

자성유체를 이용한 스퀴즈 필름 댐퍼의 동특성 동정 Identification of Dynamic property of Squeeze Film Damper Using Magnetic Fluid

안영공*·하종용**·김용한***·안경관****·양보석**·森下信*****

Young Kong Ahn, Jong-Yong Ha, Yong-Han Kim
Kyoung Kwan Ahn, Bo-Suk Yang and Shin Morishita

Key Words : Squeeze Film Damper, Electro Magnet, Magnetic Fluid, Optimization method

ABSTRACT

The paper presents the identification of dynamic property of a rotor system with a squeeze film damper (SFD) using magnetic fluid. An electromagnet is installed in the inner damper of the SFD. The magnetic fluid is well known as a functional fluid. Its rheological property can be changed by controlling the applied current to the fluid and the fluid can be used as lubricant. Basically, the proposed SFD has the characteristics of a conventional SFD without an applied current, while the damping and stiffness properties change according to the variation of the applied electric current. Therefore, when the applied current is changed, the whirling vibration of the rotor system can be effectively reduced. The clustering-based hybrid evolutionary algorithm (CHEA) is used to identify linear stiffness and damping coefficients of the SFD based on measured unbalance responses.

1. 서론

회전체의 진동을 보다 효과적으로 줄이기 위해 ER 유체(electro-rheological fluid)⁽¹⁾, MR 유체(magneto-rheological fluid)⁽²⁾, 액정(liquid crystal)⁽³⁾과 같은 기능성 유체 및 전자석을 이용한 SFD⁽⁴⁾에 관한 연구들이 수행 되어져 왔다. 한편, MR 유체와 유사하게 자장을 부가하면 유체의 점도특성이 변하는 자성유체(magnetic fluid)는 MR 유체에 비해서 자장을 부가하지 않았을 때 나타나는 기본점도가 낮기 때문에 비교적 작은 장치에 적용 범위가 넓고, 유체를 구성하는 입자의 크기가 MR 유체에 비해서 작기 때문에 윤활유로서 사용가능하며, 또한 침전이 없는 장점을 갖고 있다. 본 연구에서는 자성유체를 SFD에 적용하였고, 자성유체를 이용한 SFD는 효과적으로 회전체의 진동을 재진할 수 있음을 확인하였다. 또한, 최적화 알고리즘을 이용하여 SFD의 강성 및 감쇠계수를 동정하였으며 부가전류에 따른 특성을 검토하였다.

2. 자성유체를 이용한 SFD

Fig. 1은 자성유체를 이용한 SFD의 개략도를, Table 1은 SFD에 관련된 각 부의 치수제원을 나타내었다. 전류를 부가함에 따라서 자장은 댐퍼의 내륜과 외륜 사이에 형성되어 흡입력이 발생하고

동시에 SFD 내부의 자성유체 점도가 증가하여 전자력과 자성유체에 의한 감쇠력이 증가하게 된다. 사용된 자성유체는 일본의 Taiho Industries사의 PA-40로서 자장을 부가하지 않았을 경우의 점도는 25°C에서 203 mPa·s이다. 일반적으로 자성유체의 점도는 MR 유체보다는 낮기 때문에 작은 장치에 응용이 용이하고, 또한 MR 유체와 달리 침전이 생기지 않고, 구성하고 있는 입자가 작기 때문에 윤활유로서 사용 가능한 것이 장점이라 할 수 있다.

