

# Electro-Rheological 流體를 이용한 無限幅 스퀴즈 필름 댐퍼 解析

정시영\*, 최승복\*\*, 조용철\*\*

## Analysis of an Infinitely Long Squeeze Film Damper Operating with an Electro-Rheological Fluid

Si-Young Jung\*, Seung-Bok Choi\*\*, Yong-Chul Cho\*\*

### ABSTRACT

This paper addresses on the determination of damping coefficients of an infinitely long squeeze film damper operating with an electro-rheological (ER) fluid. The ER fluid behaves as Bingham fluid with an electric field dependent yield shear stress. A phenomenological model of the fluid is adopted for the relationship between the yield shear and the intensity of the electric field imposed on the fluid domain. The model is then incorporated with the governing equation and associated boundary conditions of the squeeze film damper executing a circular centered orbit for the expression of dimensionless damping coefficients. Numerical simulation is performed to evaluate the performance improvement of the proposed squeeze film damper.

### NOMENCLATURE

C	: Clearance	U, V	: Fluid velocities
C <sub>∥</sub> , C <sub>⊥</sub>	: Dimensionless direct, cross coupled damping coefficients (normalized by $\mu R^3 L / C^3$ )	u	: Dimensionless fluid velocity ( $= U / \omega R$ )
E	: Electric potential (voltage)	v	: Dimensionless fluid velocity ( $= V / \omega C$ )
e	: Eccentricity	X, Y	: Cartesian coordinate
H	: Film thickness	$\alpha$	: ER fluid sensitivity
h	: Dimensionless film thickness ( $= H / C$ )	$\beta$	: Experimental exponent of ER fluid
F	: Film force	$\epsilon$	: Eccentricity ratio ( $= e / C$ )
f <sub>∥</sub> , f <sub>⊥</sub>	: Dimensionless film forces ( $F C^2 / \mu \omega R^3 L$ )	$\eta$	: Dimensionless cross film coordinate ( $= Y / C$ )
L	: Length of journal	$\theta$	: Dimensionless circumferential coordinate ( $= X / R = \theta' - \omega T$ )
P	: Pressure	$\mu$	: Viscosity
p	: Dimensionless pressure ( $= P C^2 / \mu \omega R^2$ )	T	: Shear stress
p'	: Pressure gradient ( $= dp / d\theta$ )	$\tau$	: Dimensionless shear stress ( $T C / \mu \omega R$ )
R	: Radius of journal	$\tau_y$	: Dimensionless yield shear stress
T	: Time	$\tau_{av}$	: Dimensionless average yield shear stress
t	: Dimensionless time ( $= \omega T$ )	$\omega$	: Frequency of damper journal center motion

\* 인하공업전문대학 항공기계과  
\*\* 인하대학교 기계공학과(정회원)

## 1. 序 論

1960년 초반에 구름 베어링과 저어널로 구성된 Squeeze Film Damper (SFD)를 터보기기, 특히 航空機 엔진에 장착하여 回轉軸의 振動 감소와 回轉軸 지지부분에 전달되는 힘을 감소시키는데 커다란 효과를 거둔 후 SFD의 성능을 정확히 해석하기 위해 많은 研究가 進行되어 왔다. 즉 SFD의 형상과 운용조건에 따른 SFD 性能解析, 流體 慣性力과 동공현상이 SFD 性能에 미치는 영향 등의 研究가 활발히 進行되어 왔다.<sup>(1)-(6)</sup> 또한 이와같이 해석된 SFD를 回轉軸-베어링계에 적용함으로써 SFD 장착효과를 더욱 명확히 이해할 수 있었다.<sup>(7)-(8)</sup> 그러나 SFD에 관한 대부분의 研究는 뉴우톤 流體에 기반을 두고 있고, SFD의 성능향상 보다는 정확한 해석에 주안점을 두고 있다. 더불어 공동현상이 발생하면 뉴우톤 유체를 이용한 SFD의 減衰性能이 현저히 감소할 뿐만 아니라 非線形 振動현상이 발생하여 SFD의 운용범위를 축소시킨다.<sup>(9)-(16)</sup> 이러한 단점을 보완하기 위하여, 本 研究에서는 최근 미국과 일본을 비롯 여러 선진국에서 研究가 활발한 Electro-Rheological (ER) 流體를<sup>(9)-(10)</sup> SFD에 적용하여 댐퍼의 획기적인 성능향상과 성능조절 혹은 제어가능함을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 研究하고자 한다.

