

## 고속 회전 터보 기기용 포일 베어링의 불안정 진동 제진에 관한 연구

이용복\* · 김태호\* · 김창호\* · 이남수\*\* · 최동훈\*\*

### A Study on the Suppression of Instability Whirl of a Foil Bearing for High-Speed Turbomachinery beyond the Bending Critical Speed

Yong-Bok Lee\*, Tae-Ho Kim\*, Chang-Ho Kim\*,  
Nam-Soo Lee\*\*, Dong-Hoon Choi\*\*

*Key Words: Viscoelastic Foil Bearing (VEFB), Bump Bearing, Super-Bending-Critical Operation, Structural Dynamic Coefficient, Viscoelasticity*

#### ABSTRACT

A new foil bearing, ViscoElastic Foil Bearing(VEFB) is suggested with the need for a high damping foil bearing. Sufficient damping capacity is a key technical hurdle to super-bending-critical operation as well as widespread use of foil bearings into turbomachinery. The super-bending-critical operation of the conventional bump foil bearing and the VEFB is examined, as well as the structural dynamic characteristics. The structural dynamic test results show that the equivalent viscous damping of the VEFB is much larger than that of the bump bearing, and that the structural dynamic stiffness of the VEFB is comparable or larger than that of the bump bearing. The results of super-bending-critical operation of the VEFB indicate that the enhanced structural damping of the viscoelastic foil dramatically reduces the vibration near the bending critical speed. With the help of increased damping resulting from the viscoelasticity, the suppression of the asynchronous orbit is possible beyond the bending critical speed.

#### 1. 서 론

포일 베어링은 윤활제로 공기 또는 다른 유체를 사용하는 동압 베어링 (hydrodynamic bearing)으로서 설계 단순화, 경량화, 고속화, 고온화 등 많은 장점을 얻을 수 있

으며, 이러한 장점들은 최근 터보 기계류의 개발 경향과도 잘 부합된다. 또한 포일 베어링 하우징 표면에 탄성체가 장착되어 있기 때문에 마찰 손실이 적어지며, 고속에서의 안정성이 다른 베어링에 비해서 높고, 외부 불순물 유입에 대해서 둔감하며, 열이나 고속에서의 원심력에 의한 간극 변화에도 그 기능을 발휘할 수 있게 된다.

그러나 포일 베어링의 이러한 장점에도 불구하고 하중지지 능력, 감쇠 능력, 고온 코팅과 해석 기술의 한계

\* 한국과학기술연구원 트라이볼로지 연구센터

\*\* 한양대학교 기계설계공학과

E-mail : lyb@kist.re.kr

로 인하여 1970년대에는 주로 ACM (Air Cycle Machine) 등 저하중의 제한적인 영역에서 사용되어져 왔으나<sup>(1)</sup>, 하중지지 능력의 증가, 코팅 기술의 발전과 해석 기술의 발전으로 인하여 적용 분야가 점점 더 넓어지고 있다. 하중지지 능력은 다엽, 범프와 이를 보완한 여러 가지 형태를 이용하여 증가하고 있으며<sup>(2)</sup>, 특히 Heshmat는 서로 크기가 다른 범프를 사용함으로써 두 배 정도 증가된 하중지지 능력을 얻었다<sup>(3)</sup>. 이러한 하중지지 능력의 증가로 인해 터보 압축기(Turbo-compressor), 터보 펌프(Turbopump)등 점차적으로 고하중이 요구되는 부분으로 적용 분야가 확대되고 있다<sup>(4),(5)</sup>. 코팅 부분에서는 과거 PTFE, MoS2등을 사용하여 300℃보다 낮은 온도에서 사용하였으나<sup>(6)</sup>, 고온에서의 코팅 기술이 발전함에 따라 터보 차저(Turbo-charger)와 같은 고온에서의 적용이 검토되고 있다<sup>(7)</sup>.

포일 베어링의 기술적인 발전으로 인해 점차적으로 그 사용 범위가 넓어지고 있으나 보다 광범위하게 터보 기기에 적용되기 위해서는 안정성과 관련한 감쇠 성능 향상은 매우 중요하다<sup>(8)</sup>. 특히 포일 베어링의 감쇠 기구는 주로 마찰력(Coulomb friction)에 의존하고 있기 때문에 감쇠가 적으며, 진동의 크기가 한계치보다 커지면 불안정한 단점을 가지고 있다. 감쇠면에서 포일 베어링의 이러한 단점을 보완하기 위해서 본 논문에서는 새로운 구조를 지닌 점탄성 포일 베어링(ViscoElastic Foil Bearing, VEFB)을 제안하고자 한다. 또한 제안된 점탄성 포일 베어링의 성능을 점탄성 포일 베어링의 가진 실험과 굽힘 모드 운전 실험을 통해서 입증하고자 한다.

