

# 38kW, 100000 RPM 고속모터에 대한 포일 가스 베어링 응용 개발 Application of Foil Gas Bearing to the 38kW, 100000 RPM Class High Speed Motor

김경수\* · 박기철\*\* · 김승우\*\* · 이 인\*\*\*

Kyeong-Su Kim, Ki-Cheol Park, Seung-Woo Kim and In Lee

**Key Words** : foil gas bearing(포일 가스 베어링), noncontact bearing(비접촉 베어링), BLDC motor(BLDC 모터), cryogenic cooler(극저온 냉동기), rotordynamics(로터다이나믹스)

## ABSTRACT

Foil gas bearing is a noncontact bearing operated by coupled interaction between hydrodynamic pressure of viscous fluid and elastic deformation of foil structure. It has valuable advantages, such as low power loss, long life, oilless environment and low vibration, over conventional bearings for the high speed applications. A high speed BLDC motor adopting the foil bearing has been developed. It is designed to have 38 kW power at 100,000 RPM for a cryogenic cooler whose operating fluid is neon. In this paper, structural development details especially for the foil gas bearing and rotordynamics are presented.

포일 베어링 개발 초기에 주로 사용된 것은 리프형(Leaf Type) 베어링이었는데, 최근에는 베어링 하중 성능이 높은 범프형(Bump Type) 베어링이 주류를 이루고 있으며 성능개량을 위해서 여러 가지 형태로 연구 개발되고 있다[2].

## 1. 서 론

그림1과 같이 고속으로 회전하는 로터 표면에는 작동 유체의 점성 저항에 의해서 유도되는 유체의 흐름이 발생하며 이 유체의 흐름은 베어링 하우징에 의해서 형성되는 쉘기 형태의 수축부를 통과하면서 유속과 압력이 높아져서 로터를 지지하게 된다. 포일 베어링은 로터와 베어링 하우징 사이에 적절한 형태의 탄성을 갖는 포일을 삽입함으로써 어느 정도 균일한 스프링계수를 확보할 수 있게 해주며 포일의 변형에 의해서 베어링의 자세각(Attitude Angle)이 작아지고 포일의 마찰에 의해서 감쇄가 발생하므로 고속회전에서 동적안정성이 크게 향상된다. 이러한 저널베어링에 공기 또는 가스를 작동유체로 사용하면 낮은 점성계수에 의해서 고속회전이 가능할 뿐만 아니라 별도의 오일공급 장치 등의 부가장치가 필요 없기 때문에 전체 시스템이 간단해 지며 오일을 사용하지 않으므로 환경친화적인 제품개발이 가능하다[1].

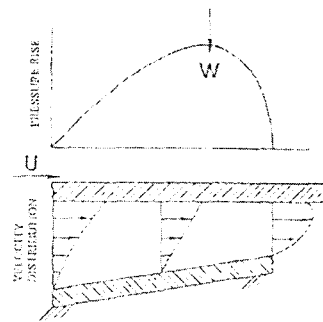


그림1 포일 베어링 원리

포일 베어링의 크기 및 위치는 로터의 동특성에 매우 큰 영향을 미치기 때문에, 베어링을 설계할 때에는 로터다이나믹스 설계를 병행하게 된다. 포일 베어링의 강성은 운용조건에 따라서 달라질 수 있지만 대체로 유연한 스프링과 유사하며, 진동을 억제하는 감쇠의 크기는 베어링 형상설계에서 일부 조정이 가능하지만 높은 편은 아니다. 고속으로

\* 한국 과학기술원  
E-mail : mcpie@neuros.co.kr  
Tel : (042) 855-7333, Fax : (042) 855-7340

\*\* (주) 뉴로스

\*\*\* 한국 과학기술원

회전하는 로터에 포일 베어링을 적용하는 경우에는 구름베어링과 달리 베어링이 장착되는 부위에도 로터 축의 직경을 크게 할 수 있으므로 전체 로터의 굽힘 강성이 높아져서 굽힘 모드 위험속도 설계에 매우 유리하며, 유연한 베어링 강성에 의해서 진동억제 능력이 높다.

현재 당사에서는 21세기 프론티어 사업인 “차세대 초전도 응용기술 개발”사업의 일환으로 극저온 냉동기를 개발하고 있으며, 여기에 사용되는 38kW, 최대 회전속도 100,000 RPM의 BLDC 모터는 포일 가스 베어링을 적용하여 개발되고 있다. 포일 베어링에 대한 성능 및 내구성은 전용 시험기를 통하여 평가가 완료되었으며, 이를 채택한 고속 모터에 대한 성능 시험이 수행되었다.

