

공기윤활 틸팅패드 저어널 베어링의 동적거동에 관한 실험적 연구

황 평, 권 성 인

영남대학교 기계공학부

영남대학교 대학원 기계공학부

An Experimental Investigation on the Dynamic Behavior of an Air Lubricated Tilting Pad Journal Bearing

Pyung Hwang, Sung In Kwon

School of Mechanical Engineering, Yeungnam University

School of Mechanical Engineering, Graduate School, Yeungnam University

Abstract—The dynamic behavior analysis of air-lubricated tilting pad journal bearing which considers start-up, running and shutdown process were performed. By carrying out the experiment of shaft vibration, measurement of the vibration amplitudes supported by air lubricated tilting pad bearing and analysis of the result, we found more accurate dynamic behavior of the system. There were many investigations in these bearings, but dynamic behavior of startup, shutdown and running process were lacked. By using the experimental data we found the accurate dynamic behavior of the system.

Key Words—Air-lubricated tilting pad bearing, Dynamic behavior, Vibration

1. 서 론

베어링의 속도한계를 정하는 중요한 요인은 자려진동, 불균형진동, 공진시의 진동, 높은 전단응력과 난류천이에 기초로한 소비동력, 발열증대 등이다. 이러한 자려진동을 방지하고 최고 회전속도를 높이기 위해 베어링 형태를 비진원으로 하거나, 베어링을 탄성지지하여 오일 필름 댐퍼를 달고, 부동부시를 이용하고, 각각 자유롭게 독립적으로 움직일 수 있는 틸팅 패드 형식을 이용하는 등의 대책이 제시되었다

틸팅 패드 저어널 베어링에 대해서는 1968

년 Chu등이 공기윤활 베어링의 축의 안정성을 주파수 응답법과 비선형 궤적법으로 비교하였고, 다시 72년에 정상상태와 안정성에 관해 연구하였다.[1~2] 또, Elwell등이 69년 층류, 비압축성 윤활제로 윤활되는 정특성을 연구하였다.[3] 84년 난류에서의 유체 관성력, 패드변형, 예압이 주는 영향에 대해 Hashimoto가 연구하였고, 88년에는 Knight 등이 열전달 효과를 고려한 해석을 수행하였다.[4~6] 황 등[7]은 공기로 윤활되는 틸팅 패드 저어널 베어링을 모델로 하여 패드에 작용하는 유막압력을 유량의 연속성을 이

용한 직접해법[8]을 이용하여 얻은 후, 정적 하중용량, 마찰력등의 정특성과, 교란지배방정식에 의하여 강성계수, 감쇠계수등의 동특성을 계산하였다.

본 논문에서는 이를 바탕으로 하는 틸팅패드 저어널 베어링의 안정성 해석의 기초가 될 수 있는 시동 및 종료 그리고 운전 중의 공기윤활 틸팅패드 저어널 베어링으로 지지되는 축계의 거동을 실험적으로 연구함으로써 공기윤활 틸팅패드 저어널 베어링 설계에 대한 기초자료를 얻고자 한다.

2. 틸팅 패드 저어널 베어링 모델

공기윤활 틸팅 패드 저어널 베어링을 Fig.1에 나타내었다. 여기서 네 개의 패드는 각각 $\theta_{\beta 1}$, $\theta_{\beta 2}$, $\theta_{\beta 3}$, $\theta_{\beta 4}$ 각도에서 라인 피봇 지지되어 있고, 각 패드는 θ_s 에서 θ_e 만큼의 각도로 되어있다. 또한, C_b 만큼의 베어링 틈새를, C_p 만큼의 패드 틈새를 가지며 각도 γ 로 기울어져 있다.

