

## 전자석을 이용한 가제어형 스퀴즈필름댐퍼

### Controllable Squeeze Film Damper Using an Electromagnet

안 영 공† · 하 중 룡\*\*\* · 양 보 석\*\* · 김 동 조\*

Young Kong Ahn, Jong-Yong Ha, Bo-Suk Yang and Dong-Jo Kim

(2003년 2월 25일 접수 : 2003년 5월 13일 심사완료)

**Key Words** : Squeeze Film Damper(스퀴즈필름댐퍼), Electromagnetic Damper(전자석댐퍼), Rotor Dynamics (회전체 역학)

#### ABSTRACT

The paper represents stability of a rotor system with the squeeze film damper (SFD) using an electromagnet. The electromagnet is installed in the inner damper of the SFD. The proposed SFD has basically the property of a conventional SFD and variable damping property according to variation of the applied electric current. Therefore, when the applied current is controlled, the whirling vibration of the rotor system can be effectively reduced in a wide operational speed range. In the present work, the performance of the SFD was experimentally investigated according to changing the magnetic field strength. As the applied current increased, damping ratios increased, while whirling amplitudes greatly reduced.

#### 1. 서 론

발전기, 압축기, 펌프 등의 육상용 대형 회전기계는 일반적으로 견고한 기초 지지대를 바탕으로 한 저널 베어링으로 지지 되어있다. 한편 항공기용 제트엔진이나 가스터빈 등의 유연한 기초 지지대를 갖는 회전체의 지지베어링으로는 볼베어링이 사용되는 경우가 많다. 볼베어링은 지지강성은 높지만, 감쇠작용은 거의 없으므로, 감쇠작용을 외부적으로 부가하여 회전체의 진동을 줄이기 위해 볼베어링의 외륜부에 스퀴즈필름댐퍼(squeeze film damper: SFD)를 설치한다.

SFD의 설계는 형상과 사용 윤활유의 점도를 알맞게 선택하여 주 운전주파수에서 회전체의 최적 지지조건이 되도록 한다. 이와 같은 수동형 SFD의 성능

을 향상시키기 위하여 종래의 윤활유 대신에 기능성 유체인 ER(electric-rheological) 및 MR(magneto-rheological) 유체를 이용한 SFD<sup>(1~6)</sup> 대한 연구들이 수행되었다. 이와 같은 기능성 유체를 이용한 SFD의 감쇠특성을 회전체의 휘둘림 주파수에 따라서 변화시킴으로써 보다 효과적으로 회전체의 진동을 줄일 수 있는 특징이 있다.

그러나, ER 유체는 불순물에 민감하며 또한 내구성의 문제가 완전히 해결되지 못한 상태에 있고, MR 유체는 기본점도가 종래의 유체에 비해서 높기 때문에 MR 유체를 이용한 SFD의 성능을 충분히 발휘할 수 있도록 하기 위해서는 SFD의 내륜과 외륜 사이의 간격을 종래의 간격에 비해서 아주 크게 해야 하는 단점이 있다. 또한 MR 유체의 밀봉에 따른 문제점 등이 있다. 따라서 MR 유체를 이용한 SFD의 설계과정이 종래의 SFD제작을 위한 설계과정에 비해 고려되어야 할 사항이 많이 있다. 더욱이 ER 유체나 MR 유체의 동특성에 대해서 아직까지 명확하게 설명하는 연구가 이루어져 있지 않다. 이와 같은 여러 가지 이유 때문에 산업현장에 실제로 적용된 예는 많지 않다.

† 책임저자, 정회원, 부경대학교 기계공학부

E-mail : ahn@mail1.pknu.ac.kr

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

\* 부경대학교 대학원

\*\* 정회원, 부경대학교 기계공학부

\*\*\* 부경대학교 대학원 기계공학부

따라서 본 연구에서는, 종래의 윤활유가 충전된 기존의 SFD에 단순한 전자석을 설치함으로써 ER 또는 MR 유체를 이용하는 SFD에 비해서 내구성, 부식, 산화문제 등이 발생하지 않는 반면에 가제어성 감쇠 특성을 갖는 새로운 SFD를 제안하고, 그 특성을 실험적으로 평가하였다.

