

공기윤활 범프포일 저널 베어링의 내구성 특성에 관한 연구

김태호, 이용복, 김창호, 이남수*, 장건희**

한국과학기술연구원 트라이볼로지 연구센터
*한양대학교 대학원 기계설계학과
**한양대학교 공과대학 정밀기계공학과

A Study on the Durability Characteristics of an Air-lubricated Bump Foil Journal Bearing

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

Tribology Research Center, KIST

* Department of Mechanical & Design Engineering, Hanyang University

** Department of Precision Mechanical Engineering, Hanyang University

Abstract - This paper describes a durability characteristics of an air-lubricated bump foil journal bearing for high speed turbomachinerys at room temperature. At first, lift-off test and load capacity test were performed to understand the general characteristics of an air-lubricated bump foil journal bearing. A 52N weighted bump foil bearing sleeve was lifted off from a rotating journal at about 3,000rpm, and produced a load capacity of 500N at an operating speed of 15,000rpm. The next was 500 cycles lift-off test with an air-lubricated bump foil journal bearing that had a molybdenum disulfide(MoS₂) solid lubricant coated top foil. Data from measuring bearing torque and temperature and the observation of rubbing surface were included in results. Therefore the results of this work will aid in proving durability of air-lubricated bump foil journal bearings.

Key words — An air-lubricated bump foil journal bearing, Durability characteristics, Lift-off, Load capacity, Molybdenum disulfide(MoS₂)

1. 서 론

최근 터보 기계류는 비출력 향상을 위하여 고속화, 경량화되어 가고 있는 추세이다. 특히 공기를 윤활제로 사용하는 공기 포일 베어링은 다른 윤활 시스템에 비하여 전단 마찰에 따른 에너지 소비가 적고 설치 초기 비용이 저렴하며 부가적인 중량 또한 적다. 또한 고속 회전이 가능하기 때문에 항공기 등의 공기 조절용 시스템(ACM: air cycle machine)의 베어링, 보조 동력 장치(APU:

auxiliary power unit)의 베어링 그리고 극저온 터보 압축기의 지지 베어링으로 폭넓게 사용되고 있다.[1,2,3]

일반적으로 공기 포일 베어링은 그 형태에 따라 다엽형상의 포일 베어링 및 보강 강성재를 갖는 범프포일 베어링으로 대별된다. 특히 범프포일 베어링은 제 1세대격인 다엽포일 베어링에 비하여 하중지지력이 뛰어나 최근 많은 터보 동력기의 지지 베어링으로 활용되고 있다.[4]

범프포일 저널 베어링의 개략도를 Fig.

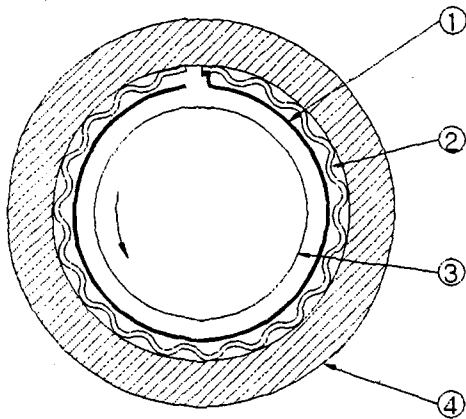


Fig. 1. An air-lubricated bump foil journal bearings

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

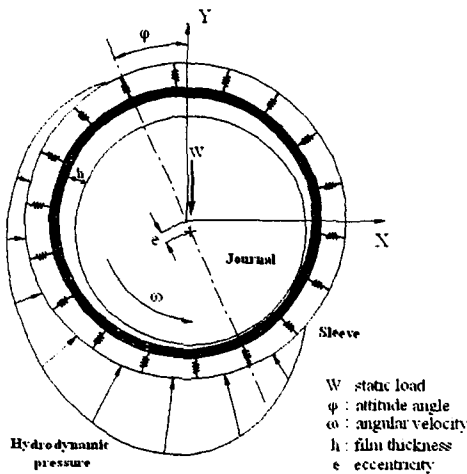


Fig. 2. Hydrodynamic pressure in a bump foil journal bearing

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.[5] 범프포일 베어링의 동압 형성의 원리를 Fig. 2에 나타내었다. 포일은 회전축과의 틈새에서 동압 공기를 형성하여 회전축을 부상시키는데 이 때 탑포일은 컴플라이언

스(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 있게되고 이에 따라 높은 하중지지 능력을 발휘하게 된다.

