

# 고속 공기 포일 베어링의 정적·동적 특성에 관한 실험적 연구

조준현, 이용복<sup>†</sup>, 김창호<sup>1</sup>(한국과학기술연구원 트라이블로지연구센터)  
임윤철<sup>2</sup>(연세대학교 기계공학부)

## An Experimental Study on the Static and Dynamic Characteristics of High Speed Air Foil Bearings

<sup>1</sup>Jun-Hyeon Jo *jhjo@kist.re.kr*, Yong-Bok Lee<sup>†</sup> *lyb@kist.re.kr*,  
Chang-Ho Kim(Tribology Research Center, KIST) *kimch@kist.re.kr*,  
<sup>2</sup>Yoon-Chul Rhim (Mech. Eng. Dept., Yonsei Univ.) *rhimyc@yonsei.ac.kr*

### ABSTRACT

Experiments were conducted to determine the structural static and dynamic characteristics of air foil bearings. The housing of the bearing on the journal was driven by an impact hammer which was used to simulate dynamic forces acting on the bump foil with various loading condition. Two different bump foils (Cu-coated bump and viscoelastic bump) were tested and the static and dynamic coefficients of two bump foils compared, based on the experimental measurements for a wide range of operating conditions. The static and dynamic characteristics of air foil bearings were extracted from the frequency response function by least square method and IV(Instrumental Variable) method. The experiment was tested at 0rpm and 10,000~16,000rpm, and loaded on 50~150N. From the test results, the possibility of the application of high load and high speed condition is suggested.

**Keywords :** Air foil bearing, Dynamic characteristics, Stiffness matrix, Load capacity, Least square method, FRF(Frequency Response Function).

### 1. 서론

최근 우주 및 항공 분야에서 사용되는 회전 기기들은 계속적으로 고속화가 요구되고 있으며, 이로 인해 기존에 사용된 볼 베어링(ball bearing)이나 오일 베어링(oil bearing)을 대체할 수 있는 공기 포일 베어링(air foil bearing)에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 1970년대부터 사용된 공기 포일 베어링은 포일의 신축성(resiliency)이 우수하며, 고속회전시 보다 안정하게 작동되는 다엽(multi leaf) 형태를 지닌 다엽 베어링이 있다. 최근에는 높은 강성을 갖는 범프(bump)를 사용함으로써, 하중지지력과 감쇠력의 측면에서 상당한 장점을 가진 범프 포일 베어링(bump foil bearing)에 관한 연구가 진행 중에 있다. 특히 하중지지 능력을 나타내는 척도중 하나인 하중지지력(bearing load capacity)에 관한 실험 및 해석이 병행되고 있으며, 이에 관련되어, 범프 포일의 동적 계수가 전체 베어링의 강성과

감쇠 값에 영향을 미친다는 것을 Peng이 수치 해석을 통하여 밝혔으며, Heshmat 은 범프 포일의 동적 계수를 추출하여 그 특성을 파악한 바 있다. [1-3]

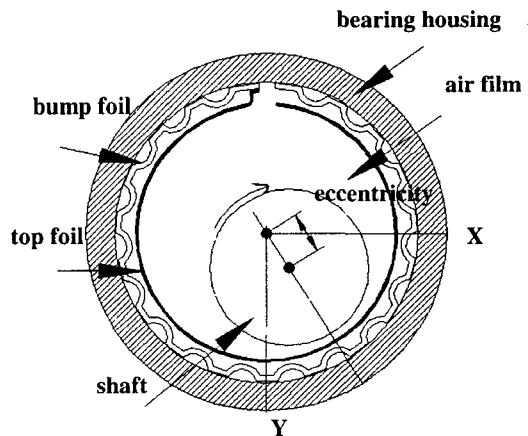


Fig. 1 Bump foil bearing configuration

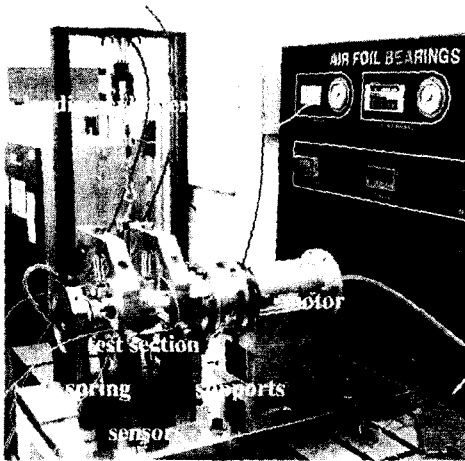


Fig. 2 Air foil bearings test rig

공기 포일 베어링은 탑 포일(top foil)과 범프 포일(bump foil)로 이루어진다. 상부 표면을 고체 윤활 코팅한 탑 포일은 범프 포일 위에 장착되어 윤활 틈새를 부드럽게 만들어 주는 역할을 하며, 범프 포일은 범프 형태의 굴곡 형상이 여러 개 모여서 이루어지는 것으로, 하중지지력을 높이는 역할을 한다. 또한 탑 포일과 범프 포일 간에는 마찰력이 작용하는데 이러한 접촉 마찰은, 구동시의 불안정 요소를 감소시킬 수 있는 감쇠력을 향상시킨다. 이러한 공기 포일 베어링의 구조를 Fig. 1 에 나타내었다. 포일 베어링이 사용되는 최근의 회전 기기들은 효율을 향상시키고자 임계 속도 이상에서 운전 속도를 갖도록 한 시스템이 증가하는 추세이다. 하지만, 공기가 갖는 저 점도

