

## 겹판스프링댐퍼를 이용한 저어널베어링의 안정성 향상에 관한 실험적연구

최영준<sup>†</sup> · 김종수 · 제양규\*

한국해양대학교 기계공학부, \*(주)머신나우

### An Experimental Study on Improvement of the Stability of Plane Journal Bearing using Leaf Spring Damper

Young-Jun Choi<sup>†</sup>, 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. 서 론

오늘날 회전기계는 고 효율화를 위하여 점점 고속화 되어가고 있다. 이와 같이 사용속도의 증가는 조그마한 불평형 질량이 존재하여도 심각한 진동문제를 야기하게 되며 더욱이 1차 위함속도를 통과하더라도 미끄럼베어링은 자체의 고유한 특성에 의하여 오일 휩(oil whip)이라는 매우 불안정한 진동이 발생하게 된다. 그러므로 회전기계를 고속화하기 위하여는 이와 같은 문제를 해결하지 않으면 안된다. 이와 같은 불안정한 진동을 제어하기 위하여 사용될 수 있는 베어링이 틸팅-패드 저어널베어링과 플로팅 링 저어널베어링이다[1-5]. 틸팅-패드 저어널베어링은 비교적 큰 체적공간을 요구할 뿐만 아니라 제작비가 높기 때문에 터보차저와 같은 소

형의 축에는 적용이 곤란하다. 또한 플로팅 링 저어널 베어링은 고속에서 내측유막으로의 윤활유 공급의 불안정 때문에 사용이 제한적이고 설계가 쉽지 않다. 그러나 일반적인 저어널베어링과 이미 저자들에 의하여 개발된 겹판스프링댐퍼(Leaf Spring Damper, LSD)[6-9]를 함께 사용하여 베어링의 안정성을 향상시킬 수 있다면 경제적, 기술적 측면에서 매우 높은 효과를 거둘 수 있을 것으로 사료된다.

본 논문에서는 횡진동을 절연하기 위한 겹판스프링댐퍼와 유막베어링(저어널베어링)을 함께 구성하여 회전기계에 적용함으로써 회전축계의 진동특성을 조사하고자 한다. 회전기계에서 겹판스프링댐퍼를 적용하였을 때와 저어널베어링만을 사용하였을 때의 진동특성과 겹판스프링댐퍼의 감쇠를 조정하였을 때 계의 진동특성을 실험적으로 관찰하여 저어널베어링과 겹판스프링댐퍼를 같이 사용함으로써 오일휩 발생속도를 얼마나 늦출 수

<sup>†</sup>주저자 · 책임저자 : mrbig1991@grgio.net

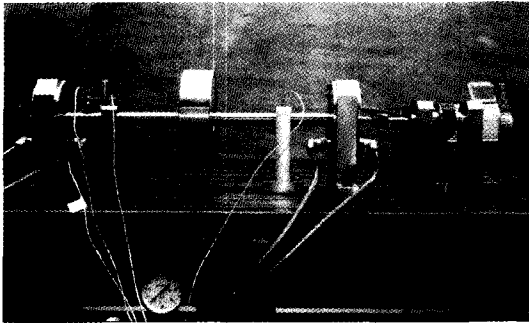


Fig. 1. Photography of experiment system.

있는지를 실험적으로 확인하고자 한다.

### 2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 실험장치의 전체적인 사진을 보여주고 있다. 실험장치는 데이터 취득부분, 윤활유공급장치, 회전체 부분으로 나누어진다. 회전축 중간에는 디스크(disk)를 설치하여 회전축계의 1차 위험속도를 낮추어서 실험의 편의성을 도모하였다. 축의 회전에 의한 진동진폭은 변위센서(eddy current type displacement transducer)를 통하여 측정하였으며 이렇게 측정된 신호는 증폭기(amplifier)를 거쳐 적절한 크기로 증폭된 후 A/D 변환기를 거쳐 컴퓨터에 저장되어진다. 진폭 관측지점은 Fig. 1에서 보여주고 있는 것처럼 디스크를 중심으로 회전축 좌우측으로 3등분되는 지점으로 베어링부에서 83 mm 떨어진 위치이다. 또한 회전축은 속도제어기가 부착된 AC 서보모터(Servo motor)와 타이밍벨트(Timing belt)로 연결되어 구동되어지며, 중간

