

고속 발전기용 Air Foil Bearing 개발

°염 병용*, 박 희용*, 백기영*, 이 영섭*, 김 명섭*

Development of Air Foil Bearing for High Speed Generator

Byung-Yong Yum, Hee-Yong Park, Ki-Young Baik, Young-Seob Lee,
Myung-Seob Kim

ABSTRACT

An air foil bearing is developed for the high speed generator. The bearing is type of multi-leaf and is stable on 60,000RPM. The vibration level is 12um(p-p) and the highest temperature level is below 100 °C. The dynamic parameter of air foil bearing is acquired by experimental method using exciter. The air foil bearing is also good condition at test of real generator and load condition. The condition of foil is very good after 3,000cycle start-stop test. Therefore the air foil bearing is ideal for high speed, light weight and modern turbo-machinery.

1. 서론

고속회전체를 위한 Air Foil Bearing은 회전체를 이용하는 터보머신산업분야뿐만 아니라 회전체가 이용되는 가전제품, 산업기기 분야에서의 첨단기술로, 주로 40,000 RPM이상, 10kg이하의 고속, 경량 회전체를 지지하는 비접촉 베어링이다. 기존의 접촉식 구름베어링이 가지는 문제점인 접촉에 의한 진동문제가 없으며, 윤활시스템이 필요 없다는 장점을 가진다. 따라서 Air Foil Bearing은 무게제한이 심한 항공용으로 널리 쓰일 수 있다. 그리고 구름요소 베어링은 지속적인 유지보수가 필요한 반면 AFB는 유지보수가 필요하지 않기 때문에 우주정거장과 같은 사람이 없는 곳에서도 5년 이상 성공적으로 연속작동을 시킬 수가 있다. 그리고 비접촉 베어링의 일종인 Magnetic 베어링에 비해 구조가 훨씬 간단하여 무게, 사이즈 측면에서 유리하고

제조원가도 낮으며 Magnetic 베어링에 필수인 제어장치가 Air Foil Bearing에서는 불필요하다는 장점이 있다. 개발하고자 하는 Air Foil Bearing은 고속발전기를 지지하는 용도이다. 고속발전기는 가스터빈과 연계하여 고속으로 회전하면서 전기를 발생하는 장치인데 60,000RPM이상의 고속으로 회전한다. 당사에서 개발하고있는 고속발전기는 중급의 성능을 가지고 있다.

Air Foil Bearing은 로터를 지지하는 능력뿐만 아니라 터보머신에서 요구하는 초기 구동토크, 수명, 축하중도 만족하여야 한다. 이에 따라 설계요구조건에 맞게 Air Foil Bearing을 설계하고, 베어링을 제작하여 로터-베어링 리그시험을 수행하였다.

2. Air Foil Bearing 설계

개발하고 있는 Air Foil Bearing은 Multi leaf type의 Air Foil Bearing이다. 아래의 Figure 1에

* 삼성테크윈 파워시스템 연구소

베어링의 형상이 나와있다.

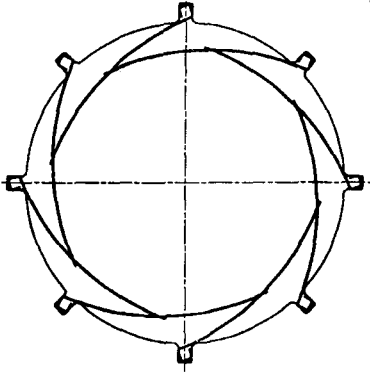


Figure 1 Multi-leaf type Air Foil Bearing

위의 Figure 1 에는 Radial Bearing이 나와있고, Axial Bearing도 위의 그림과 유사한 형태로 여러 장의 포일을 가지는 구조로 되어있다.

2.1 베어링 설계 요구조건

고속발전기용 Air Foil Bearing의 설계 요구조건은 다음과 같다.