특성에 기인한 문제로, 고속에서의 안정성이 상대적으로 취약하여, 그 설계 및 운전이 매우 제한이 된다. 고속으로 회전하고, 고하중이 작용하는 회전 기기에 적용하기 위해서는 포일 베어링의 안정성(stability)과 신뢰성(reliability)에 대한 연구가 요구된다. 따라서 범프 포일 베어링의 구조적인 강성 및 감쇠 특성뿐만 아니라 고속 운전시 동압에 의하여 발생하는 유막력에 의한 효과를 고려한 베어링의 정확한 파라미터 예측이 고속 운전시 발생하는 불안정성(instability)을 줄이는데 매우 중요하다.

Heshmat과 Lee는 비 회전 상태에서, 범프 포일 베어링의 강성 및 감쇠계수 값을 가진 실험을 통하여 도출한 바 있다. 하지만, 여기에서는 비 회전 상태에서 가진 실험이 행하여 졌기 때문에, 축이 회전하면서, 포일 베어링 내부에서 발생하는 공기 층(air film)에 의한 동압 효과(hydrodynamic effect)는 고려되지 않았다.[4-6]

실제 고속회전이 가능한 시스템에서 공기 포일 베어링은, 범프 포일의 특성과 고속 회전 시 발생하는 공기 층의 특성이 함께 작용함으로써 축을 지지하게 된다. 공기 포일 베어링의 동특성 계수를 추출하기 위해서는, 범프 포일의 특성과 고속 회전 시에 공기 포일 베어링 내부에 발생하는 공기 층의 특성을 함께 고려하여야만 한다. 이때에 추출된 값이 고속 회전시의 공기 포일 베어링의 정확한 동특성 계수라고 말할 수 있다.

본 논문에서는 고속 회전 시에 실제로 발생하는 공기 포일 베어링의 동압 효과를

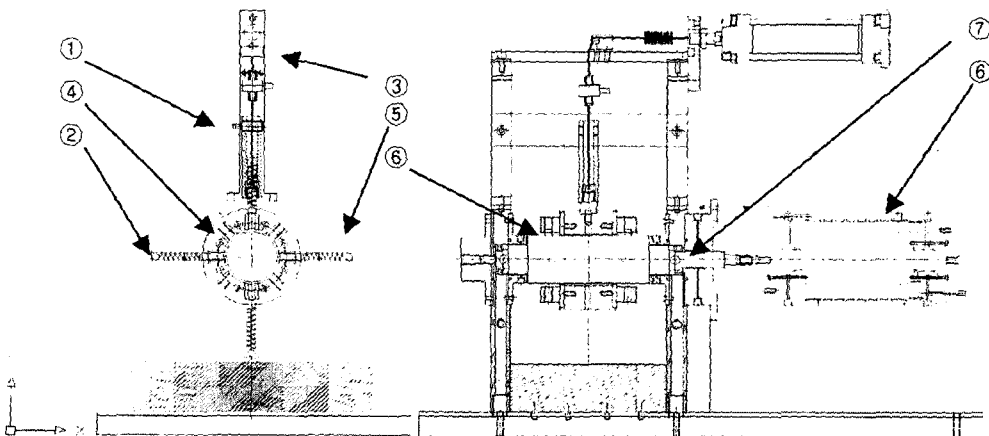


Fig. 3 Figure of the air foil bearing test rig

- ①load cell    ②spring supports    ③air cylinder    ④gap sensor    ⑤spring    ⑥test bearing
- ⑦mounted ball support bearings

**Table 1 Test conditions for air foil bearings**

Rotating Speed(RPM)	0, 10,000, 12,000, 14,000,
Loading(N)	16,000
	0, 50, 100, 150

고려하기 위해서, 10,000~16,000rpm으로 회전을 하면서, 공기 포일 베어링의 정적 특성(static characteristics)인 하중 지지력(load capacity), 그리고 유막 틈새내의 특성인 동적 계수(dynamic characteristics)들을 실험을 통하여 구하였다. 뿐만 아니라, 정·동특성 계수를 추출하기 위하여, 공기 포일 베어링 동특성 추출 실험장치를 설계 제작하였으며, Fig. 2 에 전체 사진을 나타내었다. 또한, 이를 고속 회전기기의 베어링으로 적용하여 감쇠 특성을 파악하고자, 구리 범프 포일과 점탄성 범프 포일에 대한 가진 실험을 하였으며, 이를 통하여 각각 베어링에 대한 정, 동특성 계수를 구하였다. 또한 하중지지력에 대한 실험을 병행하였는데, 하중이 작용함에 따른 각각의 베어링에 대한 동특성 계수들을 구하기 위하여 외부에 장착된 공압 실린더(air cylinder)를 이용하여 50, 100, and 150N의 하중을 실험하였다. 각각의 실험조건을 Table 1 에 나타내었다.

