

## 고속 터보기계용 공기 포일 저널 베어링의 신뢰성에 관한 연구

이용복\* · 김태호\* · 김창호\* · 이남수\*\*

### A Study on the Reliability of an Air Foil Journal Bearing for High Speed Turbomachinery

Yong-Bok Lee\*, Tae-Ho Kim\*, Chang-Ho Kim\*,  
Nam-Soo Lee\*\*

*Key Words: High Speed Turbomachinery(고속 터보기계), Air Foil Journal bearing(공기 포일 저널 베어링), Reliability(신뢰성), Load carrying capacity(하중지지능력), durability(내구성) Start-Stop Torque(시동-정지 토크), Bearing Temperature(베어링 온도)*

#### ABSTRACT

This paper describes a reliability characteristics of an air foil journal bearing for high speed turbomachinery at room temperature. To verify the reliability of air foil journal bearing, lift-off characteristics, load carrying capacity, and 10,000 cycle start-stop test were performed with motor driven test rig. Lift-off test shows the relationship between the rotating speed of the shaft and the frictional torque with bearing surface. About load carrying capacity, the tested air foil journal bearing produced a load capacity of 500N at an operating speed of 15,000rpm, which is compared with results of numerical analysis and empirical coefficients. Finally, The trends in change of start torque, stop torque, and bearing temperature were shown during 10,000 cycle start-stop test of an air foil journal bearing. From the results of this work, an air foil bearing will be done well, as a supported bearing for high speed turbo-compressor.

#### 1. 서론

최근 터보 기계류는 비출력 향상을 위하여 고속화, 경량화되어 가고 있는 추세이다. 특히 공기를 운환제로 사용하는 공기 포일 베어링은 다른 운환 시스템에 비하여 전단 마찰에 따른 에너지 소비가 적고 설치 초기 비용이 저렴하며 고속회전이 가능하다. 또한 설계

단순화로 인해 부가적인 중량이 적기 때문에 Boeing 747, 757 그리고 767, DC-10, F-15, F-16, 그리고 Falcon 2000과 같은 수많은 항공기의 공기 조절용 시스템(ACM: air cycle machine) 및 보조 동력 장치(APU: auxiliary power unit)의 베어링으로 사용되고 있다.<sup>(1,2)</sup>

그러나 포일 베어링의 이러한 장점에도 불구하고 하중지지 능력, 감쇠 능력, 고온 코팅과 해석기술의 한계로 인하여 1970년대에는 주로 항공분야 등의 저하중의 제한적 영역에서 사용되어져 왔으나<sup>(3)</sup>, 하중지지 능력 및 감쇠 능력의 향상과 해석 기술의 발전으로 인하여

\* 한국과학기술연구원 트라이볼로지 연구센터

\*\* 한양대학교 기계설계공학과  
E-mail : taeho21c@kist.re.kr

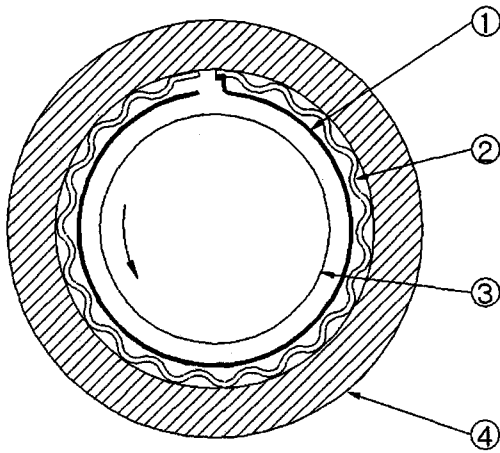


Fig. 1. An air-lubricated bump foil journal bearings

- ① top foil    ② bump foil
- ③ journal    ④ bearing sleeve

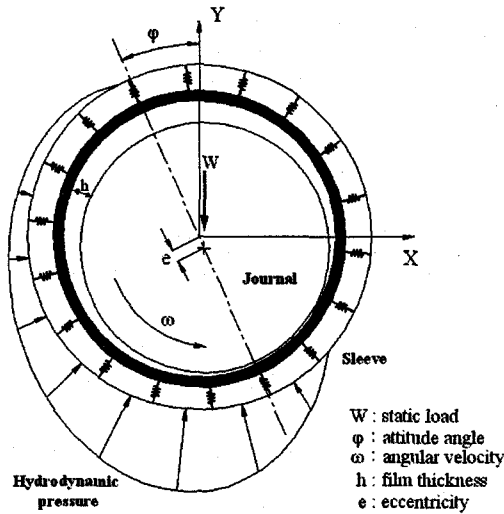


Fig. 2. Hydrodynamic pressure in a bump foil journal bearing

적용 분야가 점점 더 넓어지고 있다.

