

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2008.32.7.541

# 공기 포일 베어링으로 지지되는 초고속 마이크로 터보차저의 구동 안정성 향상에 관한 연구

곽용석\*\* · 김창호\* · 정진택\*\* · 이용복†  
(2007년 12월 18일 접수, 2008년 5월 21일 수정, 2008년 6월 10일 심사완료)

## Stability Improvement of the Ultra-High Speed Micro Turbocharger Supported by Air Foil Bearings

Yong-Suk Kwak, Chang-Ho Kim, Jin Taek Chung and Yong-Bok Lee

**Key Words:** Micro Gas Turbine Engine(마이크로 가스터빈 엔진), Air Foil Bearing(공기 포일 베어링), Viscoelastic Material(점탄성 물질), Rotor Instability(회전체 불안정성)

### Abstract

To improve the operational stability of the 100 Watts class Micro Gas Turbine, the air foil bearing with additional damping material has been investigated. The key of structure is that a viscoelastic material is coated under the top foil. The compliant foil journal bearing and thrust bearing are designed to withstand high load of vibrations at the operational speed 870,000 rpm. Test is executed in room temperature. Rotor has stably operated above 480,000 rpm. It is over 55% of the designed speed 870,000 rpm. Synchronous and subsynchronous vibrations are both well controlled. Vibration amplitude diminished over 50%. With the help of increased damping resulting from the viscoelasticity, the rotor stability of Micro turbocharger has been improved.

### 1. 서 론

근래의 급속한 기술의 발전은 기존 시스템의 사용 한계를 극복하여 휴대성을 증대시키고 적용 범위를 다양하게 넓히고 있다. 그러나 현재 널리 사용되고 있는 화학 에너지 형태의 전지(battery)는 성능 및 크기의 한계로 적용상에 많은 제한을 갖는다. 이러한 시스템의 효율적인 활용을 위해서는 기존의 배터리를 대체할 수 있는 고효율의 에너지 공급원이 필수적이며, 필요를 충족시키기

위해 초소형 파워 시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 중, 가스터빈 발전을 기반으로 하는 초소형 마이크로 가스터빈 엔진은 높은 에너지 밀도와 큰 발전 용량으로 인해 차세대 에너지 공급원으로 주목 받고 있다. 초소형 가스터빈은 임펠러의 크기가 기존의 가스 터빈에 비해 매우 작은 관계로, 동일한 형상을 가질 시 충분한 압축비를 얻기 위해서 초고속의 회전이 필요하다. 따라서 마이크로 가스터빈 개발에서 로터의 구동안정성이 필수적이며, 베어링의 선정 및 설계가 매우 중요하다.

Epstein<sup>(1)</sup>이 제작, 연구 중인 MEMS 마이크로 가스 터빈 엔진은 외부 가압 베어링인 hydrostatic 베어링으로 지지된다. 하지만 가공 방법의 한계로 인해 로터의 형상비(L/D ratio)가 매우 작은 값으로 제한되는데, 이런 경우 베어링의 하중지력 및 안정성이 기존의 베어링에 비해 현저히 떨어진다. 또한 고속으로 회전하는 압축기로부터

† 책임저자, 회원, 한국과학기술연구원 에너지 메카닉스 연구센터

E-mail : lyb@kist.re.kr

TEL : (02)958-5663 FAX : (02)958-5659

\* 한국과학기술연구원 에너지 메카닉스 연구센터

\*\* 고려대학교 기계공학과

발생하는 축 방향 하중은 로터 자중에 의한 하중과 더불어 로터의 안정적 부상 및 회전에 가장 큰 어려움으로 작용한다.

Tanaka<sup>(2)</sup>는 정밀가공을 통해 제작한 3차원 압축기를 가진 100Watts급 마이크로 가스터빈을 제작하여 외부가압베어링인 Hydroinertia 베어링으로 지지하였다. Hydroinertia 베어링은 다른 정압베어링 보다 큰 베어링 간극을 가지고 있어, 위험속도에서 베어링이 망가지는 위험을 줄일 수 있다. 하지만 높은 하중지지력을 갖기 위해서는 높은 외부가압 압력이 필요하기 때문에, 이는 궁극적으로 휴대성을 강조하는 최종적인 마이크로 가스터빈 시스템에 적용되기에는 맞지 않는다.

