

가스터어빈용 고속 베어링의 Oil-Starvation 유회특성: Part II-Roller Bearing

김기태

삼성항공(주) 엔진연구소

The Effect of Oil-Starvation on the Lubrication Characteristics of High-Speed Bearing: Part II-Roller Bearing

Kitae Kim

Samsung Aerospace Engine R & D Division

Abstract – The lubrication characteristics of high-speed roller bearings at oil-starvation have been investigated empirically using the bearings employed in small industrial gas turbine engines. Testing was done by simulating the oil-starvation conditions in engines, such as stopping the oil-supply to the bearing during normal operating, starting without oil-supply at atmospheric temperature, and accelerating with oil-supply at atmospheric temperature. During testing, the temperature of bearing, the power consumption, and the rotating resistance of the bearing were measured. From this study, on the contrary to the ball bearing, it was found that the resistance of the bearing was higher at the regime of without oil-supply than that at the regime of with oil-supply, despite less power consumption.

Key words – roller bearing, gas turbine, oil-starvation, power consumption, frictional resistance, oil resistance.

1. 서 론

일반적으로 가스터어빈의 main bearing에 사용되는 고속 구름베어링은 가스터어빈의 운전 조건을 고려하여 설계되어지나, 운용 시의 신뢰성을 확보하기 위하여는 가스터어빈의 모든 운용 조건에서 유회특성의 검증이 이루어져야 한다. 특히 운전 중의 oil interruption이나 엔진 시동 시의 oil-starvation상태에서의 유회특성의 검증은 엔진의 치명적 손상을 방지하기 위하여 반드시 필요하다.

가스터어빈 엔진의 운용 중 유회시스템의 oil-pump와 같은 구성품의 고장으로 운전 중 오일이 공급되지 않는 경우, pre-lube pump를 하지 않고 베어링 내부 잔여 오일만 가지고 가속을 하게 되는 경우, 또는 엔진 가속 시 상온에서 고점도에 의한 저 유량의 오일이 공급되는 경우에 베어링에는 절대적으로 오일 부족현

상이 발생하게 되며 이 경우의 유회특성은 정상적인 유회유가 공급되는 경우와는 상이하게 되며 가스터어빈 엔진 운용의 신뢰성을 좌우하게 된다. 특히 roller bearing은 일반적으로 two bearing system을 가지는 소형 가스터어빈에서 고온부인 터어빈부에 위치하므로 오일 부족상태가 발생할 때 냉각불량에 의하여 문제가 발생하기 쉬우므로 더욱 면밀한 검증이 필요하다.

구름베어링의 oil-starvation유회에 관한 연구는 ball-plane contact에서의 실험적[1] 및 이론적[2] 연구에서부터 오일 유량에 의한 영향[3] 등에 이르기까지 다양하게 이루어져 왔다. 그러나, 고속 베어링의 유회특성에 많은 영향을 주는 실제 엔진의 베어링 지지 구조물을 사용하고 실제 엔진에서 운용되는 조건을 고려하여 시험을 수행한 결과는 많지 않으며 따라서 연구 결과를 실제 엔진 개발 시 직접 적용하기는 어렵다.

