

## 슬롯 링 형상을 갖는 전기 유변 스퀴즈 필름 댐퍼로 지지된 연성 로터의 동특성 및 최적설계 파라미터 실험 연구

이용복 · 김창호 · 이남수\* · 최동훈\* · 정시영\*\*

한국과학기술연구원 트라이볼로지 연구센터

\*한양대학교 기계설계학과

\*\*인하공업전문대학교 항공기계과

### Experimental Parametric Study on the Rotordynamic Characteristics and Optimal Design of a Flexible Rotor Supported by a Slotted-Ring Electro- Rheological Squeeze Film Damper

Yong-Bok Lee, Chang-Ho Kim, Nam-Soo Lee\*, Dong-Hoon Choi\* and Si-Young Jung\*\*

*Tribology Research Center, KIST*

*\*Department of Mechanical & Design Engineering, Hanyang University*

*\*\*Department of Aero-Mechanical Engineering, Inha Technical College*

**Abstract** – A discharge free Electro-Rheological Squeeze Film Damper (ER-SFD) with predetermined-clearances at leakage ends can inherently eliminate electric discharge problems while still supplying stable leakage control. Test results show that the damping force of the slotted-ring ER-SFD is mainly affected by electric voltage, oil supply pressure, position of the damper and ratio of effective surface area of slotted-rings. As the supply voltage is larger, the amplitudes of both slotted ER-SFD and rotor are decreased at first and second critical speeds. The influence of the oil supply pressure and the effective surface area ratio was shown mainly near the first critical speed. The effective surface area ratio of slotted-rings influences the reduction of flexible rotor vibration. As a result, experimental results confirm that the slotted-ring ER-SFD satisfactorily controls the flexible rotor vibration, while eliminates the inherent electric discharge problems in conventional ER-SFDs.

**Key words** – Slotted Electro-Rheological squeeze film damper, pressurized squeeze film damper, effective surface area ratio.

#### 1. 서 론

1960년대에 개발된 이후로 스퀴즈 필름 댐퍼는 회전기 요소 부품 중의 하나로 널리 사용되어져 왔으며 그 기본 구조는 구름 베어링에 감쇠를 갖도록 한 것으로 베어링 외륜부는 일반 미끄럼 베어링의 저널부와 동일한 역할을 수행하나, 리테이너 스프링(retainer spring) 또는 센터 링 스프링(center ring spring) 등으로 구속하여 회전되지 않도록 하여, 베어링 내륜만 회전축과 같이 회전하도록 되어 있다. 따라서 스

퀴즈 필름 댐퍼는 고속 터보 기계의 감쇠 기구로 로터의 불균형에 대한 응답(rotor unbalance response)과 전달력(transmitted force)을 줄여 주는 우수한 성능을 지니고 있다. 그러나 가스화로 인한 공동(gaseous cavitation) 문제, 난류 문제, 유체의 관성 영향[1-2]과 같은 복잡한 현상 및 동특성의 비선형성(nonlinearity)으로 인하여 스퀴즈 필름 막의 압력 생성에 대한 정확한 해석이 어려워 아직까지 정상상태의 스퀴즈 필름 댐퍼 성능을 예측할 수 있는 완전한 해석 방법이 개발되지 않았다[3]. 또한 최적화 설계를 통하여 스퀴즈

필름 댐퍼의 적절한 위치를 선정하여야만 하는데 이는 전체 회전기 시스템의 동특성 해석과 댐퍼와 베어링부의 전달력을 고려한 전문적 설계를 요하는 매우 어려운 기술이다[4].

한편 최근에 앞서 언급한 댐퍼의 적절한 감쇠력을 제어 할 수 있는 지능재료의 일종인 ER유체 (Electro-Rheological Fluid)가 여러가지 기계요소의 성능향상과 진동제어에 응용되면서 그 실용성을 인정받기 시작하였다[5-7]. ER유체는 전기장 무부하시에는 뉴우튼 유체의 거동 특성을 갖으나 전기장 부하시에는 Bingham 유체의 거동특성을 갖는다. 이때 Bingham 유체의 특성인 항복전단응력이 전기장의 크기에 따라 가역적으로 변화하며, 전기장 변화에 대한 응답성도 매우 양호하다. 이러한 장점으로 인하여 회전체 및 윤활공학 분야에서도 ER유체의 응용연구가 최근에 시작되었으며 특히 고속회전체의 축진동 감쇠장치인 스퀴즈 필름 댐퍼(SFD: squeeze film damper)[8-10]와 유막 베어링[11-13]에 ER유체를 적용하는 이론적 및 실험적 연구가 수행된 바 있다. 그 중에서도 전기유변 SFD의 경우는 ER유체의 항복 전단응력을 증가시키기 위해 두께가 변화하는 베어링 틈새, 즉 유막간극을 전기장 간극으로 활용하고 있는 구조로 이루어져 있다. 이런 구조의 경우는 전기장 간극의 크기가 변화한다. 특히 SFD 저어널의 편심율이 클때는 최소 간극에서 방전으로 인한 단락현상이 쉽게 발생하여 SFD의 기능이 일시에 상실되고 고속 회전기계에 치명적 손상을 발생시킬 수 있는 위험성이 존재한다. 그러므로 현재까지 연구된 바 있는 이러한 형태의 전기유변 SFD는 항시 방전의 위험성이 존재하기 때문에 고속 회전기계에 직접 활용하기에는 매우 어렵다.

따라서 본 논문에서는 상기와 같은 전기적 방전 (electric discharge)으로 인한 단락현상을 방지할 수 있고, 또한 ER유체의 장점을 최대한으로 활용할 수 있는 새로운 형태의 Slotted 전기유변 SFD로 지지된 연성 로터의 동특성을 전기유변 SFD의 위치에 따른 효과와 더불어 댐퍼에 공급되는 전기 유변 유체의 외부 가압의 정도, 공급되는 전압의 세기 그리고 피스톤-링 슬롯의 유효 단면적에 따른 효과를 실험적으로 고찰함으로써 Slotted 전기유변 SFD의 설계 변수들이 고속 회전기계의 축 진동현상에 미치는 영향을 분석하고 감쇠성능을 평가하는데 본 연구의 목적이 있다.