한편, 공기 포일베어링은 윤활제로 공기 또는 다른 유체를 사용하는 공기 동압 베어링(hydrodynamic bearing)으로서 회전축과의 마찰이 거의 없기 때문에 동력손실이 매우 작아 매우 고속의 회전속도에서도 회전축을 지지할 수 있을 뿐 아니라, 외부 가압 장치가 필요 없기 때문에 설계 단순화, 경량화, 고속화, 고온화 등 많은 장점을 얻을 수 있다. 이러한 장점들은 마이크로 가스터빈 같은 초고속 터보기계류의 구동 요구조건과도 잘 부합된다. 그러나 포일 베어링의 이러한 장점에도 불구하고, 고속의 영역에서 진동의 크기가 한계치보다 커지면 불안정해지는 단점을 가지고 있다. 이는 고속의 구동영역에서 포일베어링의 공기 유막이 강성이 증가함에 따라 상대적으로 감쇠가 줄어들면서 전체적인 베어링 감쇠가 급격히 줄어들기 때문이다. 이때 포일 베어링의 감쇠는 주로 범프 포일(bump foil) 같은 탄성 구조물의 마찰력(Coulomb friction)에 의존하고 있는데, 따라서 탄성 구조물의 감쇠를 증가시켜 초고속 터보기기의 안정성을 확보하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

1982년 Heshmat<sup>(3)</sup>은 범프 포일에 구리 코팅을 하여 베어링의 강성과 감쇠를 모두 향상 시켰다. 이러한 현상이 나타난 이유는 구리 코팅이 범프 포일의 마찰력을 증대 시켰기 때문이다. 또한 1994년 Heshmat<sup>(4)</sup>은 서로 다른 크기의 범프 포일을 겹쳐서 배치하여 종래 베어링에 비해 하중지지 능력을 2배 이상 증대 시켰다.

본 논문에서는 탑 포일 뒷면에 점탄성 물질을 삽입하여 탄성 구조물에 추가적 감쇠를 준 점탄성 공기 포일베어링을 적용하였다. 점탄성 공기

포일베어링(viscoelastic air foil bearing)은 Lee<sup>(5)</sup>에 의해 처음 제시 되었으며, 감쇠성능이 기존의 범프 포일 베어링에 비하여 최대 80% 정도 향상된 결과를 보여주었다. 마이크로 가스터빈 엔진의 구동실험을 위한 마이크로 터보차저를 설계 및 제작하였다. 또한 기존 공기 포일베어링과 점탄성 공기 포일베어링을 각각 적용하여 구동실험을 수행하여서 실험 결과를 통해 추가적 감쇠성분이 초고속 로터의 구동 안정성 향상에 미치는 영향을 살펴보았다.

## 2. 마이크로 가스터빈 엔진

마이크로 가스터빈 엔진<sup>(6)</sup>은 브레이튼 사이클(Brayton cycle)을 기반으로 하며, 100Watts 출력을 목표로 한다. 터빈과 압축기의 직경은 10mm이며 정격 압축비 3을 달성하기 위한 구동속도는 870,000 rpm 이다.<sup>(7)</sup> 마이크로 가스터빈 엔진의 구조는 크게 연료와 공기를 혼합하여 연소시켜 고온, 고압가스를 얻는 연소기 부분과 연소기 내부로 압축공기를 공급하는 압축기, 출력을 얻어 내는 터빈, 전기적 에너지를 얻기 위한 발전기 그리고 회전축을 지지하기 위한 공기 포일베어링으로 구성된다. Fig. 1은 마이크로 가스터빈 엔진의 개념도를, Table 1은 작동 조건을 보여준다. 마이크로 가스터빈 엔진의 구동원리는 상용 가스터빈 엔진의 원리와 동일하다. 발전기가 모터링 모드로 로터를 초기 구동시키면 압축공기가 발생하고 연소기로 유입된다. 압축공기가 연소기 내에서 연료와 혼합되어 연소되면서 고 엔탈피의

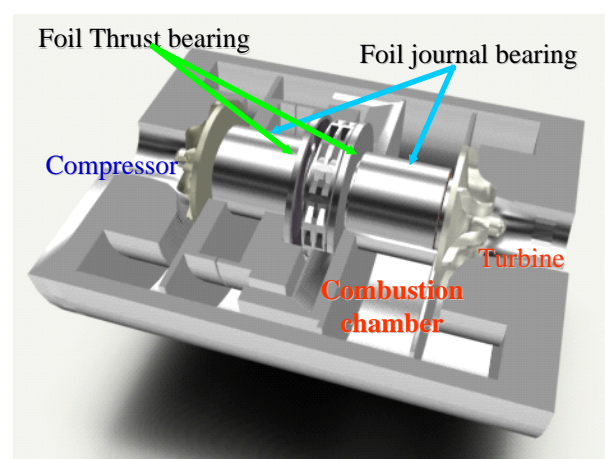


Fig. 1 Concept of micro gas turbine

연소가스가 발생하고 터빈을 구동한다. 로터의 구동속도가 일정속도 이상이 되면 발전기는 발전 모드로 전환되어 전기에너지를 얻는다.