ER流體의 외면상 가장 두드러진 현상은 電氣場 무부하시 液體狀態가 電氣場 부하시 固體狀態로 변화하는 것이다. 전장무부하시 전극(electrode)의 전하와 ER流體입자의 전하는 양극 혹은 음극이 될 수 있으며 자유로이 운동을 한다. 이때 流體는 등방성(isotropic)의 物理的 및 機械的 성질을 갖게 된다. 그러나 電氣場 부하시에는 流體입자의 전하는 체인형 구조를 형성하게 되며 이방성(anisotropic)의 物理的 및 機械的 성질을 갖게 된다. 이 체인형 구조로 인해 流體의 운동이 제한되며 따라서 流體의 모든 유동성질이 변화한다. 電氣場이 무부하상태로 될 때 流體는 다시 본래의 랜덤(random) 구조를 갖게 된다. 일반적으로 ER流體의 相變化(phase change)를 위해 요구되는 電氣場의 크기는 약 1~3kV/mm(流體두께)이나 전류밀도(current density)가 약 10 $\mu$ A/cm 이하이기 때문에 相變化를 위해 요구되는 전력은 매우 낮다. 그리고 전장에 대한 流體의 反應速度는 1ms 이하이며 최대반응주파수는 약 12kHz 이다. 力學的인 관점에서 현재 사용되고 있는 一般的인 ER流體의 流動性質은 전장무부하시 뉴우톤

流體로 간주되지만 전장부하에 따른 流體의 거동 형태는 매우 복잡하다고 할 수 있다. 電場으로 인한 ER流體의 거의 공통적인 현상은 Bingham 거동으로 降伏剪斷應力이 전장의 증가에 따라 증가한다. 따라서 이러한 ER 유체를 SFD에 적용할 때 댐핑력을 내부 및 외부 환경조건 그리고 작동조건에 따라 알맞은 전기장의 공급으로 제어할 수 있는 장점이 있다. 이는 다시 말해서 전장의 크기를 조절함으로써 高速回轉軸-베어링계의 振動감소에 필요한 減衰기능 제어가 가능함을 의미한다. 지금까지 ER유체를 SFD에 적용한 研究는 초기단계이며 따라서 관련자료가 거의 전무한 실정이다. 본 논문에서는 ER 유체를 비뉴우톤 유체인 Bingham 모델로 가정하여 기존의 Bingham 유체 해석방법<sup>(11)-(12)</sup>을 이용함으로써 전장크기의 변화 또는 平均 降伏剪斷應力 변화에 따른 ER SFD의 減衰계수와 유막압력분포 등을 해석하였다.

## 2. 모델 解析

무한폭 SFD의 구조는 Fig.1에서 보는 바와 같다.

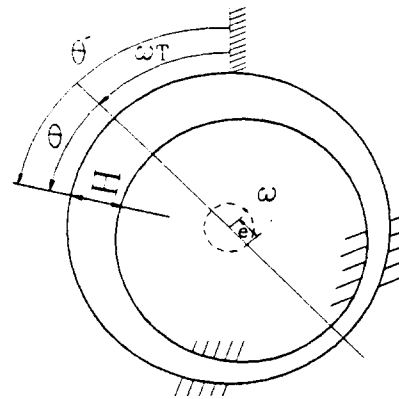


Fig.1 Squeeze film damper geometry

하우징(housing)은 고정되어 있으며 저어널은 회전하지 않으나 하우징의 중심점을 중심으로 回轉軸과 같은 回轉速度( $\omega$ )로 휘돌림을 한다. 이때 휘돌림의 폭( $e$ )은 一定하다. 하우징과 저어널 사이의 간극 내의 流體流動을 해석하기 위해 필요한 無次元 連續方程式과 運動量 方程式은 각각 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial \eta} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial \theta} = \frac{\partial \tau}{\partial \eta} \quad (2)$$

ER流體는 Bingham 流體의 특성을 갖고 있으므로 ER유체의 無次元 方程式은 다음과 같다.<sup>11, 12</sup>

$$\frac{\partial u}{\partial \eta} = \tau \mp \tau_0 \quad (|\tau| \geq \tau_0) \quad (3a)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \eta} = 0 \quad (|\tau| < \tau_0) \quad (3b)$$