## 2. 점탄성 포일 베어링과 가진 실험

### 2.1 점탄성 포일 베어링의 구조 및 작동 원리

Fig. 1에 나타난 바와 같이, 점탄성 포일 베어링(ViscoElastic Foil Bearing, VEFB)은 탑 포일(top foil), 점탄성 포일(viscoelastic foil), 심 포일(shim foil), 그리고 범프 포일(bump foil)로 구성되어져 있다. SUS 301로 된 탑 포일(top foil)은 폭이 35mm이며, 길이는 원주 방향으로 355도에 해당하도록 되어있다. 시동과 정지 시 축과의 마찰 및 마멸을 줄이기 위하여 탑 포일 윗 면에 이황화몰리브덴(MoS2) 고체 윤활 코팅을 하였으며, 베어링에 설치되기 전에 성형하였다. 점탄성 포일(viscoelastic foil)은 아크릴로 구성된 폴리머로 되어있으며, 탑 포일과 범프 포일 사이에 설치되어있다. 범프 포일(bump foil)은

심 포일과의 마찰을 증대시키기 위하여 동도금을 수행하였으며, 성형한 후에 심 포일과 점탄성 포일 사이에 설치되었다. 심 포일(shim foil)은 탑 포일과 같은 재질로 되어있으며, 베어링 표면의 손상을 방지하기 위하여 베어링 하우징과 범프 포일 사이에 설치되어있다. 베어링에 대한 보다 자세한 사항을 Table 1에 나타내었다.

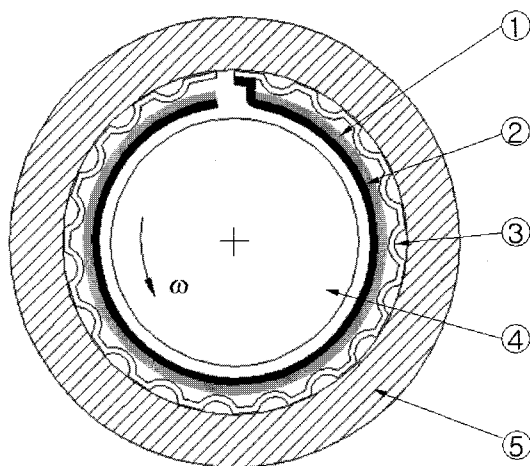


Fig. 1 Foil bearing supported super critical rotor ① viscoelastic foil, ② top foil, ③ bump foil, ④ shaft, ⑤ sleeve

Table 1. Viscoelastic foil bearing configuration

Bearing length(mm)	35
Bearing diameter(mm)	35.45
Approximate running diametral clearance(mm)	0.05 - 0.07
No. of pad	1
<i>Top foil :</i>	
Foil thickness(mm)	0.12
Foil radius(mm)	20
Foil material(mm)	SUS301
Foil coating	MoS2
<i>Bump foil :</i>	
Bump pitch(mm)	3.1
Bump length(mm)	2.6
Bump height(mm)	0.45
No. of bumps	1
Foil thickness(mm)	0.1
Foil material	SUS301
Foil coating	copper
<i>Viscoelastic foil :</i>	
Foil material	acrylic polymer
Foil thickness(mm)	0.1

상기한 구조를 가지는 점탄성 포일 베어링의 강성은 주로 범프 포일의 구조에 주로 의존하게 되며, 감쇠는 주로 점탄성 포일의 구조에 주로 의존하게 된다. 이에 대한 개념을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 탑 포일 위에서 동압이 발생하게 되면, 탑 포일 아래에 위치한 점탄성 포일이 에너지를 소산시키게 되며 이로 인해서 감쇠력이 발생하게 된다. 이렇게 추가적으로 발생하게 되는 감쇠력으로 인해 기존의 포일 베어링이 가지는 단점을 보완할 수 있게 된다. 이러한 점탄성 포일 베어링의 장점을 증명하기 위해서 본 논문에서는 가진 실험과 굽힘 모드 운전 실험을 수행하였다.

