

〈논 문〉

ER유체를 이용한 이방성 스퀴즈필름 댐퍼의 특성

Characteristics of Directional Squeeze Film Damper Using ER Fluid

안영공* · 양보석* · 森下信**

Young Kong Ahn, Bo-Suk Yang and Shin Morishita

(2000년 12월 1일 접수 : 2001년 2월 2일 심사완료)

Key Words : Squeeze Film Damper(스퀴즈필름 댐퍼), Electrorheological Fluid(전기점성유체), Flexibly Supported Rotor(유연지지 회전체), Directional Supporting Damping(이방성 지지감쇠), Optimum Damping(최적감쇠)

ABSTRACT

Electro-Rheological (ER) fluid is applied to a controllable squeeze film damper (SFD) for stabilizing a flexibly supported 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. 서 론

스퀴즈필름 댐퍼(squeeze film damper, SFD)는 회전체의 감쇠요소로서 잘 알려져 있고, 지지부의 볼베어링 바깥부분에 설치하여 회전체의 감쇠특성을 개선하고, 주 운전주파수에서 회전체의 안정성을 높이는 작용을 한다.^(1,2) SFD에 의해 부가되는 감쇠효과는 회전체의 휘돌림 모드에 따라 차이가 있고, 이는 각 모드에 대응하는 최적 감쇠치가 존재하는 것을 의미한다.⁽²⁾ 종래의 SFD 설계는 형상과 사용 윤활유의 점도를 알맞게 선택하여 주 운전주파수에서 회전체의 최적 지지조건이 되도록 하였다.

전기 점성유체(electro-rheological fluid, ER유체)는 외부 신호에 의해 부가하는 전장의 크기를 변화시킴으로써 유체의 걸보기 점도가 변화하는 독특한 기능을 가지고 있고, 실용화의 기대가 높은 기능성유체의 하나로써 주목되고 있다.⁽³⁾ 종래의 SFD에 사용되는 윤활유대신에 ER유체를 적용함으로써 회전체의 진동모드에 따라서 최적 지지감

쇠치를 적응적으로 부여하는 것이 가능하게 된다. 이에 관한 연구는 여러 연구자에 의해 이론적 및 실험적인 검토가 이루어져 왔다.^(4~6)

본 연구에서는 SFD를 구성하는 한 쌍의 동심원통의 전극을 수평과 수직방향으로 분리하여, 전압을 독립적으로 부가할 수 있도록 함으로써 수평 및 수직방향에 대한 지지감쇠를 각각으로 제어할 수 있도록 하였다.

일반적으로, 유연지지 회전체는 제작 정도 혹은 지지강성의 이방성에 의해 수평과 수직방향의 위험속도가 서로 다른 값을 가지고, 축심의 궤도는 타원으로 나타난다. 이와 같은 유연지지 회전체의 휘돌림 진폭을 보다 효과적으로 감쇠시키기 위해서는 수평과 수직방향의 진동 모드에 따라서 감쇠력의 크기를 조절하는 것이 바람직하다.

본 논문에서는 이방성의 감쇠특성을 가지는 가제어형 SFD를 이용하여 회전체의 휘돌림 진폭을 보다 효과적으로 저감시킬 수 있음을 실험 및 수치계산을 통하여 입증하였다.

2. ER효과와 메커니즘

Winslow⁽⁷⁾에 의해 보고된 ER유체는 외부에서 부가한 전장에 의해 유체의 항복응력이 변화하는 ER효과를 가진

* 정회원, 부경대학교 기계공학부
E-mail : ahn@mail.pknu.ac.kr

Tel : (051) 620-1618, Fax : (051) 620-1405

** Department of Mechanical Engineering,
Yokohama National University

기능성 유체로서, 구성된 입자의 종류, 크기, 밀도 및 기본 오일의 점성에 따라서 다양한 특성을 가지게 된다. 항복응력이 변화하는 메커니즘이 유사한 또 하나의 기능성 유체인 MR(magneto-rheological)유체는 자장을 부가하였을 경우에 발생하는 항복응력의 변화범위가 ER유체에 비해 아주 큰 것이 특징이다.⁽⁸⁾ 이들 기능성 유체에 대한 연구로서는 자체의 기능과 안정성을 향상시키는 연구와 suspension, 감쇠기, 엔진마운트, 클러치, 브레이크, 밸브 등에 대한 응용연구가 활발히 진행되고 있다.^(3, 8~10)