이러한 범프포일 베어링은 초기 구동 시와 정지 시의 저속에서는 공기 윤활막이 형성되지 않으므로 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°C의 고온에서도 내구성을 갖게 되었다.[6] 그리고 Higgs, III 등은 고속 회전 베어링의 내구성을 향상시키기 위한 고체윤활제에 대한 연구를 수행하여 이황화몰리브덴(MoS₂)의 적합성을 언급하였다.[7] 또한 국내에서는 다엽포일 베어링과 범프포일 베어링의 부상특성에 대한 이론적 해석을 통해, 회전축과 포일의 접촉 시간을 감소시킴으로써 내구성을 향상시키기 위한 연구가 수행된 바 있다.[8,9]

고속 터보 기계에 탑재되는 베어링의 내구성은 윤활 시스템의 신뢰성과 밀접한 관련을 가진다. 따라서 미리 예측되지 못한 베어링의 성능 감소나 파손은 회전체 시스템 전체의 불안정성을 유발하며 추후 막대한 유지보수의 비용을 초래하게 된다. 특히 공기 포일 베어링의 부상특성은 전체 회전체 동역학 해석뿐만 아니라 내구성에 중대한 영향을 끼치기 때문에 실험을 통해서 정확한 부상특성을 규명할 필요가 있다.

따라서 본 논문은 범프포일 베어링의 내구성에 관련한 부상특성에 대한 실험을 수행하였으며, 하중지지 실험을 통해 그 성능을 확인하였다. 그리고 내구성 확인을 위해 500회의 시동 및 정지 실험을 통하여 모재와 코팅재의 내구성 및 그에 따른 부상 특성을 연구

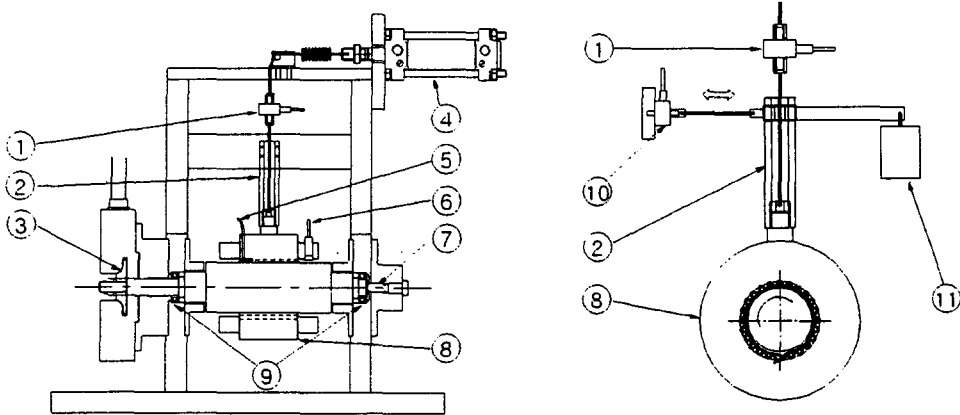


Fig. 3. Bump foil journal bearing test apparatus

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

하였다.