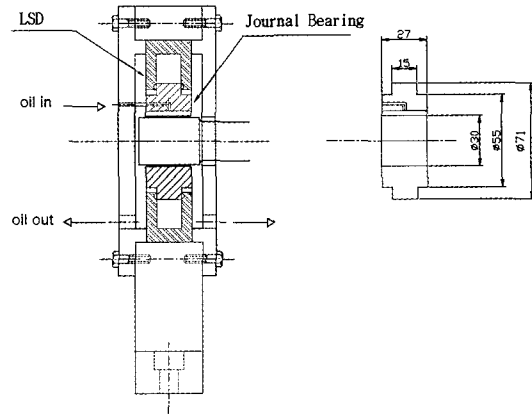


Fig. 2. Detail of LSD journal bearing.

에 플렉시블 커플링으로 연결되어서 벨트를 통한 진동이나 간섭을 최소화하고자 하였다.

Fig. 2는 저어널베어링과 LSD를 사용하여 회전축 양단을 지지하는 조립도이며 윤활유 공급이 저어널의 측면에 있는 구멍을 통하여 이루어진다. 베어링의 재질은 베어링 황동이며 상부에 직경 3 mm의 윤활유 급유구가 설치되어있고, 베어링의 내경과 길이의 치수는 각각 30.0 mm, 27.0 mm으로  $L/D=0.9$ 이다. 베어링의 반경틈새(clearance)는  $30\ \mu\text{m}$ 로 틈새비  $c/R=0.002$ 이다.

Fig. 3은 본 논문의 실험에 사용된 횡방향 겹판스프링댐퍼의 전체 조립도를 나타내었으며, 겹판스프링댐퍼의 내부에는 겹판스프링이 원주방향으로 등 간격으로 설치되어있다. 겹판스프링팩간에는 측면 커베에 만들어진 홈(groove)의 크기에 의하여 점성감쇠력을 조절할 수 있다.

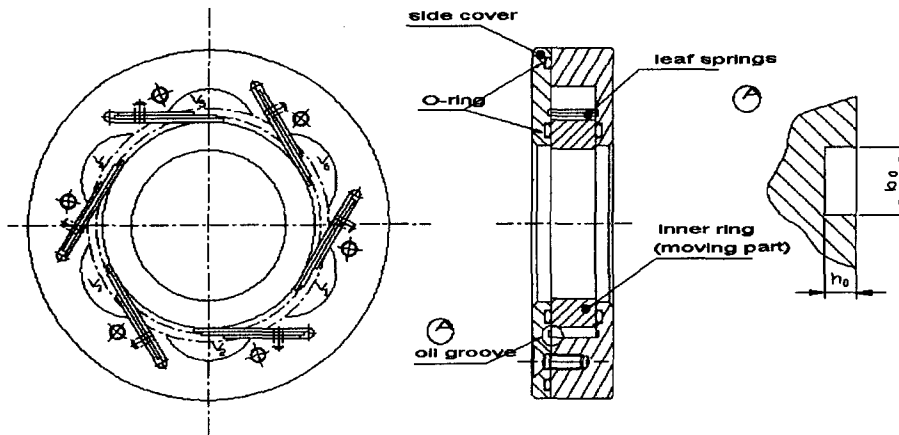


Fig. 3. A section view of leaf spring damper.

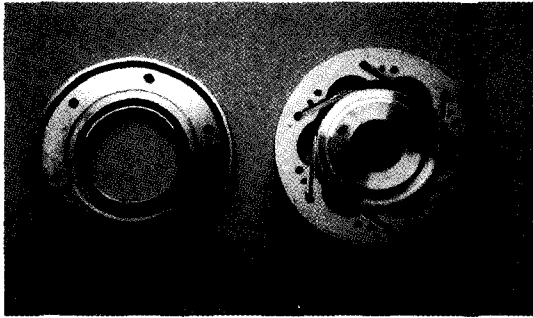


Fig. 4. Photography of LSD journal bearing.