본 연구에 요구되는 기능성 유체의 특성은 회전체의 수평과 수직방향의 1차 진동모드에 대한 최적감쇠 지지조건이 되는 점도가 전장을 부과하지 않은 상태의 기본 점도와 본 실험에서 부가 가능한 최대전장 내에서의 겔보기 점도 사이에 위치할 수 있는 것으로 규정하였고, 이에 적합한 ER유체를 선택하였다. 사용된 ER유체는 1 μm 정도의 미립자 실리카 파우더(silica powder)를 절연체인 광유(mineral oil)에 분산시킨 것이다. 그 특성은 회전식 점도계로서 온도 40 °C에서 DC전압을 부가하여 측정하였다. 기본 점도는 41 cP이고, 전장을 3 kV/mm 부가하였을 경우, 전단속도가 105 1/s일 때 항복응력이 약 70 Pa정도 증가하였고, 이를 겔보기 점도로 환산하면 490 cP로 된다.

Fig. 1은 ER유체의 ER효과에 관한 메커니즘을 나타내고 있다. (a)와 같이 전장을 부과하지 않았을 경우 유체내부의 미립자는 불규칙적으로 분산되어 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 특성 측정에는 일반적으로 전단모드인 전단속도의 방향이 일정한 회전식 점도계가 이용되고, 측정된 ER유체의 특성은 겔보기 점도가 전단속도의 변화에 지수함수적으로 변화하지만, Bingham유체의 특성이 나타난다.^(3,4) 그러나 본 연구의 실험결과와 제진 대상물의 최적감쇠조건이 고려되어 선정된 ER유체를 이용한 감쇠기의 응답특성은 항복응력에 의한 쿨롱마찰(Coulomb friction)보다는 점성감쇠(viscous damping)에 의한 효과가 현저하게 나타났다.⁽¹¹⁾ 또한 ER과 MR 유체를 이용한 감쇠기에 실링이 삽입된 경우 쿨롱마찰특성이 나타나는데,^(12,13) 이 특성은 실링의 마찰이 기본적으로 작용하기 때문에 단순히 항복응력의 변화에 의한 효과로 규정 짓기는 어렵다.

최적 감쇠조건이 고려되어 선정된 ER유체를 이용한 감쇠기에 왕복식의 전단, 유체유동, 스퀴즈작용이 일어나면 Fig. 1의 진동모드 (e)와 같이, ER유체 내부의 미립자들은 덩어리를 형성하지만 사슬구조를 유지하지 못하고, 불규칙하게 분산되어질 것으로 간주된다. 이러한 원인으로 감쇠

기의 응답은 Bingham유체의 특성을 나타낸 회전식 점도계로 측정된 결과와는 달리 뉴턴유체의 특성을 나타낸다. 따라서 본 이론해석에서는 타격시험 결과를 근거로 하여 ER유체를 이용한 SFD에 의해 부가된 감쇠를 점성감쇠로 간주하여 수치적 해석을 수행하였다.

3. 실험장치

실험장치의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 3개의 원판을 가진 회전체의 양단을 볼 베어링 및 SFD로 지지하고, 회전체의 한쪽 단은 flexible coupling으로 가변속 모터에 접