본 연구에서는 엔진에 사용되는 베어링 지지 구조

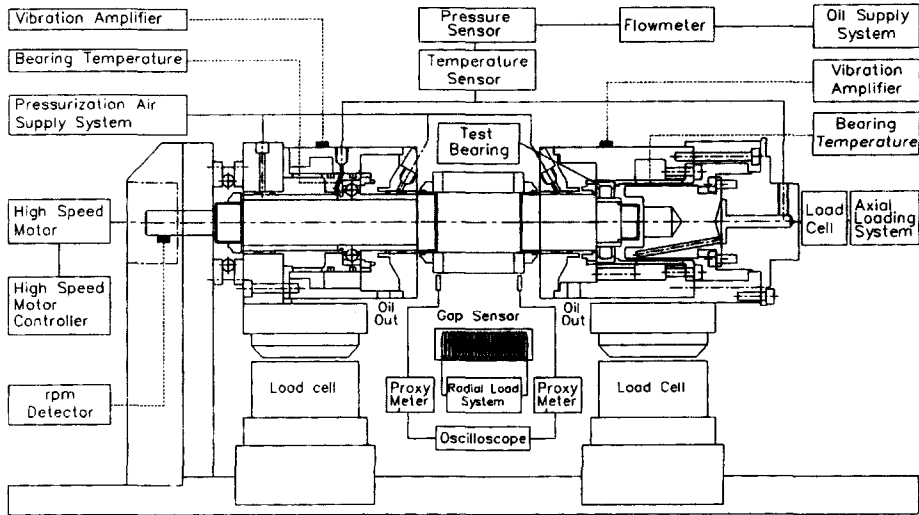


Fig. 1. High-speed bearing test apparatus.

물을 이용하고 엔진 운용 측면에서 oil-starvation 현상이 발생하는 경우에 대하여 소형 산업용 가스터어빈에 사용될 cylindrical roller bearing의 oil-starvation 시 윤활특성을 관찰 하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2-1. High-Speed Bearing Tester

고속 ball bearing의 베어링 시험을 수행하기 위하여 설계 제작한 고속 베어링 윤활시험장비[4]를 roller bearing의 시험을 수행 할 수 있도록 Fig. 1에서 보는 바와 같이 왼쪽에는 축의 지지 및 위치 설정을 위하여 ball bearing을 설치하고 시험을 위한 roller bearing을 축의 오른쪽에 설치하였다. Roller bearing으로의 윤활 유 공급을 위한 oil nozzle assembly와 베어링 하우징 내부의 metal ring damper를 실제 엔진에서 사용하는 것과 동일한 부품을 장착할 수 있도록 베어링 지지부 설계를 변경하여 roller bearing의 시험환경을 엔진의 운용환경과 유사하도록 하였다. 윤활시스템은 실제 엔진에 사용되는 윤활시스템과 동일한 시스템으로 구성하였고 시험시 roller bearing으로의 오일 공급량을 기준으로 작동하도록 설정하였다(Fig. 2).

2-2. Test Bearing

시험베어링은 RBEC 5등급의 cylindrical roller bearing으로서 내경이 40 mm이며, ring과 roller의 재료는

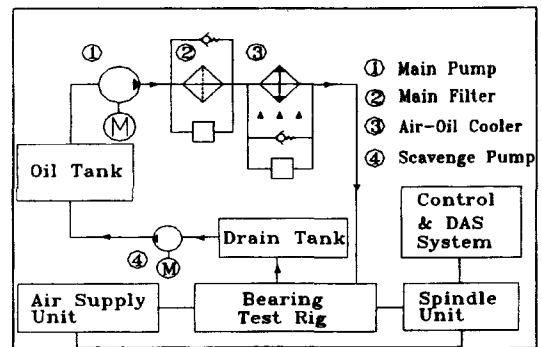


Fig. 2. Circulation-type lubrication system.

AISI M-50 steel, cage는 granodized finish가 된 AISI 52100을 사용하였다. 본 베어링은 직경 8 mm의 semi-crowned roller 8개로 구성되어 있고, 18644 N의 동정 격하중을 갖고 cage의 위치는 outer-land riding cage이다. 베어링의 윤활 방식은 3개의 oil nozzle hole을 가지는 single side oil-jet 윤활 방식이며 실제 엔진과 동일하게 구성하였다.

2-3. Lubricant

고속 roller bearing의 윤활에 사용된 윤활유는 ester 계통의 Type II 오일로서 MIL-L-23699C를 만족하는 오일이며 항공용 및 소형 산업용 가스터어빈에 일반적으로 사용되는 윤활유이다. 윤활유의 주요 성분은 Table 1에 나타난 바와 같으며, 윤활시스템에서 10

Table 1. Major properties of oil (MIL-L-23699C)

Kinematic Viscosity, cSt	27.6
@ 38°C	5.1
@ 99°C	1.3
@ 204°C	-54
Pour Point, °C	260
Flash Point, °C	285
Fire Point, °C	404
Autogenous Ignition Temperature, °C	1.87
Specific Heat, kJ/kg°C @ 38°C	1.0035
Specific Gravity, 15.6/15.6°C	

μm oil filter를 통과하면서 filtering되어 베어링으로 재공급 된다.

