

# 강성 회전축계를 지지한 ER-SFD의 parametric study 및 최적설계

김종립 · 이남수 · 이용복\* · 김창호\* · 최동훈\*\*

한양대학교 대학원 기계설계학과  
\*한국과학기술연구원 트라이볼로지 연구센터  
\*\*한양대학교 기계공학부

## A Parametric Study and an Optimal Design of an ER-SFD Supporting a Rigid Rotor System

Jong-Rip Kim, Nam-Soo Lee, Yong-Bok Lee\*,  
Chang-Ho Lee\*, and Dong-Hoon Choi\*\*

Graduate School, Hanyang University  
\*Tribology Research Center, KIST  
\*\* School of Mechanical Engineering, Hanyang University

**Abstract**— This paper presents a parametric study and an optimal design of the ER-SFD supporting a rigid rotor system. An attempt is made to obtain the optimal design of an ER-SFD for a two degree-of-freedom rotor model. Such a simple model is used in order to get a better insight into the physics of the problem. A maximum whirl amplitude, supply pressure and voltage are considered, and a maximum whirl amplitude is minimized over a range of speeds and presented for some values of unbalance mass. The results presented in this paper provide important design information necessary to reduce a whirl amplitude of an ER-SFD.

**Key words**—ER-SFD, Parametric Study, Optimal Design, Rigid Rotor System

### 1. 서론

고속 회전 기계인 항공기 엔진의 터빈이나 압축기에서는 진동을 절연하거나 감쇠를 주기 위해 회전 기기 요소 부품 중의 하나인 스퀴즈 필름 댐퍼(squeeze film damper, SFD)를 사용하며, 그 개략적인 구조도는 Fig. 1과 같다. SFD의 기본 구조는 베어링 외륜부는 리테이너 스프링(retainer spring) 또는 센터링 스프링(centering spring) 등으로 구속하여 회전되지 않도록 하며, 베어링 내륜만 회

전축과 같이 회전하도록 되어 있다. 따라서 SFD는 회전축과 베어링 내륜이 회전할 때 로터의 불균형력에 의한 원심력이 베어링의 외륜부인 SFD의 저어널 원주면을 감싸고 있는 윤활유를 주기적으로 압착하게 되고 이에 따라 유막 압력이 생성되어 감쇠력이 발생하며, 이러한 감쇠력이 축 진동을 감소시키며 하우징으로 전달되는 힘을 감소시킨다.

한편, 스마트 재료의 하나인 전기 유변성 유체(electrorheological fluid, ER fluid)는 절연 성질을 나타내는 유체내부에 외부 전기장

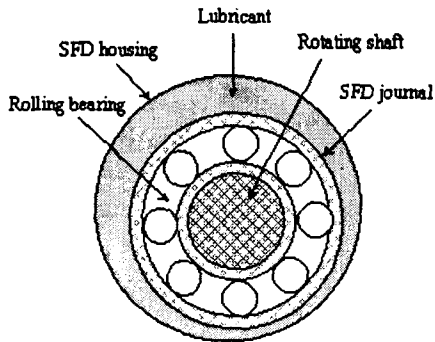


Fig. 1 Squeeze film damper configuration

에 대해 쉽게 분극이 유발되는 특징을 가진 미립자들을 분산시킨 현탁액을 지칭하는 것으로, 전기장 무부하 시에는 뉴우톤 유체의 거동을 하며 전기장 부하 시에는 초기 항복 전단력이 필요한 특성을 가지고 있다. 이러한 ER 유체를 이용한 전기 유변성 스퀴즈 필름 댐퍼에 관한 기초적인 연구가 기계의 지능화 연구의 하나로 활발히 진행되고 있으며[1-5], 아직도 많은 연구를 필요로 하고 있다.