2. 범프포일 베어링의 내구성 실험

2.1 실험 장치

Fig. 3은 범프포일 저널 베어링의 실험장치를 나타내었다. 실험장치는 공기 터빈(③)으로 구동되며 공압 실린더(④)에 의하여 시험 베어링에 하중을 부하할 수 있다. 회전축은 양단의 볼베어링(⑨)에 의해서 지지되며 중앙에 52N의 자중을 갖는 시험 베어링 슬리브(⑧)를 장착하여 범프포일을 삽입하였다. 토크를 측정하기 위해 토크 암(②)을, 베어링의 온도를 측정하기 위하여 범프포일의 뒷면

에 온도센서(⑤)를, 회전축의 속도를 측정하기 위해 베어링 슬리브 끝단에 속도센서(⑥)를 각각 부착하였다. 공기 터빈은 최대 65,000rpm까지 구동이 가능하며 축의 직경은 60mm로서 최대 DN value 값이 3,000,000이상 유지되도록 하였다. 실험 장치는 A/D 컨트롤을 하여 일정한 회전속도로 반복 구동이 가능하게 하였다.

2.2 포일 베어링의 시험편 제작

실험에 사용된 범프포일 저널 베어링의 시험편을 Fig. 4에, 시험편의 사양을 Table 1에 나타내었다. 포일의 재질은 상온에서 사용이 가능한 스테인리스 강판으로서, 탑포일은 상

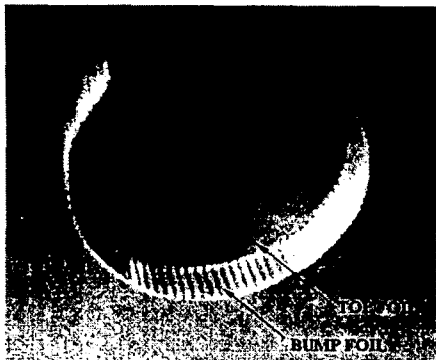


Fig. 4. Details of bump foil journal bearing

Table 1. Specification of bearing

Bearing Data	
Radius of shaft	30.000 mm
Radius of sleeve	30.700 mm
Thickness of top foil	0.100 mm
Thickness of bump foil	0.076 mm.
Height of bump foil	0.450 mm
Width of foils	60.000 mm
Material of foils	SUS301
Weight of bearing sleeve	52 N

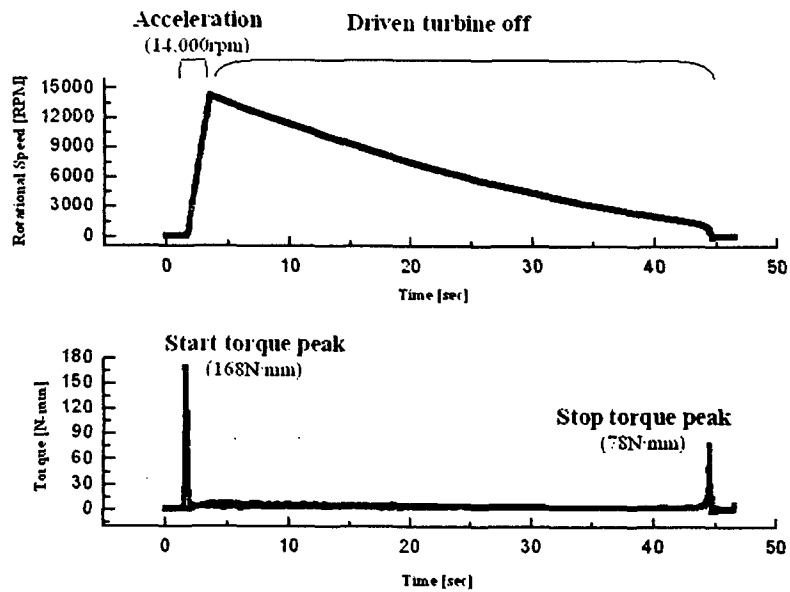


Fig. 5. Bearing torque and journal speed versus time for one start/stop cycle at 52 N static load

하부면에 구리도금을 한 후 상부면은 초기 토크의 감소와 내구성 향상을 위하여 이황화 몰리브덴(MoS₂) 고체윤활 코팅을 하였다. 범프포일은 구리도금을 하여 탑포일과의 접촉 마찰력 상승을 도모하였다.

