

무인기용 소형 가스터빈 엔진에 대한 포일 공기 베어링 적용 연구

김경수*, 이시우*, 김승우*, 이 인**

Application of Foil Air Bearing to Small Gas Turbine Engine for UAV

Kyeong-Su Kim*, Si-Woo Lee*, Seung-Woo Kim*, In Lee**

ABSTRACT

Foil air bearing, which is a noncontact bearing utilizing viscosity of operating fluid and elastic deformation of foil structure, has several advantages over rolling element bearings in terms of oilless environment, long life, high speed operation, and high temperature application over 500 °C. Recently advanced researches are actively being performed for the application to the extreme temperature such as gas turbines, as well as conventional small turbo machinery. In this paper, the principle of foil air bearing is introduced and a feasibility study to adopt a foil bearing as the turbine bearing of 65 HP turbo shaft engine, which is under development for UAV, is presented.

초 록

포일 베어링은 공기의 점성과 포일 형태의 구조물을 이용하는 비접촉 베어링으로서, 구름베어링에 비하여 별도의 윤활장치가 필요 없고, 무한수명이 가능하며, 구름베어링을 사용할 수 없는 초고속 회전체와 500 °C 이상의 고온 환경에도 적용이 가능하다는 장점이 있다. 최근에는 전통적으로 널리 사용되어 왔던 소형 터보기기 분야뿐만 아니라, 소형 가스터빈 엔진과 같이 극한 온도 조건에서도 작동할 수 있는 포일 베어링에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 본 논문에서는 포일 공기 베어링 원리에 대한 소개와 함께, 현재 당사에서 볼베어링을 사용하여 개발 중인 65마력급 무인기용 터보샤프트 엔진의 고온부 베어링으로 적용하기 위한 가능성 연구를 수행하였다.

Key Words : Foil Air Bearing(포일 공기 베어링), Noncontact Bearing(비접촉 베어링), UAV(무인기), Turbo Shaft Engine(터보샤프트 엔진)

1. 서 론

Fig. 1과 같이 고속으로 회전하는 로터 표면

에는 작동유체의 점성 저항에 의해서 유도되는 유체의 흐름이 발생되며 이 유체의 흐름은 베어링 하우징에 의해서 형성되는 썩기 형태의 수축

* (주)뉴로스 터보에너지 연구소

** 한국 과학기술원

부를 통과하면서 유속과 압력이 높아져서 로터를 지지하는 힘이 발생한다. 포일 공기 베어링은 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 로터와 베어링 하우징 사이에 적절한 형태의 탄성을 갖는 포일을 삽입함으로써 어느 정도 균일한 스프링계수를 확보할 수 있게 해주며 포일의 변형에 의해서 베어링의 자세각이 작아지고 포일의 마찰에 의해서 감쇄가 발생하므로 고속회전에서 동적 안정성이 크게 향상된다. 뿐만 아니라, 구름 베어링을 적용할 수 없는 극저온 및 고온 환경에도 적용이 가능하며, 구조가 간단하고 수명이 매우 길어 유지보수가 거의 필요 없다.1) 최근에는 이러한 포일 베어링의 장점을 소형 가스터빈 엔진에 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며2), 열병합 분산 발전용으로 사용되는 지상용 가스터빈에 성공적으로 적용되어 상품화된 제품도 있다.

현재 당사에서는 과기부의 민군겸용 사업 과제 65마력급 무인기용 소형 터보 샤프트 엔진을 개발하고 있다. Fig.3은 엔진의 형상을 보이고 있는데, 엔진 전장 551mm, 연소기 케이스 기준으로 직경은 146mm 이다. 현재는 1단계 사업이 성공적으로 마무리되어 가스발생기 역할을 하는 터보 제트 엔진에 대한 개발이 완료되어 있는 상태이다. 본 논문에서는 가스터빈 엔진 설계에서 냉각 문제로 인해 어려움을 많이 겪는 터빈 베어링을 포일 공기 베어링으로 대체할 수 있는 가능성 연구를 수행하였으며, 당사에서 개발 중인 무인기용 터보 샤프트 엔진을 그 대상으로 사용하였다.

