

## 슬롯 링을 장착한 전기유변 스퀴즈 필름 댐퍼의 감쇠성능 해석

정시영 · 김창호\* · 이용복\*

인하공업전문대학, 항공기계과  
\*한국과학기술연구원 트라이볼로지연구소

### Damping Performance Analysis of Electro-Rheological Squeeze Film Damper Sealed with Slotted Rings

Si-Young Jung, Chang-Ho Kim\* and Yong-Bok Lee\*

Department of Aero-Mechanical Engineering, Inha Technical College  
\*Tribology Research Center, Korea Institute of Science and Technology

**Abstract** – The present paper proposes a new type of an electro-rheological squeeze film damper (ER SFD) of which the damping capacity can be controlled by the application of electric field. The new ER SFD is sealed with slotted rings having electrodes at the inside of the constant gap. The ER SFD can prevent the problem of electric short which might be occurred in a previous ER SFD. Reynolds lubrication equation for a Newtonian fluid and the end leakage equation for ER fluids are numerically solved to get the pressure distributions and the damping coefficients of the ER SFD. The results show that the damping coefficients greatly increase with increasing the yield shear stress of ER fluid. In addition, the unbalance response analysis of a flexible rotor supported on the new ER SFD implies that the rotor system can be operated with the minimum of rotor amplitude and force transmissibility by controlling the yield shear stress of ER fluids properly.

**Key words** – Squeeze film damper, electrorheological fluid, damping coefficient, rotordynamics.

#### 1. 서 론

펌프, 압축기 및 가스터빈 등 터보기계류의 출력과 효율증대를 위하여 경량화, 소형화 및 고속화를 기계 설계의 기본개념으로 설정하는 추세이다. 특히 터보 기계의 대형화보다는 고속운전을 통하여 성능향상을 도모하고 있기 때문에 고속회전으로 인한 기계의 심각한 축진동과 안정화 문제가 반드시 발생한다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 다양한 형태의 감쇠장치와 안정화 기술개발이 필요하다. 고속회전기계용 감쇠장치 중에 스퀴즈 필름 댐퍼(SFD : Squeeze Film Damper)는 구조가 단순하면서도 감쇠성능이 우수하여 구름베어링에 지지된 고속회전체의 감쇠장치로 이용되고 있다. SFD는 가스터빈 항공엔진용으로 개발되어 현재까지 고속회전기계의 감쇠장치로서 우

수한 성능을 인정받고 있지만 매우 비선형적 동특성을 갖고 있기 때문에 부적절히 설계하면 오히려 회전체계의 축진동을 더욱 악화시키는 결과를 초래하여 사용범위에 제한을 받고 있다[1-4].

한편 지능재료의 일종인 ER(Electro-Rheological) 유체가 여러가지 기계요소의 성능향상과 진동제어에 활용되어 그 실용성을 인정받으면서[5,6], 회전체공학과 윤활공학 분야에서도 ER유체의 응용연구가 최근에 시작되었다. 특히 고속회전체의 축진동 감쇠장치[7-11]와 유막베어링[12,13]에 ER유체를 적용하는 이론적 및 실험적 연구가 수행되어 축진동 감쇠성능 및 윤활성능을 크게 향상시킬 수 있음이 밝혀진 바 있다. 그러나 현재까지 연구된 ER SFD와 ER 유막베어링은 간극의 크기가 변화하는 베어링 틈새, 즉 유막 간극을 전기장 간극으로 활용하고 있는 구조로 이루어

어져 있다. 이러한 구조는 전기장 간극의 크기가 변화하기 때문에, 특히 제어널의 편심율이 클 때는 최소 간극에서 전기적 단락현상이 쉽게 발생하여 그 기능을 일시에 상실하고 고속회전기계에 치명적 손상을 발생시킬 수 있는 위험성이 존재한다. 따라서 현재까지 연구된 바 있는 ER SFD 및 ER 유막베어링은 회전기계에 직접 활용하기에는 매우 어려울 것이다.

따라서 ER SFD의 단락 위험성을 제거하여 고속회전기계에 실제 적용할 수 있을 뿐만 아니라 ER유체의 장점을 활용할 수 있는 새로운 구조의 Slot ER SFD를 본 논문에서 처음으로 제안하고, 이에 관한 동특성계수 해석기법을 서술하고자 한다. 이와 더불어 Slot ER SFD의 감쇠성능이 우수함을 입증하고자 Slot ER SFD에 지지된 탄성회전체의 정상상태 불균형응답 해석도 수행하였다.

### 2. Slot ER SFD의 동특성계수 해석

일정한 크기의 간극으로 가공한 슬롯 링(slotted ring : Fig. 1)을 SFD 제어널 양단에 장착한 새로운 구조의 Slot ER SFD(Fig. 2)는 기존의 ER SFD[8-11]와는 달리 전기장 부하시 발생할 수 있는 단락현상을 미연에 방지할 수 있다. 이러한 Slot ER SFD는 제어널과 하우징 사이의 오일 압축지역에 전기장이 형성되지 않기 때문에 이 지역의 유체유동은 뉴우튼유체 유회이론으로 잘 알려진 레이놀즈 방정식에 따라 유체가 거동한다. 그러나 SFD의 양단에 장착된 슬롯 링에는 전기장이 형성되기 때문에 전기장 크기에 따라 축방향의 누설유량이 변화하고 SFD 내부의 유막압력분포에 영향을 준다. 따라서 뉴우튼유체 유회 지배방정식과 ER유체 거동으로부터 얻은 경계조건식을 해석함으로써 유막압력분포와 동특성계수, 즉