마이크로 가스터빈 엔진의 성능을 좌우하는 두 가지 요인은 압축비와 터빈 입구 온도이며 이것은 무엇보다도 구동속도의 영향을 가장 크게 받는다. 때문에 고속에서의 구동안정성은 마이크로 가스터빈 엔진의 개발에 있어서 매우 중요하다.

### 3. 공기 포일베어링

#### 3.1 공기 포일베어링

공기 포일베어링(air foil bearing)은 저널과 베어링 하우징 사이에 한 개 또는 그 이상의 포일을 포함하고 있으며 축이 회전함에 따라 베어링의

Table 1 Operating condition of the system

Power	100W
Operational Speed	870,000rpm
Pressure Ratio	3.0
Turbine inlet Temperature	1223K
Net Power	144W
Mass Flow Rate	3.429g/s
Turbine Efficiency	0.70
Compressor Efficiency	0.68
Pressure Efficiency in Combustor	0.92
Mechanical Efficiency	0.9
Electrical Efficiency	0.7

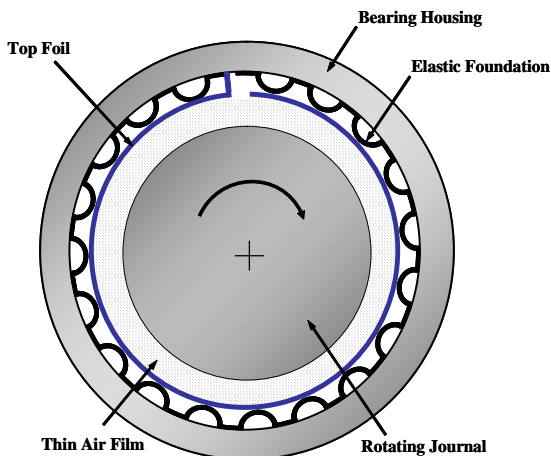


Fig. 2 Structure of the air foil bearing

틈새에서 자동(self-acting)적으로 압력이 발생되는 동압(hydrodynamic) 베어링의 일종이다.

Fig. 2는 공기 포일베어링의 기본적인 구조를 나타낸다. 공기 포일베어링은 크게 탄성 구조물, 탑 포일, 그리고 공기 유막으로 구성된다. 구동과정을 살펴보면, 탑 포일이 축과의 사이에서 윤활 틈새를 형성하는 역할을 하기 때문에, 축이 회전함에 의해 윤활 틈새에 동압공기가 형성되면 축은 탑 포일로부터 부상하여 동압공기를 윤활매체로 하여 회전하게 된다. 이 때 탑 포일은 컴플라이언스(compliance)의 존재로 변형되는 탄성 구조물에 의해 지지력을 얻는다. 탄성 구조물이 스프링처럼 작용하여 회전축을 지지하기 때문에 그 회전축을 둘러싼 탑 포일은 일반적인 공기 베어링 보다 넓은 범위에 걸쳐 극소 윤활 틈새를 유지할 수 있게 되고, 이에 따라 안정적인 회전이 가능하게 된다. 본 논문에서는 탄성 구조물로 범프 형상의 포일을 사용한다. 포일의 재료는 SUS301을 사용하였고, 범프 포일에는 쿨롱 감쇠를 증가시키기 위해 구리 코팅을 하였다. 탑 포일 윗면에는 초기 구동 시 구동토크를 감소시키기 위해 MoS<sub>2</sub> 코팅을 하였다.

#### 3.2 공기 포일베어링의 단점

공기 포일베어링의 감쇠는 크게 공기 유막에서의 감쇠와 탑 포일과 범프 포일과의 마찰에 의한 쿨롱 감쇠 그리고 범프 포일과 베어링 슬리브 사이의 마찰에 의한 쿨롱 감쇠로 구성되어 있다. 공기 필름의 경우 고속의 영역에서 강성이 증가하면서 상대적으로 감쇠가 급격히 줄어들게 되는데, 이로 인해 전체 베어링의 감쇠는 탄성 구조

