

# ER유체를 이용한 이방성 스퀴즈필름 댐퍼의 응답특성에 관한 연구

안 영공\* · 양 보석\* · 森下 信\*\*

## A Modeling of a Variable-damping Mount Using Magneto-Rheological Fluid

Young Kong Ahn\*, Bo-Suk Yang\* and Shin Morishita\*\*

### ABSTRACT

Electro-Rheological (ER) fluid is applied to a controllable squeeze film damper (SFD) for stabilizing a flexible rotor system. ER fluid is a class of functional fluid whose yield stress varies according to the applied electric field strength, which is observed as viscosity variation of the fluid. In applying ER fluid to a SFD, a pair of rings of the damper can be used as electrodes. When the electrodes are divided into a horizontal pair and a vertical one, the SFD can produce damping force in each direction independently. A prototype of the directionally controllable SFD was constructed and its performance was experimentally and numerically investigated in the present work.

### 1. 서론

스퀴즈필름 댐퍼(squeeze film damper, SFD)는 회전체의 감쇠요소로서 잘 알려져 있고, 지지부의 볼베어링 바깥 부분에 설치하여 회전체의 감쇠특성을 개선하고, 주 운전주파수에서 회전체의 안정성을 높이는 작용을 한다<sup>1,2)</sup>. SFD에 의해 부가되는 감쇠효과는 회전체의 휘둘림 모드에 따라 차이가 있고, 이는 각 모드에 대응하는 최적 감쇠치가 존재하는 것을 의미한다<sup>3)</sup>. 종래의 SFD의 설계는 형상과 사용되는 윤활유의 점도를 조절하여 주 운전주파수에서 회전체의 최적 지지 조건을 만들 수 있도록 하였다.

전기 점성유체(Electro-Rheological fluid, ER유체)는 외부 신호에 의해 부가하는 전장의 크기를 변화시킴으로써 유체의 점도가 변화하는 독특한 기능을 가지고 있고, 실용화의 기대가 높은 기능성 유체의 하나로써 주목되고 있다<sup>4,5)</sup>. 종래의 SFD에 사용되는 윤활유대신에 ER유체를 적용함으로써 회전체의 회전수에 따라서 최적 감쇠치를 지지부에 적응적으로 부여하는 것이 가능하게 된다. 이에 관한 연구는 여러 연구자에 의해 수치 및 실험적인 검토가 이루어져 왔다<sup>6,7)</sup>.

본 연구에서는 SFD를 구성하는 한 쌍의 동심 원통의 전극을 수평과 수직방향으로 분리하여, 전압을 독립적으로 부가할 수 있도록 함으로써 수

평 및 수직방향에 대한 지지감쇠를 각각으로 제어할 수 있도록 하였다.

일반적으로, 유연지지 회전체는 공작정도 혹은 지지 강성의 이방성에 의해 수평과 수직방향의 고유진동수는 다른 값을 가지고, 휘둘림 진동의 레벨은 타원으로 나타난다. 이와 같은 유연지지 회전체의 휘둘림 진폭을 보다 효과적으로 감쇠시키기 위해서는 수평과 수직방향의 진동 모드에 따라서 감쇠력의 크기를 조절하는 것이 바람직하다.

본 논문에서는 이방성의 감쇠특성을 가지는 가제어형 SFD를 이용하여 회전체의 휘둘림 진폭을 보다 효과적으로 저감시키는 것을 실험 및 수치계산을 통하여 입증하였다.

### 2. ER효과의 메커니즘

Winslow<sup>9)</sup>에 의해 보고된 ER유체는 외부에서 부가한 전장에 의해 유체의 항복응력이 변화하는 ER효과를 가진 기능성 유체로 잘 알려져 있다. ER유체 자체의 성능과 안정성을 향상시키는 연구<sup>4), 10)</sup>와 ER유체를 감쇠기, 엔진 마운트, 클러치, 브레이크, 밸브 등에 응용 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>11), 12)</sup>. ER유체는 분산계(dispersive type)와 균일계(homogeneous type)로 분류된다. 전자는 절연체에서 반도체 미립자를 분산시킨 것이고, 전장 하에서 그 미립자가 전장의 방향으로 사슬구조를 형성한다. 후자는 전장의 방향에 의해, 분자의 클러스터(cluster) 혹은 분자의 방향이 지배된다. 균일계의 ER유체로는 액정(liquid crystal)이 잘 알려져 있다.