2-4. Test Procedure

시험 roller bearing에 121 N의 반경방향 하중을 일정하게 인가한 상태에서 회전속도와 오일 유량을 제어하면서 시험을 수행하였으며, 시험시 시험장치의 일반적인 운용방법은 oil-jet 윤활시 고속 ball bearing의 윤활특성을 관찰한 방법과 동일하다[4]. 윤활유는 정상 운전 시 70°C의 일정 온도에서 0.35 MPa의 압력을 유지하면서 베어링에 공급하였고, 오일펌프 구동모터를 on-off 제어하여 베어링으로의 오일 유량을 제어하였다. 시험 중 베어링으로의 정상상태 오일 유량은 각 시험베어링에서 $2.8 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$ 으로 공급하였다.

윤활특성의 관찰은 ball bearing의 시험과 같이 이루어졌으며, 반경 방향의 하중 측정은 각 시험베어링 지지부 하단에 수평으로 설치된 tension-compression형 박형 load cell로 측정하였다. Fig. 1에서 왼쪽 ball bearing의 지지부 하단에 설치한 load cell을 L1과 L2로, 오른쪽 roller bearing의 지지부 하단에 설치한 load cell을 R1과 R2로 표기하며 1은 베어링의 회전과 동일한 방향에 위치한 것을 의미하고 2는 반대방향에 위치한 베어링을 의미한다.

3. 실험 결과 및 고찰

3-1. Effect of Oil-Stop during Operating

엔진이 정상 운전 중 oil-pump의 이상 등으로 베어링에 오일이 공급되지 않는 조건을 가정하여 27000 rpm의 속도에서 30초 동안 베어링으로의 오일 공급을 차단시키며 베어링을 관찰하였다. Oil-pump motor의 전원 차단 후 약 10초 동안은 약간의 오일이 공

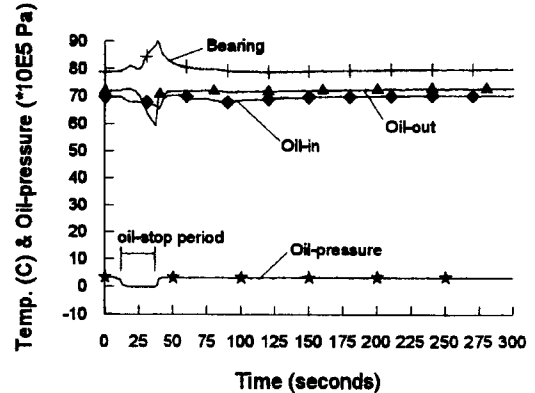


Fig. 3. The effect of oil-stop during operation on the roller bearing temperature ($2.8 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$, 0.35 MPa).

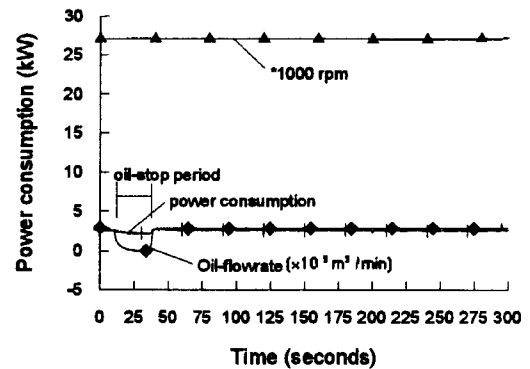


Fig. 4. The effect of oil-stop during operation on the frictional resistance ($2.8 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$, 0.35 MPa).