## 2. 슬롯 링 전기 유변성 스퀴즈 필름 댐퍼 실험 장치

### 2-1. 슬롯 링 스퀴즈 필름 댐퍼의 구조

Kim[14,15]등은 전기 유변성 스퀴즈 필름 댐퍼로 지지된 강성 로터 시스템에 대하여 실험을 수행한 바 있는데 이때의 구조는 댐퍼 저어널 부위 전체가 전극으로 로터의 회전에 따른 과도한 불평형력이나 또한 저어널과 베어링의 접촉이나 구조적인 편심에 따른 전기 유변성 유체 입자 사이의 방전이 문제 시되어 실제 시스템에 적용하기에는 많은 문제점을 지니고 있었다. 이러한 전기적 방전 문제를 해결한 슬롯 링 전기 유변성 스퀴즈 필름 댐퍼의 기존 구조는 Fig. 1과 같다. 저어널의 직경은 100 mm이고, 랜드부의 반경 틈새는 1 mm이고, 축의 직경은 10 mm이다. 저어널 양단에 슬롯 링을 장착하여 베어링 부위에 만들어진 슬롯과의 비 접촉에 의한 운동의 간섭을 최소화하도록 한다. 또한 슬롯의 모양은 유체가 링의 틈새를 통과하도록 반경 틈새를 1 mm로 유지하였다. 슬롯 피스톤 링은 절연체로 가공하였고 안쪽 링과 바깥쪽 링과의 절연을 위하여 90도 간격으로 절연 지지부를 설치하였으며 링의 내부에는 전극(electrode)을 설치하여 유체에 전압을 주도록 하였다. 이러한 구조는 이전의 ER-SFD에서 발생하는 방전현상을 근본적으로 해결 할 수 있는 설계로 이루어져 있다. 전극은 도전성이 좋은 동판을 사용하였으며, 전극의 유효 단면적에 따른 스퀴즈 필름 댐퍼의 전기 유변성 효과를 연구하고자 하였다.

### 2-2. 슬롯 링 전기 유변 스퀴즈 필름 댐퍼 시스템

슬롯 링 전기 유변성 스퀴즈 필름 댐퍼의 실험을 위하여 외팔 지지 연성 로터를 설계 제작하여 실험 장치를 구성하였으며 그 장치는 Fig. 2, Fig. 3에 나타내었다. 전기 유변성 스퀴즈 필름 댐퍼가 장착된

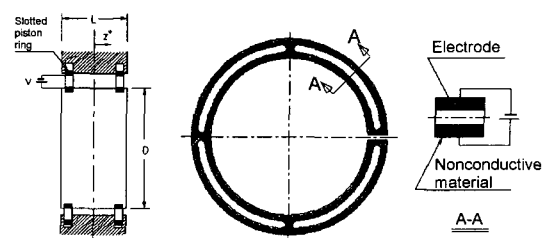


Fig. 1. Coordinate system of a slotted-ring ER-SFD.

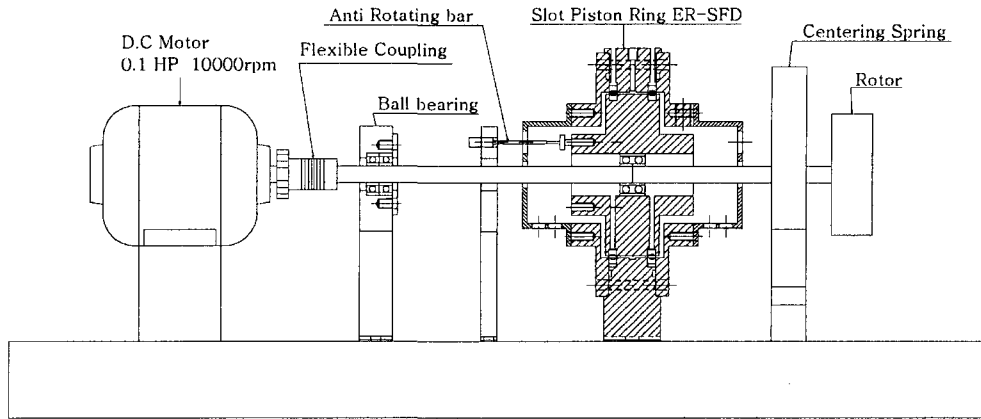


Fig. 2. Flexible rotor system supported by slotted-ring ER-SFD.

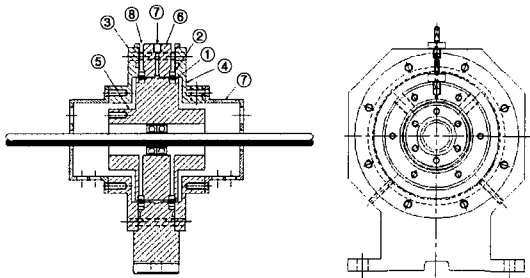


Fig. 3. Discharge free slotted ring ER-SFD.

회전축은 직류모터에 의해 10,000 RPM까지 구동이 가능하며 회전축은 고무 재질의 연성 커플링(flexible coupling)을 통해 소형 직류모터와 연결되며, 구동 모터는 0.1마력으로 속도 변화율은 모터 구동에 의해 조절이 가능하다. 회전축의 좌측은 자동 조심형 베어링(self-aligning bearing)으로 지지되며 불균형력에 대하여 이 베어링을 피벗점이 되도록 설계되어 있다.