\* 정회원, 부경대학교 기계공학부  
\*\* Department of Mechanical Engineering,  
Yokohama National University

본 연구에서는 분산계 ER유체를 사용하였다. 사용 이유로는 액정의 기본 점도보다는 분산계 ER유체의 기본점도는 다양하게 선택할 수 있고, 또한 ER효과의 변화 범위가 넓기 때문이다.

Fig. 1은 분산계 ER유체의 ER효과에 관한 매커니즘을 나타내고 있다. (a)와 같이 전장을 부과하지 않았을 경우 유체 내부의 미립자는 불규칙적으로 분산되어져 있고, 전장을 부과하였을 경우에 그 미립자들은 사슬구조를 형성하여 (b)의 전단모드(shear mode), (c)의 유체 유동모드(flow mode), (d)의 스퀴즈모드(squeeze mode)에서 저항하는 모습을 나타내고 있다. ER유체의 점도를 측정하는데 일반적으로 전단속도의 방향이 일정한 회전식 점도계가 이용되고, 그 내부는 전단모드로 간주할 수 있다. 이와 같은 회전식 점도계에서 측정된 ER유체의 특성은 유체의 항복응력이 변화하는 Bingham 유체의 특성이 나타난다. 그러나 항복식의 전단-유체유동, 스퀴즈 작용이 일어나는 경우에 ER유체 내부의 미립자는 사슬구조를 유지하지 못하고, 미립자들이 덩어리를 형성하고, 불규칙하게 분산된 형태인 (d)과 같이 나타날 것으로 간주된다. 그래서 항복응력의 변화는 아주 적어 뉴턴유체와 같이 취급할 수 있다. 그 한 예로서 ER를 이용한 감쇠기의 파형이 쿨롱마찰(Coulomb friction)에 의한 효과보다는 점성감쇠(viscous damping)에 의한 감쇠진동이 나타난다<sup>13)</sup>. 또한 전장을 부과하였을 때, 그 항복응력이 ER유체의 것보다 크게 변화하는 기능성 유체인 자기점성유체(Magneto-Rheological fluid, MR유체)를 이용한 감쇠기의 응답은 강제진동이 부과된 상태에서 쿨롱마찰이 작용하는 시간과형이 나타난 보고가 있다<sup>14)</sup>. 그러나 그 논문에 대한 결과는 쿨롱마찰의 대부분은 실링의 마찰에 의한 것으로 판단된다. 이와 같은 근거와 ER유체를 뉴턴 유체로 간주하면, 이를 이용한 계는 선형계로 취급할 수 있는 장점이 있기에 본 연구에서는 ER유체를 뉴턴유체로 간주하였고, ER유체를 이용한 SFD에 의해 부과된 감쇠를 점성감쇠로 간주하여 수치적 해석을 행하였다.

본 실험에 이용된 ER유체는 실리카 파우더(silica powder)의 미립자를 절연체인 광유(mineral oil)에 분산시킨 것으로, 그 미립자의 지름은 1 $\mu$ m 정도이다. ER유체의 특성은 회전식 점도계로서 온도가 40  $^{\circ}$ C에서 DC전압을 부가하여 측정하였다. 전압을 부가하지 않았을 경우의 기본 점도는 41 cP이고, 전장을 3 kV/mm 부과하였을 경우의 전단력은 70 Pa로 나타났고, 이를 전단속도가 105 1/s대한 겔보기 점도로 환산하면 490 cP로 된다.

### 3. 실험장치

실험장치의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다.