급되게 되며 그 이후 약 20초 동안은 오일이 공급되지 않아 베어링 raceway내에 있는 오일만으로 윤활하게 되어 냉각이 이루어지지 않으며, 본 시험결과를 Fig. 3~Fig. 5에 나타내었다.

베어링으로의 오일 차단 마지막 시점에서의 베어링 온도는 79°C에서 90°C까지 상승한 후 오일 공급이 다시 이루어지면 급히 하강하여 80°C로 안정화됨을 알 수 있다(Fig. 3). 베어링의 최고 온도가 90°C로서 베어링의 윤활과 냉각 측면에서 볼 때 정상적인 온도 범위 내에 있으며 오일 재공급 후 베어링 출구 오일 온도와 베어링온도가 거의 동일한 온도를 보여 주는 것으로 보아 베어링의 열적 평형이 이루어졌고 윤활과 냉각 문제는 발생하지 않고 있다고 판단된다. Ball bearing 시험 시 최고 온도가 107°C인 점[5]과 비교하면 roller bearing의 경우 베어링 최고 온도는 17°C 낮은 온도를

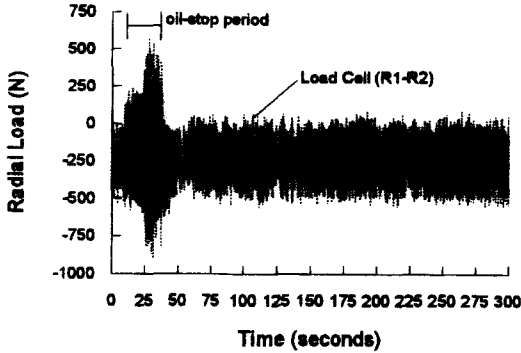


Fig. 5. The effect of oil-stop during operation on the variation of radial loads ($2.8 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{min}$, 0.35 MPa).

보여 주는데 이는 ball bearing과 달리 축 하중이 인가 되지 않으므로 equivalent radial load가 작게 작용하며 오일 유량이 ball bearing보다 약 19% ($0.54 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{min}$) 많이 공급되었기 때문이라고 추정된다.

운전 중 무급유에 따른 oil-starvation이 베어링의 cavity oil resistance 및 마찰 특성에 미치는 영향을 관찰하고자 베어링 구동motor 동력 소비량의 변화를 Fig. 4에, 시험베어링 지지부 하단에 베어링의 inner ring 회전 방향과 반대되는 곳에 수평으로 설치된 load cell에서의 측정값으로부터 inner ring의 회전 방향과 동일한 방향에 수평으로 설치된 load cell에서 측정된 값을 제한 값(베어링의 회전저항의 변화를 나타내 주는 값)의 변화를 시간에 따라 Fig. 5에 나타내었다. 여기서 주목할 부분은 Fig. 4의 오일 공급이 중단된 부분에서의 동력 소비량의 변화이다. 오일 공급이 중단되면서 구동motor의 동력 소모가 3.418 kW에서 급히 하강하기 시작하여 오일 공급이 재개되기 시작하는 시점에서는 2.08 kW로 오일이 공급될 때보다 39% 감소된 동력을 사용하여 회전체를 구동시켰다는 것을 알 수 있다. 그러나 이 부분에서 rpm은 ball bearing시험 시 300 rpm 증가한 것[5]과 달리 증가하지 않았다. 여기서 측정된 값은 지지용 ball bearing과 시험용 roller bearing에서 소모된 동력이며, Ball bearing의 시험 시[5] 하나의 ball bearing에서의 동력 소모량이 동일 속도에서 1.289 kW인데 회전저항의 비율을 이용하면 25%의 동력이 980 N의 축하중에 의하여 소모되었다고 할 수 있으므로 본 시험에서와 같이 98 N의 축하중이 인가된 경우 75%의 동력인 0.967 kW 정도가 ball bearing에서 소모되었다고 할 수 있으며,

