

틈새 변화에 따른 공기 포일 베어링 시스템의 진동 특성에 대한 연구

Study on the Vibration Characteristics of Air Foil Bearing System by Clearance Variation

신승훈*† · 박정구* · 정규강*

Seung-hoon Shin, Jung-Koo Park and Kyu-Kang Joung

Key Words : Air Foil Bearing(공기 포일 베어링), Clearance(틈새), Vibration Test(진동시험)

ABSTRACT

Application of air foil bearing (AFB) is widely using to cope with requirements of high speed and high efficiency system at turbo machinery. At same time, a wide variety of AFB design methods are required. In this paper, the AFB design factor influencing the most greatly in bearing performance was selected through theoretical analysis and vibration test was conducted using selected factor. Through this process, AFB system applicable for vehicle turbo machinery was developed.

1. 서 론

현재 개발되고 있는 터보 기기는 고속화, 고효율 시스템으로 그 경향이 바뀌어 가고 있다. 특히 차량에 사용하고 있는 터보 기기는 내진동 및 내충격에 적용이 가능한 베어링 시스템을 필요로 한다. 또한 베어링 오일의 문제를 제거하면서 작동유체를 직접 윤활제로 사용하는 공기 포일 베어링(Air Foil Bearing, AFB)을 장착하는 추세이다.

또한 신재생 에너지의 사용이 요구되면서 자동차용 공기 포일 베어링의 쓰임새가 넓어지고 있는 만큼 그 연구 또한 지속되어 오고 확대되고 있다.

고속 터보 기기의 원천 기술의 하나인 공기 포일 베어링의 설계, 제작 및 평가 기술에 대한 국내 기술은 아직 미흡한 상태이며, 현재까지 대부분의 원천적인 설계 기술은 그동안 많은 발전을 해 왔지만 진동이나 온, 습도 등의 외부 환경에 직접적인 영향을 받는 자동차로의 적용은 아직 불가능한 상태이며, 현재까지 원천적인 설계 기술은 국내 연구뿐만 아니라 선진사에서도 거의 확보하지 못한 상태이다. 따라서 보다 체계적인 기술의 축적만이 공기 포일 베어링의 설계 및 제작을 통한 고성능 자동차용 터보 기기 제작의 초석이 된다.

2. 본 론

2.1 공기 포일 베어링의 설계인자 해석

본 논문에서는 터보 기기의 성능을 고려한 공기 포일 베어링 설계시 사용되는 설계 인자들을 이론적으로 해석하여 베어링 성능에 가장 크게 영향을 주는 인자를 찾았다. 그리고 그 인자를 이용하여 공기 포일 베어링으로 지지되는 로터-베어링 시스템의 특성변화에 대하여 알아보았다.

공기 포일 베어링의 성능에 영향을 주는 설계 인자들은 베어링의 직경, 길이, 탑 포일 및 범프 포일의 형상, 베어링 틈새, 윤활 코팅 등이 있다. Fig. 1은 공기 포일 베어링의 구조를 나타낸 것이다. 본 연구에서 탑 포일 및 범프 포일의 형상은 최적화로 가정하였고, 베어링의 직경은 회전체동역학 해석에 의하여 결정되었다. 그리고 윤활 코팅은 현재 사용 중인 코팅에 대하여 국한하였다. 따라서 나머지 변수인 베어링 길이와 틈새에 대한 영향만을 분석하였다. 공기 포일 베어링의 해석 과정을 Fig. 2에 나타내었다. 압축성 레이놀즈 방정식에서 편심률과 자세각을 가정한 후 압력분포를 구하였다. 구한 압력 분포를 이용하여 탑 포일과 범프 포일의 변형을 해석하고 반복계산을 통하여 최종해를 구한 후 온도, 하중지지력 등을 구한 뒤에 공기 포일 베어링의 동특성(강성, 감쇠)을 계산한다.