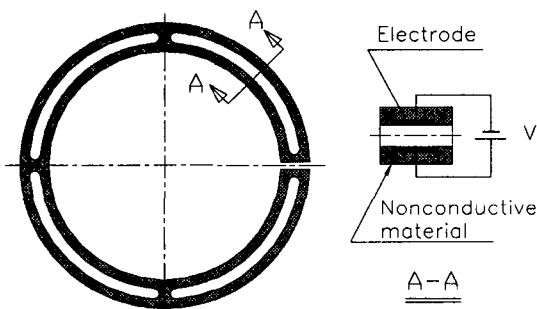


Fig. 1. Slotted ring.

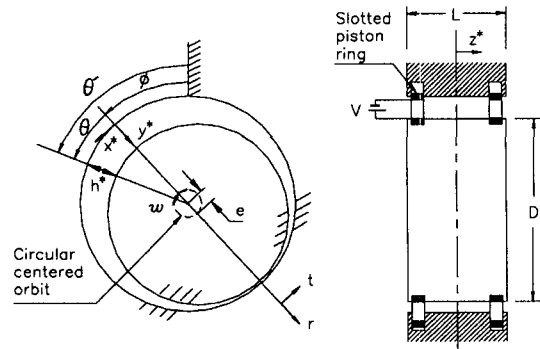


Fig. 2. Coordinate system of a slot ER SFD.

감쇠계수를 해석할 수 있다.

#### 2-1. SFD의 뉴우튼유체 유회 지배방정식

SFD는 하우징과 제어널 및 구름 베어링으로 구성되어 있으며, 축은 구름베어링에 의해 지지되어 회전(spinning)운동을 하고 SFD 제어널은 오직 휘돌림(whirling)운동을 한다. 즉 제어널의 휘돌림 운동은 편심량( $e$ )을 반지름으로 하여 하우징 중심점을 중심으로 축의 회전속도와 같은  $\omega$ 로 원운동을 한다. Slot ER SFD의 경우도 ER유체가 압축되는 지역에서는 전기장이 부하되지 않기 때문에 뉴우튼유체를 사용하는 일반 SFD와 동일한 유체유동이 발생한다. 따라서 비압축성, 등점성, 층류의 뉴우튼유체 유동을 지배하는 운동량 방정식과 연속 방정식으로부터 다음과 같은 무차원 유회 지배방정식을 얻는다.

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + \left( \frac{D}{L} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \zeta} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial \zeta} \right) = -12 \frac{\partial h}{\partial \theta} \quad (1)$$

위 지배방정식에 사용한 무차원계수는 다음과 같으며 \*는 차원 변수를 나타낸다.

$$h = \frac{h^*}{C} = 1 + \epsilon \cos \theta$$

$$\theta = \frac{x^*}{R} = \theta' - \omega t^*, \quad \eta = \frac{y^*}{C}, \quad \zeta = \frac{2z^*}{L}$$

$$t = \omega t^*, \quad u = \frac{u^* - \omega R}{\omega R}, \quad v = \frac{v^*}{\omega C}, \quad w = \frac{w^*}{\omega R}$$

$$\tau = \frac{\tau^* C}{\mu \omega R}, \quad p = p^* \frac{C^2}{\mu \omega R^2}, \quad \epsilon = \frac{e}{C}$$

#### 2-2. 슬롯 링의 ER유체 누설유량

Slot ER SFD의 양단에는 슬롯 링이 Fig. 2와 같

이 장착되어 있기 때문에 슬롯 링에 부하되는 전기장을 조절함으로써 축방향의 누설유량(ER유체)을 제어할 수 있다. 이때 슬롯 링의 간극을 통과하는 ER유체의 누설유량은 SFD 양단에서의 축방향 누설유량과 동일하다. 따라서 SFD 유효지배 방정식에 관한 Slot ER SFD의 경계조건식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$q_{c,ER}(\theta) = q_c(\theta, \zeta = \pm 1) \quad (2)$$

위 식의 ER유체 누설유량  $q_{c,ER}$ 은 전기장이 형성된 슬롯 링의 Slot 간극을 통과하는 유량으로서 Bingham 유체의 유동특성을 갖는다. 따라서 ER유체의 누설유량은 무차원의 운동량 방정식과 Bingham 모델 방정식을 무차원화한 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$\left(\frac{D}{L}\right)\frac{\partial p}{\partial \zeta} = \frac{\partial \tau_{\zeta\eta}}{\partial \eta} \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial \eta} = \tau_{\zeta\eta} \mp \tau_o \quad (|\tau_{\zeta\eta}| \geq \tau_o) \quad (4a)$$

$$\frac{\partial w}{\partial \eta} = 0 \quad (|\tau_{\zeta\eta}| < \tau_o) \quad (4b)$$

위의 Bingham 모델 방정식에서 ER유체의 무차원 항복전단응력은 다음과 같다.

$$\tau_o = a \left(\frac{V}{K_p}\right)^b \frac{C}{\mu \omega R} \quad (5)$$

여기서  $K_p$ 는 슬롯 링의 Slot 간극,  $V$ 는 전압이며  $\mu$ 는 ER유체의 점도이다.  $C, R, \omega$ 는 각각 SFD의 틈새, 반경, 각속도를 나타내며  $a$ 와  $b$ 는 ER유체의 실험상수이다.

