

자성유체를 이용한 스퀴즈 필름 댐퍼의 동특성 분석

Investigation of Dynamic Property of Squeeze Film Damper Using Magnetic Fluid

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

Young Kong Ahn, Jong-Yong Ha, Yong-Han Kim

Bo-Suk Yang, Shin Morishita and Kyoung Kwan Ahn

(2005년 5월 11일 접수 ; 2005년 10월 10일 심사완료)

Key Words : Squeeze Film Damper(스퀴즈필름 댐퍼), Magnetic Fluid(자성유체), Parameter Identification(파라미터 동정), Optimization Method(최적화 방법)

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. 서 론

회전체의 진동을 보다 효과적으로 저감하기 위해 ER유체(electro-rheological fluid)⁽¹⁾, MR유체(magneto-rheological fluid)⁽²⁾, 액정(liquid crystal)⁽³⁾과 같은 기능성 유체 및 전자석을 이용한 스퀴즈 필름 댐퍼(SFD)⁽⁴⁾에 관한 연구들이 수행되어 왔다. 한편, MR유체와 유사하게 자장을 부가하면 유체의 점

도특성이 변하는 자성유체(magnetic fluid)는 MR유체에 비해서 자장을 부가하지 않았을 때 나타나는 기본 점도가 낮기 때문에 비교적 작은 장치에 적용이 용이하고 적용 범위가 넓고, 유체를 구성하는 입자의 크기가 MR유체에 비해 작기 때문에 윤활유로서 사용이 가능하며, 또한 침전이 없는 장점을 가지고 있다.⁽⁶⁾ 이 연구에서는 자성유체를 SFD에 적용하였고, 자성유체를 이용한 SFD가 효과적으로 회전체의 진동을 제진할 수 있음을 확인하였다. 또한, 최적화 알고리즘을 이용하여 SFD의 강성 및 감쇠계수를 동정하였으며 부가전류에 따른 특성을 검토하였다.

† 책임저자 : 정회원, 송도테크노파크 자동차 부품산업클러스터사업단
E-mail : ahn@maill.pknu.ac.kr

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

* 부경대학교 기계공학부

** Queensland University of Tech, 공학시스템학과

*** 정회원, 부경대학교 기계공학부

**** 요코하마국립대학 생산공학과

***** 울산대학교 기계자동차공학부

2. 자성유체를 이용한 SFD

Fig.1은 자성유체를 이용한 SFD의 개략도를, Table 1은 SFD에 관련된 각 부의 치수제원을 나타

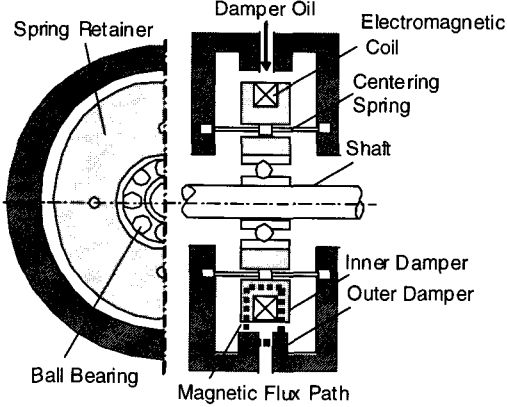


Fig. 1 Schematic view of SFD using magnetic fluid

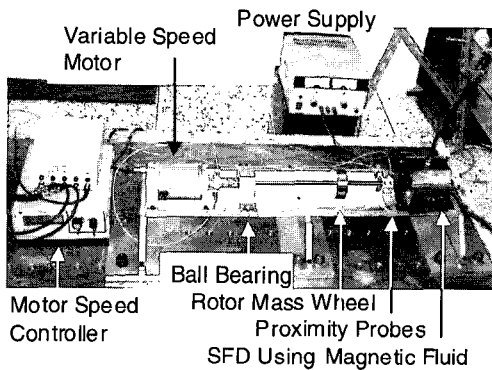


Fig. 2 Test rig with SFD using magnetic fluid

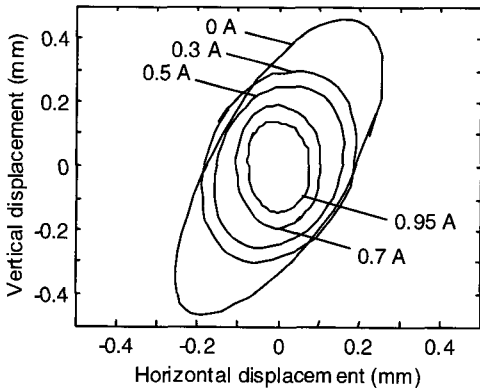


Fig. 3 Whirl orbits of the rotor system with SFD using magnetic fluid at 2570 rpm

