

## 겹판스프링댐퍼를 이용한 저어널베어링의 안정성 향상에 관한 실험적연구

최영준 · 김종수 · 제양규\*  
한국해양대학교 기계공학부, \* (주)머신나우

### An Experimental Study on Improvement of the Stability of Plane Journal Bearing using Leaf Spring Damper<sup>®</sup>

Young-Jun Choi, Jong-Soo Kim, and Yang-Gyu Jei\*

Dept. of Mech. Sys. Engineering, Korea Maritime University

\* MachineNow Co., Ltd.

**Abstract** : The purpose of present paper is to prove an improvement on stability of plane journal bearing due to the leaf spring damper(LSD) experimentally. A flexible rotor system is designed and manufactured, in order to generate oil whip instability of journal bearing at relative lower rotating speed. Vibration amplitude and instability onset speeds are investigated for a conventional plane journal bearing and plane journal bearing with LSD. To investigate the damping effects of LSD on stability of bearing, experiments are also conducted on the leaf spring dampers with and without working oil. It is found that the leaf spring damper can considerably increase the instability onset speed of a plane journal bearing.

**Key words** - Leaf Spring Damper(LSD), Journal bearing, Instability, Critical speed, Oil whip

#### 1. 서론

오늘날 대부분의 에너지 기계는 회전기계로 구성되어 있다 사용 효율을 향상시키기 위하여 작동 속도의 증가는 보다 심각한 진동문제를 야기하게 된다 이러한 진동에 대해 적절한 진동흡수장치를 적용하여 기계시스템의 고 효율화 및 고속화를 이루고자 하는 연구가 다양하게 진행되고 있다. 일반적인 미끄럼 저어널베어링은 오일휩(oil whip)이라는 매우 불안정한 진동의 발생으로 특수한 형상의 베어링을 사용하지 않으면 안 된다. 이와 같은 불안정한 진동을 제어하기 위하여 사용될 수 있는 베어링이 틸팅-패드 저어널베어링과 플로팅 링 저어널베어링이다. 틸팅-패드 저어널베어링은 비교적 큰 체적공간을 요구할 뿐만 아니라 제작비가 높기 때문에 터보차저와 같은 소형의 축에는 적용이

곤란하다. 또한 플로팅 링 저어널베어링은 고속에서 윤활유 공급의 불안정 때문에 사용이 제한적이고 설계가 쉽지 않다. 그러나 일반적인 저어널베어링과 이미 저자들에 의하여 개발된 겹판스프링댐퍼(Leaf Spring Damper, LSD)를 함께 사용하여 베어링의 안정성을 향상시킬 수 있다면 경제적, 기술적 측면에서 매우 높은 효과를 거둘 수 있을 것으로 사료된다.

본 논문에서는 횡진동을 절연하기 위한 시제품 겹판스프링댐퍼를 제작하여 이를 유막베어링(저어널베어링)을 함께 구성하여 회전기계에 적용 하므로써 이의 진동특성을 조사하고자 한다. 회전기계에서 겹판스프링댐퍼를 적용하였을 때와 저어널베어링만을 사용하였을 때의 진동특성과 겹판스프링의 감쇠를 조정하였을 때 계의 진동특성을 실험적으로 관찰하여 저어널베어링에 겹판스프링댐퍼를 적용하였을 때의 계의 안정

성향상에 관한 효과를 정량적으로 제시하고자 한다.

는 디스크(disk)가 설치되어 있다.

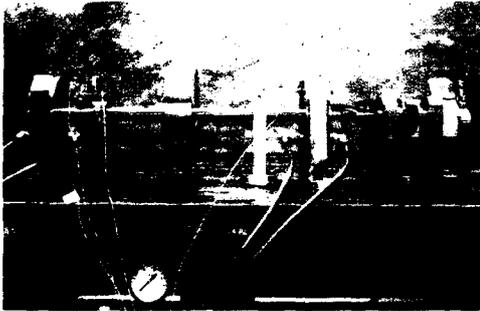


Fig.1 Photography of experiment system

## 2. 실험장치 및 방법

Fig.1은 실험장치의 전체적인 사진을 보여주고 있다. 실험장치는 데이터 취득부분, 윤활유 공급장치, 회전체 부분으로 나누어지며 로터의 회전에 의한 변위를 변위센서(eddy current type displacement transducer)를 통하여 측정하였으며 이렇게 측정된 신호는 증폭기(amplifier)를 거쳐 적절한 크기로 증폭된 후 A/D변환기를 거쳐 컴퓨터에 저장되어진다.