Fig. 4는 저어널베어링과 LSD의 조립상태의 사진이며 저어널의 길이와 직경은 각각 33.6 mm와 29.94 mm이다. 저어널베어링 특성실험은 LSD에서 겹판스프링을 제거하고 저어널베어링 외부에 링을 삽입하여 조립을 할 수 있으며 이때에 LSD는 저어널베어링을 지지하는 역할을 하게되며 저어널베어링만의 특성실험을 할 수 있도록 설계하였다. 공급 윤활유의 점도는 68cSt (@40°C)이며 로타펌프(Rotor pump)를 이용하여 저어널베어링에 공급되어진다. 펌프의 출구측에 압력을 조절할 수 있는 By-pass 밸브와 윤활유 공급압력을 측정할 수 있는 압력계가 설치되어 있다. 모든 실험에서의 윤활유 공급압력은 3 kg/cm<sup>2</sup>로 일정하게 유지하였으며 윤활유량은 32.9 ml/min, 공급온도는 실온(20.1°C)으로 하였으며 윤활유는 저장 탱크 안의 필터를 통하여 오물이 제거되어 저어널베어링으로 공급된다.

실험은 3가지 경우에 대하여 수행하였으며 이는 저어널베어링만을 사용하였을 때와 오일이 없는 LSD와 저어널베어링을 사용할 때, 그리고 점성감쇠력을 얻기 위하여 오일을 채운 LSD와 저어널베어링을 사용할 때로 구분할 수 있다. 실험에 선행하여 회전축계의 불평형 질량을 제거하기 위한 평형잡기(balancing) 작업을 수행하였다. 평형잡기는 Diagnostic Instruments사의 실시간 FFT분석기(모델명:DI-2200)를 이용하여 초기 불평형 질량을 계측하였으며, 이때 10 g의 불평형이 나타났다. 평형잡기를 수행한 결과 0.006 g의 불평형 질량이 나타났고 그이상의 평형 잡기는 어렵다고 판단하여 이 상태에서 실험을 진행하였다.

실험은 회전축의 속도를 175 rpm씩 증가시키면서 그때의 진폭을 측정하였다. 속도의 증가시 X-Y 방향의 진폭을 관측하면서 오일 휩(oil whip)이 발생하는 시점까지 실험을 진행하였고 그 이상의 속도에서는 과도한 진동으로 인한 저어널과 베어링간의 접촉을 우려하여

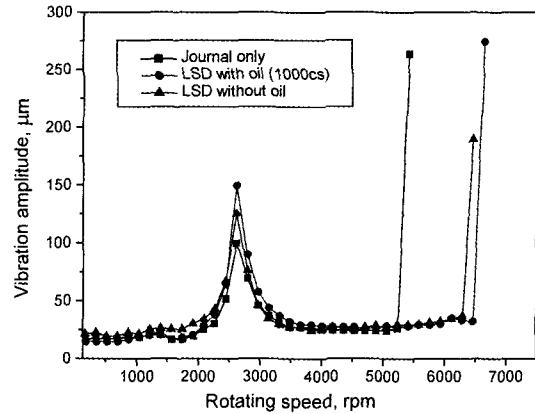


Fig. 5. Measured amplitude on the shaft.

중지하였다.

### 3. 실험결과

Fig. 5는 베어링부에서 83 mm 떨어진 지점에서 측정된 Y-방향(수직방향)의 진폭곡선을 나타내고 있다. 여기에는 저어널베어링만을 사용하였을 때와 저어널베어링에 진동절연장치인 LSD를 오일이 없는 상태로 장착하였을 때, 그리고 진동절연장치의 점성감쇠력을 추가하기 위해 실리콘오일(KF96-1000, 1000cSt(@25°C))을 LSD에 주입하였을 때의 진폭곡선을 비교하여 나타내었다.

