한국윤활학회지(1996), 제12권 제1호
Journal of KSTLE(1996) Vol. 12, No. 1, pp.47~55

자성형 급기공을 갖는 외부가압 공기베어링의 섭동압력측정에 관한 연구

박상신 · 한동철*

서울대학교 터보 · 동력기계연구센터
*서울대학교 기계설계학과

Measurement of Perturbed Pressures under Inherently Compensated Restrictors in Externally Pressurized Air Bearings

Sang-Shin Park and Dong-Chul Han*

Turbo and Power Machinery Research Center, Seoul National University
**Department of Mechanical Design and Production Engineering, Seoul National University*

Abstract—In this study, steady state and perturbed pressures are experimentally measured under inherently compensated restrictors in externally pressurized air bearings. A piezo actuator is used for simulating small displacement perturbation in the air film. The pressures under the restrictors are measured by a miniature type pressure transducer and the height of the air film is measured by capacitance type gap sensors developed by Chapman's method. The perturbed pressure is obtained through Fourier transformation of the two signals. The measured perturbed pressures are in good agreement with the calculated values.

1. 서 론

외부가압 공기베어링은 회전하지 않는 경우에도 비교적 높은 하중지지용량을 가지며, 외부가압에 의해서 회전축이 베어링에서 떠 있기 때문에 가속이나 감속과정에서도 거의 마찰이 없다는 장점을 지니고 있다. 외부 가압 공기 베어링에 사용되는 급기방식으로는 공기햄머링이 일어나지 않으며 제조하기 쉬운 자성형 급기공이 널리 이용되고 있다.

자성형 급기공을 이용한 공기베어링을 설계하기 위해서는 점급기 가정을 이용하여 베어링 내로 유입되는 공기의 유량을 계산하여야 한다. 점급기 가정을 이용한 해석방법으로는 Majumdar[1] 는 영향계수를 도입하여 각각의 급기공사이의 유량을 구하는 방법을 제시하였고, Elrod[2] and Kazimierski [3] 는 급기에 의한 유동의 영향을 차분화된 지배방정식에 대입하여 구하는 방식을 제시하였으나, 이러한 방법들은 유입되는 유량을 정확히 해석할 수 없었다.

급기공에서 들어오는 유량을 등엔트로피 가정을 통하여 압력분포를 해석하고, 이 정적인 압력을 이용하여 섭동압력을 divergence 이론을 적용하여 압력 및 섭동압력을 다른 변수로 치환하지 않고 직접 구하는 직접수치해법이 개발되었다[4]. 직접수치해법에서는 베어링의 압력함수 및 틈새함수를 미소섭동시켜 섭동압력을 구하고, 구해진 섭동압력을 각각의 방향으로 적분하여 강성계수 및 감쇠계수를 얻을 수 있었으며, 급기공으로 들어오는 유량 또한 지배방정식인 레이놀즈 방정식과 마찬가지로 섭동시켜 지배방정식에 대입하므로써 효과적으로 외부가압 공기베어링에 적용할 수 있었다.

그러나 외부가압 공기베어링의 정적인 압력 및 섭동압력에 대한 연구는 이론해석으로만 진행되었을 뿐 실험적으로는 전[5] 이 정적인 압력의 측정을 성공시키는데 그친바 있다. 따라서 급기공으로 들어오는 유

량을 섭동시켜 급기공 밑에서의 섭동압력을 실험적으로 연구할 필요성이 대두되고 있다.

본 연구에서는 자성형 급기공을 갖는 외부가압 공기베어링의 정적인 압력 및 섭동압력을 측정하는 실험을 수행하였고, 측정된 결과를 이론해석 결과와 비교하였다.

2. 섭동이론

공기베어링의 해석을 위하여, 공기막 틈새의 미소체적요소의 관성력, 압력, 마찰력 그리고 외부의 힘장 사이의 힘의 균형으로부터 얻어진 레이놀즈 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(ph^3\frac{\partial p}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(ph^3\partial\frac{p}{\partial y}\right) =6\mu\omega\frac{\partial(ph)}{\partial x}+12\mu\frac{\partial(ph)}{\partial t} \tag{1}$$

공기베어링의 강성 및 감쇠계수를 구하기 위해서 베어링의 틈새함수 및 압력함수를 미소섭동시키는 방법을 이용한다. 여기서 베어링의 틈새함수는 주파수 ν로 미소섭동된다고 가정된다.

$$h=h_0+\varepsilon\hat{h}e^{j\nu t} \tag{2}$$

여기서 h_o는 정상상태의 공기막 두께함수이고, $\hat{h}$는 미소섭동 유막두께이다. ε은 정상상태의 틈새에 대한 변동비율로 무차원 값을 갖는다. 이에 상응하는 압력함수도 마찬가지로 섭동시킨다.