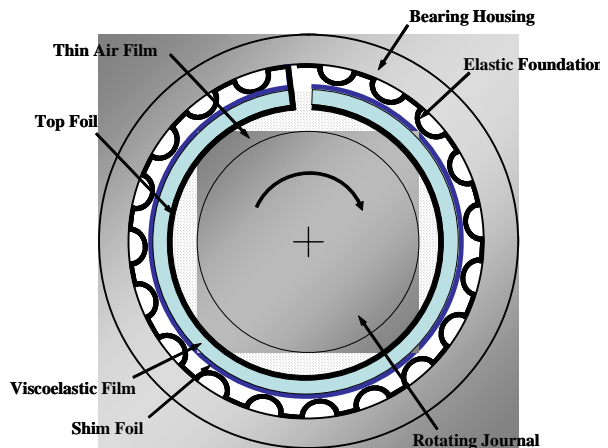


Fig. 3 Structure of the viscoelastic foil bearing

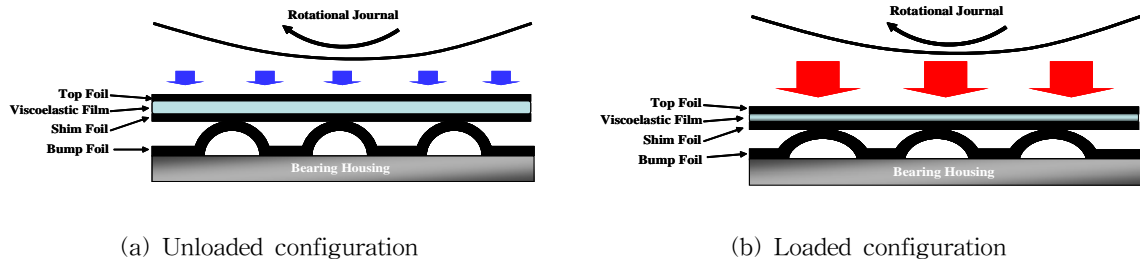


Fig. 4 Schematic diagram of the viscoelastic air foil bearing

물의 감쇠에 의해서 좌우하게 된다. 그리하여 공기 포일베어링 내에 설치된 탄성 구조물의 감쇠가 작을 경우, 편심률이 증가할수록 일반적인 저널 베어링과는 달리 그 감쇠가 감소한다. 포일 베어링의 작동 영역이 보통 큰 편심률에서 그 성능을 제대로 나타낸다는 점을 감안하면, 이는 포일 베어링의 단점으로 작용한다.

### 3.3 점탄성 공기 포일베어링

점탄성 공기 포일베어링(viscoelastic air foil bearing)은 기존 공기 포일베어링의 탄성 구조물에 점탄성 포일을 추가적으로 삽입하여 일반적인 포일 베어링 보다 탄성 구조물의 감쇠를 향상시킨 포일 베어링이다. 점탄성 포일 베어링은 Fig. 3에서 보이듯이 크게 점탄성 포일(viscoelastic foil), 범프 포일(bump foil), 탑 포일(top foil) 및 심 포일(shim foil)로 구성된다. 심 포일은 점탄성 물질에 하중이 고르게 분포하도록 하여, 점탄성 물질이 범프 포일과 바로 맞닿게 되면서 발생하는 점탄성 포일의 국부적 손상을 막는 역할을 한다. 또한 심 포일에 구리 코팅을 하게 되면, 범프 포일과의 쿨롱 감쇠를 극대화 할 수 있다.

Fig. 4(a)와 같이 탑 포일 위에서 동압이 발생하게 되면, 기존 공기 포일베어링과 동일한 방식으로 탄성 구조물은 변형하게 된다. 로터의 구동이 초고속에 이를 때, Fig. 4(b)에서 보이듯, 탑 포일 면에 높은 동압이 발생하면서 범프 포일의 변형이 극대화 된다. 이때 점탄성 물질의 변형이 공력 불안정성이나 동압에 의한 에너지를 소산하면서, 탄성 구조물의 감쇠력과 하중지지력을 증가시킨다. 이러한 추가적 감쇠력은 고속에서 감쇠가 감소하여 외부 기진력에 취약한 포일베어링의 단점을 보완해준다. 따라서 초고속 구동의 터

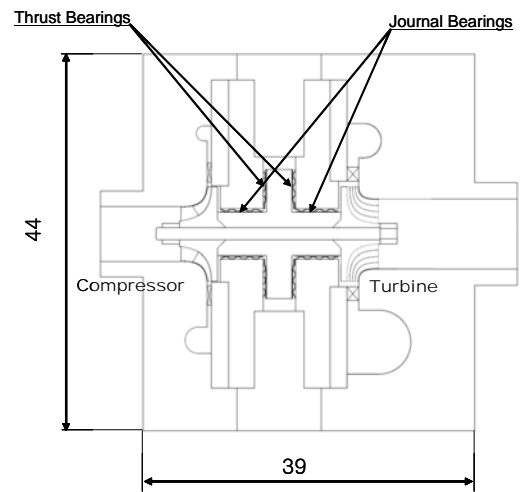


Fig. 5 Cross Section of Micro Turbocharger

보기에 점탄성 공기 포일베어링을 적용 시, 기존 공기 포일베어링에서 구동안정성의 향상을 가져올 것이다. 본 논문에서는 다음과 같은 사실을 구동실험을 통해 증명하였다.