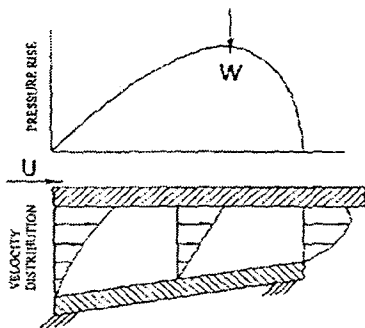


Fig. 1 Principle of Air Bearing

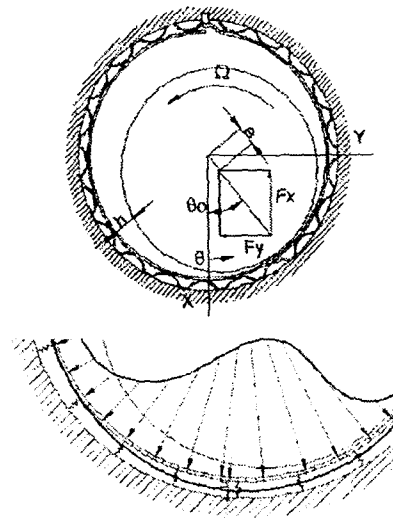


Fig. 2 Configuration of Foil Journal Bearing

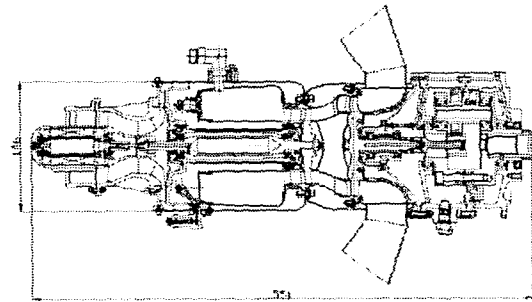


Fig. 3 65 HP Turbo Shaft Engine for UAV

2. 본 론

2.1 항공용 가스터빈 엔진 베어링의 요구조건

가스터빈 엔진은 무게 대 성능이 다른 형태의 엔진에 비해서 매우 높기 때문에 항공기에 가장 적합한 동력원으로서, 고속으로 회전하는 회전체와 이를 지지해주는 정지부가 있으며 그 사이에는 베어링이 존재한다. 성공적인 가스터빈 엔진 개발을 위해서는 수많은 설계 항목들을 서로 종합적으로 고려하여 최적화 과정을 수행하게 되는데3), 그 중에서도 가장 기본적이면서도 안

정적인 엔진운동을 위해서 필수적인 항목이 베어링 설계분야이다. 특히, 항공용 가스터빈 엔진은 지상용과 달리 무게 최소화를 위한 설계가 필수적이기 때문에 전체 구조물이 상대적으로 유연하여 진동 발생 가능성이 높으며, 비행 기동에 의한 부가적인 하중조건이 발생하게 되어 베어링 설계에 요구되는 조건이 더 까다롭다. 항공용 가스터빈 엔진 베어링의 성능 및 수명 설계에 반영되어야 하는 하중 조건들을 정리하면 아래와 같다.

- 로터 축 방향 하중
- 기체 비행 하중
- 로터 진동 하중
- 축 어긋남 하중
- 기어박스 전달 하중

이러한 하중들을 고려하여 베어링을 선정 또는 신규로 설계하게 되는데, 현재 주로 사용되고 있는 것은 구름베어링과 오일 윤활 방식이다. 이 경우에는 오일의 작동 최대 온도가 약 250 ℃ 이하로 제한되기 때문에 베어링부의 냉각설계가 필수적이며 엔진 주 유동의 일부를 추출하여 사용하여야 하므로 이로 인한 엔진의 성능저하를 감수하여야 한다. 또한 기체의 비행 자세 변화를 고려한 오일 공급장치의 설계가 이루어져야 하며, 베어링 상태를 정기적으로 검사하여 유지보수를 수행하여야 한다.

