

공기 포일 베어링을 사용하는 300마력급 터보송풍기 개발

김경수* · 이기호** · 박기철** · 이시우** 김승우**

Development of a 300 HP Class Turbo Blower with Air Foil Bearings

Kim Kyeong-su*, Lee Ki-ho**, Park Ki-cheol**, Lee Si-woo** and Kim Seung-woo**

Keywords : Air Foil Bearing(공기 포일 베어링), 300HP Turbo Blower(300마력 터보송풍기), PMSM(영구자석형 동기모터)

Abstract

Air foil bearings have been attempted for application to industrial turbo machines, since they have several advantages over oil bearings in terms of endurance, simplicity, environment-friendliness, efficiency, sound and vibration, and small turbo machines with air foil bearings are in the market as the result. Recently, researches on widening the application spectrum of air foil bearings are in progress worldwide. In this paper, a 300 HP class turbo blower using air foil bearings is introduced. The turbo blower has a high speed PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor) driving a compressor, and air flow rate is designed to be 180 m³/min at pressure ratio of 1.6. The maximum rotational speed is set to 17,000 RPM to maximize the total efficiency with the result that the weight of rotor assembly is 26kg, which is expected to be the largest turbo machine with air foil bearings ever developed in the world.

1. 서론

공기 포일 베어링은 오일을 사용하지 않는 비접촉식 베어링으로서 구조가 간단하고, 유지보수가 거의 필요 없으며, 소음과 진동이 적고, 동력손실이 적은 친환경기술이기 때문에 산업용 터보기기의 베어링에 적격이다. 지금까지 공기 포일 베어링을 다양한 산업용 터보기기에 적용하기 위한 노력이 진행되어 왔으며, 그 결과로 공기 포일 베어링이 장착된 소형 터보기기가 상용화되기에 이르렀다.[1-9] 현재는 중대형 터보기기에 적용하기 위한 연구가 전 세계적으로 진행되고 있다.[10-12]

본 논문에서는 공기 포일 베어링을 사용하는 300마력 터보송풍기를 소개한다. 개발된 터보 송풍기는 영구자석형 동기 모터를 사용하여 직접 압축기를 구동하는 방식이며, 압축비 1.6에서 180 m³/min의 공기를 공급할 수 있다. 소형이면서도 고출력을 낼 수 있는 터보기기는 최고의 효율을 가지기 위해서는 최적의 비속을 유지하여야 하는데[13], 이는 결과적으로 기계의 용량이 증가할수록 회전속도가 감소하는 특징을 가지게 된다. 따라서 기계가 대형화될수록 로터의 중량도 함께 증가하게 되고, 베어링으로 전달되는 하중도 커지게 된다. 이러한 이유 때문에 최고의 효율을 가지도록 잘 설계된 터보송풍기에 공기 포일 베어링을 적용하는 것은 공기 포일 베어링의 응용분야에서도 가장 기술적 난이도가 높은 것으로 인정되고 있다. 개발된 터보 송풍기는 압축기의 효율을 최대화 시키기 위해서 정격 회전속도를 17,000 RPM으로 설계하였으며, 이에 따른 로터의 중량은 26kg

이다. 이는 현재까지 전 세계적으로 알려진 공기 포일 베어링을 장착한 터보기기 중에서 최대의 중량과 최소의 회전속도를 가지는 응용 대상이다.

