

절단 원추형 전기점성 SFD 베어링 연구

윤석철

공군사관학교 기계공학과

(2003. 3. 17. 접수 / 2003. 8. 29. 채택)

A Study on the Electroviscous(EV) Fluid Squeeze Film Damper(SFD) Bearing of the Truncated Cone Type

Seok-Cheol Yoon

Department of Mechanical Engineering, Korea Air Force Academy

(Received March 17, 2003 / Accepted August 29, 2003)

Abstract : Equivalent Reynolds equation of truncated cone type SFD bearing using nonnewtonian EV fluid is derived. The 3 nondimensional oil film pressures and its forces are obtained with axial and circumferential pressure gradient of bearing respectively, and dynamic characteristics for the stability of rotor-bearing system are obtained through the governing equation for an elastic rotational shaft. It is shown that EV fluid is less sensitive to the changes of oil-film than newtonian fluids for dynamic characteristics. Therefore, results show that it is better to use an EV fluid with truncated cone type SFD bearing for the vibration control of rotational machines.

Key Words : truncated cone, electroviscous fluid, squeeze film damper bearing

1. 서 론

S. Cooper¹⁾가 뉴우톤 유체를 원형 단면형상의 스퀴즈 유막 댐퍼(SFD) 베어링에 이용하여 회전축계 진동을 제어할 수 있다는 것을 연구한 이후, 많은 과학자들이 유막의 공급압력, 난류유동, 캐비테이션 현상, 불평형 등의 다양한 실제조건 등을 고려하여 강체 및 탄성 회전축에 적용하였고 동기 및 비동기 진동특성을 연구하였다^{2,4)}. 그런데 유막내의 캐비테이션 혹은 작동 조건의 변화등으로 비선형 현상이 발생하여 회전축계의 고속운전 및 안정성에 제한요소가 되어 왔다.

이러한 하중지지 용량과 진동제어 특성은 SFD 베어링의 윤활유 점도와 유막간극에 의하여 크게 영향을 받는데 회전축계는 사용 중에 점도와 유막간극을 변화시킬 수가 없다. 그러므로 회전축계는 작동중에 변화하는 운전조건에 적합하게 능동적으로 진동을 제어할 수 없으며 다만 제한된 범위내에

서만 운전이 가능하다. 또한 일단 설계 제작된 SFD 베어링이 부적합한 경우에 회전축계의 안전성을 더욱 악화시킬 수 있으므로 재차 설계를 해야한다.

1980년 이후 선진국을 중심으로 특수한 물성을 갖고 있는 전기 점성유체를 이용하여 클러치, 유압기기, 로봇 등의 성능을 향상시키기 위하여 응용되고 있는데 특히 그 동안 뉴우톤 유체를 이용해서 연구해온 SFD 베어링을 비 뉴우톤 유체인 전기점성 유체와 접목을 시도하여 회전축계의 진동을 개선하려는 연구가 더욱 활발히 진행되고 있다^{5,6)}.

전기점성 유체는 전기장을 공급할 경우에 절연입자들이 사슬구조를 형성하게 되며 전기장의 크기에 따라 현탁액의 점도가 매우 빠른 응답 시간내에 최고 수천 배로 증가하는 특성을 갖고 있다. 이와 같은 현상을 Winslow 현상이라고 하는데 일반적으로 현탁액에 전기장을 가하면 순간적으로 전단항복 응력이 급격히 증가하고 유체 내에 간해진 전단 응력이 항복 전단 응력을 초과해야만 유동이 가능한 비 뉴우톤 거동을 한다. 이러한 유체는 전기적으로 점성이 변화해서 전기점성 유체라고 한다^{7,9)}.

scyoon@afa.ac.kr

한편 SFD 베어링은 사용 중에 유막간극을 능동적으로 변화시키기 위하여 좌우 단면을 절단원추형으로 하는데 이러한 베어링을 절단 원추형 SFD 베어링이라 한다(Fig. 1). 따라서 본 연구는 회전축계가 사용 중에 전기점성 유체에 전기장을 가함으로 해서 점도를 변화시킬 수 있고, SFD 베어링의 단면을 절단원추형으로 하여 축 방향으로 댐퍼를 이동시켜 유막 간극 변화시킬 수 있다는 장점을 이용하여 비 뉴우톤 유체를 이용한 절단 원추형 SFD 베어링 유막특성을 연구하였다. 이때 전기점성 SFD 베어링에 대한 3차원 레이놀즈 방정식을 유도하고 베어링의 폭이 작은 경우에 대하여 유막의 특성을 연구한다.