† 교신저자; 삼성테크윈(주) 파워시스템연구소

E-mail : sh23.shin@samsung.com

Tel : (055) 260-2933, Fax : (055) 260-2886

* 삼성테크윈(주) 파워시스템연구소

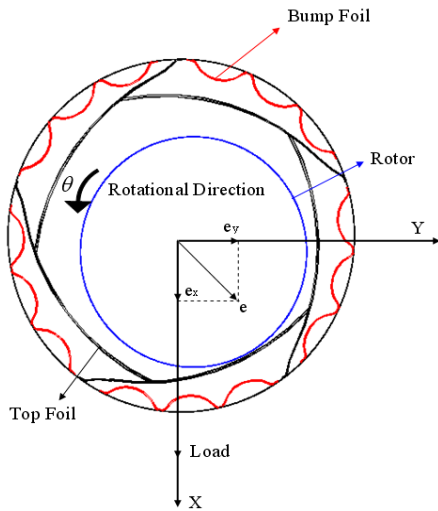


Fig. 1 Structure of AFB

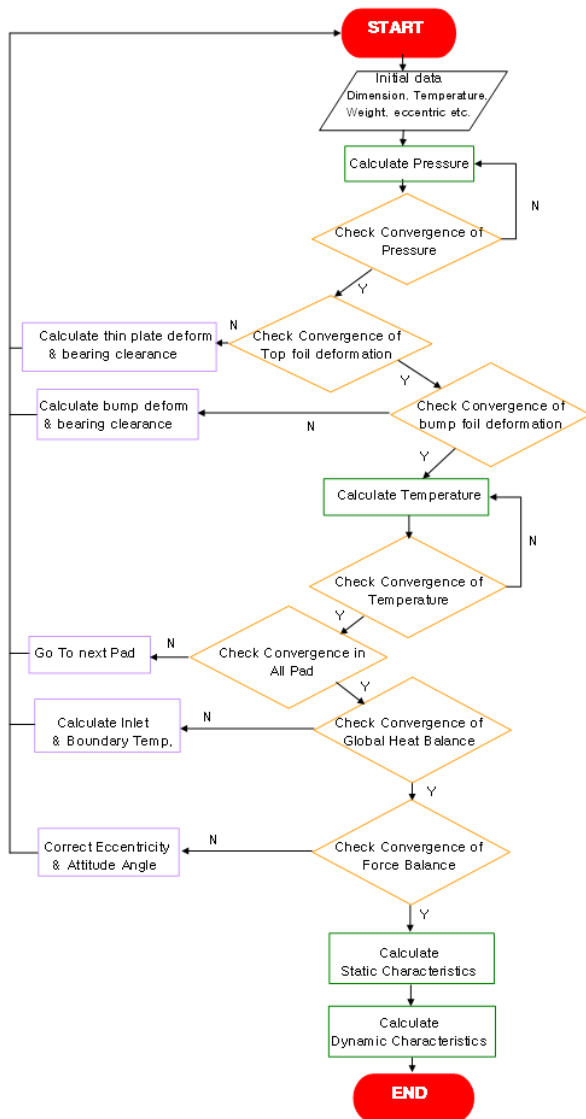
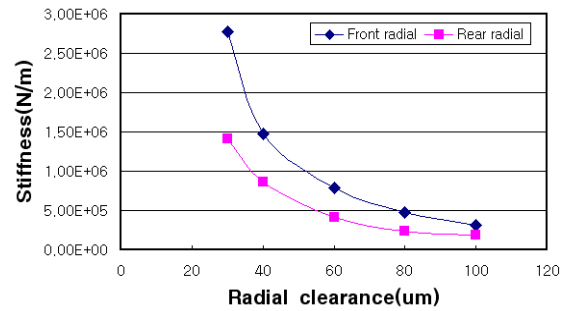
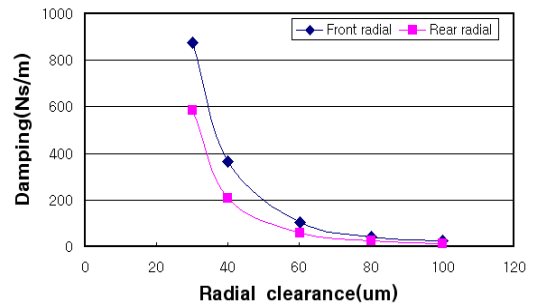


Fig. 2 Flowchart of AFB analysis

Fig. 3 은 베어링 틈새를 이용하여 베어링의 강성과 감쇠를 해석한 결과이고, Fig. 4 는 베어링 길이를 이용한 베어링 강성, 감쇠 해석결과이다. 해석결과들을 비교한 결과, 베어링의 틈새 변화가 길이 변화보다 베어링 성능에 더 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다.