회전축의 우측은 전기 유변성 스퀴즈 필름 댐퍼에 의해 지지되도록 설계하였으며, 회전축의 재질은 고강도 탄소강인 SM45C로 칩단 열처리를 하여 강성(stiffness)을 높이고, 원통연마가공을 통하여 정밀도를 향상시켰다. 저어널의 중심부에는 볼 베어링을 삽입하여 로터가 설치되어있는 회전축과 연결되도록 하였으며, 저어널의 외륜부와 변위센서에 의해 감지되는 부위는 원통연마가공을 통하여 정밀도를 향상시켰다. 또한 SFD의 저어널 부는 원주상 120도 간격으로 연성바(flexible bar)에 의해 지지 되도록 설계하였으며, 이 연성바는 지지대에 고정되어 스퀴즈 필

름 댐퍼의 회전을 방지하고, 휘들림(whirling) 운동만 가능하도록 하였다. 전기 유변성 스퀴즈 필름 댐퍼 저어널부는 하우징 내에 설치되며, 이 하우징은 크롬 경질도금 후 밀면 평면 연마작업으로 평탄도를 허용 공차 이내로 유지하여 받침대(Base plate)에 단단히 고정된다. 스퀴즈 필름 댐퍼 하우징의 상부에 위치한 연결부를 통하여 공급유체는 전기 유변성 스퀴즈 필름 댐퍼 내 하우징의 원주면에 만든 홈을 따라 축 방향 스퀴즈 필름 내로 공급되며, 슬롯 틈새를 지나 전기 유변성 스퀴즈 필름 댐퍼 양쪽 측면에 결합시킨 덮개의 하부에 위치한 배출구를 통하여 오일탱크로 귀환된다.

불균형력을 발생시키기 위하여 회전축의 오른쪽 끝에 불균형 질량을 추가시킬 수 있는 로터를 설치하였다.

### 2-3. 측정 및 데이터 수집

전기 유변성 스퀴즈 필름 댐퍼 저어널의 궤적을 측정하기 위해 ER SFD의 하우징에 90도 간격으로 2조의 변위센서를 설치하였으며, 로터부에도 90도 간격으로 설치하였다. 또한 전기 유변성 스퀴즈 필름 댐퍼에 공급되는 전기 유변성 유체의 압력을 측정하기 위해 전기 유변성 스퀴즈 필름 댐퍼 상단에 스트레인 게이지 타입의 압력센서를 설치하였으며, 공급 유체의 온도를 측정하기위해 열전대(thermocouple)을 설치하였다. 또한 축의 회전속도의 측정은 모터의 축에 변위 센서를 설치하여 이를 FV 변환기를 통하여 정확한 회전 속도 측정하였다. 이상으로 열거한 각종의 센서로부터 측정되는 신호는 100 kHz의 샘플처

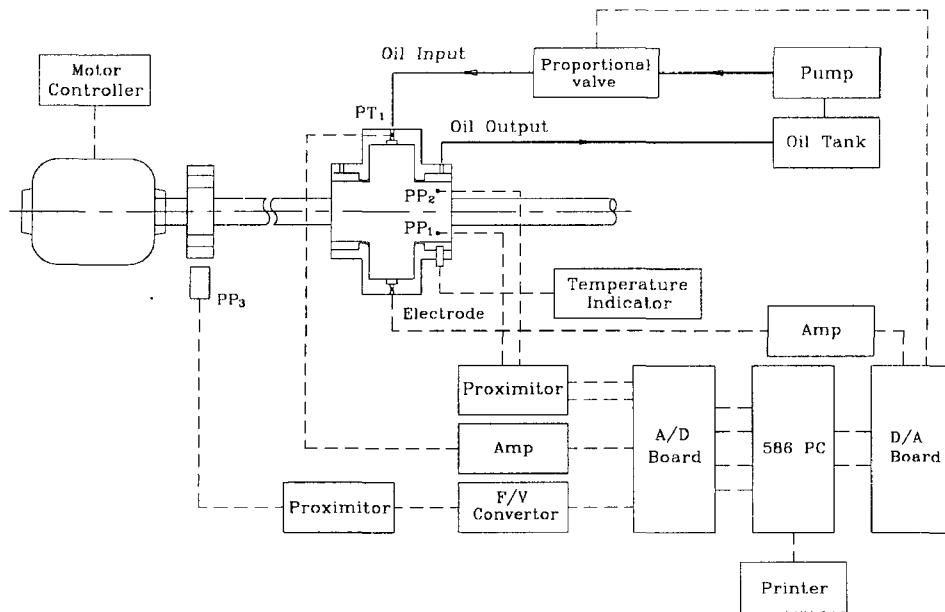


Fig. 4. Schematic diagram for slotted-ring ER-SFD data acquisition system.

리속도를 갖는 A/D변환기를 통하여 컴퓨터로 입력되며, 측정 및 데이터가 처리되는 전반적인 흐름도를 Fig. 4에 나타내었다.

전기 유변성 유체에 가하기 위하여 개발된 고전압 발생 장치는 ER 유체를 사용하는 기기를 제어하기 위한 제어 신호를 빠르게 고전압으로 증폭하여 ER 용 장치에 공급하는 장치이다. 본 고전압 증폭기는 24 Volt의 전원하에서 0~5 Volt의 제어 입력을 받아 이를 1,000배 증폭하여, 이 제어 입력에 비례하는 0~5,000 Volt의 출력을 발생시킨다. 이때 반응속도는 1 KHz 이상이 되며, 최대 전류 5 mA, 출력은 24 Watt가 된다. 개발된 고전압 증폭기의 특성은 Table 1과 같다.

