

무한 소폭 전기유변 스퀴즈 필름 댐퍼에 관한 이론적 근사해

정시영 · 최상규* · 강덕형**

인하공업전문대학, 항공기계과
*한국기계연구원, 회전체진동실
**주)대한항공, 한국항공기술연구원

Theoretical Approximate Solutions for Electrorheological Short Squeeze Film Dampers

Si-Young Jung, Sang-Kyu Choi* and Duck-Hyung Kang**

Dept. of Aero-Mechanical Engineering, Inha Technical College
*Rotordynamics Laboratory, KIMM

**Korea Institute of Aeronautical Technology, Korean Air

Abstract—ER(electro-rheological) fluids, which are represented as Bingham fluids, have large and reversible changes in yield shear stresses by application of an electric field. In this paper, ER fluids are employed in a short squeeze film damper. The modified Reynolds equation for an ER short squeeze film damper is theoretically solved to get the approximate solutions of pressure profiles and damping coefficients. The theoretical approximate solutions are compared with numerical ones and both results are coincided very well. Both the direct and cross coupled damping coefficients substantially increase with increasing the yield shear stress of ER fluids. Furthermore, the synchronous response analysis of a rigid rotor supported on ER short squeeze film dampers is performed to show the improved damping capability of an ER short squeeze film damper.

Key words—squeeze film damper, electrorheological fluid, damping coefficient, rotordynamics.

1. 서 론

ER유체(Electro-Rheological fluids)는 전기장의 강도에 따라 ER유체의 항복전단응력이 가역적으로 크게 변화하며 또한 전기장의 변화에 대한 응답속도도 매우 빠르다는 장점 때문에 여러가지 기계요소의 성능 향상과 능동제어에 ER유체를 활용하고자 다각적으로 연구되고 있다[1,2].

이러한 ER유체의 활용연구는 회전체 및 윤활공학 분야에서 최근에 시작되었으며 특히 회전체 축진동 감쇠장치인 스퀴즈 필름 댐퍼(SFD: squeeze film damper)와 유막 베어링에 ER유체를 적용하는 이론적 및 실험적 연구가 수행되고 있다. SFD는 항공기용 터보엔진 축진동 감쇠장치로서 점성유체를 사용하고 있으며 감쇠성능도 우수하다. 그러나 SFD 내부의 오일에

서 공동현상이 발생하고 회전체의 불평형이 증대하면 오히려 축진동을 더욱 악화시키는 점프현상을 발생시키는 단점을 갖고 있다[3,4].

저자[5,6]는 ER유체를 적용한 무한 장폭과 무한 소폭 전기유변 SFD의 윤활 지배방정식을 유도하고 수치적으로 해석하여 전기유변 SFD의 감쇠계수가 크게 증가함을 밝힌 바 있다. Tichy[7]도 무한 장폭 전기유변 SFD에 관한 유사한 연구를 통하여 전기유변 SFD의 감쇠성능이 우수함을 이론적으로 해석하였다. Morishita와 Mitsui[8]는 전기유변 SFD를 장착한 회전체의 진동 측정실험을 수행하여 회전체 진폭의 현저한 감소와 위험속도 증가를 관찰하였다.

또한 유막 베어링에 관한 ER유체의 응용연구로서는 Dimarogonas와 Kollias[9]가 원통형 저어널 베어링에 ER유체를 사용함으로써 유막 베어링의 안정성을

크게 향상시킬 수 있음을 이론적으로 입증하였으나 ER유체의 상세한 유동현상을 배제하고 오직 항복전단응력의 효과만을 간략히 고려하였다. Leek[10] 등은 일정한 유막두께를 갖는 단순한 형태의 Rayleigh step 베어링에 ER유체를 적용하는 이론해석 및 실험을 수행하여 전기장의 크기가 증대함에 따라 베어링의 유막압력이 증가하는 것을 밝혔다.

본 논문의 목적은 저자가 이미 발표한 무한 소폭 전기유변 SFD의 유회 지배방정식에 관한 수치적 해석 [6] 대신에 이론적 근사해를 얻고자 하는 것이다. 이론적 근사해로서 무차원 유막압력 및 감쇠계수에 관한 수식적 해를 제시하였고 수치적 해석 결과와 비교 검토하였다. 또한 전기유변 SFD에 의해 지지된 강성 회전체의 불평형 정상상태 응답해석을 수행함으로써 전기유변 SFD의 진동 감쇠성능이 매우 우수함을 보여 주었다.

2. 무한 소폭 전기유변 SFD의 유회방정식

전기장 부하시 ER유체의 유동특성은 Bingham 유체와 유사하기 때문에 일반적으로 다음의 Bingham 모델로 수식화한다[5-10].

$$\mu\dot{\gamma} = T \mp T_o \quad (|T| > T_o) \quad (1a)$$

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

여기서 μ 는 절대점성계수, $\dot{\gamma}$ 는 전단율, T 는 전단응력이다. 또한 T_o 는 전기장 부하시 발생하는 ER유체의 항복전단응력으로서 전기장 크기에 따라 다음과 같은 지수함수의 관계를 갖는다.