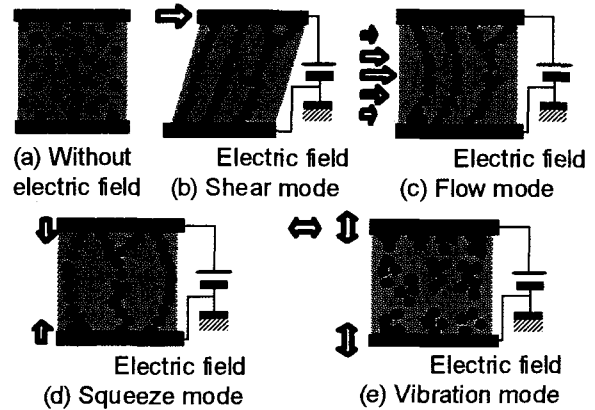


Fig. 1 Mechanism of ER effective of ER fluid

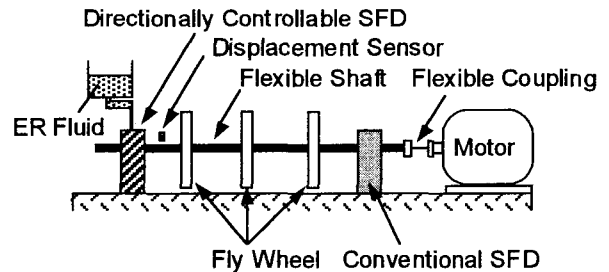


Fig. 2 Experimental apparatus of the flexible rotor with squeeze film damper

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

속되어져 있다. 각 부의 치수제원은 Table 1에 나타내었다. 모터축의 지지부에는 통상의 윤활유를 이용한 SFD를 설치하고, 그 반대축의 지지부에는 ER유체를 이용한 이방성을 가진 가제어형 SFD를 설치하였다. 이방성의 가제어형 SFD의 상세 구조의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 볼베어링 외륜의 주위에 센터링(centering) 스프링의 리테이너(retainer)를 설치하고, 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 같고 외측원통의 내경보다 극히 적은 치이의 내측 외경의 원통을 만들고, 그 외경과 내경의 틈새를 이용하여, 35 μm 의 동막(bronze film)을 수평과 수직방향으로 독립적으로 부착하였다.

실험은 가제어형 SFD내부의 온도를 40 $^{\circ}\text{C}$ 로 유지하였고, 부가한 DC전압을 변화시키면서 충격해머에 의한 타격시립과 가변모터에 의한 회전시험을 하였다. 회전체의 응답은 변위 센서를 이용하여 컴플라이언스(compliance)와 축심의 궤도(orbit)를 측정하였다.

4. 실험과 수치계산 결과 및 고찰

4.1 타격시험

회전체가 정지한 상태에서 전장의 강도를 변화시키면서 충격해머로 가제어형 SFD에 가까운 원판에 타격을 가하였을 때의 진동파형을 Fig. 4에 나타내었다. (a)는 수직방향, (b)는 수평방향의 응답파형에 해당된다. 전장의 강도가 낮을 때는 회전체의 진동은 강제운동을 하면서 지수 함수적으로 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 길어지고, 또한 진동 주기는 짧아짐을 알 수 있다.

이 현상은 ER유체의 겔보기 점도가 크게 증가함에 따라 등가 지지강성이 상승하여, 그 지지조건이 단순 지지조건 상태로 접근하기 때문에 지지부의 진동진폭은 작아지나, 회전체에 기여하는 감쇠력은 낮아지게 된다. 감쇠비가 최대로 되는 경우를 최적 감쇠조건으로 하면, 수직방향에 대한 전압은 약 1.3 kV/mm, 수평방향은 약 2.3 kV/mm일 때, 각 방향에 대한 최적 감쇠의 지지조건이 된다.

Fig. 5는 수치해석에 의한 감쇠 자유진동파형을 나타내고 있고, (a)는 수직방향, (b)는 수평방향의 응답파형에 해당된다. 수치해석에 필요한 감쇠계수 값은 실험의 응답으로부터 점성감쇠값을 동정하여 사용하였다. 감쇠값이 3.3

$\text{N} \cdot \text{s}/\text{mm}$ 와 2.7 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{mm}$ 에서 수직과 수평방향에 대한 최적 감쇠지지 조건이 된다. 이 수치적인 결과에서 수평방향의 최적 감쇠값이 수직방향의 값보다 낮으나, 실험의 결과에서 수평방향의 최적전장은 수직방향의 경우에 비해 높게 나타난 이유는 수평방향으로 전기점성 효과가 충분히 발휘되지 않았기 때문에 더 높은 전장을 부가해야 함을 알

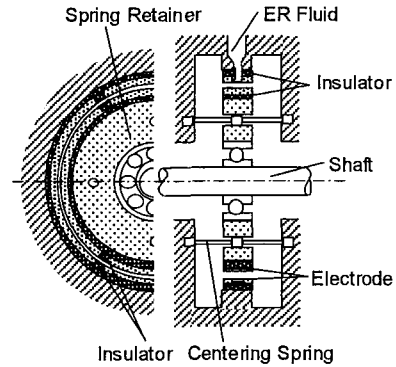
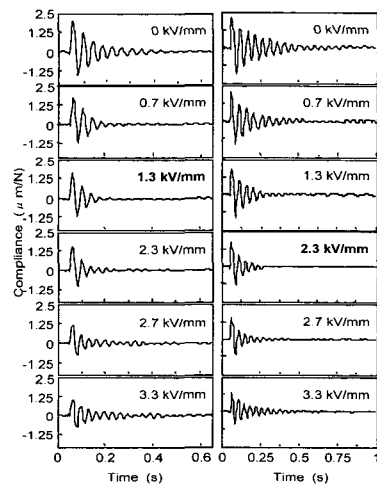
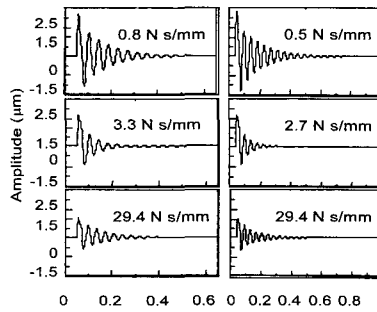