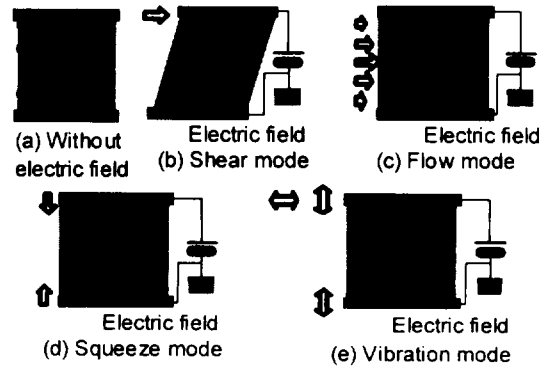


Fig. 1 Mechanism of ER effective of dispersive type ER fluid

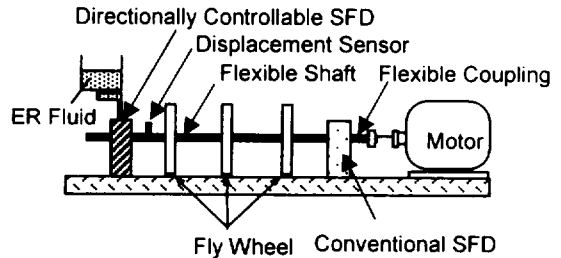


Fig. 2 Experimental apparatus of the flexible rotor with squeeze film damper

Table 1. Principal dimensions

Rotor length	700 mm
Shaft diameter	20 mm
Disk diameter	200 mm
Disk Thickness	26 mm
Rotating speed	500-4500 rpm
Damper diameter	72 mm
Radial clearance	0.15 mm
Damper width	10 mm
Oil groove width	4 mm

3개의 원판을 가진 회전체의 양단을 볼 베어링 및 SFD로 지지하고, 회전체의 한쪽 단은 flexible coupling으로 가변속 모터에 접속되어져 있고, 각부의 치수 제원은 Table 1에 나타내었다. 모터측의 지지부에는 통상의 윤활유를 이용한 SFD를 설치하고, 그 반대측의 지지부에는 ER유체를 이용한 이방성 가진 가제어형 SFD를 설치하였다.

이방성의 가제어형 SFD의 상세 구조의 개략도는 Fig. 3에 나타내었다. 볼베어링의 외륜의 주위에 센터링(centring)스프링의 리테이너(retainer)를 설치하고, 또한 그 외측에 한 쌍의 원통전극을 삽입하였다. 이 원통의 전극은 수평과 수직방향으로 감쇠력의 방향성을 가지도록 분리된 것이 큰 특징이다. 구체적으로는 프린트기판으로 사용되는

절연성의 섬유강화 복합재료를 이용하여, 폭이 같은 외측원통의 내경보다 극히 적은 차이의 내측 외경의 원통을 만들고, 그 외경과 내경의 틈새를 이용하여, 35  $\mu\text{m}$ 의 동막(bronze film)을 수평과 수직방향으로 독립이 되도록 붙였다.

실험은 가제어형 SFD내부의 온도를 40  $^{\circ}\text{C}$ 로 유지하였고, 부가한 DC전압을 변화시키면서 입페트 햄머에 의한 타격시험과 가변모터에 의한 회전시험을 하였다. 회전체의 응답은 변위 센서를 이용하여 컴플라이언스(compliance)와 궤적(orbit)을 측정하였다.

#### 4. 실험과 수치계산 결과 및 고찰

##### 4.1 타격시험

회전체가 정지한 상태에서 전장의 강도를 변화시키면서 충격햄머로 가제어형 SFD에 가까운 원판에 타격을 가하였을 때의 진동파형을 Fig. 4에 나타내었다. (a)는 실험의 수직방향, (b)는 실험의 수평방향의 응답 파형에 해당된다.

전장의 강도가 낮을 때는 회전체의 진동은 강제운동을 하면서 수렴하지만, 전장이 어느 정도 높게 되면 SFD내부의 ER유체의 점도가 상승하여 진동의 수렴시간이 짧아지고, 타격에 의한 피크가 작아짐을 알 수 있다. 보다 전장을 높게 부가하면 감쇠효과가 낮아지는, 즉 감쇠비가 줄어져 진동의 수렴시간이 길어짐을 알 수가 있고, 또한 진동 주기는 짧아 짐을 알 수 있다. 이 현상은 ER유체의 점도가 크게 증가함에 따라 등가 지지강성이 상승하여, 그 지지 조건이 단순지지 조건상태로 접근하기 때문에 지지부의 진동 진폭은 작아지나, 회전체에 기여하는 감쇠비는 낮아지게 된다. 감쇠비가 최대가 되는 경우를 최적조건으로 하면, 수직방향에 대한 전압은 약 1.3 kV/mm일 때, 수평방향에 관해서는 약 2.3 kV/mm에서, 각 방향에 대한 최적 감쇠지지 조건이 된다.