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

여기서 E 는 전압, H 는 전극 사이의 간극으로서 SFD의 하우징과 저어널 사이의 간극이며 동시에 유막두께이다. α 와 β 는 실험상수로서 ER유체의 용매와 입자 및 첨가제의 종류, 기타 조성비 등에 따라 결정되며 β 의 값은 일반적으로 $\beta=1\sim 2$ 이다.

위와 같은 Bingham 유체로 수식화한 ER유체를 Fig. 1에서 보여 주는 무한 소폭 SFD에 적용하여 얻은 무차원의 변형된 유회 지배방정식은 다음과 같다[6].

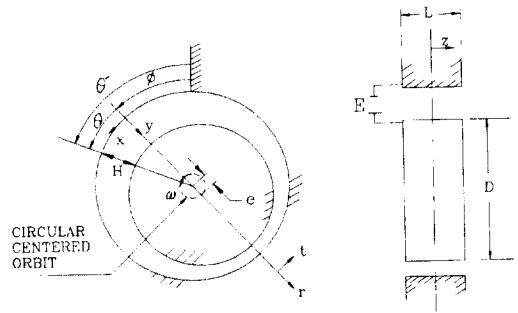


Fig. 1. Geometry and coordinate system of an ER SFD.

$$\frac{d}{d\zeta} \left[\frac{(hp' \pm 2\tau_o)^2 (hp' \mp \tau_o)}{12p'^2} \right] = -\frac{dh}{d\theta} \quad (3)$$

위식에서 p' 은 SFD의 축방향(ζ 방향)의 압력구배이며, h 는 무차원 유막두께이다. τ_o 는 ER유체의 무차원 항복전단응력으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau_o = T_o \frac{C}{\mu \omega R} = \frac{\tau_{o,avg}}{h^\beta} \quad (4a)$$

$$\text{여기서 } \tau_{o,avg} = \alpha \left(\frac{E}{C} \right)^\beta \frac{C}{\mu \omega R} \quad (4b)$$

한편 무한 소폭 전기유변 SFD의 유회 지배방정식 (3)의 해를 얻기 위한 유막압력에 관한 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{dp}{d\zeta} = p'_c = \mp \frac{2\tau_o}{h} \quad (\zeta = \pm 0) \quad (5a)$$

$$p = 0 \quad (\zeta = \pm LD) \quad (5b)$$

위의 경계조건 중 식(5a)는 ER유체를 사용한 전기유변 SFD 내부에서 ER유체가 축방향의 유동시작을 위한 최소의 축방향 압력구배 조건을 나타내는 것이다. 또한 식(5b)는 전기유변 SFD 양단의 압력이 대기압과 일치한다는 압력조건을 의미하고 있다. 이와 같은 경계조건을 유회 지배방정식 (3)에 적용하는 수치적 해석을 수행함으로써 무한 소폭 전기유변 SFD의 압력분포와 유막력 및 감쇠계수를 얻을 수 있다[6].

그러나 SFD를 장착 사용하고 있는 고속 회전체 시스템에 관한 동역학적 해석을 수행할 경우에 수치적 해석을 통하여 감쇠계수를 산출하는 것보다는 이론적 해석을 통하여 얻은 간략한 수식을 사용하는 것이 매

우 편리할 것이다. 또한 이론적 해석을 수행함으로써 여러가지의 설계변수가 SFD의 유막압력 분포 및 감쇠계수에 미치는 영향을 보다 명확히 이해할 수 있을 것이다.

3. 무한 소폭 전기유변 SFD의 근사해

무한 소폭 전기유변 SFD의 근사해를 얻기 위하여 윤활 지배방정식 식 (3)을 축방향으로 적분한 후 유막 압력구배에 관한 경계조건 식 (5a)를 적용하면 아래와 같은 축방향의 압력구배에 관한 3차 방정식을 얻는다.

$$f_1(p') = p'^3 - ap'^2 + b = 0 \quad (6a)$$

$$\text{여기서 } a = 3 \left(\frac{p'_c}{2} - \frac{4}{h^3} \frac{dh}{d\theta} \zeta \right) \quad (6b)$$

$$b = \frac{p'_c{}^3}{2} \quad (6c)$$

Fig. 2에서 보여 준 위의 3차 방정식 곡선은 상수 a 와 b 가 모두 양의 값을 갖는 경우로서 p'_c 이 양의 값을 갖는 영역(즉 SFD의 $0 \leq \theta \leq \pi$ 와 $0 \leq \zeta \leq L/D$ 또는 $\pi \leq \theta \leq 2\pi$ 와 $-L/D \leq \zeta \leq 0$)에 해당된다. p'_c 이 음의 값을 갖는 나머지 영역(즉 SFD의 $0 \leq \theta \leq \pi$ 와 $-L/D \leq \zeta \leq 0$ 또는 $\pi \leq \theta \leq 2\pi$ 와 $0 \leq \zeta \leq L/D$)에서는 상수 a 와 b 가 모두 음의 값을 갖는 다른 형태의 3차 방정식 곡선을 갖지만 근사해를 구하는 방법은

