

## 가스터어빈용 고속 베어링의 Oil-Starvation 윤활특성: Part I-Ball Bearing

김기태

삼성항공(주) 엔진연구소

### The Effect of Oil-Starvation on the Lubrication Characteristics of High-Speed Bearing: Part I-Ball Bearing

Kitae Kim

Samsung Aerospace Engine R & D Division

**Abstract** – The lubrication characteristics of high-speed ball bearings at oil-starvation have been investigated empirically using the bearings employed in small industrial gas turbine engines. For the close structural simulation, experiments carried out with bearing mounting supports of real engines, such as bearing housings and oil nozzle assemblies with squeeze film dampers. Thus the results of tests can be applied to the design and the development of 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. From this study, the relative comparison of the frictional resistance and the resistance due to the bearing cavity oil was demonstrated visually, and the resistance due to the bearing cavity oil was dominant in the resistance of bearing at high speed.

**Key words** – ball bearing, gas turbine, oil-starvation, accelerating, 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 윤활특성의 검증이 이루어져야 한다. 특히 운전중의 oil interruption이나 엔진 시동 시의 oil-starvation상태에서의 윤활특성의 검증은 엔진의 치명적 손상을 방지하기 위하여 반드시 필요하다.

가스터어빈 엔진의 운용 중 윤활시스템의 oil-pump와 같은 구성품의 고장으로 운전 중 오일이 공급되지 않는 경우, pre-lube를 하지 않고 베어링 내부 잔여 오일만 가지고 가속을 하게 되는 경우, 또는 엔진 가속 시 상온에서 고점도에 의한 저 유량의 오일이 공급되

는 경우에 베어링에는 절대적으로 오일 부족현상이 발생하게 되며 이 경우의 윤활특성은 정상적인 윤활 유가 공급되는 경우의 윤활특성과는 상이하게 되며 가스터어빈 엔진 운용의 신뢰성을 좌우하게 된다.

구름베어링의 oil-starvation윤활에 관한 연구는 ball-plane contact에서의 실험적[1] 및 이론적[2] 연구에서부터 오일 유량에 의한 영향[3] 등에 이르기까지 다양하게 이루어져 왔다. 그러나, 고속베어링의 윤활특성에 많은 영향을 주는 실제 엔진의 베어링 지지 구조물을 사용하고 실제엔진에서 운용되는 조건을 고려하여 시험을 수행한 결과는 많지 않으며 따라서 연구 결과를 실제 엔진 개발 시 직접 적용하기는 어렵다. 국내에서는 항공용 및 산업용 소형 가스터어빈 개발이 이루어지지 못한 이유로 이에 사용되는 고속 구름베어링의 oil-starvation 윤활특성 연구가 본격적으로 이루어

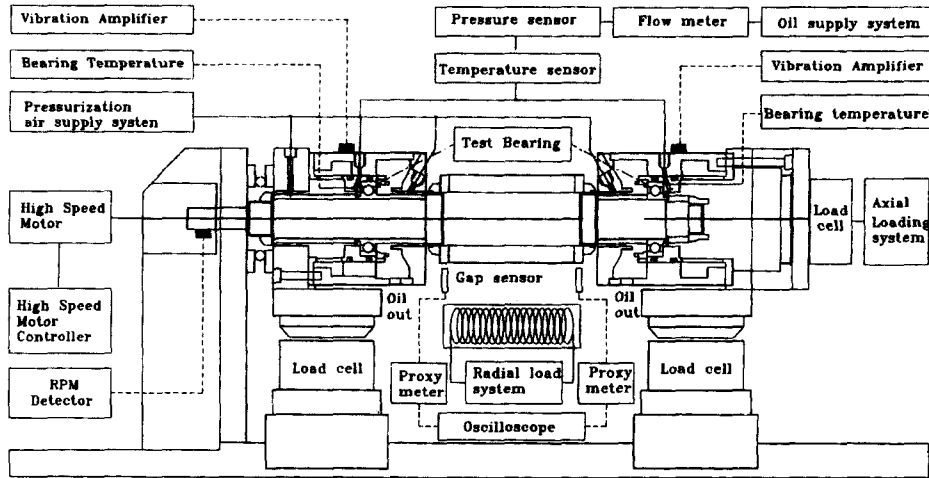


Fig. 1. High-speed bearing test apparatus.

어지지 못하였다.

본 연구에서는 엔진에 사용되는 베어링 지지 구조물을 이용하고 엔진 운용 측면에서 oil-starvation 현상이 발생하는 경우에 대하여 소형 산업용 가스터빈에 사용될 ball bearing의 oil-starvation시 유회특성을 관찰 하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2-1. High-Speed Bearing Tester

고속베어링의 시험을 수행할 수 있는 고속 베어링 유회시험장비[4]를 설계 제작하여 이용하였으며 기계 시스템부, 계측제어부, 및 베어링으로의 오일 공급을 위한 유회시스템부로 구성되어 있다(Fig. 1).