따라서 본 연구에서는 ER-SFD의 최적설계를 위하여 ER-SFD설계를 위한 여러 설계인자들에 대한 parametric study를 통하여 ER-SFD의 감쇠성능에 주요한 인자들을 선정하였다. 이러한 연구를 수행하기 위하여 ER-SFD를 외팔보 형태의 강성 로터에 적용하였다. 그리고, 이렇게 선정된 설계변수들에 대하여 설계자가 요구하는 바람직한 영향을 최대화하거나 바람직하지 못한 영향을 최소화하는 최적설계를 수행하였다.

## 2. ER-SFD의 Parametric Study

### 2.1 ER-SFD의 해석

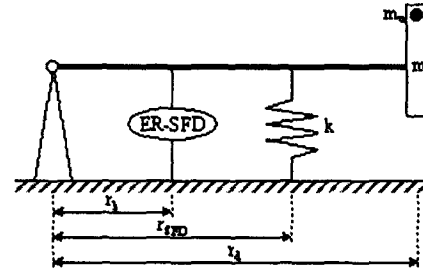


Fig. 2 A rigid rotor system supported by an ER-SFD

무한 소폭 전기 유변성 스퀴즈 필름 댐퍼에 대한 지배 방정식을 해석적으로 풀어 압력 함수를 구하였다. 이 압력 함수는 두 개의 적분 상수를 포함하고 있으며, 이 상수들은 두 개의 경계 조건에 따라, 즉 공급 압력과 시일의 유무에 따라서 달라진다. 이렇게 구한 압력 함수는 수치 적분을 이용하여 감쇠력을 구하였으며, 적분 과정에서 압력이 음수인 부분은 제외하였다[6].

강성 회전축계를 지지한 ER-SFD의 최적설계를 수행하기 위하여, Fig. 2에서와 같이 전기 유변성 스퀴즈 필름 댐퍼를 강성 로터에 적용하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 축의 한 쪽 끝은 피봇되어 있고, 다른 한 쪽 끝은 불균형 질량이 부착된 디스크가 있고, 피봇점과 디스크 사이에 스프링과 전기 유변성 스퀴즈 필름 댐퍼가 달려있는 것으로 모델링하였다.

### 2.1 Parametric Study

ER-SFD 설계를 위한 주요 설계인자들로 SFD 형상과 관련된 틈새(clearance)와 길이, end seal 형상과 관련된 틈새와 길이, centering spring, ER 유체의 capability( $\alpha$ ,  $\beta$ , viscosity) 및 공급압력과 ER 유체에 가

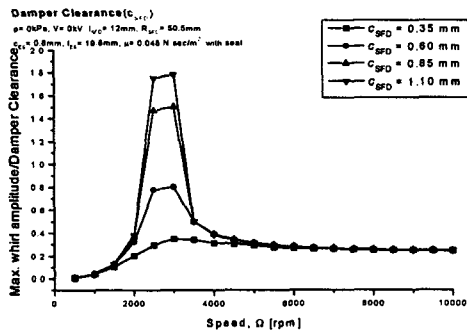
**Table 1 Parameters' range and default values**

Name	Parameter		Range			
	Symbol	Unit	Lower Value	Delta	Upper Value	Default Value
SFD Clearance	$C_{SFD}$	[mm]	0.35	0.25	1.1	1
SFD Length	$l_{SFD}$	[mm]	9.1	3	12.1	12
End Seal Clearance	$C_{ES}$	[mm]	0.1	0.25	1.1	0.6
End Seal Length	$l_{ES}$	[mm]	4.95	4.95	19.8	19.8
Viscosity	$\mu$	[N · sec/m <sup>2</sup> ]	0.03	0.03	0.15	0.048
Supply Pressure	$p$	[kPa]	0	125	250	0
Voltage	$V$	[kV]	0	0.375	1.5	0