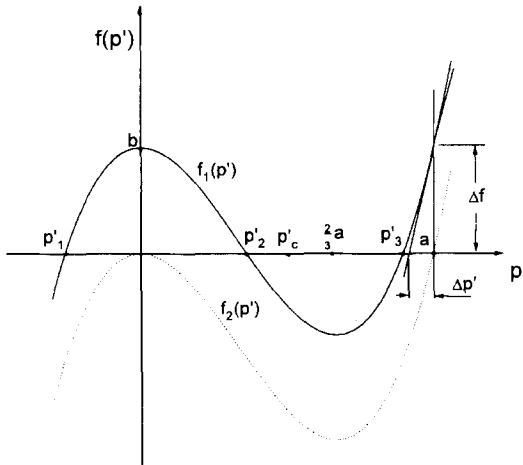


Fig. 2. Graph of a cubic equation in the axial pressure gradient.

아래와 동일하다.

위의 3차 방정식은 Fig. 2에서 보여 주듯이 축방향의 압력구배에 관한 3개의 해(p'_1, p'_2, p'_3)를 갖는다. 그러나 이와 같은 3개의 해는 ER유체가 유동하기 위해 필요한 다음의 축방향 압력구배 조건을 만족해야 한다.

$$|p'| \geq |p'_c| \quad (7)$$

우선 Fig. 2에서 $f_1(p'_c) < 0$ 이므로 p'_1 과 p'_2 은 p'_c 보다 작은 절댓값을 갖는다. 따라서 p'_1 과 p'_2 의 해는 ER유체가 유동할 수 없는 고체상태가 되므로 불필요한 해이다. p'_3 은 위의 식 (7)을 만족하는 해로서 $p'_c \leq \frac{2}{3}a \leq p'_3$ 에 존재한다.

$f_1(p') = 0$ 의 해중 p'_3 의 근사값을 구하기 위해 함수 $y = f_1(p')$ 을 y 축 방향으로 $-b$ 만큼 이동시키면 Fig. 2에서 점선으로 나타낸 함수 $y = f_2(p')$ 을 얻을 수 있으며 $p' = a$ 의 해를 쉽게 얻는다. 따라서 p'_3 은 $\frac{2}{3}a \leq p'_3 \leq a$ 의 범위 내에 존재한다. 여기서 p'_3 의 근사값을 구하기 위하여 $p' = a$ 에서 $f_1(p')$ 의 도함수를 구하면 다음과 같다.

$$f'_1(p')|_{p'=a} = a^2 = \frac{\Delta f}{\Delta p'} \quad (8)$$

따라서 p'_3 의 근사값은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$p'_3 \cong a - \Delta p' = a - \frac{b}{a^2} \quad (9)$$

위 식의 분모항 a^2 에서 유막두께 h 를 포함하는 항은 최종 유막압력과 유막력을 산출할때 필요한 적분과정을 매우 복잡하게 한다. 또한 위 식은 근사해이므로 유막두께를 포함하는 항을 무시하면 식 (6)의 해 p'_3 을 아래와 같이 근사적으로 나타낼 수 있다.

$$p'_3 = \frac{dp}{d\zeta} \cong -\frac{12}{h^3} \frac{dh}{d\theta} \zeta + \frac{23}{18} p'_c \quad (10)$$

다음으로 SFD 양단의 유막압력에 관한 경계조건식(5b)를 위 식(10)에 적용하면 다음과 같은 무차원 유막압력 분포식을 얻는다.

$$p = \frac{6}{h^3} \frac{dh}{d\theta} \left[\left(\frac{L}{D} \right)^2 - \zeta^2 \right] \pm \frac{23}{9} \frac{\tau_{o,avg}}{h^{\beta+1}} \left[\left(\frac{L}{D} \right) \mp \zeta \right] \quad (11)$$