저어널베어링만을 사용하였을 때의 오일 휩 발생속도는 5425 rpm로 이는 1차 위험속도인 2625 rpm의 거의 두 배임을 보여주고 있다. 그리고 오일이 없는 LSD를 추가하였을 때 오일 휩은 6475 rpm에서 발생하여 저어널베어링만을 사용할 때 보다 약 1050 rpm 이상에서 오일 휩이 발생하여 약 20%의 증대효과가 있음을 보여주고 있다. 또한 LSD에 점성감쇠를 증가시키기 위하여 LSD 내부에 실리콘오일(1000cSt)을 주입하였을 때의 경우는 오일 휩이 6650 rpm에서 발생하였다. 본 실험의 회전체에서는 실리콘 오일을 추가하여도 불안정 개시속도의 증가에는 별 영향이 없음을 알 수 있다. 그러나 회전축계의 강성계수와 저어널베어링의 강성계수와 감쇠계수에 따라 최적의 LSD의 동특성이 있을 것으로 사료되며 이와 같은 조건을 찾아서 실험을 수행할 필요가 있으며 차후의 연구과제가 될 것이다. 또한 1차 위험속도에서 저어널베어링만을 사용할 때 보다 LSD와 함께 사용하는 경우가 진폭이

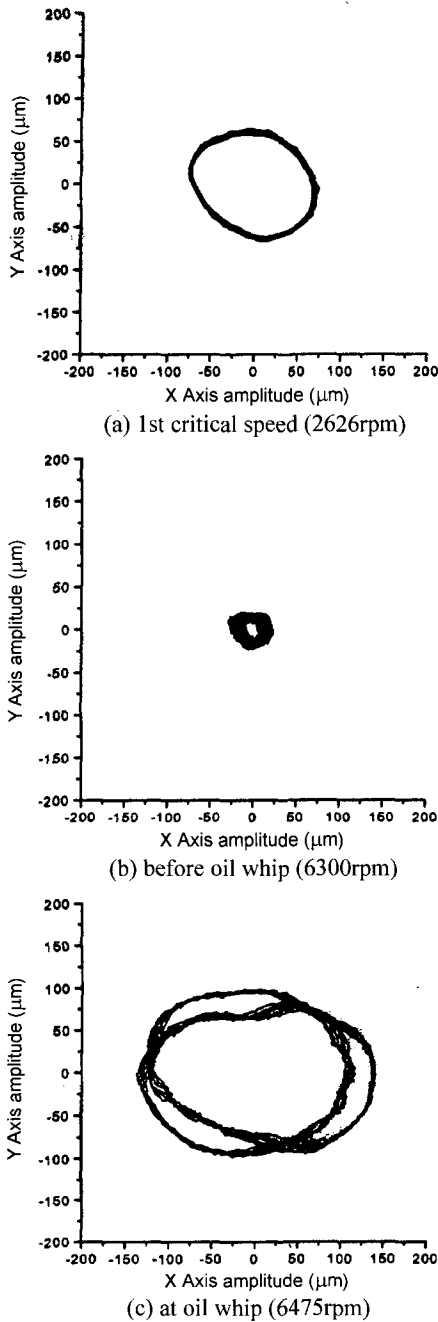


Fig. 6. Measured X-Y amplitude of the shaft in LSD journal bearing system.

더 큰 것으로 나타나고 있는데 이에 대하여는 좀 더 많은 실험을 통하여 밝혀져야 할 것으로 사료된다.