## 2. 본 론

### 2.1 포일 가스 베어링 개발

그림2와 같은 범프형 포일 저널 베어링에 대한 이론적인 배경은 기하학적인 형상에 따른 작동 유체의 압력을 나타내는 압축성 레이놀즈 방정식(Compressible Reynolds Equation)과 이러한 압력에 의해서 발생하는 포일의 탄성변형 방정식으로 요약할 수 있다. 레이놀즈 방정식은 베어링의 틈새 간격인 유체막 두께(Film Thickness)와 압력분포 방향으로 구성되어 있는 비선형 방정식으로서, 압력분포가 유체막 두께의 세제곱에 비례하기 때문에 레이놀즈 방정식의 해는 포일의 변형량에 대하여 매우 민감하게 변한다. 이 두 가지 방정식은 서로 연성되어 있기 때문에 그림3에서 볼 수 있듯이 수치적인 반복 작업에 의해서 해를 구하게 된다[3].

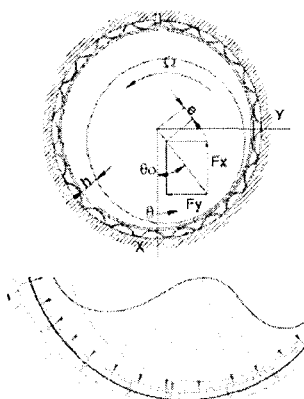


그림2 범프형 포일 저널 베어링

포일 베어링 한 조는 그림4에 나타난 바와 같이 반경 방향 하중을 지지하는 2개의 저널 베어링과 축방향 하중을 지지하는 축하중 베어링 1개로 구성되어 있는데, 개발 모터

에 사용되는 저널 베어링의 크기는 직경 40mm, 길이 30mm, 축하중 베어링의 외경은 74mm이며, 운용 조건은 회전속도 100,000 RPM, 작동 온도 120 °C, 작동 유체는 네온이다. 포일 저널 베어링은 약 4,000 RPM에서 공기막이 형성되면서 비접촉 상태가 되는데, 그 이하의 회전속도에서는 로터와의 마찰이 발생하여 베어링의 수명을 감소시키게 된다. 따라서, 로터의 시동과 정지 회수에 의해서 베어링의 수명이 결정이 되며, 이때의 마찰을 최소화시키기 위해서 베어링 면에 윤활성이 좋은 코팅처리를 한다.

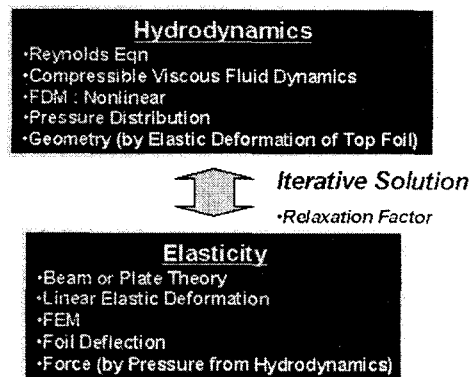


그림3 포일 베어링 계산 방법

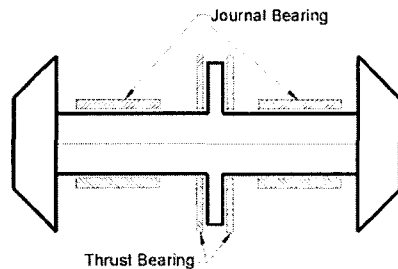


그림4 포일 베어링 구성도

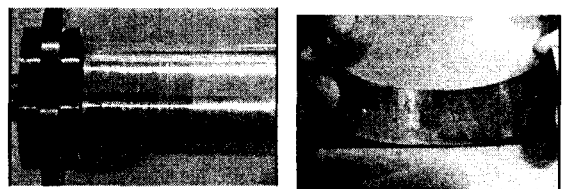


그림5 내구성 시험 후의 저널 베어링 상태

포일 베어링의 성능은 전용시험기를 사용하여 평가되었으며, 내구성을 확인하기 위하여 개발 모터의 무게와 유사한 가상 로터와 구동용 스피들 모터를 사용하여 20,000 회의 시동/정지 시험을 수행하였다. 그림5는 내구성 시험 후의 베어링 상태를 보이고 있는데, 상태가 양호하여 무한 수

명에 가까운 내구성을 확보하였다[4].