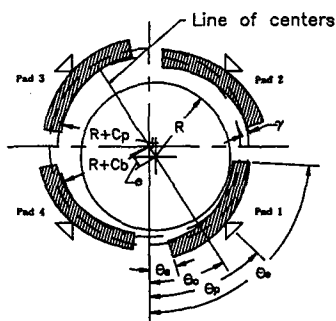


Fig.1 Geometry of air-lubricated tilting pad journal bearing

3. 실험

본 연구에서 사용된 실험장치는 정압으로 구동하여 동압으로 운전되는 공기윤활 틸팅패드 저어널 베어링으로 양단에 지지된 강체의 로터로 구성된다. 또한 로터의 축 방향 움직임을 억제하고 드러스트부에 로터가 접촉하는 등의 회전 방해요소를 제거하기 위하여 로터의 양단에 정압형 공기 드러스트 베어링을 구성하였다. 로터의 회전은 압축 공기를 블레이드에 분사를 통해 회전력을 줌으로써 고속회전이 가능하도록 하였다.

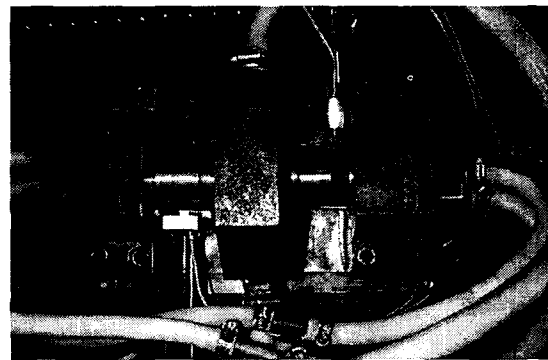


Photo. 1 Bearing system supported by air lubricated tilting pad journal bearing

Photo. 1은 로터와 베어링이 완전히 조립된 상태에서 속도 및 진동 측정을 위한 센서를 위치시킨 상태의 실험장치를 보여준다.

먼저 지지부인 베어링은 Fig. 1에서 보여주는 것과 같은 기하학적 형상을 지니고 있다. 베어링 패드의 내경은 $50\text{mm} \pm 0.001\text{mm}$ 로, 베어링 패드의 외경은 $56\text{mm} \pm 0.001\text{mm}$ 로 설계하였다. 예압 $(c_p - c_b)/c_p$ 가 0.2가 되도록 설계를 하였다. 베어링의 폭은 $50.0 \pm 0.1\text{mm}$ 로 설계 제작하였으며 베어링 하우징의 재질은 SM45C를 사용하였다. 로터의 직경은 $50\text{mm} \pm 0.001\text{mm}$ 이며 무게는 2.4kg이다. 로터의 길이는 243mm이며 표면은 부식

방지를 위해 연마를 한 상태이다.

로터의 회전력을 주는 블레이드 부분은 로터를 밀링으로 가공하여 삼각형의 단이 지게 함으로써 급기공으로 유입되는 압축공기를 받아 회전하도록 설계하였다.

드러스트 베어링은 정압형을 사용하고 있으며 6개의 급기공을 통해 양쪽에서 축을 안쪽으로 밀어 넣어 축 방향의 움직임을 제지하고 공기막에 의해 틈새가 발생하게 하여 드러스트 부분과 마찰이 일어나지 않도록 제작하였으며 드러스트 급기공은 직경 0.5mm이다.

초기의 구동마찰로 인해 발생하는 마모 및 불안정성을 해결하기 위해 베어링이 위치하는 부분에 정압 구동이 가능토록 2열로 원주방향으로 0.5mm의 구멍 24개씩을 뚫어 급기가 가능토록 하였다. 로터의 회전속도 및 위상을 측정하기 위하여 로터의 한쪽에 광반사형 타코메타를 수평방향에 설치하고 Keyphasor의 역할을 할 수 있도록 하였다.

회전속도의 변화에 따른 로터의 진동을 측정하고 분석하기 위하여 비접촉 변위센서를 사용하였다. 반경방향으로 서로 엇갈린 두 개의 센서는 서로 90°를 이루도록 하였다. 드러스트 베어링 및 블레이드에 공급되는 압력은 두 대의 공기 압축기를 통해 공급하도록 하였다. 또한 압축기와 실험장치 사이의 진동의 전달 및 바닥으로부터 전달되는 진동들이 실험장치에 전달되지 않도록 실험장치는 방진 테이블 위에 설치하였다.