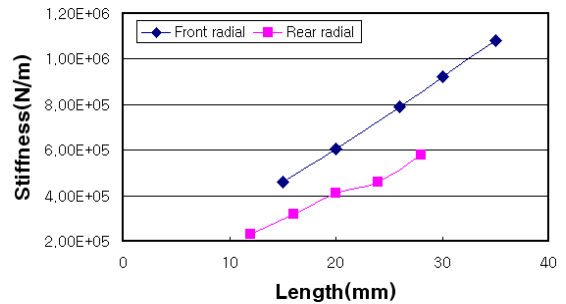


(a) Stiffness coefficient

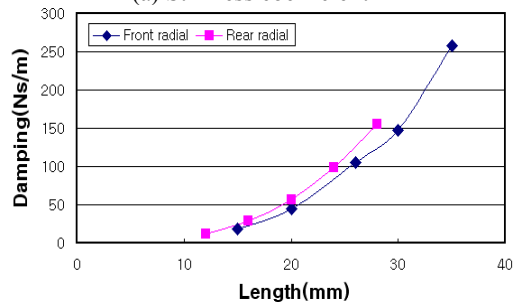


(b) Damping coefficient

Fig. 3 Analysis by AFB clearance variation



(a) Stiffness coefficient



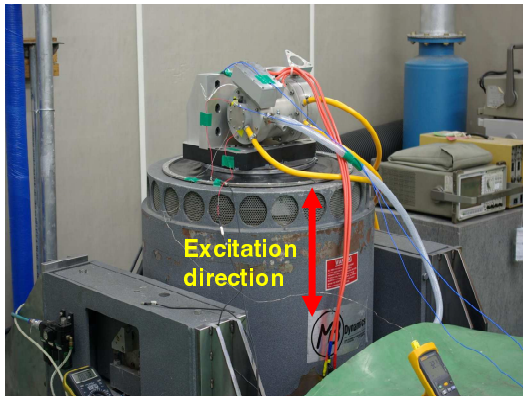
(b) Damping coefficient

Fig. 4 Analysis by AFB length variation

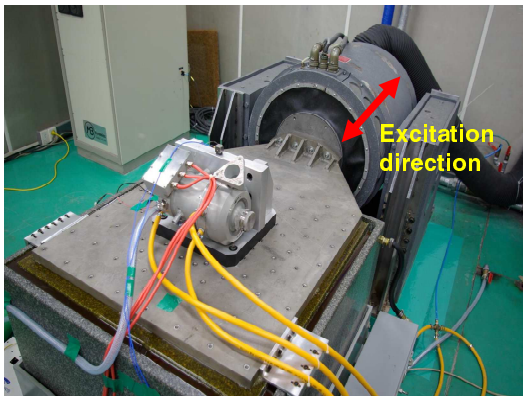
2.2 진동시험

진동 시험은 공기 포일 베어링을 설치한 터보 기계를 직접 가진하여 로터에 설치된 변위센서를 통하여 시험 결과 데이터를 얻는 방식을 취한다. 진동시험의 순서는 다음과 같다.

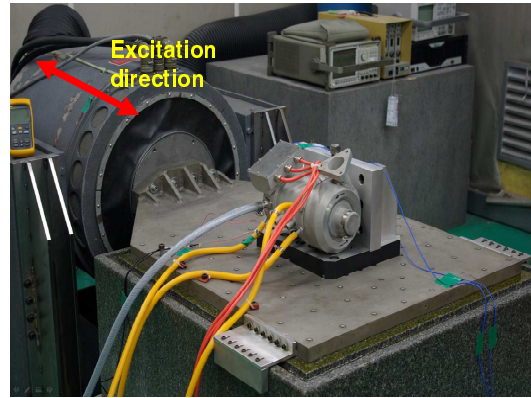
- 1) 터보 기계의 로터 부근에 변위센서를 설치한다.
- 2) 시험 치구는 Fig. 5(a)와 같이 수직방향으로 가진할 수 있도록 조정된 가진기 위에 설치한다.
- 3) 터보 기계를 치구 위에 설치한다.
- 4) 터보 기계와 제어용 인버터와 연결하고, 냉각수와 냉각공기가 공급되도록 연결한다.
- 5) 변위 센서를 앰프와 연결하고 앰프는 주파수 분석기와 연결한다.
- 6) 터보 기계를 30,000rpm 으로 가동한다.
- 7) 1.85g_{rms}의 랜덤파형 진동을 터보 기계에 가한다.
- 8) 0.1g의 사인파형 진동을 터보 기계에 가한다.
- 9) 측정을 완료한 후, 공기 포일 베어링의 다른 틈새로 조립하여 1)~8)의 과정을 반복한다.
- 10) 6 가지의 틈새에 따른 진동시험을 모두 완료한 후, (b), (c)에 나타난 것처럼 측면 방향과 축 방향으로 가진할 수 있도록 가진기의 위치를 조정하여 1)~9)의 과정을 반복하며 진동시험을 수행한다.