장수명이면서 오일장치가 필요 없는 포일 공기 베어링은 최근에 500 ℃ 이상에서 사용할 수 있는 고온 코팅이 개발되면서 가스터빈 엔진의 고온부 베어링으로 적극 검토되고 있다.4) 지상용 엔진 보다 베어링의 운용조건이 더 열악한 항공용 엔진에도 포일 베어링의 적용이 가능하다면, 엔진 베어링 관련 설계과정의 부담을 덜어줄 뿐 아니라 엔진의 수명 증대와 더불어 냉각유량 절감으로 인한 성능 증가도 기대할 수 있다.

이와 더불어 로터를 지지하는 베어링 부의 강성은 엔진전체의 진동특성을 좌우하는 로터다이

나믹스 설계에 많은 영향을 준다. 회전중인 모든 형태의 로터는 고유진동수가 불균형 질량에 의해서 가진을 받아 공진을 일으키는 위험속도가 발생하게 되는데, 이때는 로터의 굽힘현상으로 인해 엔진 진동 및 베어링으로 전달되는 하중이 과도하게 발생하기 때문에 엔진의 운용구간과는 일정한 거리를 두도록 설계하여야 한다. 위험속도의 위치는 축의 강성, 디스크의 질량 및 베어링 지지부의 강성을 조절함으로써 변경이 가능하지만 축 및 디스크는 다른 설계 인자들에 의해서 거의 결정되기 때문에 실질적으로 베어링 지지부의 강성을 조절하는 방법을 많이 사용된다.5)

2.2 UAV용 가스터빈 엔진의 포일 베어링 적용 연구

현재 개발 단계에 있는 터보 샤프트 엔진의 가스발생기 부분을 제트엔진 형식으로 재조립된 형태를 Fig.4에 나타내었으며, Fig.5에는 엔진 시험 장면을 보였다. 제트 엔진은 추력이 55 lbf이며, 최대 회전수는 105,000 RPM이다. 로터는 오일로 윤활이 되는 2개의 볼 베어링으로 지지되어 있으며, 회전수가 매우 높기 때문에 베어링의 DN 수의 제한에 의해서 베어링의 직경이 작다. 그럼에서 볼 수 있듯이 베어링 장착 부위의 축은 다른 부위에 비하여 상대적으로 가느다란 형상을 하고 있는데, 이는 로터 구조물 전체의 강성을 떨어뜨리게 하여 진동문제를 발생시킬 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 엔진 설계 단계에서 로터 다이내믹스 최적 설계와 더불어 적절한 진동 흡수 장치도 함께 고려되어야 한다.