ER流體의 降伏剪斷應力은 다음과 같은 실험식으로 표현 가능하다.<sup>13</sup>

$$\tau_0 = \alpha \left[ \frac{E}{H} \right]^\beta \quad (4)$$

여기서  $\alpha$ 는 ER流體의 感度係數이며, E는 전압, 그리고 H는 전극사이의 간격을 나타낸다. 지수  $\beta$ 의 값은 ER流體의 종류, 농도 등에 따라 다르다. 지금까지 알려진 일반적 ER流體의 경우  $1 < \beta < 3$  범위의 값을 갖는다. ER流體의 無次元 降伏剪斷應力  $\tau$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\tau_0 = \alpha \left[ \frac{E}{H} \right]^\beta \frac{C}{\mu \omega R} = \frac{\tau_{0, avg}}{h^\beta} \quad (5a)$$

여기서

$$\tau_{0, avg} = \alpha \left[ \frac{E}{C} \right]^\beta \frac{C}{\mu \omega R} \quad (5b)$$

위식에서 보여주듯이 SFD에 일정한 전압을 가하면 無次元 降伏剪斷應力은 유막두께에 따라 변화하고 있다.

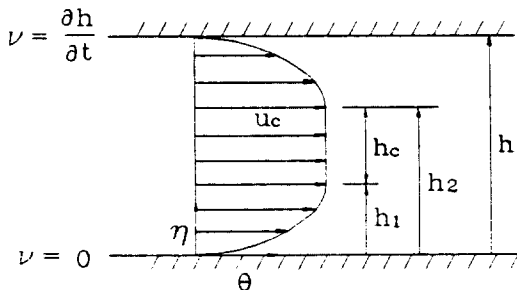


Fig. 2 Velocity distribution of electro-rheological fluid

Fig. 2는 ER流體의 速度分布를 나타내는 것으로서 境界條件은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u = 0 \quad v = 0, \quad (\eta = 0) \quad (6a)$$

$$u = u_c, \quad (\eta = h_1) \quad (6b)$$

$$u = u_c, \quad (\eta = h_2 = h_1 + h_c) \quad (6c)$$

$$u = 0 \quad v = \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (\eta = h) \quad (6d)$$

여기서  $u_c$ 는 ER流體의 core 速度이며, h는 core의 두께를 표시한다. 식 (2)를 적분한 후 식 (3a)에 境界條件 (6)을 적용하면 다음과 같은 각 구간별 流體 速度를 구할 수 있다.

$$u_1 = \frac{1}{2} p' (\eta^2 - h_1 \eta) + \frac{u_c}{h_1} \eta, \quad (0 \leq \eta \leq h_1) \quad (7a)$$

$$u_2 = u_c, \quad (h_1 \leq \eta \leq h_2) \quad (7b)$$

$$u_3 = \frac{1}{2} p' (\eta - h)(\eta - h_2) - \frac{u_c}{h - h_2} (\eta - h), \quad (h_2 \leq \eta \leq h) \quad (7c)$$

여기서  $p'$ 은  $\theta$ 에 관한 壓力勾配를 나타낸다. 連續 方程式(1)에 식 (7)을 대입한 후 유막두께 방향으로 적분하면 다음의 方程式을 얻는다.

$$\frac{d}{d\theta} \left[ -\frac{1}{6} p' h_1^3 + u_c (h - h_1) \right] + \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

다음에 core의 速度 u는 앞에서 구한 速度  $u_1$ 을 식 (3a)에 적용한 후 유막두께  $h_1$ 에서의 剪斷應力이 降伏剪斷應力과 일치하는 사실을 이용함으로써 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$u_c = -\frac{1}{2} p' h_1^2 \quad (9)$$

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

$$h_1 = \frac{h}{2} \pm \frac{\tau_0}{p'} \quad (10)$$

여기서  $p'$  값이 음수이면 (-) 부호를 선택하고,  $p'$  값이 양수이면 (+) 부호를 선택한다. 식 (9)와 (10)에서  $h_1 = 0$ 이면 즉 유막 전체가 core로 변화하면, core의 速度 u도 영이 되므로 ER流體의 흐름은 정지되고, 이때의 壓力勾配  $p'$ 는 다음과 같다.

$$p'c = \mp \frac{2\tau_0}{h} \quad (11)$$

다시 말하면 流體流動 시작에 필요한 최소의 壓力勾配 절대값은  $p'$ 의 절대값 보다 약간 더 큰 값이어야 한다. 식 (9)와 (10)을 식 (8)에 代入하고, Fig. 1의 좌표계에서 보여주는 바와 같이  $\partial h/\partial t$ 를  $-\partial h/\partial \theta$ 로 대치하면 식 (8)은 다음과 같이 변환된다.

