

포일베어링을 사용한 고속 원심압축기의 동특성

°권 계 시*, 지유철*, 이상욱*, 최문창*

Dynamic Characteristics of a High Speed Centrifugal Compressor using Foil Bearings

(Kye-Si Kwon, Yoo-Chul Ji, Sang-Wook Lee, Moon-Chang Choi)

ABSTRACT

In order to understand dynamic characteristics of centrifugal compressor supported foil bearing, of which normal operating speed is about 20,000 ~ 50,000 rpm, the rotor whirl is measured using gap sensors. Not only critical speeds of rotor system but also stability of rotor whirl, which are main concerns of the turbo compressor system, are measured using gap sensors by varying the rotating speed of the rotor. The stiffness characteristics of bearing system is shown to be almost invariant according to speed variation by the measurement of eccentricity. In addition, from the directional power spectral density function of the measured vibration signal, the isotropy stiffness characteristics of foil bearing system is discussed.

1. 서론

고속 회전체, 특히 고속 원심 압축기들은 고속 회전과 고온등의 극한적인 운전조건에 적합한 베어링을 필요로 할 뿐더러 냉매환경등에 사용이 가능하여야한다. 이러한 고속 원심 압축기의 베어링으로 공기 역학 베어링 (gas hydrodynamic bearing) 을 사용하였으며, 이는 로터(rotor)가 회전함에 따라 공기의 쉼기 효과에 의해 압력이 발생하여 이 압력에 의해 회전체를 지지하는 기계요소이다 [1,2]. 이러한 공기 역학 베어링은 다음과 같은 장점을 지닌다. 공기 역학 베어링은 윤활제로서 공기 혹은 냉매로서 기름에 대한 오염의 영향이 작고, 회전정밀도가 높고, 비접촉식 운전이 가능하므로 마찰 마멸이 없어 고속 회전에 적합하다. 또한 정압베어링(hydrostatic bearing)과는 달리 가압장치등이 불필요하며, 간단한 구조로서 가볍고 값이 싼 장점이 있다 [2]. 이러한 공기베어링이 강제인 경우에는 고속회전시에 불안정성 (Instability)등이 문제가 되어 다엽베어링(multileaf bearing) 즉 포일 베어링(foil bearing)과 틸팅패드 베어링(tilting pad bearing)이 널리 사용되었다 [3,4]. 특히 포일 베어링의 경우 타 베어링에 비해 가공 및 조립 제작이 용이하다. 또, 무엇보다도 포일 날장간의 마찰과 포일 틈새 공간의 에어쿠션 효과로 감쇠능력이 탁월하기 때문에, 안정적 고속 운전이 요구되는 소형 터보 압축기의 베어링으로써 적합한 장점이 있다 [2].

이러한 포일베어링은 고속회전체를 지지하는 베어링이므로 안전성, 질량불균형응답(unbalance response)등을 측정하기 위한 연구가 진행 되어 오고 있다

[5,6]. 한편 공기베어링의 강성등을 간접적으로 알아내기 위한 실험도 역시 진행되어 오고 있다 [7]. 이러한 진동을 스펙트럼으로 분석하려는 노력도 진행되어 오고 있다 [5]. 한편 회전체의 진동특성을 위한 스펙트럼인 방향성 주파수 해석이 최근에 개발되어 많이 응용 되어 오고 있는데 [8,9,10,11], 이를 이용하면 베어링의 비등방성의 진단이 용이할 뿐더러, 회전체의 방향성을 쉽게 알아 볼수 있는 장점이 있다 [9,10,11].

본 연구에서는 포일 베어링의 고속 원심 압축기에 적용가능성을 위하여 포일 베어링과 축 그리고 임펠러로 구성된 베어링 회전체 시스템을 공기중에서 회전 주파수를 관심영역내에서 변화를 시켜 축의 궤적을 측정하였다. 질량불균형응답의 크기를 이용하여 고속 압축기 시스템의 고유진동수를 간접 추정하였으며, 속도에 따른 편심량의 변화를 통해 포일베어링의 강성의 변화를 추정하였고, 방향성 주파수 응답 함수를 통해 베어링의 비등방성정도를 알아 보았다.

2. 포일베어링의 구조

일반적으로 동압 공기 베어링은 구조가 간단하고 누설등의 없는 장점이 있으나, 0.5X성분의 불안정성이 일어나므로 보통의 경우에 다엽의 구조인 틸팅패드 베어링 또는 포일 베어링을 사용하게 된다 [3,4]. 포일베어링은 얇은 접판이 서로 겹쳐지도록 배열 되어 있으며, 겹쳐지는 효과에 의해 댐핑의 효과를 가져올뿐더러, 0.5X등의 불안정요소를 제거할수 있는 그림 1과 같은 구조이다.