2.3 포일 베어링의 내구성 실험 방법

포일 베어링의 수명은 신뢰성 및 내구성과 관련하여 시동 시와 정지 시 피할 수 없는

마찰 혹은 마멸 현상에 기인한 고체윤활막의 파단 및 그 정도에 따른 시험이 중요하다. 본 논문에서는 범프포일 베어링의 내구성과 관련하여 부상 특성을 고찰하기 위한 실험을 하였으며, 추가적으로 하중지지 능력을 확인하였다. 먼저 내구성 확인을 위해 500회의 시동 및 정지 실험을 하여 베어링의 회전 토크와, 축과 포일이 미끄럼 접촉에 의한 현상을 일으키는 순간의 온도를 측정하였다. 이

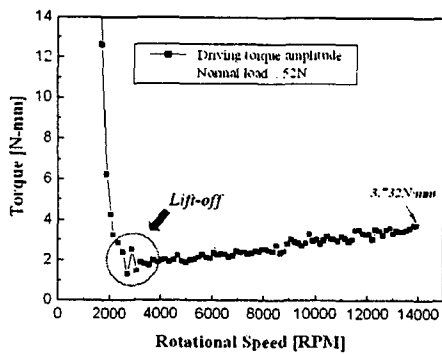


Fig. 6. Bump foil journal bearing torque

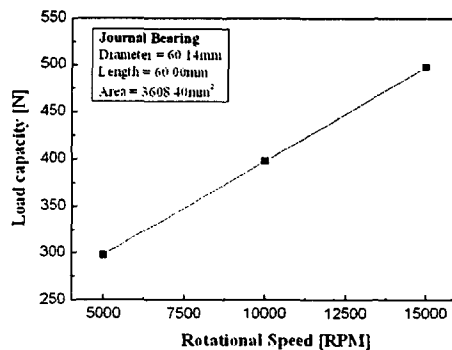


Fig. 7. Bump foil journal bearing load capacity

러한 모든 실험은 상온에서 수행되었다. 실험한 베어링의 시편은 실험장치로부터 분리하여 교체윤활 코팅 표면의 CCD (Charge Coupled Device) image, Line profile 및 EDS(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)를 통하여 분석하였다.

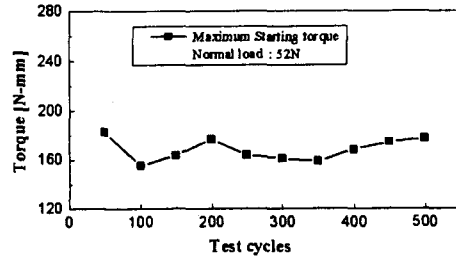
3. 실험결과 및 고찰

3.1 부상특성 실험

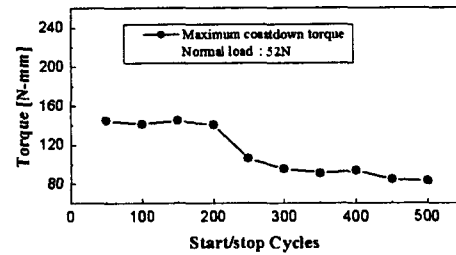
부상 시험을 위해 회전속을 14,000rpm까지 상승시켰다가 자유정지 시켰으며, 52N의 자중을 갖는 베어링의 상부에는 토크 암을 설치하여 회전토크를 측정하였다.

측정시간에 따른 회전속도와 토크의 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 회전토크는 회전축의 시동 시 약 168N·mm의 피크 값을 나타내었다가 회전속도가 증가함에 따라 급속히 감소되었다. 또한 회전축의 정지 시 회전토크는 다시 증가하여 약 78N·mm의 값을 나타내었다. Fig. 6은 회전속도에 따른 토크의 변화를 나타낸다. 시동 후 회전토크는 급속히 감소하다가 약 3,000rpm에 이르러 점차 증가하여 14,000rpm에서는 약 4N·mm를 나타내었다. 이 값은 시동토크의 약 2%, 정지토크의 약 5%에 해당되는 값으로 시동 시 혹은 정지 시의 최대 마찰 토크에 비하여 매우 작다.