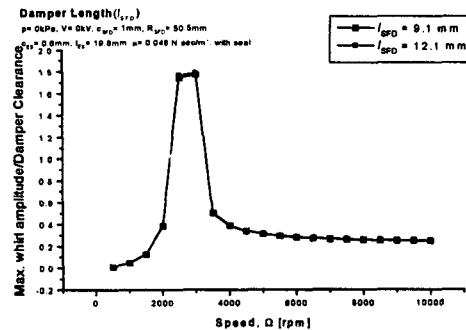
하는 전압등이 있다. 이렇게 선정된 여러 설계 관련 인자들 중에서 ER-SFD의 감쇠 성능과 관련되고 값의 변경이 가능한 SFD 틈새와 길이, end seal 틈새와 길이, ER 유체의 공급압력 및 전압을 각각 택하여, parametric study를 통하여 그들의 변화에 따른 최대 휠 진폭을 파악함으로써 각각의 설계인자들이 ER-SFD의 감쇠 성능에 미치는 효과를 파악할 수 있었다. Table 1에는 ER-SFD의 parametric study에 사용된 각각의 설계 고려 인자들에 대한 해석 범위와 고정 상수값 들을 나타내었다. 그리고, 각각의 해석 결과는 Fig. 3에서 Fig. 8에 나타내었다.

SFD 틈새의 변화에 따른 최대 휠 진폭의 변동을 Fig. 3에 나타내었으며, 틈새가 작을수록 감쇠효과가 커짐을 알 수 있다. SFD

길이의 변화에 따른 최대 휠 진폭의 변동을 Fig. 4에 나타내었으며, 그 길이가 길어질수록 더 나은 감쇠효과를 보였다. Fig. 5는 end seal 틈새의 변화에 따른 최대 휠 진폭의 변동을 보여주고 있으며, 작은 틈새에 대하여 나은 감쇠효과를 보인다. Fig. 6은 end seal의 길이의 변화에 따른 휠 진폭의 변동을 보여주며, 그 길이가 길어질수록 감쇠효과가 커지는 것을 알 수 있다. ER 유체의 공급압력에 따른 최대 휠 진폭의 변동은 Fig. 7에 나타내었는데, 공급압력이 증가함에 따라 최대 휠 진폭이 감소하는 추세를 보이며, 임계속도 또한 감소함을 알 수 있다. Fig. 8에는 ER 유체에 가하는 전압의 변화에 따른 최대 휠 진폭의 변동을 나타내었으며, 높은 전압을 가할수록 감쇠성능은 좋아