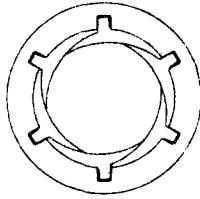


Figure 1. Radial foil bearings

포일베어링은 정지시에 축과 베어링 사이에 약간의 예하중(preload)가 걸려 있으며 축이 회전함에 따라 동압이 형성된다. 이 동압은 포일을 밀어내어 완전히 접촉없이 회전하게 된다. 초기의 부상시에 마찰등에 윤활 작용을 하기 위해 포일은 테프론 코팅이 되어있다.

3. 축계적의 측정 및 해석

3.1 축계적의 측정

포일베어링으로 지지된 원심압축기의 축 거동 현상을 보기 위하여 그림2과 같이 y 및 z방향에 각각 와전류형 비접촉식 변위센서 (KALMAN KDM-7200)를 이용하여 진동을 측정하였다. 이를 위하여 임펠러 대신 끝쪽에 임펠러의 무게와 같은 센서 타겟을 설치하여 실험을 하였다.

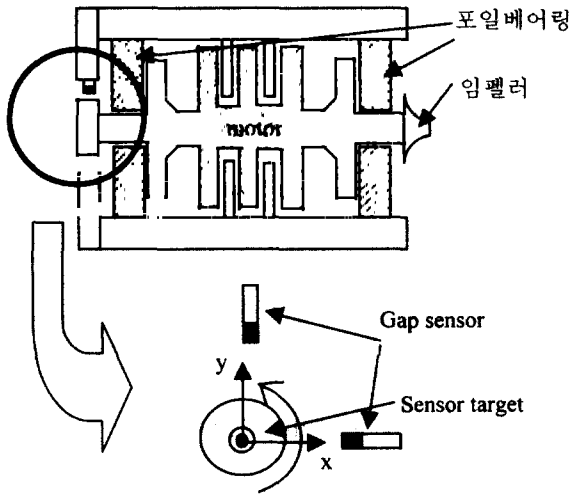
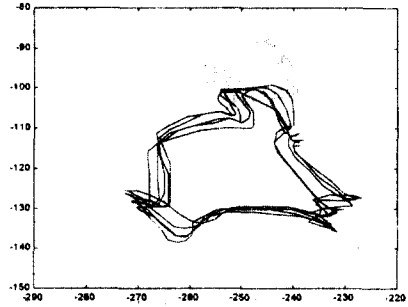
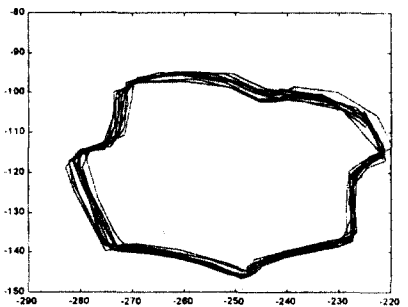


Figure 2. Measurement of rotor whirl

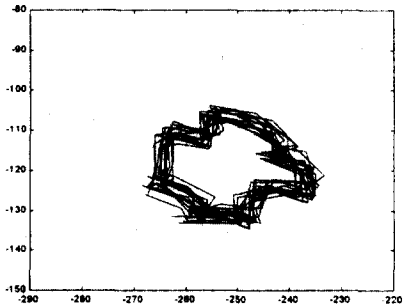
변위신호의 저장을 위하여 10kHz의 sampling 주파수로 y방향과 z방향의 변위를 각각 동시에 저장하였다. 속도에 따른 실험 결과는 그림 3과 같다.