## 2. 실험 장치의 구조 및 실험 방법

### 2.1 실험 장치의 구조

공기 포일 베어링의 하중 지지력 및 동특성계수를 규명하기 위한 실험장치는 Massmann 과 Nordmann 이 제안한 방법을 기초로 설계하였다.[7]

Fig. 3 은 구성된 실험 장치의 상세도를 나타낸 그림이다. 실험 장치는 크게 볼 베어링으로 지지되는 회전축(shaft) 및 테스트 베어링이 장착된 유연한 하우징(flexible housing) 과 이를 구동하기 위한 구동 모터(motor)로 구성되는데, 하우징은 가진 시 기울어짐(tilting)을 방지하기 위해 스프링 지지대(spring supports)를 사용하였다. 하우징의 양쪽 부위를 고강성 스프링(spring)을 이용하여, 지지대와 연결하였으며, 이를 통하여 실험초반에 작용하던 톨링의 문제를 해소할 수 있었다. 또한, 스프링은 하우징과 회전축의 동심을 맞추기 위해 수직 방향(중

**Table 2 Structure stiffness and damping**

Stiffness [kN/m]			
$K_{xx}$	$K_{xy}$	$K_{yx}$	$K_{yy}$
14.904	0.384	-0.869	16.388
Damping [kNs/m]			
$C_{xx}$	$C_{xy}$	$C_{yx}$	$C_{yy}$
0.02	0.003	-0.001	0.017

력 방향)과 수평 방향으로 움직일 수 있도록 하였다. 실제로 공기 포일 베어링 시스템을 보면, 베어링 내부에서 발생하는 반력은 고정된 하우징에 대한 축의 움직임에 의하여 발생이 된다. 하지만, 본 실험에서는 하우징을 가진 하여 베어링에 의한 하우징 자체의 반력을 측정한다. 그때의 구조적인 강성 및 감쇠 값은 Table 2 에 나타난 값과 같다.

### 2.2 실험방법

일반적으로 범프 포일의 구조적 강성과 감쇠는 운전시 동압에 의해 발생한 유막이 형성하는 유막력에 따른 강성 및 감쇠에 비하여 그 크기가 크므로 설계 시 이러한 점을 충분히 감안하여 구조적인 강성 및 감쇠의 값을 선정할 필요가 있다. 가진 실험은 가진 시 응답 신호는 회전축과 동일한 중심을 갖는 X, Y 좌표계 시스템에서 변위 센서를 통하여 측정되며, 이는 회전축의 거동을 측정하기 위한 변위 센서를 베어링 하우징에 고정하였다. 회전축의 상대 변위는 Bently Nevada사의 Proximeter(8Vdc/mm)의 와전류(eddy current)형태의 변위 센서

**Table 3 Specification of bump foils**

Data of bump foils [mm]	
Radius of shaft	30.00
Radius of bearing housing	30.70
Material of foils	SUS301
Width of foils	60.00
Thickness of top foil	0.120
Thickness of bump foil	0.100
Thickness of shim foil	0.076
Height of Cu-coated bump foil	0.45
Thickness of viscoelastic material	0.1

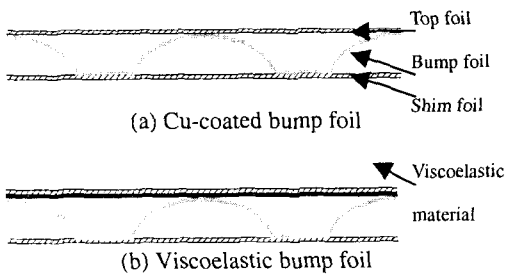


Fig. 4 Configuration of various bump foils

로 측정하였다. 이를 통해 축과 하우징 사이의 상대 변위를 측정할 수 있으며, 하우징과 회전축에서 측정된 상대 변위와의 관계를 통해 회전축과 공기 포일 베어링 사이의 상대 변위를 측정할 수 있다.

공기 포일 베어링에 대한 강성과 감쇠 계수를 추출하기 위한 실험 장치에서, 회전축은 양단에 볼 베어링으로 지지되며, 베어링 하우징(bearing housing) 내에 공기 포일 베어링이 장착되어 있다. 베어링 하우징의 총 질량은 5.0kg이다. 축을 회전시키기 위하여 모터가 설치되어 있으며, 변위 센서는 서로 수직 방향으로 두 개씩 베어링 슬리브 양 끝에 설치되어, 공기 포일의 변형을 측정하였다.

임팩트 햄머(impact hammer)는 변위 센서가 설치된 동일한 방향에서 베어링 하우징 내에 장착되어 있는 공기 포일 베어링을 가진 하도록 되어 있다. 하중 지지력을 측정하기 위하여 최대 500N의 힘을 가할 수 있는 공압 실린더와 힘 센서(load cell)를 이용하여 회전속도에 따라서 힘을 줄 수 있도록 되어 있다. 두 가지 형태의 범프 포일에 대한 가진 실험을 각각 수행하여, 각각 포일에 대한 강성과 감쇠 계수를 계산하였다. 회전속도는 10,000, 12,000, 14,000, 그리고 16,000 rpm으로 변화시켰으며, 하중지지력을 측정하기 위해서, 각각의 포일 베어링에 공압 실린더를 이용하여, 50, 100, 150N의 외부 하중을 가하였다. 즉, 구리 범프 포일 베어링과 점탄성 범프(viscoelastic bump) 포일 베어링에 대해서 회전속도와 외부하중 힘의 크기를 변화시키면서 베어링의 동특성 계수인 강성 계수(stiffness coefficient)와 감쇠 계수(damping coefficient) 값을 측정하였다. 이렇게 실험 장치를 이용하여, 깎 센서에서 나오는 신호 값을 측정하고, 이 때의 베어링의 변형을 측정