Fig.2는 저널베어링과 LSD를 사용하여 회전축 양단을 지지하는 조립도이며 회전축 중간에

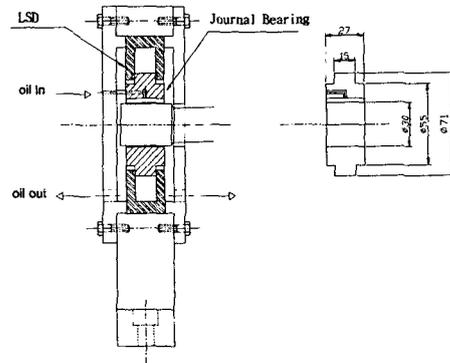


Fig.2 Detail of LSD journal bearing

로터는 속도제어기가 부착된 AC 서보모터 (Servo motor)와 타이밍벨트(Timing belt)로 연결되어 구동되어지며, 중간에 플렉시를 커플링으로 연결되어서 벨트를 통한 진동이나 간섭을 배제하였다.

Fig.3은 본 논문의 실험에 사용된 횡방향 곱판스프링댐퍼의 전체 조립도를 나타내었으며, 곱판 스프링댐퍼의 내부에는 곱판스프링이 원주방향으로 등간격으로 설치되어있다.

저널베어링 재질은 베어링 황동이며 상부에 3mm의 윤활유 주유구가 설치되어있고 내경과 길이의 치수는 각각 30.0mm, 27mm이며

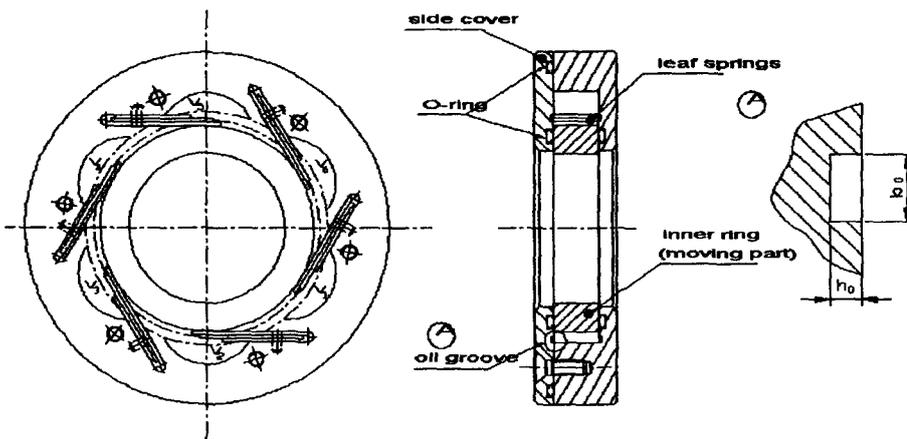


Fig.3 A section view of Leaf Spring Damper

$L/D=0.9$ 이며 베어링의 반경틈새(clearance)는  $30\ \mu\text{m}$ 로 틈새비  $c/R=0.002$ 이다

Fig.4는 저널베어링과 LSD의 조립상태의 사진이며 저널의 길이와 직경은  $33.56\text{mm}$ 와  $29.94\text{mm}$ 이다. 저널베어링 특성실험은 LSD에서 접판 스프링을 제거하고 저널베어링 외부에 링을 삽입하여 조립을 할 수 있으며 이때 LSD는 저널베어링을 지지하는 역할을 하게되며 저널베어링만의 특성실험을 할 수 있도록 설계하였다. 저널베어링의 윤활유는  $68\text{cSt}(@40^\circ\text{C})$  유압작동유를 사용하였으며 로타펌프(Rotor pump)를 이용하여 저널베어링에 공급되어진다. 펌프의 출구 측에 압력을 조절할 수 있는 바이패스(Bypass)밸브와 윤활유 공급압력을 측정할 수 있는 압력게이지가 설치되어 있다.