Fig. 5는 수치해석에 의한 감쇠자유 진동파형을 나타내고 있고, (a)는 수직방향, (b)는 수평방향의 응답 파형에 해당된다. 수치해석에 필요한 감쇠상수 값은 실험의 응답으로부터 점성감쇠값을 동정하여 사용하였다. 왜냐하면 ER유체의 점도는 전단속도의 변화에 크게 의존하므로<sup>9)</sup>, 회전식점도계로 측정된 점도의 값을 이용할 수 없기 때문이다. 감쇠값이 3.3 N s/mm와 2.7 Ns/mm에서 수직과 수평방향에 대한 최적 감쇠지지 조건 이된다. 이 수치적 결과에서 수평방향의 최적 감쇠값이 수직방향의 값보다 낮으나, 실험의 결과에서는 수평방향의 최적 전장은 수직방향의 경우에 비해 높은 이유는 수평방향으로 전기점성 효과가 충분히 발휘되지 않았기 때문에 더 높은 전장을 부가해야 함을 알 수 있다. 이 수치적 결과는 쿨

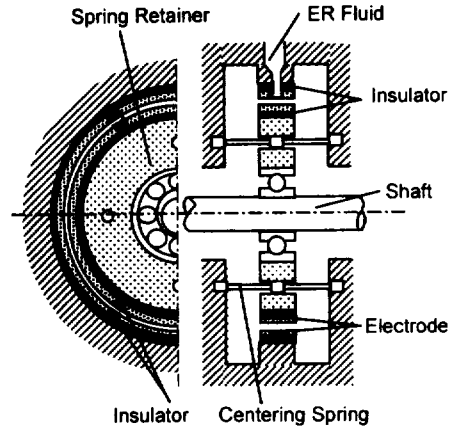


Fig. 3 Construction of directionally controllable SFD

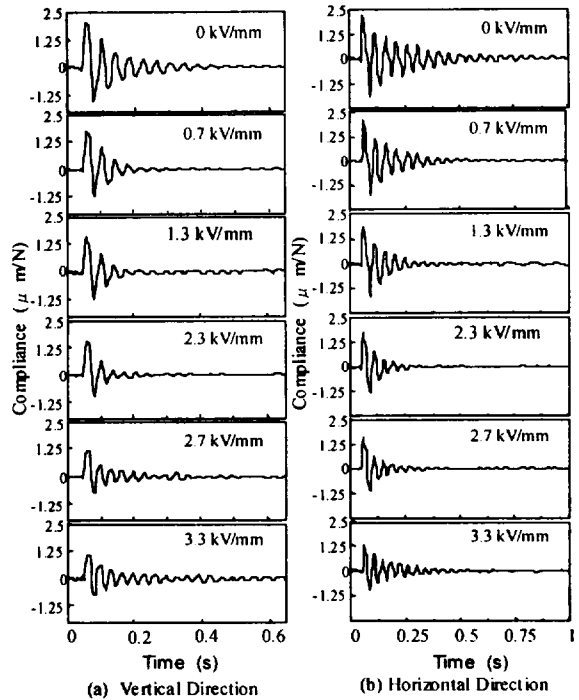


Fig. 4 Response to impact test with variation of applied electric fields

롱마찰값을 이용하지 않고 점성감쇠값을 이용하였으나, 감쇠진동 형태는 실험 결과와 유사함을 알 수 있다.