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 |

내었다. 전류를 부가함에 따라서 자장은 댐퍼의 내륜과 외륜 사이에 형성되어 전자력에 의한 흡입력이 발생하고 동시에 SFD 내부의 자성유체 점도가 증가하여 전자력과 자성유체에 의한 감쇠력이 증가하게 된다. 사용된 자성유체는 일본 Taiho Industries사의 PA-40로서, 자장을 부가하지 않았을 경우의 점도는 25 °C에서 203 mPa·s이다. 자성유체를 이용한 SFD가 설치된 회전체의 실험장치를 Fig. 2에 나타내었으며, Bently-Nevada사의 RK4 장비에 자성유체를 이용한 SFD를 장착하였다.

가변 전동기 측에는 볼 베어링 2개를 인접하게 설치하여 커플링의 영향과 볼 베어링의 미소 유격을 보정하고 각 변위를 구속함으로써 측정 응답에 대한 볼 베어링의 영향을 최소화하였다. 또한 볼 베어링의 강성은 SFD의 강성에 비해 매우 높기 때문에 측정된 응답은 SFD의 동특성에 의해 지배적으로 영향을 받게 된다. 일반적인 SFD가 설치된 회전체와 같이 이 회전체가 유연회전체(flexible rotor system)이기 때문에 횡과 종방향의 지지조건이 비등방성으로 나타났지만 부가전류의 변화에 대한 응답특성은 유사하였기 때문에 한쪽 방향의 응답만을 고려하기로 하였다.

인가된 전류의 세기에 따른 위험속도 부근의 회전속도 2570 rpm에서 측정된 회전축의 휘돌림 궤적을 Fig. 3에 나타내었다. 전류의 세기가 증가할수록 응답 진폭은 현저히 감소함을 알 수 있으며, 자성유체를 이용함으로써 SFD의 응답을 적절히 제어하는 것이 가능함을 확인하였다.

3. 자성유체에 의한 SFD 파라미터 동정

베어링, 댐퍼 등의 지지 요소는 일반적으로 선형의 강성 및 감쇠 계수로 모델링하여 회전축계의 동특성 및 응답 특성을 해석한다. 이 자성유체를 적용한 SFD의 경우, 자성유체에 의한 감쇠효과와 전자력에 의한 강성 및 감쇠효과가 동시에 발생하므로, 그 동특성을 이론적으로 유도하기가 용이하지 않으며, 아직 이에 대한 정확한 연구 결과도 없는 실정이다. 따라서 이 연구에서는 측정된 응답과 최적화 기법을 이용한 방법⁽⁵⁾을 SFD의 동특성 동정에 적용하였다. 이 방법은 미지 파라미터를 변수로 하여 계산된 불평형 응답과 측정된 응답의 회전수 동기 성분의 차이를 최소화시키는 최적화 문제로 정식화하고, 전역 최적화 알고리즘을 이용하여 최적 값의 미지 파라미터를 동

정하는 것이다.

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

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

$$\mathbf{x} = (K, C, u)^T \quad (2)$$

여기서 j 는 측정 노드(node)이며, U^x 와 U^d 는 각각 실험적으로 측정된 불평형 응답과 이론적으로 계산된 불평형 응답의 진폭, Ω 는 회전수, \mathbf{x} 는 동정하기 위한 SFD의 등가 지지강성 K , 감쇠 C 및 불평형량 u 에 대한 설계 변수 벡터이다. 이들 변수의 실제의 값을 측정 및 추정하기가 곤란하였기 때문에 구속 조건인 경계 조건은 다음과 같이 실제의 값을 포함하도록 충분히 넓게 설정하였다.