Fig. 3은 전기장 부하시 발생하는 고체상태의 core가 존재하는 ER유체의 전형적인 속도분포이다. 이에 관한 ER유체 속도의 경계조건은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$w=0 \quad \text{at } \eta=0, \eta=k \quad (6a)$$

$$w=w_c \quad \text{at } \eta=k_1, \eta=k_2=k_1+k_c \quad (6b)$$

여기서  $w_c$ 는 ER유체의 core 속도이며  $k_c$ 는 간극 중앙에 위치하는 core의 두께이다.

식(3)과 식(4)를 적분한 후 경계조건식(6)을 적용하여 슬롯 링의 Slot 간극을 통과하는 ER유체의 누설유량을 구하면 다음과 같다.

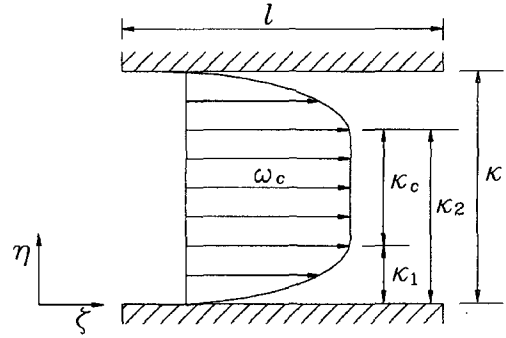


Fig. 3. Velocity profile of ER fluid in the slotted ring.

$$q_{c,ER} = \frac{(kp \pm 2\tau_o)^2 (kp \mp \tau_o)}{12p^2} \quad (7)$$

여기서  $p'$ 은 축방향의 압력구배이며,  $\pm$ 기호 중 위쪽 기호는 축의 양방향 ( $+\zeta$ ), 아래쪽 기호는 축의 음방향 ( $-\zeta$ )의 누설유량이다. 그러나 간극 전체가 core로 변화하면 core의 속도가  $w_c=0$ 이 되고 ER유체의 흐름은 정지된다. 이 때의 임계압력구배  $p'_c$ 은 다음과 같다.

$$p'_c = \mp \frac{2\tau_o}{k} \quad (8)$$

다시 말하면 슬롯 링 구간에서 압력구배 값이  $p'_c$ 의 절대값 보다 클 때는 축방향의 오일 누설이 발생하지만, 작을 경우에는 오일누설이 발생하지 않는다.

### 2-3. 수치해석

앞에서 서술한 축방향 누설유량에 관한 경계조건식과 SFD의 유효 지배방정식을 해석하기 위하여 유한차분법(finite difference method)을 이용한다. Fig. 4에서 보여주는 격자구조에서 SFD의 유효 지배방정식을 차분화하여 격자점  $i,j$ 의 압력  $p_{i,j}$ 로 정리하면 다음과 같다.

$$p_{i,j} = a_1 p_{i,j+1} + a_2 p_{i,j-1} + a_3 p_{i+1,j} + a_4 p_{i-1,j} + a_5 \quad (9)$$

여기서

$$a_1 = h_p^3/Q, \quad a_2 = h_p^3/Q, \quad a_3 = \left(\frac{D}{L}\right)^2 \left(\frac{\Delta\theta}{\Delta\zeta}\right)^2 h_p^3/Q$$

$$a_4 = 12(h_p - h_p)\Delta\theta/Q, \quad Q = h_p^3 + h_p^3 + 2\left(\frac{D}{L}\right)^2 \left(\frac{\Delta\theta}{\Delta\zeta}\right)^2 h_p^3$$

위 차분식의 경계조건으로 Slot ER SFD 양단에서

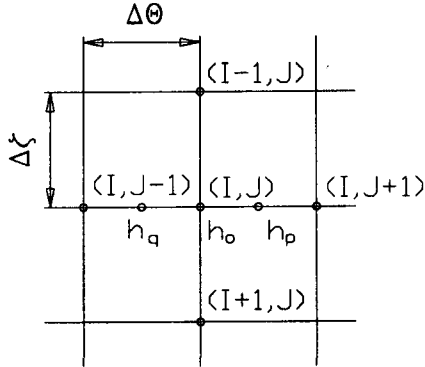


Fig. 4. Grid mesh in the squeeze film land.

의 누설유량식을 이용한다. 이때 슬롯 링의 Slot 구간에서 압력구배 절대값이 임계압력구배  $p'_c$  보다 작을 때와 클 때의 2가지 경우로 구분하여 적용한다. 먼저 압력구배 값이 임계압력구배 보다 작을 경우에는 Slot 간극 전체에 고체상태의 core가 형성되어 Slot 간극이 완전히 밀봉된다. 즉 슬롯 링 내면에서의 유막압력이 다음 식을 만족할 경우에는 누설유량이 전혀 발생하지 않는다.

$$p_{NR,J} \leq 2 \left( \frac{L}{D} \right) \tau_o \left( \frac{l}{k} \right) \quad (10)$$

여기서  $l = 2L_p/L$ ,  $k = K_p/C$ 로서 슬롯 링의 Slot 크기  $L_p \times K_p$ 의 무차원 값이다. 그리고 압력구배 값이 0이 되어 Slot ER SFD 양단에서의 압력은 다음과 같다.