이들의 실험에 의한 자유진동파형을 주파수의 영역에서 표현하면 Fig. 6과 같다. 전장을 부과하지 않았을 경우의 수직방향의 1차 공진주파수는 약 23.8 Hz, 2차는 약 52.5 Hz, 수평방향의 1차 공진주파수는 약 20.8 Hz, 2차는 약 46.8 Hz이다. 전장을 높이면 수직, 수평방향의 1차 공진점에

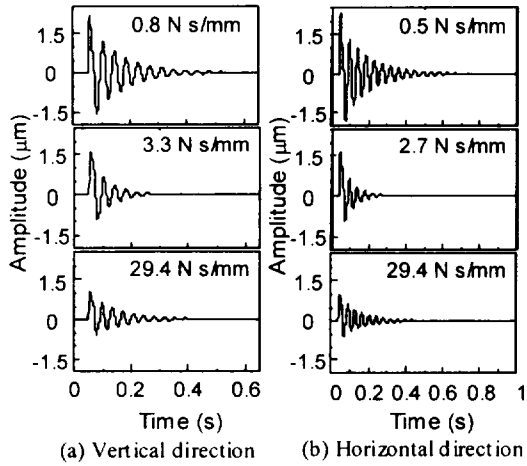


Fig. 5 Time histories with variation of damping constant by simulation

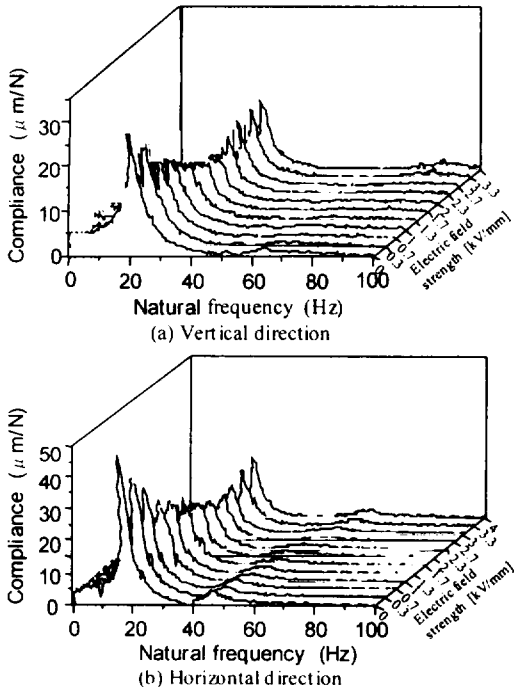


Fig. 6 Spectrum of impact response under various electric fields

대응하는 피크는 감소하기 시작하고, 수직방향에 관해서는 약 1.3 kV/mm, 수평방향에 대해서는 약 2.3 kV/mm에서 피크는 최소로 된다. 피크의 최소치를 통과한 부근에서부터 전장의 강도를 높이는 것에 따라서 공진주파수는 상승하고, 그 피크는 점점 커진다. 즉, 감쇠효과는 작아짐을 알 수 있다. Fig. 6으로부터 구한 부가전압에 따른 1차 공진주파수와 감쇠비의 변화를 Fig. 7에 나타내었다.