## 4. 구동 실험

### 4.1 실험장치

공기 포일베어링으로 지지되는 마이크로 가스터빈 엔진의 운전 특성을 파악하기 위한 실험 장치를 설계, 제작하였다. 구동 실험에 있어서 고온의 열로 인한 영향을 고려하지 않기 위해 실험 장치는 마이크로 가스터빈 엔진에서 연소기를 제거하고, 터빈입구에 상온의 압축공기를 공급하여 터빈에 지속적인 유량 공급을 하게 하는 일종의 터보차저의 구조로 설계 되었다. Fig. 5는 이러한 마이크로 터보차저의 구조를 보여준다. 두 개의

저널 베어링이 로터의 반경방향 하중을, 두 개의 스톱베어링이 로터의 축 방향 하중을 지지한다. 베어링은 모두 공기 포일베어링으로 구성된다. 로터는 터빈, 압축기, 샤프트로 구성되었으며 중심에서 볼트와 너트로 체결된다. 조립 시 각 부품의 동심을 일치시켜 주기 위해 임펠러와 축이 만나는 부분에 단을 지어 맞물리게 하였다.

터빈과 압축기의 직경은 10mm이며, 구동속도(870,000 rpm)에서 브레이튼 사이클을 만족하도록 설계되었다. 터빈은 7개의 블레이드(blade)와 12개의 노즐 베인(nozzle vane)으로 이루어져 있고,

재질은 추후에 고온 실험을 대비하여 고온의 작동온도에서 재료적 특성이 좋은 Inconel718을 사용하였다. 압축기는 블레이드 6개, 스플리터(splitter) 6개 등 총 12개의 날개와 9개의 디퓨저 베인(diffuser vane)으로 구성되었다. 고온 실험에서도 온도가 최대 200℃내에서 유지되므로 가공성이 좋고 터빈과 질량이 비슷한 SUS304로 제작되었다. 임펠러는 모두 5축 밀링 가공장비를 이용하여 자유 곡면형상을 가지는 블레이드로 정밀가공되었다. Fig. 6은 제작된 터빈과 압축기와 로터의 형상이다.

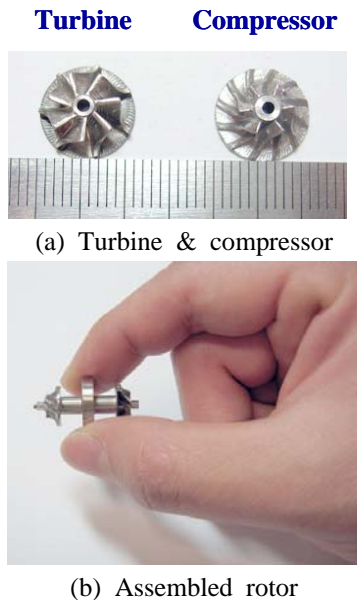
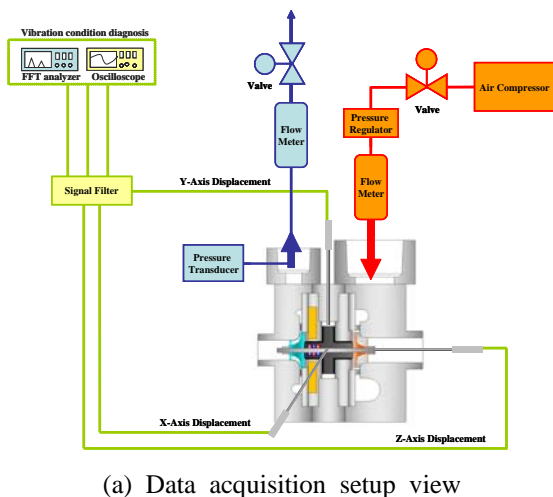