Fig. 6은 오일이 없는 LSD와 저어널베어링을 사용한 경우에 대한 회전축의 궤적을 1차 위험속도와 오일

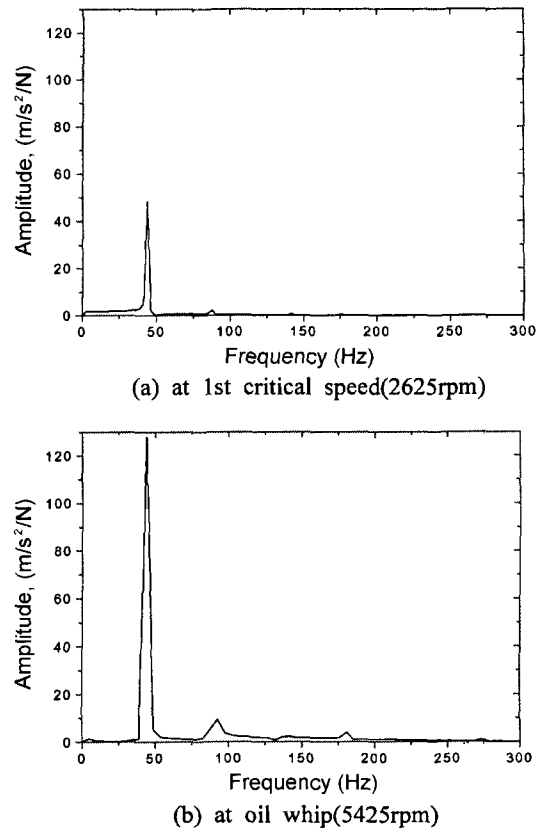


Fig. 7. Frequency analysis of shaft vibration in journal bearing only.

휩(oil whip) 발생 직전에서 그리고 오일 휩 발생지점에서 나타나고 있다. Fig. 6(c)에서 알 수 있듯이 오일 휩 발생지점에서는 진폭이 매우 크며 타원형 궤도가 겹쳐서 나타나고 있는데 이는 자전속도 보다 낮은 주파수 성분이 공전(whirling)하는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 저어널베어링만을 사용하였을 때의 1차 위험속도에서와 오일 휩 발생 시점에서의 주파수 분석을 나타내고 있다. 1차 위험속도에서는 주된 주파수 성분이 43.94 Hz로 이는 위험속도와 일치한다. 즉, 동조선 회전동(synchronous whirl)이 일어나고 있음을 의미한다. 반면에 오일 휩 발생지점에서의 주된 주파수 성분이 여전히 43.94 Hz로서 1차 위험속도와 동일한 속도로 선회진동(subsynchronous whirl)하고 있으며 자전속도(spin speed)에 해당하는 성분은 그 크기가 매우 작다. 따라서 불평형 질량에 의한 동조진동성분이 문제가 아니라 저어널베어링 고유한 특성에 의한 오일 휩(oil whip)이 발생됨을 보여주고 있다.

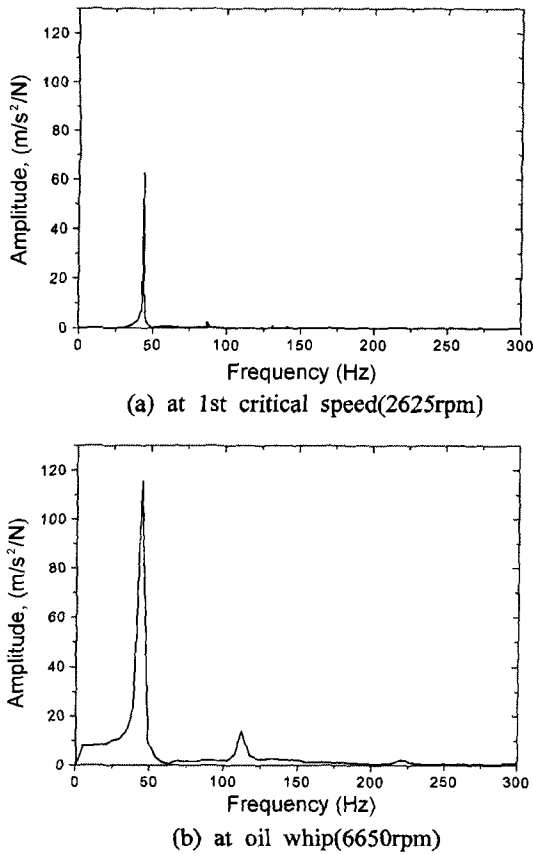


Fig. 8. Frequency analysis of shaft vibration in LSD journal bearing with oil.