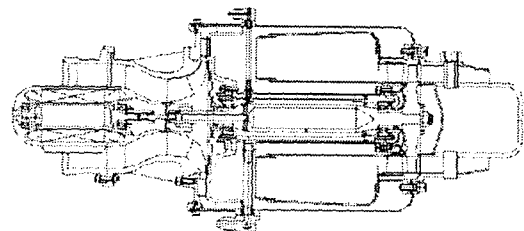


Fig. 4 Turbo Jet Engine of 55 lbf Thrust

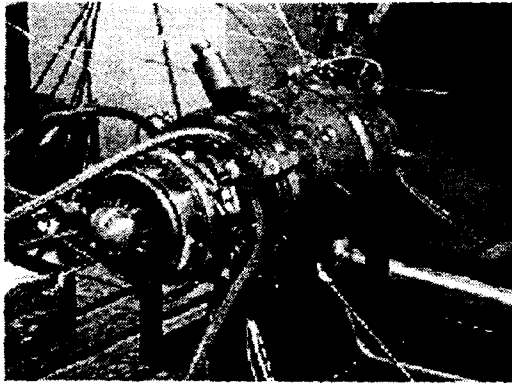


Fig. 5 Engine Test of Turbo Jet

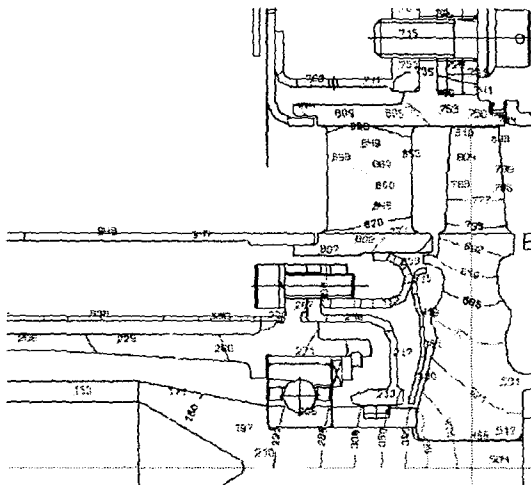


Fig. 6 Temperature around Turbine Bearing

베어링의 운용 온도 제한은 사용되는 오일에 의해서 결정되는데, 일반적으로 적용되는 베어링의 최대 작동 온도는 약 250 ℃이다. 엔진의 터빈부는 Fig.6에서 볼 수 있듯이 최대 온도가 800 ℃ 이상이며 터빈 베어링과의 거리가 매우 가깝기 때문에 베어링의 온도 조건을 만족시키기 위해서는 냉각설계가 이루어져야 한다. 냉각을 위해서는 오일과 함께 압축기에서 나오는 주유동의 일부를 추출하여 사용한다. 여기에서 소모되는 냉각공기는 엔진의 성능에 기여하지 못하고 오직 베어링의 냉각을 위해서 소비되는 것이므로 사용되는 양에 비례하여 엔진의 성능은

저하된다. 현재는 전체 공기 유량의 0.5%인 2.2 g/s를 터빈 베어링 냉각에 사용하고 있다.

이 엔진의 터빈 베어링으로 포일 공기 베어링을 채택하는 경우에는 최대 작동온도를 500 ℃ 이상으로 설정할 수 있으므로 냉각문제가 없고, 베어링 부위의 구조적 강성감소가 발생하지 않으므로 로터다이나믹스 설계에도 유리하다. 뿐만 아니라 비접촉 베어링으로서 수명이 매우 길기 때문에 유지보수가 필요 없으므로 엔진의 신뢰성 향상에 기여할 수 있다. 그러나, 항공용 엔진이 가져야 하는 다양한 형태의 작동 하중을 고려하여 작동성 및 신뢰성을 가져야 하므로 시험평가를 거쳐 최적화 개발 과정을 반드시 거쳐야 한다. Fig.7은 터빈부에 포일 베어링을 적용한 로터의 형상을 기존의 것과 함께 나타내었다. Fig.8에는 위의 두 가지 형상의 로터에 대한 위험속도를 비교하여 나타내었다. 빗금친 부분이 엔진 작동 영역인데, 시동 초기에 1차와 2차 강체모드 위험속도를 통과하게 되며 진동문제를 발생시키는 3차 굽힘모드 위험속도와는 충분한 거리를 가지고 있으므로 적절한 위험속도 설계가 이루어져 있는 상태이다. 포일 베어링을 사용하는 경우에는 3차 위험속도와의 여유를 약 7% 더 확보할 수 있으므로 엔진 초기 설계단계에서 그 만큼 설계부담을 줄일 수 있는 여유를 제공한다.