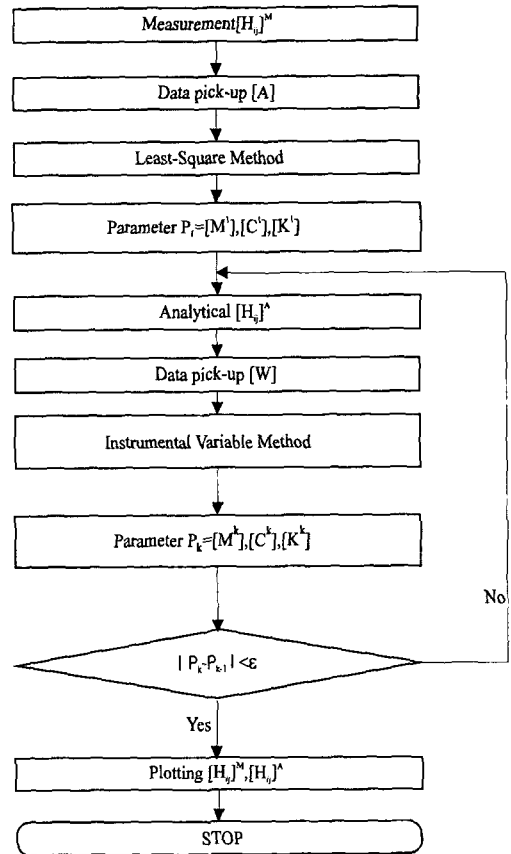


Fig. 5 Flow chart of characteristics identification algorithms of air foil bearing

하였다. Table 3은 실험에 사용된 공기 포일 베어링의 사양을 보여주고 있으며, 여기에서 사용된 공기 포일 베어링은 구리로 코팅된 범프 포일 베어링과 점탄성 포일 베어링이다. Fig. 4는 실험에 사용된 구리 포일 베어링과 점탄성 베어링의 모습을 나타내고 있다.

### 3. 공기 포일 베어링의 계수 측정

공기 포일 베어링에서 발생된 힘은 회전축과 공기 포일 베어링 사이의 상대변위, 속도 그리고, 가속도에 연관된 강성(stiffness), 감쇠(damping), 부가질량(inertia)의 함수로 이루어지는데 이러한 동적 계수(dynamic coefficient)를 구하기 위해서는 실험적 방법으로 구한 주파수 응답 함수(FRF: Frequency Response Function)를 이용할 수 있다. 공기 포일 베어링에 대해서는 그림과 같이 고정 위치에 있는 공기

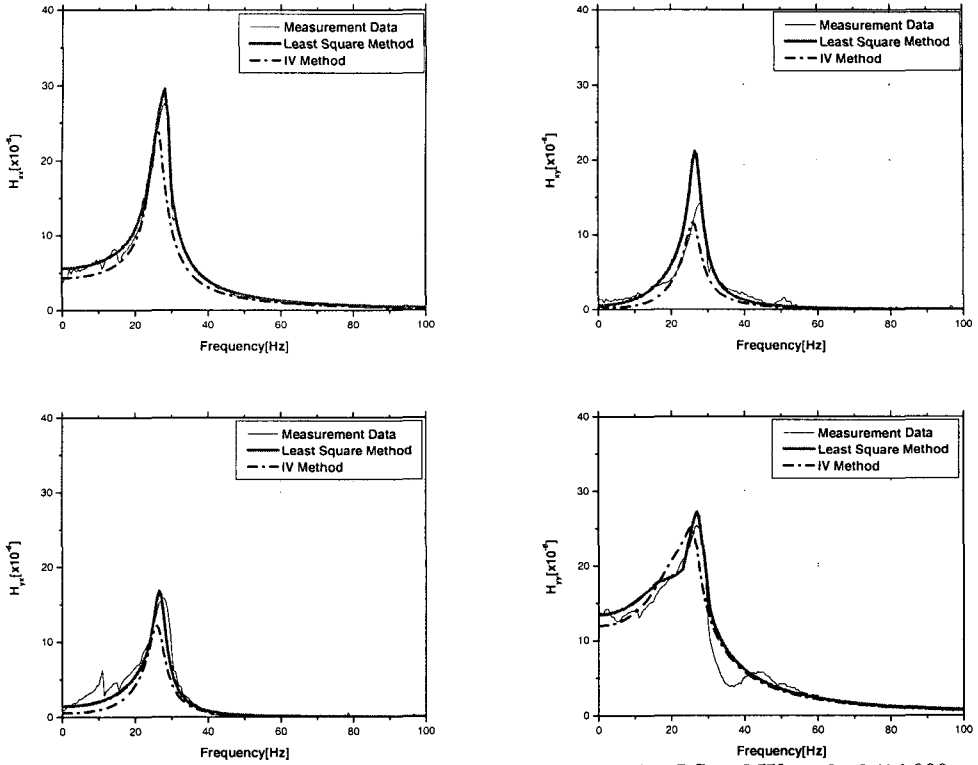


Fig. 6 Measured data .vs. curve fitting data of air foil bearings using LS and IV method (14,000rpm)