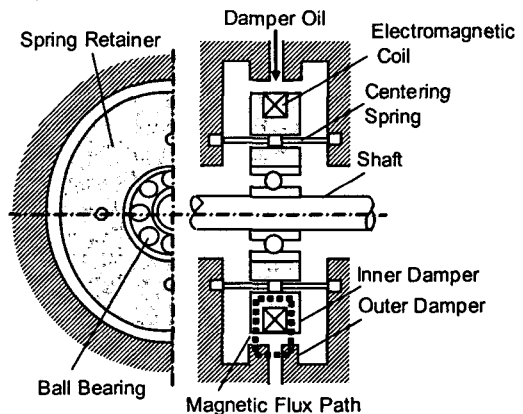


Fig. 1 Schematic view of SFD using magnetic fluid

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

* 울산대학교, 기계부품 및 소재특성 평가 연구센터

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

Tel : (052) 259-1501, Fax : (051) 259-1680

** 부경대학교, 기계공학부

*** 퀸슬랜드 공과대학, 공학시스템학과

**** 울산대학교, 기계자동차 공학부

***** 요코하마 국립대학, 생산공학과

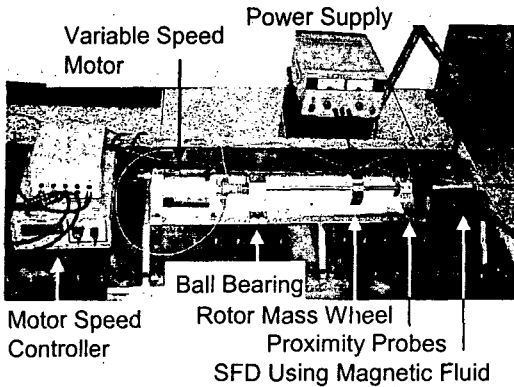


Fig. 2 Test rig with SFD using magnetic fluid

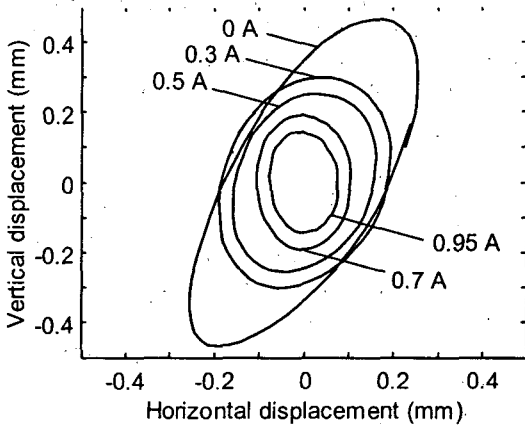


Fig. 3 Whirl orbits of the rotor system with SFD using magnetic fluid

자성유체를 이용한 SFD 실험장치를 Fig. 2 에 나타내었으며, Bently-Nevada 사의 RK4 장비에 자성유체를 이용한 SFD 를 장착하였다. 가변 모터측에는 볼 베어링 두 개를 인접하게 설치하여 커플링의 영향과 볼베어링의 미소 유격을 보정하고 각 변위를 구속하므로써 측정 응답에 대한 볼 베어링의 영향을 최소화하였다. 또한 볼 베어링의 강성은 SFD 의 강성에 비해 월등히 높기 때문에 측정된 응답은 SFD 의 동특성에 의해 지배적으로 영향받게 된다.

부가된 전류의 세기에 따른 위험속도 부근에서의 회전축의 휘돌림 궤적을 Fig. 3 에 나타내었다. 전류의 세기가 증가할수록 응답진폭은 현저히 감소함을 알 수 있으며, 자성유체를 이용함으로써 SFD 의 응답을 적절히 제어하는 것이 가능함을 확인하였다.

3. 자성유체를 이용한 SFD 의 파라미터 동정

베어링, 댐퍼 등의 지지요소는 일반적으로 전형

의 강성, 감쇠계수로 모델링하여 회전 축계의 동특성 및 응답특성을 해석한다. 본 자성유체를 적용한 SFD 의 경우, 자성유체에 의한 감쇠효과와 전자기력에 의한 강성 및 감쇠효과가 동시에 발생하므로 그 동특성을 이론적으로 유도하기가 용이하지 않으며, 아직 이에 대한 정확한 연구결과도 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 측정된 응답과 최적화 기법을 이용한 방법⁽⁵⁾을 SFD 의 동특성 동정에 적용하였다. 이 방법은 미지 파라미터를 변수로 하여 계산된 불평형응답과 측정된 응답의 회전수동기성분의 차이를 최소화시키는 최적화문제(Optimization problem)로 정식화하고 전역최적화 알고리즘을 이용하여 최적값의 미지 파라미터를 동정하는 것이다.

실험 장치의 회전 축계를 Fig. 4 와 같이 18 개의 유한요소로 모델링하고 볼 베어링은 강성계수만을, SFD 는 강성계수와 감쇠계수를 갖는 것으로 모델링하였다. 축계의 제원 및 주요 물성치는 Table 2 에 나타내었다. 회전체의 파라미터 동정은 아래의 목적함수 $f(x)$ 를 최소화 하는 과정을 통하여 수행하게 된다.