## 2.2 점탄성 포일 베어링 가진 실험 장치

점탄성 포일 베어링의 구조적 강성과 감쇠 계수를 추출하기 위하여 각각 포일에 대하여 가진 실험을 수

행하였다. 실험 장치의 사진과 주요부분의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 회전축은 양단에 볼베어링(④)으로 지지되며, 베어링 슬리브(⑤) 내에 포일이 장착되어 있다. 베어링 슬리브(⑤)의 총 질량은 5.2kg이며, 포일(⑨)에 작용하는 초기 정하중을 조절하고 측정하기 위하여 공압 실린더에 의해 힘이 추가되는 철선 와이어(①)와 힘 센서(②)를 장착하였다. 점탄성 포일 베어링의 하중지지 능력을 측정하기 위하여 공기 터빈(③)이 설치되어 있다. 변위 센서(⑥)는 서로 수직 방향으로 두 개씩 베어링 슬리브(⑤) 양끝에 설치되어, 포일(⑨)의 변형을 측정하였다. 공간 제약으로 인하여 가진기(⑦)는 변위 센서(⑥)와 원주 방향으로 45도 차이 나도록 설치되어 베어링 슬리브(⑤) 내에 있는 포일(⑨)을 가진하도록 되어있다. 또한 가진기(⑦) 끝 부분에는 힘 센서와 가속도계(⑧)가 설치되어, 포일(⑨)에 가진되는 힘과 그 때의 가속도를 측정할 수 있도록 되어있다.

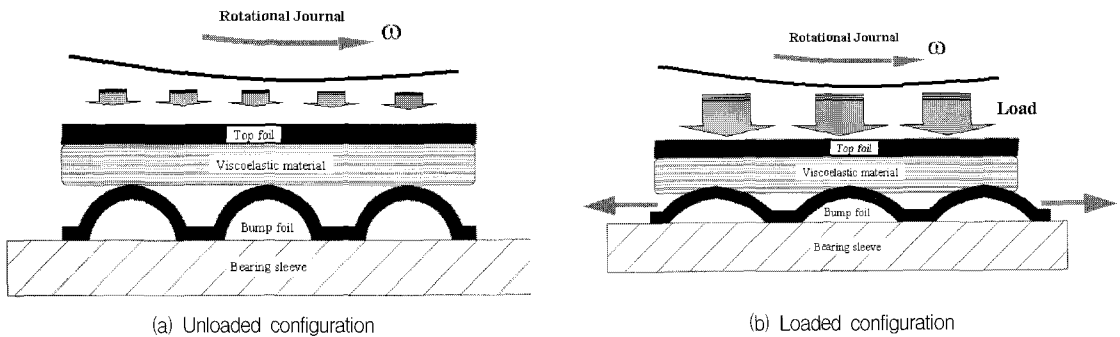


Fig. 2 Schematic diagram of the viscoelastic foil bearing

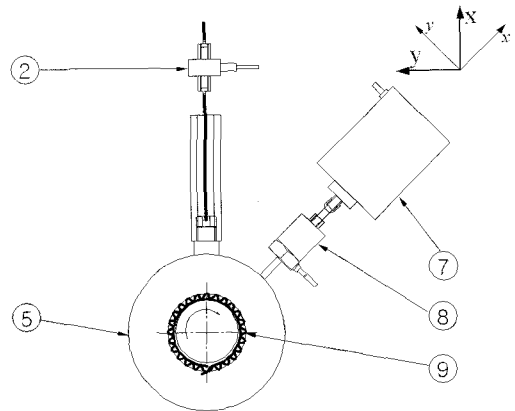
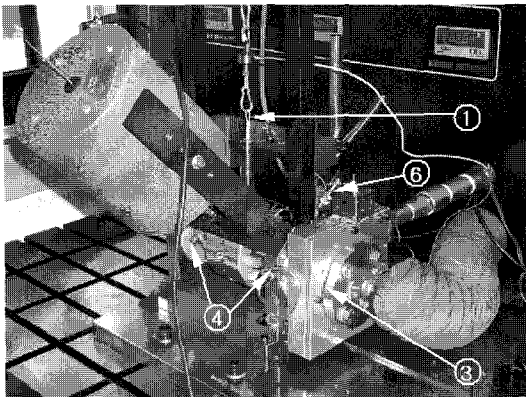


Fig. 3 Bump foil journal bearing test apparatus

- ① loading wire ② load cell ③ air turbine ④ ball bearings ⑤ test foil bearing sleeve
- ⑥ gap sensors ⑦ shaker ⑧ force transducer and accelerometer ⑨ test foils

이렇게 설치된 실험 장치를 이용하여, 가진 시의 가진력, 베어링 슬리브의 가속도, 그리고 포일의 변형을 측정하였다.