기존의 SFD 내륜에 전자석 코일을 감아서, 전류를 부가하지 않을 경우는 종래의 SFD와 동일한 감쇠특성을 가지고, 부가하는 전류를 변화시킴에 따라서 SFD의 감쇠특성을 제어할 수 있도록 하였다. 전자석을 이용한 회전체의 진동제어에 관한 연구는 70년대 후반부터 활발하게 이루어져왔다.<sup>(7~12)</sup> 본 연구에서 제안하는 SFD의 작동 매커니즘은 참고문헌 (8)~(10)의 경우와 유사하지만, 탄성 회전체의 진동감쇠기로 가장 잘 알려진 SFD에 전자석을 적용하여 SFD의 평가를 수행한 연구는 지금까지 이루어지지 않았다.

본 SFD에 부가하는 전류를 변화시킴에 따라서 회전체의 휘둘림 진폭은 급격하게 감쇠하고, 또한 공진 주파수가 감소함을 실험적으로 확인하였고, 또한 단순한 제어이론을 도입하여 전류를 회전체의 회전주파수에 따라서 제어함으로써 보다 효과적으로 회전체의 진동을 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

## 2. 가제어형 스퀴즈필름댐퍼

Fig. 1은 전자석을 이용한 가제어형 SFD가 설치된 회전체의 실험장치를 나타내고 있다. 회전축의 중앙에 한 개의 원판이 부착되어 있고, 유연커플링에 의해 가변모터에 연결되어져 있다. 또한 회전축은 모터축의 Bushing 베어링과 반대편의 가제어형 SFD로

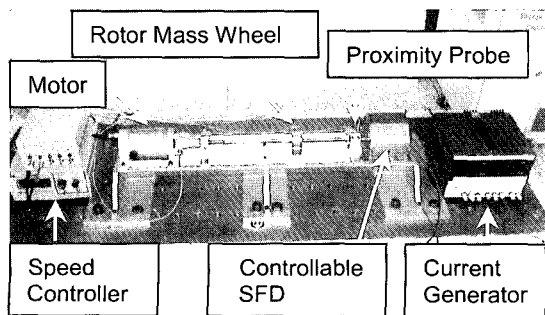


Fig. 1 Rotor test rig with a controllable SFD

지지되어 있고, 그 응답특성은 SFD와 인접한 부분에 설치된 변위계로 측정되었다.

Fig. 2에는 가제어형 SFD의 개략도를 나타내었다. 축(shaft) 외부에 설치된 볼 베어링은 4개의 센터링 스프링 즉, 탄성봉으로 지지되어 있고, 전자석 코일은 SFD의 내륜에 해당하는 센터링(centering) 스프링의 리테이너(retainer)에 삽입되어져 있다. 전자석 코일에 전류를 부가함에 따라서 자장은 댐퍼의 내륜과 외륜사이에 발생하며, 전류를 증가시킴에 따라서 SFD의 지지감쇠력은 증가하게 된다. 본 SFD에 사용된 윤활유는 ISO VG32로서 동점도는 40 °C에서 32 cSt 이다.

SFD내부에 기존의 윤활유가 사용되므로 기존의 SFD특성을 유지하게 되고, 또한 부가하는 전류에 의해서 SFD의 감쇠특성이 제어성을 갖게 된다. 만약, 전자석에 문제가 발생하여도 기본적으로 SFD 본래의 감쇠성능을 유지하기 때문에 성능에 대한 신뢰성이 높다.

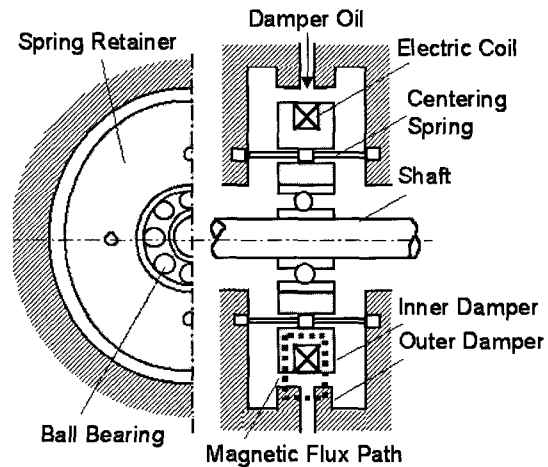


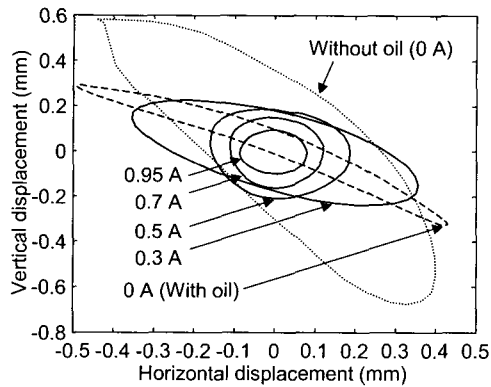
Fig. 2 Controllable SFD with electromagnet