2. 본론

2.1 공기 포일 베어링을 장착한 터보 송풍기

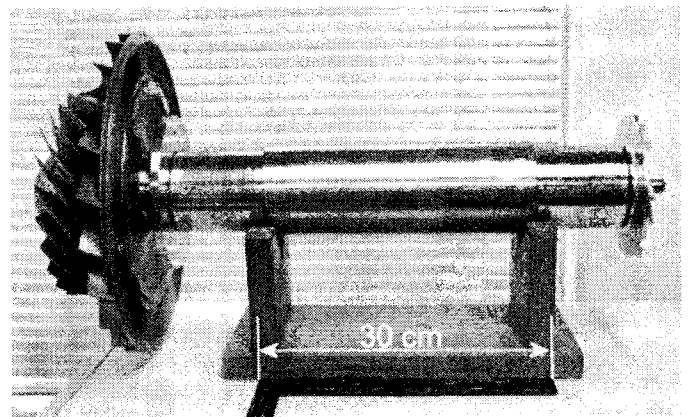


Fig.1 View of rotor assembly

Fig.1은 300마력 고속 모터를 사용하는 단단 터보송풍기의 로터 조립체를 보이고 있다. 로터의 전체 길이는 695mm이고 총 중량은 26kg이다. 터보 송풍기의 최대 압력 비는 1.8이며, 운전 회전속도는 13,600 RPM~17,800 RPM이다. 로터 조립체는 범프형

* (주) 뉴로스, mcpie@neuros.co.kr

** (주) 뉴로스

의 공기 포일 베어링으로 지지가 되는데, 2개의 저널 베어링과 1개의 양면 추력 베어링으로 구성되어 있다. Fig.2는 추력 베어링과 전방 저널 베어링을 보이고 있으며, 추력 베어링의 패드 개수는 8개이다. 터보 송풍기는 친환경 시스템으로 개발되었으며, 모터 스테이터의 냉각을 위하여 순환형 냉각장치를 적용하였다.

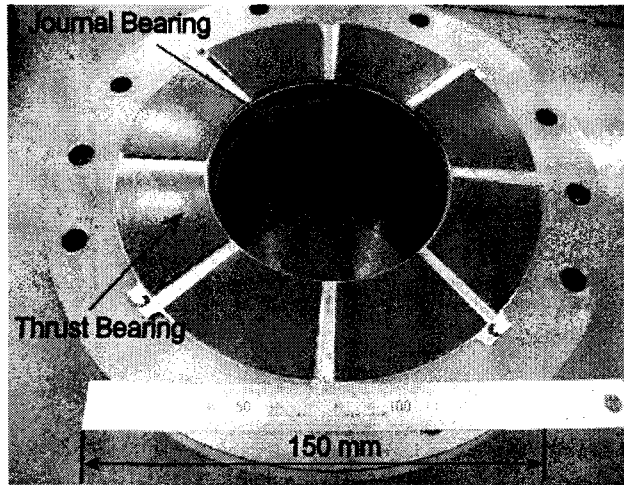


Fig.2 Thrust bearing and front journal bearing

2.2 Instrumentation

Fig.3은 터보 송풍기의 성능 평가를 위한 시험장면을 보이고 있다. 고속 모터는 인버터에 의해서 제어가 되고 송풍기의 압축 공기 압력은 토출배관에 장착되어 있는 밸브를 사용하여 조절된다. 로터의 진동 측정을 위하여 비접촉식 변위 센서 5개를 사용하였는데, 2개는 전방 저널 베어링 부에 X, Y 방향으로 장착하였고, 또 다른 2개는 후방 저널 베어링 부에 X, Y 방향으로 장착하였으며, 나머지 1개는 로터의 축 방향 움직임을 측정하기 위하여 Z 방향으로 장착하였다. 로터의 회전속도는 인버터에 의해서 제어가 되고 모터 스테이터의 온도 및 압축공기의 온도는 K 형식의 열전대를 사용하였다. 그리고, 측정된 모든 신호는 DAS와 FFT analyzer를 사용하여 저장되고 분석되었다.