### 2.3 점탄성 포일 베어링 가진 실험 방법 및 결과

앞 서 설명한 실험 장치에서 가진력의 크기와 주파수, 그리고 포일의 변형을 측정하면 베어링의 구조적 강성과 감쇠는 다음과 같은 식을 이용하여 추출할 수 있다.

$$\{K\} = [d]^{-1}(\{F\} - \{A\}) \quad (1)$$

여기서,  $\{K\}$ ,  $\{F\}$ ,  $\{A\}$ , 그리고  $[d]$ 는 본 논문의 부록에 나타내었다. 포일 베어링의 구조적 강성과 감쇠는 가진력의 주파수와 포일의 변형에 따라 변할 수 있기 때문에, 본 논문에서는 가진력의 주파수는 150, 200, 250 Hz에 대해서 포일의 변형은 1.0, 1.5, 2.0 2.5mm에 대해서 각각 강성과 감쇠를 측정하였다. 또한 가진력 방향과 변형을 측정하는 방향이 45도 차이가 나기 때문에 좌표 변환 후 강성과 감쇠를 산정하였다.

점탄성 포일 베어링의 감쇠 성능을 비교하기 위하여 기존의 범프 포일 베어링의 구조적 강성과 감쇠를 비교 측정하였으며, 이에 대한 결과를 각각 Fig. 4(a)와 4(b)에 나타내었다. Fig. 4(a)에서 점탄성 포일 베어링의  $C_{xx}$ 가 범프 포일 베어링의  $C_{xx}$ 에 비해서 높게 나타났다. 이에 반해서 점탄성 포일 베어링의  $C_{yy}$ 가 범프 포일 베어링의  $C_{yy}$ 에 비해서 낮게 나타났다. 베어링에 정하중이 가해지는 방향이 연직 방향이기 때

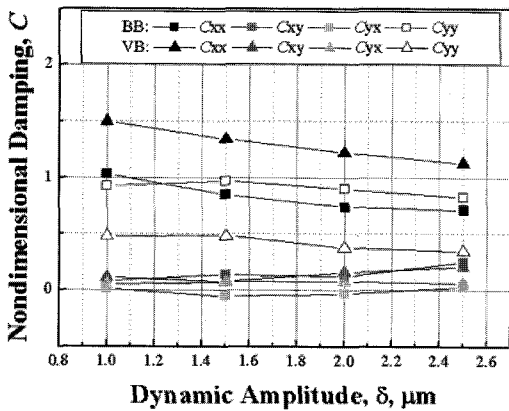
에 포일 베어링을 실제 적용 시 진동을 감소시키는 데에  $C_{xx}$ 가 대부분의 역할을 하게 된다. 점탄성 포일 베어링의  $C_{xx}$ 가 높게 나타난 이유는 점탄성 포일 베어링이 기존의 범프 포일 베어링에 비해서 에너지를 소산할 수 있는 능력이 높기 때문이다. 이러한 감쇠 성능의 향상은, 점탄성 포일 베어링이 터보 기기의 진동을 줄이는 데에 효과적으로 사용될 수 있음을 의미한다. Fig. 4(b)에서 점탄성 포일 베어링의  $K_{xx}$ 가 범프 포일 베어링의  $K_{xx}$ 에 비해서 약간 높게 나타났으며, 점탄성 포일 베어링의  $K_{yy}$ 가 범프 포일 베어링의  $K_{yy}$ 에 비해서 약간 낮게 나타났으나, 감쇠 성능의 변화에 비해서는 그 효과가 적음을 알 수 있다.

이러한 강성과 감쇠 성능의 변화를 효과적으로 표현하기 위하여 기존의 범프 포일 베어링에 대한 점탄성 포일 베어링의 강성과 감쇠 변화율을 다음과 같이 정의하였다.