Table 1 Principal dimensions of the SFD

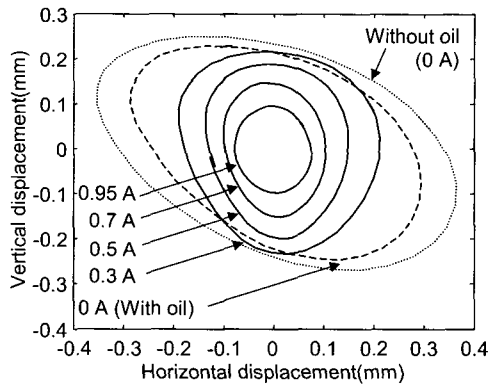
Inner damper diameter	73 mm
Electric coil turns	450
Electric coil resistance	23.4 Ω
Electric coil diameter	0.3 mm
Radial clearance	1.5 mm
Inner damper width	10 mm
Centering spring diameter	2 mm

### 3. 회전체의 불평형 응답

Fig. 3은 증축과 횡축의 1차 위험속도 1810 rpm과 1850 rpm에서 측정한 휘돌림 궤도의 변화를 나타내고 있다. SFD에 유체를 주입하면 그렇지 않은 경우에 비해서 스퀴즈 작용에 의한 감쇠력의 증가로 각 방향의 진동진폭이 감소함을 확인할 수 있다. 또한



(a) The first critical speed of vertical direction



(b) The first critical speed of horizontal direction

Fig. 3 Whirl orbits at first critical speed

Table 2 Amplitude reduction rate at the first critical speed of the vertical direction

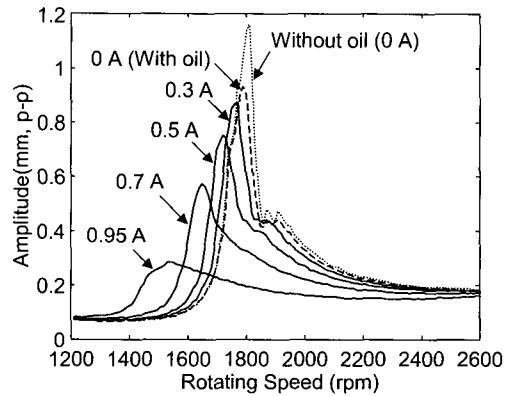
	Amplitude reduction rate (%)	
	Vertical direction	Horizontal direction
Without oil(0 A)	Baseline	Baseline
0 A(with oil)	- 51.1	+ 9.3
0.3 A(with oil)	- 63.2	- 15.8
0.5 A(with oil)	- 68.6	- 58.7
0.7 A(with oil)	- 75.2	- 72.6
0.95 A(with oil)	- 84.8	- 80.4

진류가 증가함에 따라서 진동모드의 변화와 함께 진동진폭이 크게 감소함을 알 수 있다. 진폭감소에 대한 비율을 Table 2와 3에 나타내었다. Table 2의 0 A에서 윤활유를 주입한 경우가 그렇지 않은 경우에 비해서 횡축방향의 진폭이 증가한 것은 외부적 노이즈에 의한 것으로 판단된다.

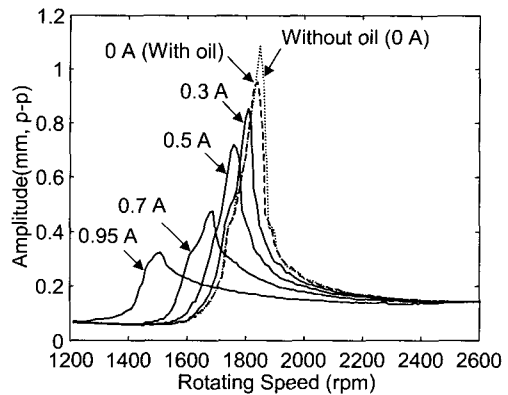
Fig. 4는 주파수응답특성을 나타내고 있다. 윤활유

Table 3 Amplitude reduction rate at the first critical speed of the horizontal direction

	Amplitude reduction rate (%)	
	Vertical direction	Horizontal direction
Without oil(0 A)	Baseline	Baseline
0 A(with oil)	- 8.3	- 19.1
0.3 A(with oil)	- 13.5	- 44.0
0.5 A(with oil)	- 25.4	- 60.2
0.7 A(with oil)	- 42.7	- 71.7
0.95 A(with oil)	- 62.6	- 78.7