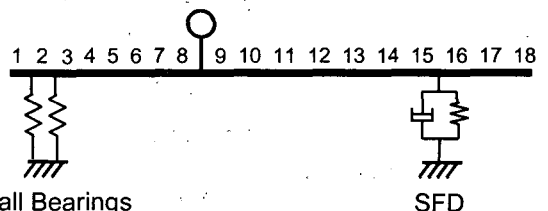
$$f(x) = \sum_{\Omega=1000}^{3500} (U_j^x(\Omega, \mathbf{x}) - U_j^a(\Omega, \mathbf{x}))^2 \quad (1)$$

$$\mathbf{x} = [K, C, u] \quad (1)$$

여기서 j 는 측정 노드(node)이며, U^x 와 U^a 는 각각 실험적으로 측정된 불평형 응답과 이론적으로 계산된 불평형 응답의 진폭, Ω 는 회전수, \mathbf{x} 는 동정하기 위한 SFD 의 등가 지지강성 K , 감쇠 C 및 불평형량 u 에 대한 벡터이다. 이들 변수의 경계조건식은 다음과 같이 실제의 값을 포함하도록 충분히 넓게 설정하였다.

$$\left. \begin{aligned} 10^3 &\leq K \leq 10^7 \text{ (N/m)} \\ 10^0 &\leq C \leq 10^3 \text{ (N}\cdot\text{s/m)} \\ 10^{-1} &\leq u \leq 10^2 \text{ (g}\cdot\text{mm)} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

최적화 알고리즘은 유전 알고리즘(Genetic Algorithm)의 개체 군집(cluster) 특성을 이용한 조합 알고리즘(Clustering-Based Hybrid Evolutionary Algorithm, CHEA)⁽⁵⁾을 사용하여 정확하면서도 짧은 시간에 최적해를 탐색하여 파라미터 동정을 수행하였다.



Ball Bearings

SFD

Fig. 4 Finite element modeling of the rotor system using SFD with magnetic fluid

Table 2 Configuration data of a flexible rotor system

Shaft	Length : 560mm Diameter : 10mm Young's modulus: 208 G N/m ² Density: 7801 kg/m ³ Poisson ratio: 0.3
Disk	Disk mass: 809 g Polar moment of inertia: 568 kg·mm ² Trans. moment of inertia: 327 kg·mm ²
Ball Bearing	Stiffness: 10 ⁹ N/m

1000rpm 에서 3500rpm 까지 50rpm 간격으로 데이터를 취득하여 구한 수평방향의 응답의 회전수 동기성분만을 추출하여 구해진 실험적 불평형응답을 Fig. 5 에 점선으로 나타내었으며, 최적화 기법에 의한 동정결과를 이용한 해석적 불평형응답을 실선으로 비교하여 나타내었다. 동정된 강성, 감쇠계수를 이용한 불평형 응답은 실험치를 잘 추정하고 있음을 알 수 있다.

부가전류가 증가함에 따라서 위험속도 피크는 현저하게 감소하며 위험속도가 조금씩 낮아지는 것을 Table 3 의 비교를 통해 파악할 수 있다. 부가전류의 크기에 따른 동정된 SFD 의 강성 및 감쇠계수를 Fig. 6 에 그래프화하였다. 부가 전류가 증가함에 따라서 강성계수는 점점 큰 폭으로 감소하고 감쇠계수 또한 증가하는 경향을 파악할 수 있다.