Table 2 Configuration data of a flexible rotor system

| | |
|--------------|---|
| Shaft | Length : 560 mm Diameter : 10 mm Young's modulus : 208 GN/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: 109 N/m |

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 |

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

연구에 사용된 최적화 알고리즘은 유전 알고리즘 (genetic algorithm)과 ART-KNN 신경망의 개체 군집 특성(clustering)을 이용한 조합 알고리즘 (clustering-based hybrid evolutionary algorithm)⁽⁵⁾을 사용하여 정확하면서도 짧은 시간에 최적해를 탐색하여 파라미터 동정을 수행하였다. 회전속도 1000 rpm에서 3500 rpm까지 50 rpm 간격으로 데이터를 취득하여 구한 수평방향의 응답의 회전수 동기성분만을 실험적으로 추출한 불평형 응답을 Fig. 5에 점선으로 나타내었으며, 최적화 기법에 의한 동정 결과를 이용한 해석적 불평형 응답을 실선으로 비교하여 나타내었다. 동정된 강성, 감쇠계수를 이용한 불평형 응답은 실험치를 잘 추정하고 있음을 알 수 있다. 인가 전류가 증가함에 따라서 위험 속도에서의 피크는 현저하게 감소하며 위험속도가 조금씩 낮아지는 것을 Table 3의 비교를 통해 파악할 수 있다. 인가 전류의 크기에 따른 동정된 SFD의 강성 및 감쇠계수를 Fig. 6에 그래프화하였다. 인가 전류가 증가함에 따라서

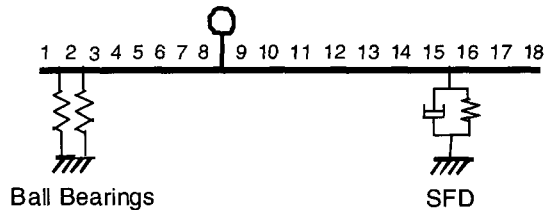


Fig. 4 Finite element modeling of the rotor system using SFD with magnetic fluid

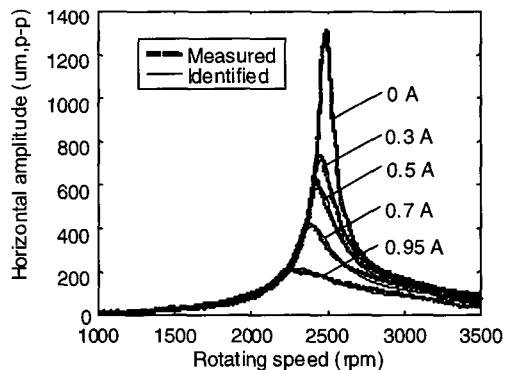
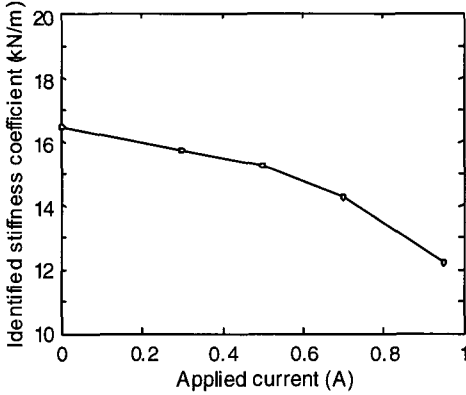


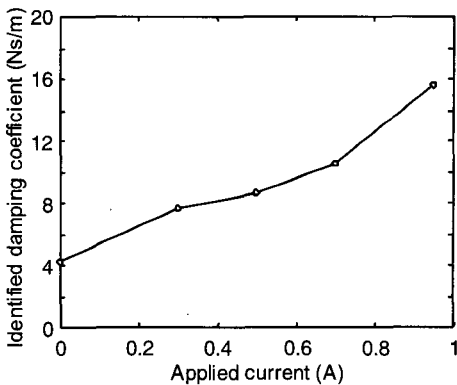
Fig. 5 Measured unbalance response and identified simulated unbalance response

강성계수는 점점 큰 폭으로 감소하고 감쇠계수 또한 증가하는 경향을 파악할 수 있다.