포일 베어링과 회전축으로 구성된 기계적인 모델을 설정할 수 있으며, 이 계의 선형화된 운동 방정식은 다음 식(1)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 F_x &= -K_{xx}X - K_{xy}Y - C_{xx}\dot{X} - C_{xy}\dot{Y} \\
 &\quad - M_{xx}\ddot{X} - M_{xy}\ddot{Y}, \\
 F_y &= -K_{yx}X - K_{yy}Y - C_{yx}\dot{X} - C_{yy}\dot{Y} \\
 &\quad - M_{yx}\ddot{X} - M_{yy}\ddot{Y}
 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, 가진 진동수가  $\omega$  일 경우 가진력과 계의 응답은 다음과 같은 조화함수라 가정할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 x &= X e^{j\omega t}, y = Y e^{j\omega t}, \\
 F_x &= F_x e^{j\omega t}, F_y = F_y e^{j\omega t}
 \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)를 식 (1)에 대입하여 주파수 영역에서 표현하면 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{bmatrix} K_{xx} - \omega^2 M_{xx} + j\omega C_{xx} & K_{xy} - \omega^2 M_{xy} + j\omega C_{xy} \\ K_{yx} - \omega^2 M_{yx} + j\omega C_{yx} & K_{yy} - \omega^2 M_{yy} + j\omega C_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} \quad (3)$$

가진력에 대한 변위 신호의 응답을 구하기 위해 식 (3)의 역행렬을 취해 리셉턴스 행렬(receptance matrix) [H] (displacement/force)를 구하여 정리하면 하나의  $\omega$  성분에 대하여 실수와 허수부 각각 4개의 방정식으로 표현되며 이를 행렬 형태로 표시한다.

$$[A][X] = [E] + [S] \quad (4)$$

여기서 [A]는 가진 진동수  $\omega$  와 주파수 응답 함수의 함수로 이루어져 있으며, [X]는 미지의 계수 [M], [C], [K]로 이루어져 있고, 행렬 [S]'는 측정 오차 및 시스템에 영향을 끼치는 외적 잡음에 대한 Euclidean norm 형태의 노이즈(noise) 오차

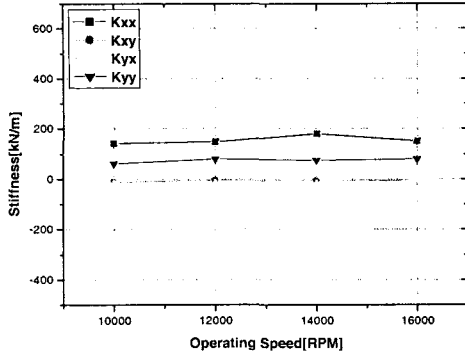


Fig. 7 Direct and cross-coupled stiffness of cu-coated bump foil bearing in a range of operating speed in experiment

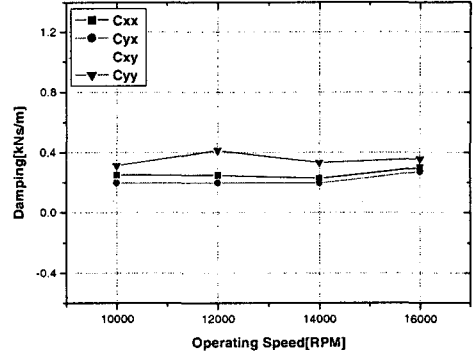


Fig. 9 Direct and cross-coupled damping of cu-coated bump foil bearing in a range of operating speed in experiment

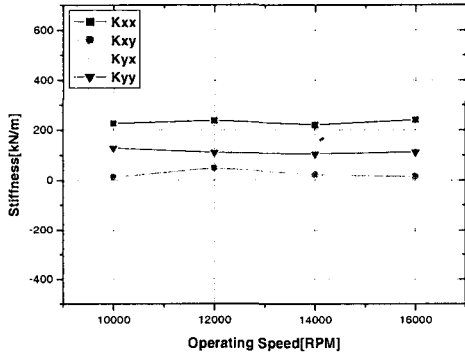


Fig. 8 Direct and cross-coupled stiffness of viscoelastic bump foil bearing in a range of operating speed in experiment

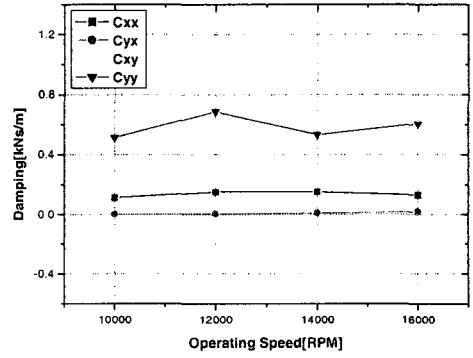


Fig. 10 Direct and cross-coupled damping of viscoelastic bump foil bearing in a range of operating speed in experiment

행렬을 나타낸다.