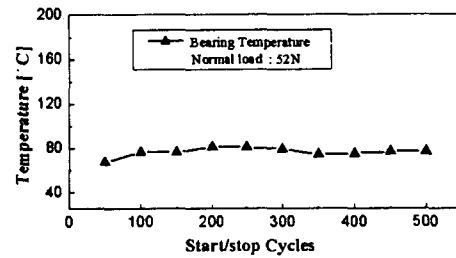
공기 포일 베어링은 시동 시 축과 포일의 접촉하여 있으므로 시동토크는 축과 포일의 마찰력에서 기인한 것임을 알 수 있다. 또한 회전속도가 증가함에 따라 토크가 감소되다가 약 3,000rpm에서 다시 증가하게 되는데, 이는 축의 회전으로 윤활 틈새에 공기압이 형성되어 축이 포일로부터 부상하게 되었기 때문이다. 따라서 부상 후의 회전토크는 동압 공기와 축 사이의 순수 공기 마찰 토크로 회전속도에 따라 선형적으로 증가하였다. 또한 회전속도의 감소 시에도 이러한 작용으로 회전축이 정지한 것이다. 따라서 회전축이 부상한 후의 회전토크는 포일의 파손에 큰 영향을 미치지 못하기 때문에 반복적인 시동 및 정지 시험을 통해 내구성의 예측이 가능하다고 판단된다.



(a) Maximum starting torque



(b) Maximum coastdown torque



(c) Bearing temp.

Fig. 8. 500 cycles start/stop test

3.2 하중지지 능력 실험

하중지지 능력 시험을 위해서 축을 임의의 속도로 회전시킨 후 베어링에 정하중을 가하였으며 강성을 증대하기 위하여 0.1mm 두께의 범프포일을 사용하였다. 하중지지 능력은 회전하는 축이 하중에 의해 편심되어 포일 표면의 윤활 코팅과 미끄럼 접촉을 일으키기 전까지의 하중량을 기준으로 나타내었으며 실험 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

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.

3.3 500회 시동 및 정지 실험

범프포일 베어링의 내구성 실험을 위해 자중의 정하중을 받는 베어링의 부상 시험을 반복 수행하였다. 회전속은 최대 14,000 rpm 까지 회전시켰다가 정지시키는 과정을 반복적으로 수행하였으며 실험동안의 베어링의 토크와 범프포일의 온도를 측정하였다.

Fig. 8(a), (b)는 반복 시험동안의 베어링의 최대 시동 및 정지 토크를 50회 간격으로 나타낸 것이다. 시동 토크는 약 $155\text{N}\cdot\text{mm}$ ~ $183\text{N}\cdot\text{mm}$ 의 범위의 값을 나타내었으며 이들 값의 평균치인 $169\text{N}\cdot\text{mm}$ 의 9%이내의 변동치를 유지하였다. 정지 토크는 50회에서는 $145\text{N}\cdot\text{mm}$ 에서 500회 시험 후에는 약 $83\text{N}\cdot\text{mm}$ 으로 약 43%의 감소를 나타내었다. 시동 토크는 축이 코팅막 위에 정지하여 접촉한 상태에서 발생하는 것으로 회전축과 코팅막의 정지 마찰력에 기인하게 된다. 따라서 코팅의 정지 마찰계수(μ_s)는 거의 일정함을 알 수 있다. 그러나 정지 토크는 자유 정지하는 축이 코팅막과 접촉을 일으키면서 발생하는 것으로 운동 마찰계수(μ_d)가 지배적으로 작용하게 된다. 따라서 코팅막은 지속적인 시동 및 정지 실험에 의해 운동 마찰계수가 감소되었으며 마찰면에 윤활막이 충분히 형성되었음을 보여주고 있다.