(a) Vertical direction



(b) Horizontal direction

Fig. 4 Frequency responses

를 주입하지 않은 경우에 비해서 주입함에 따라서 진동진폭이 감소함을 알 수 있다. 또한 전류가 증가함에 따라서 위험속도에서의 진폭이 크게 줄고 있음을 알 수 있고, 진폭감소에 대한 비율을 Table 4에 나타내었다. 진폭감소 비율이 Fig. 3의 휘들립 궤도의 비율과 비교해서 차이가 있는 것은 가변모터를 이용하여 회전체의 회전수를 sweep시키면서 주파수응답을 얻을 경우에 하나의 진동 모드를 제대로 유지하지 못하였기 때문에 차이가 생긴 것으로 판단된다. 윤활유를 주입한 상태에서, 0 A에 비해서 0.95 A의 전류를 추가했을 경우 수직 및 수평방향의 위험속도는 약 14% 및 18% 감소하였다.

Fig. 4의 응답특성으로부터 회전체의 회전수가 변화하는 경우에 회전수 정보를 이용하여 ON-OFF제어를 수행함으로써 효과적으로 진동진폭을 줄일 수 있음을 알 수 있다.

전류가 증가함에 따라서 위험속도가 낮아지는데, 이는 ER 혹은 MR 유체를 이용한 SFD에 전장이나 자장을 증가시킴에 따라서 SFD의 감쇠 및 강성력의 증가로 인하여 위험속도가 증가하는 현상과는 상반되는 결과이다.<sup>(1-5)</sup> 본 전자석을 이용한 SFD는 전류를 추가함에 따라서 자장이 발생하여 SFD의 내륜과 외륜 사이에 흡입력이 작용한다. 이 흡입력(suction force)에 의해 지지강성이 낮아지기 때문에 위험속도가 낮아지는 것으로 판단된다. 한편, 전자석의 흡입력은 회전체의 불안정상태를 유발할 수 있으므로 회전체의 지지강성력 보다는 낮아야 한다.<sup>(13)</sup>

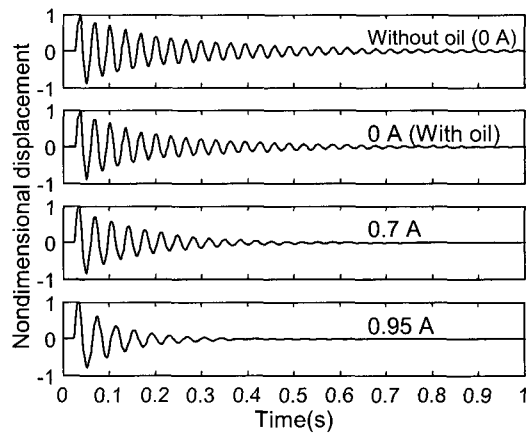
### 3. 회전체의 자유진동응답

회전체가 정지한 상태에서 부가하는 전류를 변화시

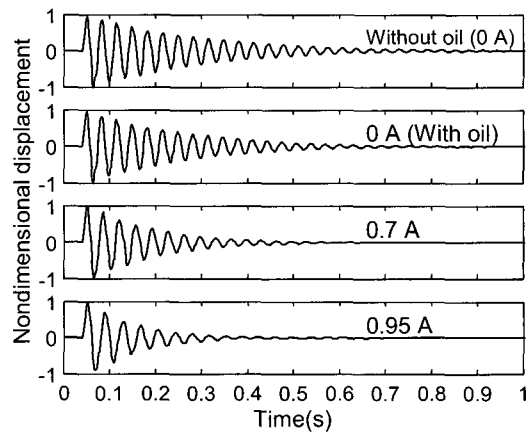
**Table 4** Amplitude reduction rate at the first critical speed of the vertical and horizontal directions

	Amplitude reduction rate (%)	
	Vertical direction	Horizontal direction
Without oil(0 A)	Baseline	Baseline
0 A(with oil)	- 19.8	- 12.4
0.3 A(with oil)	- 24.8	- 21.2
0.5 A(with oil)	- 35.1	- 33.5
0.7 A(with oil)	- 50.7	- 56.2
0.95 A(with oil)	- 75.5	- 70.3

키면서 충격hammer로 회전축의 중앙에 부착된 원판에 타격을 가하고 SFD부근에 설치된 변위계로부터 얻은 수직 및 수평방향의 자유진동파형을 Fig. 5에, 이 파형으로부터 얻은 감쇠비를 Table 5에 나타내었다. 종축은 각 파형에 대해서 초기의 최대 진동피크로 나눈 무차원 진폭이다. 진동모드는 각 방향의 1차 위험속도의 모드에 해당한다. 양방향 모두 윤활유를 주입한