(a) Vertical direction excitation



(b) Lateral direction excitation



(c) Axial direction excitation

Fig. 5 Test instrumentation

2.3 틈새의 영향 분석

2.3.1 불규칙파형 가진 시험

(1) 수직방향 가진(Vertical excitation)

공기 포일 베어링의 동특성 변화를 알기 위하여 진동시험을 수행하였다. 이때 진동시험의 변수는 이론적인 해석 결과를 통해 얻은 로터와 공기 포일 베어링 사이의 틈새(Clearance)다.

따라서 공기 포일 저널 베어링 틈새 6 가지와 공기 포일 스톱 베어링 틈새 6 가지를 이용하여 진동시험을 수행하였다. 첫번째 불규칙(Random) 진동시험을 통해 공기 포일 베어링 시스템이 갖는 진동응답의 변화를 분석하였다. 진동시험 결과, 저널 베어링의 경우 수직방향 가진과 측면 방향의 가진에 대해 틈새가 증가함에 따라 진동응답이 증가하는 경향을 나타내었다.

Fig. 5(a)에 나타난 것처럼 수직방향 가진시, 틈새의 증가에 따라 응답이 증가하지만 4 번째 틈새에서는 비선형적인 특성을 나타내었다. 그리고 로터 전방에 임펠러가 설치되어 있어 전방에서 측정한 응답이 로터 후방에서 측정한 응답보다 크게 나타났다.

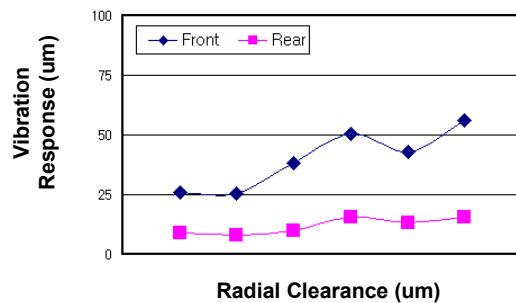


Fig. 6 Vibration response at vertical direction excitation

(2) 측면방향 가진(Lateral Excitation)

Fig. 7의 측면방향으로 가진하였을 때 진동에 따른 민감도를 분석한 결과, 수직방향 민감도와 비슷한 추세를 나타낸다. 하지만 수직방향 응답결과에 비해 응답 크기가 작게 나타난다. 따라서 공기 포일 베어링은 측면방향의 진동보다는 수직방향에의 진동에 더 민감하게 반응한다는 것을 알 수 있다.

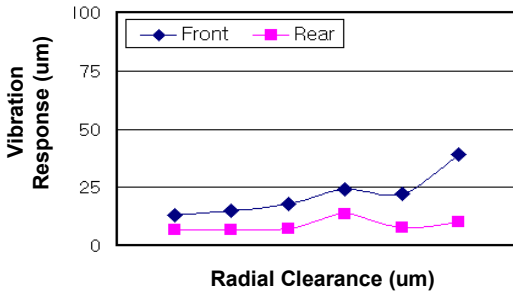


Fig. 7 Vibration response at lateral direction excitation

(3) 축방향 가진(Axial Excitation)

축방향의 가진시험에서는 공기 포일 저널 베어링의 틈새는 변화를 주지 않고 공기 포일 스톱퍼 베어링의 틈새만 변화를 주어 시험을 진행하였다. 시험 결과, 틈새가 커져 감에 따라 응답이 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있다.