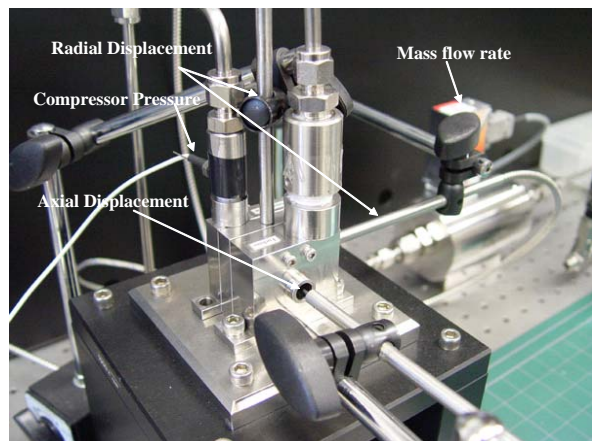
Fig. 6 Rotor of the micro turbocharger

#### 4.2 실험 방법

마이크로 가스터빈 엔진의 회전체 실험 장치는 원심형 터빈(centrifugal type turbine)으로 구동되며, 축의 회전속도는 공기 터빈으로 유입되는 공기량을 통해 제어하였다. 터빈의 입구에 Mass flow meter (Bronkhorst, F-113AC-aAHD-55-V)를 설치하여 터빈에 공급해 주는 유량의 정도를 확인하였다. 회전축과 하우징의 상대변위는 philtec사의 RC 20-Z모델인 fiber optic displacement sensor를 사용하였으며, 측정에서의 선형성을 확보하기 위해 출력 전압 범위에서 선형성을 유지할 수 있는 Z 센서 옵션을 채택하였다. 이는 센서의 출력 범위인 0~5V에서 변위 변화에 대한전압의 변화를 선형적으로 유지시켜줄 뿐 아니라 2 mV/μm의 sensitivity를 제공한다. 이러한 변위 센서로 회전축의 스톱베어링 칼라 윗부분에서 반경 방향의 변위를 측정하였고, 로터의 축 끝단 너트에 부분



(a) Data acquisition setup view



(b) Test rig setup view

Fig. 7 Micro turbocharger test rig setup

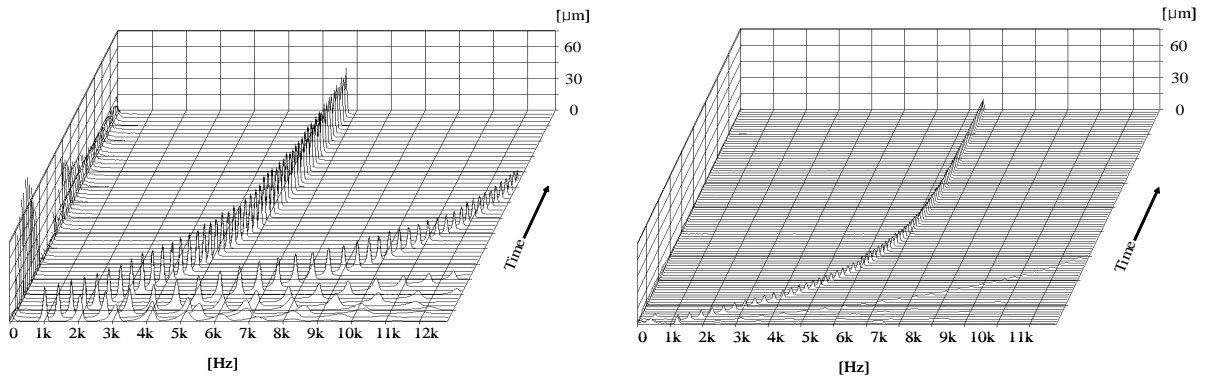
에서 축 방향 변위를 측정하였다. Fig. 7 은 실험 장치의 구성을 나타낸 것이다.

진동의 크기는 오실로스코프(oscilloscope)를 통하여 시각적으로 확인하였다. 또한 스펙트럼 분석기(FFT signal analyzer, Yokogawa DL1520)를 통하여 실험장치의 진동에 대한 주파수 성분을 분석 하였다. 모든 센서에서 나오는 출력은 시험 후 분석을 위하여 디지털 레코더(digital recorder, Sony SIR-1000)에 저장하였다.

4.3 실험 결과

초고속 마이크로 터보차저의 구동 실험에서 로터는 점탄성 공기 포일베어링으로 지지한 경우와 기존 공기 포일베어링으로 지지한 경우 모두

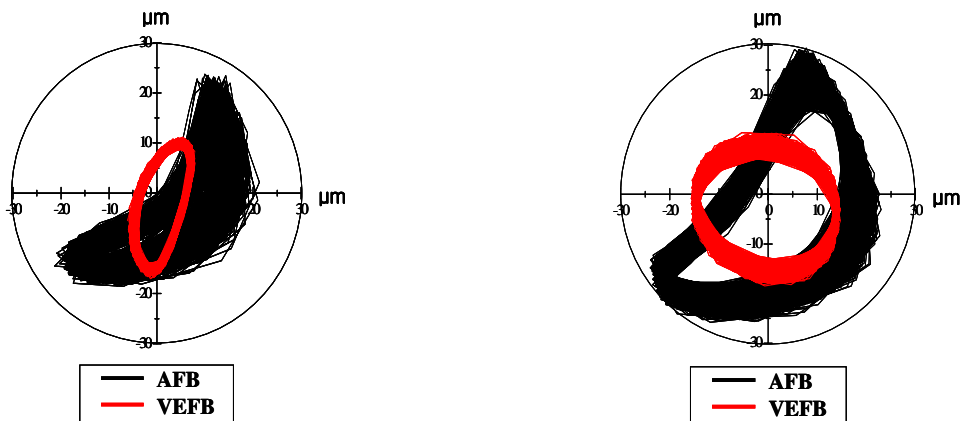
430,000 rpm 이상에서 안정적으로 구동을 하였다. 특히, 점탄성 공기 포일베어링으로 지지한 로터는 최고 480,000 rpm 이상으로 구동하였고 10분 이상의 시간동안 안정적으로 구동하였다. Fig. 8 은 이때의 Waterfall Diagram을 보여준다. 로터의 초기 구동 시 베어링에 동압이 형성 되면서 로터가 빠른 속도로 가속되었으며 이 과정에서 기존 공기 포일베어링을 적용한 로터에서는 공력불안정성에 의해 로터 불안정성이 나타났다. 이로 인해 Waterfall의 100Hz 미만에서 큰 비동기 주파수가 나타남을 알 수 있다. 반면에, 점탄성 공기 포일베어링을 적용한 로터에서는 어떠한 불안정성도 나타나지 않았다. 이를 통해 점탄성 포일 베어링의 추가적 감쇠 성분이 공력불안정성에 의한