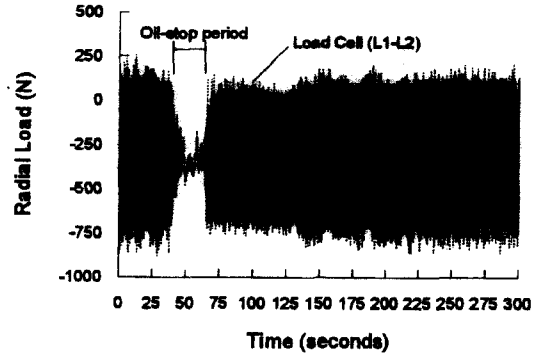


Fig. 6. The effect of oil-stop during operation on the variation of radial loads at ball bearing ($2.26 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{min}$, 0.35 MPa) [5].

따라서 순수히 roller bearing에서 소모된 동력은 1.113 kW정도가 되리라는 것을 알 수 있다.

베어링에서의 회전저항은 Fig. 5의 시험베어링 지지부 하단에서의 수평 방향의 radial load 변화로부터 오일 공급이 차단된 시점인 7초 부터 오일 재공급 되는 시점인 37초 시점까지 지속적으로 증가하다가 오일 재공급 이후 감소하여 일정한 값을 유지하고 있다. 이는 Fig. 6의 ball bearing 시험결과[5]와 정반대 되는 현상이며 roller bearing에서 최소 윤회를 하는데 필요한 유량이 ball bearing보다 더욱 많이 존재하여야 한다는 것을 의미한다. 이는 다시 베어링의 냉각을 제외하고 윤회만을 고려하는 경우 적은 유량이 공급될수록 윤회특성이 좋아진다는 결과를 보여 준 ball bearing과 달리 보다 많은 유량이 공급되어야 최적 윤회이 이루어진다는 것을 보여 주고 있다. 이는 ball bearing과 roller bearing의 rolling element의 race에서의 구름 접촉 형태의 차이로 추정되나 이 부분은 앞으로 더 자세한 연구가 이루어 져야 할 것으로 보인다.

3-2. Starting without Oil-Supply.

가스터빈 엔진의 기동전 베어링에 윤회유를 공급하는 pre-lube pump를 사용하지 않는 조건을 simulation하여 시험을 수행하기 위하여 오일 공급 없이 상온에서 출발하여 oil-pump가 구동 되어 베어링에 오일이 공급되는 15000 rpm까지 약 25초 동안에 가속시키는 시험이며 그 시험결과를 Fig. 7~Fig. 8에 나타내었다. Fig. 7의 oil-pressure의 측정값 변화로부터 알 수 있듯이 처음부터 25초 동안은 오일이 공급되지 않고 25초 후 오일이 공급 되고 있다. 25초 후 베어링은 약

3°C정도 온도가 증가하여 13°C가 되었으며 오일이 공급되기 시작하자 곧바로 온도 상승률이 감소하여 이후에는 완만하게 온도가 상승하는 것을 볼 수 있으며 오일의 베어링 출구온도도 베어링온도의 상승률과 동일한 값을 갖는다는 것을 알 수 있으며, 이러한 시험 결과로부터 베어링 내부에 소량의 오일이 존재한다면 pre-lube pump를 사용하지 않고도 엔진을 기동할 수 있다는 것을 알 수 있다.

특기할 사항은 본 시험 시에도 운전중 무급유 시험 시와 같이 오일이 공급되지 않고 있는 동안에 저항이 지속적으로 증가하고 있으며 오일 공급이 이루어지면 서 일시적으로 감소한 후 오일 공급이 정상적으로 이루어지고 있는 50초 이후부터 일정한 값을 유지하고 있다는 것을 알 수 있다(Fig. 8). 그림에서 약 15초 시점에서의 순간적인 저항 증가는 회전축의 1차 공진과

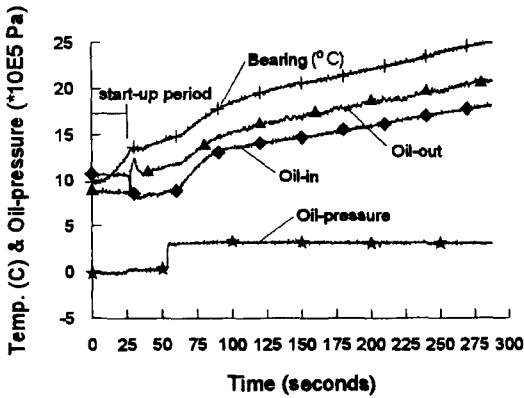


Fig. 7. The bearing temperature during start-up without oil-supply (from 0 to 15000 rpm).