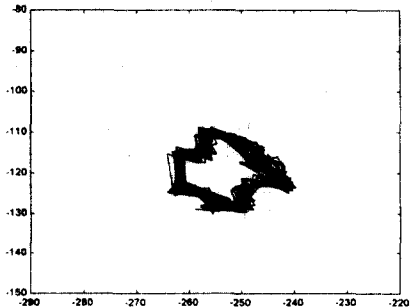
(a) 10,000 rpm



(b) 20,000 rpm



(c) 30,000 rpm



(d) 40,000 rpm

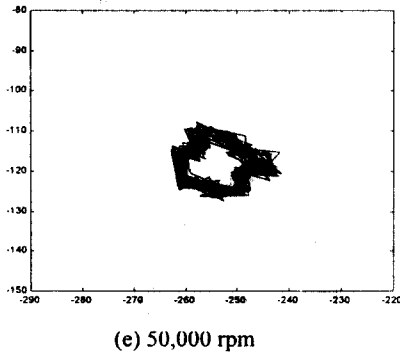


Figure 3. Rotor whirl with the variation of speed

그림3은 속도별 축 궤적을 측정한 결과이다. 공통적인 특징은 궤적 1상에 포일 날개의 효과가 반영되어 6개의 굴곡이 나타난다. 또한 축 궤적이 원형에 가까운 대칭성을 보이는데, 이것은 포일 베어링의 강성이 방향성에 관계없이 균일하다는 것을 보여준다. 궤적 크기의 RMS값을 속도별로 도시하면 그림4와 같다. 축의 Whirl이 최대로 큰 운전 속도는 2만 RPM 근처이다. 2만 RPM을 넘어서는 궤적의 크기가 점점 작아지면서 안정적인 Whirl 형상을 나타낸다.

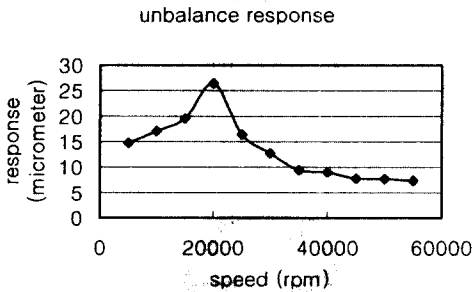
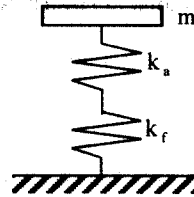


Figure 4. Whirl amplitude with the variation of speed

이는 포일 베어링을 적용한 회전체 시스템은 베어링의 강성이 낮아 강체 모드 (rigid body mode)가 20000rpm 정도에서 나타나고 축의 굽힘 모드가 나타날때까지 안정적인 운전이 가능함을 알 수 있다. 베어링을 고려하지 않은 Free-free 경계조건으로 모드 실험으로 얻은 축의 1차 굽힘 모드 (flexible mode)는 2kHz이었고 이에 해당하는 위험속도는 12만 rpm이므로 실험에서는 굽힘 모드 (flexible mode)는 나타나지 않았다. 본 실험에서는 속도를 5000 rpm씩 불연속적으로 증가시키면서 측정하였으므로 2개의 강체 모드인 병진 및 conical 모드를 구분하기는 힘들었다. 또한 축 구동 모터와 구동 드라이버의 한계로 축의 굽힘모드가 나타날정도로 속도를 증가시키지는 못하였다.

3.2 포일베어링의 강성

포일 베어링의 강성은 동수압(hydrodynamic pressure)에 의해 발생하는 공기막의 강성과 포일의 자체의 탄성에 기인하는 강성이 직렬로 연결되어 있다고 볼 수 있다. 따라서, 공기압이 충분히 발생하여 포일 자체와 회전축의 접촉이 없다고 가정한다면 그림 5과 같이 포일 베어링 강성의 모델링이 가능하다.



k_a : Hydrodynamic air film stiffness
 k_f : Foil stiffness
 m : rotor mass

Figure 5. Modeling of foil bearing stiffness

즉 베어링 강성을, k_b 라고 하면, 베어링의 강성의 다음 식에 의해 얻어진다.

$$\frac{1}{k_b} = \frac{1}{k_a} + \frac{1}{k_f} \quad (1)$$

이때, 여기서 공기막의 강성, k_a ,은 속도 및 편심위치의 함수이고 속도에 따라 급격히 증가하나, 포일의 강성은 일정하므로 일반적으로 $k_a \gg k_b$ 의 관계가 된다. 따라서 베어링 시스템의 강성은 근사적으로 포일의 강성과 동일하게 되어 $k_b \approx k_f$ 의 관계가 된다. 즉 베어링 강성은 근사적으로 포일 강성이 되며 속도와는 상관없는 일정한 값을 갖는다.

실험으로 구한 정적인 포일에 의한 베어링 강성은 $k_f = 1.2e6 \text{ N/m}$ 이다.

베어링의 특성이 등방성을 지니고, 이 강성이 속도에 따른 포일 베어링의 베어링 강성을 근사적으로 대표하고, 축의 질량 중심이 각 베어링의 사이의 중심에 위치한다면 강체 모드중 병진 모드에 의한 위험 속도 f_{cr} 를 다음과 같이 근사적으로 간단히 계산이 가능하다.

$$f_{cr} \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_b}{m/2}} = 352 \text{ Hz} = 21133 \text{ rpm} \quad (2)$$

여기서 회전체의 무게, m ,는 임펠러를 포함해서 490g이다.