2. 절단 원추형 SFD 베어링 해석

Fig. 2는 일반적인 SFD 베어링의 단면형상을 나타내고 있고 Fig. 3은 축 방향의 기하학적인 형상을 보이고 있다. 이때 절단 원추형 댐퍼 베어링의 유막 간극 C는 다음과 같다.

$$C = C_0 A \tag{1}$$

여기에서 유막 간극비 A는 $1-KS/C_0$ 이고 K는 댐퍼 경사각의 탄젠트 값, S는 댐퍼의 축방향 이동변위이며 C_0 는 $S=0$ 에서 유막간극이다. 무차원 유막 두께 h는 다음과 같다.

$$h = A + \varepsilon \cos \theta \tag{2}$$

전기점성유체는 일정한 항복 전단응력을 지나서 유동을 함으로 빙햄모델로 가정한다. 빙햄모델에 대한 전단 응력과 전단비의 관계는 다음과 같이 표현된다¹⁰⁾.

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \tau_\theta \left(1 - \frac{\tau_0}{T}\right), \quad \frac{\partial \omega}{\partial y} = \tau_z \left(1 - \frac{\tau_0}{T}\right) \quad (T \geq \tau_0) \tag{3a}$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial \omega}{\partial y} = 0 \quad (T < \tau_0) \tag{3b}$$

여기에서 u와 ω 는 원주방향과 축 방향 각각의 속도이고 τ_θ , τ_z , τ_0 는 각각 원주방향 전단응력, 축방향 전단응력, 항복 전단응력이다. S. Wada¹¹⁾는 일반적인 등가 레이놀즈 방정식을 유도하였는데 식이

매우 복잡하고 SFD 베어링 경우에 대해서는 해석을 하지 않았다. 유막내에서 y 방향으로 전단응력은 다음과 같다.

$$T = P' \sqrt{(y - h_a)(y - h_b) + \tau_0^2 / P'^2} \tag{4}$$

Fig. 2에 나타나 있는 베어링의 유막내 코어가 형성되는 h_a , h_b 에서, 항복 전단응력 τ_0 와 동일하다. 이때 유막의 상단($y=0$)과 하단($y=h$) 전단응력은 대칭성으로 동일하고 유막내의 압력구배 P' 은 $\sqrt{\tau_\theta^2 + \tau_z^2}$ 이다.

등가 레이놀즈 방정식을 절단 원추형 SFD 베어링에 응용하기 위하여 다음과 같은 단순화 과정을 수행한다. 저어닐과 베어링의 속도는 각각 영이고 $h_a = h/2 - \tau_0 / P'$ 이다. h_a 가 0이면 코어가 형성되어 유동이 발생하기 위한 최소 압력구배는 $P'_c = 2\tau_0/h$ 이다. 위 식에 대입하면 다음과 같은 절단형 원추 SFD 베어링에 대한 레이놀즈 방정식을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} P_x' h_a^3 \left(\frac{P' - P_c'}{P'} \right)^3 + \frac{\partial}{\partial z} P_z' h_a^3 \left(\frac{P' - P_c'}{P'} \right)^3 = -12 \frac{\partial h}{\partial \theta} \tag{5}$$

위의 식에서 각 방향의 둘째 항은 전기점성유체의 항복 전단응력에 의해서 발생하는 항인데 τ_0 가 0이고 h_a 가 h이면 $P'_c = 0$ 이 되어 뉴우톤 유체에 대한 레이놀즈 방정식과 동일하다.