**Fig. 3 Variation of unbalance response of rotor with damper clearance**



**Fig. 4 Variation of unbalance response of rotor with damper length**

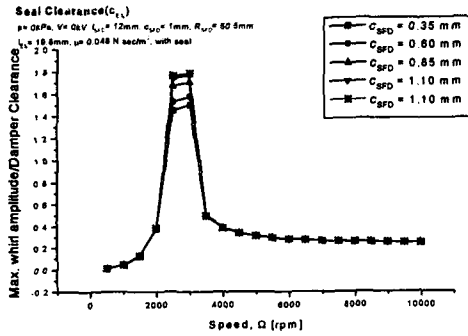


Fig. 5 Variation of unbalance response of rotor with seal clearance

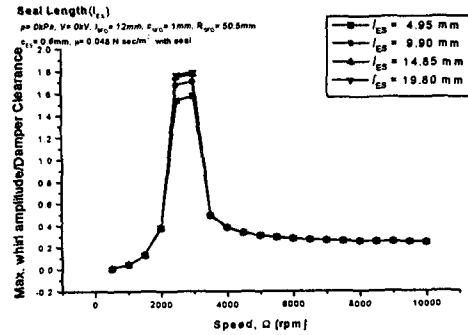


Fig. 6 Variation of unbalance response of rotor with seal length

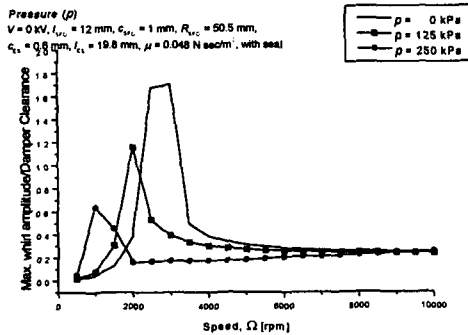


Fig. 7 Variation of unbalance response of rotor with supply pressure

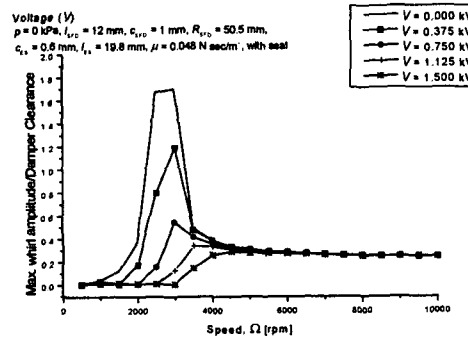


Fig. 8 Variation of unbalance response of rotor with voltage

지며, 높은 전압에서는 임계속도가 보이지 않음을 알 수 있다.

Fig. 3에서 Fig. 8을 통하여 SFD와 end seal의 틈새의 변화가 길이의 변화보다 감쇠 성능에 많은 영향을 나타내며, ER 유체의 공급압력 및 전압이 ER-SFD의 감쇠 성능에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다. ER 유체의 개발과 관련하여 점성은 고정된 것으로 봄이 타당하므로 ER-SFD의 설계 주요인자로서 SFD와 end seal의 틈새와 공급압력 및 전압을 선택할 수 있겠다.

### 3. 최적설계

이에 따라, SFD 틈새, end seal 틈새, 공급압력 및 전압을 설계변수로 하는 최적설계를 수행하였다. 이를 위하여 목적함수로써 최대 휠 진폭을 최소화하는 문제를 식 (1)과 같이 구속조건이 없는 최적화 문제로 구성하였으며, 공급압력과 전압을 최소화하는 문제를 식 (2)와 같이 하나의 구속조건을 가진 최적화 문제로 구성하였다.

( case I )

$$\text{Minimize : } F_1(\mathbf{X}) = a \Big|_{\Omega=3,000 \text{ rpm}} \quad (1)$$

**Table 2 Initial and optimal values of design variables**

Design Variable	Lower Bound	Initial Value	Optimal Value		Upper Bound
			CASE I	CASE II	
$c_{SFD}$	0.2	0.5	0.41	0.5	1.0
$c_{ES}$	0.2	0.5	0.24	0.5	1.0
$p$	0.0	0.5	0	0.0	1.0
$V$	0.2	0.5	0.2	0.2	1.0

**Table 3 Initial and optimal values of object function and relative change**

	Initial Value	Optimal Value	Relative Change
CASE I	0.055	0.013	-75.8 %
CASE II	1.0	0.2	- 80.0 %

( case II )

Minimize :  $F_2(\mathbf{X}) = w_1 \cdot p + w_2 \cdot V$   
 subject to : (2)

$$g_1(\mathbf{X}) = \frac{a | \omega = 3,000 \text{ rpm} }{a_{all}} - 1 \leq 0$$

where

$a$  = whirl amplitude / damper clearance

$a_{all} = 0.5$

$w_1, w_2$  = weighting factor(  $w_1 = w_2 = 1$  )

$$\mathbf{X} = \{ c_{SFD}, c_{ES}, p, V \}^T$$

최대 휠 진폭은 Fig. 3부터 Fig. 8에서 3,000 rpm에서 모든 그래프의 진폭이 최대에 이르는 것을 알 수 있으며 주어진 회전자-베어링 시스템의 임계속도가 2,500 rpm 부근임을 고려하여, 최적설계 시간의 단축을 위하여 3,000 rpm의 진폭으로 택하였으며, 허용 최대 진폭비로서는 3,000 rpm이후의 수평부분의 값으로 선정하였다. 설계변수들의 상·하한 값은 Table 1과 같으며, 최적설계를 위하여 모두 스케일을 하였다. Table 2에 스케일된 설계변수들의 상·하한 값, 초기값 및 최적값을 나타냈으며, 설계변수의 초기값으로는 모두 상한 값과 하한 값의 중간치를 사용하였다.