2.4. 시험 방법

고속회전체인 연성 로터 시스템의 지지 댐퍼로서의 감쇠 효과를 관찰하고 댐퍼 뿐만 아니라 댐퍼에 가해지는 고 전압에 따른 제진 효과를 실험하기 위하여 댐퍼와 로터의 진동 특성을 동시에 파악하였다. 먼저 본 댐퍼는 외부 가압 형태를 갖는 댐퍼로 공급 압력의 크기에 따른 댐퍼의 감쇠력과 로터에서의 진동 제진 효과를 동시에 고찰하였고 또한 가변 전압에 따른 항복 전단 응력의 변화에 따른 전기 유변성 유체의 특성 변화에 따른 감쇠 효과를 살

Table 1. Characteristics of high voltage amplifier

Characteristics	Value
Control input voltage	0~5 Volts
Output voltage	0~5,000 Volts
Maximum current	5 mA
Working frequency	0~1,000 Hz
Response time of an output signal at switching from a high level on low	300 μsec
Response time of an output signal at switching from a low level on high	50 μsec
Feed power	24 Watts
Feed voltage	24 Watts

펴 보았다.

슬롯에서의 누수 특성에 따른 감쇠의 영향을 보기 위하여 전극의 유효 단면적에 따른 감쇠 효과와 그리고 회전체 시스템에서의 댐퍼의 최적 위치를 설정함으로써 설계 시 유효한 데이터로 활용할 수 있도록 하였다. 시험은 먼저 일정한 회전 속도를 유지하도록 고정 시키고 그 때의 가압 조건과 적용 전압의 한도까지 전압 조정기를 설정한다. 그 때의 계측을 A/D 변화기를 통하여 X,Y 방향의 진폭의 데이터를 저장한다. 또한 정지 상태에서 설정 회전수 도달 시 까지 진폭의 크기를 변위계를 통하여 댐퍼 저어널과 로터의 진폭 데이터를 동시에 저장한다.

**Table 2. Variable parameters of slot ER-SFD system**

Variable parameters	Value
External supply pressure	0.0/30/60 kPa
Electric voltage	0.0/0.5/1.0/1.5 kV
Effective surface area	0.5/0.7/0.94
Damper location	170/220 mm

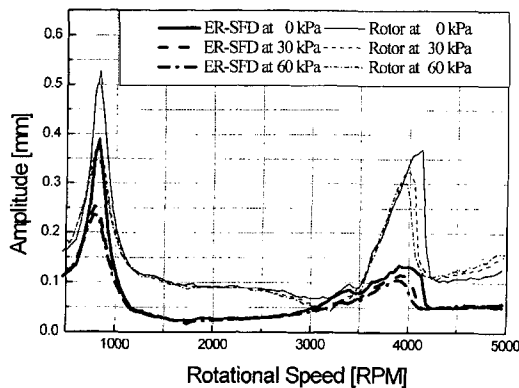
### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. 공급 압력의 영향에 따른 스퀴즈 필름 댐퍼의 특성

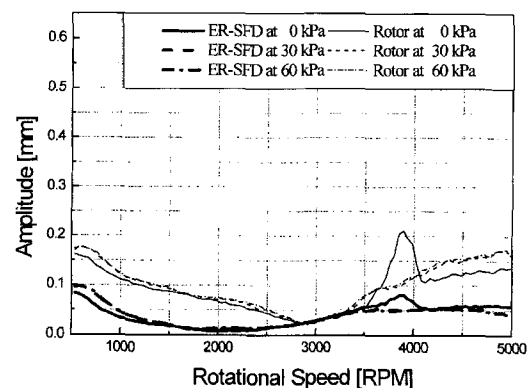
Fig. 5은 슬롯 피스톤-링의 유효 단면적과 가압 전압을 일정하게 고정시켰을 때 외부 가압 조건에 따른 수평 방향(X)의 변위를 댐퍼와 로터의 회전 부위에서 측정된 결과로써 댐퍼 부위의 가압 조건은 0,30,60 kPa의 세가지 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 연성 로터의 임계 속도는 750 rpm 전후로 강성 모우드를 확인하였고 4,000 rpm 전후로 연성에 의한 로터의 모우드를 가짐을 통한 스펙트럼 분석을 통하여 알 수 있었다. 전반적으로 압력의 증가는 진동 레벨을 낮추어 제진의 효과를 볼 수 있는 감쇠의 증가를 알 수 있는 데 이는 2차 임계 속도보다 1차인 강성 모우드에서 그 효과가 컸으며 제진 효과는 1차 임계속도의 경우 댐퍼의 위치에서의 진동이 로터의 진동 제진 보다 효과적이나 2차 임계 속도 근방에서는 거의 위치와 상관없이 제진 효과가 크지 않음을 알 수 있었다. 2차 임계 속도 근방인 4,200 rpm에서는 진폭 신호의 크기가 급격히 강하하는 RUN DOWN현상이 발생하였는데 이는 “hardening spring”

의 응답과 유사한 현상으로 스퀴즈 필름 댐퍼의 비선형적 성질에 기인한 것이다[16]. 이상의 외부 가압 형태의 실험을 통하여 따라서 스퀴즈 필름 댐퍼로 지지되는 연성 로터 시스템의 경우 단순히 압력의 증가 만으로는 시스템을 제진하기 어려움을 알 수 있다.