실험은 3가지 경우에 대하여 수행하였으며 이는 저널베어링만을 사용하였을 때와 LSD에 저널베어링을 삽입하였을 때, LSD에 오일을 주입하여 감쇠를 조정하였을 때로 구분할 수 있다. 실험에 선행하여 회전축계의 불평형 질량을 제거하기 위한 평형잡기(balancing) 작업을 수행하였다.

Diagnostic Instruments사의 Real Time FFT Analyser(DI-2200)를 이용하여 초기 불평형질량을 계측하였고 이때  $10\text{g}$ 의 불평형이 나타났으며 평형잡기를 수행한 결과  $0.006\text{g}$ 의 불평형 질량이 나타났고 그이상의 평형 잡기는 어렵다고 판단하여 이 상태에서 실험을 진행하였다.

전체 실험에서의 윤활유 공급압력은  $3\text{ kgf/cm}^2$ 로 일정하게 유지하였으며 윤활유량은  $32.87$

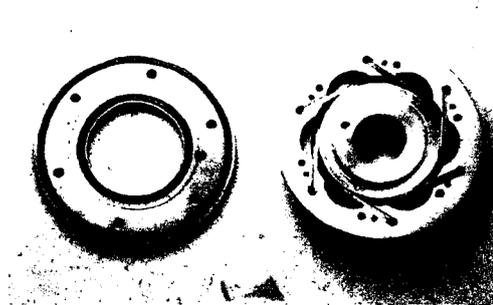


Fig.4 Photography of LSD Journal Bearing  
cc/min, 공급온도는 실온( $20.1^\circ\text{C}$ )으로 하였으

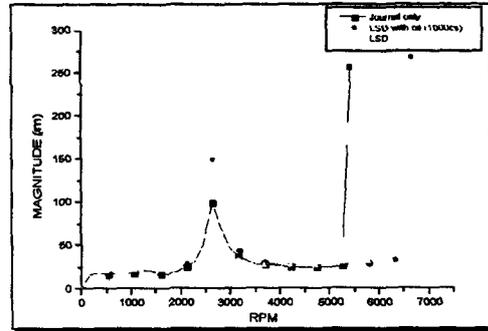


Fig.5 Measured amplitude on the shaft

며 윤활유는 저장 탱크안의 필터를 통하여 오물이 제거되어 저널베어링으로 공급된다. 회전축의 속도는  $175\text{rpm}$ 씩 증가하였고 이때 각 회전수에서의 데이터를 취득하였다. 속도의 증가 시 X-Y방향의 진폭을 관측하면서 오일 휩(oil whip)이 발생하는 시점까지 실험을 진행하였고 그 이상의 속도에서는 과도한 진동으로 인한 저어널과 베어링간의 접촉을 우려하여 실험은 오일 휩 발생시작 후 첫 번째 데이터까지 진행하였다.

진폭 관측지점은 디스크를 중심으로 회전축 좌우측으로 3등분되는 지점인 중심으로부터  $166\text{mm}$ 떨어진 위치이다.

### 3. 실험결과

Fig.5는 디스크 중심에서  $166\text{mm}$ 지점에서의 Y방향의 속도 변화에 따른 진폭곡선을 나타내고 있다. 여기에는 저널베어링만을 사용하였을 때와 저널베어링에 진동절연장치인 LSD를 장착하였을 때, 그리고 진동절연장치의 감쇠력을 높이기 위해 실리콘오일(KF96-1000,  $1000\text{cSt}(@25^\circ\text{C})$ )을 LSD에 주입하였을 때의 진폭곡선을 비교하여 나타내었다.