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

상기 식에서  $\tau_0=0$ 이면, 뉴우톤 流體의 SFD 지배 방정식과 일치한다.

한편, 壓力 境界條件은 다음과 같다.

$$p(0) = p(2\pi) = 0 \quad (13)$$

따라서 식 (12)를 적분하면 아래와 같이 壓力勾配에 관한 3차方程式을 얻는다.

$$p'^3 - 3 \left[ \frac{p'c}{2} - 4 \frac{(h-h_0)}{h^3} \right] p'^2 + \frac{p'c^3}{2} = 0 \quad (14)$$

위 식의 3개의 근 중 流體流動에 필요한 최소 절대 값  $p'$ 보다 큰 값을 선택하여 壓力 境界條件을 만족시키는 미지수  $h$ 를 결정함으로써 ER流體의 壓力分布를 얻을 수 있다. 이 壓力分布로부터 반지름 방향과 접선 방향의 유막힘은 다음과 같다.

$$f_r = \int p \cos \theta \, d\theta \quad (15a)$$

$$f_t = \int p \sin \theta \, d\theta \quad (15b)$$

위와 같이 구한 유막힘은 저어널 중심이 無次元 점선 속도  $v_t = \epsilon$ 로 운동하여 발생한 힘이므로 SFD의 無次元 減衰係數는 다음과 같다.

$$C_{tt} = -\frac{f_t}{v_t} = -\frac{f_t}{\epsilon} \quad (16a)$$

$$C_{rt} = -\frac{f_r}{v_t} = -\frac{f_r}{\epsilon} \quad (16b)$$

### 3. 시뮬레이션 結果 및 考察

ER유체 ( $\tau_{0,avg} > 0$ )를 이용한 SFD와 뉴우톤 유체 ( $\tau_{0,avg} = 0$ )를 이용한 기존의 SFD<sup>(2)</sup>와 비교 검토하기 위하여 유막압력과 감쇠계수를 구하였다. Fig. 3은 ER

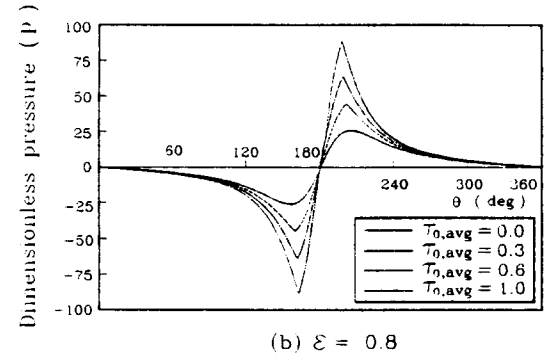
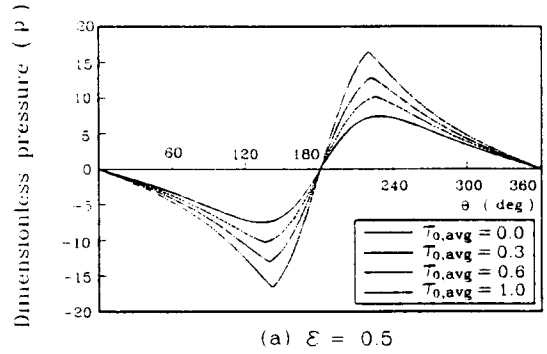


Fig.3 Dimensionless pressure distribution

流體의 지수  $\beta=2$  사용시 편심을  $\epsilon=0.5$ 와  $0.8$ 일 때, ER 流體의 平均 降伏剪斷應力 변화에 따른 壓力分布의 변화를 보여주고 있다. 平均 降伏剪斷應力이 增加하면 또는 ER SFD의 전장크기가 증가하면 압력도 증가하고 있다. 뉴우톤 流體 ( $\tau_{0,avg}=0$ )의 경우와 달리 ER 流體의 壓力분포를 보면 압력이 최대와 최소값에 도달하는 지점에서 壓力勾配가 영이 아닌  $p'c$ 의 값을 갖으며 Fig. 4와 같이 이 지점의 유막두께는  $h_0$ 에 해당한다. 식 (14)에  $h=h_0$ 를 대입하여  $p'$ 의 값을 구하면  $p'=p'c$ 임을 쉽게 알 수 있다. 또한 이 지점에서는  $h_1=0$ 임으로 유막두께 전부가 ER流體의 core로 형성되어 있으며 core의 속도  $u_c=0$ 다. Fig. 4는 유막