구름베어링에 장착되어 있는 절단원추형 SFD 베어링의 폭은 원주방향에 대하여 비교적 소폭임으로 압력의 변화가 큰 Z 방향의 압력을 고려할 수 있다. $Z=0$ 에서 유동이 되기 위해서 $P'_z = P_c'$ 이며, SFD 베어링에 레이놀즈 방정식에서 축 방향의 압력만 고려하여 적분하면 다음과 같은 방정식을 얻을 수 있다.

$$P_z'^3 + \left(12 \frac{\partial h}{\partial \theta} \frac{Z}{h^3} - 3P_c' \right) P_z'^2 + 3P_c'^2 P_z' - P_c'^3 = 0 \tag{6}$$

여기에서 무차원 항복 전단응력 $\tau = \tau_0/h^\beta$ 가 0인 경우에 $P'_c = 0$ 임으로 뉴우톤 유체의 레이놀즈 방정식에서 구한 압력구배 방정식과 동일하다. 이때 $Z = \pm L/D$ 에서 $P'_z = 0$ 임을 고려하여 SFD 베어링의 압력

분포를 구한다. 그리고 반경 및 접선방향 유막력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f_r = \int_{-L/D}^{L/D} \int_{\theta_1}^{\theta_2} P_z R \cos \theta d\theta dZ \quad (7a)$$

$$f_t = \int_{-L/D}^{L/D} \int_{\theta_1}^{\theta_2} P_z R \sin \theta d\theta dZ \quad (7b)$$

여기에서 R은 베어링 임의의 지점에서 무차원 반경이다. 한편 회전축-베어링계에 대한 지배 방정식은 다음과 같다¹²⁾.

$$G = (A_1 \epsilon^2 + A_2^2 f_r^2 - 2A_1 A_2 \epsilon f_r + A_2^2 f_t^2)^{1/2} \quad (8)$$

여기에서 $A_1 = 2a\Omega^2 - 1$

$$A_2 = 8aB^2$$

$$A_3 = \Omega^2 - 1$$

$$A_4 = 2\zeta\Omega$$

$$A_5 = U\Omega^2$$

여기에서 질량비 $a = 0.1 \sim 1.0$, 베어링 변수 $B = 0.05 \sim 1.5$, 감쇠비 $\zeta = 0.05$, 회전수비 $\Omega = 0 \sim 5.0$, 불평형 변수 $U = 0.05 \sim 0.5$ 이다. 무차원 탄성 회전축-

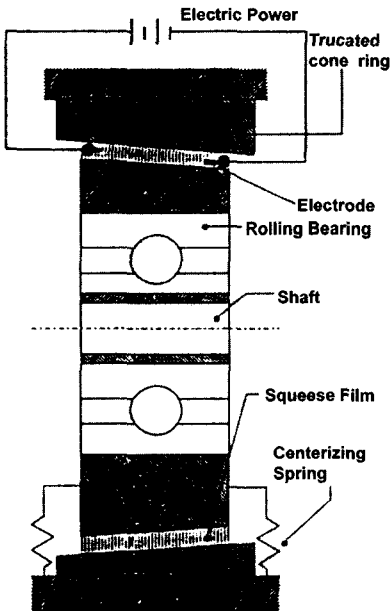


Fig. 1. Truncated cone type SFD bearing

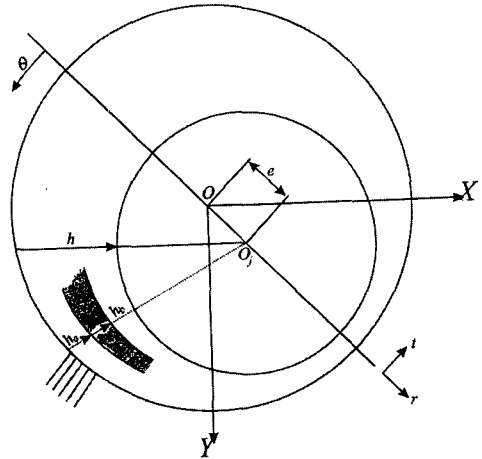


Fig. 2. SFD Bearing coordinates

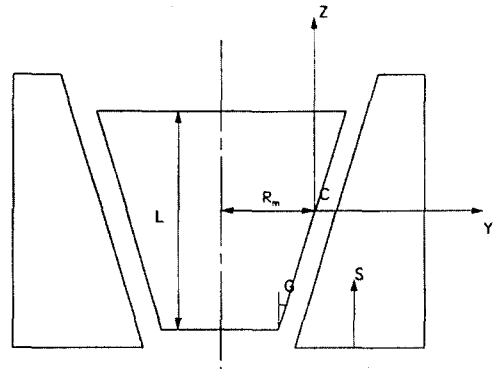


Fig. 3. Geometry and coordinate axes

베어링계에 대한 지배 방정식은 반복 계산을 수행하며 회전축계가 위험속도 및 고속에서 안정성을 갖는 동특성을 구한다.