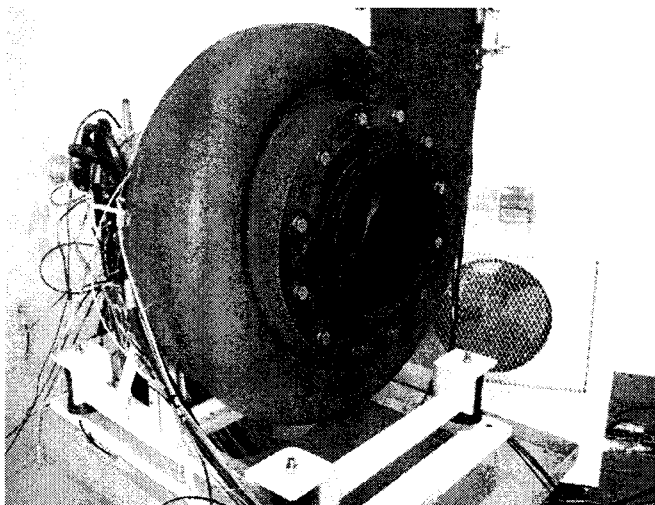


Fig.3 View of performance test

2.3 성능시험에서 측정된 진동 특성

Fig.4는 성능시험 결과를 나타내는데, 송풍기의 회전속도를 정격속도의 95%인 16,300 RPM으로 유지한 상태에서 송풍기 출구의 공기 압력을 점진적으로 증가시켜 최종적으로는 압축기의 Surge현상이 발생할 때까지 시험을 수행한 결과이다. 정상상태의 시험결과를 확보하기 위해서 각 단계별로 충분한 시간 동안 상태를 유지하였으며, 모터 온도는 모든 시험 조건에 대하여 120 °C 이하를 유지하였다.

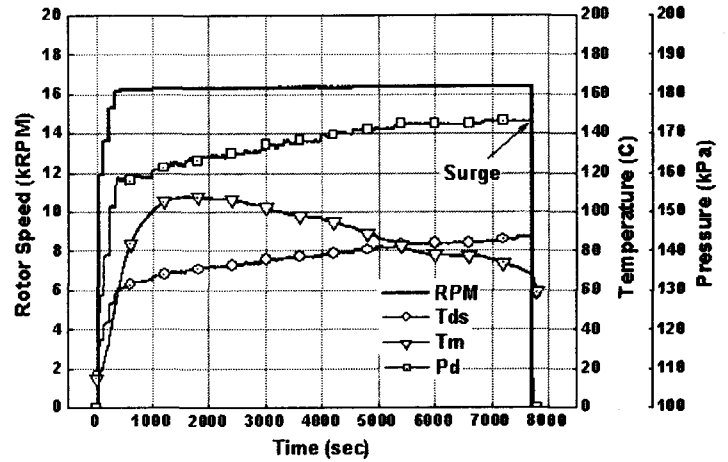


Fig.4 Rotor speed, discharge pressure and temperatures vs. time

Fig.5와 Fig.6은 각각 로터 진동을 시간과 회전속도에 대해서 나타낸 것이다. 그림에 표시된 진동값은 peak-peak 값이며, 실제 발생한 진동의 크기 뿐만 아니라 측정면의 흔들림(runout)이 포함된 값이다. 측정된 진동의 크기는 전체 시험 동안 20 μ m 이하를 유지하였으며, 전방에서 측정된 진동의 수준이 높은 것은 전방 진동 측정면의 흔들림 양이 크기 때문이다. 실제 베어링 부에서 발생하는 진동의 크기는 10 μ m 이하이다. 회전속도에 대해서 나타낸 진동에서는 송풍기의 시동과 정지 때 일부 구간에서 진동의 크기가 증가하거나 감소하는 현상이 발생하는데, 이는 강제 모드의 임계속도(Critical Speed)에 의한 결과이며, 이때의 진동 변화 폭도 매우 작다.