Fig. 8(c)는 회전축이 포일과 접촉마찰을 일으킬 때의 온도를 50회 간격으로 나타낸 결과로 약 68°C ~ 81°C 의 내에서 그 변동량이 이들의 평균값인 74.5°C 의 9%이내를 유지하였다. 실험을 위해 사용한 코팅의 제한사용 온도는 380°C 로 실험동안의 베어링의 최대 온도인 81°C 보다 작다. 또한 포일 표면의 이황화몰리브덴(MoS_2)코팅이 파손되면 이보다 높은 마찰계수를 갖는 구리도금이 회전축과 접촉하게 되어 마찰 토크와 마찰열이 증가하게 될 것이다. 따라서 실험동안의 베어링의 토크와 온도의 결과로부터 이황화몰리브덴(MoS_2)코팅이 파손되지 않았음을 추정할 수 있었다.

500회 반복 시험을 끝낸 후 범프포일을 시

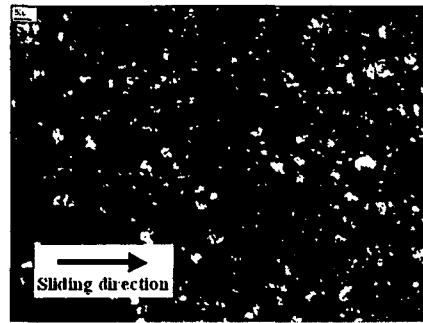


Fig. 9. CCD image of rubbing surface in MoS_2 coated foil after 500 cycles test

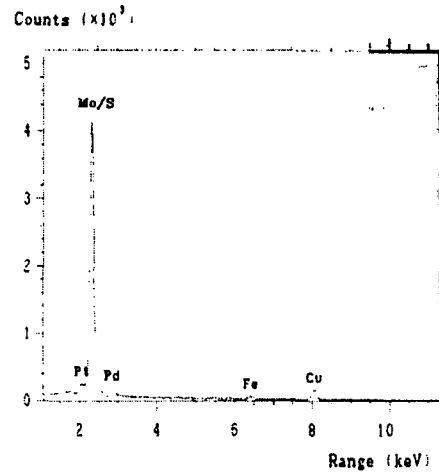


Fig. 10. EDS X-ray spectrum of rubbing surface in MoS_2 coated foil after 500 cycles test

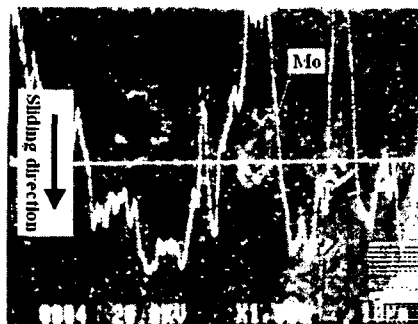


Fig. 11. Mo line profiling micrograph of rubbing surface in MoS_2 coated foil after 500 cycles test

험기에서 분리하여 코팅 표면을 관찰하였다. 코팅의 육안관찰을 위해 Fig. 9에 CCD image를 나타내었다. 코팅면은 축의 회전 방향으로 미끄럼 접촉이 발생하였음을 보여주며 코팅면에는 파손이 관찰되지 않았다.

코팅의 성분분석을 위해 EDS를 수행하였다. 이황화몰리브덴(MoS₂)코팅은 부도체이므로 검사를 위해 표면에 전도성 코팅을 하여 Fig. 10과 같이 성분분석을 수행하였다. 검출 결과에서 Pt, Pd는 전도성 코팅의 성분이 나타난 것이며 상대적으로 많은 양의 Mo와 S가 검출되었다. 또한 Fe와 Cu 성분은 상대적으로 매우 조금 검출됨을 보여준다. 이러한 결과는 코팅의 초기 성분분석과 거의 일치하는 것으로서 따라서 시험과정에서 이황화몰리브덴(MoS₂)코팅이 유지되었으며 코팅의 파손으로 인한 포일 모재나 구리도금의 노출이 거의 발생하지 않았음을 판단할 수 있었다.