일반적으로 공기 포일 베어링은 그 형태에 따라 다엽형상의 포일 베어링 및 보강 강성재를 갖는 범프포일 베어링으로 대별된다. 특히 범프포일 베어링은 제 1세대적인 다엽포일 베어링에 비하여 하중지지력이 뛰어나 최근 많은 터보 동력기의 지지 베어링으로 활용되고 있다.<sup>(4)</sup> 이러한 범프포일 베어링은 초기 구동 시와 정지 시의 저속에서는 공기 윤활막이 형성되지 않

으므로 회전축과 포일의 잦은 접촉에 따른 마멸 현상 (rub)은 포일 표면을 상하게 하여 수명을 단축시킬 우려가 있다. 따라서 일반적으로 포일 표면을 고체윤활 코팅함으로써 그 문제를 해결할 수 있으며 최근에는 코팅기술의 발달로 인해 공기 포일 베어링은 저온뿐 아니라 700℃의 고온에서도 내구성을 갖게 되었다.<sup>(5)</sup> 그리고 Higgs, III 등은 고속회전 베어링의 내구성을 향상시키기 위한 고체윤활제에 대한 연구를 수행하여 이황화몰리브덴(MoS<sub>2</sub>)의 적합성을 언급하였다.<sup>(6)</sup> 또한 국내에서는 다엽포일 베어링과 범프포일 베어링의 부상특성에 대한 이론적 해석과 실험을 통해서, 회전축과 포일의 접촉 시간을 감소시킴으로써 신뢰성을 향상시키기 위한 연구가 수행된 바 있다.<sup>(7,8,9)</sup>

최근 공기 포일 베어링을 산업용 터보 압축기에 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>(10,11)</sup> 공기 포일 베어링으로 지지되는 터보압축기는 별도의 윤활 장치가 필요없어 청결한 공기를 공급할 수 있을 뿐 아니라 공기윤활을 통해 동력손실을 저하시키는 장점을 갖는다. 그러나 공기 포일 베어링으로 지지되는 터보 압축기의 설계를 위해서는 로터-베어링 시스템의 신뢰성 향상을 통한 내구성 확보와 공력 요소의 안정성에 대한 연구가 상호 연성작용을 고려하여 수행되어야 한다. 또한 고하중의 회전축을 지지하기 위해 충분한 하중지지 능력의 검증이 이루어져야 한다. 신뢰성이 검증되는 얇은 고속 터보기계에서 발생하게 되는 베어링의 성능 감소와 그로 인한 파손은 회전체 시스템 전체의 불안정성을 유발하며 추후 막대한 유지 보수 비용의 초래하게 된다.

따라서 본 논문에서는 공기 포일 베어링의 신뢰성을 검증하기 위하여 포일 베어링의 하중지지능력 실험을 통해 실험적 결과를 수치해석 및 실험계수 결과와 비교하였으며, 로터의 회전속도에 따른 토크의 관찰을 통한 공기 포일 베어링의 부상특성 규명과 시동 및 정지 횟수에 따른 시동 토크, 정지 토크 및 온도의 변화를 고찰하였다.

## 2. 공기 포일 저널 베어링

포일 저널 베어링의 개략도를 Fig.1(a)에 나타내었다. 베어링의 내면은 상부표면을 고체윤활 코팅한 탑포일 (top foil, ①)과 범프포일(bump foil, ②)로 이루어져 높은 하중지지 능력을 얻을 수 있으며 탑포일과 범프포일 간의 접촉 마찰에 의해 감쇠력을 향상시킨다.<sup>(13)</sup> 범