- ◎ 운용 RPM : 0 ~ 60,000 RPM
- ◎ 로터무게 : 약10kg
- ◎ 축하중 : 약10kg
- ◎ 시동토크 : 5Nm 이하
- ◎ 요구수명 : 3,000 cycle이상
- ◎ 사용온도 : 150 °C 이하
- ◎ Lift-off 속도 : 10,000 RPM 이하

위와 같은 설계요구조건에 맞추어 베어링을 설계하였다. Air Foil Bearing 설계에서 기본이 되는 베어링 Radial Load Capacity는 자중의 6배를 견딜 수 있도록 설계하였다. 축하중은 요구조건을 충분히 만족시키도록 마진을 많이 두어 설계하였는데, 일반적으로 터보머신에서는 축하중에 대해서 높은 마진을 요구한다. 시동토크는 설계요구조건이 높지 않아 쉽게 만족시킬 수 있었으며, 요구조건보다 현저히 낮은 수준이다. Air Foil Bearing에서 중요한 항목중의 하나가 베어링에서 발생하는 발

열이다. 로터가 베어링이 형성한 아주 얇은 공기틈새에서 고속으로 회전하기 때문에 이 부분에서 많은 발열이 발생한다. 따라서 이 부분에서의 발열을 예측하여야만 로터 전체에서의 온도분포를 정확히 예측할 수 있다. 따라서 베어링 설계자는 정확한 베어링 로스를 계산해 줄 수 있어야 한다. Air Foil Bearing의 포일과 로터가 떨어지기 시작하는 RPM을 Lift-off Speed라고 하는데 이는 베어링의 수명과 초기구동에 많은 영향을 주는 요소이다. Lift-off Speed가 높으면 초기 구동에 들어가는 부하가 많이 걸리므로 고속발전기를 초기에 기동하는데 부담이 되는 것이다. 또한 Lift-off Speed가 높으면 로터와 베어링 포일의 접촉시간이 길어지므로 베어링의 수명에도 좋지 않은 영향을 준다. 일반적으로 터보머신의 구동초기에는 축하중이 발생하지 않으므로 Axial Bearing 보다는 Radial Bearing의 Lift-off Speed가 높다. 아래의 그림은 제작된 Bearing의 사진이다.

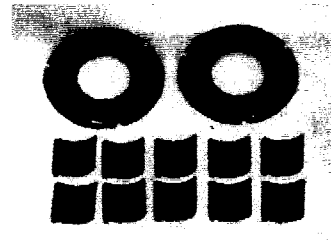


Figure 2 Air Foil Bearing

2.2 베어링 동특성 실험

설계된 베어링을 제작하여 기본적인 베어링의 동특성을 알아보는 실험을 하였다. 실험방법은 가진기를 이용한 실험적 모드해석방법을 사용하였다. 실험적 모우드해석은 FFT의 개발로 주로 전달함수(transfer function)를 이용한 모우드 해석법이 사용되어 지는데, 광대역 불규칙신호(broad band random noise) 또는 충격(impact)으로 구조물을 가진하고, 동시에 그 응답을 측정하여 전달함수를 얻은 후 곡선 맞춤(curve fitting)방법을 이용하여 모우드 매개변수를 얻는다. Air Foil Bearing의 실험적인 해석에 사용된 방법은 전달 함수방법이다. 동

특성 측정은 20,000 RPM부터 60,000 RPM까지 10,000 RPM씩 축(shaft)의 회전 속도를 변화 시켜 가면서 측정하였다. 동특성 측정은 가진기를 이용하여 광대역 불규칙 신호를 Air Foil Bearing에 적용하고, 그의 응답을 측정하여 Air Foil Bearing의 receptance를 측정한다. Air Foil Bearing에 지지된 축은 에어 터빈(air turbine)을 이용하여 기동하였으며, 축의 양단 끝에 변위 센서(AEC)를 부착하여 Air Foil Bearing의 특성을 측정하였다. 아래 그림 3에 동특성 측정 장치의 블록 선도를 나타내었다. 가진기는 15Hz에서 500 Hz까지의 광대역 불규칙 신호로써 Air Foil Bearing을 가진하였고, 가진력 신호와 응답 신호의 성질을 좋게 하기 위하여 100 회 이상을 평균한 신호를 저장하였다.