위 식에서 첫번째 항은 ER유체의 점성에 의해 생성된 유막압력이며 축방향으로 포물선 형태의 압력분포를 갖는다. 두번째 항은 전기장 부하시에 ER유체의 항복전단응력에 의해 생성되는 유막압력이며 축방향으로 선형 형태의 압력분포를 갖는다. 한편 항복전단응력에 의해 생성된 두번째 유막압력 항에서 첫번째 ± 기호는 원주방향과 관계되는 부호로써 양의 부호는 양의 유막압력 영역($\pi \leq \theta \leq 2\pi$)에서 사용되며 음의 부호는 음의 유막압력 영역($0 \leq \theta < \pi$)에서 사용된다. 또한 두번째 ζ 기호는 축방향과 관계되는 부호로써 음의 부호는 양의 축방향 영역($0 \leq \zeta \leq L/D$)에서 사용되며 양의 부호는 음의 축방향 영역($-L/D \leq \zeta < 0$)에서 사용된다. 따라서 전기유변 SFD의 축 중앙지점과 최소 및 최대 유막두께 지점에서 유막압력은 불연속적으로 나타난다.

위의 유막압력을 SFD 저어널 표면에 대하여 적분함으로써 접선방향과 반경방향의 무차원 유막력을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f_t = \frac{D}{L} \int_0^{L/D} \int_\phi^{2\pi} p \sin \theta d\theta d\zeta \quad (12a)$$

$$f_r = \frac{D}{L} \int_0^{L/D} \int_\phi^{2\pi} p \cos \theta d\theta d\zeta \quad (12b)$$

여기서 $\phi=0$ 이면 공동현상이 없는 2π -유막해이고 $\phi=\pi$ 이면 공동현상이 있는 π -유막해이다. 또한 SFD를 장착한 고속회전체의 회전체역학적 해석을 편리하게 하기 위하여 위의 유막력은 일반적으로 다음의 감쇠계수로 변환하여 사용한다.

$$C_n = -\frac{f_t}{v_t} = -\frac{f_t}{\epsilon} \quad (13a)$$

$$C_n = -\frac{f_r}{v_t} = -\frac{f_r}{\epsilon} \quad (13b)$$

여기서 $v_t = \epsilon(\omega e / \omega C)$ 은 SFD 저어널 중심의 무차원 접선방향의 속도이며 위 식의 최종 결과인 C_n 와 C_n 는 각각 다음과 같다.

< 2π -유막해 >

(1) $\beta=1$ 경우;

$$C_n = 4 \left(\frac{L}{D} \right)^2 \frac{\pi}{\gamma^3} + \frac{46}{9} \left(\frac{L}{D} \right) \frac{\tau_{o,avg}}{\epsilon \gamma^2} \quad C_n = 0 \quad (14a)$$

(2) $\beta=2$ 경우;

$$C_n = 4 \left(\frac{L}{D} \right)^2 \frac{\pi}{\gamma^3} + \frac{46}{9} \left(\frac{L}{D} \right) \frac{\tau_{o,avg}}{\epsilon \gamma^2} \quad C_n = 0 \quad (14b)$$

여기서 $\gamma = \sqrt{1-\epsilon^2}$

< π -유막해 >

(1) $\beta=1$ 경우;

$$C_n = 2 \left(\frac{L}{D} \right)^2 \frac{\pi}{\gamma^3} + \frac{23}{9} \left(\frac{L}{D} \right) \frac{\tau_{o,avg}}{\epsilon \gamma^2} \quad (14c)$$

$$C_n = 8 \left(\frac{L}{D} \right)^2 \frac{\epsilon}{\gamma^4} + \frac{23}{18} \left(\frac{L}{D} \right) \frac{\pi}{\gamma^3} \tau_{o,avg}$$

(2) $\beta=2$ 경우;

$$C_n = 2 \left(\frac{L}{D} \right)^2 \frac{\pi}{\gamma^3} + \frac{23}{9} \left(\frac{L}{D} \right) \frac{\tau_{o,avg}}{\epsilon \gamma^2} \quad (14d)$$

$$C_n = 8 \left(\frac{L}{D} \right)^2 \frac{\epsilon}{\gamma^4} + \frac{23}{12} \left(\frac{L}{D} \right) \frac{\pi}{\gamma^5} \tau_{o,avg}$$

4. 전기유변 SFD-강성회전체의 불평형 응답 해석

전기장의 강도에 따라 변화하는 ER유체의 항복전단응력이 회전체의 진동현상에 미치는 영향을 해석하기 위하여 회전체 양단에 무한 소폭 전기유변 SFD로 지지한 강성회전체 (Fig. 3)를 도입한다. 질량 $2M$ 을 갖는 회전체가 질량은 없으나 강성은 무한 큰 회전축 중앙에 위치하고 있다. SFD 저어널은 스프링 상수 K_r 을 갖는 지지 스프링(retainer spring)에 의해 지지되어 반지름 e 인 동심원 궤도를 따라 회전축의 회전속도 ω 와 같은 각속도로 휘돌림(whirling) 운동을 하고 있다. 또한 회전체의 무게중심은 회전체 또는 회전축의 도심으로부터 ρ 만큼 불평형을 이루고 있다. 이와

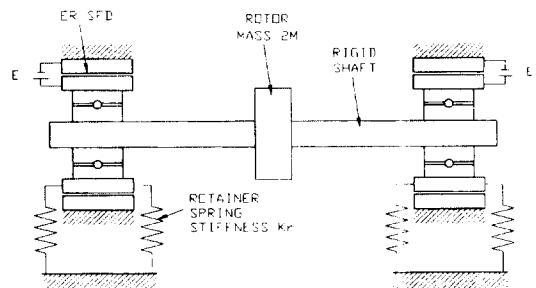


Fig. 3. A rigid rotor-ER SFD system.