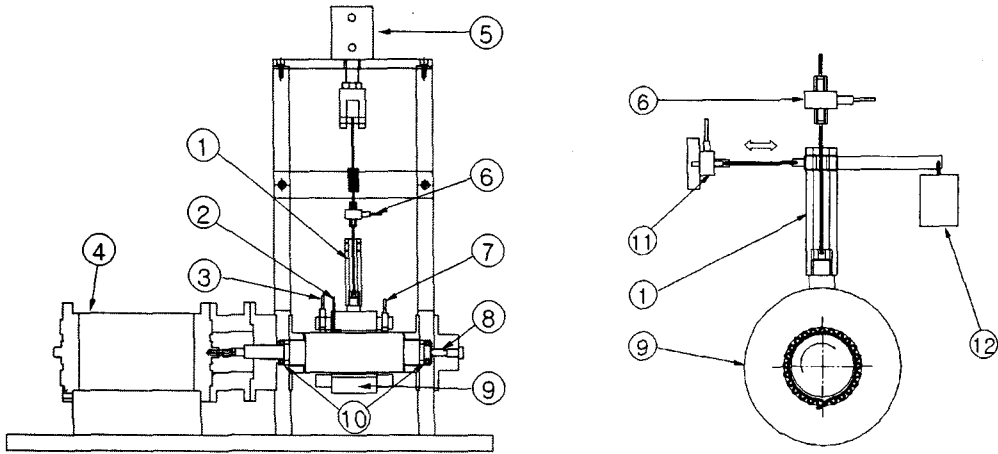


Fig. 3. Foil journal bearing test apparatus

① torque rod ② thermocouple wire ③ displacement sensor ④ motor ⑤ air cylinder ⑥ load cell ⑦ speed sensor ⑧ thrust button ⑨ test foil bearing sleeve ⑩ mounted ball support bearings ⑪ torque transducer load cell ⑫ counter weight

포일 베어링의 동압 형성의 원리를 Fig. 2에 나타내었다. 포일은 회전축과의 틈새에서 동압 공기를 형성하여 회전축을 부상시키는데 이 때 탑포일은 컴플라이언스(compliance)의 존재로 변형되는 범프포일에 의해 지지력을 얻는다. 범프포일이 스프링처럼 작용하여 회전축을 지지하기 때문에 그 회전축을 둘러싼 탑포일은 일반적인 공기 베어링보다 넓은 범위에 걸쳐 극소 윤활 틈새를 유지할 수 있게 되고 이에 따라 높은 하중 지지 능력과 안정성을 발휘하게 된다.

## 2. 실험

### 2.1 실험 장치 및 시험편

Fig. 3은 범프포일 저널 베어링의 실험장치를 나타내었다. 실험장치는 30kW의 유도전동 모터(④)로 구동되며 공압 실린더(⑤)에 의하여 시험 베어링에 하중을 부하할 수 있다. 회전축은 양단의 볼베어링(⑩)에 의해서 지지되며 중앙에 52N의 자중을 갖는 시험 베어링 슬리브(⑨)를 장착하여 범프포일을 삽입하였다. 토크를 측정하기 위해 토크 암(①)을, 베어링의 온도를 측정하기 위하여 범프포일의 뒷면에 온도센서(②)를, 회전축의 속도를 측정하기 위해 베어링 슬리브 끝단에 속도센서(⑦)를 각각 부착하였다. 회전축에 대한 베어링 슬

리브의 진동은 서로 수직으로 장착된 2개의 변위센서(③)에 의해 측정된다. 유도전동 모터는 최대 60,000rpm의 고속회전이 가능하며 A/D 컨트롤을 하여 일정한 회전속도로 반복 구동이 가능하게 하였다. 축의 직경은 60mm로서 최대 DN value 값이 3,000,000이상이 유지되도록 하였다.

실험에 사용된 범프포일 저널 베어링의 시험편을 Fig. 4에, 시험편의 사양을 Table 1에 나타내었다. 포일의 재질은 상온에서 사용이 가능한 스테인리스 강판으로서 탑포일과 범프포일은 모두 0.1mm의 두께를 갖는다. 탑포일은 상하부면에 구리도금을 한 후 상부면은 초기