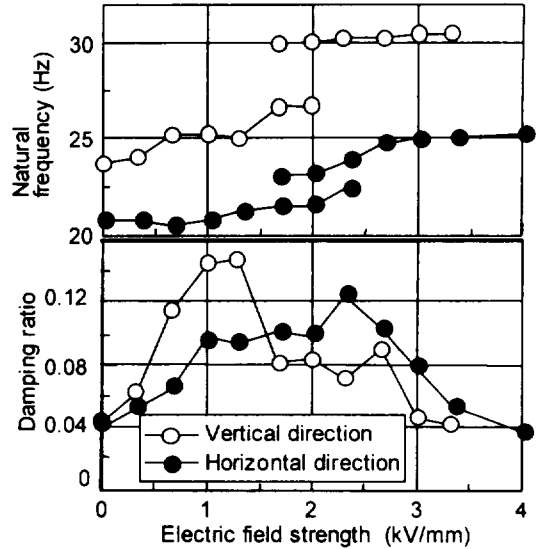


Fig. 7 Variation of resonant frequency and damping ratio

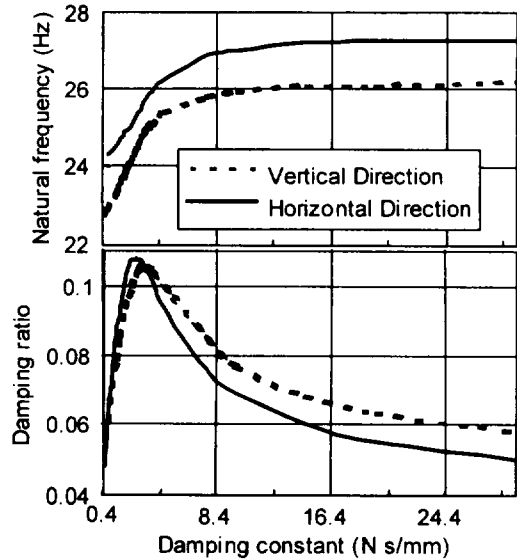


Fig. 9 Variation of resonant frequency and damping ratio by simulation

또한 점성감쇠상수의 변화에 따른 다른 1차 공진주파수와 감쇠비의 변화를 이론적으로 구한 결과를 Fig. 8에 나타내었고, 이론적 해석은 유한요소법을 이용하였다.

Fig. 7에서 수직방향은 약 2 kV/mm의 전장, 수평방향은 약 3 kV/mm 전장 이상에서는 공진주파수의 변화가 나타나지 않았다. 감쇠비에 관해서는 공진주파수가 이동하기 직전에 최대치를 가지고, 또한 공진주파수 대해서는 그 천이점 부근에서 두 개의 공진주파수가 나타나난다. Fig. 6에서 보면 공

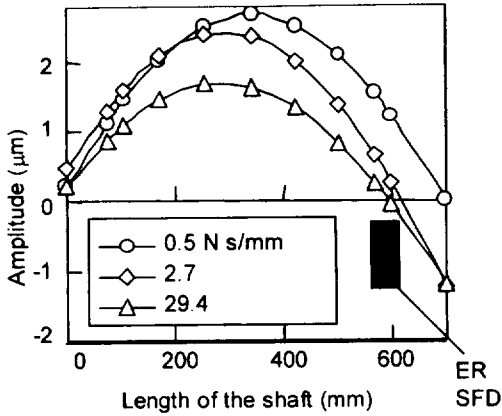


Fig. 9 Mode shapes of flexible rotor

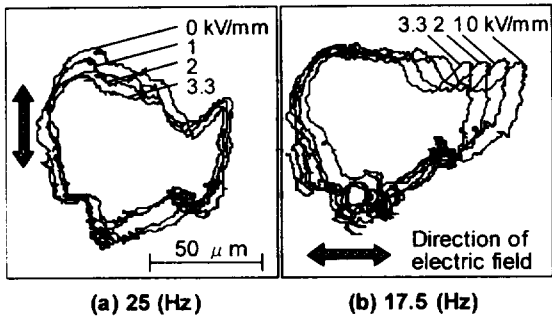


Fig. 10 Whirl orbits under various electric fields

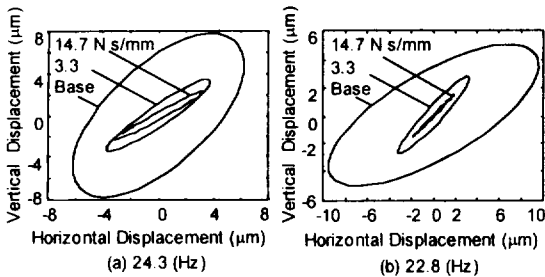
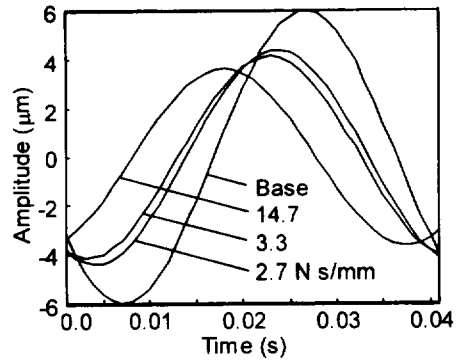