저널베어링만을 사용하였을 때의 오일 휩 발생속도는  $5425\text{rpm}$ 이며 LSD를 추가하였을 때 오일 휩은  $6475\text{rpm}$ 에서 발생하였고 저널베어링을 사용할 때 보다 진동절연장치를 추가하였을 때  $1050\text{Rpm}$ 이상에서 오일 휩이 발생한다. 또한 LSD에 감쇠계수를 증가시키기위해 LSD내부에

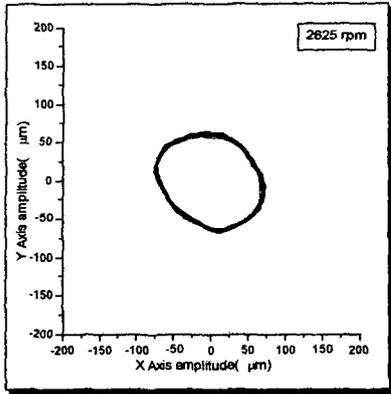


Fig.6 Measured X-Y amplitude of the shaft in LSD journal bearing system(2625 rpm)

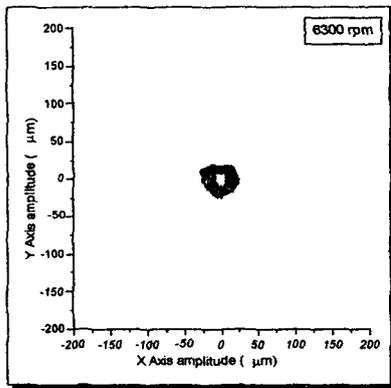


Fig.7 Measured X-Y amplitude of the shaft in LSD journal bearing system(6300 rpm)

실리콘오일(1000cSt)를 주입하였을 때 오일 휩은 6650Rpm에서 발생하였다.

Fig.6 LSD저널베어링을 사용하였을 때의 1차 고유진동수 일 때의 X-Y 축의 궤적(orbit)를 나타내고 있으며 Fig.7는 오일 휩 발생 직전의 축의 궤적을 나타내고 있고, Fig.8 오일 휩 발생지점에서의 축의 궤적을 나타낸다.

Fig.8에서 알 수 있듯이 오일 휩 발생지점에서는 타원형 궤도가 겹쳐서 나타나고 있는데 이는 가진속도 보다 낮은 주파수 성분이 겹치기 때문이며 이로서 회전축이 자전과 동시에

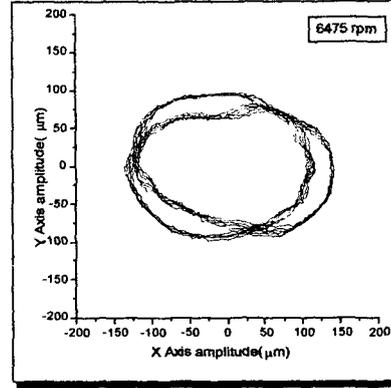


Fig.8 Measured X-Y amplitude of the shaft in LSD journal bearing system(6475 rpm)

공전을 하고 있는 것을 알 수 있다.

Fig.9는 저널베어링만을 사용하였을 때 1차 고유진동수 부분(2625Rpm)에서와 Fig.10은 오일 휩 발생 지점(5425Rpm)에서의 FFT분석 그래프이다. Fig.9에서 볼 수 있듯이 43.94Hz에서의 1차 고유진동수가 주 위험차수임을 알 수 있으며 Fig.10에서는 43.94Hz에서 즉 오일 휩 발생 시 0.5차 진동수가 주 위험차수임을 알 수 있다. 일반적으로 오일 휩이 발생하는 주 위험차수는 저어널베어링의 경우 오일 휩이 발생하는 회전속도의 0.45~0.48정도에서 발생하며 여기서 이를 확인할 수 있다.