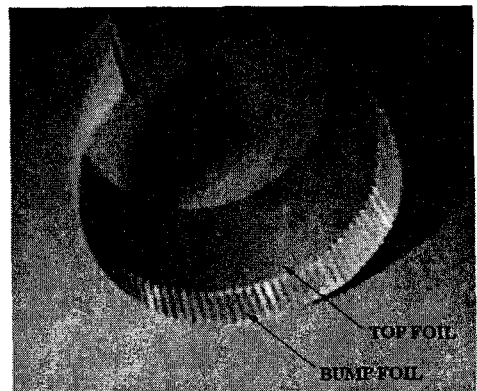


Fig. 4. Details of bump foil journal bearing

Table 1. Specification of bearing

Bearing Data	
Radius of shaft	30.00 mm
Radius of sleeve	30.70 mm
Thickness of top foil	0.10 mm
Thickness of bump foil	0.10 mm
Height of bump foil	0.45 mm
Width of foils	60.00 mm
Material of foils	SUS301
Weight of bearing sleeve	52 N

토크의 감소와 내구성 향상을 위하여 이황화몰리브덴 (MoS<sub>2</sub>) 고체윤활 코팅을 하였다. 범프포일은 구리도금을 하여 탑포일과 베어링 슬리브 표면과의 접촉 마찰력 상승을 도모하였다.

### 2.2 실험 방법

본 논문에서는 포일 베어링의 신뢰성에 대한 연구로서 먼저 하중지지능력 실험을 수행하였다. 공기 포일 베어링에 부가되는 하중은 공압 실린더에 의해 부가되며 와이어에 연결된 로드 셀(load cell)로부터 부하 하중량의 측정이 가능하다. 하중지지능력은 회전축이 포일 베어링 표면과 접촉을 일으키지 않고 안정적으로 회전하는 최대 부하하중을 측정하였으며 실험결과를 수치해석 및 실험계수 결과와 비교하였다. 아울러, 10,000rpm의 회전속도로 10,000회 반복 구동 실험을 수행하여 본 실험에 사용된 공기 포일 베어링의 내구성을 확인하고자 하였다. 결과 분석을 위해서 반복 횟수에 따른 베어링의 온도 변화, 시동토크, 정지토크 및 10,000rpm에서 정지 시까지의 토크의 변화를 측정하였다.

실험은 약 7일 동안 연속적으로 진행되었으며 시스템의 파손으로 인한 사고에 대비하여 KIST에서 자체 개발한 소프트웨어를 사용하여 회전축의 진동을 24시간 모니터링 하였다. 실험 기간동안의 작동 조건을 일정하게 하기 위하여 실험실의 온도를 20℃로 유지하였으며 구동 모터의 과열을 방지하기 위하여 냉각수를 이용하여 모터를 냉각하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 하중지지 능력 실험

공기 포일 베어링의 하중지지 능력은 베어링에 임의의 하중이 가해졌을 때 동압 공기 윤활막에 의한 회전축의 부상유지 능력을 나타낸다. 따라서 하중지지능력이 높을수록 더 낮은 회전속도에서 부상이 가능하게 되어 회전축과 베어링 표면의 접촉시간을 단축시켜 신뢰성을 향상시킬 수 있다.

하중지지능력을 측정하기 위해서 회전축을 각각 5,000rpm, 10,000rpm, 15,000rpm의 속도로 회전시킨 후 베어링에 서서히 정하중을 가하였으며 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 범프 포일 베어링은 최대 15,000rpm에서 약 500N의 하중지지능력을 발휘하였으며 5,000rpm에서부터 15,000rpm까지의 시험 회전속도 범위에서 선형적인 하중지지능력의 증가를 나타내었다. 한편 실험계수 결과는 포일 베어링의 가진실험을 통하여 포일 베어링의 강성을 추출한 후 이 값을 포일 베어링의 공기윤활해석에 적용하여 하중지지능력을 측정한 결과이다. 실험계수 결과와 수치해석 결과는 수치해석기의 오차로 인한 제약으로 인하여 1μm의 윤활 두께에서의 하중지지능력을 측정하였으며 15,000rpm에서 모두 약 380N의 값을 나타내어 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 실험 결과와는 비교적 큰 차이를 보이며, 특히 15,000rpm에서는 실험결과가 수치해석의 결과보다 30% 더 큰 값을 나타냄을 알 수 있다. 이는 수치해석과 실험계수의 결과가 실험에서와는 달리 회전축과 포일 베어링의 완전한 접촉을 허용하지 않았기 때문에 발생한 것으로 사료된다.