(a) Waterfall with AFB

(b) Waterfall with VEFB

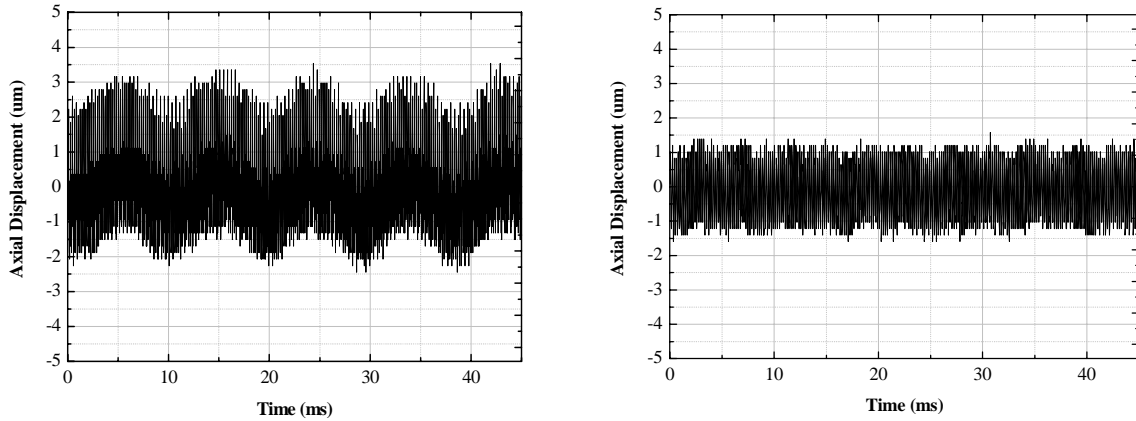
Fig. 8 Waterfall diagram with the air foil bearing and viscoelastic foil bearing



(a) Orbit at 310,000 rpm

(b) Orbit at 430,000 rpm

Fig. 9 Comparison of the vibration orbit between the air foil bearing and viscoelastic foil bearing



(a) Axial displacement with AFB

(b) Axial displacement with VEFB

**Fig. 10** Axial vibrations of the micro turbocharger at 310,000 rpm

진동 성분을 제진하였음을 알 수 있다. 베어링의 추가적 감쇠 성분은 동기 주파수의 진폭에도 영향을 주었음을 확인 할 수 있는데 기존 공기 포일베어링으로 지지한 로터에서는, 동기 주파수의 진폭이 대략 30  $\mu\text{m}$ 에 이르는데 비해 점탄성 공기 포일베어링으로 지지한 로터에서는 그 진폭이 대략 15  $\mu\text{m}$ 로 50%정도 진동 감쇠효과가 있었음을 확인할 수 있다.

점탄성 공기 포일베어링으로 지지되었을 때의 진동을 공기 포일베어링으로 지지되었을 때의 진동과 비교해서 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9(a)는 구동속도가 310,000 rpm일 때, Fig. 9(b)는 430,000 rpm일 때의 진동 궤적을 각각 나타내었다. 310,000 rpm의 경우, 공기 포일베어링으로 지지되었을 때의 로터의 진동 궤적 반경은 대략 20  $\mu\text{m}$ 임에 비해, 점탄성 공기 포일베어링으로 지지한 로터에서는 진동궤적의 반경이 대략 10  $\mu\text{m}$ 로 줄어들었음을 확인할 수 있다. 430,000 rpm에서 또한 공기 포일베어링으로 지지되었을 때의 로터의 진동궤적 반경은 대략 25  $\mu\text{m}$ 에서 점탄성 공기 포일베어링으로 지지한 로터에서는 15  $\mu\text{m}$ 로 감소했다. 로터의 속도가 증가할수록 진동 궤적의 크기 또한 증가하였는데, 이는 속도 증가에 따른 감쇠성분이 감소함에 따른 것이다.