Fig.11은 LSD 저널베어링을 사용하였을 때 1차 위험속도 부분(2625Rpm)에서와 Fig.12는 오일 휩 발생 지점(6475Rpm)에서의 FFT분석 그래프이다. LSD의 감쇠력을 증가시켰을 때의 진동 특성은 Fig.5에서 볼 수 있듯이 LSD저널베어링의 오일 휩 발생속도는 6475rpm이다. 그리고 주파수 분석결과에 의하며 오일 휩 주파수는 저어널베어링만 사용할 때와 LSD를 함께 사용할 때 모두 동일한 43.94Hz임을 보여주고 있다. 그러므로 LSD 베어링에서는 선회속도비(whirl ratio)가 0.4정도로 낮아짐을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 저널베어링의 사용속도를 향상

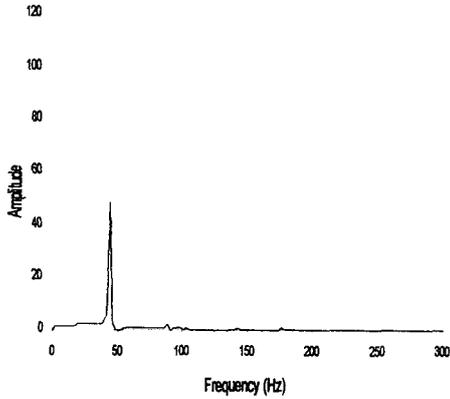


Fig.9 Frequency analysis of shaft vibration at 1st critical speed in journal bearing only(2625rpm)

시킴을 위해 개발된 진동절연장치(LSD)를 제작하였으며 성능을 평가하기 위한 회전체시스템을 자체 설계 제작하여 회전체실험을 실시하였다.

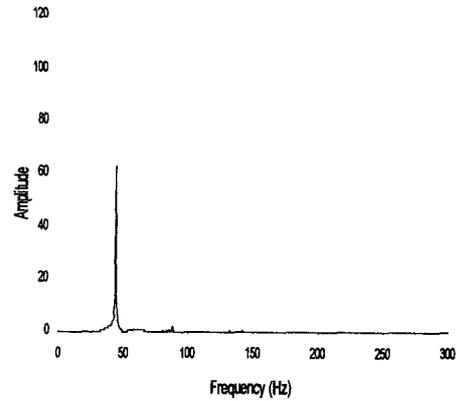


Fig.11 Frequency analysis of shaft vibration at 1st critical speed in LSD journal bearing with oil (2625rpm)

진동수의 위치는 거의 변함이 없으며 그 진폭은 저널베어링보다 LSD저널베어링이 크게 나타난다.

(2) 불안정진동현상인 오일휩(oil whip)발생 시기

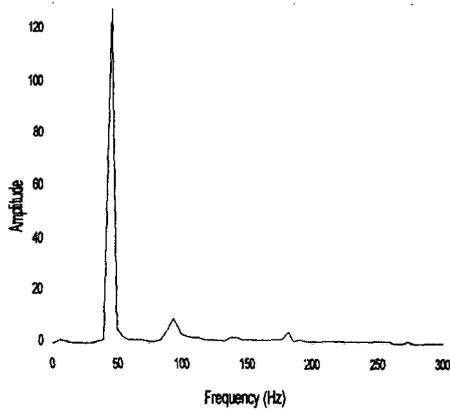


Fig.10 Frequency analysis of shaft vibration at oil whip in journal bearing only(5425rpm)

본 연구에서 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) 저어널베어링과 LSD저널베어링 그리고 LSD저널베어링의 감쇠를 증가시킬 때의 1차 고유

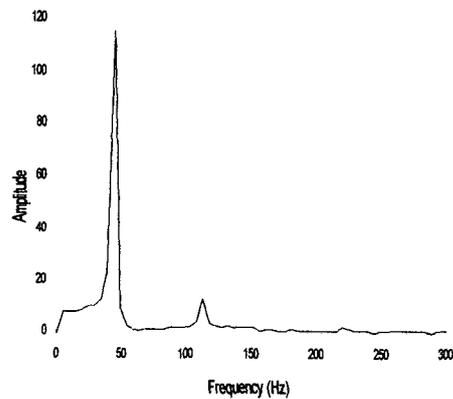


Fig.12 Frequency analysis of shaft vibration at oil whip in LSD journal bearing with oil (6650rpm)