Fig. 3 Construction of directionally controllable SFD



(a) Vertical direction (b) Horizontal direction

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



(a) Vertical direction (b) Horizontal direction

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

수 있다. 이 수치적인 결과는 쿨롱마찰값을 이용하지 않고 점성감쇠 값을 이용하였으나, 감쇠 자유진동의 형태는 실험 결과와 유사함을 알 수 있다.

이들 실험에 의한 자유진동 파형을 주파수 영역에서 표현하면 Fig. 6과 같다. 전장을 부가하지 않았을 경우의 수직방향에 대한 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 수직과 수평방향의 1차 공진점에 대응하는 피크는 감소하기 시작하고, 수직방향에 대해서는 약 1.3 kV/mm, 수평방향에 대해서는 약 2.3 kV/mm에서 피크는 최소로 된다. 피크의 최소치를 통과한 부근에서부터 전장의 강도를 더욱 높이면 공진주파수는 상승하고, 그 피크는 점점 커진다. 즉, 감쇠효과는 작아짐을 알 수 있다.

Fig. 6으로부터 얻은 부가전압에 따른 1차 공진주파수와 감쇠비의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 수직방향은 약 2 kV/mm의 전장, 수평방향은 약 3 kV/mm 전장 이상에서는 공진 주파수의 변화가 나타나지 않았고, 감쇠비에 관해서는 공진주파수가 이동하기 직전에 최대치로 됨을 알 수 있다. 이와 같은 실험결과를 이론적으로 검토하기 위해 Fig. 2에 나타난 회전체를 유한요소법으로 모델링하여 복소 고유치해석을 수행하였고, 그 결과로서의 점성감쇠계수의 변화에 따른 1차 공진주파수와 감쇠비의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 수치적인 결과에서도 감쇠치의 상승과 함

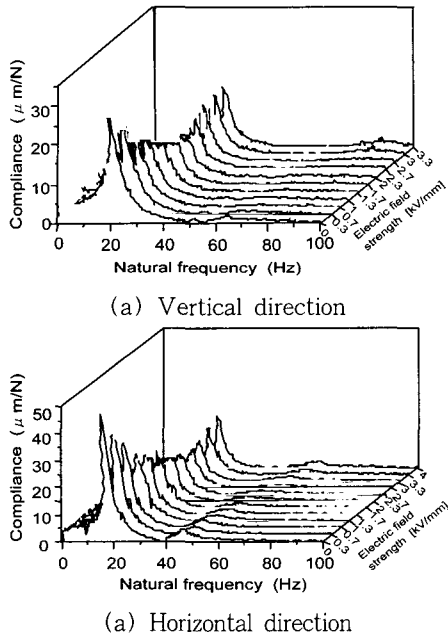


Fig. 6 Spectrum of impact response under various electric fields

께 공진 주파수가 증가함을 잘 나타내고 있고, 수평 및 수직방향에 대한 최대 감쇠비 값의 차이는 적지만 서로 다른 값을 가지고 있음을 알 수 있다.

이상의 결과와 같이 지지감쇠 값이 상승함에 따라 감쇠비가 낮아지고, 또한 공진주파수가 증가하며 단순 지지상태의 공진주파수로 수렴하는 현상은 Fig. 9와 10에서 관찰할 수 있다. 고유치해석을 통하여 수평방향의 지지감쇠 값의 변화에 대한 수평방향 진동모드의 변화를 구한 결과를 Fig. 9에 지지감쇠계수가 0.5 N·s/mm인 상태에서 가제어형 SFD가 설치된 지지부의 수평방향 지지강성 변화에 따른 수평방향 공진주파수의 변화를 Fig. 10에 나타내었다. 감쇠 값이 증가함에 따라 가제어형 SFD가 위치한 부분의 진폭이 작아지고, 감쇠 값이 29.4 N·s/mm에서는 감쇠효과가 없는 단순지지조건으로 접근하며 진동모드가 변화하는 것을 Fig. 9에서 알 수 있고, 또한 지지강성이 증가함에