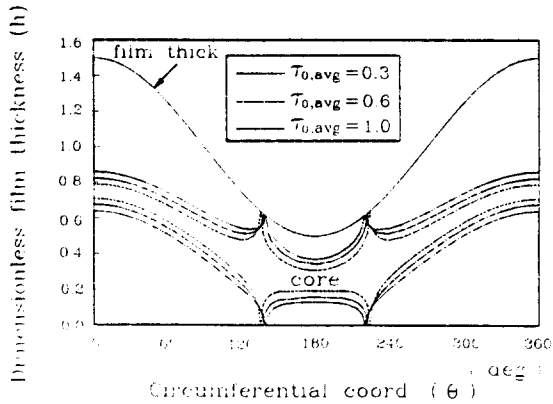


Fig. 4 Variation of core thickness in film,  $\epsilon=0.5$  내에 형성되는 core의 형태를 보여 주고 있다. ER流體의 降伏剪斷應力이 增加함에 따라 core의 폭 h가 增大함을 알 수 있다.

ER SFD의 성능특성을 직접적으로 나타내는 계수는 감쇠계수이다. 다음의 감쇠계수  $C_1$ 와  $C_2$ 를 구하기 위하여 SFD 유막을  $\pi$ -유막으로 가정하였다. Fig. 5는

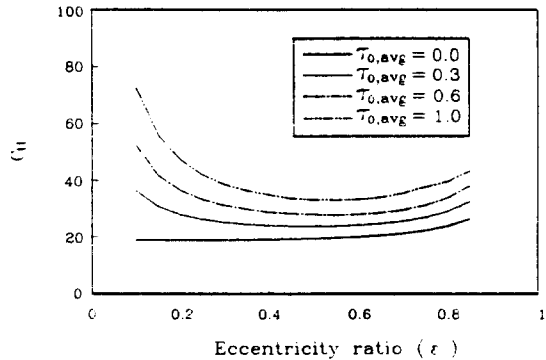


Fig. 5 Dimensionless direct damping coefficients

ER SFD의 無次元 減衰係數  $C_1$ 의 變化를 보여주고 있다. ER流體의 平均 降伏剪斷應力이 增加함에 따라 減衰係數  $C_1$ 도 增加함을 보여주고 있다. 특히 작은 편심율에서 減衰係數  $C_1$ 의 增加율이 큰 것을 알 수 있다. Fig. 6은 無次元 減衰係數  $C_2$ 의 變化를 보여주는 것으로  $C_1$ 와 같이 平均 降伏剪斷應力의 增加에 따라 增加하고 있다.

Table 1은 뉴우튼 流體 ( $\tau_{0,avg} = 0$ )의 減衰係數를 기준으로 할 때 ER流體의 平均 降伏剪斷應力의 增加에 따른 減衰係數의 增加율을 백분율(%)로 나타낸 것

이다. 작은 편심율에서 減衰係數  $C_1$ 와  $C_2$ 의 增加율이 더욱 크다. 회전체-SFD계에서 剛性係數의 역할을 갖는 減衰係數  $C_2$ 의 增加율은 실질적 減衰係數인  $C_1$  增加율과 비교할 때 약 2배 정도의 增加율을 보여주고 있다.