시험 결과의 정확성을 향상시키기 위하여 회전축을 지지하는 slave bearing 없이 시험베어링으로 축을 지지하도록 설계하였고 2개의 ball bearing을 동시에 시험할 수 있다. 시험베어링에서의 측정값은 실시간 monitoring과 동시에 저장할 수 있고 베어링의 속도와 하중을 제어할 수 있도록 설계되었다. 마지막으로 유회시스템은 실제 엔진에 사용되는 유회시스템과 동일한 시스템으로 구성되었으며(Fig. 2), 정확한 유량제어와 베어링으로의 오일 공급을 효과적으로 차단시키기 위하여 각 베어링 직전에서 오일의 압력과 유량을 측정할 수 있도록 압력센서와 유량계를 설치하였고, data acquisition unit에서 monitoring할 수 있도록 설계하였다(Fig. 1).

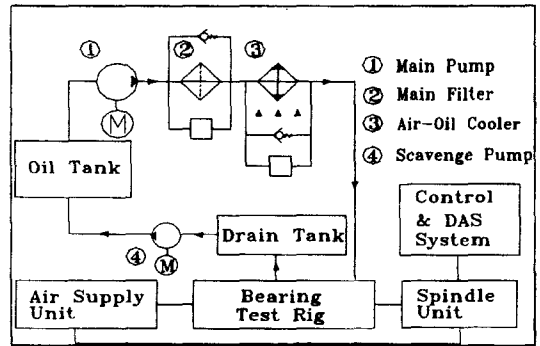


Fig. 2. Circulation-type lubrication system.

### 2-2. Test Bearings

시험베어링은 ABEC 7등급의 split inner-ring을 갖는 ball bearing으로서 내경이 45 mm이며, ring과 ball의 재료는 AISI M-50 steel, cage는 granodized finish가 된 AMS 6440을 사용하였다. 본 베어링은 직경 12.7 mm의 ball 12개로 구성되어 있고, 베어링의 free contact angle은 35°이며 34265 N의 동정격하중을 갖고 cage의 위치는 outer-land riding cage이다. 베어링의 유회방식은 3개의 oil nozzle hole을 가지는 single side oil-jet 유회방식이며 실제 엔진과 동일하게 구성하였다.

### 2-3. Lubricant

고속 ball bearing의 유회에 사용된 유회유는 ester계 통의 Type II 오일로서 MIL-L-23699C를 만족하는 오

일이며, 항공용 및 소형 산업용 가스터어빈에 일반적으로 사용되는 윤활유이다. 윤활유의 주요 성분은 Table 1에 나타낸 바와 같으며, 윤활시스템에서 10  $\mu\text{m}$  oil filter를 통과하면서 filtering되어 베어링으로 재공급 된다.

#### 2-4. Test Procedure

시험베어링에 축하중과 반경방향하중을 일정하게 인가한 상태에서 회전속도와 오일 유량을 제어하면서 시험을 수행하였으며, 시험시 시험장치의 일반적인 운용방법은 oil-jet 윤활시 고속 ball bearing의 윤활특성을 관찰한 방법과 동일하다[4].

시험 중 반경방향하중은 각 시험 베어링에 121 N, 축방향 하중은 ball bearing의 outer-ring에 980 N을 일정하게 인가하였다. 윤활유는 정상운전시 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  $2.26 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$ 으로 공급하였다.

윤활특성의 관찰은 시험 수행시 베어링 온도, 오일의 입출구온도, 공급오일의 압력, 오일 유량, 축방향 및 각 시험베어링의 반경방향으로의 하중 변화 및 베어링 구동motor의 소요동력을 실시간 monitoring하며 측정값을 저장하면서 이루어졌다. 반경방향의 하중 측정은 각 시험베어링 지지부 하단에 하나는 시험베어링의 회전 방향에, 다른 하나는 시험베어링의 회전과 반대되는 방향에 수평으로 설치된 tension-compression형 박형 load cell로 측정하였다. Fig. 1에서 왼쪽 베어링의 지지부 하단에 설치한 load cell을 L1과 L2로, 오른쪽 베어링의 지지부 하단에 설치한 load cell

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

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

을 R1과 R2로 표기하며 1은 베어링의 회전과 동일한 방향에 위치한 것을 의미하고 2는 반대방향에 위치한 베어링을 의미한다.