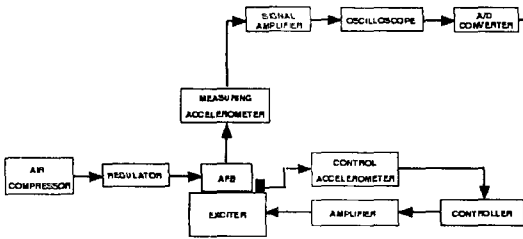


Figure 3 동특성 측정 장치의 블록선도

동특성 시험에 사용된 센서는 가속도센서와 변위 센서, 그리고 회전 속도를 측정하기 위한 광센서이다. 가속도 센서는 3개가 설치되었는데, 가진기의 가진력을 제어하기 위하여 가진기 윗면에 1개가 수직으로 부착되었고, 나머지 2개는

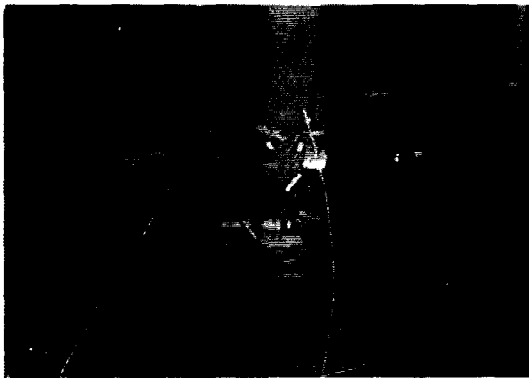


Figure 4 가진기를 이용한 동특성 실험장치

Air Foil Bearing 케이스의 진동을 측정하기 위하여 케이스 양끝에 2개가 설치되었다. 변위 센서는 축의 동적 거동을 측정하기 위하여 축을 둘러싸고 있는 케이스에 구멍을 뚫어 축의 수직, 수평방향으로 2개씩 설치되었다. 광센서는 축의 회전 속도를 측정하기 위하여 Air Foil Bearing 시스템의 좌측에 부착되었다. 그림 4는 Air Foil Bearing 동특성 실험장치를 나타내고 있다. 그림 5에 회전 속도가 증가될 때 Air Foil Bearing의 동적 특성이 변화하는 것을 나타내었다. Air Foil Bearing이 17,518 RPM에서는 고유진동수가 109 Hz로 나타났는데, 60,000 RPM으로 회전 속도가 증가되면서 Air Foil Bearing의 고유진동수는 102 Hz로 서서히 감소되고 있는 것을 볼 수 있다. 축의 회전 속도가 증가하면서 고유진동수가 감소하는 현상은 로터가 센터쪽으로 자리를 잡아가면서 베어링의 강성이 감소하기 때문에 나타나는 현상이다. 회전력이 증가하면서 주파수 응답함수의 주파수 밴드폭(bandwidth)이 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이러한 현상은 Air Foil Bearing이 가지는 감쇠비(damping ratio)가 0.063에서 회전 속도가 증가하면서 0.041로 감소되기 때문이며, 이는 Air Foil Bearing의 friction 감쇠가 줄어들기 때문인 것으로 생각된다.

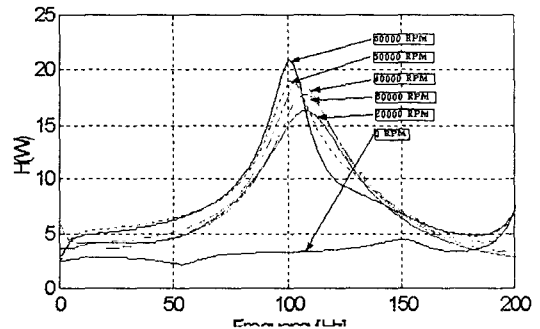


Figure 5 회전 속도에 따른 AFB의 Dynamic 특성

3. 로터-베어링 리그 시험

실제의 고속발전기에 Air Foil Bearing을 조립하고 고속발전기를 구동시키면서 로터-베어링 시스템의 안정성을 확인하였다. 구동은 에어 터빈을 이용하였고, 에어터빈과 고속발전기는 샤프트로 연결

되어있다. 고속발전기의 진동을 모니터링하기 위하여 변위센서를 2개 장착하였다. 그리고 발전기와 베어링에서의 온도를 관찰하기 위해서 열전대를 장착하였다. 로터-베어링 리그는 다음의 사진과 같다. 사진에서 오른쪽이 구동부이고 왼쪽이 고속발전기 부분이다.