$$p_{NR,J} = p_{NR-1,J} \quad (11)$$

반면에 슬롯 링의 Slot 구간에서 압력구배 절대값이  $p'_c$  보다 클 경우에는 ER유체의 누설이 발생하여 경계조건식으로부터 다음의 조건식을 얻을 수 있다.

$$h^3 \left( \frac{D}{L} \right) \frac{\partial p}{\partial \zeta} = \left[ \frac{(kp')^3 + 3\tau_o(kp')^3 - 4\tau_o^3}{p^2} \right] \quad (12)$$

여기서  $p'$  슬롯 링의 Slot 구간에서의 압력구배로서 SFD의 외부 압력이 대기압과 같다면  $p'$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$p = \left( \frac{D}{L} \right) \left( \frac{\Delta p}{\Delta \zeta} \right) = \left( \frac{D}{L} \right) \frac{p_{out} - p_{in}}{l} = - \left( \frac{D}{L} \right) \frac{p_{NR,J}}{l} \quad (13)$$

다시 위 식을 식(12)에 대입한 후 정리하면 Slot ER SFD 양단에서의 압력에 관한 3차원 방정식을 다음

과 같이 얻는다.

$$\left\{ 1 + \frac{\Delta \zeta}{l} \left( \frac{k}{h_o} \right) \right\}^3 p_{NR,J}^3 - \left\{ p_{NR-1,J} + 3\tau_o \left( \frac{L}{D} \right) \left( \frac{\Delta \zeta k^2}{h_o^3} \right) \right\} p_{NR,J}^2 + 4 \left( \tau_o \frac{L}{D} \right)^3 \left( \frac{\Delta \zeta l^2}{h_o^3} \right) = 0 \quad (14)$$

위 식의 3개 근 중 ER유체 유동에 필요한 최소값보다 큰 값을 선택하고 유한차분법의 반복적 해법 통하여 Slot ER SFD의 유막압력분포를 해석할 수 있다. 유막압력을 SFD의 저어널 표면에 따라 다음과 같이 적분함으로써 Slot ER SFD의 접선과 반경 방향의 무차원 유막력을 각각 구할 수 있다.

$$f_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{NR} \sum_{j=1}^{NC} p_{i,j} \sin \theta_j \Delta \theta \Delta \zeta, \quad f_r = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{NR} \sum_{j=1}^{NC} p_{i,j} \cos \theta_j \Delta \theta \Delta \zeta \quad (15)$$

위의 유막력은 SFD 저어널의 무차원 접선속도( $v_i = \epsilon$ )로 인하여 발생하는 유체 저항력이므로 선형화된 무차원 동특성계수인 주 감쇠계수(direct damping coefficient)와 연성 감쇠계수(cross coupled damping coefficient)로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$C_{ii} = -\frac{f_i}{v_i} = \frac{f_i}{\epsilon}, \quad C_{rr} = -\frac{f_r}{v_r} = \frac{f_r}{\epsilon} \quad (16)$$

#### 2.4. Slot ER SFD의 감쇠계수

전기장의 크기에 따라 변화하는 ER유체의 항복전단응력이 유막압력분포와 감쇠계수에 미치는 영향을 분석하기 위하여 유막영역을 축방향과 원주방향으로 각각 20개, 30개로 등분하였다. 유한차분법을 이용하여 반복계산할 때 수렴속도를 높이기 위해 SOR(successive over relaxation)변수를 사용하였으며 SOR변수 값은 1.5로 하였다. 본 연구에서 수치해석하고자 하는 Slot ER SFD의 형상비는  $L/D = 0.25$ , 슬롯 링의 Slot 간극은 SFD의 틈새와 동일하게, 폭은 SFD 길이의 1/8로 설정하였다. 즉 Slot의 무차원 크기는  $k \times l = 1.0 \times 0.25$ 이다. 또한 Slot ER SFD의 해석은 공동현상을 고려하는  $\pi$ -유막해(cavitated solution)를 기초로 하였다.

Fig. 5는 각각 유막두께가 작은 지역 ( $\theta = 210^\circ$ )과 큰 지역 ( $\theta = 330^\circ$ )에서 ER유체의 항복전단응력에 따라 변화하는 축방향의 무차원 유막압력분포를 보여 주고 있다. 유막두께가 작은 지역에서는 높은 압력

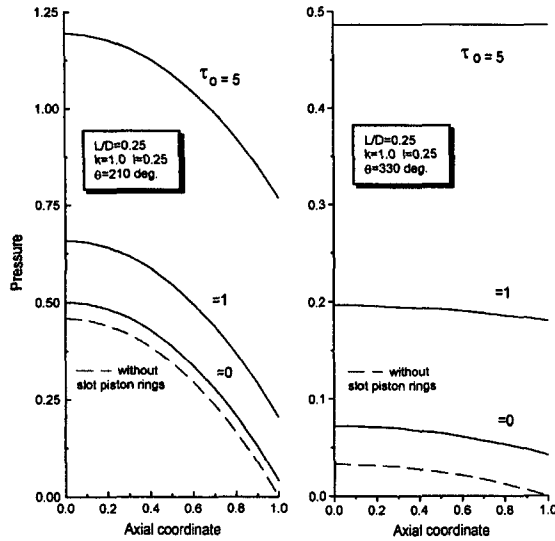


Fig. 5. Dimensionless axial pressure profiles at  $\theta = 210^\circ$  and  $\theta = 330^\circ$ .