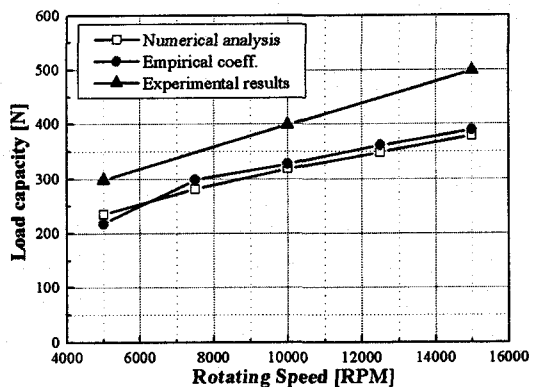


Fig. 5. Foil journal bearing load carrying capacity

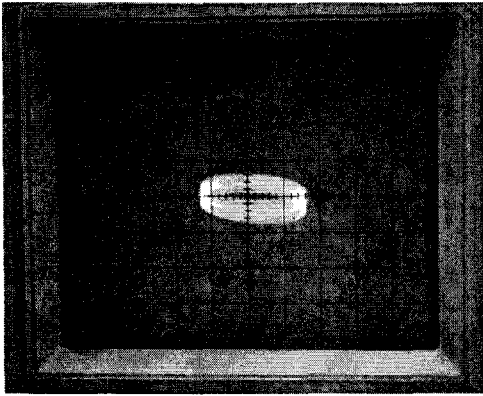


Fig. 6. Orbit measured by oscilloscope

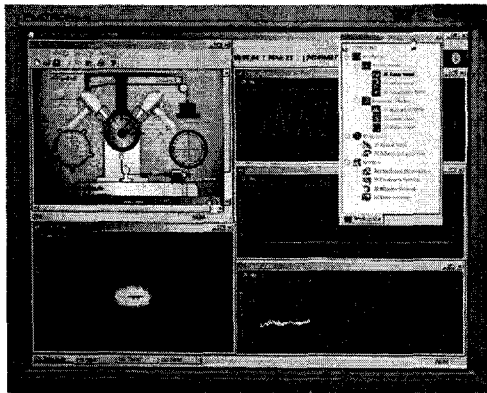


Fig. 7. Air foil bearing monitoring software

### 3.2 10,000회 시동 및 정지 반복 실험

포일 베어링의 내구성 확인을 위해 52N의 자중을 갖는 포일 베어링을 10,000rpm의 회전속도로 10,000회 부상실험 하였으며, 베어링의 시동 토크, 정지 토크, 온도 및 정지 회전수(touch down speed) 등을 관찰하여 내구성 특성을 고찰하였다. 포일 베어링의 부상 주기는 1분으로, 회전축은 2초의 가속구간, 23초의 등속구간, 그리고 5초의 감속구간을 가지고 운전되며, 1회 부상실험이 완료된 뒤 30초 동안 정지 후 다시 반복 구동된다. 실험 시간의 단축을 위하여 회전축은 모터의 감속장치를 이용하여 강제 감속시켰다.

Fig. 6과 Fig. 7은 회전축이 완전히 부상한 후 오실로스코프(oscilloscope)에 의해 측정된 포일 베어링의 진동 궤적(orbit)과 KIST에서 자체 개발한 포일 베어링 모니터링 시스템의 스크린 뷰(screen view)를 보여

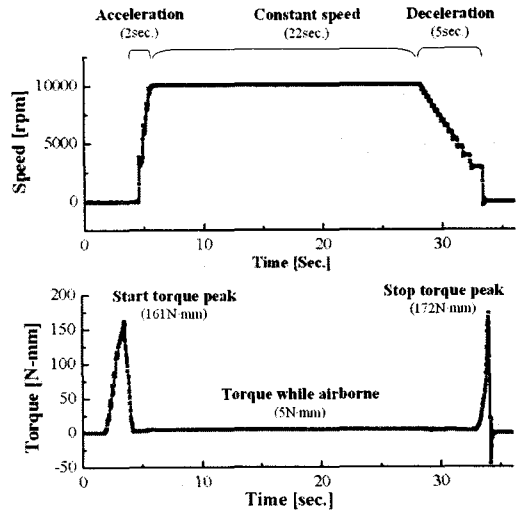
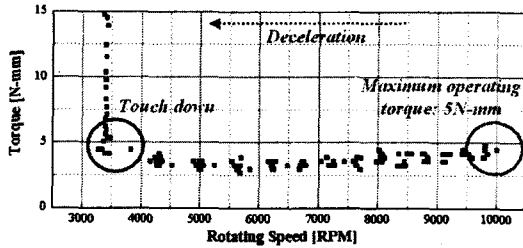