Fig. 6은 3 mm의 전극과 슬롯 피스톤-링의 유효 단면적을 Fig. 5의 조건과 유사하게 설정하고 단지 가압 전압을 1.5 kV의 고전압을 가하였을 때 외부 가압 조건에 따른 수평 방향(X)의 변위를 댐퍼와 로터의 회전 부위에서 측정된 결과로써 Fig. 5와 비교하였을 때 가압에 의한 제진 효과는 크지 않음을 알 수 있다. 또한 연성 모우드인 2차 임계속도에서의 미미하게 진폭이 줄었음을 알 수 있었다. 따라서 과도한 전압의 전체적인 제진 효과를 비교할 때 가압의 조건 보다 효과적이나 외부 가압에 다른 제진 효과는 거의 기대하기 힘들고 이를 위하여는 적절한 가압이 이루어져야 한다. Fig. 7은 회전속도 4,000 rpm에서의 휠 궤적(whirl orbit)을 나타낸 것으로 전반적으로 앞서 언급한 바와 같이 제진 효과가 그리 크지 않음을 알 수 있다. Fig. 8은 스퀴즈 필름 댐퍼의 위치를 왼쪽 자동 조심 볼 베어링으로부터의 거리, 이라 하였을 때 댐퍼가 보다 가까운 곳에 위치하였을 때인에서 슬롯 피스톤-링의 유효 단면적과 가압 전압을 일정하게 고정시키고 외부 가압 조건에 따른 수평 방향의 변위를 댐퍼와 로터의 회전 부위에서 측정된 결과로 인 경우에 비하여 1차 임계 속도가 증가 하였고 반면에 2차 임계속도는 3,400 rpm 정도로 하강하였다. 1차 임계 속도 근방에서의 댐퍼



**Fig. 5. Comparison of unbalance response amplitudes with variable supply pressures at ER-SFD and overhung rotor ( $E_t = 3 \text{ mm}$ ,  $A_r = 0.7$ ,  $E = 0.0 \text{ kV}$ ,  $L = 220 \text{ mm}$ ).**



**Fig. 6. Comparison of unbalance response amplitudes with variable supply pressures at ER-SFD and overhung rotor ( $E_t = 3 \text{ mm}$ ,  $A_r = 0.7$ ,  $E = 1.5 \text{ kV}$ ,  $L = 220 \text{ mm}$ ).**

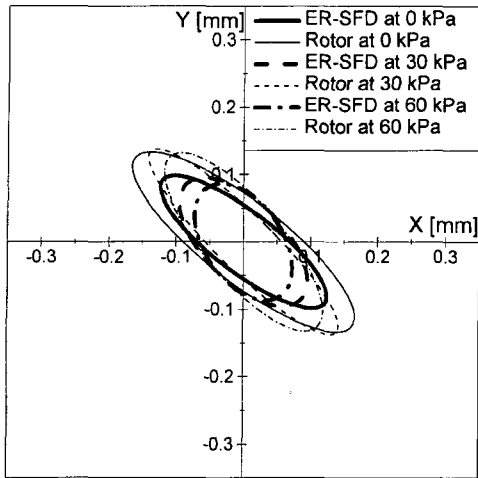


Fig. 7. Comparison of orbits with variable supply pressures at ER-SFD and overhung rotor ( $E_i = 3 \text{ mm}$ ,  $A_r = 0.7$ ,  $E = 0.0 \text{ kV}$ ,  $4,000 \text{ rpm}$ ).

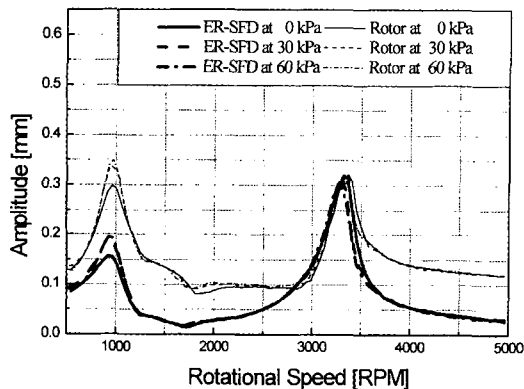


Fig. 8. Comparison of unbalance response amplitudes with variable supply pressures at ER-SFD and overhung rotor ( $E_i = 3 \text{ mm}$ ,  $A_r = 0.7$ ,  $E = 0.0 \text{ kV}$ ,  $L = 170 \text{ mm}$ ).

와 로터와의 진폭의 크기는 확연히 차이가 있고 외부 가압에 크기가 증가함에 따라 약간의 진폭 상승이 있었고 2차 임계속도 근방에서는 댐퍼와 로터와의 진폭 크기가 거의 비슷하고 외부 가압 압력에도 거의 변화가 없었음을 알 수 있었다. 이는 Fig. 5와 비교 할 때 댐퍼의 적절한 위치는 진동 제어의 효과를 효율적 제진 할 수 있음을 암시하며 이에 대한 최적화 설계가 필요함을 알 수 있다.

3-2. 가변 전압에 따른 스퀴즈 필름 댐퍼의 특성

Fig. 9는 슬롯 피스톤-링의 유효 단면적과 외부 가압의 압력을 일정하게 고정시켰을 때 가변 전압에

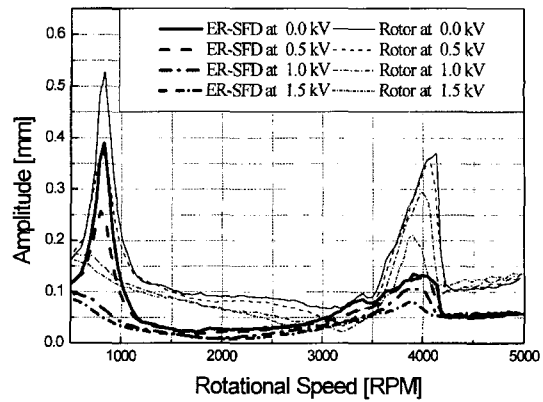


Fig. 9. Comparison of unbalance response amplitudes with variable supply voltages at ER-SFD and overhung rotor ( $E_i = 3 \text{ mm}$ ,  $A_r = 0.7$ ,  $P_s = 0.0 \text{ kPa}$ ,  $L = 220 \text{ mm}$ ).