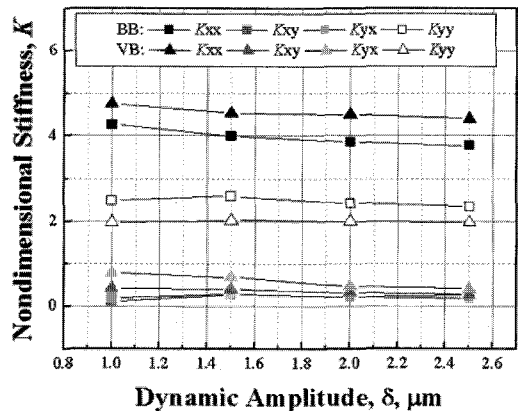
$$\Delta K_{xx} = (K_{xx}^{VB} - K_{xx}^{BB})/K_{xx}^{BB} \quad (2)$$

$$\Delta C_{xx} = (C_{xx}^{VB} - C_{xx}^{BB})/C_{xx}^{BB} \quad (3)$$

베어링 가진 실험에 대한 강성과 감쇠 변화율을 Fig. 5(a)와 5(b)에 각각 나타내었다. Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이 본 논문에서 수행한 실험 영역 전체에서 감쇠 변화율이 강성 변화율에 비해서 높게 나타났다. 이는 점탄성 포일이 베어링의 강성 성능에 비해서 주로 감쇠 성능을 높이는 데에 크게 기여하고 있음을 알 수 있다. 베어링 감쇠 변화율은 대략 0.2에서 0.8

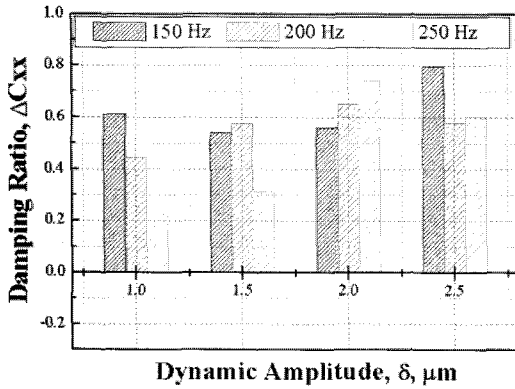


(a) Nondimensional damping

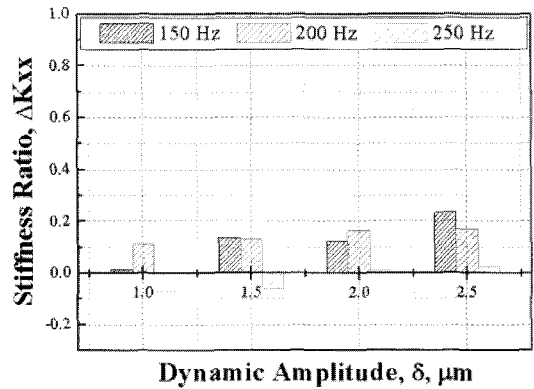


(b) Nondimensional stiffness

Fig. 4 Comparison of the structural dynamic coefficient between the BB and VB (excitation frequency : 200Hz) (BB : the conventional bump foil bearing, VB : viscoelastic foil bearing)



(a) Damping ratio



(b) Stiffness ratio

Fig. 5 Comparison of the structural dynamic coefficient ratio

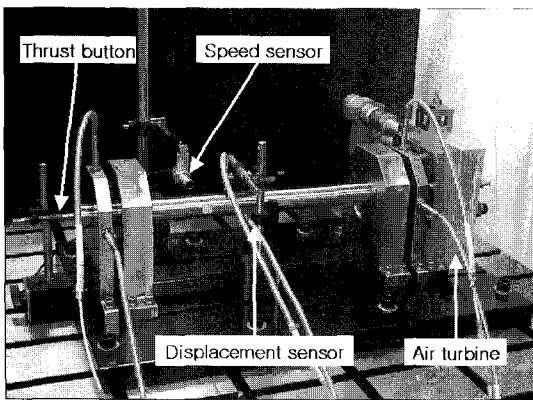


Fig. 6 Foil bearing supported super critical rotor

도까지 분포하고 있으며, 이러한 감쇠 성능의 증가는 터보 기기의 안정성을 높이는 데에 효과적으로 사용될 수 있음을 의미한다.