## 2.2 로터 위험속도 설계

극저온 냉동기의 냉매 압축기에 사용되는 모터는 영구 자석을 사용하는 BLDC 형이며 100,000 RPM에서 38kW의 파워를 내도록 설계되어 있다. 임펠러를 포함하는 전체 로터의 중량은 2.6 kg이며, 로터의 형상 및 위험속도 해석을 위한 해석모델은 그림6에 보였다. 전, 후방 포일 저널 베어링은 두 개의 유연한 스프링으로 대체되었다. 그림7은 베어링의 강성에 따른 위험속도의 변화를 보여주고 있고, 그림8에는 각각의 위험속도에 해당하는 진동모드를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 포일 베어링의 강성 영역인 1.0e6 N/m ~ 3.0e6 N/m에서는 1, 2차 강제모드 위험속도가 20,000 RPM 이하에, 3차 굽힘모드 위험속도는 130,000 RPM 이상에 존재하고 있으므로 운용영역인 100,000 RPM 과는 충분한 거리를 확보하고 있다. 따라서, 저속 발란성만 적절하게 수행될 경우, 로터의 위험속도에 의한 진동 가능성은 없다.



그림6 로터 형상 및 로터다이나믹 해석 모델

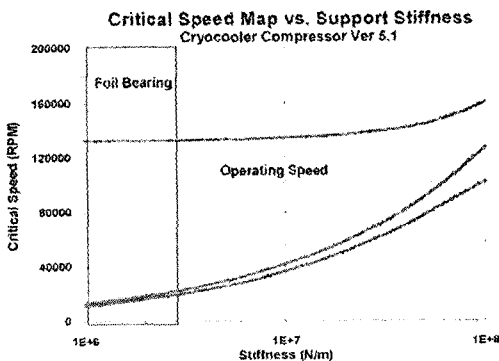


그림7 베어링 강성에 대한 로터 위험속도 변화

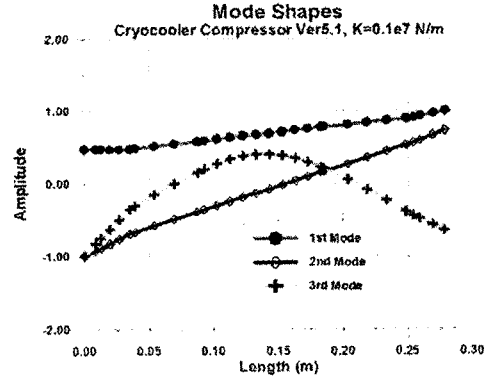


그림8 로터 위험속도의 진동 모드

## 2.3 모터 시험

모터의 진동 및 성능시험을 수행하기 위해서 임펠러 장착 위치에 임펠러와 유사한 질량 특성을 갖는 디스크를 장착하였다. 모터 시험은 내온이 아닌 공기상태에서 수행되었다. 로터의 회전수와 변위 진동은 변위센서를 사용하여 측정되었고, 모터 정지부의 속도진동을 측정하기 위해서 가속도 센서를 장착하였다. 로터의 회전수는 모터 구동 인버터와 별도로 변위센서를 사용하여 측정하였으며, 로터의 변위 진동 측정용 변위센서는 서로 직각으로 설치하여 로터의 궤적(Orbit)을 볼 수 있도록 하였다. 가속도 센서에서 측정되는 진동은 적분을 수행하여 속도로 환산된 값으로 활용되는데, 속도로 진동을 분석하는 경우에는 광범위한 주파수의 진동 성분을 종합적으로 볼 수 있다. 그림9에는 모터의 단면 및 센서 장착 위치를 나타내었으며, 그림10에는 시험 모습을 보였다.