$$[A] = \begin{bmatrix} H_{xx} & H_{xy} & -\omega^2 H_{xx} & -\omega^2 H_{xy} & -\omega H_{xx} & -\omega H_{xy} \\ H_{yx} & H_{yy} & -\omega^2 H_{yx} & -\omega^2 H_{yy} & -\omega H_{yx} & -\omega H_{yy} \\ H_{xx} & H_{xy} & -\omega^2 H_{xx} & -\omega^2 H_{xy} & -\omega H_{xx} & -\omega H_{xy} \\ H_{yx} & H_{yy} & -\omega^2 H_{yx} & -\omega^2 H_{yy} & -\omega H_{yx} & -\omega H_{yy} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[E]' = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$[X] = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \\ M_{xx} & M_{xy} \\ M_{yx} & M_{yy} \\ C_{xx} & C_{xy} \\ C_{yx} & C_{yy} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$[A]^T [A] [X] = [A]^T [E]' + [A]^T [S]' \quad (8)$$

먼저 식 (8)에서 처음으로 구한 각각의 값들을 해석적인 전달함수인 analytical receptance function  $H^A$ 를 구하고,  $H^A$ 를 이용해서 행렬  $[W]^T$ 을 만든다. 이를 식 (8)에 대입하면 아래와 같이 다시 파라미터  $[X]^T$ 를 구할 수 있게 된다

$$[X] = ([A]^T [A])^{-1} ([A]^T [E]' + [A]^T [S]') \quad (9)$$

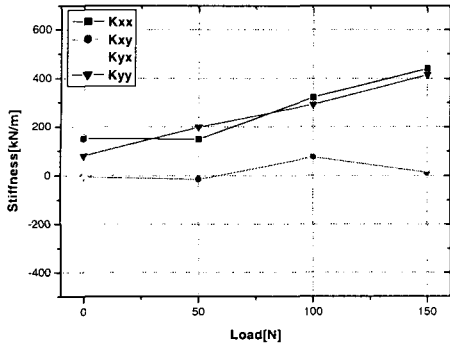


Fig. 11 Direct and cross-coupled stiffness of cu-coated bump foil bearing in a range of load at 16,000rpm

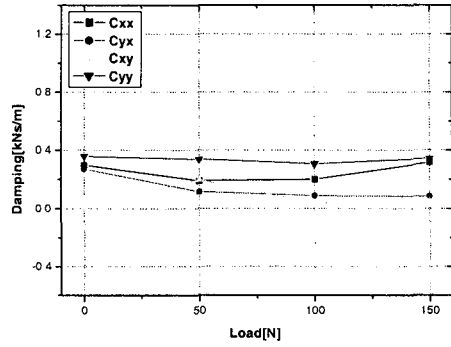


Fig. 13 Direct and cross-coupled damping of cu-coated bump foil bearing in a range of load at 16,000rpm

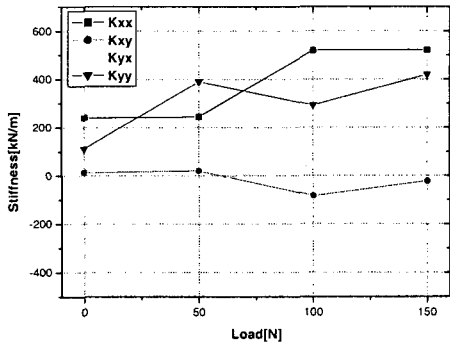


Fig. 12 Direct and cross-coupled stiffness of viscoelastic bump foil bearing in a range of load at 16,000rpm

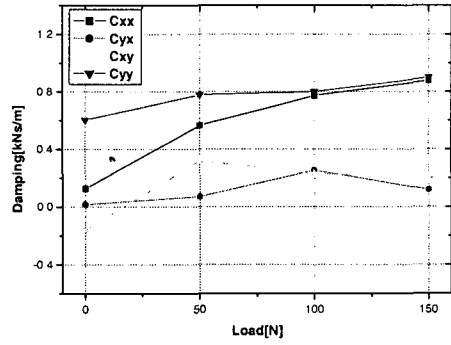


Fig. 14 Direct and cross-coupled damping of viscoelastic bump foil bearing in a range of load at 16,000rpm

식 (9)를 통해 얻어진 동특성 계수들은 공기 포일 베어링의 동특성 계수와 유연한 하우징의 동특성 계수를 포함하게 된다. 따라서 포일 베어링의 동특성 계수 측정을 위해서는 측정 결과로부터 하우징의 동특성 계수들을 제거하여야 하며, 이는 비 회전 상태의 순수한 하우징의 구조적 동특성 계수들을 측정함으로써 이루어 진다.

또한, 신호에 대한 노이즈의 비가 클 경우, 기술한 최소 자승 방법과 함께 IV (instrumental variable) method를 사용할 수 있다.[8]

Fig. 5 는 측정된 데이터로부터 파라미터를 추출하기 위한 흐름도를 나타내고 있으며, 또한 노이즈 신호가 많은 경우에는 IV 방법을 사용한다. Fig. 6 은 회전속도 14,000rpm에서, 점탄성 포일 베어링을 사용한 경우의 실제 주파수 응답함수의 데이터, 최소 자승법과 IV 방법을 이용하여, 피

팅한 결과를 그래프로 나타내고 있으며, 고 유진동수는 24Hz 정도의 전달함수를 나타내고 있다.