같은 강성회전체의 운동방정식을 복소수 함수($\bar{c} = c_x + ie_y$, $\bar{\rho} = \rho_x + i\rho_y$)로 표현하면 다음과 같다.

$$M(\ddot{\bar{c}} + \ddot{\bar{\rho}}) + C_n^* \dot{\bar{c}} + C_n^* \omega \bar{c} + K_r \bar{c} = 0 \quad (15)$$

여기서 C_n^* 와 C_n^* 는 앞 장에서 해석한 무한 소폭 전기유변 SFD의 감쇠계수로서 접선과 반지름 방향의 유막압력으로 부터 산출한 차원계수이다. 위 식으로 부터 불평형에 대한 정상상태응답을 해석하여 무차원화 하면 다음과 같은 회전체의 무차원 진폭 또는 전기유변 SFD 저어널의 편심율 ε 을 얻을 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{|\bar{c}|}{C} = \frac{U}{\sqrt{Q_x^2 + Q_y^2}} \quad (16a)$$

여기서

$$Q_x = B \frac{C_n}{\delta} + \frac{1}{\delta^2} - 1 \quad Q_y = B \frac{C_n''}{\delta} \quad (16b)$$

위 식의 U , B , δ 는 무차원화시킨 불평형, 베어링 및 회전속도 계수들로서 각각 다음과 같다.

$$U = \frac{\rho}{C} \quad B = \frac{\mu L}{M \omega_s} \left(\frac{R}{C} \right)^3 \quad \delta = \frac{\omega}{\omega_s} = \frac{\omega}{\sqrt{K_r/M}} \quad (17)$$

또한 C_n 와 C_n'' 는 전기유변 SFD의 무차원 감쇠계수로서 식 (14)와 같다. 그러나 식 (14)의 무차원 평균 항복전단응력 $\tau_{o,avg}$ 는 식 (4b)에서 보여 주듯이 일정한 크기의 전기장 부하에서 회전속도가 증가하면 감소한다. 즉 $\tau_{o,avg}$ 가 일정하다는 것은 회전속도가 증가할수록 전기장의 크기도 증가함을 의미한다. 따라서 회전속도와 무관하게 일정한 크기의 전기장을 의미할 수 있는 다음의 무차원 항복전단응력 $\tau_{o,s}$ 를 도입하여 사용하면 ER유체에 작용하는 전기장 크기가 회전체 진동에 미치는 영향을 이해하는데 더욱 편리할 것이다.

$$\tau_{o,s} = \tau_{o,avg} \cdot \delta = \alpha \left(\frac{E}{C} \right)^\beta \frac{C}{\mu \omega_s R} \quad (18)$$

한편 회전체의 불평형 힘과 전기유변 SFD의 지지점에 전달되는 힘의 비율을 나타내는 전달계수 T_r 은 다음과 같다.

$$T_r = \frac{\varepsilon}{U} \sqrt{(Q_x + 1)^2 + Q_y^2} \quad (19)$$

5. 해석 결과 및 검토

앞에서 구한 유막압력과 감쇠계수에 관한 근사해의 정확성을 검토하기 위하여 참고문헌 [6]에서 제시한 수치해석 결과와 비교하였다. Fig. 4는 전기유변 SFD의 축 중앙에서 원주방향의 무차원 유막압력 분포를 편심율 $\varepsilon=0.5$ 와 0.8 의 경우에 대하여 각각 비교하였다. L/D 비율과 지수 β 는 각각 $L/D=0.25$, $\beta=1$ 이다. 전반적으로 근사적 이론해는 수치적 해와 잘 일치하고 있으나 항복전단응력이 증가할수록 또는 최소 유막두께 지점에 근접할수록 근사적 유막압력이 수치적 유막압력 보다 크게 예측되고 있다. Fig. 5는 편심율 $\varepsilon=0.5$, 원주방향 $\theta=210^\circ$ 지점에서 전기유변 SFD의 축방향 무차원 유막압력분포를 보여 주고 있으며 수치적 해석 결과와 잘 일치하고 있다.