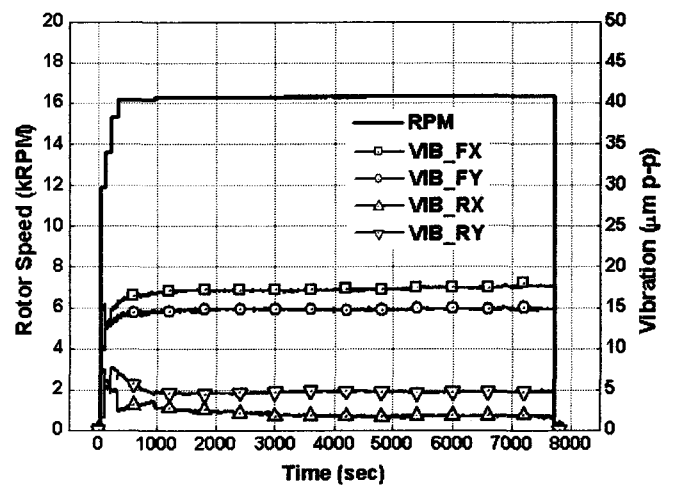


Fig.5 Rotor vibrations vs. time

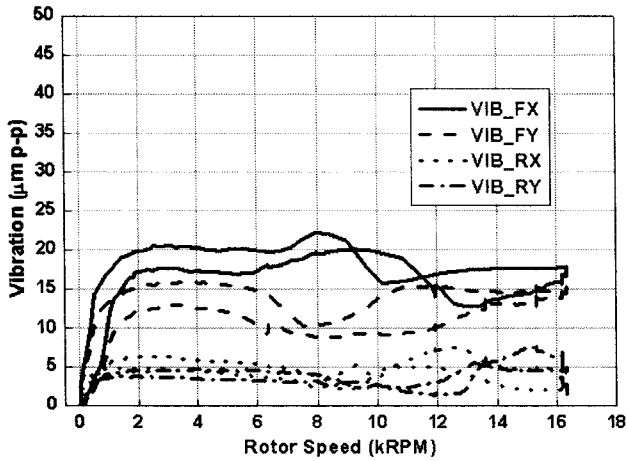


Fig.6 Rotor vibrations vs. rotor speed

Fig.7에는 Surge 발생 때를 포함한 송풍기 정지 때의 로터 축 방향 변위를 Waterfall diagram으로 나타내었다. Surge는 압축기에서 압력 분포가 주기적으로 뒤바뀌는 현상이므로 낮은 주파수의 소음과 함께 로터에 가해지는 축 하중이 변동되어 결과적으로는 로터의 움직임도 함께 발생하게 된다. Fig.8은 Surge가 발생할 때 측정된 축 방향 변위를 시간축과 주파수축에 대해서 각각 보이고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 Surge가 발생할 때에는 로터조립체가 축 방향으로 Surge 주파수인 16 Hz 속도로 진동하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 로터를 지지하는 공기 포일 베어링에 과도한 하중으로 작용하여 베어링의 손상 또는 수명을 단축시킬 수도 있다.

Fig.9와 Fig.10은 같은 시간대에 측정된 로터의 진동을 보이고 있다. 로터의 진동에서도 Surge에 의한 영향을 뚜렷하게 확인할 수 있으며, Surge에서 벗어난 후에는 송풍기의 진동상태가 정상으로 회복되었다. 성능시험 후에 송풍기는 모두 분해 되어 손상 여부를 확인하였으며, 분해 검사결과, 공기 포일 베어링 및 주요 부품에 대한 손상은 발견되지 않았다. 개발된 터보 송풍기는 대형 하수처리장에 납품되었으며, 설치 현장에서 성능 평가 및 베어링에 대한 내구성을 평가할 예정이다.

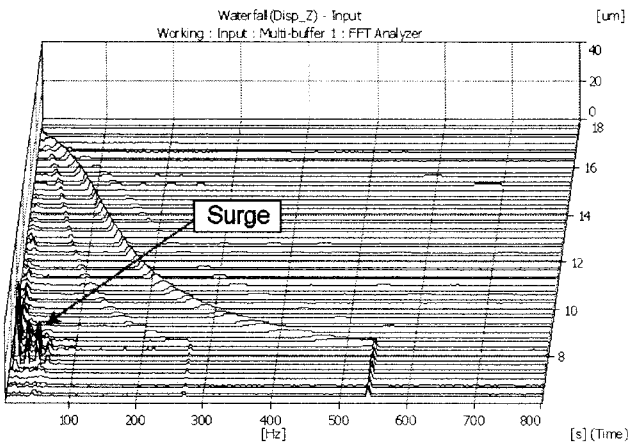
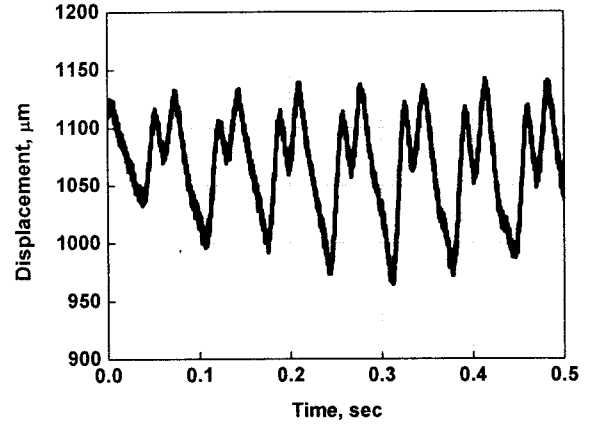
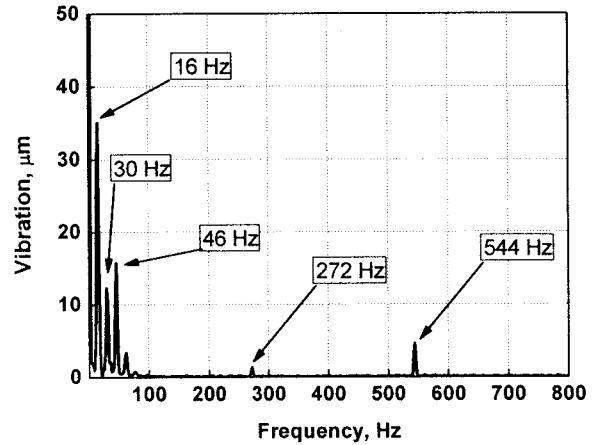