구배가 형성되기 때문에 ER유체에 의해 SFD 양단에서 완벽한 밀봉이 이루어지지 못하지만 유막압력은 크게 상승한다. 그러나 유막두께가 큰 지역에서는 압력구배가 작기 때문에 항복전단응력  $\tau_0=5$  경우에 Slot 간극 전체에 core가 형성되고 SFD의 양단이 완전히 밀봉되어 축방향의 유막압력 변화가 발생하지 않고 있다.

Fig. 6과 7은 ER유체의 항복전단응력 크기에 따라 변화하는 무차원 주 감쇠계수( $C_{ii}$ )와 연성 감쇠계수( $C_{ij}$ )를 각각 보여주고 있다. 슬롯 링에 전기장 부하를 증대시킬 때, 즉 ER유체의 항복전단응력을 증대시킬 때, SFD 양단에서의 누설유량이 감소하고, 이에 상응하여 SFD의 감쇠계수가 증대하고 있음을 보여주고 있다. 이러한 효과는 작은 편심율에서 더욱 크게 나타나고 있으며 무한 장폭 SFD의 감쇠계수 값에 접근하고 있다. 본 도표의 무한 장폭과 소폭 SFD의 감쇠계수는 이론해로부터 얻은 값이다.

### 3. Slot ER SFD-탄성회전체의 불평형응답 해석

#### 3-1. 탄성회전체의 불평형응답

앞에서 제안한 Slot ER SFD의 감쇠성능을 파악하기 위하여, 회전축 양단에 Slot ER SFD에 의해 지지된 탄성회전체(Fig. 8)를 도입한 후 SFD 제어널과 회

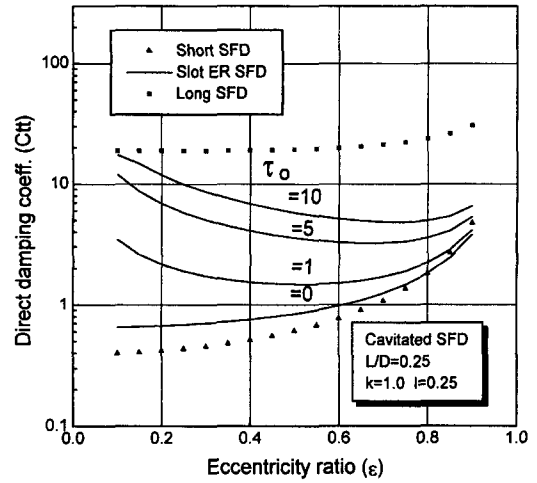


Fig. 6. Dimensionless direct damping coefficients.

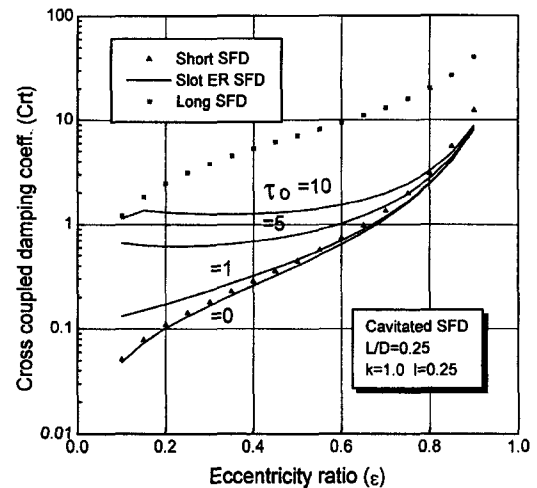


Fig. 7. Dimensionless cross coupled damping coefficients.

전체에 관한 운동방정식을 구하면 각각 다음과 같다[3].

$$aM\ddot{\vec{e}} + C_{ii}^* \dot{\vec{e}} + K_s(\vec{e} - \vec{g}) + C_n^* \omega \vec{e} + K_r \vec{e} = 0 \quad (17a)$$

$$(1-a)M\ddot{\vec{g}} + C_s \dot{\vec{g}} + K_s(\vec{g} - \vec{e}) = (1-a)M\omega^2 \rho e^{i\omega t} \quad (17b)$$

여기서  $C_{ii}^*$ 와  $C_n^*$ 는 Slot ER SFD의 감쇠계수로서 차원계수이며  $C_s$ 는 회전체계의 감쇠계수이다.

Slot ER SFD의 제어널과 회전체의 진폭을 구하기 위하여 탄성회전체가 축 회전속도와 동일한 속도  $\omega$ 로 원운동하는 정상상태로 가정하여 위 운동방정식

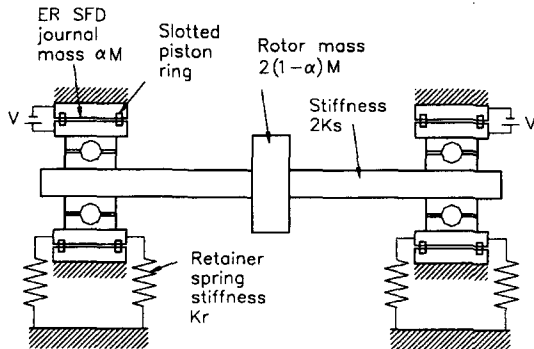


Fig. 8. Flexible rotor system supported on slot ER SFDs.