$$p=p_0+\varepsilon\hat{p}e^{j\nu t} \tag{3}$$

여기서 p_o는 틈새함수와 마찬가지로 정상상태의 압력함수이고, $\hat{p}$는 섭동압력으로 복소수 형태를 갖는다. 이 섭동압력의 실수부는 베어링의 강성계수에 관련되어 있고, 허수부는 시간에 대한 미분항이 들어있는 항으로 감쇠계수에 연결되어있는 값이다. 식 (2)와 (3)을 식 (1)에 대입하여 각각 ε의 차수에 따라 정리하면 다음과 같이 정상상태의 레이놀즈 방정식과 섭동 레이놀즈 방정식을 얻게 된다.

h_o에 대한 정상상태 레이놀즈방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(p_o h_o^3\frac{\partial p_o}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(p_o h_o^3\frac{\partial p_o}{\partial y}\right)=6\mu\omega\frac{\partial(p_o h_o)}{\partial x} \tag{4}$$

$\hat{h}$에 대한 섭동 레이놀즈 방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial}x\left\{p_o h_o^3\frac{\partial\hat{p}}{\partial x}+3p_o h_o^2\hat{h}\frac{\partial p_o}{\partial x}+h_o^3\hat{p}\frac{\partial p_o}{\partial x}\right\} +\frac{\partial}{\partial}y\left\{p_o h_o^3\frac{\partial\hat{p}}{\partial y}+3p_o h_o^2\hat{h}\frac{\partial p_o}{\partial y}+h_o^3\hat{p}\frac{\partial p_o}{\partial y}\right\} =6\mu\omega\frac{\partial}{\partial x}(p_o\hat{h}+\hat{p}h_o)+12\mu\nu\mathrm{j}(p_o\hat{h}+\hat{p}h_o) \tag{5}$$

식 (4)와 (5)를 벡터방정식으로 간략하게 표현하면 다음과 같다.

$$\nabla\cdot\left\{p_o h_o^3\nabla p_o-6\mu\omega(p_o h_o)\right\}=0 \tag{6}$$

$$\nabla\cdot\left\{p_o h_o^3\nabla\hat{p}+3p_o h_o^2\hat{h}\nabla p_o+h_o^3\hat{p}\nabla p_o righr -6\mu\omega(p_o\hat{h}+\hat{p}h_o)\right\}=12\mu\nu\mathrm{j}(p_o\hat{h}+\hat{p}h_o) \tag{7}$$

식 (6)과 (7)을 윤활면의 격자점을 둘러싸고 있는 면에 대해서 면적분을 하고, Gauss 다이버전스 정리를 적용하면, 격자점을 둘러싼 둘레에 대한 선적분으로 바뀌게 되고, 중앙 차분법을 이용하여 적분식을 이산화 하면, 각각의 격자점에 대해서 대수방정식이 얻어지고, 대수방정식의 해를 구함으로써 정상상태 및 섭동압력분포를 얻을 수 있다[4].

급기공이 위치한 절점에서는 질량유량의 연속방정식이 적용된다. 자성형 급기공을 통과하는 질량유량은 등엔트로피 가정을 이용하여 다음과 같이 얻어진다[6].

$$Q_{oSu,j}=C_d\cdot\pi d_S h_{oi,j}\cdot\sqrt{R}p_s\ \ \Phi \tag{8}$$

여기서 C_d는 급기공을 통과하는 유량의 이산계수이고, d_s는 급기공의 직경, $h_{oi,j}$는 급기공이 위치한 절점에서의 정상상태 유막두께이며, R은 공기의 기체상수와 절대온도의 곱의 역수이다(즉 $R=1/RT$) p_s는 급기압력이고, Φ는 공기의 단열상수에 관련된 함수로 다음과 같이 급기공 밑의 압력과 공급압력의 비율에 따라 다음과 같이 2 가지의 상태로 나누어진다.

$$\Phi=\left[\frac{2\chi}{\chi+1}\right]^{1/2}\left[\frac{2}{\chi+1}\right]^{1/(\chi-1)},\quad \frac{p_{oi,j}}{p_s}\le\left[\frac{2}{\chi+1}\right]^{\chi/(chi-1)}$$

$$\Phi=\left[\frac{2\chi}{\chi-1}\right]^{1/2}\left[\left(\frac{p_{oi,j}}{p_S}\right)^{2/\chi}-\left(\frac{p_{oi,j}}{p_S}\right)^{\frac{\chi+1}{\chi}}\right]^{1/2},$$

$$\frac{p_{oi,j}}{p_S}>\left[\frac{2}{\chi+1}\right]^{\frac{\chi}{\chi-1}} \qquad (9)$$

$$Q_{oSuj}=C_d\cdot\pi d_S h_{i,j}\cdot\sqrt{R}p_s\left[\frac{2\chi}{\chi+1}\right]^{1/2}\left[\frac{2}{\chi+1}\right]^{\frac{1}{\chi-1}}, \qquad \frac{p_{i,j}}{p_S}\le\left[\frac{2}{\chi+1}\right]^{\frac{\chi}{\chi-1}}$$