다른 수평 방향의 변위를 댐퍼와 로터의 회전 부위에서 측정된 결과이다. 외부 가압이 거의 없는 상태에서의 1차 임계 속도는 750 rpm과 2차 임계 속도는 4,200 rpm 전후에 위치한다. 외부 가압 조건에 따른 진폭의 제진 효과에 비하여 훨씬 그 효과가 뚜렷이 볼 수 있으며 이는 댐퍼와 로터 부위에 동일하게 나타나고 있다. 특히 1차 임계 속도의 제진의 경우 1.0 kV의 가변 전압이 적용되었을 경우 댐퍼와 로터의 진동 진폭이 상당히 감소하고 있음을 볼 수 있었는데 1.5 kV의 경우에는 거의 변동이 없었음을 볼 때 가변 전압의 임계 점이 존재함을 알 수 있었다. 그러나 2차 임계 속도 근방에서는 가변 전압에 따른 제진 효과는 있으나 1차 임계 속도의 진폭처럼 급격한 제진 효과는 보이지 않았다. 따라서 이러한 효과는 가변 전압에 따른 전기 유변성 재료에 기인한 것이기 보다는 연성 로터의 시스템 특성에 따른 제진 효과의 차이로 사료된다. Fig. 10에서는 앞에서의 외부 가압 조건을 60 kPa로 일정하게 공급하며, 가변 전압에 따른 효과를 살펴 본 결과로 Fig. 9와의 진폭을 비교하여 볼 때 전반적으로 진폭이 줄어들었음을 알 수 있다. 특히 0.0, 0.5 kV의 가변 전압 조건에서는 외부 가압에 따른 진폭의 제진 효과가 확실함을 알 수 있었으나 1.0 kV이상의 고전압 상태에서는 외부 가압에 따른 제진 효과가 미미함을 알 수 있다. 이는 앞서 언급한 과도한 고전압에서는 압력으로 인한 제진 효율이 낮아지는 비슷한 결과를 보였다. Fig. 11은 회전속도 4,000 rpm에서의 휠 궤적 (whirl orbit)을 나타낸 것으로 가변 전압이 1.0 kV까

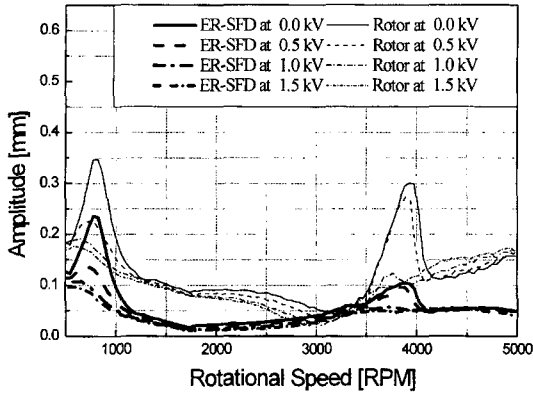


Fig. 10. Comparison of unbalance response amplitudes with variable supply voltages at ER-SFD and overhung rotor ( $E_f = 3 \text{ mm}$ ,  $A_r = 0.7$ ,  $P_s = 60 \text{ kPa}$ ,  $L = 220 \text{ mm}$ ).

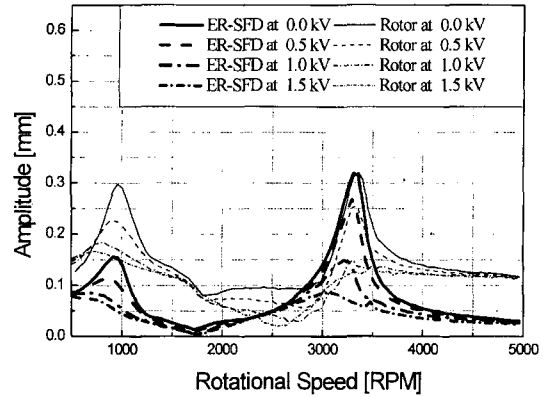


Fig. 12. Comparison of unbalance response amplitudes with variable supply voltages at ER-SFD and overhung rotor ( $E_f = 3 \text{ mm}$ ,  $A_r = 0.7$ ,  $P_s = 0.0 \text{ kPa}$ ,  $L = 170 \text{ mm}$ ).

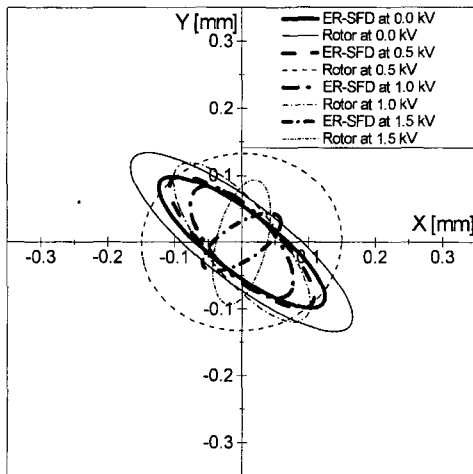


Fig. 11. Comparison of orbits with variable supply voltages at ER-SFD and overhung rotor ( $E_f = 3 \text{ mm}$ ,  $A_r = 0.7$ ,  $P_s = 0.0 \text{ kPa}$ ,  $4,000 \text{ rpm}$ ).

지는 in phase 상태의 운동을 보이다 1.5 kV에서는 out of phase의 운동으로 궤적의 방향이 바뀌었다. 이는 고전압인 1.5 kV의 경우 임계 속도가 변화되었음을 알 수 있는데 감쇠력의 증가와 더불어 그 영향으로 임계속도 점이 점차 낮아지는 현상을 보였다. Fig. 12는 스퀴즈 필름 댐퍼의 위치가 일때로, 슬롯 피스톤-링의 유효 단면적과 가압 전압을 일정하게 고정시켰을 때 외부 가압 조건에 따른 수평 방향의 변위를 댐퍼와 로터의 회전 부위에서 측정된 결과이다. 인 경우에 비하여 가변 전압의 크기에 따라 1차와 2차 임계 속도가 약간씩 감소 하였다. 또한 댐퍼의 경우 1,2차 임계속도에서 모두 가변 전압에 따른 제진

효과가 컸으며 2차 임계속도의 크기는 댐퍼와 로터와의 진폭의 크기가 거의 유사하였다.