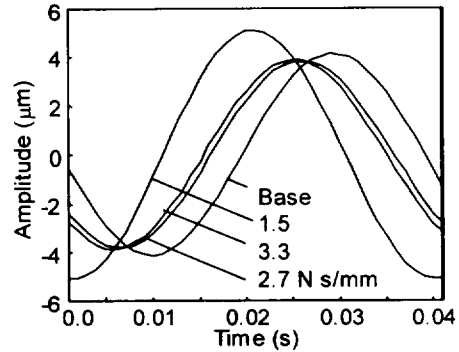
Fig. 11 Whirl orbits under various supporting damping constants by simulation

진 피크가 2개 근접하여 나타났고, 전장 강도를 높이면 서서히 높은 공진 피크가 현저하게 나타나게 되는 것을 알 수 있다. Fig. 8의 수치적 결과에서도 감쇠치의 상승과 함께 공진주파수가 증가함을 잘 나타내고 있고, 수평, 수직방향의 최대 감쇠비의 차이는 크게 없지만 서로 다른 값을 가지고 있음을 알 수 있다.

지지감쇠값의 변화에 따른 수평방향의 진동 모드의 변화를 이론적으로 구한 결과는 Fig. 9와 같다. 감쇠값이 증가함에 따라 가제어형 SFD가 위치한 부분의 진폭이 작아지고, 감쇠값이 29.4 N



(a) Vertical direction



(a) Horizontal direction

Fig. 12 Vertical and horizontal amplitudes under various supporting damping constants by simulation

s/mm에서는 감쇠효과가 없는 단순 지지조건으로 접근함을 알 수 있다.

#### 4.2 회전시험

회전체를 회전시켜서 부가하는 전장의 강도에 대한 응답을 실험적으로 조사하였고, 그 결과는 Fig. 10에 나타내었다. 축심의 궤적을 나타내고 있는 (a)는 수직방향의 1차 위험속도 부근, (b)는 수평방향의 1차 위험속도 부근의 궤적이다. 전장의 강도를 높이면 높일수록 축심 궤적이 작아지는 사실을 알 수 있다. 이것은 전장의 강도를 어느 정도 높이면 감쇠력이 상승하여 그 진폭은 줄어들고, 더욱 강하게 전장을 가하면 등가 강성의 증가로 회전체의 지지조건이 단순지지로 변하여 휘둘림 모드가 변화하고 위험속도가 상승하여 피크가 작아지는 현상이다.

Fig. 7의 결과에서는 감쇠비는 전장의 변화 따라 3배이상 변화하지만, Fig. 10에서는 그렇게 현저한 효과는 나타나지 않았다. 이것은 회전체가 회전할 때 축심이 정지상태에서 타격실험을 할 때와 그 위치가 변화하여 전극의 간격에 편심이 생

겨서 충분한 전기점성 효과가 발휘되지 않았기 때문으로 추정된다.

회전체의 강제진동에 대한 수치해석은 Newmark  $\beta$  법을 이용하였고, 그 결과는 Fig. 11과 12에 나타내고 있다. Fig. 11(a)는 수직방향의 1차 위험속도에서의 궤도, Fig. 11(b)는 수평방향의 1차 위험속도 궤도이다. 이들 위험속도에서는 실험결과와 같이 감쇠값이 크면 클수록 궤적은 작아진다. 그러나 Fig. 12와 같이 25.7 Hz로 가진한 경우, 수직방향은 감쇠값이 증가할수록 진폭은 작아지지만, 수평방향은 수평방향의 감쇠값이 증가하여 최적감쇠값까지는 진폭이 감소하나 그 이상 감쇠값을 증가시키면 오히려 진폭이 증가함을 알 수 있다. 이들 그림에서 Base는 전장을 부가하지 않은 상태, 즉 수직방향에 대한 감쇠상수는 0.8 N s/mm이고, 수평방향의 경우는 0.5 N s/mm의 감쇠상수 값을 수치계산에 사용하였고, Fig. 12에서 파형의 주기는 각각 동일하다.