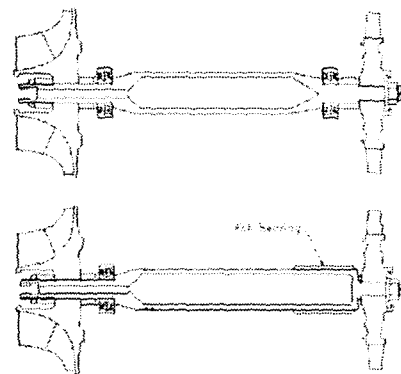


Fig. 7 Rotor Configuration adopting Foil Air Bearing for Turbine Support

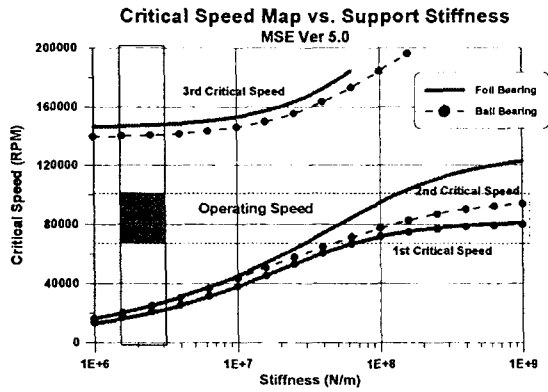


Fig. 8 Critical Speed Map

엔진의 성능측면에서 포일 베어링 장착효과를 살펴보면, 터빈 베어링의 냉각으로 소모되는 냉각공기의 양을 2.2 g/s에서 0.4 g/s으로 최소화시킬 수 있으며, 이를 바탕으로 엔진성능의 향상을 기대할 수 있다. Table 1 에는 베어링 변경에 의한 성능 변화를 정리하였다. 성능 변화에 미치는 양이 크지는 않지만, 1%의 성능 향상을 위하여 엄청난 규모의 개발비와 시간을 투자하고 있는 선진 개발업체의 경우를 참조하면 결코 작지 않은 성과라고 볼 수 있다.

Table 1. Contribution to Engine Performance

Parameter	Ball Bearing	Foil Bearing	Remarks
Cooling Flow Rate (g/s)	2.2	0.4	-1.8 g/s
SFC (kg/hr/hp)	0.4787	0.4771	-0.33%
TIT (K)	1175.4	1171.0	-4.4 K

2.3 포일 공기 베어링 설계

설계된 포일 베어링은 Fig.2에서 볼 수 있는 바와 같이 범프형이며 크기는 직경 26mm, 폭 25mm, 작동유체는 공기, 온도는 400 °C, 베어링의 틈새는 30 μ m, 회전속도는 105,000 RPM이다. 로터의 편심률이 1일 때, 베어링의 하중성능은

9kgf, 자세각은 15.4도, 발열량은 53 W이며, Fig.9에 성능 해석결과를 나타내었다. 이때 베어링의 강성은 0.3E7 N/m이다.

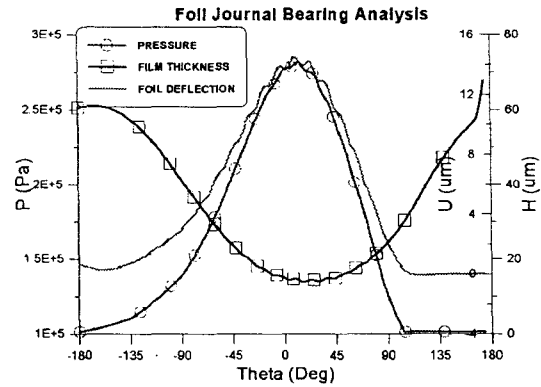


Fig. 9 Foil Journal Bearing Analysis

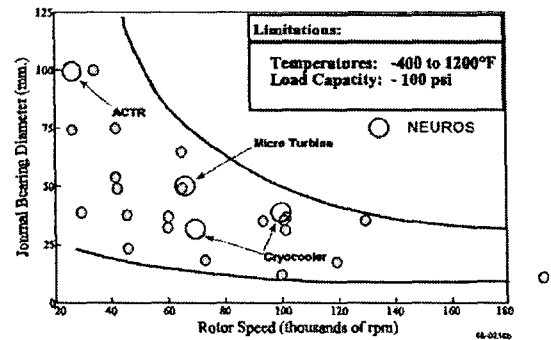


Fig. 10 Spectrum of Foil Bearing Application

포일 공기 베어링은 점성유체의 속도 및 압력과 베어링 면을 형성하는 포일 구조물의 연성작용에 의해서 작동하기 때문에 해석하는 과정도 복잡하지만, 실제 작동할 때 발생하는 불확실한 현상을 정확하게 예측하는 것은 쉽지 않다. 따라서, 설계 제작된 베어링에 대해서는 구성품 시험을 거쳐서 성능 및 수명 평가를 수행하는 것이 필수적이다. Fig.10에는 지금까지 세계적으로 개발된 포일 베어링을 회전속도와 베어링 직경을 기준으로 표시한 것으로, 본 논문에서 설계된 베어링도 적용 가능한 범주에 속한