3. 해석 결과 및 고찰

SFD 베어링은 윤활제로서 전기점성유체를 사용하고 원형형상을 탈피하여 축 방향으로 경사가 있으므로 조립 후에도 유막간극의 변화가 가능한 원추형 SFD 베어링을 대상으로 있다. 유막 해석을 위해 3차 전기점성 등가 레이놀즈 방정식을 구하였으며 이러한 등가 방정식에서 축 방향의 압력변화를 고려한 소폭 베어링 이론을 적용하였다.

유막 내에서 폭 방향으로 각각 대칭이므로 1/2의 SFD 베어링을 선정하였고, 이때 폭 방향과 원주 방향의 Grid는 30×50 으로 하였다. 폭 방향 레이놀즈 방정식을 베어링의 편심율에 따라 임의의 원주 방

향에서 폭 방향으로 적분하여 유막압력을 구하고 유막에 대하여 유막에 작용하는 반경 및 접선 방향 유막력을 구하였다. 이때 SFD 베어링 경사(2°)의 탄젠트 값은 0.03492, 전기점성 유체상수 β 와 무차원 항복 전단응력 τ 가 0이 되면 뉴우톤 유체와 동일하므로 일반적으로 β 는 1~2의 범위, τ 는 0~1의 범위, 축 방향 이동거리 S는 0.2~0.6mm로 하였다.

Fig. 4~Fig. 9는 SFD 베어링의 유막 내에서 1/2에 해당되는 유막 면의 압력분포를 나타내고 있다. 이때 변수는 전기점성 상수 β , 무차원 항복 전단응력 τ , 편심율 ϵ , 축 방향 이동거리 S이다.

Fig. 4에서 보는 것과 같이 $\beta=1.0$, $\tau=0.4$, $\epsilon=0.4$, $S=0.2\sim 0.6$ 경우에 베어링의 폭의 중심 $Z=0$ 에 대하여 1/2 폭 방향 압력분포를 나타내고 있다. 이때 뉴우톤 유체와 달리 $Z=0$ 에서 전기점성 유체의 항복 전단응력에 의한 영향으로 불연속을 보이고 있다. 원주 방향으로 최소유막과 최대유막을 통해서 압력 분포는 매우 유연하며 최대 유막압력은 $\theta=200^\circ$ 근방에서 나타내고 있다.

저어널의 편심율을 증가한 Fig. 5에서와 같이 $\epsilon=0.8$ 일 경우에 180° 에서 10배의 유막압력이 형성됨으로 저어널의 편심율에 의한 영향을 크게 받고 있

다. 한편 최대 유막압력은 195° 에서 발생한다. 축 방향 이동거리의 함수인 유막 간극비는 SFD 베어링의 경사로 인하여 1보다 적은 값을 갖게 되고 S로 인한 유막간극의 변화에도 덜 영향을 받는다.

Fig. 6와 Fig. 7에서와 같이 무차원 항복전단응력 τ 을 0.8로 증가한 경우, 유막압력이 $\tau=0.4$ 에 비하여 2~2.5배로 증가한다.

Fig. 8와 Fig. 9에서와 같이 $\beta=1.5$ 인 경우에는 $\beta=1.0$ 와 비교하면 유막압력이 매우 증가하며 최대값은 $\theta=180^\circ$ 방향으로 이동한다. 뉴우톤 유체의 경우는 편심율에 의해서만 유막압력의 변화가 있는데 이와 같은 비 뉴우톤 유체인 전기점성 유체를 사용하면 편심율뿐만 아니라 유체상수, 항복 전단응력의 변화에 따라서 유막압력을 조절할 수가 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 10와 Fig. 11에서 보는 것과 같이 무차원 반경 및 접선방향 유막력은 전기점성유체는 뉴우톤 유체보다 크게 나타난다. 일정한 편심율인 경우에 각각의 유막력은 전기점성 유체상수 및 항복 전단응력의 증가에 따라 크게 증가한다. 특히 접선방향 유막력은 편심율이 0.7이상의 큰 영역에서 증가하는 현상을 알 수가 있다.