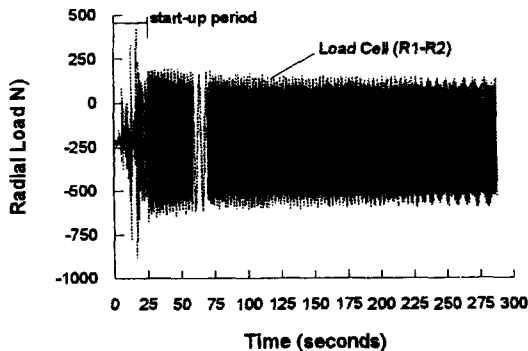


Fig. 8. The change of the radial load under the roller bearing support during start-up without oil-supply (from 0 to 15000 rpm).

관련되어 더욱 크게 나타난 것으로 보이며, 25초 이후 완만하게 저항이 감소하는 것은 오일의 온도가 서서히 증가하면서 오일의 점성 저항이 감소하기 때문이라고 추정된다.

3-3. Acceleration with Oil-Supply

상온에서 오일을 공급하면서 27000 rpm까지 40초 내에 가속을 하면서 윤회특성을 관찰 하였으며 그 결과를 Fig. 9과 Fig. 10에 나타내었다. 구동motor의 응답 특성 때문에 실제 가속 시간이 약 41초가 소요되었으며 오일 공급은 oil-pump를 시험 시작과 동시에 가동하여 시험을 수행하였다. 베어링의 온도는 약 41초 동안에 8°C정도 증가하여 26°C에 달하였고 유량은 0.33 MPa의 압력에서 약 $1.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$ 이 공급되었다. 가속 시의 온도상승율은 약 0.24°C/sec 이었고 가속이 끝난 이후 27000 rpm의 일정 속도에서의 온도

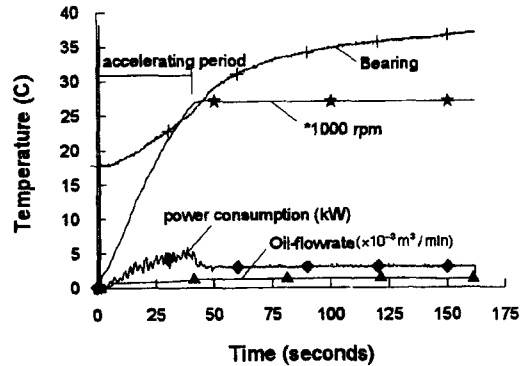


Fig. 9. The bearing temperature during acceleration with oil-supply (from 0 to 27000 rpm).

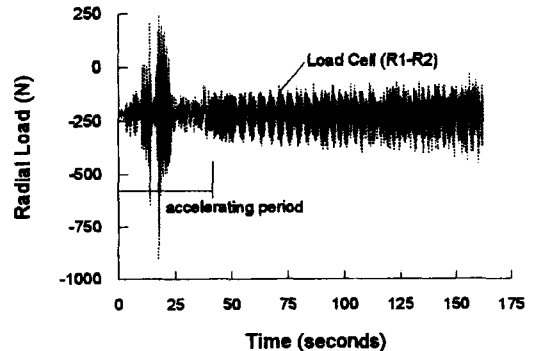


Fig. 10. The change of the radial load under the roller bearing support during acceleration with oil-supply (from 0 to 27000 rpm).