Fig. 10은 공기 포일 슬러스트 베어링으로 지지되는 로터의 축 방향 진동과 점탄성 공기 포일스러스트 베어링으로 지지되는 로터의 축 방향 진

동을 나타내는 그래프이다. 이때, 로터는 양 쪽 경우 모두 310,000 rpm으로 회전하고 있다. 공기 포일 슬러스트 베어링으로 지지되는 로터의 경우는 축 방향 진동이 대략 4  $\mu\text{m}$  정도이며, 강한 비동기 주파수 성분이 있음을 알 수 있다. 이는 다음과 같이 축의 진동에 커다란 웨이브를 주며, 전체적인 축의 진동이 5  $\mu\text{m}$  이상으로 진동하게 만든다. 반면, 점탄성 포일 슬러스트 베어링으로 지지되는 로터의 경우, 비동기 주파수의 성분이 나타나지 않으며 로터의 진폭 또한 2  $\mu\text{m}$  정도로 공기 포일 슬러스트 베어링에 비해 약 두 배 정도의 진동 감쇠 효과가 있었다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 공기 포일베어링으로 지지되는 마이크로 가스터빈 엔진의 구동안정성 향상에 관한 연구를 수행 하였다. 공기 포일베어링은 고속 영역에서 낮은 감쇠로 인하여 안정성이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 이에 대한 해결책으로 탐 포일 뒤에 점탄성 물질을 코팅하여 포일베어링에 추가적 감쇠를 준 점탄성 공기 포일베어링을 설계 및 제작하여 기존 공기 포일베어링과의 구동 실험을 통해 성능을 비교하였다. 점탄성 공기 포일베어링과 기존 공기 포일베어링 각각에 대하여 구동실험을 한 결과, 점탄성 공기 포일 베어링의 증대된 감쇠 성능이 로터의 진동을 최대 50% 이

상 줄였고, 비선형에 기인한 진동 성분을 효과적으로 제진하였다.

상기한 결과에 의거하여 점탄성 공기 포일 베어링의 감쇠 성능은 기존 공기 포일 베어링보다 우수함을 알 수 있다. 이는 마이크로 터보차저의 구동 안정성을 향상 시켰으며 실제 고속 터보기기에 적용 시 효과적으로 작동할 수 있으리라 판단된다.

하지만 본 논문에서 적용한 점탄성 물질의 작동온도가 100℃ 미만인 점을 감안하면, 고온의 마이크로 가스터빈에 적용하기 위해서는 고온에서 사용 할 수 있는 새로운 점탄성 물질의 개발이 필요하다.

## 후 기

본 연구는 한국 과학 기술 연구원의 기관 고유 사업 “고속 회전기의 지능형 센서 및 액추에이터 기술 개발”, 에너지 관리 공단의 에너지 자원 기술 개발 사업 “초고속 모터 시스템 개발”, 산업자원부의 표준화 기술 개발 사업 “무급유 에어포일 베어링 및 터보 블로워 시험평가 기술 표준화” 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) Alan H. Epstein, 2004, "Millimeter-scale, Micro-Electro-Mechanical Systems Gas Turbine Engines," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 126. pp. 205~226.
- (2) Isomura, K. and Shuji Tanaka., 2002, "Component Development of Micromachined Gas Turbine Generators," *Power MEMS 2002 Technical Digest*, pp. 32~35.
- (3) Heshmat H, Shapiro W. and Gray S., 1982, "Development of Foil Journal Bearings for High Load Capacity and High Speed Whirl Stability," *Journal of Lubrication Technology*, Vol. 104, pp. 149~156.
- (4) Heshmat H., 1994, "Advancements in the Performance of Aerodynamic Foil Journal Bearings : High Speed and Load Capacity" *Journal of Tribology*, Vol. 116, pp. 287~295.
- (5) Yong-Bok Lee, Tae-Ho Kim, Chang-Ho Kim, Nam-Soo Lee and Dong-Hoon Choi, 2004, "Dynamic Characteristics of a Flexible Rotor System Supported by a Viscoelastic Foil Bearing," *Tribology International*, Vol. 37, pp. 679~687.
- (6) Keun Ryu, 2005, "A Study on the Rotordynamic Characteristics of the Micro Turbo Generator," *Master thesis*, Hanyang University, Seoul, Korea.
- (7) Kouske Isomura, Shuji Tanaka, Shinichi Togo, Hideki Kanebako, Motohide Murayama, Nobuyoshi Saji, Fumihito Sato, and Masayoshi Esashi, 2004, "Development of Micromachine Gas Turbine for Portable Power Generation," *JSME International Journal*, Series B, Vol. 47, No. 3, pp. 459~464.