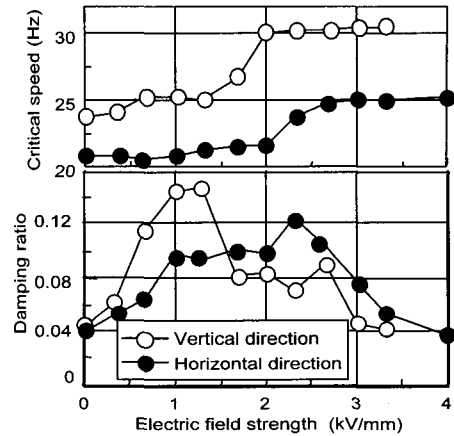


Fig. 7 Variation of resonant frequency and damping ratio

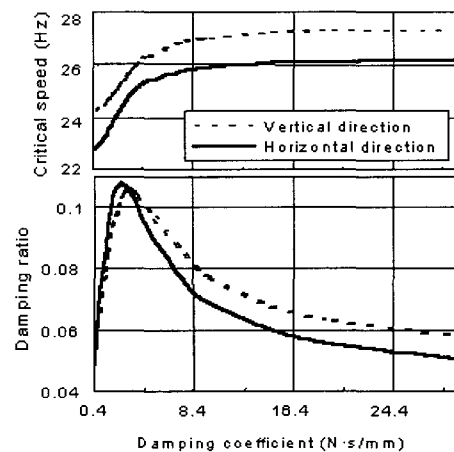


Fig. 8 Variation of resonant frequency and damping ratio by simulation

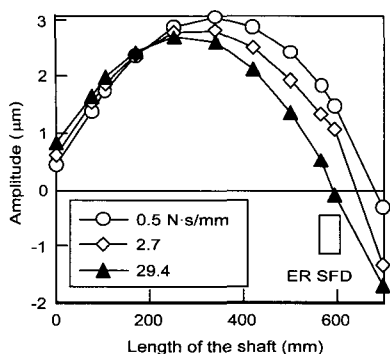


Fig. 9 Mode shapes of flexible rotor

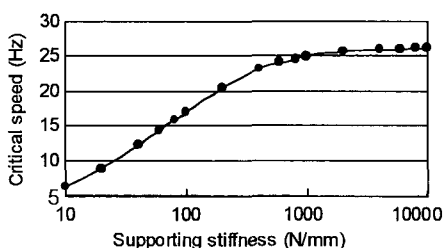


Fig. 10 Critical speed map

따라 유연지지에서 단순지지조건, 즉 단순지지의 진동모드로 변화하여 공진주파수가 상승하지만, 약 2 kN/mm 이상에서는 진동모드의 변화가 없으므로 공진 주파수의 변화가 없음을 Fig. 10에서 알 수 있다.

4.2 회전시험

회전체를 회전시켜서 부가하는 전장의 강도에 대한 축심 궤도의 변화를 Fig. 11에 나타내었다. (a)는 수직방향의 1차 위험속도부근, (b)는 수평방향의 1차 위험속도 부근의 궤적이다. 전장의 강도를 높이면 높일수록 각 전장방향의 축심궤도가 작아지는 사실을 알 수 있다. 이것은 전장의 강도를 어느 정도 높이면 감쇠력이 상승하여 그 진폭은 줄어들고, 더욱 강하게 전장을 가하면 등가 지지강성의 증가로 회전체의 지지조건이 단순지지상태로 변하여 휘둘림 모드가 변화하고 위험속도가 상승하여 피크가 작아지는 현상이다. 1차 모드에 대한 감쇠비는 Fig. 7에서 나타낸 것 같