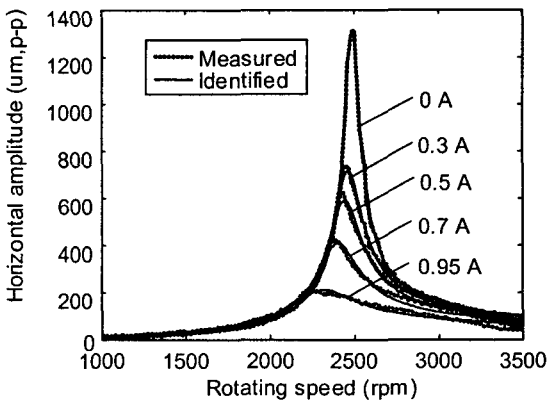
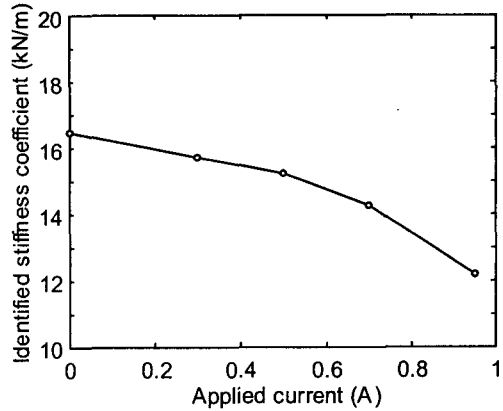


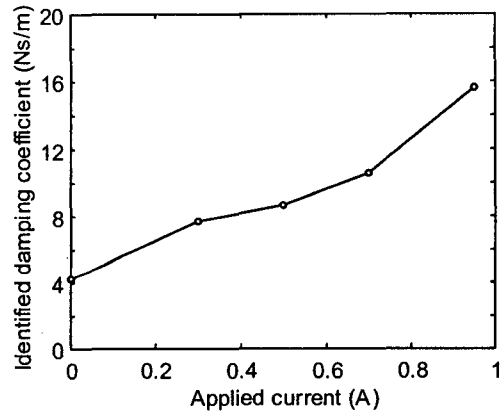
Fig. 5 Measured unbalance response and identified simulated unbalance response

Table 3 Resonance frequencies and their amplitudes of the rotor system with SFD using magnetic fluid

Current (A)	Resonance frequency (rpm)		Peak to peak amplitude (mm)	
		Reduction rate (%)		Reduction rate (%)
0	2490	Baseline	1.316	Baseline
0.3	2460	-1.20	0.738	-43.92
0.5	2430	-2.41	0.628	-52.28
0.7	2391	-3.98	0.422	-67.93
0.95	2230	-10.44	0.211	-83.97



(a) Identified Stiffness coefficient



(b) Identified Damping coefficient

Fig. 6 Identified parameters of SFD with magnetic fluid according to the applied currents

한편, 자성유체를 주입하지 않은 경우, 즉 전자기력만의 특성을 검토하기 위한 실험을 수행하였으며, 측정된 불평형응답을 Fig. 7 에 나타내었다. 전자기력만을 이용한 SFD 의 경우에도 부가전류가 증가함에 따라 지지강성은 감소하고 감쇠효과에 의해 위험속도 피크값도 감소함은 흥미로운 사실이다.

최적화 기법을 적용하여 구해진 강성, 감쇠계수를 이용하여 계산된 불평형응답과 측정값을 비교하여 Fig. 8 에 각 부가전류별로 나타내었다. 결과 그래프에서 보여지듯이, SFD 내부에 유체가 없는 경우에는 선형으로 가정한 강성 감쇠계수 동정값을 이용한 불평형응답은 측정값과 많은 차이를 보여준다. 이에 대한 원인으로서는 전자기력에 의한 강성과 감쇠효과는 SFD 에서의 축변위에 대해 비선형적인 특성을 보이기 때문으로 추정되며, 선형 모델로 고려함은 적절치 않음을 보여준다.

4. 결론

자성유체를 이용한 SFD 를 개발하고 그 감쇠효과를 확인하였으며, 그 동특성을 검토하기 위하여 최적화 기법에 의한 파라미터 동정을 수행하였다. 동정된 결과를 이용한 계산된 응답은 측정치와 잘 일치하였다. 자성유체를 이용한 SFD 에 부가되는 진류를 증가 시킴에 따라서 강성계수는 낮아지는 반면 감쇠계수는 증가하여 위험속도에서의 진폭을 현저히 감소시킴을 알 수 있었다. 한편 유체를 주입하지 않은 경우에는 응답에 비선형성이 나타남을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국과학 재단 지정 울산대학교 기계 부품 및 소재 특성 평가 연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) Ahn, Y. K., Morishita, S., Yang, B. S., 1988, "Directionally Controllable Squeeze Film Damper Using Liquid Crystal," KSME International Journal, Vol. 12, No. 6, pp. 1097-1103.
- (4) Ahn, Y. K., Ha, J. Y. and Yang, B. S., 2004, "A New Type Controllable Squeeze Film Damper Using an Electromagnet," Transactions of the ASME, Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 126, No. 3, pp. 380-383.
- (5) Kim, Y. H., 2004, "Parameter Identification of Rotor-Bearing System Using Hybrid Evolutionary Algorithms," Ph. D. Thesis, Pukyong National University.