부가하는 전류에 따라서 강성계수가 변화하는 것은 자기력에 의한 음 강성효과에 의한 것으로 추정되고,



(a) Identified stiffness coefficient



(b) Identified damping coefficient

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

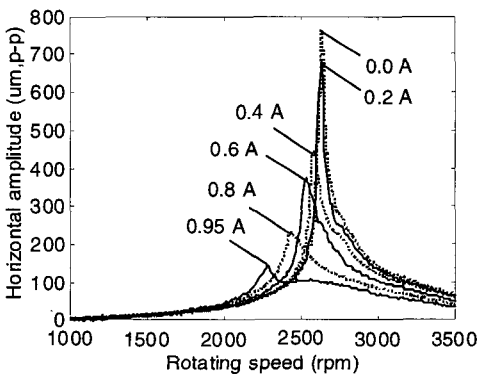


Fig. 7 Frequency response of the rotor system using SFD without magnetic fluid

감쇠계수가 변화하는 것은 와전류 감쇠기의 효과 및 자성유체의 점성변화에 의한 것으로 추정된다.

한편, 1차 위험속도에 대한 실험 결과인 Fig. 5와 Table 3으로만 판단하면 부가 전류가 증가할수록 공진피크는 감소하므로 최대전류를 부가 혹은 설계상에서 감쇠비를 최대로 하면 진동진폭을 최소화 할 수 있을 것으로 보여진다. 그러나, 일반적으로 SFD가 설치된 회전체의 경우 각 위험속도에 따라서 최적감쇠비가 존재⁽⁷⁾ 함으로 1차 이상의 공진피크를 최소화 하기 위해서는 최소의 전류를 부가해야 할 경우가 있을 수 있다.

한편, 자성유체를 주입하지 않은 경우, 즉 전자기력만의 특성을 검토하기 위한 실험을 수행하였으며, 측정된 불평형 응답을 Fig. 7에 나타내었다. 자성유체를 주입한 경우에 비해서 주입하지 않은 경우에 감쇠력이 낮아져 회전체의 진동진폭이 크게 증가하기 때문에 불평형량을 줄인 후에 그 응답을 측정하였다. 감쇠력이 낮기 때문에 Fig. 5와는 달리 비선형 특성이 나타났고, 또한 진동 주파수의 변화에 따라서 부가전류를 제어할 필요성이 있음을 알 수 있다. 하지만 전자기력만을 이용한 SFD의 경우에도 인가 전류가 증가함에 따라 지지 강성은 감소하고 감쇠효과에 의해 위험 속도에서의 피크 값도 감소함을 알 수 있다.

Fig. 8에는 최적화기법을 적용하여 얻은 강성 및 감쇠 계수를 이용하여 계산된 불평형 응답과 측정값을 인가전류에 따라서 나타내었다. 결과 그래프에서 보여지듯이, SFD 내부에 유체가 없는 경우에는 선형으로 가정한 강성 및 감쇠계수의 동정 값을 이용한 불평형 응답은 측정값과 많은 차이를 나타낸다. 이에 대한 원인으로는 낮은 지지감쇠력과 전자기력에 의한 강성과 감쇠효과는 SFD에서의 축 변위에 대해 비선형적인 특성을 보이기 때문으로 추정되며, 선형 모델로 고려함은 적절치 않음을 보여준다.

4. 결 론

자성유체를 이용한 SFD를 개발하고, SFD의 감쇠 효과를 실험적으로 확인하였다. SFD에 부가하는 전류의 세기에 따라서 나타나는 회전체의 불평형 응답 특성을 분석하기 위하여 최적화 기법에 의한 파라미터 동정을 수행하였다. 동정된 결과를 이용한 계산