는 일반적인 저널베어링보다 LSD저널베어링보다 1000rpm이상 높은 회전수에서 발생한다. 그리고 감쇠를 증가시키기 위해서 실리콘 오일(1000cSt)를 삽입한 LSD저널베어링의 경우에는

일반적인 저어널베어링보다 200rpm이상인 부분에서 발생하며 본회전체 시스템에서는 감쇠효과의 특성이 크게 나타나지 않는다.

(3) 진동특성의 FFT분석결과 1차 고유진동수에서는 계의 불평형 질량에 의한 진동임을 알 수 있었고 오일 휩(oil whip)발생은 0.5차 고유진동수( $whirl\ ratio = w_w / w_s < 0.5$ )가 주원인이 되며 계의 공전에 의한 영향임을 알 수 있다.

(4) LSD의 효과가 저널베어링에 비하여 안정성향상이 기대한 것만큼 크게 나타나지 않은 이유는 회전축의 강성과 LSD의 강성과 감쇠가 최적인 조건에서 실험되지 못했기 때문으로 사료되며 추후 축 및 베어링의 강성 및 감쇠에 대한 댐퍼의 강성 및 감쇠비에 따른 안정성 향상에 대한 연구가 수행될 필요가 있음을 알 수 있다.

#### 참고문헌

- (1) Jei, Y.-G., Kim, J.-S., Hong, S.-W., and Jung, S.-Y., "A New Lateral Vibration Damper Using Leaf Springs," ASME J. of Vib. and Acoustics, Vol.121, pp.343-350, 1999.
- (2) 김종수, 김상도, 제양규, "겹판스프링댐퍼에서 측면탄성에 의한 감쇠력 조절," 한국윤활학회지, Vol.16, No.1, pp.27-32, 2000.
- (3) 제양규, 김종수, 정시영, 홍성욱, "겹판스프링을 이용한 횡방향 진동절연장치," 대한기계학회 논문집 A, Vol.22, pp.843-858, 1998.
- (4) 제양규, 김종수, 홍성욱, "겹판스프링을 이용한 회전축의 횡진동 흡수장치 개발," 한국진동소음학회, 1999년 춘계학술대회
- (5) 김종수, 최상규, 유광택, "내측유막으로의 공급 유량이 플로팅 링 저어널베어링의 성능에 미치는 영향," 한국윤활학회지, Vol.15, No.1, pp.98-107, 1999.
- (6) Dara Childs, "Turbomachinery Rotordynamics", 1993.
- (7) Orcutt, F.K. and Ng, C.W., "Steady-State and Dynamic Properties of the Floating-Ring Journal Bearings," ASME J. of Lub. Tech., Vol.90, pp.243-253, 1968.
- (8) Trippet, R.J., and Li, D.F., "High-Speed Floating-Ring Bearing Test and Analysis," ASLE Trans., Vol.27, pp.73-81, 1984.
- (9) Tanaka, M., and Hori, Y., "Stability Characteristics of Floating Bush Bearings," ASME J. of Lub. Tech., Vol.94, pp.248-259, 1972.
- (10) Li, C.H., "Dynamics of Rotor Bearing Systems Supported by Floating Ring Bearings," ASME J. of Lub. Tech., Vol.104, pp.469-477, 1982.
- (11) Khonsari, M.M., and Chang, Y.J., "Stability Boundary of Non-Linear Orbits Within Clearance Circle of Journal Bearings," ASME J. of Vibration and Acoustics, Vol.115, pp.303-307, 1993.
- (12) Bhargava, S.K., and Malik, M., "The Transient Response of a Journal in Plane Hydrodynamic Bearing with Flexible Damped Supports During Acceleration and Deceleration Periods," Tribology Trans., Vol.34, pp.63-69, 1991.