### 3. 연성 회전체의 굽힘 모드 운전 실험

#### 3.1 굽힘 모드 운전 실험 장치

점탄성 포일 베어링의 구조적 감쇠 증가가 실제 시스템에 적용되었을 때의 진동 감소 효과를 고찰하기 위하여 Fig. 6에 나타난 바와 같이 굽힘 모드 운전이 가능한 실험 장치를 설계 제작하였다. 두 개의 점탄성 포일 베어링으로 지지되는 로터의 중량은 5 kg, 길이는 594 mm, 지름은 35 mm이며, 터빈으로 구동되도록 제작하였다. 로터의 자유단에는 스톱 버튼을 설치하여 축 방향으로의 움직임을 제한하였다. 설계 제작된 로터의 고유

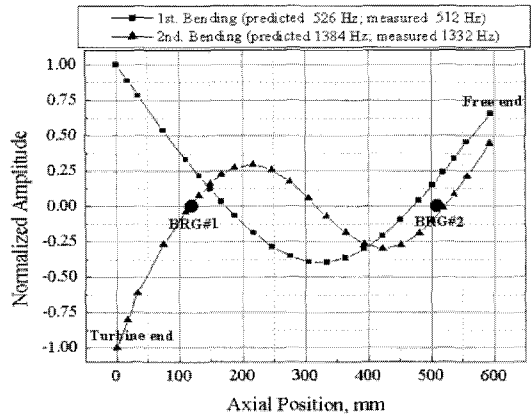


Fig. 7 Free-free bending modes of the rotor

진동수를 측정된 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 설계 시 고유 진동수는 유한 요소법을 이용하여 예측하였으며, 측정 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 로터의 진동은 6개의 변위 센서를 이용하여 각각 자유단, 로터 중심, 터빈에서 측정하였다.

#### 3.2 굽힘 모드 운전 실험 결과

점탄성 범프 포일 베어링으로 지지되었을 때의 진동을 범프 포일 베어링으로 지지되었을 때의 진동과 비교해서 Fig. 8~10에 나타내었다. Fig. 8, 9, 10에는 각각 20,000 RPM, 30,000 RPM, 50,000 RPM에서의 진동 궤도를 나타내었으며 각 베어링에 대하여 로터의 위치에 따른 진동궤도의 경향이 모두 비슷하므로 자유단과 터빈부에서의 진동 측정치만을 나타내었다. 첫 번째 굽힘 모드보다 낮은 운전 속도인 20,000 RPM에서는

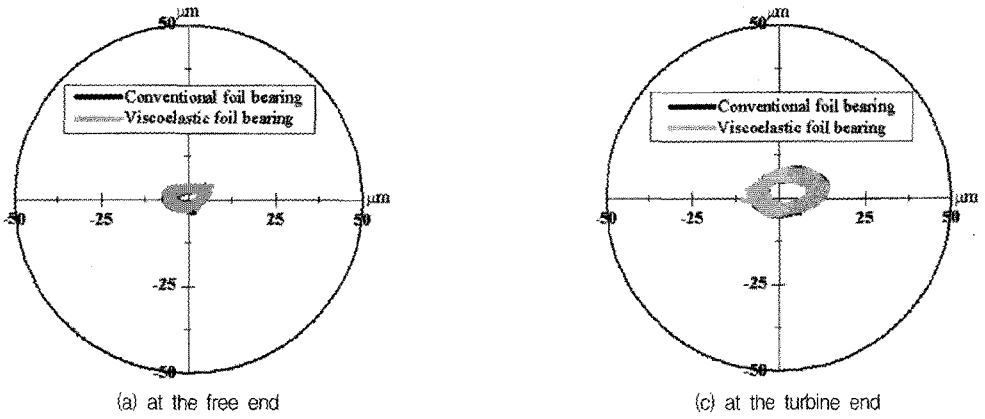


Fig. 8 Comparison of the vibration orbits between the conventional bump and viscoelastic bearing at the 20,000 RPM

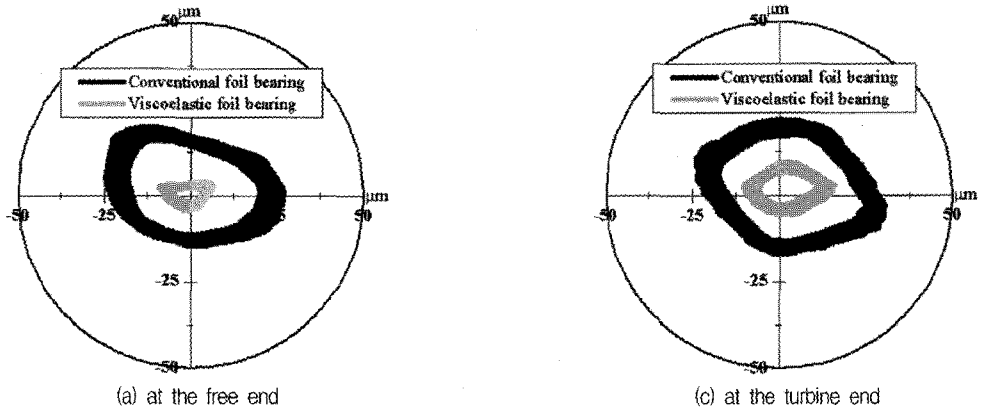


Fig. 9 Comparison of the vibration orbits between the conventional bump and viscoelastic bearing at the 30,000 RPM