$$=C_d\cdot\pi d_S\sqrt{R}p_s\left[\frac{h_{oi,j}\left\{\frac{2}{\chi}\left(\frac{p_{oi,j}}{p_s}\right)^{\frac{2-\chi}{\chi}}\left(\frac{\hat{p}}{p_s}\right)-\frac{\chi+1}{\chi}\left(\frac{p_{oi,j}}{p_s}\right)^{\frac{1}{\chi}}\left(\frac{\hat{p}}{p_s}\right)\right\}}{2\left[\left(\frac{p_{oi,j}}{p_s}\right)^{\frac{2}{\chi}}-\left(\frac{p_{oi,j}}{p_s}\right)^{\frac{\chi+1}{\chi}}\right]^{1/2}}+\hat{h}\left[\left(\frac{P_{oi,j}}{p_s}\right)^{\frac{2}{\chi}}-\left(\frac{p_{oi,j}}{p_s}\right)^{\frac{\chi+1}{\chi}}\right]\right], \qquad \frac{p_{i,j}}{p_S}>\left[\frac{2}{\chi+1}\right]^{\frac{\chi}{\chi-1}} \qquad (11)$$

이 섭동 유량을 급기공이 있는 절점의 대수방정식에 대입함으로써 급기공이 있는 절점에서의 섭동압력을 구하게 된다.

3. 실험이론

Fig.1 은 공기베어링의 정상상태의 압력 및 섭동압력을 측정하기 위한 실험적 원리도를 나타낸다. 저어널 베어링의 경우 2 개의 섭동압력이 존재하므로, 단순성을 위하여 4 각형의 평판 스러스트 베어링을 대상으로 실험하였다.

앞절에서 유도된 지배방정식을 적용하기 위하여, 회전속도 ω는 0으로 하면 되고, h_o는 정상상태의 베어링의 틈새로 유막이 변동할 때의 평균 틈새로 하고, $\hat{h}$는 기준틈새의 음부호로 $-c$를 갖게 되며 변위의 변폭을 정현함수로 주었을 때, 그 변폭과의 비를 ε으로 하면 된다. 압력항에 대해서는 p_o는 평균압력을, $\hat{p}$는 섭동압력으로 복소수 형태가 되는데, 실수부는 물리적으로 변위의 진폭에 대한 압력변동 진폭의 비율이고, 허수부는 변위가 시간당 변하는 속도의 진폭에 대한 압력변동 진폭의 비율로, 실수부를 베어링 면에 대해서 적분하게 되면 베어링의 강성계수가 얻어지고, 허수부를 베어링 면에 대해서 적분하게 되면 베어링의 감쇠계수가 된다.

섭동 질량 유량식도 식 (2)와 (3)을 (9)에 대입하므로써 얻어질 수 있다.

$$Q_s=Q_{oSij}+\varepsilon Q_{Sij}e^{j\nu t} \qquad (10)$$

여기서 Q_{Sij}는 다음과 같다.

유막 두께를 진동수 ν의 정현함수로 변동시키면서, 동시에 압력과 베어링의 틈새를 측정하여, 이 두 신호에서 정상상태의 성분을 빼낸 다음 퓨리에 변환 (Fourier transformation) 하므로써 섭동압력을 얻을 수 있다. 베어링의 틈새 신호 및 압력신호를 퓨리에 변환하여 부가해준 주파수에 해당하는 성분만을 추출해

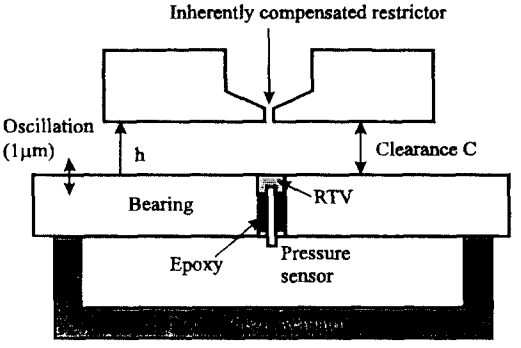

Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup.

내면 다음과 같다.

$$H = h - h_o = \bar{H} e^{j\omega t} \tag{12}$$

$$P = p - p_o = \bar{P} e^{j\omega t} \tag{13}$$

이론식에서 사용한 미소변폭 ε은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{|\bar{H}|}{c} \tag{14}$$

이렇게 얻어진 값을 이용하여 최종적으로 섭동압력의 성분을 구할 수 있다.

$$\hat{p} = \frac{\bar{P}}{\varepsilon} \tag{15}$$

4. 실험장치의 설계

외부가압 공기베어링에 사용되는 자성형 급기공의 섭동압력을 실험적으로 구하기 위해서는 3 가지의 요소가 필요하다. 그 첫 번째는 실제 베어링이 나타내는 진동수 영역 및 변폭영역으로 변위를 발생시켜주는 장치이고, 두 번째는 중앙에 급기공이 설치된 평판 스러스트 베어링이고, 세 번째는 발생된 변위와 압력을 측정할 수 있는 측정센서 및 주변기기로 이루어진 장치이다.