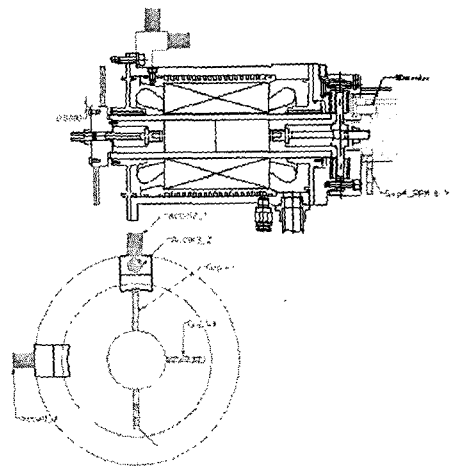


그림9 모터의 형상 및 instrumentation

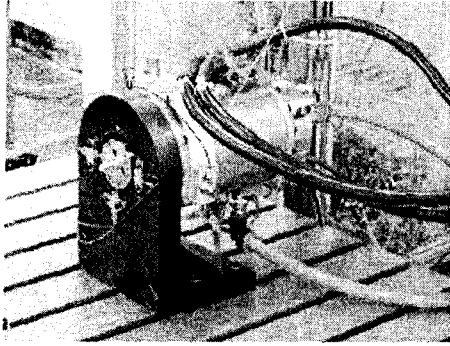


그림10 모터 시험 모습

그림11은 시간에 대한 모터의 회전수를 나타낸 것이며, 그림12와 그림13에는 시간에 대한 로터의 변위진동과 케이스의 속도진동을 3차원 Waterfall 그래프로 보였다. 전체적으로 진동성분을 살펴보면, 로터의 질량 불균형에 의해서 발생하는 1X 진동이 대부분을 차지하고 있다는 것을 알 수 있으며, 90000 RPM 이상에서는 250 ~ 290 Hz에 해당하는 진동이 약하게 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 로터의 강제 모드 위험속도에 해당하는 진동 성분으로서 회전수가 증가하면 조금씩 따라서 증가하는 특성을 가지고 있다. 그림14는 RPM에 대한 로터의 1X 변위진동을 나타내었다. 변위센서로 로터의 변위를 측정하는 디스크의 표면 흔들림(Runout) 양이 베어링 면을 기준으로 30  $\mu\text{m}$ 로 측정이 되었는데, 그림14에서 이 값을 보정해 주면 20,000 RPM 이상의 회전속도에서 변위 진동의 크기는 10  $\mu\text{m}$  이하이며, 로터의 회전수에 대한 진동의 변화는 거의 없이 안정적인 것을 확인할 수 있다. 20,000 RPM 이하에서는 포일 베어링의 부양속도 및 강제모드 위험속도에 의해서 진동이 조금 더 높게 발생하는 것을 볼 수 있다. 케이스에서 측정된 속도진동의 크기는 2 mm/s 이하의 값을 가지며, 이는 터보기기류에 적용하고 있는 일반적인 진동 한계 값인 4 mm/s에 -Erskine's Severity Chart(1981)- 비하여 낮은 값을 가지고 있으므로 전체적인 진동의 크기 및 경향은 안정적인라고 판단할 수 있다[5]. 그림15에는 회전수에 대한 로터의 진동 궤적을 보였다. 진동 궤적은 전반적으로 깨끗한 원을 그리고 있으며, 로터의 불안정성은 발생하지 않는다. 80,000 RPM 이상에서는 위험속도 진동 성분에 의해서 궤적이 약간 떨리는데, 이 현상은 90,000 RPM에서 최대인 5  $\mu\text{m}$  크기로 발생하며, 100,000 RPM으로 회전속도가 증가하면 다시 감소한다.

모터시험을 통하여 포일 베어링을 장착한 모터는 100,000 RPM까지의 운용영역에서 매우 안정적인 진동특성을 가지고 있다는 것을 알 수 있다. 현재 공기 환경에서 임펠러를 장착한 압축기 성능시험이 수행되고 있으며, 네온을 사용하는 극저온 냉동기 시험이 준비되고 있다.