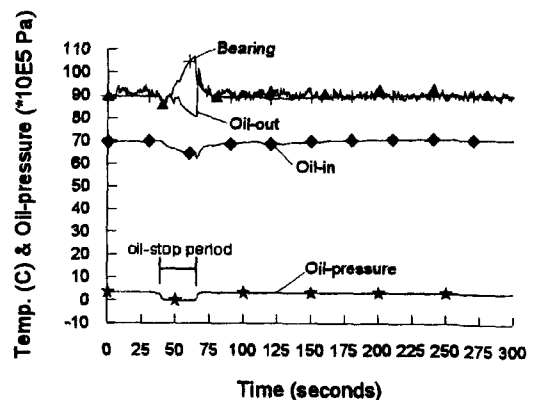
### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3-1. Effect of Oil-Stop during Operating

엔진이 정상운전중 oil-pump의 이상 등으로 베어링에 오일이 공급되지 않는 조건을 가정하여 27000 rpm의 속도에서 30초동안 베어링으로의 오일 공급을 차단시키며 베어링을 관찰하였다. Oil-pump motor의 전원 차단 후 약 10초 동안은 약간의 오일이 공급되게 되며, 그 이후 약 20초동안은 오일이 공급되지 않아 베어링 raceway내에 있는 오일만으로 윤활을 하게 되며, 본 시험결과를 Fig. 3~Fig. 5에 나타내었다.

베어링으로의 오일 차단 마지막 시점에서의 베어링 온도는 86°C에서 107°C까지 상승한 후 오일 공급이 다시 이루어지면 급히 하강하여 90°C로 안정화됨을 알 수 있다(Fig. 3). 베어링의 최고 온도가 107°C로서 베어링의 윤활과 냉각 측면에서 볼 때 정상적인 온도 범위 내에 있으며 오일 재공급 후 베어링 출구 오일온도와 베어링온도가 거의 동일한 온도를 보여주는 것으로 보아 베어링의 열적평형이 이루어 졌고 윤활과 냉각 문제는 발생하지 않고 있다고 판단된다.

운전 중 무급유에 따른 oil-starvation이 베어링의 oil cavity resistance 및 마찰특성에 미치는 영향을 관찰하고자 베어링 구동motor 동력 소비량의 변화를 Fig. 4에, 시험베어링 지지부 하단에 베어링의 inner ring 회



**Fig. 3. The effect of oil-stop during operation on the ball bearing temperature ( $2.26 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$ , 0.35 MPa).**

전 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 구동 motor의 동력 소모가 5.358 kW에서 급히 하강하기 시작하여 오일 공급이 재개되기 시작하는 시점에서는 2.578 kW로 오일이 공급될 때보다 동력 소모가 1/2이하로 감소하고 있고, 또한 이 부분에서 rpm도 약 300 rpm정도 증가하였다. 여기서 측정된 값은 2개의 시험 베어링에서 소모되는 동력이다. 이 시험결과로부터 오일 유량을 감소시키면 베어링에서의 저항을 현저히 감소시켜 운할특성을 향상시킨다는 것을 알 수 있으나 베어링 온도 증가로 인하여 제한을 받게 된다. 그리고 Fig. 5의 시험베어링 지지부 하단에서의 수평 방

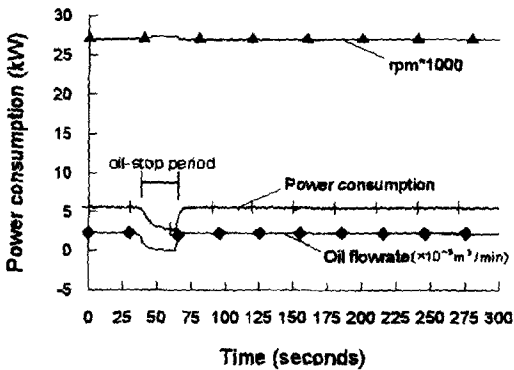


Fig. 4. The effect of oil-stop during operation on the power consumption ( $2.26 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$ , 0.35 MPa).

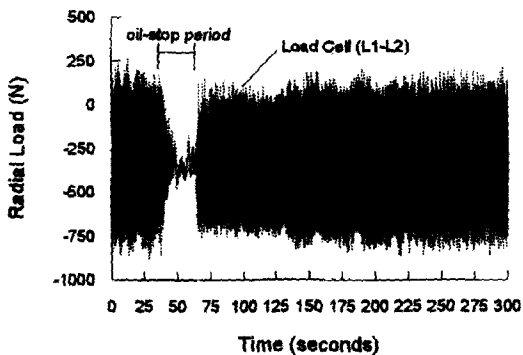


Fig. 5. The effect of oil-stop during operation on the variation of radial loads ( $2.26 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$ , 0.35 MPa).