EDS를 통해서 Mo와 S성분을 구분할 수 없었으며 따라서 추가적으로 Mo성분의 Line profiling을 수행하여 Fig. 11에 나타내었다. 그 결과 Mo 성분이 존재함을 뚜렷이 보여주고 있다.

4. 결론

범프포일 베어링의 내구성을 연구하기 위해서 부상 시험을 하였으며 아울러 하중지지 시험을 통하여 높은 하중지지 능력을 확인하였다. 부상 시험으로 고찰된 포일 베어링의 토크 특성을 이용하여 내구성 연구를 수행하였으며 그 방법으로 500회의 시동 및 정지 실험을 수행하였다. 이러한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

- i) 범프포일 베어링은 시동 및 정지 시 각각 약 168N·mm와 78N·mm의 회전토크를 나타내었으며 부상 후에는 최대 약 4N·mm의 값을 보였다. 이 값은 시동토크의 약 2%, 정지토크의 약 5%에 해당되는 값으로서 접촉마찰에 기인한 토크가 지배적임을 알 수 있어 내구성에 증대를 위해서는 이에 대한 연구가 필수적임을 알 수 있다.
- ii) 52N의 자중을 갖는 범프포일 베어링은 약 3,000rpm의 회전속도에서 부상하였으며,

부상 후의 회전토크는 회전속도에 따라 선형적으로 증가하였다.

iii) 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.

iv) 500회의 내구성 시험동안 시동토크는 169N·mm의 9%의 변동량 내에서의 값을 유지하였으며, 정지토크는 초기 145N·mm에서 43%가 감소하여 83N·mm의 값을 나타내었다. 이는 정지마찰 계수와 운동마찰 계수의 차이에서 기인한 것으로 사료된다. 또한 범프포일의 온도는 74.5℃의 9%의 변동량 내에서 값을 유지하였다. 따라서 이황화몰리브덴(MoS₂)코팅이 파손되지 않음을 추정할 수 있었다.

v) 500회 내구성 시험 후에 수행한 코팅 표면의 CCD image, Line profiling 그리고 EDS의 결과를 통해 포일 표면에 이황화몰리브덴(MoS₂)코팅이 유지되어 있음을 확인하였다.

후 기

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

참고 문헌

1. Heshmat, H., "Advancements in the Performance of Aerodynamic Foil Journal Bearings : High Speed and Load Capability," ASME, Journal of Tribology, Vol. 116, pp. 287~295, 1994
2. Heshmat, C. A. and Heshmat, H., "An Analysis of Gas-Lubricated, Multileaf Foil Journal Bearings with Backing Springs", ASME, Journal of Tribology, Vol. 117, pp. 437~443, 1995
3. Heshmat, H. and Hermel, P., "Compliant Foil Bearings Technology and Their Appli-

- cation to High Speed Turbomachinery””, Elsevier Science Publishers B.V. pp. 559 ~ 575, 1993
4. 이용복, 김창호, “포일 베어링에 대한 기술 개발 현황 및 응용에 대한 재 조명”, 한국소음진동공학회지 소특집, Vol. 11, No. 5, pp. 582 ~ 591, October 2001,
 5. Roger Ku, C. -P. and Heshmat, H., "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, 1992
 6. Dellacorte C. "A New Foil Air Bearing Test Rig for Use to 700°C and 70,000rpm", NASA TM-107405, 1997
 7. Fred Higgs, C. III, Heshmat, C. A. and Heshmat, H., "Comparative Evaluation of MoS₂ and WS₂ as Powder Lubricants in High Speed, Multi-Pad Journal Bearings", ASME, Journal of Tribology, Vol. 121, pp. 625 ~ 630, 1999
 8. 이용복, 김태호, 김창호, 이남수, 장건희, “공기윤활 다엽포일 저어널 베어링의 회전축 부상 특성에 관한 연구”, 윤활학회지 Vol. 17, No 4, pp. 290 ~ 296, 2001
 9. 이용복, 이남수, 최동훈, 김창호, “공기윤활 범프 저어널 베어링의 부상 특성에 관한 연구”, 윤활학회지 게재 예정