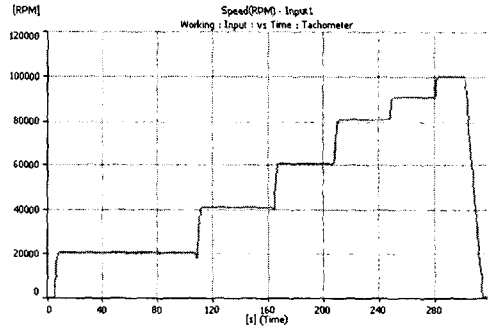


그림11 RPM Profile

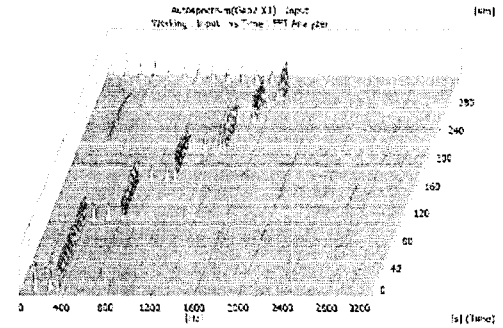


그림12 로터의 변위 진동 Waterfall

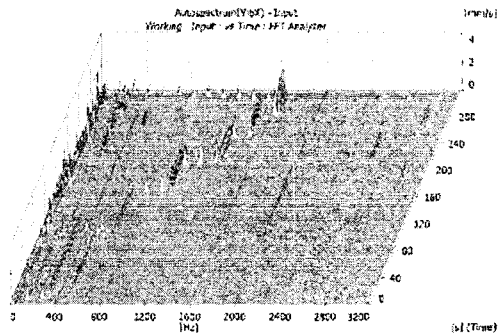


그림13케이스의 속도 진동 Waterfall

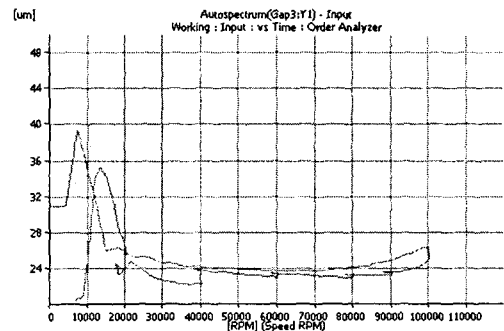


그림14 RPM에 대한 로터의 1X 변위 진동

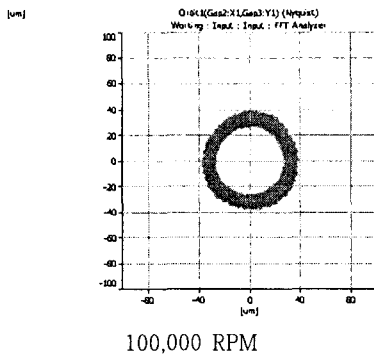
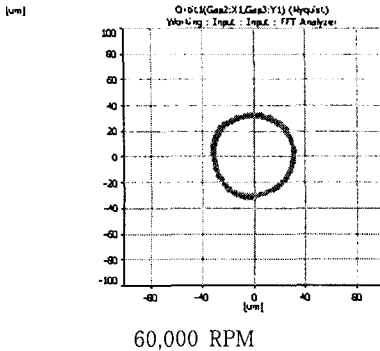


그림15 로터의 진동 궤적

### 3. 결론

본 논문에서는 비접촉 베어링으로서 회전속도가 매우 높은 초고속회전체에 적합한 포일 가스 베어링에 대한 작동 원리 및 개발현황을 소개하였으며, 이 베어링을 채택하여 개발 중인 극저온 냉동기용 38kW급, 최대속도 100,000 RPM인 BLDC 모터시험 결과를 제시하였다. 포일 베어링은 전용시험기를 통하여 성능 및 내구성이 입증되었으며, 모터 시험결과로부터 전체 운용구간에서 매우 안정적인 진동특성을 보여주었다. 따라서, 이 시험결과를 바탕으로 장수명, 저

진동 및 환경친화적인 냉매압축기 개발이 가능할 것으로 판단되며, 극저온 냉동기의 개발 뿐 아니라 고속 회전체를 사용하는 터보기기 및 소형 가스터빈의 무급유 시스템화에도 크게 기여할 것으로 기대된다.

### 후 기

본 연구는 21세기 프론티어 사업인 “차세대 초전도 응용기술 개발”사업의 일환으로 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

- [1] Giri L. Agrawal, 1997, "Foil Air/Gas Bearing Technology-An Overview", International Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition
- [2] Hooshang Heshmat, 1999 "Operation of Foil Bearings Beyond the Bending Critical Mode", 99-Trib-48
- [3] 김경수, 이기호, 김승우, 2002, "고성능 포일 베어링 개발", 한국군사과학기술학회 2002년도 종합학술대회 논문집, Vol.1, pp124~128
- [4] 김경수, 김승우, 이 인, 2003, "고속 발전기/모터용 공기 포일 베어링 개발", 전기학회 춘계학술대회 전기기기 및 에너지변환시스템학회 회전기 관련 국가지정연구실 Session 논문집, pp99-104
- [5] Fredric F. Ehrich, 1992, *Handbook of Rotordynamics*, McGraw-Hill