4-1. 변위발생장치

초정밀 공작기계에 사용되는 외부가압 공기베어링은 회전수 영역이 300~10000 rpm 정도이며, 이에 해당되는 주파수는 5~167 Hz이므로 이러한 영역에서 변위를 발생할 수 있는 가진장치가 필요하다. 한편, 외부가압 공기베어링의 이론에서 섭동압력을 계산할 경우에는 미소변위를 가정하여 섭동시키기 때문에 베어링틈새의 10 % 이내의 진폭으로 변위를 발생시킬 수 있어야 한다. 그런데, 외부가압 공기베어링의 경우 기준틈새를 10 μm~20 μm를 사용하므로 진폭을 1 μm~2 μm이내로 진폭을 설정해야 섭동압력을 얻어낼 수가 있다.

가진장치로는 고려할 수 있는 방법으로는 1) 유압펌프, 2) 자기 액츄에이터(magnetic actuator), 3) 피에조 액츄에이터 (piezo actuator) 등이 있다. 유압을 이용한 방법으로는 가진주파수가 100 Hz를 넘기기 어렵고 장치의 크기가 너무 커지는 단점이 있으며, 자기 액츄에이터를 이용하는 방법은 가진주파수는 필요영역에 충분하나, 변폭이 필요이상으로 커지게 되는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 피에조 소자를 이용하여 가진 하기로 하였다. 본 연구에서는 가진기로서 독일의 Piezomechanik · Dr. Lutz Pickelmann GmbH 사의 HPSt 150/20-15/12 VS 35 를 선정하였다. 이 액츄에이터의 사양은 Table 1 에 나타내었다.

위 표에서 최대 변위는 전압을 150 V를 가했을 경우 12 μm이므로 전압의 변폭을 12.5 V로 하면 변위 1 μm를 얻을 수 있으며, 공진주파수가 15 kHz이므로 실험에서 필요한 200 Hz이하의 주파수 영역에서는 무리없이 동작할 수 있다.

4-2. 압력측정장치

외부가압 공기베어링에 사용되는 자성형 급기공의 직경은 0.2~0.4 mm 이기 때문에, 이 밑에서의 압력을 측정하기 위해서는 초소형 압력센서를 사용하여야 한다. 보통 센서의 해상도는 측정범위에 반비례하므로

Table 1. Piezo actuator 150/20-15/12 VS 35

Stroke at 150 V	12 μm
Electrical capacitance	6000 nF
Stiffness	400 N/μm
Resonant frequency	15 kHz
Max. compressive load	4000 N
Max. tensile load	500 N

Table 2. Specification of pressure transducer EPI-178-5G

Range	5 bar
Overrange	10 bar
Sensitivity	20 mV/bar
Resonant Frequency	190 kHz
Nonlinearity	±0.5%/full scale
Temp. Shift	±1% full scale/50°C
Diameter	1.78 mm
Length	6.4 mm

Table 3. Specification of power supply & amplifier PS-30A

Transducer excitation	±0.5 to ±7.5 V DC adjustable
Current	100 mV max.
Transducer output	10 to 100× adjustable
Input power	120 V AC/60 Hz
Mounting rail option	3.3 ft mounting rail

정밀도의 향상을 위하여 센서의 최대 측정압력이 예상되는 공기막 내부의 압력에 근접하도록 선정하여야 하며, 부가되는 진동수에 적합한 압력을 측정하기 위해서는 주파수 특성도 고려되어야 한다.

본 연구에서는 이러한 목적에 적합한 스트레인 게이지형 압력센서인 Entran 사의 EPI-178-5G 를 사용하였다. 압력센서의 측정범위는 게이지 압력으로 5 bar 이며 10 bar 의 압력에 견딜 수 있다. 제조회사에 의해 교정된 민감도는 21.170 mV/bar 이고 공진주파수는 190 kHz 이고, 비선형성은 전 측정범위에서 0.5% 미만이며, 제조회사에 추천하는 사용가능한 주파수 영역은 공진주파수의 20% 이내이므로 본 연구에서 측정할 최대 200 Hz까지는 무난한 측정이 가능하다.

이 압력센서를 사용하기 위해서는 전원공급장치 및 증폭기가 필요하게 된다. 제조회사에 의해 교정된 민감도는 21.170 mV/bar 는 노이즈가 유입될 경우 거의 측정이 불가능하다. 따라서 이 해상도를 높여야 미세한 압력변동을 측정할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 선정된 센서에 전원을 공급하며, 센서에서 나오는 신호를 증폭할 수 있는 Entran PS-30A를 전원공급장치 및 증폭기로 사용하였다. 이 증폭기는 증폭비가 최대 100배까지 가능한 장치이며, 본 연구에서 조절된 증폭비는 50.02배였다. 본 연구에서 사용한 압력센서 및 전원공급장치의 사양을 Table 2와 Table 3에 나타내었다.