Fig.7 Waterfall diagram of axial movement during coast-down

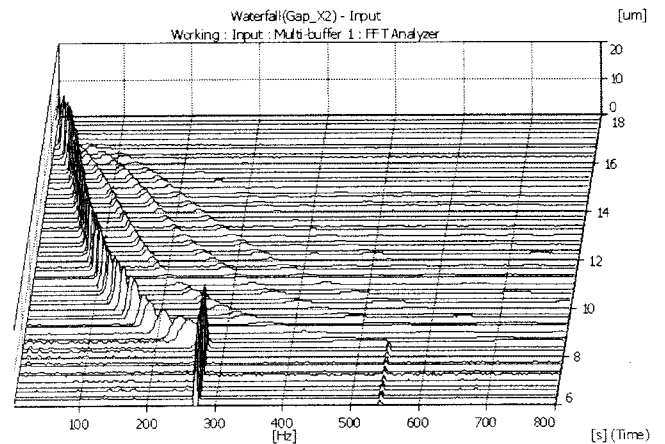


(a) Time signal



(b) Frequency spectrum

Fig.8 Axial movement of rotor measured at surge



(a) Front X direction

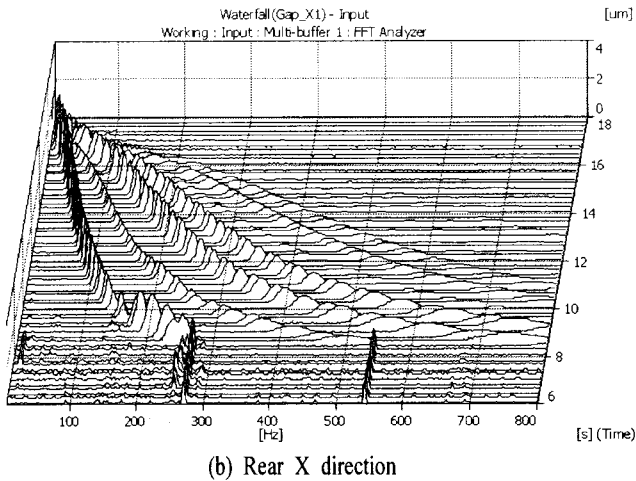
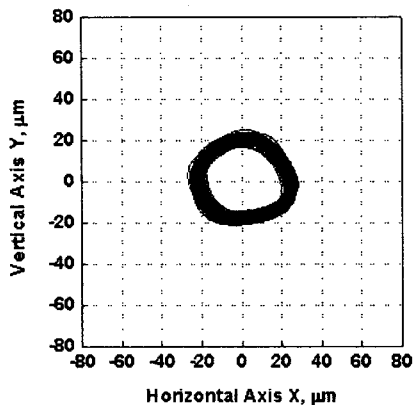
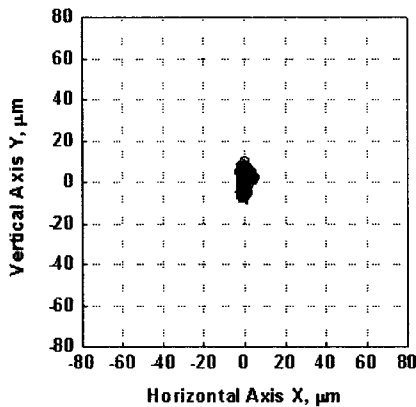


Fig.9 Waterfall diagram of rotor vibration during coast-down .