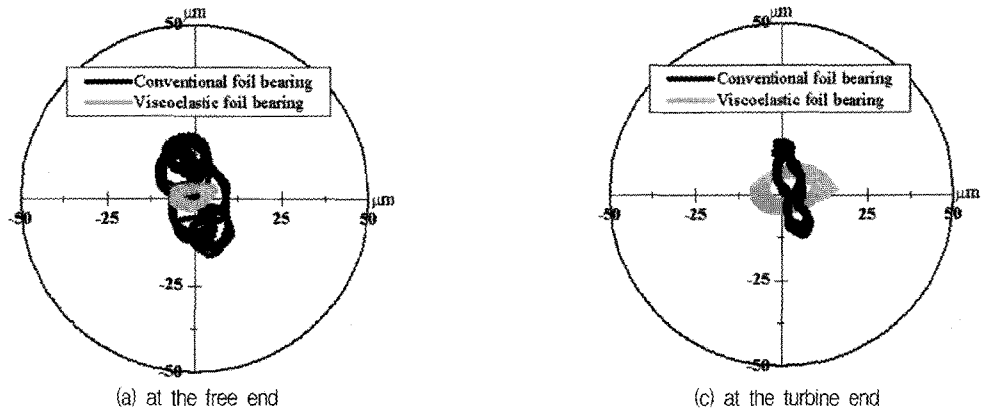


Fig. 10 Comparison of the vibration orbits between the conventional bump and viscoelastic bearing at the 50,000 RPM

모든 위치에서 진동의 크기가 비슷함을 알 수 있다. 그러나 첫 번째 굽힘 모드가 발생하는 30,000 RPM에서는 점탄성 포일 베어링으로 지지되었을 때의 진동이

기존의 범프 포일 베어링을 지지되었을 때보다 확연하게 줄어들음을 알 수 있다. 이는 점탄성 포일 베어링의 감쇠 성능이 기존의 범프 베어링에 비해서 월등히 높

기 때문이다. 40,000 RPM에서의 결과는 다른 회전속도에서의 경향과 비슷하기 때문에 본 논문에서는 생략하였다. 50,000 RPM, 즉 첫 번째 굽힘 모드보다 높은 운전 속도에서 기존의 범프 포일 베어링의 경우에는 비선형성에 기인한 진동이 발생함을 알 수 있다. 그러나 점탄성 포일 베어링의 경우에는 증대된 감쇠 성능으로 인해 이러한 진동이 발생하지 않음을 알 수 있다. 즉 점탄성 포일 베어링의 증대된 감쇠 성능은 로터의 진동을 줄이는 데에 효과적인 뿐만 아니라, 비선형성에 기인한 진동 또한 없애는 데에 도움이 됨을 알 수 있다.

#### 4. 결론 및 토의

본 논문에서는 감쇠 성능이 향상된 점탄성 포일 베어링을 처음으로 제안하였으며, 제안된 베어링에 대한 감쇠 성능을 입증하기 위하여 베어링 가진 실험과 굽힘 모드 운전 실험을 수행하였다. 가진 실험에서 점탄성 포일 베어링의 감쇠 성능은 기존의 범프 포일 베어링에 비하여 최대 80%정도 향상된 결과를 나타내었다. 굽힘 모드 운전 실험에서 점탄성 포일 베어링의 진동은 기존의 범프 포일 베어링에 비하여 진동의 크기면에서 최대 3배 이상 감소하였다. 또한 기존의 범프 포일 베어링에서 발생했던 비선형 진동 또한 점탄성 포일 베어링의 경우에는 발생하지 않았다.

상기한 결과에 의거하여 점탄성 포일 베어링의 감쇠 성능은 기존의 범프 포일 베어링보다 우수함을 알 수 있다. 본 논문에서 제안된 점탄성 포일 베어링은 실제 고속 터보 기기에 효과적으로 적용될 수 있으리라 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부가 지원하는 특정연구개발사업 중 중점국가연구개발사업(기체설비요소기술개발)으로 지원되어 수행하였습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Heshmat, H., 1991, "A Feasibility Study on the Use of Foil Bearings in Cryogenic Turbopumps," AIAA-91-2103-CP.
- (2) 이용복, 김창호, 김태호, 이남수, 2001, "일체형 다

엽/범프 공기 포일 저널 베어링 및 다엽/범프 포일의 제작 방법," 한국특허출원, 10-2001-000326.

