D} 의 증가는 회전체의 진동을 감소시키며 감쇠계수 C_{C} 의 증가는 회전체의 위험속도를 상승시키는 역할을 하므로 전기유변 SFD를 회전체에 장착할 경우, 전기장의 크기를 조절함으로써 획기적인 진동감소와 위험속도 조절을 능동적으로 제어할 수 있을 것이다.

기호 및 약어 설명

- C : Clearance
- C_f : Dimensionless factor of film force ($= \mu\omega R^3 L / C^2$)
- C_{D} , C_{C} : Dimensionless direct, cross coupled damping coefficients normalized by μR^3

	L/C^3
D	: Diameter of journal
E	: Voltage
e	: Eccentricity
H	: Film thickness
h	: Dimensionless film thickness ($=H/C$)
F_t, F_r	: Tangential and radial film forces
f_t, f_r	: Dimensionless films force ($=F_t, F_r/(C)$)
L	: Length of journal
P	: Pressure
p	: Dimensionless pressure ($=PC^2/\mu\omega R^2$)
p'	: Pressure gradient ($=dp/d\xi$)
R	: Radius of journal
t	: Dimensionless time ($=\omega T$)
u, v, w	: Dimensionless fluid velocity ($=U/\omega R, V/\omega C, W/\omega R$)
v_c	: Velocity of journal center ($=e\omega/C\omega = \epsilon$)
X, Y, Z	: Cartesian coordinate
α	: ER fluid sensitivity
β	: Experimental exponent of ER fluid
ϵ	: Eccentricity ratio ($=e/C$)
η	: Dimensionless cross film coordinate ($=Y/C$)
θ	: Dimensionless circumferential coordinate ($=X/R = \theta' - \omega T$)
ξ	: Dimensionless axial coordinate ($=Z/R$)
μ	: Viscosity
T	: Shear stress
τ	: Dimensionless shear stress ($=TC/\mu\omega R$)
τ_0	: Dimensionless yield shear stress
$\tau_{0,avg}$: Dimensionless average yield shear stress
ω	: Frequency of damper journal center motion

참 고 문 헌

1. W.H. Winslow, "Induced Fibrillation of Suspensions", J. of Applied Physics, Vol. 20, pp. 1137-1140, 1949.
2. D. Scot and J. Yamaguchi, "Solidifying Fluid Transforms Clutches and Flow Valves", Automotive Eng., Vol. 91, No. 11, pp. 61-66, 1983.
3. Z.P. Shulman, R.G. Gordkin, E.V. Korobko and V.K. Gleb, "The Electrorheological Effect and its Possible Uses", J. of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 8, pp. 29-41, 1981.
4. R.W. Phillips, "Engineering Applications of Fluids with a Variable Yield Stress", Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley, 1969.
5. Y. Otsubo, "Electrorheological Properties of Silica Suspensions", J. of Rheology, Vol. 36, No. 3, pp. 479-496, 1992.
6. L.A. SanAndres and J.M. Vance, "Effects of Fluid Inertia on Finite Length Squeeze Film Dampers", ASLE Trans. Vol. 30, No. 3, pp. 384-393, 1987.
7. S.Y. Jung, L.A. SanAndres and J.M. Vance, "Measurements of Pressure Distributions and Force Coefficients in a Squeeze Film Damper, Part I & II" STLE Trans. Vol. 34, No. 3, pp. 375-388, 1991.
8. M.D. Rabinowitz and E.J. Hahn, "Steady-State Performance of Squeeze Film Damper Supported Flexible Rotors", J. of Engineering for Power, pp.552-558, Oct. 1977.
9. S. Wada and M. Tsukijihara, "Elastohydrodynamic Lubrication of Squeeze Films (Part 1. Two Cylinders Lubricated with Grease)", Bulletin of JSME, Vol. 21, No. 159, pp. 1408-1415, 1978.
10. S. Wada and M. Tsukijihara, "Elastohydrodynamic Lubrication of Two Rotating Cylinders (Part 2. Bingham Solid)", Bulletin of JSME, Vol. 24, No. 192, pp. 1072-1077, 1981.
11. J.A. Tichy, "Hydrodynamic Lubrication Theory for the Bingham Plastic Flow Model", J. of Rheology, Vol. 35, No. 4, pp. 477-496, 1991.
12. 정시영, 최승복, 조용철, "Electro-Rheological 유체를 이용한 무한 폭 스퀴즈 필름 댐퍼 해석", 한국정밀공학회, 제9권, 제3호, pp. 61-66, 1992.
13. S. Morishita and J. Mitsui, "Controllable Squeeze Film Damper: An Application of Electro-Rheological Fluid", Rotating Machinery and Vehicle Dynamics, ASME, DE-Vol. 35, pp. 257-262, 1991.
14. A.D. Dimarogonas and A. Kollias, "Electrorheological Fluid-Controlled Smart Journal Bearings", STLE Trans. Vol. 35, No. 4, pp. 611-618, 1992.
15. J.L. Nikolajsen and M.S. Hoque, "An Electroviscous Damper", Proceedings of Workshop on Rotordynamics Instability Problems in High Performance Turbomachinery, NASA Conference Publication No. 3026, 1988.
16. K. Weiss, "Lord Electrorheological Fluid - Experimental Material", Internal Report, Lord Co., 1986.
17. A.F. Storace, "Advanced Rotor Dynamics - High Load Damper Requirements", Internal Report, GE Co., 1986.
18. J.M. Vance, Rotordynamics of Turbomachinery, pp. 234-247, John Wiley & Sons New York, 1988.