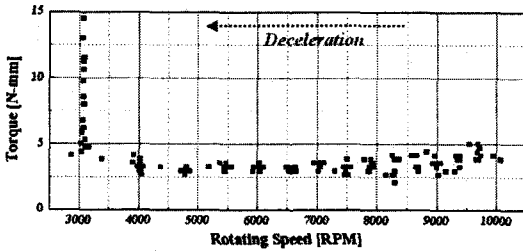
Fig. 8. Bearing torque and journal speed versus time for one start/stop cycle at 52N static load

준다. Fig. 7의 왼쪽 하단에 나타난 진동궤적은 Fig. 6과 거의 일치하는 것을 알 수 있다. Fig. 8은 10,000회 부상 시에서의 측정시간에 따른 회전속도와 토크의 결과를 보여준다. 회전토크는 회전축의 시동 시 약 161 N·mm의 최고 값을 나타내었다가 회전속도가 증가함에 따라 급속히 감소되었으며 회전축의 정지 시 회전토크는 다시 증가하여 약 172N·mm의 값을 나타내었다. 한편, 회전축이 10,000rpm의 등속으로 운전되는 동안에는 5N·mm의 일정한 값을 나타내었는데 이 값은 시동 토크와 정지토크의 약 3%에 해당하는 작은 값이다. 이러한 결과는 공기 포일 베어링에 있어서 고속의 운전 시에 발생하는 동력 손실이 시동 및 정지 시에 비하여 매우 작음을 의미하며, 또한 마찰 토크에 의한 내구성 저하에 있어서도 같은 결과를 가져올 것을 예측할 수 있다.

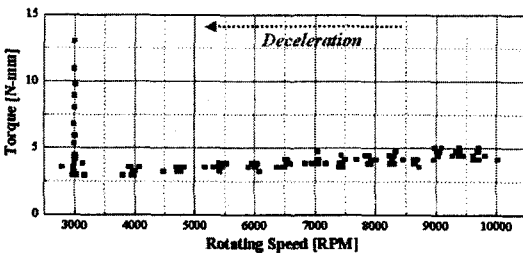
Fig. 9는 회전축이 10,000rpm의 운전속도에서 감속되어 정지할 때까지의 회전속도에 따른 토크의 변화를 나타낸다. 구동 횟수에 따른 변화를 관찰하기 위해서 100회, 2,000회, 5,000회, 그리고 10,000회의 부상 실험에서의 결과를 나타내었다. 등속 운전속도인 10,000rpm에서의 토크는 약 5N·mm로 구동 횟수에 상관없이 일정한 값을 유지함을 알 수 있다. 그러나, 100회에서의 토크는 회전속도의 감소에 따라 서서히 감소하다가 약 5,500rpm에서부터는 다시 증가하여 약 3,400rpm에 이르러서는 급격한 증가를 보인다. 한편 2,000회에서도 100회에서의와 동일한 경향을 가지며, 약 5,000rpm에서부



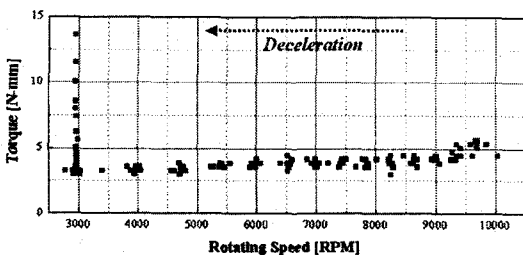
(a) 100 cycles



(c) 2,000 cycles



(d) 5,000 cycles



(e) 10,000 cycles

Fig. 9. Bearing torque versus journal speed during deceleration under 52N static load

터 토크가 다시 증가하기 시작하여 약 3,100rpm에 이르러서 급격한 토크의 증가를 보인다. 반면에 5,000회와 10,000회에서는 10,000rpm의 등속 회전속도에서부터 회전속도가 감소함에 따라 선형적인 토크의 감소를 보이며 약 3,000rpm에서 토크의 최소값을 가진 후 급격히 증가하는데 이러한 결과는 DellaCorte<sup>(9)</sup>에 의해 이미