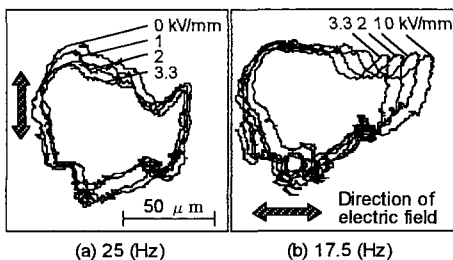


Fig. 11 Whirl orbits under various electric fields

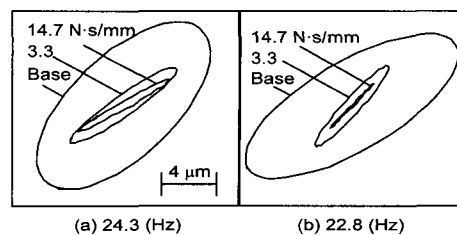
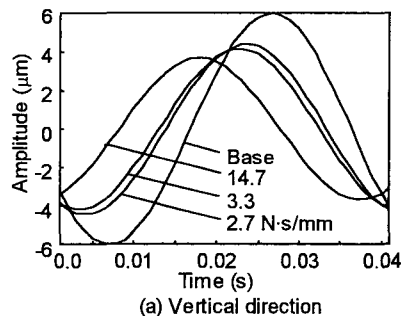
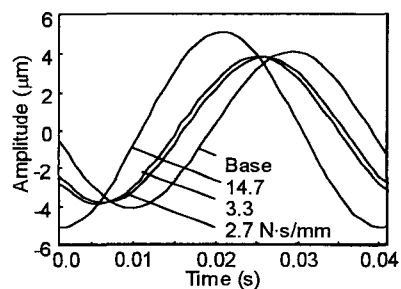


Fig. 12 Whirl orbits under various supporting damping coefficients by simulation



(a) Vertical direction



(b) Horizontal direction

Fig. 13 Vertical and horizontal amplitudes under various supporting damping coefficients by simulation

이 타격시험에서는 약 3배이상 변화하지만, 회전시험에서 그렇게 현저한 효과가 나타나지 않았다. 이것은 회전체가 회전할 때 축심이 정지상태에서 타격시험을 할 때와 그 위치가 변화하여 전극의 간격에 편심이 생겨서 충분한 전기점성 효과가 발휘되지 않았기 때문으로 추정된다.

회전체의 강제진동에 대한 수치해석은 Newmark β 법을 이용하였고, 그 결과는 Fig. 12와 13에 나타내고 있다. Fig. 12(a)는 수직방향의 지지감쇠 값의 변화에 따른 수직방향의 1차 위험속도에서의 궤도 변화, Fig. 12(b)는 수평방향의 지지감쇠 값의 변화에 따른 수평방향의 1차 위험속도 궤도변화이며, 이들 위험속도에서는 실험 결과에서와 같이 감쇠값이 크면 클수록 궤도는 작아진다. 그러나 Fig. 13과 같이 25.7 Hz로 가진 한 경우, 수직방향은 감쇠값이 증가할수록 진폭은 작아지지만, 수평방향은 수평방향의 감쇠값이 증가하여 최적 감쇠 값까지는 진폭이 감소하나,

그 이상의 감쇠 값으로 증가시키면 오히려 진폭이 증가함을 알 수 있다. 이들 그림에서 Base는 전장을 부가하지 않은 상태, 즉 수직방향에 대한 감쇠계수는 $0.8 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{mm}$, 수평방향은 $0.5 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{mm}$ 를 수치계산에 사용하였고, Fig. 13에서 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. 결 론

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

(1) ER유체를 SFD에 적용하고, 전극으로 이용되는 덮개의 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 억제할 수 있음을 보였다.

(3) ER유체를 이용한 SFD로 지지된 회전체의 응답특성을 수치적으로 계산을 할 때 지지부에 콜롱 감쇠가 아닌 점성감쇠가 작용하는 것으로 간주하여 얻은 결과는 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

(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) 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.

(3) 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.

(4) 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.

(5) 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.

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

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

(8) Carlson, J. D. and Spencer Jr., B. F., 1996, "Magneto-Rheological Fluid Dampers for Semi-Active Seismic Control," *Proceedings of the 3rd International Conference on Motion and Vibration Control*, pp. 35~40.

(9) 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.

(10) 홍성룡, 최승복, 정우진, 함일배, 김두기, 2000, "작동모드에 따른 ER마운트의 동특성 해석," *한국소음진동공학회*, 제 10 권, 제 5 호, pp. 819~829.

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

(12) Peel, D. J., Stanway, R. and Bullough, W. A., 1996, "Dynamic Modeling of an ER vibration Damper for Vehicle Suspension Applications," *Journal of Smart Materials and Structures*, Vol. 5, pp. 591~606.

(13) Dyke, S. J. Spencer Jr., B. F., Sain, M. K. and Carlson, J. D., 1996, "Modeling and Control of Magnetorheological Dampers for seismic Response Reduction," *Smart Materials and Structures*, Vol. 5, pp. 565~575.