### 3-3. 슬롯의 전극 면적에 따른 스퀴즈 필름 댐퍼의 특성

전기 유변성 유체의 가변 전압에 의한 슬롯 유량의 제어는 누유되는 ER 유체의 양을 조절 할 수 있게 한다. 이는 댐퍼 내부의 감쇠 성능과도 매우 밀접하게 연관이 되어있는 데 본 논문에서는 슬롯 부위의 유효 단면적에 대한 누유 저항을 실험을 통하여 고찰하였다. 먼저 슬롯의 유효 단면적(원주 방향의 전체 단면적에 대한 전극 부위의 비-비절연체를 제외한 비율)을 0.94, 0.7, 0.5의 세가지로 슬롯의 유효 단면적 0.94는 전체 원주 방향의 전극 면적에서 6%만이 비 전극(절연) 부위를 의미한다. 전극의 폭은( $E_f = 3 \text{ mm}$ ) 일정하고 반경 방향의 틈새는 1 mm로 일정하게 유지하였다. 그러나 댐퍼의 반경 방향의 off-set은 틈새의 크기에 영향을 미치므로 실험 시 댐퍼를 centering 스프링에 의하여 중심을 일치시킨 후 실험을 하였다. Fig. 13은 가변 전압이 0.5 kV, 외부 가압이 없는 상태에서의 댐퍼와 로터의 진동 진폭을 측정된 것이다. 1차 임계 속도에서 슬롯 유효 단면적의 변화에 따라 댐퍼와 로터 부위에서 진동에 변화가 있었으나, 2차 임계 속도의 경우에는 슬롯의 유효 단면적의 영향이 거의 없음을 알 수 있다. 또한 로터의 진동 전달은 2차 임계속도 근방에서 불안정한 경향을 띄고 있음을 알 수 있었다. 또한 외부 가압 조건의 경우인 Fig. 14는 가압의 영향으로 1차 임

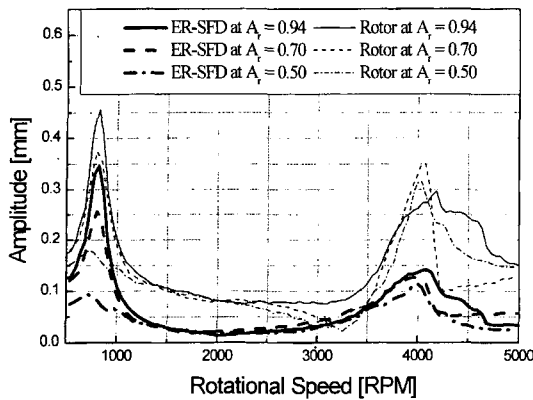


Fig. 13. Comparison of unbalance response amplitudes with variable effective surface area of electrode at ER-SFD and overhung rotor ( $E_t = 3 \text{ mm}$ ,  $E = 0.5 \text{ kV}$ ,  $P_S = 0.0 \text{ kPa}$ ,  $L = 220 \text{ mm}$ ).

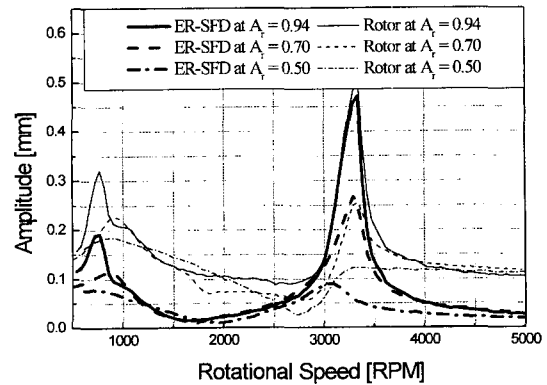


Fig. 15. Comparison of unbalance response amplitudes with variable effective surface area of electrode at ER-SFD and overhung rotor ( $E_t = 3 \text{ mm}$ ,  $E = 0.5 \text{ kV}$ ,  $P_S = 0.0 \text{ kPa}$ ,  $L = 170 \text{ mm}$ ).

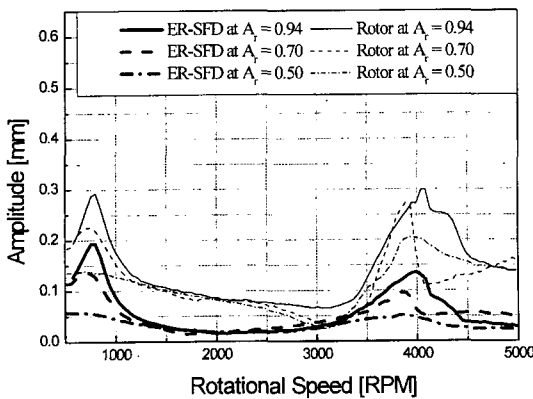


Fig. 14. Comparison of unbalance response amplitudes with variable effective surface area of electrode at ER-SFD and overhung rotor ( $E_t = 3 \text{ mm}$ ,  $E = 0.5 \text{ kV}$ ,  $P_S = 0.0 \text{ kPa}$ ,  $L = 220 \text{ mm}$ ).