을 해석하면, Slot ER SFD 저어널의 진폭을 다음과 같이 무차원 설계변수로 표현할 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{e}{C} = \frac{U \cdot \delta^2}{\sqrt{D_x^2 + D_y^2}} \quad (18)$$

여기서

$$U = (1 - \alpha) \cdot \frac{\rho}{C}$$

$$D_x = f^2(1 - \delta^2) + \delta^2(a\delta^2 - 1) + B\delta f(1 - \delta^2)C_n - 2\xi\delta^2 fBC_n$$

$$D_y = B\delta f(1 - \delta^2)C_n + 2\xi\delta^2 fBC_n + 2\xi\delta(f^2 - \alpha\delta^2 + 1 - \alpha)$$

그리고 회전체의 진폭과 회전체 지지점에 전달되는 힘 전달계수도 각각 다음과 같다.

$$G = \frac{g}{C} = \frac{U \cdot \delta^2}{(1 - \alpha) \sqrt{[(D_x + 1 - \alpha)^2 + D_y^2]}} \quad (19)$$

$$T = \frac{\varepsilon}{U \cdot \delta^2} \sqrt{[C_n B \delta f + f^2] + [C_n B \delta f]^2} \quad (20)$$

### 3-2. Slot ER SFD의 감쇠성능

Fig. 8에서 보여 준 Slot ER SFD에 의해 지지된 탄성 회전체를 설계할 때 필요한 회전체의 각종 설계변수(즉 불평형계수  $U$ , 베어링 계수  $B$ , 공진주파수비  $f$ , 질량비  $\alpha$  등)가 축 진동현상에 미치는 영향은 이미 연구 발표된 바 있다[3]. 따라서 본 논문에서는 슬롯 링의 일정 각도에 부하되는 전기장의 크기, 즉 ER유체의 항복전단응력의 크기 변화가 탄성 회전체의 정상상태 불평형응답에 미치는 영향만을 분석하고자 한다. 무차원 항복전단응력  $\tau_e$ 는 식(5)에서

보여 주듯이 일정한 크기의 전기장 부하상태에서 회전속도가 증가하면 감소한다. 따라서 회전속도와 무관하게 일정한 크기의 전기장을 의미할 수 있는 다음의 무차원 항복전단응력  $\tau_e$ 를 도입하여 사용하면 Slot ER SFD에 작용하는 전기장 크기가 회전체 축 진동에 미치는 영향을 이해하는데 더욱 편리할 것이다.

$$\tau_e = \tau_o \cdot \delta = \alpha \left( \frac{V}{K_p} \right)^b \frac{C}{\mu \omega R} \quad (21)$$

Slot ER SFD에 의해 지지된 탄성 회전체계의 설계변수는 각각 불평형계수  $U=0.3$ , 베어링 계수  $B=0.3$ , 공진주파수비  $f=0.4$ , 질량비  $\alpha=0.2$ , SFD 형상비  $L/D=0.25$ 로 설정하였다. 탄성 회전체계의 전체 감쇠비율은  $\xi=0.5\%$ 로 가정하였으며, 탄성회전체의 불평형응답은 제1, 2차 위험속도를 포함하는 회전속도  $0 \leq \delta \leq 4$ 의 범위에서 구하였다.

Fig. 9는 공동현상이 발생하는 Slot ER SFD의 진폭, 즉 편심율의 변화를 보여주고 있다. SFD의 양단이 완전히 밀폐되어 축방향의 누설유량이 전혀 없는 경우와 SFD 양단이 완전히 개방되어 오일누설이 자유로운 2가지의 경우와 비교 검토하기 위하여 무한 장폭과 무한 소폭 SFD에 지지되어 있는 탄성회전체의 진동해석도 동시에 수행하였다. 슬롯 링이 장착되지 않고 전기장 무부하 상태에 해당하는 무한 소폭 SFD의 경우에는 강제로 지지된 탄성회전체의 위험속도  $\omega_c$  이하의 회전속도에서 비선형의 동특성인 점프현상이 발생하며, SFD 저어널의 편심율도 크게 증대되어 매우 위험한 운전상태에 도달한다. 그러나 Slot ER SFD의 경우, ER유체의 항복전단응력  $\tau_e$ 가 증가함에 따라 SFD 양단에서 ER유체의 누설유량이 억제됨으로써 SFD의 감쇠성능이 증대하여 SFD 저어널의 진폭을 크게 감소시킴과 동시에 무한 장폭 SFD의 해에 접근하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 회전체의 진폭변화를 보여주고 있다. 무한 소폭 SFD 경우에는 회전체의 진폭비율이 최대 7에 이르고 있으나, Slot ER SFD의 경우에는 ER유체의 항복전단응력이 증가함에 따라 회전체의 최대 진폭이 감소한 후 다시 상승하여 무한 장폭 SFD 경우에 접근하고 있음을 보여주고 있으며 회전체의 진폭을 최소화하는 최적의 항복전단응력이 존재하고 있다. 따라서 전기장의 크기를 회전속도에 따라 적절히 제어함으로써 오일 누설량을 조절하고 ER SFD의 감쇠성능을 조절하여 회전체의 진폭을 최소화할