이상의 결과로부터 회전체의 진동을 억제하기 위해서는 수평과 수직방향의 지지 감쇠력을 독립적으로 부여하는 것이 보다 효과적이라는 것을 이들 실험 및 이론적인 결과로부터 알 수 있다.

## 5. 결론

본 논문은 유연지지 회전체에 감쇠력을 부가하는 가제어형 SFD의 감쇠특성을 외부신호에 의해 수평과 수직방향에 대해 서로 독립적으로 제어함으로써 폭넓은 운전주파수 범위에서 회전체의 안정성을 향상시키는 연구로서, 결론은 아래와 같다.

- (1) ER유체를 적용하고, 전극으로 이용되는 댐퍼의 원통을 수직, 수평방향으로 분할하여 서로 독립적으로 전압을 제어함으로써, 감쇠력에 방향성을 부여하는 것이 가능함을 실험적으로 보였다.
- (2) 본 가제어형 SFD를 이용함으로써 유연지지 회전체의 수직과 수평방향의 지지부에 최적 감쇠력을 독립적으로 부여함으로써, 폭넓은 운전주파수에서 보다 효과적으로 휘돌림 진동을 억제 가능함을 보였다.
- (3) ER유체를 이용한 SFD를 이용한 회전체의 응답 특성을 수치적으로 계산을 할 때 지지부에 쿨롱 감쇠가 아닌 점성감쇠가 작용하는 것으로 간주하여 얻은 결과는 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.

## Reference

1) Thomsen, K. K. and Andersen, H., 1974, "Experimental Investigation of a Simple Squeeze Film Damper," *Journal of Engineering for Industry, Transactions ASME*, Vol. 96. No. 2, pp. 427-430.

2) Cunningham, R. E, Fleming, D. P. and Gunter, E. J., 1974, "Design of a Squeeze-Film Damper for a multi-Mass Flexible Rotor," *Journal of Engineering for Industry, Transaction ASME*, Vol. 97, No. 4, pp. 1383-1389.

3) Satio, S., and Kobayashi, M., 1982, "On the Vibration of a Rotor Supported by Squeeze Film Damper," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 48, No. 436, pp. 1883-1888.

4) Jordan, T.C. and Shaw, M. T., 1989, "Electrorheology," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 24, No. 5, pp. 849-879.

5) Klass, D. L. and Martinek, T. W., 1967, "Electroviscous Fluids. I. Rheological Properties," *Journal of Applied Physics*, Vol. 38, No. 1, pp. 67-74.

6) Morishita, S. and Mitsui, J., 1992, "Controllable Squeeze Film Damper (An Application of Electro-Rheological Fluid)," *Transactions of the ASME, Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 114, No. 3, pp. 354-357.

7) Nikolajsen, J. L. and Hoque, M. S., 1988, "An Electroviscous Damper for Rotor Applications," *Transactions of the ASME, Journal of Vibration and Acoustics*, vol. 112, No. 3, pp. 440-443.

8) Tichy, J. A., 1993, "Behavior of a Squeeze Film Damper with an Electrorheological Fluid," *Tribology Transactions*, Vol. 36, No. 1, pp. 127-133.

9) Winslow, W. M. 1947, "Method and Means for Translating Electrical Impulses into Mechanical Forces," *US Patent Specification 2417850*

10) Block, H., and Kelly, J. P., 1988, "Electro-rheology," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 12, No. 12, pp. 1661-1677.

11) Morishita, S. and Ura, T., 1993, "ER Fluid Applications to Vibration Control Devices and an Adaptive Neural-Net Controller," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 4, pp. 366-372.

12) Stanway, R., Sproston, J. L. and EL-Wahed, A. K., 1996, "Applications of Electro-Rheological Fluids in Vibration Control: a Survey," *Journal of Smart Materials and Structures*, Vol. 5, pp. 464-482.

13) Hoque, M. S., 1988, "Experimental Investigation of an Electroviscous Damper for Rotordynamics Applications," *Master thesis, Mechanical Engineering Department, Texas A&M University*.

14) Spencer, B.F., Dyke, Jr., S.J., Sain, M.K and Carlson, J.D., 1997, "Phenomenological Model of a Magnetorheological Damper," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 123, pp. 230-238.