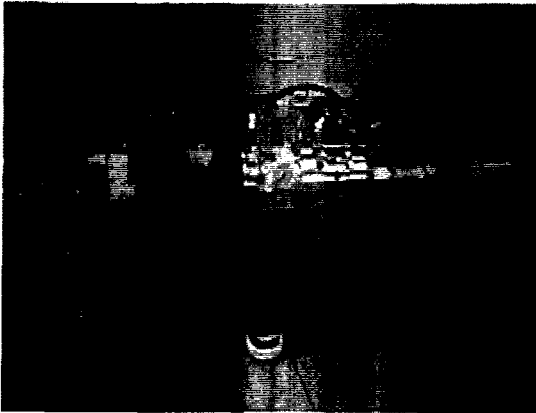


Figure 6 고속발전기 시험리그

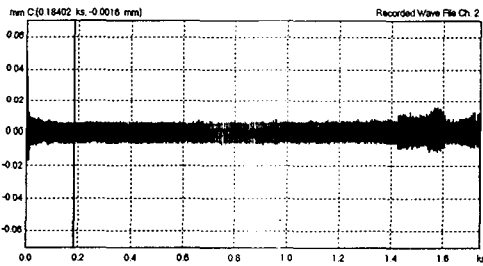


Figure 7 진동, Time Signal

실험결과 온도는 최대 측정치에서 100도를 넘지 않았고, 진동은 양호하였다. 변위센서에서 측정된 고속발전기의 진동은 12um 정도로 시간에 대해서 안정적으로 나오고 있다. 약 1,000초 이후에는 발전기에 부하를 걸었는데 부하가 커질수록 진동이 약간 커졌지만 그 증가량은 작음을 알 수 있다. 로터의 orbit은 크기는 작지만 형상이 많이 찌그러짐을 알 수 있는데, 이것은 구동부에서의 aerodynamic 특성이나, generator의 전기적인 성분이 섞여 들어오기 때문인 것으로 생각한다. 이 부분을 주파수 분석을 해보면 성분이 많은 것을 알 수 있다.

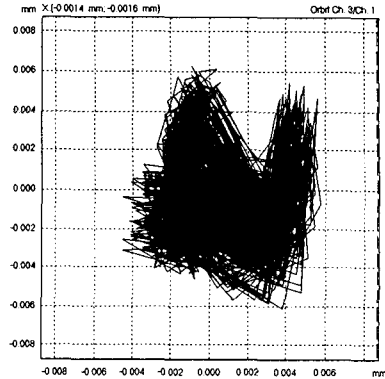


Figure 8 진동, Orbit

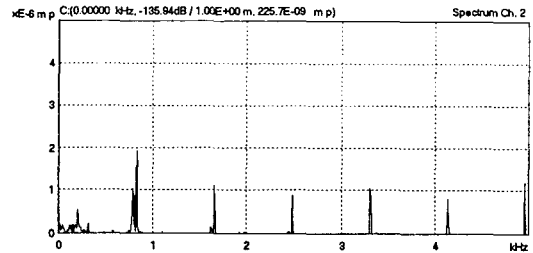


Figure 9 진동, 스펙트럼

4. 결론

고속발전기를 지지하기 위한 Air Foil Bearing을 개발하였다. Multi-leaf type으로 베어링을 개발하였으며, 60,000RPM이라는 고속에서의 발열을 고려하여 베어링의 형상을 최적화 하였다.

실험결과 60,000RPM에서의 온도는 100도를 넘지 않았고, 진동은 12um를 유지했다. 부하시험에서도 온도나 진동의 큰 변화는 일어나지 않고 안정적이었다. 3,000cycle의 start-stop 시험 후에도 베어링 포일의 상태는 매우 양호하여 장수명 터보머신에도 충분히 사용할 수 있다.

10kg이상의 대용량 로터를 Air Foil Bearing으로 운용했다는데 큰 성과가 있으며, 앞으로는 진동/충격/고온에 대해서도 연구가 필요하다.

후기

본 연구는 과기부가 지원하는 국가지정연구실사업 (NRL)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. H. Heshmat and P. Hermel, 1992, "Compliant Foil Bearings Technology and Their Application to High Speed Turbomachinery", 19th Leeds-Lyon Symposium on Tribology.
- 2 Paul Robert Trumpler. 1966, "Design of Film Bearings", The Macmillan Company
3. Bernard J. Hamrock, 1994, "Fundamentals of Fluid Film Lubrication", McGraw Hill