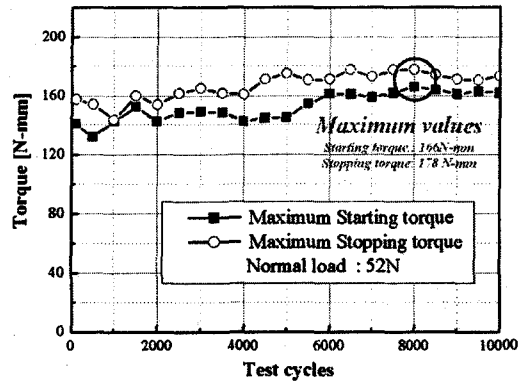


Fig. 10. Bearing torque versus journal speed during deceleration under 52N static load

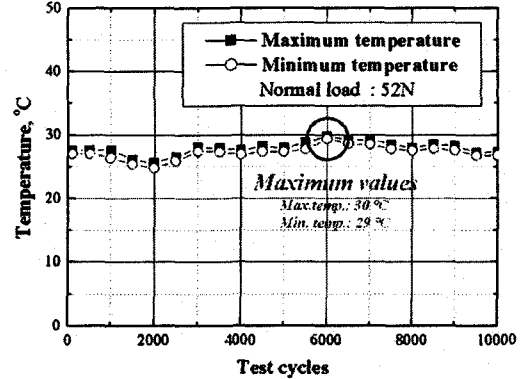


Fig. 11. Bearing temperature versus journal speed during deceleration under 52N static load

증명된 바 있다. 공기 포일 베어링은 회전속도가 감소함에 따라 토크가 감소되다가 임의의 회전속도에서 다시 증가하게 되는데, 이는 축의 회전속도의 감소에 따라 윤활 틈새에 형성된 공기압이 작아져 하중지지 능력이 적어지기 때문에 회전속도가 감소함에 따라 공기윤활막은 얇아지며 결국 접촉이 발생하여 정지(touch down)하게 되기 때문이다. 따라서 약 3,000rpm 근방에서 급격히 증가하는 정지토크는 축과 포일의 마찰력에서 기인한 것임을 알 수 있다. 5,000회와 10,000회에서는 접촉이 발생하기 전까지의 회전토크는 동압 공기와 축 사이에서의 순수 공기 마찰 토크로 회전속도의 감소에 따라 선형적으로 저하됨을 보인다. 한편, 100회와, 2,000회에서 베어링과 회전축의 접촉이 비교적 높은 회전속도에서 발생한 것은 탐포일 상부에 형성된 고체 윤활 코팅막이 포일표면에 완전히 고정되지 않았기 때문에 발생한 결과로 사료된다.

Fig. 10은 10,000회의 부상실험 동안의 최대 시동 토

크와 정지토크의 변화를 나타낸다. 시동토크와 정지토크는 100회에서 각각 141N·mm와 157N·mm를 나타내었으며 8,000회에 이르러서는 각각 166N·mm와 178N·mm로 최대값을 나타내었다. 이는 초기 100회의 값에 비해서 각각 약 18%와 13% 증가하였음을 알 수 있다. 그러나 이들은 완만한 감소의 경향을 보이며 10,000rpm에서는 각각 162N·mm와 173N·mm의 값을 나타내었다. Fig. 11은 10,000회의 부상실험 동안의 베어링의 최대 온도와 최소온도를 나타낸다. 베어링의 최대온도는 100회에서 약 28℃를 나타내었으며 6,000회에서는 30℃로 최대값을 나타내었다. 이는 초기 100회의 값에 비해서 약 7% 증가한 값이다. 이후 베어링의 최대 온도는 서서히 감소하여 10,000회에서는 최초 28℃보다 적은 27℃를 유지하였다. 이러한 결과는 공기 포일 베어링의 10,000회 내구성 시험에서 최대 시동 토크와 정지 토크 그리고 베어링의 온도는 모두 20%이내에서 그 값을 유지하였으며, 특히 회전속도에 따른 회전토크의 변화가 동일한 경향을 유지하며 10,000rpm에서 5N·mm로 일정하게 유지됨으로써 실험된 공기 포일 베어링의 10,000회의 반복 구동 내구성을 보여준다.