최적설계 알고리즘으로는 Augmented Lagrange Multiplier(ALM) Method를 사용

하였으며, 구속조건이 없는 최적화 문제를 위하여서는 Broydon-Fletcher-Goldfarb-Shanno(BFGS) Method를 사용하였다[7]. 이렇게 구한 최적해에 대한 목적함수값의 변화를 Table xx에 나타내었으며, case II의 경우 구속조건의 값은 초기치에 대하여 -0.89로서 feasible 영역에서 설계가 시작되었으며, 최적치에 대하여 -0.98로서 보다 안정한 영역으로 이동하였다. Table 2에서 알 수 있듯이 두 경우에 대하여 최적값에 대하여 75%이상의 향상을 보였다. Fig. 9에는 지금 사용되고 있는 모델에 대한 휠 진폭과 최적화 과정을 위한 임의의 초기치 및 각각의 최적값에 대한 휠 진폭을 도시하였다.

Fig. 9의 점선으로 표시한 휠 진폭에 대한 모델 데이터는 Table 1의 기본값들을 사용하였다. 지금의 사용모델에 비하여 임계속도 부근에서 많은 향상을 보임을 Fig. 9를 통하여 알 수 있다. 3,000 rpm 이상의 회전수에 대하여 최적값에서 상대적으로 높은 휠 진폭을 보임은 Fig. 8의 전압 변화 그래프에서 알 수 있듯이 최적값의 전압의 영향으로 판단된다.

#### 4. 결론

ER-SFD의 최적설계를 위하여 먼저 parametric study를 통하여 주요 설계변수를

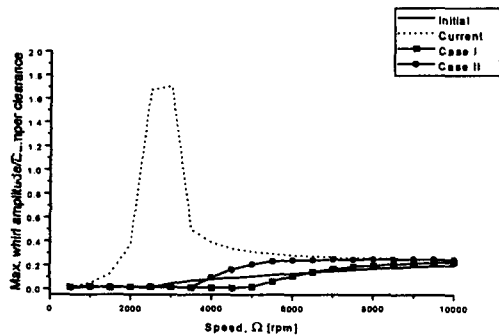


Fig. 9 Whirl amplitude of rotor for initial, current and optimal values

과약할 수 있었으며, 이를 통하여 선정된 설계변수들에 대하여 최대 휨 진폭을 최소화하거나, ER 유체에 가하는 압력과 전압을 최소화하는 최적화 문제를 수행함으로써 보다는 ER-SFD 설계기준을 제시하였다.

### 후 기

본 논문은 과학기술부가 지원하는 특정연구개발사업중 중점국가연구개발사업 (기계설비요소기술개발)으로 지원되어 수행하였습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. S. Wada and M. Tsukijihara, "Elasto-hydrodynamic Lubrication of Squeeze Films(Part 1. Two Cylinders Lubricated with Grease)", Bulletin of JSME, Vol. 21, No. 159, pp. 1408-1415, 1978
2. S. Wada and M. Tsukijihara, "Elasto-hydrodynamic Lubrication of Squeeze Films(Part 2. Bingham Solid)", Bulletin of JSME, Vol. 24, No. 192, pp. 1072-1077, 1978
3. J.A. Tichy, "Hydrodynamic Lubrication Theory for the Bingham Plastic Flow Model", J. of Rheology, Vol. 35, No. 4,

pp. 477-496, 1991

4. Jung, S.Y. and Choi, S.B., "Analysis of a Short Squeeze Film Damper Operating with Electrorheological Fluids", STLE Tribology Trans. Vol. 38, No. 4, pp. 857-862, 1995
5. Morishita, S. and Mitsui J., "Controllable Squeeze Film Damper", J. of Tribology, Trans. ASME, Vol. 114, pp. 354-357, 1992
6. C.H.Kim, N.S.Lee, Y.B.Lee, D.H.Choi, "Vibration Control of a Pressurized, Sealed, Electro-Rheological Fluid Squeeze-Film Damper Supported Rotor", Proceedings of the 7th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Vol. A, pp. 238-247, 1998
7. Vanderplaats, G.N., "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design", McGraw-Hill, 1984