4-3. 변위측정

자성형 급기공을 갖는 베어링 면과 가진 되는 면 사이의 변위를 측정하기 위해서는 변위센서를 사용해야 한다. 이러한 변위센서로는 정전용량형 변위센서 (capacitance type gap sensor), 와전류형 변위센서 (eddy current type gap sensor) 가 있다. 본 연구에서는 가진 진폭이 최대 1~2 μm 인 정현파이기 때문에 0.1 μm 이하를 정밀하게 측정해야만 하며, 노이즈 레벨을 감안할 때, 변위센서의 해상도가 100 mV/μm 이상 되어야 안정적으로 변위를 측정할 수 있다. 그런데, 상품화되어 나오는 변위센서들은 해상도가 최대 20 mV/μm이기 때문에 노이즈에 영향을 받게 되어 측정이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 센서의 면적을 넓게 하여 측정의 해상도를 높일 수 있는 정전용량형 변위센서를 제작하여 사용하였다. 이러한 변위센서의 개념은 P.D. Chapman[7] 이 제시하여 회전축의 회전

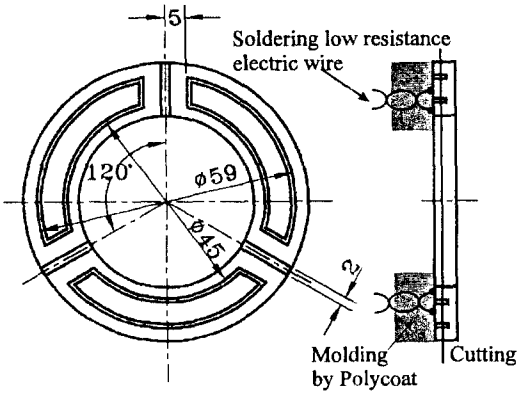

Fig. 2. Shape of gap sensor before machining.

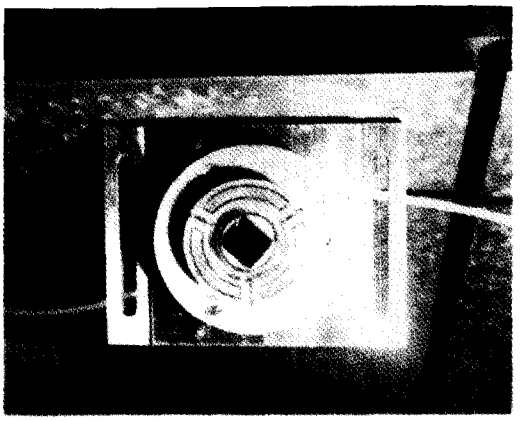

Fig. 3. Photo of gap sensor after machining.

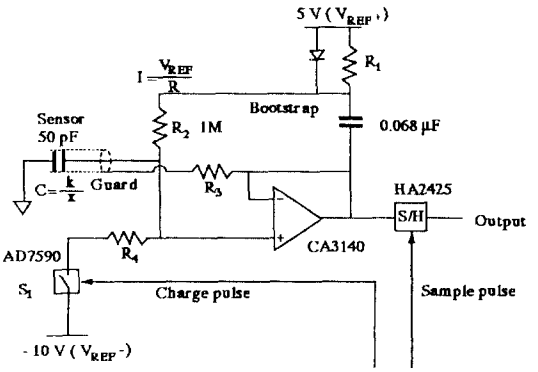

Fig. 4. Capacitance to voltage converter circuit/

오차를 측정한 바 있으나, 센서면을 둘러싸는 가드전극의 미비와 정전용량을 전압으로 바꾸어 주는 회로의 불안정으로 인한 노이즈 때문에 정확한 궤적을 구

하지는 못했다. 본 연구에서는 이 방법을 개선하여 센서면을 완전히 둘러싸는 가드전극을 설치하고, 이를 평판 센서로 바꾸어서 원환형이 센서가 되도록 설계하였다. 평행한 두 판의 평행도를 맞추기 위해서는 3점지지로 설계되는 것이 평행도 맞추는 작업이 용이하다. 따라서 센서면도 원환형으로 3 개로 분리되는 것이 필요하다. 본 연구에서는 센서면이 급기공을 갖는 베어링을 둘러싸며, 3개로 분리되도록 Fig.2 와 같이 설계하였고, 홈이 파인 면 쪽에 저항선을 납땜한 후, 이를 플라스틱 몰딩을 하여 전기적인 절연을 하였고, 그 반대 면을 절삭하여, 전극과 가드사이가 모두 분리되도록 하였으며, 면의 평면도를 위하여, 연삭한 후, 평면도 0.5 μm인 랩핑정반을 이용하여, 랩핑하였다. 최종적으로 만들어진 센서의 모양을 Fig.3에 나타내었으며, 정전용량을 전압으로 바꾸기 위한 회로도를 Fig.4에 나타내었다.