따라서 근사적으로 병진 모드를 2만 rpm 정도를 얻었으며 이는 실험적으로 추정된 값과 근사적으로 일치함을 알 수 있다.

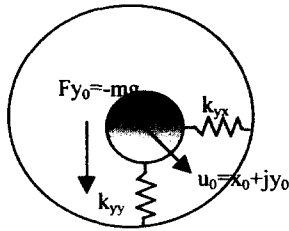


Figure 6. Stiffness estimation from eccentricity

한편 베어링의 강성 변화는 하중에 의한 정적인 처짐에 영향을 준다. 이를 이용하여 간접적으로 베어링강성의 변화를 추정하는 연구가 진행되어 왔다 [4,7]. 어느정도 되는지 알아 보기 위하여 속도에 따른 정적 편심량의 변화 ($u_0 = x_0 + jy_0$)를 측정하였다. 여기서 j 는 복소수를 나타낸다. 측정부의 정적편심량을 위하여 편의상 한쪽베어링에서의 무게탄을 전체 로터의 무게의 1/2이라고 가정한다면, 정적인 중력의 힘에 의한 강성의 변화를 근사적으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$k_{xx} = \frac{F_{x0}}{x_0}, k_{yy} = \frac{F_{y0}}{y_0}, k_{xy} = \frac{F_{x0}}{y_0}, k_{yx} = \frac{F_{y0}}{x_0} \quad (3)$$

여기서 정적인 힘, F_{y0} , F_{x0} , 은 중력만 작용한다고 가정하고 축의 무게 중심이 각 베어링사이의 중심에 작용한다면 각방향의 힘의 한쪽 베어링에 각각

$$F_{y0} \approx -\frac{mg}{2}, F_{x0} = 0 \text{이라고 할 수 있다. 실험에서}$$

베어링에 가해지는 하중은 회전체의 자중으로 일정하고, 실험 결과에 의하면 축의 처짐도 속도와 무관하게 거의 일정하였다. 여기서 그림 3 에서 알수 있듯이 축 궤적의 중심 위치도 중심이 (-250,-120)근처에서 1-2 μ m 이내의 변화이다. 이는 식 (3)과 같이 축의 처짐량이 베어링의 강성과 하중의 관계로 결정되므로 실험 결과도 베어링의 강성, k_b , 은 거의 일정함을 입증한다. 여기서 중심의 절대 위치는 센서의 오프셋등의 영향과 센서를 설치하는데에 문제가 있었기 때문에 베어링 센터로부터의 정확한 중심값을 나타내지는 못했다. 따라서 이번 실험에서는 축의 중력에 의한 편심량이 속도에 따라 변화가 적었고, 이를 통해 베어링의 강성의 변화가 적다는 결론을 얻을수 있었다.

3.3 방향 파워 스펙트럼을 이용한 분석

원심압축기의 속도에 따른 진동을 보다 효율적으로 분석하기 위하여 회전기계의 진단등에 널리 사용되는 방향 파워 스펙트럼 (directional power spectrum)을 이용하여 운전중의 로터의 평면 선회 운동을 방향 스펙트럼으로 후방 (로터의 회전과 반대 방향) 및 전방

(로터 회전과 같은 방향) 조화 성분으로 분리해, 진동 신호를 효율적으로 분석할 뿐더러 회전기계의 비등방성의 진단등에 응용하는 것이다 [9,10,11]. 특히 베어링이 비등방성을 가지면 질량 불균형의 응답이 전방 선회 운동 뿐만 아니라 후방 선회 운동도 생기게 되는데 방향 파워 스펙트럼을 사용하면 이를 양과 음의 주파수 영역에서 분리해 내서 볼 수 있는 장점이 있다 [9,10,11]. 방향 파워 스펙트럼은 다음과 같은 복소 신호, $u(t)$, 가 y 방향과 z 방향의 신호로 정의 될 때 다음과 같이 방향 스펙트럼은 정의 된다.

$$P_{uu}(f) = P_{xx}(f) + P_{yy}(f) + j(P_{xy}(f) - P_{yx}(f)) \quad (4)$$

여기서 $P_{ik}(f)$, $i, k=y, z$, 는 파워 스펙트럼을 나타내고 복소신호는 $u(t) = y(t) + jz(t)$ 의 관계로 나타낼 수 있다. 식(4)에 정의된 방향 파워 스펙트럼은 기존의 파워 스펙트럼과 달리 y - z 평면상에 운동의 모양과 방향 및 주파수 정보를 제공한다. 따라서 방향 파워 스펙트럼은 기존의 파워 스펙트럼보다 평면운동의 더 많은 정보를 제공한다 [9]