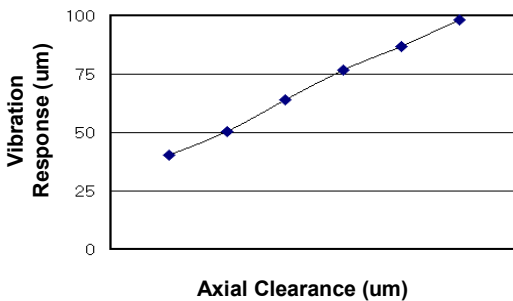


Fig. 8 Vibration response at axial direction excitation

2.3.2 정현파형 가진 시험

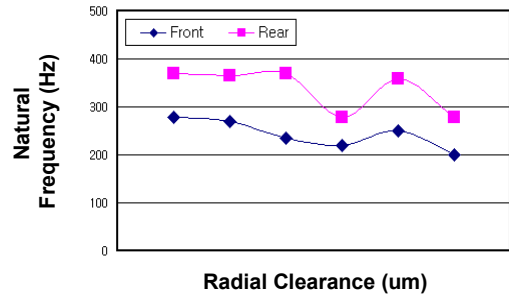
(1) 수직방향 가진(Vertical excitation)

정현(Sine sweep)파형 진동시험은 공기 포일 베어링의 고유진동수(natural frequency), 감쇠율(damping ratio)을 알아보기 위해 수행하였다.

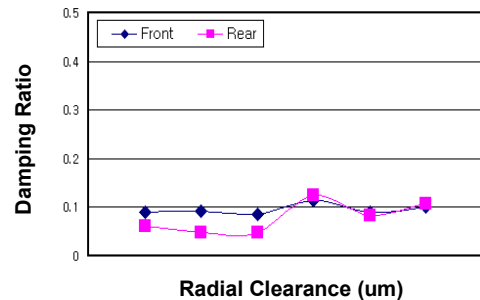
진동응답과 달리 고유진동수는 Fig. 9(a)에 나타낸 것처럼 틈새의 증가에 따라 점차 감소하는 특성을 나타내었다. 이는 공기 포일 베어링 시스템의 강성이 감소하였다고 볼 수 있다. 고유진동수 역시 4번째 틈새에서 변화의 폭이 컸다. 따라서 4번째 틈새를 가진 터보 기기의 가진 영향을 받았을 때, 강성의

변화로 인해 진동응답이 비정상적으로 커지는 현상을 야기한 것으로 판단된다.

하지만 (b)의 감쇠율 선도는 틈새의 증가에 따른 감쇠율 영향을 나타낸 것으로 틈새가 증가함에 따라 감쇠율이 증가하는 경향을 보이지만 크게 민감하지 않는 것으로 보인다. 그리고 감쇠율 선도를 통해 진동시험에 사용된 공기 포일 베어링의 감쇠율은 1 미만이기 때문에 부족 감쇠계(Underdamped system)라는 것을 알 수 있다.



(a) Natural frequency

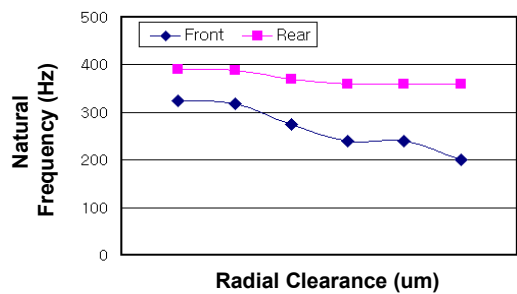


(b) Damping ratio

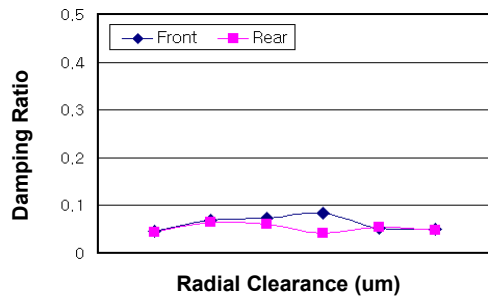
Fig. 9 Characteristics at vertical direction excitation

(2) 측면방향 가진(Lateral Excitation)

측면방향으로 가진하여 고유진동수와 감쇠율을 알아본 결과, 고유진동수는 틈새 변화에 따라 감소하였고 감쇠율은 틈새 변화와 상관관계를 갖지 않는 것으로 보인다.