4-4. 형상설계

Fig.5는 본 연구에서 설계한 급기공의 섭동압력 실험장치의 조립도를 나타낸다. 기초 베이스 위에 피에조 액츄에이터가 M4 볼트로 고정이 되고 그 위에 압력센서가 중앙의 ϕ 2.5 구멍에 설치된 원형 평판이 조립된다. 즉, 피에조 액츄에이터와 평판이 변위발생부위가 된다. 절연을 위해 플라스틱 몰딩한 센서를 고정하고 자성형 급기공이 설치된 베어링을 끼워 넣는다. 이 급기공이 설치된 시험베어링과 피에조 액츄에이터 위에 설치된 평판사이가 공기베어링이 된다. 이 베어링의 기준 틈새는 10~20 μm이다. 한편 베어링면과 센서면간에는 70 μm의 높이 차가 있어서 센서의 기준간극은 80 μm이 되도록 하였다. 이러한 기준간극은 보울트의 조임량에 따라서 바뀌기 때문에, 정확한 간극의 조절 및 평행도를 맞추기 위하여 미분나사를 설계하였다. 미분나사는 피치가 조금 다른 미터식과 인치식 나사를 조합하여 상대 운동량만큼의 미세이송을 얻는 나사로, 본 연구에서는 미터나사로는 호칭 M5×0.8을 인치나사는 호칭 No.10-32UNF 로 피치를 미터법으로 환산하면 0.7838 로 두 나사간에는 피치가 6.2 μm의 차가 있다. 이렇게 하면, 유효피치 6.2 μm/rev의 미분나사가 얻어지며, 베어링의 평행도 및 기준틈새를 원하는 틈새로 조절이 가능하게 된다.

5. 실험결과

5-1. 변위센서의 보정(Calibration)

급기공 밑에서의 압력을 측정하기에 앞서 우선 변

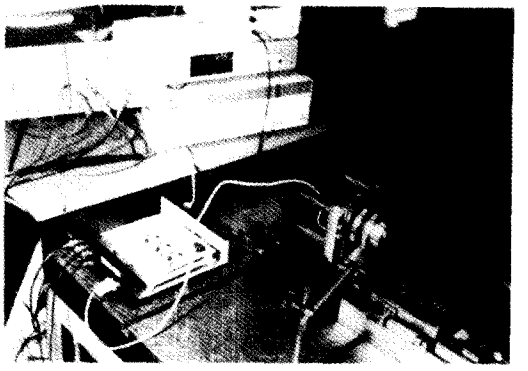

Fig. 6. Photo of sensor calibration.

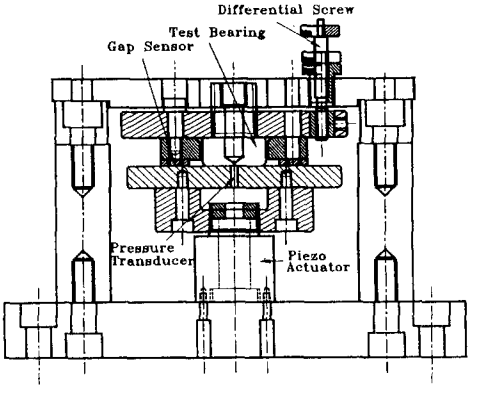

Fig. 5. Assembly of experiment.

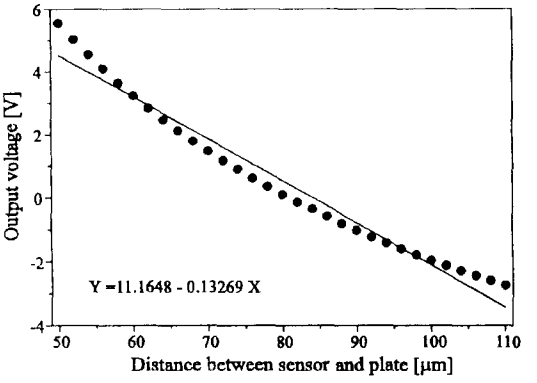

Fig. 7. Sensor calibration results.

위를 측정하기 위한 변위센서의 보정을 해야 한다. 변위센서의 보정을 위해서는 치구가 필요하다. 변위센서의 보정을 위한 치구는 센서와 측정면사이의 거리를 조절할 수 있어야 하며, 그 거리를 측정할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 거리조절 요소로 1 μm의 해상도를 갖는 마이크로미터와 리니어 가이드를 이용하여 센서와 측정면사이의 거리를 바꾸어 가며, 이 움직임을 해상도 0.05 μm인 Keyence 사의 레이저 변위센서 LD-2500을 이용하여 절대변위량을 측정하고, 제작된 센서에서 내보내는 전압을 A/D 변환기를 통해서 IBM-PC 로 저장하여 그 값의 보정을 하였다. Fig.6에 센서보정을 위한 실험장치를 보였다.

Fig.7는 센서의 보정결과를 나타낸다. 센서는 기준간극 (offset) 을 80 μm로 설정하여, 이 거리에서 센서의 출력값이 0이 되도록 증폭기를 조절하고 양방향으로 30 μm씩 옮겨가며 출력값을 읽었다. 센서의 보정결과 센서에서 나오는 신호는 세개의 센서가 각각 130 mV/μm정도의 값을 내보내는 것으로 확인되었고, 이때의 선형성은 약 2 % 내외였다. 이 정도의 감도이면 피에조 소자의 미소변위를 충분히 감지해낼 수 있다.

5-2. 정적인 압력의 측정결과

섭동압력을 측정하기 앞서서 우선 급기공 밑의 정적인 압력이 정확하게 측정되는지를 살펴보아야 한다. 급기공 아래의 정적인 압력을 측정하기 위해서는 센서를 보정하기 위한 장치에 베어링을 조립하고 급기압력을 5 kgf/cm^{2}로 하여 급기하며 실험하였다. 실험시에는 약 4 mV정도의 노이즈 레벨이 있었기 때문에 압력센서에서 나오는 전압을 샘플링 주파수 1000 Hz로 300개의 데이터를 평균하여 구하였다.