(a) Vertical direction



(b) Horizontal direction

**Fig. 5** Time responses of free vibration

**Table 5** Damping ratios

	Damping ratio (%)	
	Vertical direction	Horizontal direction
Without oil(0 A)	2.37	2.12
0 A(with oil)	2.85	2.38
0.7 A(with oil)	4.15	4.17
0.95 A(with oil)	7.77	6.95

경우가 그렇지 않은 경우에 비해서, 또한 전류의 강도가 증가함에 따라서 진동수렴시간이 짧아지고 진동은 지수 함수적으로 수렴하는 것을 Fig. 5에서, 그리고 감쇠비가 증가하는 것을 Table 5로부터 확인할 수 있다.

## 5. 결 론

ER 또는 MR 유체를 이용한 SFD의 문제점을 해결하고 종래의 SFD 성능을 향상시키기 위한 하나의 방안으로서 전자석을 이용한 가제어형 SFD를 제안하였다. SFD의 내륜에 전자석 코일을 삽입하고, 부가하는 전류를 변화시킴에 따라 SFD 내부의 지지감쇠력의 변화를 실험적으로 확인하였고, 회전체의 운전 주파수에 따라서 부가전류를 제어함으로써 보다 효과적으로 회전체의 휘둘림 진폭을 줄일 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서 제안한 전자석을 이용한 SFD는 전자석이 정상적으로 작동하지 않아도 기존의 SFD의 성능을 발휘하므로 ER 혹은 MR 유체를 이용한 SFD보다 내구성이 우수하고, 또한 제작이 비교적 간편하기 때문에 산업계에 적용가능성이 높다고 판단된다.

## 후 기

SFD의 제작에 많은 도움을 주신 동양산업의 정성수 사장님께 감사사를 드린다.

## 참 고 문 헌

(1) 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.

(2) 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.

(3) 안영공, 양보석, Morishita, S., 2001, "ER 유체를 이용한 이방성 스퀴즈필름 댐퍼의 특성," 한국소

음진동공학회논문집, 제 11권, 제 2호, pp. 301~306.

(4) Ahn, Y. K., Morishita, S. and Yang, B. S., 1998, "Directionally Controllable Squeeze Film Damper Using Liquid Crystal," KSME International Journal, Vol. 12, No. 6, pp. 1097~1103.

(5) Zhu, C., Robb, D. A. and Ewins, D. J., 2002, "Dynamics of Over-hung Rotor with a Disc-Type Magneto-rheological Fluid Damper," IFToMM Sixth International Conference on Rotor Dynamics, pp. 607~614.

(6) Vance, J. M. and Ying, D., 2000, "Experimental Measurements of Actively Controlled Bearing Damping with an Electrorheological Fluid," Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 122, pp. 337~344.

(7) Vance, J. M., Ying, D. and Nikolajsen, J. L., 2000, "Actively Controlled Bearing Dampers for Aircraft Engine Applications," Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 122, pp. 466~472.

(8) Nikolajsen, J. L., Holmes, R. and Gondhalekar, V., 1979, "Investigation of an Electromagnetic Damper for Vibration Control of a Transmission Shaft," Proc. ImechE, Vol. 193, No. 31, pp. 331~336.

(9) Kasarada, M. E. F., Allaire, P. E., Humphris, R. R. and Barrett, L. E., 1990, "A Magnetic Damper for First-mode Vibration Reduction in Multimass Flexible Rotors," Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 112, pp. 463~469.

(10) Lee, C. H. and Kim, J. S., 1992, "Modal Testing and Suboptimal Vibration Control of Flexible Rotor Bearing System by Using a Magnetic Bearing," Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 114, pp. 244~252.

(11) Frederick, J. R. and Darlow, M. S., 1994, "Operation of an Electromagnetic Eddy-current Damper with a Supercritical Shaft," Transactions of the ASME, Journal of Vibration and Acoustics,

Vol. 116, pp. 578~580.

(12) Kligerman, Y. and Gottlieb, O., 1998, "Dynamics of a Rotating System with a Nonlinear Eddy-current Damper," Transactions of the ASME, Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 120, pp. 848~853.

(13) Murakami, C. and Satoh, I., 1999, "A Magnetic Damper Based on Magnetic See-saw Principles and Its Analysis Using Bessel Function," The Transactions of The Institute of Electrical Engineers of Japan, Vol. 119, No. 5, pp. 745~752.