(a) Natural frequency



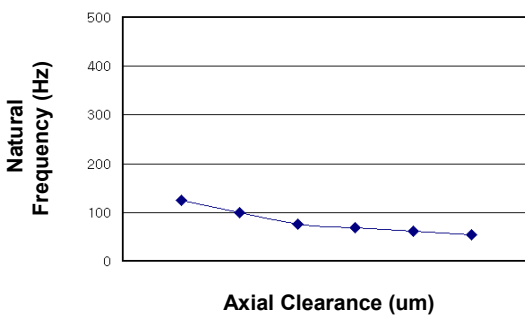
(b) Damping ratio

Fig. 10 Characteristics at lateral direction excitation

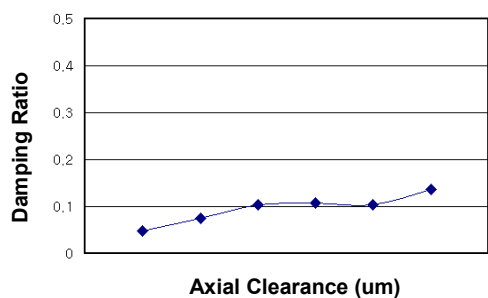
(3) 축 방향 가진(Axial Excitation)

터보 기계를 축방향으로 가진한 결과로써

Fig. 11(a)는 틈새 변화에 따른 고유진동수 변화선도를 나타내었고, (b)는 틈새의 변화에 따른 감쇠율 선도를 나타내었다. 틈새가 커짐에 따라 고유진동수는 감소하는 추세를 나타내고 감쇠율은 증가하는 추세를 나타낸다.



(a) Natural frequency



(b) Damping ratio

Fig. 11 Characteristics at axial direction excitation

3. 결 론

지금까지 공기 포일 베어링으로 지지되는 터보기계의 베어링 성능에 가장 큰 영향을 미치는 설계 인

자를 이론적인 해석방법과 시험을 통하여 얻었다.

이를 통하여 자동차용 터보기에 적용가능한 공기 포일 베어링 시스템의 진동응답 변화 선도, 강성 변화 선도, 감쇠율 변화 선도를 구하였다. 이를 설계에 반영하여 자동차에 적용가능한 공기 포일 베어링 시스템의 설계 방법을 제시하였다.

본 연구의 결과는 강성 변화와 진동응답 변화를 예측할 수 있어 로터-베어링 시스템의 임계속도(Critical Speed)를 피하는 최적의 틈새 설계를 할 수 있을 뿐만 아니라 저진동, 저소음 문제를 가지는 가정용 터보 기기 설계에도 맞춤형 최적 틈새 설계가 가능하다.

참 고 문 헌

- (1) Lee, Y. B., Research Trend and Commercial Utilization of the Air Foil Bearing Technology, KSNVE, Vol. 16, No. 3, pp16~22, June 2006.
- (2) Lee, Y. B., Park, D. J., Kim, C.H., Study on the Air Foil Bearings of the Turbo-Expander for Fuel Cell System, Journal of KSTLE, Vol. 21, No. 3, pp114~121, 2005.
- (3) Heshmat H., Walowit J.A and Pinkus O., Analysis of Gas Lubricated Compliant Thrust Bearings, ASME Journal of Lubrication Technology, Vol.105, pp638~646, Oct.1983.
- (4) Heshmat H., Walowit J.A and Pinkus O., Analysis of Gas Lubricated Foil Journal Bearings, ASME Journal of Lubrication Technology, Vol.105, pp647~655, Oct.1983.
- (5) Samuel A. Howard, Preliminary Development of Characterization Methods for Compliant Air Bearings, Tribology Transactions, Vol. 42, No. 4, 789~794, 1999.
- (6) H. Heshmat, J. F. Walton, C. DellaCorte & M. Valco, Oil-Free Turbocharger Demonstration Paves Way to Gas Turbine Engine Applications, ASME International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition, Paper No. 2000-GT-620, Munich, Germany, 2000.
- (7) Kenneth, G. M., 1995, Vibration Testing, John Wiley & Sons, Inc., New York.