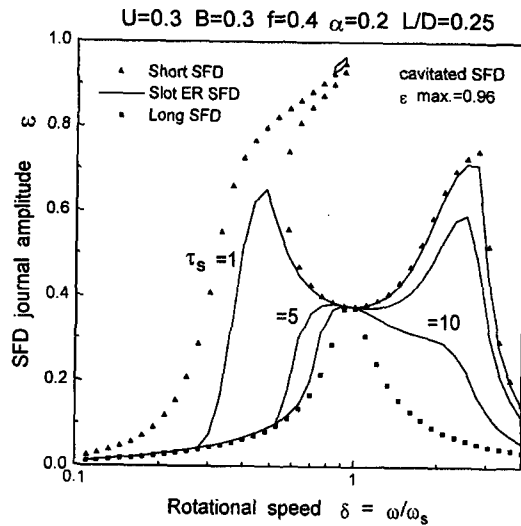


Fig. 9. SFD journal amplitude of the flexible rotor system.

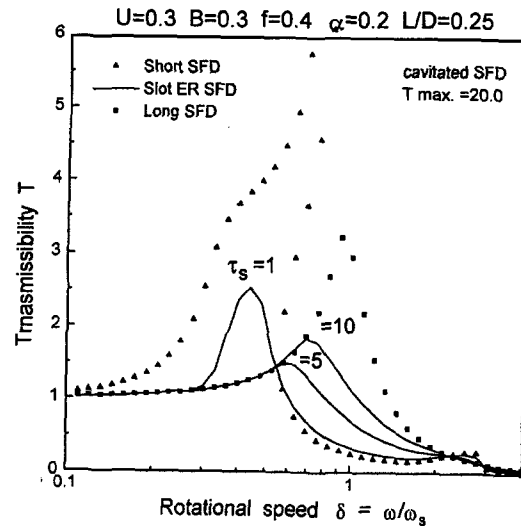


Fig. 11. Force transmissibility of the flexible rotor system.

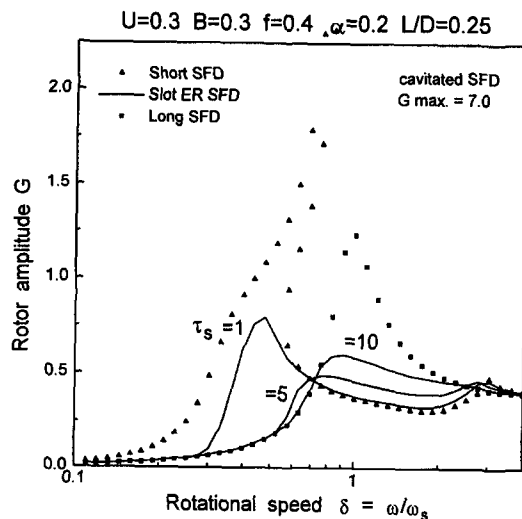


Fig. 10. Rotor amplitude of the flexible rotor system.

수 있으며, 또한 베어링의 냉각작용도 원활히 할 수 있다. 한편 항복전단응력이 증가할 때, 즉 ER SFD의 감쇠계수가 증가할 때 회전체의 유효 강성계수 (effective stiffness)도 증가하여 회전체의 위험속도가 점차 상승하고, 결국은  $\omega_s$ 에 도달한다. 다시 말하면 과도한 항복전단응력으로 인하여 ER SFD가 고착되어 회전체의 지지점이 탄성상태에서 강성상태로 변화하여 강체에 지지된 회전체의 위험속도에 도달하는 것이다.

Fig. 11은 회전체 지지점에 전달되는 힘 전달계수의 변화를 보여주고 있다. 힘 전달계수도 회전체의 진동현상과 동일한 경향을 보여주고 있다. 무한 소폭 SFD 경우에는 회전속도가  $\omega_s$ 에 도달하면 회전체 지지점에 전달되는 전달력이 불평형력의 최대 20배까지 증가되어 베어링의 수명을 크게 단축시키며 매우 위험한 운전상태에 도달하게 된다. 무한 장폭 SFD 경우에도 전달력이 약 3배에 이른다. 그러나 Slot ER SFD의 경우에는 ER유체의 항복전단응력을 적절히 제어하면 힘 전달율을 최소화할 수 있다. 즉 회전속도  $\omega = 0.3\omega_s$  이하에서는 ER유체의 항복전단응력이  $\tau_s = 1$ 이 되도록 전기장을 부하하고, 속도구간  $0.3\omega_s \leq \omega \leq \omega_s$ 에서는  $\tau_s = 5$ 로,  $\omega = \omega_s$  이상에서는 전기장을 제거함으로써 운전속도 구간에서 회전체의 힘 전달계수와 축 진동을 최소화할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 전기장의 크기를 조절하여 SFD의 감쇠성능을 능동적으로 조절하고 고속회전기계의 축진동 제어와 안정화 증대를 얻을 수 있는 새로운 구조의 Slot ER SFD를 제안하였고, 이에 관한 동특성계수 해석기법을 연구하였다. Slot ER SFD는 슬롯 링에 가공한 일정한 크기의 Slot 간극에 전기장을 부하시킴으로써 기존 ER SFD의 최소 유막두께에서 발

생활 수 있는 전기적 단락현상을 방지할 수 있는 중요한 장점이 있다.