계속도에서의 진폭은 제진에 따른 효과를 감지 할 수 있었으나 2차 임계속도에서는 슬롯의 유효 단면적의 영향은 보이나 로터의 진동은 여전히 불안정한 경향을 띠고있었다. Fig. 15는 댐퍼의 위치가 일 때 로, 가압 전압을 일정하게 고정시켰을 때 슬롯의 유효 단면적에 따른 댐퍼와 로터의 회전 부위에서의 변위를 측정된 결과이다. 1,2차 임계속도 근방에서의 슬롯의 유효 단면적에 따른 댐퍼와 로터에서의 진동 변화를 볼 수 있었으며 특히 2차 임계속도 근방에서의 진동 변화가 뚜렷이 나타났다. 슬롯의 유효 단면적의 증가에 따라 1차 임계속도가 약간 증가하고 있으며, 그 때의 진폭의 크기도 증가하였다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 방전 현상에 대하여 비교적 자유로운 슬롯 링 형태의 전기 유변성 유체의 스퀴즈 필름 댐퍼로 지지되는 외팔보 형태의 연성 고속 로터 시스템에 대하여 외부 가압 형태의 공급 압력의 조정, 슬롯의 유효 단면적 그리고 가변 전압에 따른 댐퍼와 로터의 진동 진폭의 크기를 실험을 통하여 고찰하였고 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 외부 가압의 압력의 조정에 의한 연성 로터 시스템의 제진 효과는 시스템의 모드에 따라 적절한 위치에 설정함으로써 원하는 제진 효과를 극대화 할 수 있음을 알았고 이를 위하여는 먼저 시스템의 모드 분석이 선행되어야 한다.
2. 스퀴즈 필름 댐퍼의 가변 전압은 전체적으로 공급 압력의 제진 효과에 비하여 탁월히 그 효과를 발휘하였으며, 시스템의 제어에 있어 공급 압력의 의한 제어기 보다 응답 속도가 월등히 좋아 시스템 제어기로 가능성을 알 수 있었다.
3. 과도한 전압의 전체적인 제진 효과를 비교할 때 가압의 조건보다 효과적이거나 외부 가압에 따른 제진 효과는 거의 기대하기 힘들고 이를 위하여는 적절한 가 전압이 이루어져야 한다.
4. 댐퍼 슬롯의 유효 단면적의 증가로 인하여 최대 진폭의 위치가 약간 증가하였고, 최대 진폭의 크기도 약간 증가하는 현상을 보였다. 댐퍼 슬롯의 유효 단면적이 증가로 인하여 유체의 흐름을 막고있는 비절연체 부분이 감소하여 최대 진폭의 크기가 증가



한 것으로 사료된다.

5. 고속 회전하는 연성 로터 시스템에 있어 댐퍼의 위치 선정은 제진 효율을 극대화 시키는 데 필수적이며 뿐 만 아니라 가변 전압의 크기, 가압의 조건 그리고 슬롯의 유효 단면적의 크기등의 최적화를 통한 설계가 필수적이다.

### 후 기

본 논문은 1999년도 과학기술처 “국가중점연구과제” 연구결과의 일부이며 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

1. Zeiden F, Vance J.M., “Cavitation Leading to a Two Phase Fluid in a Squeeze Film Damper,” STLE Trans. Vol. 32, pp. 100-104, 1989
2. Zeiden F., Vance J.M., “Cavitation and Air Entrainment Effects on the Response of Squeeze Film Supported Rotors,” ASME Trans., J. of Tribology, Vol. 112, pp. 347-353., 1990.
3. Childs D., “Turbomachinery Rotordynamics,” John Willey & Sons, Inc., pp. 214-223, 1993.
4. 김종립, 이남수, 이용복, 최동훈, 김창호, “강성 회전축계를 지지한 ER-SFD의 parametric study 및 최적설계,” 한국윤활 춘계학술대회, 1999.
5. Winslow, W. H., “Induced Fibration Suspensions,” J. of Applied Physics, Vol. 20, pp. 1137-1140, 1949
6. Shulman, J. P., Gordkin, R. G, Korobko, E. V., and Gleb, V. K., “The Electro-Rheological Effect and its Possible Uses,” J. of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 8, pp. 29-41, 1981
7. Nikolajsen, J. L. and Hoque, M. S., “An Electroviscous Damper,” Proceedings of Workshop on Rotor-dynamics Instability Problems in High Performance Turbomachinery, NASA Conference Publication No. 3026, 1988
8. Morishita, S. and Mitsui, J., “Controllable Squeeze Film Damper (An Application of Electro-Rheological Fluid),” J. of Vibration and Acoustic, Vol. 114, pp. 354-357, 1992
9. Tichy, J. A., “Behavior of a Squeeze Film Damper with an Electrorheological Fluid,” STLE Tribology Trans. Vol. 36, No. 1, pp. 127-133, 1993
10. Jung, S. Y. and Choi, S. B., “Analysis of a Short Squeeze Film Damper Operating with Electro-Rheological Fluids,” STLE Tribology Trans. Vol. 38, No. 4, pp. 857-862, 1995
11. Wada, B. S. and Tsukijihara, M., “Elastohydrodynamic Lubrication of Squeeze Films (Part 1. Two Cylinders Lubricated with Grease),” Bulletin of JSME, Vol. 21, No. 159, pp. 1408-1415, 1978
12. Dimarogonas, A. and Kollias, A., “Electrorheological Fluid-Controlled ‘Smart’ Journal Bearings,” STLE Tribology Trans., Vol. 35, No. 4, pp. 611-618, 1992
13. Leek, T. H., Lingard, S., Atkin, R. J. and Bullough, W. A., “An Experimental Investigation of the Flow of an Electro-Rheological Fluid in a Rayleigh Step Bearing,” J. of Physics D: Appl. Physics, Vol. 26, pp. 1592-1600, 1993
14. Kim, C. H. et al., “Vibration Control of a Pressurized, Sealed, ER Fluid SFD supported rotor,” 7th ISROMAC Conference, pp.238~247, 1998
15. Kim, C. H. et al., “Test results for vibration control of an overhung rigid rotor supported by a sealed and electro-rheological fluid squeeze film damper,” *International Conference on the Integration of Dynamics, Monitoring and Control*, pp. 363~368, Sept. 1999,
16. Simandiri S. and Hahn E.J., “Experimental Evaluation of the Predicted Behavior of Squeeze Film Bearing-Supported Rigid Rotors,” *ImechE, J. Mech Eng Science*, pp. 109-117. Feb., 1976