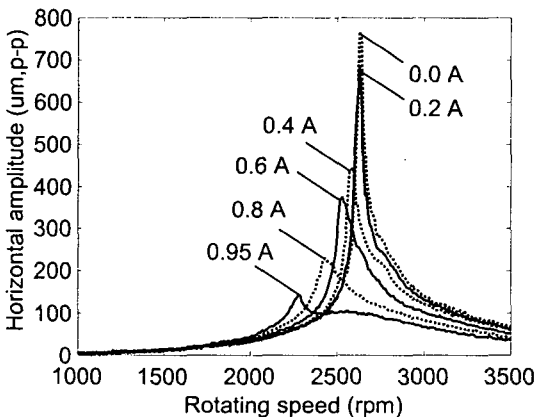
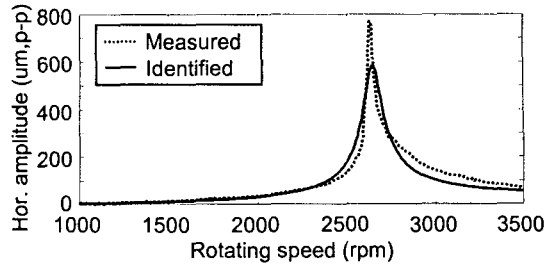
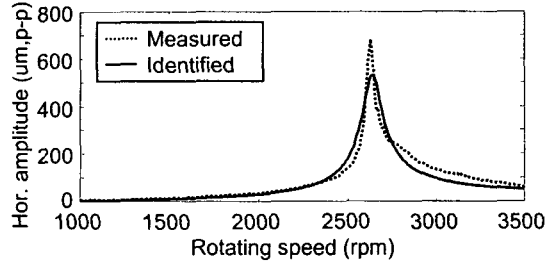


Fig. 7 Frequency response of the rotor system using SFD

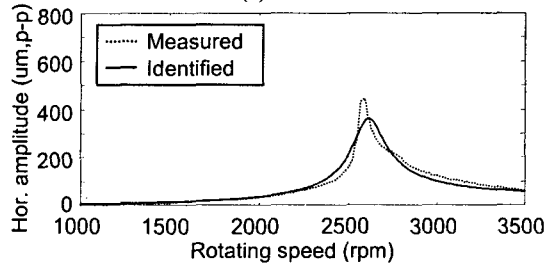
without magnetic fluid



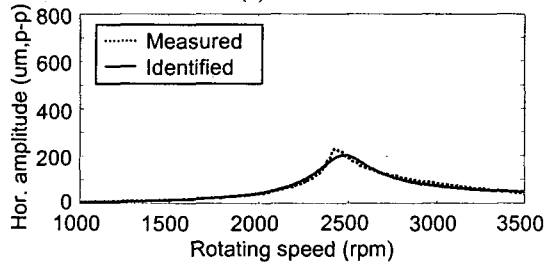
(a) 0 A



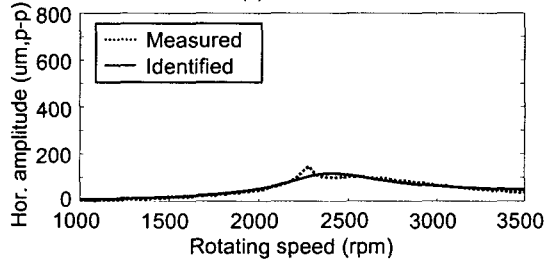
(a) 0.2 A



(a) 0.4 A



(a) 0.8 A



(a) 0.95 A

Fig. 8 Identification of frequency response for the system using SFD without magnetic fluid