#### 4. 결론

공기 포일 베어링의 신뢰성을 연구하기 위해서 하중지지 능력 시험과 10,000회 반복 부상 시험을 하였으며 이러한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

- i) 범프포일 베어링은 최대 15,000 rpm에서 약 500N의 하중지지 능력을 발휘하였으며 5,000 rpm에서부터 15,000 rpm까지의 시험 회전속도 범위에서 선형적인 하중지지 능력의 증가를 나타내었다.
- ii) 10,000회 부상시험에서의 시동 및 정지 시 각각 약 161N·mm와 172N·mm의 회전토크를 나타내었으며 부상 후 10,000rpm으로 운전 시에는 약 5N·mm의 값을 보였다. 이 값은 시동 및 정지 토크의 약 3%에 해당되는 값으로서 접촉마찰에 기인한 토크가 지배적임을 알 수 있다.
- iii) 10,000회 시동 및 정지의 반복 실험에서 52N의 자중을 받는 포일 베어링은 회전속도의 감소에 따라 선형적인 회전토크의 감소를 나타내었으며 약 3,000rpm전후에서는 하중지지 능력의 저하로 인하여 접촉이 발생하며 정지(touch down)하며 급격한 토크의

증가를 나타내었다.

iv) 10,000회의 반복 부상실험동안 공기 포일 베어링의 시동 및 정지 토크 그리고 베어링의 온도는 뚜렷한 증가를 보이지 않고 20% 이내의 변동량을 유지하였으며, 10,000rpm의 운전속도에서 회전토크가 5N·mm로 일정하게 유지됨으로서 이를 통해 10,000회 구동의 내구성을 확인할 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부가 지원하는 특정연구개발사업 중 중점국가연구개발사업(기계설비요소기술개발)으로 지원되어 수행하였습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Heshmat, C. A. and Heshmat, H., 1995, "An Analysis of Gas-Lubricated, Multileaf Foil Journal Bearings with Backing Springs", ASME, Journal of Tribology, Vol. 117, pp. 437~443
- (2) Heshmat, H., 1994, "Advancements in the Performance of Aerodynamic Foil Journal Bearings : High Speed and Load Capability," ASME, Journal of Tribology, Vol. 116, pp. 287~295
- (3) Heshmat, H., 1991, "A Feasibility Study on the Use of Foil Bearings in Cryogenic Turbopumps," AIAA-91-2103-CP.
- (4) 이용복, 김창호, 2001, "포일 베어링에 대한 기술 개발 현황 및 응용에 대한 재 조명", 한국소음진동 공학회 소특집, Vol. 11, No 5, pp. 582~591
- (5) Dellacorte C., 1997, "A New Foil Air Bearing Test Rig for Use to 700℃ and 70,000rpm", NASA TM-107405
- (6) Fred Higgs, C. III, Heshmat, C. A. and Heshmat, H., 1999, "Comparative Evaluation of MoS<sub>2</sub> and WS<sub>2</sub> as Powder Lubricants in High Speed, Multi-Pad Journal Bearings", ASME, Journal of Tribology, Vol. 121, pp. 625~630
- (7) 이용복, 김태호, 김창호, 이남수, 장건희, 2001, "공기윤활 다엽포일 저어닐 베어링의 회전축 부상 특성에 관한 연구", 윤활학회지 Vol. 17, No 4, pp.

- (8) 이용복, 이남수, 최동훈, 김창호, 2001, “공기운활 범프 저어널 베어링의 부상 특성에 관한 연구”, 윤활학회지 Vol. 17, No 6, pp. 441~446
- (9) 이용복, 김태호, 김창호, 이남수, 장건희, 2002, “공기운활 범프포일 저어널 베어링의 내구성 특성에 관한 연구”, 윤활학회지 Vol. 18, No 2, pp. 153~159
- (10) 이용복, 이남수, 김태호, 김창호, 최동훈, 2002, “이단 압축기의 동력학적 설계 및 운전 특성에 관한 연구”, 유체기계저널, Vol. 1, No 5, pp. 153~159,
- (11) 이용복, 김종립, 최동훈, 김광호, 김창호, 2001, “이단 압축기의 임펠러 및 시스템에 대한 최적 설계”, 2001, 유체기계 연구개발 발표회논문집 pp. 129~134
- (12) Roger Ku, C. -P. and Heshmat, H., 1992, “Compliant Foil Bearing Structural Stiffness Analysis: Part I -Theoretical Model Including Strip and Variable Bump Foil Geometry,” ASME, Journal of Tribology, Vol. 114, pp. 394~400