Fig. 8은 오일이 없는 LSD와 저어널베어링을 사용하였을 때 1차 위험속도에서와 오일 휩 발생 지점에서의 주파수분석 결과이다. 1차 위험속도에서의 주된 주파수 성분은 자전속도와 동일하며 오일 휩 발생지점의 주파수 성분에서 여전히 1차 위험속도와 같은 속도로 선회진동을 하고 있음을 알 수 있다. 즉, 베어링외부의 상태가 바뀌어도 일단 오일 휩이 발생하면 항상 1차 위험속도와 같은 속도로 선회진동을 하게 됨을 보여주고 있다. 따라서 저어널베어링만을 사용할 때는 자전속도에 대한 회전축의 선회속도 비(whirl ratio)가 0.5 정도가 되지만 LSD를 함께 사용하면 오일 휩 발생속도는 증가하고 선회속도는 항상 1차 위험속도가 되기 때문에 0.5이하가 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 횡방향 진동절연장치로 개발된 겹판

스프링댐퍼(LSD)를 저어널베어링과 함께 사용함으로써 저어널베어링의 불안정 개시속도를 향상시킬 수 있을 것인가에 대하여 실험적으로 검증하고자 하였으며, 이를 정리하면 다음과 같다.

(1) 저어널베어링과 LSD 저어널베어링 그리고 LSD 저어널베어링의 감쇠를 증가시킬 때의 1차 고유진동수의 위치는 거의 변함이 없으며 그 진폭은 저어널베어링보다 LSD를 함께 사용하는 LSD 저어널베어링(LSD journal bearing)이 크게 나타난다.

(2) 불안정 진동현상인 오일 휩(oil whip)발생 시기는 일반적인 저어널베어링보다 LSD 저어널베어링이 20%이상 높은 회전수에서 발생한다. 그리고 점성감쇠를 증가시키기 위해서 실리콘 오일을 봉입한 경우는 오일을 사용하지 않은 LSD를 사용하는 경우에 비하여 별 효과가 나타나지 않았다.

(3) 진동특성의 주파수분석결과 1차 위험속도에서는 계의 불평형 질량에 의한 진동(synchronous whirl)임을 알 수 있었다. 저어널베어링만을 사용할때의 오일 휩 발생속도는 1차 위험속도의 두 배에서 발생하며 LSD 저어널베어링의 경우에는 그 보다 더 늦게 발생한다. 오일 휩(oil whip)이 발생할 때는 오일 휩의 발생속도와는 상관없이 항상 1차 위험속도와 같은 속도로 선회진동을 하게 되어 선회속도비(whirl ratio)는 항상 0.5 이하가 된다.

(4) 향후 LSD의 강성계수와 감쇠계수를 변화시키면서 실험을 수행할 필요가 있으며, 이를 통하여 각 회전체계의 특성에 따른 LSD의 강성계수 및 감쇠계수의 최적조건에 대한 결과를 알 수 있게 될 것이다.

후 기

본 연구는 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 김종수, 최상규, 유광택, “내측유막으로의 공급유량이 플로팅 링 저어널베어링의 성능에 미치는 영향,” 한국윤활학회지, Vol.15, No.1, pp.98-107, 1999.
2. 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.
3. Trippet, R.J., and Li, D.F., “High-Speed Floating-Ring Bearing Test and Analysis,” ASLE Trans., Vol.

- 27, pp.73-81, 1984.
4. Tanaka, M., and Hori, Y., "Stability Characteristics of Floating Bush Bearings," ASME J. of Lub. Tech., Vol.94, pp.248-259, 1972.
  5. Li, C.H., "Dynamics of Rotor Bearing Systems Supported by Floating Ring Bearings," ASME J. of Lub. Tech., Vol.104, pp.469-477, 1982.
  6. 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.
  7. 김종수, 김상도, 제양규, "겹판스프링맴퍼에서 측면틀새에 의한 감쇠력 조절," 한국윤활학회지, Vol.16, No.1, pp.27-32, 2000.
  8. 제양규, 김종수, 정시영, 홍성욱, "겹판스프링을 이용한 횡방향 진동절연장치," 대한기계학회 논문집 A, Vol.22, pp.843-858, 1998.
  9. 제양규, 김종수, 홍성욱, "겹판스프링을 이용한 회전축의 횡진동 흡수장치 개발," 한국진동소음학회, 1999년 춘계 학술대회, pp.283-286.