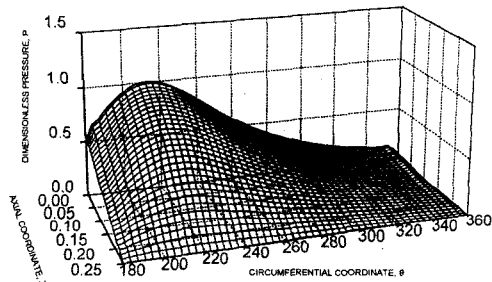


Fig. 4. Dimensionless pressure profiles ($\beta=1.0$, $\tau=0.4$, $\epsilon=0.4$)

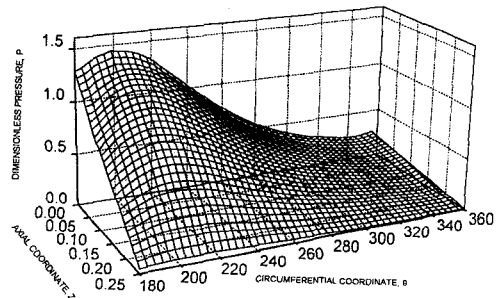


Fig. 6. Dimensionless pressure profiles ($\beta=1.0$, $\tau=0.8$, $\epsilon=0.4$)

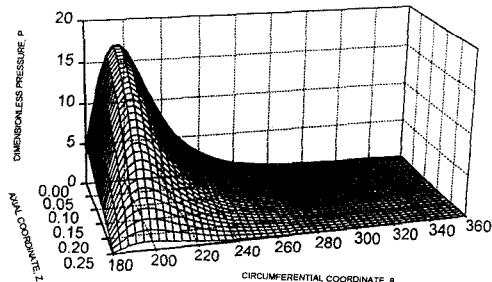


Fig. 5. Dimensionless pressure profiles ($\beta=1.0$, $\tau=0.4$, $\epsilon=0.8$)

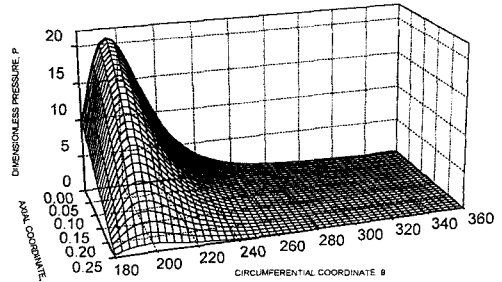


Fig. 7. Dimensionless pressure profiles ($\beta=1.0$, $\tau=0.8$, $\epsilon=0.8$)

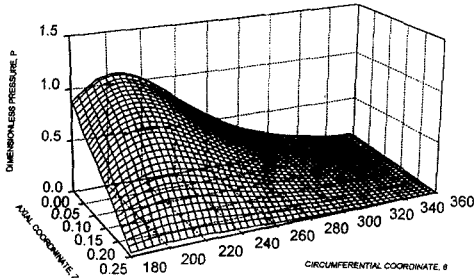


Fig. 8. Dimensionless pressure profiles ($\beta=1.5, \tau=0.4, \epsilon=0.4$)

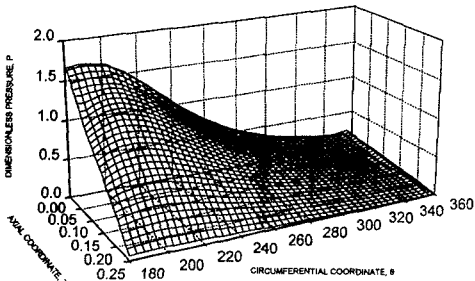


Fig. 9. Dimensionless pressure profiles ($\beta=1.5, \tau=0.8, \epsilon=0.4$)