상승율은 약 $0.07^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ 이었다(Fig. 9). 그리고 그림에서도 알 수 있듯이 가속 완료 후 일정 속도에서 베어링온도가 안정화되고 있는 것으로 보아 상온 가속 시의 베어링의 운용에는 이상이 없다고 판단된다.

저온에 의한 오일의 점성증가에 따른 저항 증가와 베어링 내부의 frictional resistance는 Fig. 10으로부터 알 수 있듯이 초기 가속 시에 증가하나 가속 후반부가 되면서 베어링 내부로의 오일 공급이 원활히 이루어져 약 25초 이후부터 가속이 끝나는 시점까지 일정하게 유지된 후 서서히 증가하고 있다. 그러나, 약 13초와 17초 시점에서의 높은 저항치는 회전축의 공진과 관련되어 나타난 것으로 보이므로, 본 시험에서 저온에 의한 오일의 점성 증가에 따른 마찰저항 증가 문제는 구동motor의 동력소비량의 측정값으로부터 가속 시에 약간의 증가가 있는 것 같으나 가속이 끝난 시점 이후에는 없는 것으로 추정되어진다. 왜냐하면 점성증가에 기인한 마찰저항 증가 문제가 야기되었다면 가속이 끝난 시점 이후의 구동motor동력소비량의 값이 정상 운전 시에서의 측정 결과(Fig. 4)인 3.418 kW 보다 훨씬 큰 값이어야 하나 이 값과 거의 같은 값을 나타내 주고 있기 때문이다. 가속 시의 구동motor동력소비량이 5.928 kW까지 상승한 것은 저온에 의한 점성 증가에 따른 영향보다는 짧은 시간에 가속을 시키기 위하여 구동motor 속도 조절기를 빨리 조작하여 많은 양의 입력 전류가 흐르게 된 것 때문인 것으로 추정된다.

4. 결 론

소형 가스터어빈 엔진의 main shaft bearing으로 사용되는 roller bearing의 oil-starvation 윤회특성을 엔진에서 실제로 발생할 수 있는 관점에서 베어링의 회전 속도 및 오일 유량을 제어하면서 실험적으로 관찰하였다. 실제 엔진에 사용되는 bearing support와 hous-

ing을 사용하여 베어링의 운용 상태를 엔진과 유사하게 구현하여 시험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 베어링 내부 잔류 오일만으로 윤회를 하는 경우, 베어링의 동력소모는 저하하나 베어링에서의 윤회특성은 저항 증가로 인하여 나빠진다.
2. 상온 가속 시 저온 고점도 오일에 기인한 resistance가 존재하나 bearing thermal performance 측면에서 윤회에 문제를 발생시키지는 않는다.
3. 소량의 오일이 베어링 내부에 존재한다면 엔진에서의 실제 운용 시 oil pump failure시와 pre-lube pump가 존재하지 않는 경우 모두 한정된 시간 동안 운용이 가능하다.

참 고 문 헌

1. Wedeven, L. D., Evans, D. and Cameron, A., "Optical Analysis of Ball Bearing Starvation," Trans. ASME, J. Lubric. Technol., Vol.93, No.3, pp.349-361, 1971.
2. Chiu, Y. P., "An Analysis and Prediction of Lubrication Film Starvation in Rolling Contact Systems," ASLE Trans., Vol.17, pp.22-35, 1974.
3. Hargreaves, R.A. and Higginson, G.R., "Some Effects of Lubricant Starvation in Cylindrical Roller Bearings," Trans. ASME, J. Lubric. Technol., Vol.98, No. 1, pp.66-72, 1976.
4. 김기태, "Oil-jet 윤회시 가스터어빈용 고속 ball bearing 윤회특성," 한국윤회학회지, 제12권 제4호, pp. 28-34, 1996.
5. 김기태, "가스터어빈용 고속 bearing의 oil-starvation 윤회특성: Part I- Ball Bearing," 한국윤회학회지, 제 13권 제1호 게재 예정, 1997.
6. Olaru, D. N. and Gafitanu, M. D., "Starvation in Ball Bearings," Wear, Vol.170, No.2, pp.219-234, 1993.