Fig. 6과 7은 각각 ER유체의 실험 지수 $\beta=1$ 과 $\beta=2$ 경우에 대한 전기유변 SFD의 무차원 감쇠계수를 보여 주고 있다. 감쇠계수의 경우도 근사적 이론해와 수치적 해석 결과가 매우 잘 일치하고 있다. 따라서 본

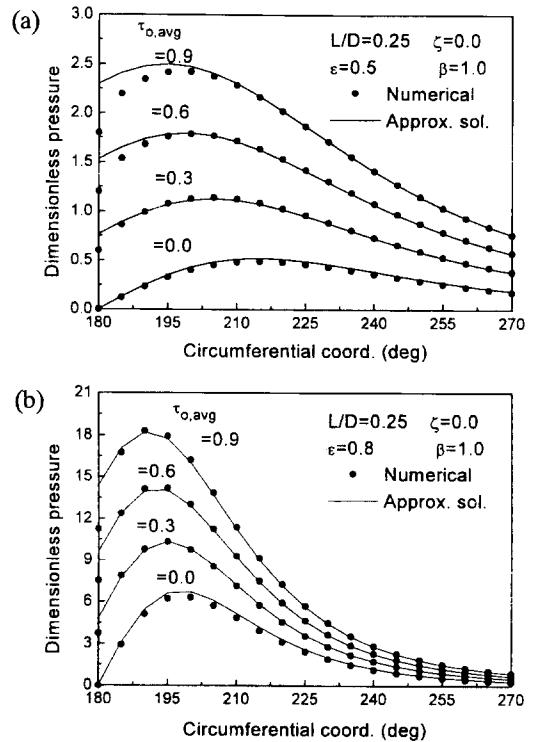


Fig. 4. Dimensionless circumferential pressure profiles at the center (a) $\varepsilon = 0.5$, (b) $\varepsilon=0.8$.

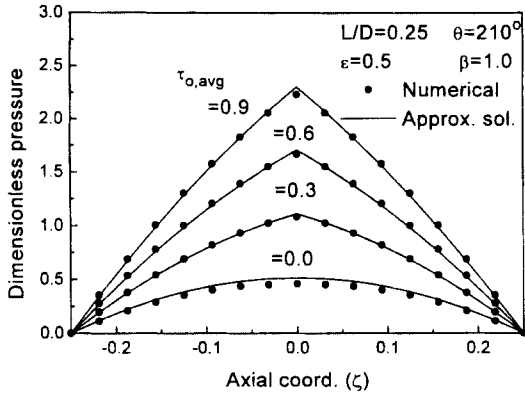


Fig. 5. Dimensionless axial pressure profiles at $\theta=210^\circ$, $\varepsilon=0.5$.

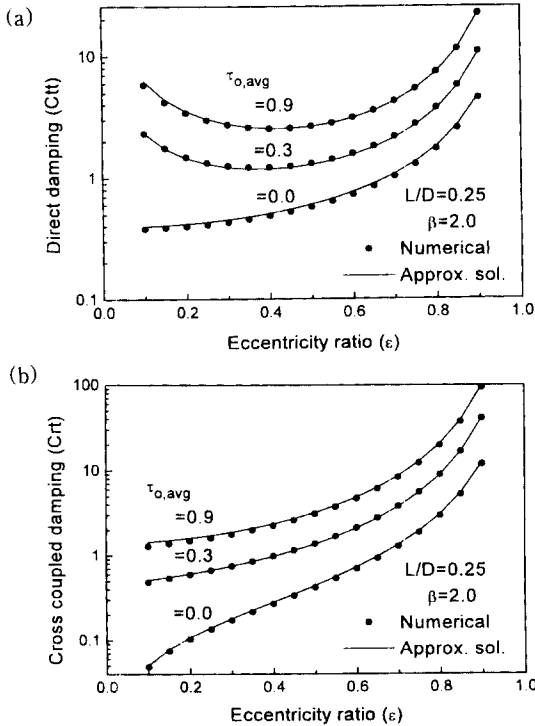


Fig. 6. Dimensionless damping coefficients with $\beta=1$ (a) direct damping, (b) cross coupled damping.

논문에서 제시한 무한 소폭 전기유변 SFD의 유막압력과 감쇠계수에 관한 이론적 근사해는 우수하며 고속회전체 진동해석에 매우 유용하게 사용할 수 있을 것이다.