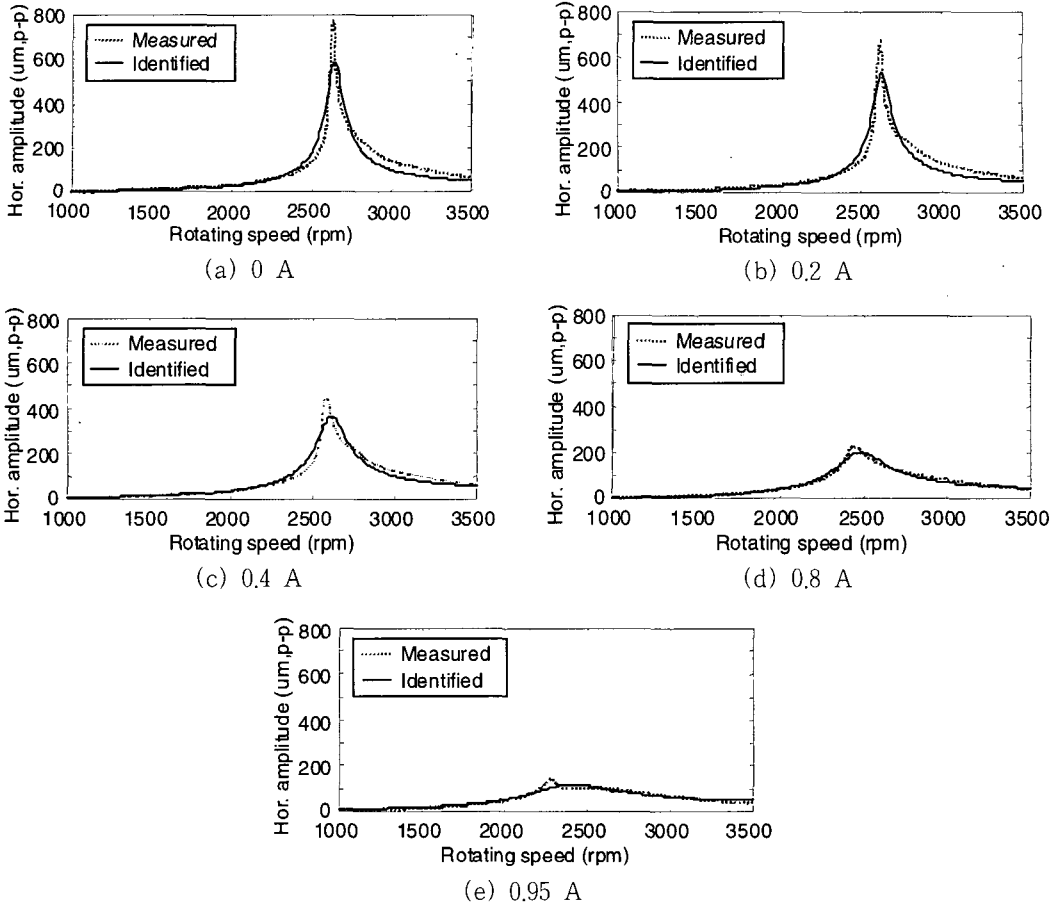


Fig. 8 Identification of frequency response for the system using SFD without magnetic fluid

된 주파수 응답은 측정치와 잘 일치하였다. 이를 바탕으로 자성유체를 이용한 SFD에 의해서 회전체의 감쇠 및 지지강성의 변화 원리는 다음과 같이 규명되었다. 자성유체를 이용한 SFD에 인가되는 전류를 증가시키에 따라서 음 감쇠효과에 의해 지지강성계수는 낮아지는 반면, 감쇠계수는 증가하여 위험속도에서의 진폭이 현저히 감소하였다. 한편, 유체를 주입하지 않은 경우에는 지지감쇠력이 낮기 때문에 부가 전류 변화에 따른 응답에 비선형성이 나타남을 확인하였다.

후 기

이 연구는 산업자원부에서 시행한 지역산업기술혁신사업으로 울산대학교 기계부품 및 소재특성 평가연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- (1) Morishita, S. and Mitsui, J., 1992, "Controllable Squeeze Film Damper (An Application of Electro-rheological Fluid)," *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 6th International Conference on Rotor Dynamics*, pp. 607~614.
- (3) Ahn, Y. K., Morishita, S. and Yang, B. S., 1988, "Directionally Controllable Squeeze Film Damper Using Liquid Crystal," *KSME International Journal*, Vol. 12, No. 6, pp. 1097~1103.
- (4) 안영공, 하중룡, 양보석, 김동조, 2003, "전자

석을 이용한 가제어형 스퀴즈 필름 댐퍼,” 한국소음진동공학회논문집, 제 13 권, 제 6 호, pp. 484~489.

(5) Kim, Y. H., 2004, “Parameter Identification of Rotor-Bearing System Using Hybrid Evolutionary Algorithms,” Ph. D. Thesis, Pukyong National University.

(6) Kameyama, S., 1989, “Introduction of Magnetic Fluid,” Sanngyutosyo Kabusikigaisya.

(7) 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.