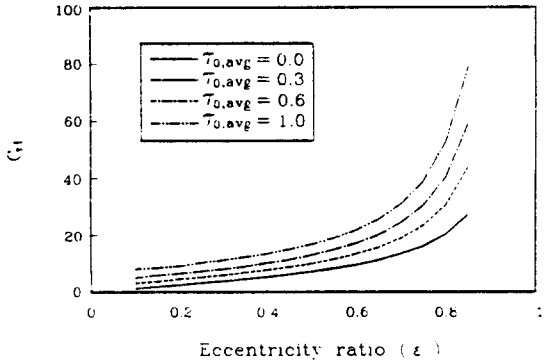


Fig. 6 Dimensionless cross coupled damping coefficients

Table 1. Increasing rate of dimensionless damping coefficients

$\tau_{0,avg}$	C			C <sub>2</sub>			
	$\epsilon$			$\epsilon$			
( $\tau_{0,avg} = 0$ )	0.2	0.5	0.8	( $\tau_{0,avg} = 0$ )	0.2	0.5	0.8
0.3	47.8%	22.5%	21.8%	0.3	82.9%	40.1%	51.1%
0.6	93.2%	44.3%	42.4%	0.6	161.3%	80.1%	99.7%
1.0	151.0%	71.5%	66.6%	1.0	267.6%	133.9%	161.4%

#### 4. 結 論

전장의 크기에 따라 降伏剪斷應力이 變化하는 ER流體를 SFD에 적용하여 무한 폭 SFD의 減衰係數를 해석하였다. ER流體의 전장크기가 증가하면 즉 ER流體의 降伏剪斷應力이 증가하면 유막압력이 증가하고 減衰係數  $C_1$ 와  $C_2$ 도 증가한다. 특히 작은 편심율에서 減衰係數의 增加율은 더욱 컸으며 剛性係數의 역할을 갖는 減衰係數  $C_2$ 의 增加율은 실질적 減衰係數인  $C_1$ 의 增加率 보다 약 2배 정도 큰 것으로 나타났다. 본 研究의 결과는 향후 ER流體를 이용한 高速回轉體-SFD계의 危險速度 制御 및 非線形 振動特性 研究에 중요한 기초적 자료가 되리라 생각된다.

## 참고문헌

- 1) Tichy, J. A., "A Study of the Effect of Fluid Inertia and End Leakage in the Finite Squeeze Film Damper", ASME Paper 86-Trib-62
- 2) SanAndres, L. A. and Vance, J. M., "Effects of Fluid Inertia on Finite Length Squeeze Film Damper", ASLE Trans. Vol. 30, No. 3, pp. 384~393, 1987
- 3) Feng, N. S. and Hahn, E. J., "Cavitation Effects on Squeeze Film Damper Performance", ASLE Trans. Vol. 29, No. 3, pp. 353~360, 1986
- 4) Zeidan, F. Y. and Vance, J. M., "Cavitation Leading to a Two-Phase Fluid in Squeeze Film Damper", STLE Trans. Vol. 32, No. 1, pp. 100~104, 1989
- 5) Jung, S. Y. SanAndres, L. A. and Vance, J. M., "Measurement of Pressure Distributions and Force Coefficients in a Squeeze Film Damper Part I : Fully Open Ended Configuration", STLE Trans. Vol. 34, No. 3, pp. 375~382, July 1991
- 6) Jung, S. Y. SanAndres, L. A. and Vance, J. M., "Measurement of Pressure Distributions and Force Coefficients in a Squeeze Film Damper Part II : Partially Sealed Configuration", STLE Trans. Vol. 34, No. 3, pp. 383~387, July 1991
- 7) Rabinowitz, M. D. and Hahn, E. J., "Steady-State Performance of Squeeze Film Damper Supported Flexible Rotors", J. of Engineering for Power, pp. 552~558, Oct 1977
- 8) SanAndres, L. A. and Vance, J. M., "Effect of Fluid Inertia on the Performance of Squeeze Film Damper Supported Rotors", J. of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 110, pp. 51~57, Jan. 1988
- 9) Phillips, R. W., "Engineering Applications of Fluids with a Variable Yield Stress", Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley, 1969
- 10) Gandhi, M. V., Thompson, B.S. and Choi, S. B., "A New Generation of Innovative Ultra-Advanced Intelligent Composite Materials Featuring Electro-Rheological Fluids : An Experimental Investigation, J. of Composite Materials, Vol. 23, pp. 1232~1255, 1989
- 11) Wada, S. and Tsukijihara, M., "Elastohydrodynamic Lubrication of Squeeze Films (Part 1. Two Cylinders Lubricated with Grease)", Bulletin of JSME, Vol. 21, No. 159, pp. 1408~1415, 1978
- 12) Wada, S. and Tsukijihara, M., "Elastohydrodynamic Lubrication of Two Rotating Cylinders (Part 2. Bingham Solid)", Bulletin of JSME, Vol. 24, No. 192, pp. 1072~1077, 1981