Fig. 8은 전기유변 SFD에 의해 지지된 강성회전체의 불평형에 대한 정상상태응답 해석 결과로서 각각

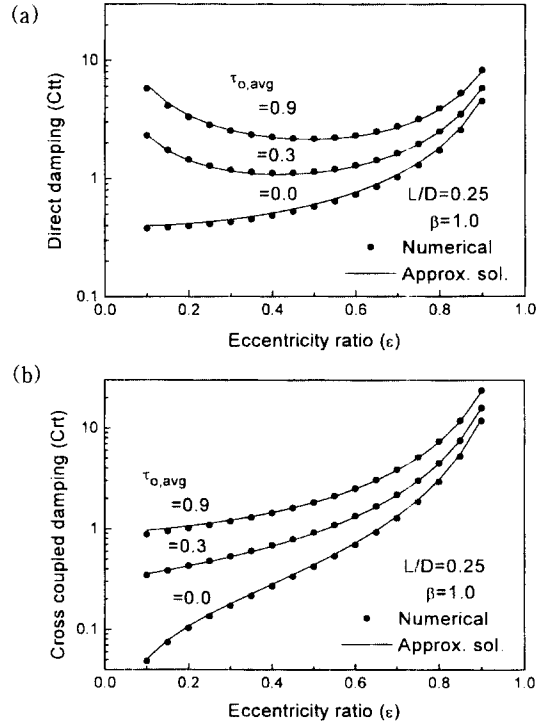


Fig. 7. Dimensionless damping coefficients with $\beta=2$ (a) direct damping, (b) cross coupled damping.

공동현상이 발생하는 경우와 공동현상이 발생하지 않는 경우이다. 강성회전체의 설계변수인 무차원 불평형계수와 베어링계수는 각각 $U=0.3$, $B=1.0$ 로 가정하였다. 공동현상이 발생하는 SFD 경우는 주 감쇠계수 C_n 와 연성 감쇠계수 C_r 가 각각 존재하며 특히 연성 감쇠계수로 인하여 회전속도가 상승할때 비선형 진동현상인 점프현상이 발생한다. Fig. 8(a)에서 전기장 무부하시, $\tau_{o,s}=0$, 회전체 진폭은 매우 크며 또한 회전속도 $\omega \geq 2.4\omega_k$ 에서 비선형 강성효과로 인한 불안정한 점프현상이 발생하고 있다. 이러한 불안정한 점프현상은 연성 감쇠계수 C_r 의 존재 때문에 발생한다. 그러나 일정 크기의 전기장 부하시, 즉 항복전단응력 $\tau_{o,s}=0.5$ 경우에는 동일 회전속도에서 회전체의 진폭이 크게 감소하고 또한 회전속도 $\omega \leq 3.2\omega_k$ 에서 점프현상이 발생하지 않아 회전체의 안정성을 향상시키고 있다. 또한 항복전단응력 $\tau_{o,s}=1.2$ 경우에도 회전속도 $\omega \leq 4\omega_k$ 에서는 점프현상이 발생하고 있지 않아 더욱 안정된 불평형 응답을 보여 주고 있다.

한편 공동현상이 발생하지 않는 전기유변 SFD의

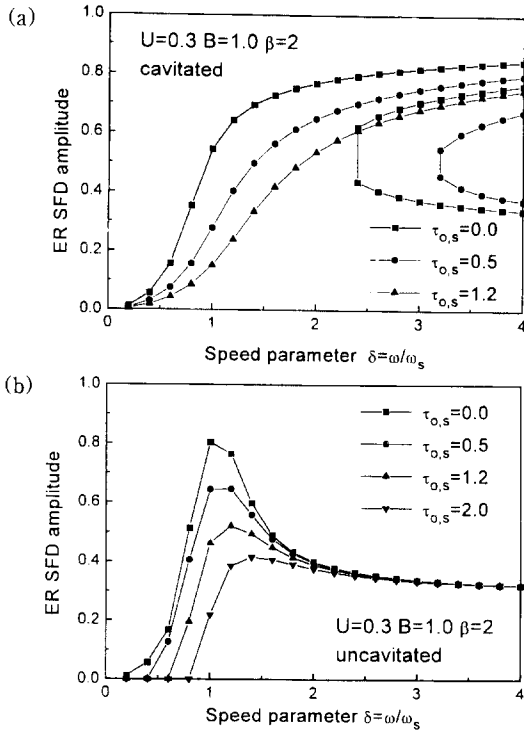


Fig. 8. Responses of rigid rotor supported on ER SFD
(a) cavitated, (b) uncavitated ER SFD

경우는 연성 감쇠계수 C_n 가 존재하지 않기 때문에 Fig. 8(b)에서 보여 주듯이 불안정한 점프현상은 나타나지 않는다. 즉 순수 감쇠기능을 갖는 주 감쇠계수 C_n 만이 존재하므로 주 감쇠계수의 크기가 증가할수록 회전체의 진폭은 크게 감소한다. 따라서 전기유변 SFD에 주는 전기장의 크기를 증대시킬수록 회전체의 진폭은 크게 감소한다.