Keyphasor 및 두개의 변위센서로부터 받아들여진 신호는 변환기를 통해 실시간 모니터링을 위한 주파수 분석기로 보내어지고, 한편으로는 A/D 변환기를 거쳐 컴퓨터로 입력되도록 구성하였다. 주파수 분석기를 통해 실시간의 주파수를 관찰하고 또 컴퓨터의 회전체 자동 진단 프로그램을 통하여 축의 회

전 궤적과 Bode plot등을 그리게 함으로써 회전속도와 로터의 진동 사이의 관계를 그리도록 설정하였다. 실험장치의 전체적인 개략도는 Fig. 2에서 보여주고 있다.

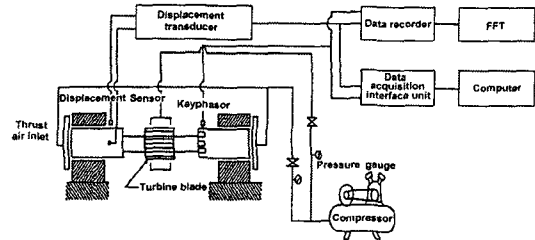


Fig. 2 Schematic diagram of experimental system

공기유향 킬팅패드 저어널 베어링으로 지지된 로터-베어링 시스템을 기동하기 위하여 충분한 압축 공기를 확인한 후 먼저 정압 드러스트 베어링과 정압 레이디얼 급기공에 4기압의 공기압으로 압축 공기를 공급한다. 드러스트 베어링과 로터가 양단에서 충분한 틈새를 가지도록 하고 축이 패드의 표면에 대해 부상되도록 한다.

그리고, 블레이드에 공급되는 8기압의 압축공기를 서서히 공급하여 회전을 시작하도록 한다. 속도를 점차 증가시키면서 즉, 블레이드 부의 급기를 점점 늘리면서 로터의 궤적과 스펙트럼 등을 관찰한다. 로터가 고속으로 회전하는 동안 항상 시스템에 다른 이상이 발생하지 않는지를 관찰하고 완전한 불안정 상태에 이르러 실험을 더 이상 수행하지 못하거나 기타 설정된 속도한계나 상황에 이르면 서서히 공기압을 줄여 로터의 회전을 멈추게 하고 드러스트 부분에 공급되던 공기도 중단시킨다.

본 연구에서는 구동의 안정성 및 기초적 데이터 획득을 위해 구동시작 후 약 10,000rpm까지 로터의 운동을 측정하고 또

베어링의 영향을 검토하도록 한다.

4. 실험결과 및 고찰

공기틸팅패드 저어널 베어링으로 지지되는 로터-베어링 시스템에 대해 서로 직각으로 설치된 두 개의 비접촉 변위센서를 이용한 실험을 통하여 다음과 같은 데이터를 얻었다.

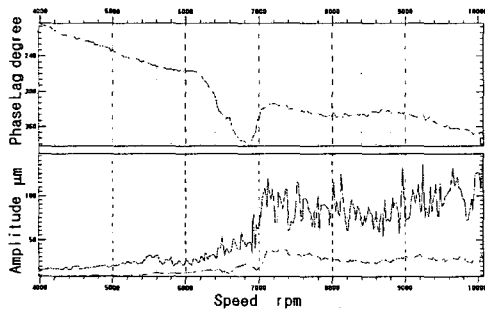


Fig. 3 Variation of phase lag & amplitude about speed (X-axis)

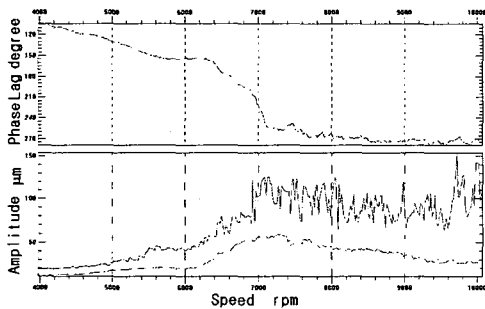


Fig. 4 Variation of phase lag & amplitude about speed (Y-axis)

Fig. 3과 Fig. 4는 Bode plot으로서 속도의 변화에 따른 진폭의 변화와 위상각의 변화를 X, 및 Y 축에 대해 보여주고 있다. Bode plot를 통해 얻을 수 있는 중요한 정보는 공진 속도를 정의할 수 있다는 것이다. 공진

속도는 로터 베어링 시스템의 회전속도가 시스템의 공진 주파수와 만나는 영역을 나타낸다. 로터가 공진 영역에 접근하면 시스템 전체에 진폭이 크게 증가하고 위상지연도 거의 90°를 넘어서게 된다. 그리고 공진에서는 시스템의 강성이 최소가 된다. 이 영역에서는 진폭을 크게 줄이는 댐핑의 역할이 매우 중요하게 된다.