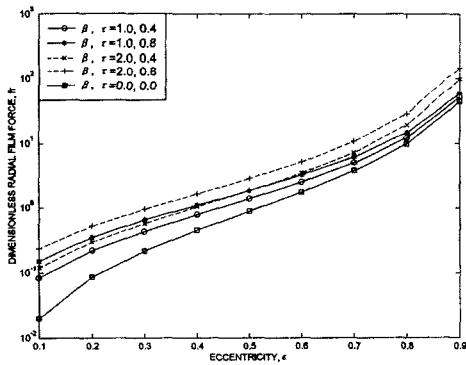


Fig. 10. Dimensionless radial film force distribution

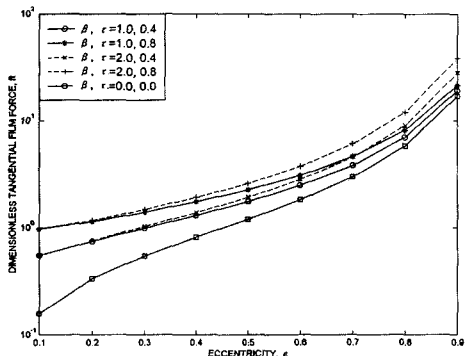


Fig. 11. Dimensionless tangential film force distribution

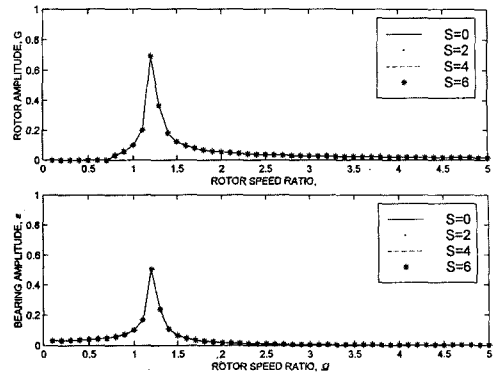


Fig. 12. Response of flexible rotor ($\beta=1.0, \tau=0.4, \alpha=1.0, U=0.1, B=0.05$)

Fig. 12에서는 $\beta=1.0, \tau=0.4$ 인 경우에 베어링의 경사각에 의한 유막 간극비에 따라 회전체의 진폭을 나타내고 있다. 이와 같이 설계된 SFD 베어링은 간극비 변화에도 일정한 진폭을 나타내어 시스템의 안정성을 보이고 있다.

4. 결론

본 연구는 절단 원추형 SFD 베어링에 전기점성 유체를 이용한 등가 레이놀즈 방정식을 구하였으며 베어링 폭이 작은 유막압력, 유막력, 그리고 회전축 베어링계의 거동을 해석하였다. $\beta=1.0, \tau=0.4$ 의 경우에는 유막간극의 변화에도 회전축의 진폭변화가 없이 안정되고 유막압력도 일정하다. 적합하게 설계된 절단원추형 SFD 베어링은 사용중에 유막간극이 변화하더라도 동일한 동특성을 보이고 있어 회전축계의 안정성에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글 : 본 연구는 2000년도 LG 연암 문화재단의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- 1) S. Cooper, "Preliminary investigation of oil film for the control of vibration, proc. of the L. and W. convention", I.M.E., 1963.
- 2) Seok-Cheol Yoon, L. A. San Andres, G. Meng, "Dynamic force response of an open ended squeeze film damper", ASME 91-GT-247, 36th ASME international gas turbine & aeroengine

- congress and exposition, 1991.
- 3) Gunter, E. J., Barrett, L. E., and Allaire, P. E., "Design of nonlinear squeeze film dampers for aircraft engines", ASME Journal of Lubrication Technology, Vol. 99, pp. 57~64, 1977.
 - 4) Taylor, D. L., and Kumar, B. R. K., "Nonlinear response of short squeeze film dampers", ASME Journal of Lubrication Technology, Vol. 102, pp. 51~58, 1980.
 - 5) S. Morishita, "Controllable squeeze film damper", J. of vibration and acoustics vol. 114/355, 1992.
 - 6) C. Mu, J. Darling, C. R. Burrows, "An appraisal of a proposed active squeeze film damper", ASME J. of Tri. Vol. 113, 1991.
 - 7) W. M. Winslow, "Induced fiberation of suspensions", J. of Applied Physics, Vol. 20, 12, 1949.
 - 8) J. A. Tichy, "Hydrodynamic lubrication theory for the Bingham plastic flow model", J. Rheol 35(4), 1991.
 - 9) J. L. Nikolajsen, "An electroviscous damper", NASA cp-2250, 1982.
 - 10) S. Wada, "Elastrohydrodynamic lubrication of squeeze film", B. of JSME, vol. 21, 159, 1978.
 - 11) S. Wada, "Behavior of a Bingham Solid in hydrodynamic Lubrication", B. of JSME, Vol. 16, 92, 1973.
 - 12) 윤석철, "중심잡이 스프링이 없는 절단 원추형 SFDB의 동특성에 관한 연구", 한국과학재단 연구보고서, 1995.
 - 13) 한동철, 윤석철, "스퀴즈-필름 댐퍼를 이용한 회전축 베어링계의 고속화 연구", 윤활학회지, Vol. 5, 1989.