6. 결 론

전기장의 강도에 따라 항복전단응력이 발생하는 ER유체를 Bingham유체로 모델링하여 얻은 무한 소폭 전기유변 SFD에 관한 Reynolds 윤활 지배방정식의 근사해를 이론적으로 해석하였다. 본 논문에서 제시한 이론적 근사해인 무한 소폭 전기유변 SFD의 무차원 유막압력과 무차원 주 감쇠계수 C_n 및 연성 감쇠계수 C_n 는 수치적 해와 잘 일치하였다. ER유체의 항복전단응력으로 인하여 생성된 유막압력은 SFD의 축방향에 대하여 선형 형태로 분포하며 항복전단응력

의 크기에 비례하여 증가한다. 또한 감쇠계수도 ER유체의 항복전단응력에 비례하여 증가한다. 한편 전기유변 SFD에 의해 지지된 강성회전체의 불균형 응답 해석을 수행함으로써 SFD에 응용한 ER유체는 회전체의 진동을 크게 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라 회전체의 안정성도 향상시키고 있음을 입증하였다.

기호 및 약어 설명

- B : Bearing parameter= $\mu L (R/C)^3 / (M \omega_s)$
- C : Clearance of SFD
- C_m, C_n : Dimensionless direct, cross coupled damping coefficients normalized by $\mu L (R/C)^3$
- D : Diameter of SFD journal
- E : Voltage
- e : Eccentricity
- f_θ, f_r : Dimensionless tangential, radial film forces normalized by $\mu \omega L R^3 C^2$
- H : Film thickness
- h : Dimensionless film thickness= H/C
- K_r : Stiffness of SFD retainer spring
- L : Length of SFD journal
- $2M$: Mass of rotor-SFD system
- p : Dimensionless pressure normalized by $\mu \omega L R C^2$
- p' : Dimensionless pressure gradient= $dp/d\zeta$
- R : Radius of SFD journal
- T_r : Transmissibility
- U : Dimensionless imbalance= ρ/C
- v_t : Dimensionless tangential velocity= $\omega e / \omega C = \varepsilon$
- α, β : Experimental constants of ER fluids
- γ : $=\sqrt{1-\varepsilon^2}$
- δ : Speed parameter= ω/ω_s
- ε : Eccentricity ratio= e/C
- θ : Dimensionless circumferential coordinate
- ζ : Dimensionless axial coordinate= z/R
- μ : Viscosity
- ρ : Imbalance of rotor system
- 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=

$$\tau_{o,s} = \frac{\alpha(E/C)^{\beta} C / \mu \omega R}{\alpha(E/C)^{\beta} C / \mu \omega_s R}$$

$\tau_{o,s}$: Dimensionless yield shear stress=
 ω : Frequency of SFD journal center motion
 ω_s : First critical speed of rigid rotor on retainer
 spring= $\sqrt{K_r/M}$

참 고 문 헌

- Jordan, T. C. and Shaw, M. T., "Electrorheology," IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 24, No. 5, pp. 849-878, 1989.
- Shulman, J. P., Gordkin, R. G., Korobko, E. V., and Gleb, V. K., "The Electro- Rheological Effect and its Possible Uses," J. of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 8, pp. 29-41, 1981.
- Vance, J. M., "Rotordynamics of Turbomachinery," John Wiley & Sons, New York, pp. 234-247, 1988.
- SanAndres, L. A. and Vance, J. M., "Effect of Fluid Inertia on the Performance of Squeeze Film Damper Supported Rotors," J. of Eng. for Gas Turbines and Power, Vol. 110, No. 1, pp. 51-57, 1988.
- 정시영, 최승복, 조용철, "Electro-Rheological 유체를 이용한 무한폭 스퀴즈 필름 댐퍼 해석," 한국정밀공학회지, 제9권, 제3호, pp. 61-66, 1992.
- Jung, S. Y. and Choi, S. B., "Analysis of a Short Squeeze Film Damper Operating with Electrorheological Fluids," STLE Tribology Trans. Vol. 38, No. 4, pp. 857-862, 1995.
- Tichy, J. A., "Behavior of a Squeeze Film Damper with an Electrorheological Fluid," STLE Tribology Trans. Vol. 36, No. 1, pp. 127-133, 1993.
- Morishita, S. and Mitsui, J., "Controllable Squeeze Film Damper (An Application of Electro-Rheological Fluid)," J. of Vibration and Acoustic, Vol. 114, pp. 354-357, 1992.
- Dimarogonas, A. and Kollias, A., "Electrorheological Fluid-Controlled 'Smart' Journal Bearings," STLE Tribology Trans., Vol. 35, No. 4, pp. 611-618, 1992.
- Leck, T. H., Lingard, S., Atkin, R. J. and Bullough, W. A., "An Experimental Investigation of the Flow of an Electro-rheological Fluid in a Rayleigh Step Bearing," J. of Physics D: Appl. Physics, Vol. 26, pp. 1592-1600, 1993.