Fig. 3과 Fig. 4에서 초기의 구동 부분에 대한 데이터는 보여지고 있지 않으며 실험 중에 0~4,000rpm 구간은 매우 빠른 가속이 이루어졌다. 또, X 방향의 1차 공진은 6,800rpm 부근으로 판단되어지며 이때 최대 진폭은 50 μm 이다. Y 방향의 1차 공진은 약 7,000rpm 부근으로 판단되어진다. 공진에서 Y 방향의 최대 진폭은 125 μm 이다. 물론 공진 이전의 영역에서는 X,Y 모두 안정되고 낮은 진폭(50 μm)을 가진다. 하지만 공진 이후에는 회전에 대한 동기 성분과 같은 1X 성분은 진폭이 조금 줄어들고 있으나 필터링되지 않은 직접적인 데이터는 매우 불안정한 양상을 보여준다. 원인은 실험을 계속 진행시켜야만 한다.

Fig. 5와 Fig. 6은 cascade plot으로 속도에 대한 주파수와 진폭의 크기를 나타내며, 또 회전속도와 동기 성분인 주파수 성분들에 tracking을 해 보여줌으로써 각 속도에 대해 진동에 영향을 미치는 주된 요인들을 알아볼 수가 있다. 이 그림에서도 역시 7,000rpm 이상에서는 아주 큰 진폭을 가진 불규칙한 성분들이 보여짐으로써 여러 요인들이 복합적으로 작용하고 있음을 알 수 있으며 직접 실험상으로 알 수 있는 가장 큰 요인은 베어링과 로터의 마찰로 인한 것으로 여겨진다.

Fig. 7은 속도의 변화에 따른 X 및 Y 방향의 진폭과 함께 축의 회전궤적을 보여주고

있다. 축의 회전궤적에서도 7,000rpm에서 회전궤적이 매우 찌그러져 있음을 볼 수 있다. 이는 수평과 수직 방향의 진폭의 차이가 상당히 큼을 알 수 있다.

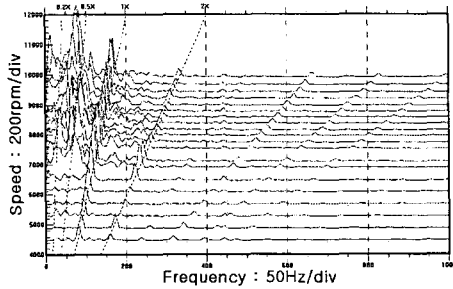


Fig. 5 Cascade plot of rotor-bearing system supported by foil bearing (X-axis)

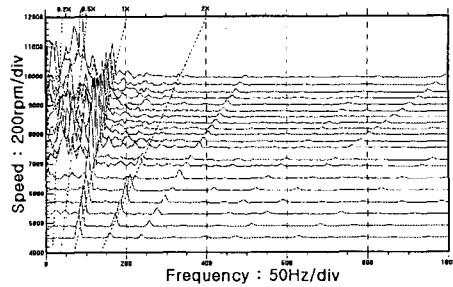


Fig. 6 Cascade plot of rotor-bearing system supported by foil bearing (Y-axis)