Fig.8에서는 (a)에는 급기공의 직경을 0.2 mm (b)에서는 급기공의 직경을 0.3 mm일때의 측정결과를 나타내었다. 이때 폭과 길이가 각각 19 mm인 베어링에 대하여, 급기공 아래에서의 압력을 측정하고, 이를 이론해석과 비교한 것이다. 이론해석에 있어서는 급기공의 이산계수(discharge coefficient)를 0.6, 0.64, 0.7로 바꾸어 가면서 계산하였다. 이론해석의 결과와 실험의 결과는 거의 일치하며, 이산계수가 0.64인 경우가 실험치와 가장 근접한 결과를 얻었다.

5-3. 섭동압력의 측정결과

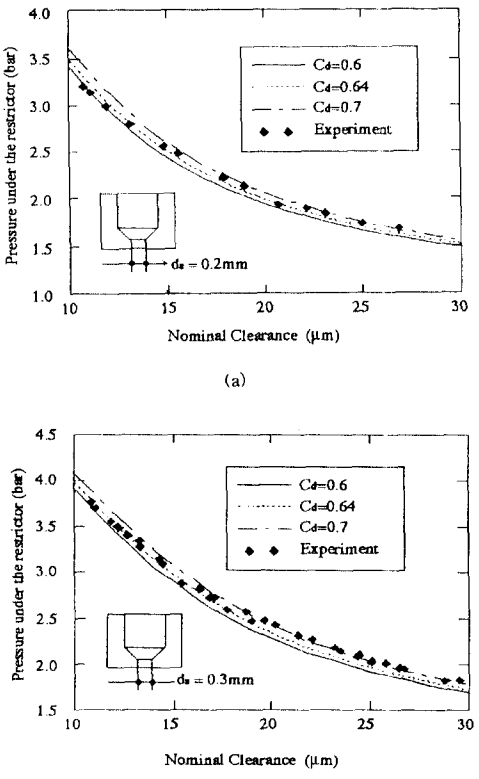

Fig. 8. Steady state pressure under the restrictor

급기공 아래에서의 섭동압력을 측정하기 위해서는 피에조 소자의 변위와 압력을 동시에 측정해야 한다. 변위센서는 3 개이고 압력센서가 1 개이므로, 최소한 4 개의 신호를 동시에 샘플링해야 하며, 최대 200 Hz의 정현파를 제대로 측정해내기 위해서는 20 kHz 이상의 샘플링 주파수를 갖는 A/D 컨버터를 사용해야 한다. 본 연구에서는 이러한 조건을 만족하는 컨버터로서 Data Translation사의 16 bit A/D 컨버터 DT2838을 사용하였다. 실험장치의 조립된 모습의 사진은 Fig.9에 실었다. Fig.10에는 동시에 샘플링한 변위와 압력의 예를 나타내었다.

Fig.11과 Fig.12는 측정된 결과에 의해서 얻어진 급기공 밑의 섭동압력의 실수부와 섭동압력의 허수부를 이론해석과 비교한 결과이다. 기준간극은 13 μm로 측정되었으며, 급기압력은 게이지 압력으로 5 bar로 급기하였다. 본 연구에서는 ε이 무차원이기 때문에 섭동압력의 실수부의 차원은 [N/m^2]를 가지며, 허

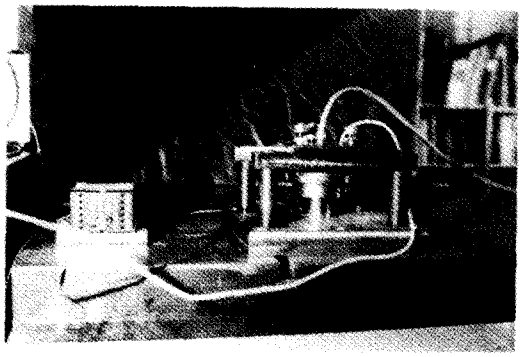

Fig. 9. Photo of experimental setup.

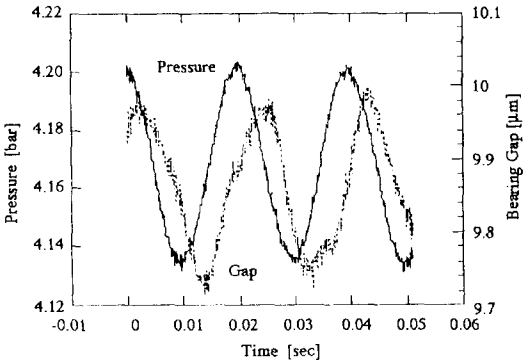

Fig. 10. An example of measured data.