## 4. 실험 결과 및 토의

### 4.1 동특성 및 하중지지력 측정

구리 범프, 점탄성 범프에 대하여 가진 실험을 각각 수행한 후 각각 회전속도와 외부하중에 대한 강성과 감쇠 계수를 앞서 설명한 방법으로 계산하였다. Fig. 7, 8은 각각 범프 포일에 대해서, 모터의 회전속도를 10,000rpm 에서, 16,000rpm 까지 변화를 시켰을 경우 공기 포일 베어링에서 발생하는 강성 계수를 실험적 방법으로 도시한 것이다. 일반적으로 유체 동압 베어링의 경우에는 직렬 강성 계수;  $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$  는 회전속도가 증가함에 따라 변화가 없거나 회전에 따른 동압 효과에 의해서 약간 증가하는

경향을 보이고 있다. 구리 범프 포일 베어링을 사용한 경우는 실험 영역에서 대략  $1.4 \sim 1.5 \times 10^5$  범위에서 값을 가진다. 점탄성 범프 포일 베어링을 사용한 경우에는 실험 영역에서 대략  $2.2 \sim 2.4 \times 10^5$  범위에서 값을 가진다. 연성 강성계수;  $K_{xy}$ ,  $K_{yx}$  는 그래프에 나타난 바 와 같이 회전속도가 증가함에 따라서 약간 증가 하거나 일정해지는 경향을 보이고 있어 동압 베어링의 전형적인 형태를 띄고 있다.

Fig 9, 10 은, 각각 범프 포일에 대해서, 모터의 회전속도를 앞서 실험한 경우와 동일한 상황에서 공기 포일 베어링에서 발생되는 감쇠 계수를 실험적으로 도식한 그림이다. 그림에서 구리 범프 포일 베어링의 직렬 감쇠 계수;  $C_{xx}$ ,  $C_{yy}$  는  $0.1 \sim 0.4 \times 10^3$  정도의 값을 가지며, 점탄성 범프 포일 베어링을 사용한 경우의 감쇠 계수는  $0.15 \sim 0.7 \times 10^3$  정도의 값을 나타내었다. 점탄성 범프를 사용한 베어링에 경우 감쇠 계수는 구리 범프를 사용한 베어링의 감쇠 계수 값보다 70% 정도 높게 나타났다. 직렬 감쇠 계수 다음으로, 연성 감쇠 계수;  $C_{xy}$ ,  $C_{yx}$  도 마찬가지로, 연성강성 계수의 경우와 유사하게 회전 속도에 따라 거의 0에 가까운 값을 가지면서, 일정해 지는 경향을 보이고 있다.

일반적으로 공기 포일 베어링의 하중지 지력은 회전속도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 가진다. Fig. 11~12의 경우에는 구리 범프 포일 베어링에 대해 강성 및 감쇠 계수를 구하기 위해서, 회전속도가 16,000 rpm 에서, 0, 50, 100, 150N에 해당하는 하중지 지력에 따른 각각의 동특성 계수들을 나타내었다. 구리 범프 포일 베어링의 경우는 감쇠계수는 일정한 경향을 나타내고 있으며 강성 계수는 외부하중이 증가함에 따라서 그 값의 범위가 증가함을 알 수 있다. 점탄성 범프 포일 베어링의 경우는 감쇠 계수뿐만 아니라, 강성계수의 값도 외부하중이 증가함에 따라 마찬가지로 증가하는 현상을 보이고 있다. Fig. 13~14의 경우에는 점탄성 범프 포일 베어링에 대해 강성 및 감쇠 계수를 구하기 위해서, 회전속도가 16,000rpm에서, 0, 50, 100, 150N에 해당하는 하중지 지력에 따른 각각의 동특성 계수들을 나타내었다.

회전속도에 따라서 동특성 계수를 측정 한 것과 마찬가지로, 강성계수의 값은 비슷

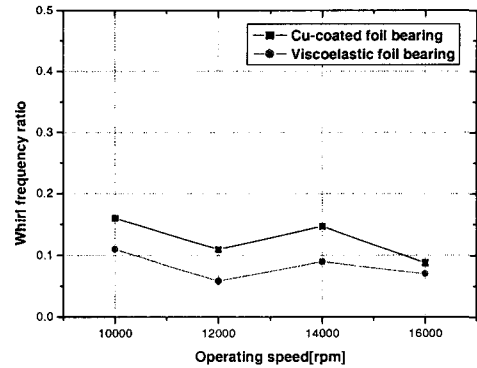


Fig. 15 Whirl frequency ratio

한 경향을 띄고 있으며, 감쇠 계수의 경우는 점탄성 범프 포일 베어링에서, 그 값이 점차 증가하는 경향을 보이고 있다. 즉, 하중지 지력에 대한 공기 포일 베어링은 한계 하중내의 범위에서 그 림과 같이 공기 포일 베어링의 동특성 계수 값들이 증가한다. 이는 외부 하중에 대한 범프 및 점탄성 포일 베어링의 하중지 지력에 대한 특성을 말해주고 있다. 또한 각각의 베어링에 대하여 영향을 주는 요인이 약간 차이를 보임을 알 수 있다.