슬롯 링을 장착한 Slot ER SFD를 해석하기 위하여 유한차분법(FDM)의 수치적 해법과 SFD 양단에서 발생하는 ER유체의 누설유량에 관한 이론식을 수립하여 유막압력을 해석하였고, 이를 기초로 하여 전기장의 크기, 즉 ER유체의 항복전단응력의 변화에 따른 Slot ER SFD의 감쇠계수를 해석하였다. 주 감쇠계수 $C_d$ 와 연성 감쇠계수 $C_n$  모두가 항복전단응력이 증가함에 따라 크게 증가하였다.

이와 더불어 Slot ER SFD에 지지된 탄성회전체의 정상상태 불평형응답을 해석함으로써 ER유체의 항복전단응력이 탄성회전체의 축진동 현상에 미치는 영향을 분석하였다. 축진동 해석 결과, 회전체의 진폭과 힘 전달계수를 최소화하는 최적의 감쇠력이 존재하며, 특히 ER유체의 항복전단응력 또는 전기장 부하를 적절히 제어함으로써 고속 탄성회전체를 최소의 진동상태로 운전할 수 있음을 입증하였다.

## 후 기

본 논문은 과학기술부가 지원하는 특정연구개발사업 중 중점국가연구개발사업(기계설비요소기술개발)으로 지원되어 수행하였으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- Vance, J. M., "Rotordynamics of Turbomachinery," John Wiley & Sons, Inc. New York, 1988.
- Gunter, E. J., L. E. Barrett, and P. E. Allaire, "Design of Nonlinear Squeeze Film Dampers for Aircraft Engines," Journal of Lubrication Technology, Trans. ASME, Vol. 99, No. 1, pp. 57-64., 1977.
- Rabinowitz, M. D., and E. J. Hahn, "Steady State Performance of Squeeze Film Damper Supported Flexible Rotors," Journal of Engineering for Power, Trans. ASME, Vol. 99, No. 4, pp. 552- 558., 1977.
- Zhao, J. Y., Linnett, I. W. and McLean, L. J., "Unbalance Response of a Flexible Rotor Supported by a Squeeze Film Damper," J. of Vibration and Acoustics, Vol. 120, Jan. pp. 32-38., 1998.
- 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.
- Jordan, T. C. and Shaw, M. T., "Electrorheology," IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 24, No. 5, pp. 849-878, 1989.
- Nikolajsen, J. L. and Hoque, M. S., "An Electroviscous Damper for Rotor Applications," J. of Vibration and Acoustics, Vol. 112, pp. 440-443, 1990.
- 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.
- 정시영, 최상규, 강덕형, "무한 소폭 전기유변 스퀴즈 필름 댐퍼에 관한 이론적 근사해," 한국윤활학회지, 제13권, 제2호, pp. 60-67, 1997.
- 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.
- Leek, 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.

## 기호 설명

$B$	: Bearing parameter = $\mu L(R/C)^3/(M\omega_s)$
$C$	: Clearance of SFD
$C_n, C_d$	: Dimensionless direct, cross coupled damping coefficients normalized by $\mu L(R/C)^3$
$D$	: Diameter of SFD journal
$e$	: Eccentricity
$f$	: Resonance frequency ratio = $\omega_r/\omega_s$
$f_t, f_r$	: Dimensionless tangential, radial film forces normalized by $\mu\omega L R^3/C^2$
$G$	: Dimensionless rotor amplitude = $g/C$
$h$	: Dimensionless film thickness = $(1+\epsilon\cos\theta)$
$K_p$	: Gap size of slotted ring
$K_r$	: Stiffness of SFD retainer spring
$2K_s$	: Stiffness of shaft
$k$	: Dimensionless gap of slotted ring = $K_p/C$
$L$	: Length of SFD journal
$L_p$	: Thickness of ring



$l$	: Dimensionless thickness of ring = $2L_r/L$	$\eta$	: Dimensionless cross film coordinate = $y^*/C$
$p$	: Dimensionless pressure normalized by $\mu\omega(R/C)^2$	$\theta$	: Dimensionless circumferential coordinate = $x^*/R = \theta' - \omega t^*$
$p'$	: Dimensionless pressure gradient = $(D/L)dp/d\zeta$	$\zeta$	: Dimensionless axial coordinate = $2z^*/R$
$R$	: Radius of SFD journal	$\mu$	: Viscosity
$T$	: Transmissibility	$\rho$	: Imbalance of rotor system
$U$	: Dimensionless imbalance = $(1-\alpha)\rho/C$	$\tau_0$	: Dimensionless yield shear stress
$V$	: Voltage	$\tau_s$	: Dimensionless yield shear stress = $a(V/K_p)^b$ $C/\mu\omega_s R$
$w$	: Dimensionless axial velocity = $w^*/\omega R$	$\omega$	: Frequency of SFD journal center motion
$v_t$	: Dimensionless tangential velocity = $\omega e/\omega C = \varepsilon$	$\omega_r$	: Natural frequency of rigid rotor on retainer spring = $\sqrt{K_r/M}$
$\alpha M$	: Mass of SFD journal	$\omega_s$	: First pin-pin critical speed of rotor = $\sqrt{K_r/(1-\alpha)M}$
$2(1-\alpha)M$	: Mass of rotor-SFD system		
$\delta$	: Speed parameter = $\omega/\omega_s$		
$e$	: Eccentricity ratio = $e/C$		