그림 7은 속도에 따른 방향 파워 스펙트럼 분석을 구한 waterfall plot을 보여준다. 그림에서 알수 있듯이 양의 방향의 주파수인 1X의 주파수 성분이 주된 성분으로 나타나도 불안정 whirl인 0.5X성분과 베어링의 비등방성으로 인한 backward whirl은 거의 없음은 이 베어링의 시스템이 등방성을 가짐을 보임을 알수 있다. 이때는 질량 및 댐핑이 등방성을 갖을때 강성은 다음과 같은 특성을 갖는다 [8].

$$k_{xx} \approx k_{yy}, k_{xy} \approx -k_{yx} \quad (5)$$

여기서 k_{xy} , k_{yx} 는 cross-coupled 강성이고 특히 k_{yx} 가 음의 값을 가질때 불안정운전이 되는것이 알려져 있다 [8].

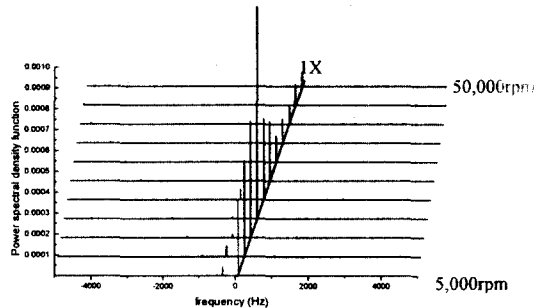


Figure 7. Waterfall plot of rotor whirl

4. 결론

본 연구에서는 고속 원심 압축기에서 포일 베어링의 적용가능성을 위하여 공기중에서 여러가지 실험을 하였다. 이실험을 통해 포일베어링의 안정성을 입증하였으며, 포일베어링의 특성은 속도에 따른 베어링의 강성이 거의 일정하였다. 또한 베어링은 각 방향에 따라서 균등한 강성특성을 지닌 등방성 (isotropy)을 가지고 있었고 일반적으로 저널 베어링에서 나타나는 불안정 요소인 0.5X성분이 거의 나타나지

않음을 실험을 통하여 알수 있었다. 추후의 연구과제로서 공기중이 아닌 냉매중에서의 거동특성을 알기 위한 실험과 축방향의 포일베어링의 특성에 대한 연구가 필요하다.

Reference

1. D.F. Heuer, R.A.Collins,"Dynamic and environmental evaluation of compliant foil gas lubricated bearing", AResearch Manufacturing Company of AriZona, 1973.
2. G.L.Agrawal, "Foil air/gas bearing technology-an Overview", International Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition, Orlando, Florida, June, 2-5,1997.
3. F.F.Ehrich, Handbook of Rotordynamics, McGRAW-HILL,inc., 1992.
4. John M. Vance, Rotordynamics of Turbomachinery, John Wiley & Sons, Inc.,1988.
5. 황평, 권성인,"고속 터어보기계용 공기포일베어링에 대한 동특성과 실험적 연구", 제27회 한국윤활학회 춘계학술대회, pp.159~166.
6. 한동철, 김재일,"겉관 공기베어링의 동특성에 관한 실험적 연구",대한기계학회 논문집, 제10권, 제3호, pp.399~407, 1986.
7. Harley tripp and Brian Murphy, "Eccentricity Measurement on a Tilting-Pad Bearing", ASLE Transactions, vol. 28,2, pp.217-224, 1984.
8. Lee, C. W., "Vibration Analysis of Rotors," Kluwer Academic Publishers. 1993.
9. Joh, C.Y. and Lee, C.W., "Use of dFRFs for Diagnosis of Asymmetric/Anisotropic Properties in Rotor-Bearing System," ASME J. Vibration and Acoustics, Vol. 117, pp. 64~69, 1996.
10. Lee.C.W., Han ,Y.S. and Park, J.P., "Use of Directional Spectra for Detection of Engine Cylinder Power Fault," J. of Shock and Vibration, Vol. 4(5), pp. 391~40, 1997.
11. 박종포, 이종원,"구름 결합 주파수 규명을 위한 방향 스펙트럼의 이용," 한국소음진동공학회지, 제9권, 제2호, pp 393~400, 1999.