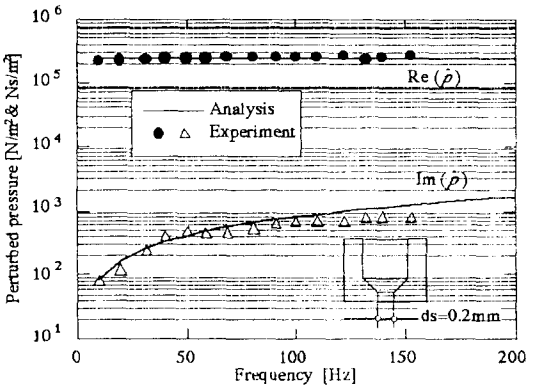

Fig. 11. Perturbed pressure at d_s=0.2 mm.

수부의 차원은 [N · s/m^2]가 된다. 섭동압력의 실수부의 경우는 값의 오더가 10^5정도의 값을 갖는 반면, 허수부는 그 값의 1000 분의 1정도의 값을 갖게 된다. 이는 공기베어링의 감쇠계수가 강성계수에 비해 작다는 것을 보여주는 데이터이다. 하지만 공기막이 발생

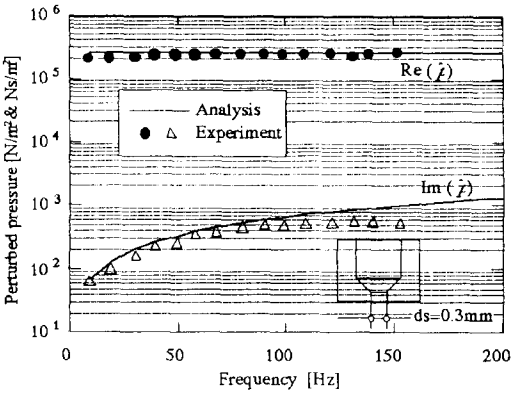

Fig. 12. Perturbed pressure at d_s=0.3 mm.

시키는 유막 힘은 강성력의 경우 강성계수와 변위의 곱이 되고, 감쇠력의 경우는 감쇠계수와 속도의 곱이 되므로, 회전수가 커지면 상대적으로 감쇠력이 커지게된다.

실험과 이론해석 사이에는 100 Hz이하의 가진주파수 영역에서는 잘 일치한다. 이는 이론적인 해석방법이 정성적인 면이나 정량적인 면에서 좋은 결과를 준다는 것을 보여주며, 본 연구에서 제시한 이론해석 방법으로 베어링의 해석 및 설계를 할 수 있다는 것을 보여주는 결과이다. 주파수가 높아지면서 이론 해석값과 실험결과가 달라지는 것은 높은 가진주파수에서는 압력신호의 필터링에 의해 시간 지연이 발생한 것이라 생각된다.

6. 결 론

자성형 급기공을 갖는 외부가압 공기베어링의 정상상태 압력 및 섭동압력을 실험적으로 측정하였다. 베어링의 미소변위에 근사시킬 수 있는 1 μm 이하의 작은 변폭을 만들어내기 위해서 압전소자를 이용하였으며 효과적으로 만들어 낼 수 있었고, 이 작은 변폭은 Chapman 이 제안한 방법을 개선한 정전 용량형 변위센서를 이용하여 효과적으로 미소 변위를 측정할 수 있었다. 정적인 압력의 경우에 이론치와 해석치가 잘 일치하였으며, 이론해석에서 사용하는 이산계수인 C_d를 0.64로 하였을 경우가 가장 근접한 결과를 나타내었다. 섭동압력도 100 Hz 이하의 가진 영역에서는 이론치와 잘 일치하는 것으로 측정되었으며, 이는 문헌[4]에서 제시되었던 직접수치해법을 외부가압 공기

베어링에 적용할 때, 등엔트로피 가정을 섭동압력을 구하기 위해서 사용할 때도 효과적으로 이용될 수 있음을 나타내준다는 결론을 얻었으며, 직접수치해법이 외부가압 공기베어링의 정적압력과 섭동압력을 계산하는데 적합하다는 결론을 얻었다.

참 고 문 헌

1. Majumdar, B.C., On the general solution of externally pressurized gas journal bearings, J. of Lub. Tech., Trans. ASME, Vol. 94, No. 4, pp.730sim733, 1972.
2. Elrod, H.G. and Glenfied, G.A., Computer procedure for the design of flexibly mounted externally pressurized gas journal bearings", Proc. 5th Gas Bearing Symposium, Univ. of Southampton, paper 22, 1971.
3. Kazimierski, Z. and Trojnarski, J., Investigations of externally pressurized gas bearings with different feeding systems", J. of Lub. Tech., Trans ASME, Vol. 103, pp.451sim 457, 1980.
4. Dong-Chul Han, Sang-Shin Park, Woo-Jung Kim, Jongwon Kim, A study on the static and dynamic characteristics of externally pressurized air bearings, Precision Eng., J. of the ASPE, Vol.16, No.3, pp. 164sim 173, 1994.
5. Shapiro, A.H., The Dynamics and the Thermodynamics of Compressibility Fluid Flow, Vol. 1, New York : Ronald Press, 1953.
6. 전경석, 외부가압 공기베어링의 특성에 관한 연구, 서울대학교 석사학위 논문, 1990.
7. P.D. Chapman, A capacitance based ultra precision spindle error analyser", Precision Eng., Vol.7, No.3 pp.129sim