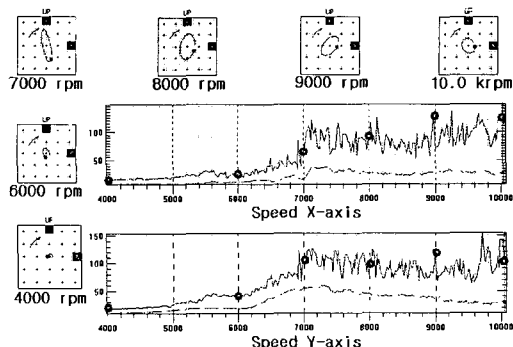


Fig. 7 Variation of orbit and amplitude about rotational speed

5. 결 론

본 연구에서는 실험적 방법을 이용하여 공기운할 틸팅패드 저어널 베어링으로 지지된 로터 베어링 시스템의 동적 거동을 측정하였다. 이에 대한 해석을 통해 공기운할 틸팅패드 저어널 베어링의 특성을 파악함으로써 설계된 시스템의 안정영역에 대한 고찰을 하였다. 또, 비교 분석을 통해 공기역학 베어링의 장점을 이해하고 또 보완해야 할 부분에 대한 고찰을 수행하였다. 실험과 그 결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

먼저, 본 실험에 사용된 로터-베어링 시스템의 로터 회전 속도는 사용영역이 저속보다는 고속영역에서 더 안정하게 작동할 수 있다. 초기 구동은 정압을 사용해야 하므로 이에 대한 대책이 필요하다.

두 번째는 실험을 행한 영역 내에서 로터 베어링 시스템의 안정 영역은 4,000~6,000rpm 사이임을 알 수 있다. 이 구간에서의 시스템 진폭은 $50 \mu m$ (peak-to-peak) 이하를 나타내고 위상각의 변화도 거의 없었다. 특히, 1X 성분의 진폭은 $10 \mu m$ pp 이하를 보여주고 있다.

마지막으로 본 연구에 사용된 시스템은 공기 동압만으로 구동하는 것보다 초기의 마찰을 없애기 위한 사항들이 고려되어만 한다. 이러한 점은 정압을 사용하여 구동을 할 때 아주 쉽게 구동이 된다는 것을 실험을 통해 잘 알 수 있다. 공기운할 틸팅패드 저어널 베어링으로 지지되는 축계 시스템의 초기 구동 시에 발생하는 불안정성을 해결하기 위하여 축 또는 패드 표면의 코팅이나 정압방식을 사용하는 것이 보다 안정적인 운전상태를 보여준다.

참 고 문 헌

- (1) T. Y. Chu, J. T. McCabe, H. G. Elrod, "Stability Considerations for a Gas-Lubricated Tilting-Pad Journal Bearing ; Part 1 : Analytical Methods", J. of Lub. Tech., Trans. ASME, pp. 162 - 172, 1968
- (2) J. T. McCabe, T. Y. Chu, H. G. Elrod, "Stability Considerations for a Gas-Lubricated Tilting Pad Bearing ; Part 2 : Analytical Refinements and Stability Data", J. of Lub. Tech., Trans. ASME, pp. 223 - 233, 1972
- (3) R. C. Elwell, J. A. Findlay, "Design of Pivoted-Pad Journal Bearings", J. of Lub. Tech., Trans. ASME, pp. 87 - 103, 1969
- (4) Hiromu Hashimoto, Sanae Wada, Shinji Yamamoto, "亂流域におけるティルティグソパッドジャーナル軸受の動特性に及ぼす流體慣性力の影響", 日本機械學會論文(C編), pp. 1709 - 1714, 1984
- (5) Hiromu Hashimoto, Sanae Wada, Takashi Marukawa, "大形ティルティングパッドジャーナル軸受の潤滑特性", 日本機械學會論文(C編), pp. 2383 - 2391, 1984
- (6) J. D. Knight, L. E. Barrett, "Analysis of Tilting Pad Journal Bearings with Heat Transfer Effects", J. of Lub. Tech., Trans. ASME, pp. 128 - 133, 1988
- (7) 황 평, 김인식, "직접해법에 의한 공기윤활 티핑패드 저어널 베어링의 정특성 및 동특성에 관한 연구", 한국윤활학회지, 제 10 권 제 1호, pp.46-55, 1994
- (8) 황 평, "공기역학 탄성 베어링의 정특성 및 동특성에 관한 연구", 박사학위논문, 서울대학교, 1989
- (9) Pyung Hwang, Seung-Jin Yun, "Dynamic Characteristics Analysis of Air-Lubricated Tilting Pad Journal Bearing using Direct Numerical Method", Proceedings of the IASTED, pp. 43 - 46, 1995