#### 4.2 포일 베어링의 등가휘둘림 주파수비

베어링이나 비접촉식 실과 같은 트리보 요소(tribo-element)는 회전 속도의 증가에 따라 간극 내에서 작동 유체의 접선 유동속도가 증가하게 된다. 이러한 작동 유체 접선 유동 속도의 증가는 시스템을 불안정화하려는 힘으로 작용하게 된다. 이러한 트리보 요소의 불안정성의 정도를 나타내는 지표로 휘둘림 주파수비(whirl frequency ratio)를 사용하게 된다. 휘둘림 주파수비는 시스템을 불안정화 하려는 힘과 안정화 하려는 힘의 비로 표현되며, 공기 포일 베어링과 같이 편심이 존재하는 트리보 요소의 경우 다음과 같은 등가 휘둘림 주파수비(equivalent whirl frequency ratio)를 사용한다.

여기서,  $K_{eq}$  는 등가 강성(equivalent stiffness)으로 다음과 같이 정의된다.[9]

$$K_{eq} = \frac{K_{xx}C_{yy} - K_{yy}C_{xx} - K_{xy}C_{yx} - K_{yx}C_{xy}}{C_{eq} - C_{yy}} \quad (10)$$



$$WFR = \sqrt{\frac{(K_{eq} - K_{xx})(K_{eq} - K_{yy}) - K_{xy}K_{yx}}{(C_{xx}C_{yy} - C_{xy}C_{yx})\omega^2}} \quad (11)$$

식 (11)으로 표현되는 등가 휘돌림 주파수비는 그 값이 작을수록 안정성이 우수하다는 것을 의미한다. Fig. 15 는 구리 포일 베어링과 점탄성 포일 베어링을 통해서, 얻어진 동특성 계수를 식 (10), (11) 에 대입하여 공기 포일 베어링의 등가 휘돌림 주파수비를 회전 속도에 따라 도시한 것이다. 두 가지 종류의 포일 베어링을 비교할 때, 점탄성 포일 베어링의 경우가 낮은 휘돌림 주파수율을 보인다. 이는 구리 범프 포일 베어링에 비하여 상대적으로 점탄성 포일 베어링이 높은 감쇠 값을 갖기 때문이며, 이로 인해, 더욱 안정적임을 보인다고 할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 고속 회전체에 적용되는 공기 포일 베어링의 동특성 및 하중 지지력 측정에 관한 실험을 수행하였다. 또한 동특성 계수를 정확히 계산해 내는 방법으로 최소 자승법(least square method)을 적용하였다.

이를 위하여 구리 범프 포일 베어링과 점탄성 범프 포일 베어링에 대하여 가진 실험을 수행하였으며, 베어링의 특성을 나타내어주는 값인 강성 계수 측면을 보았을 때, 각각의 경우의 값의 범위는 비슷함을 알 수 있었으며, 감쇠 계수는 점탄성 포일 베어링의 경우가 구리 범프 포일 베어링의 경우보다 감쇠력이 높음을 알 수 있었다.

특히 베어링의 안정성을 판단하는 파라미터인 휘돌림 주파수의 경우, 점탄성 포일 베어링이 구리 범프 포일 베어링에 비하여 비교적 안정적으로 운전될 수 있음을 알았으며, 추후 더 많은 시험을 통한 설계 DB 로의 확장이 요구된다.

## 후기

본 논문은 한국 과학 기술 연구원 기관 소유 사업 "지능형 트리보 센서/액추에이터 기술 개발" 과 과학기술부의 첨단 기계류 부품 사업의 일환으로 이루어 졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사의 말씀을 드립니다.

## 참고문헌

1. Heshmat, H., "Advancements in the Performance of Aerodynamic Foil Journal Bearings High Speed and Load Capacity", ASME J. of Trib., Vol. 116, pp 287-295, 1994.
2. Heshmat, H., "Structural Damping of Self-Acting Compliant Foil Journal Bearings," ASME J. of Trib., Vol. 116, pp 76-82, 1994
3. Peng, J. P. and Carpino, M., "Coulomb Friction Damping Effects in Elastically Supported Gas Foil Bearings," Trib. Trans., Vol. 37, pp 91-98, 1993.
4. 이용복, 김태호, 김창호, 이남수, 최동훈, "범프 포일 베어링들의 동적 계수에 관한 실험적 연구," journal of the KSTLE, Vol. 18, No. 2, pp. 153-159, 2002
5. Roger Ku, C. -P. and Heshmat, H., "Compliant Foil Bearing Structural Stiffness Analysis: Part 1-Theoretical Model Including Strip and Variable Bump Foil Geometry," ASME, Journal of Tribology, Vol. 114, pp. 394~400, 1992
6. Heshmat, H., "Operation of Foil Bearings Beyond the Bending Critical Mode," ASME J. of Trib., Vo. 122, 2000
7. Massmann, S., and Nordmann, R., "Some New Results Concerning the Dynamic Behavior of Annular Turbulent Seals," NASA CP 2409, Proceeding of the Workshop: Instability in Rotating Machinery held in Carson City, pp. 179-194, 1985
8. 이용복, 김창호, 최동훈, "IV 방법을 이용한 잡음이 포함된 베어링 실험 장치의 동특성 파라미터 추출," 한국소음진동공학회지 제6권 제5호, pp. 679~684, 1996
9. Lund, J., "The Stability of an Elastic Rotor in Journal Bearings with Flexible, Damped Supports," ASME J. of Applied Mechanics. pp. 911~920, 1965