(a) Front



(b) Rear

Fig.10 Orbit of rotor vibration measured at surge

3. 결론

공기 포일 베어링을 적용한 300마력급 터보 송풍기가 성공적으로 개발되었다. 개발된 터보 송풍기는 효율을 극대화하기 위하여 최적의 비속을 갖도록 설계 되었으며, 이로 인해 발생하는 로터 중량의 증가와 회전속도의 감소는 공기 포일 베어링의 응

용 측면에서 높은 기술적 난이도를 요구하지만 공기 포일 베어링의 최적화 설계 기술을 적용하여 해결하였다. 본 논문에서 소개한 터보 송풍기는 지금까지 공기 포일 베어링을 적용하여 개발된 터보기기 중에서 세계 최대를 기록하고 있으며, 현재는 하수 처리장에 납품되어 현장에서 성능 및 내구성평가가 수행될 예정이다.

참고문헌

- [1] Agrawal, G. L., 1997, "Foil Air/Gas Bearing Technology An Overview," International Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition, 97-GT-347, Orlando, Florida.
- [2] Yao, H., Quan, H. Y. and Chen, C. Z., 1997, "Development of Foil Journal Bearing for Small High Speed Cryogenic Turboexpander," International Cryogenic Engineering Conference, 1, pp 233-238.
- [3] Heshmat, H. and Walton II, J., 2000, "Oil-Free Turbocharger Demonstration Paves Way to Gas Turbine Engine Applications," Proceedings of TURBOEXPO2000, 2000-GT-620, Munich, Germany.
- [4] Shimizu, N., Matsushima, M., Ishii, I., and Iwadate, H., 2003, "Research of High Speed Shaft System using Air Foil Bearing," HONDA R and D Technical Review, ISSN:0915-3918, 15(2), pp 93-100.
- [5] Heshmat, H., 2000, "Operation of Foil Bearings Beyond the Bending Critical Mode," Journal of Tribology, 122(2), pp. 192-198.
- [6] Swanson, E.E., Heshmat, H. and Shin, J.S., 2002, "The Role of High Performance Foil Bearings in an Advanced, Oil-Free, Integral Permanent Magnet Motor Driven, High-Speed Turbo-Compressor Operating Above the First Bending Critical Speed," ASME Paper GT2002-30579.
- [7] 김경수, 이기호, 김승우, "터보기기용 포일 저널 베어링 개발", 유체기계 연구개발 발표회, KAIST, 2001, pp 475~ 481.
- [8] 김태호, 이용복, 김창호, 이남수, 김한길, "공기유향 다엽포일 저어널 베어링으로 지지된 이단 압축기의 설계," 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, 2001, pp. 936~941.
- [9] 김경수, 박기철, 김승우, 이 인, "38kW, 100000 RPM 고속모터에 대한 포일 가스 베어링 응용 개발", 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, 2003, pp127~131
- [10] Swanson, E. E. and Heshmat, H., 2000, "Capabilities of Large Foil Bearings," Proceedings of TURBOEXPO2000, 2000-GT-620, Munich, Germany.
- [11] Swanson, E. E., Heshmat, H. and Walton, J., II, 2002, "Performance of a Foil-Magnetic Hybrid Bearing," Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 124, pp375-382.
- [12] DellaCorte, C. and Valco, M. J., 2000, "Load Capacity Estimation of Foil Air Journal Bearings for Oil-Free Turbomachinery Application," NASA/TM-2000-209782, NASA, Cleveland OH.
- [13] Japikese, D. and Baines N.C., 1994, Introduction to Turbomachinery, Concepts ETI, Inc. and Oxford University Press, p1-23.