- (3) Heshmat, H., 1994, "Advancements in the Performance of Aerodynamic Foil Journal Bearings High Speed and Load Capacity," ASME J. of Trib., Vol. 116, pp. 287~295.
- (4) 이용복, 김태호, 김창호, 이남수, 최동훈, 2001, "이단 압축기의 동력학적 설계 및 운전 특성에 관한 연구," 2001 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 469-474.
- (5) Saville, M., Gu, A., Capaldi, R., 1991, "Liquid Hydrogen Turbopump Foil Bearing," AIAA/SAE/ASME/ASEE 27th Joint Propulsion Conference, AIAA-91-2108.
- (6) Newman, P., 1977, "Surface Coatings for Machine Elements Having Rubbing Surface," U.S. Patent No. 4,005,914.
- (7) Howard, S. A., 1999, "Rotordynamics and Design Methods of an Oil-Free Turbocharger," NASA/CR-1999-208689.
- (8) Bhushan, B., 2001, *Modern Tribology Handbook*, CRC Press.

#### 부 록

가진력의 크기와 주파수, 포일의 변형을 측정하면 베어링의 구조적 강성과 감쇠는 다음과 같은 식을 이용하여 추출할 수 있다.

$$\{K\} = [d]^{-1} (\{F\} - \{A\}) \quad (1)$$

여기서,  $\{K\}$ ,  $\{F\}$ ,  $\{A\}$ , 그리고  $[d]$ 는 각각 동적 계수 벡터, 가진력 벡터, 가속도 벡터, 그리고 시스템 응답 매트릭스를 나타내며, 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$\{K\}^T = \{K_{yy}, K_{yx}, K_{xy}, K_{xx}, \Omega C_{yy}, \Omega C_{xy}, \Omega C_{yx}, \Omega C_{xx}\} \quad (A1)$$

$$[d] = \begin{bmatrix} d_1 & d_3 & 0 & 0 & -d_2 & -d_4 & 0 & 0 \\ d_2 & d_4 & 0 & 0 & d_1 & d_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d_1 & d_3 & 0 & 0 & -d_2 & -d_4 \\ 0 & 0 & d_2 & d_4 & 0 & 0 & d_1 & d_3 \\ d_5 & d_7 & 0 & 0 & -d_6 & -d_8 & 0 & 0 \\ d_6 & d_8 & 0 & 0 & d_5 & d_7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d_5 & d_7 & 0 & 0 & -d_6 & -d_8 \\ 0 & 0 & d_6 & d_8 & 0 & 0 & d_5 & d_7 \end{bmatrix} \quad (A2)$$

$$\begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \\ d_5 \\ d_6 \\ d_7 \\ d_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{yy} \cos \gamma_{yy} \\ d_{yy} \sin \gamma_{yy} \\ d_{yx} \cos \gamma_{yx} \\ d_{yx} \sin \gamma_{yx} \\ d_{xy} \cos \gamma_{xy} \\ d_{xy} \sin \gamma_{xy} \\ d_{xx} \cos \gamma_{xx} \\ d_{xx} \sin \gamma_{xx} \end{pmatrix} \quad (A3)$$

$$\{A\} = \begin{pmatrix} A_{yy} \cos \gamma_{yy} \\ A_{yy} \sin \gamma_{yy} \\ A_{yx} \cos \gamma_{yx} \\ A_{yx} \sin \gamma_{yx} \\ A_{xy} \cos \gamma_{xy} \\ A_{xy} \sin \gamma_{xy} \\ A_{xx} \cos \gamma_{xx} \\ A_{xx} \sin \gamma_{xx} \end{pmatrix} \quad (A5)$$

$$\{F\} = \begin{pmatrix} F_y \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ F_x \\ 0 \end{pmatrix} \quad (A4)$$

여기서  $K_{ij}$ ,  $C_{ij}$ ,  $F_i$ ,  $\Omega$ ,  $d_{ij}$ , 그리고  $\gamma_{ij}$ 는 각각 베어링의 강성 및 감쇠, 가진력의 크기 및 주파수, 축과 하우징간의 상대 변위에 대한 진폭과 위상각을 나타낸다.