다는 것을 확인할 수 있다. 또한 그림에는 당사에서 개발완료 또는 개발 중인 포일 베어링을 함께 나타내었는데, 200 ℃이하에서 100,000 RPM의 회전속도를 가지는 베어링을 이미 개발완료 하였으며 고속 성능 시험과 수명 평가를 수행할 수 있는 시험기도 보유하고 있다.5) 현재 일부 베어링은 상품화 단계에 들어가 있으며, 500 ℃까지 베어링의 성능 및 수명을 시험할 수 있는 고온 베어링 시험기도 개발 중이다. 따라서, 항공용 가스터빈 엔진에 적용 가능한 포일 베어링을 개발할 수 있는 설계, 제작, 시험 평가 기술은 모두 확보가 되어 있는 상태이며, 엔진의 개발 일정 및 요구사항 등을 종합적으로 검토하여 추후에는 포일 베어링을 채택한 소형 가스터빈 엔진 개발이 가능할 것으로 판단된다.

3. 결론

본 논문에서는 비접촉 베어링으로서 수명이 길고, 별도의 윤활장치가 필요 없으면서도 고온 및 고속에 사용가능한 포일 공기 베어링에 대한 소개와 함께 현재 민군겸용 과제로 개발 중인 65마력급 무인기용 소형 터보샤프트 엔진의 터빈 베어링으로의 적용 가능성을 분석하였다. 포일 공기 베어링을 터빈부에 적용할 경우에는 구조 진동 설계, 베어링 냉각 설계 및 엔진 성능 측면에서 모두 유리한 결과를 나타내었으며, 설계된 포일 베어링의 크기와 작동조건은 현재 확보중인 베어링 개발 기술을 활용할 경우 성공적인 개발이 가능할 것으로 판단된다. 엔진의 개발 일정 및 요구사항 등을 종합적으로 검토하여 향후에 포일 베어링을 채택한 항공용 소형 가스터빈 엔진이 개발된다면, 엔진의 성능 및 신뢰성 향상과 함께 전 세계적으로 항공 엔진 분야에 적용 사례가 확인되지 않는 현 상황에서 포일 베어링 개발 기술력을 대내외적으로 알릴 수 있는 기회가 될 것으로 기대된다.

참고 문헌

1. Giri L. Agrawal, "FoilAir/Gas Bearing Technology-An Overview," International Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition, 1997
2. Hooshang Heshmat, James F. Walton II, "Oil-Free Turbocharger Demonstration Paves Way to Gas Turbine Engine," 2000-GT-620, 2000
3. 김경수, 김승우, 김우형, "소형 가스터빈 엔진의 구조설계 및 시험평가", 한국항공우주학회지 제25권 제5호, 1997년, p.170-182
4. C. Dellacorte, J. A. Fellenstein, P. A. Benoy, "Evaluation of Advanced Solid Lubricant Coatings for Foil Air Bearings Operating at 25℃ and 500℃", Tribology Transactions, Vol 42, No.2, pp 338 ~ 342, 1999
5. Fredric F. Ehrich, 1992, *Handbook of Rotordynamics*, McGraw-Hill
6. 김경수, 김승우, 이 인, "고속 발전기/모터용 공기 포일 베어링 개발", 전기학회 춘계학술대회 전기기기 및 에너지변환시스템학회 회전기 관련 국가지정연구실 Session 논문집, 2003년 4월, pp99-104