향의 radial load 변화로부터 오일이 초기(36 초 시점부터)에 공급되지 않으므로 베어링 내부에서의 오일 자체의 저항에 기인한 resistance가 감소하다가 오일이 지속적으로 감소하여 oil film thickness가 oil-starvation과 thermal effects에 의하여 감소하므로[5] EHD lubrication regime에서 Mixed 또는 boundary lubrication regime으로 변화하여 베어링에서의 frictional resistance가 증가하고(63초 부터 65초 시점까지) 그 후 오일이 다시 공급되면 이 frictional resistance가 급격히 감소하나 오일 자체의 베어링 내부 저항은 다시 증가하므로 70초이후의 측정값으로 일정하게 된다고 추정할 수 있다. 여기서 오일 자체의 베어링 내부저항과 frictional resistance와의 차이는 약 50초정도 시점에서의 최저 측정값을 70초이후의 측정값으로부터 제한 값이 된다.

이로부터 오일 자체의 회전에대한 저항과 frictional resistance가 공존한다는 것을 실험적으로 가시화할 수 있었고, rolling element bearing에서의 oil에 의한 마찰 저항 증가가 실제 얼마나 크게 발생하는지를 알 수 있었다. 그리고 베어링의 냉각을 제외한 운할특성에 있어서는 EHD lubrication에서 구해지는 theoretical oil film thickness를 만들어 줄 수 있는 oil flowrate만 공급하여 주면 운할특성이 더욱 좋아진다는 것을 알 수 있다.

### 3-2. Starting without Oil-Supply

엔진시험시 또는 실제 운용 시 운할시스템에서 베어링의 보다 안정한 운용을 위하여 사용하는 pre-

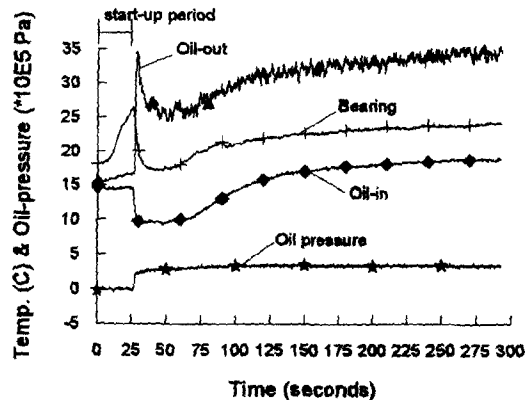


Fig. 6. The bearing temperature during start-up without oil-supply (from 0 to 15000 rpm).

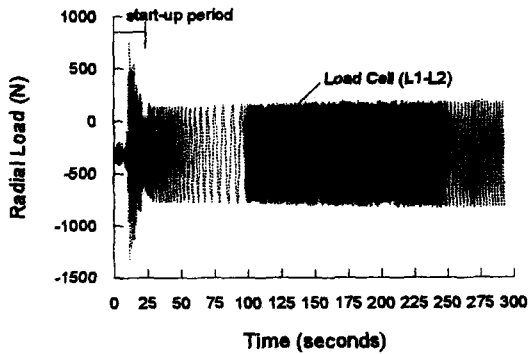


Fig. 7. The change of the radial load under the ball bearing support during start-up without oil-supply (from 0 to 15000 rpm).

lube pump가 없다고 가정한 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. 6 ~ Fig. 7에 나타내었다. Fig. 6의 oil-pressure의 측정값 변화로부터 알 수 있듯이 처음부터 25초 동안은 오일이 공급되지 않고 25초 후 오일이 공급 되고 있다. 25초후 베어링은 약 9°C정도 온도가 증가하여 26°C가 되었으며 오일이 공급되기 시작하자 곧바로 온도가 하강하여 이후에는 안정화되어 가는 것을 볼 수 있으며 오일의 베어링 출구온도도 시험의 후반부에 안정화되는 것을 알 수 있다. 이러한 시험결과로부터 베어링 내부에 소량의 오일이 존재한다면 pre-lube pump를 사용하지 않고도 엔진을 기동할 수 있다는 것을 알 수 있다.

특기할 사항은 본 시험 시에도 운전중무급유 시험시와 같이 오일 유량 감소에 따른 베어링 frictional resistance증가와 오일 공급 시작시 이의 감소 후에 오일 유량이 증가하여 정상 유량이 공급될 때 오일 자체 저항 증가에 의한 resistance 증가 현상을 볼 수 있었다(Fig. 7). 그림에서 약 12초 시점에서의 급속한 저항 증가는 회전축의 1차 공진(11000 rpm)과 관련되어 더욱 크게 나타난 것으로 보이며, 그림에서 15000 rpm에 도달한후 시간이 경과함에 따라 측정데이터의 주기가 변화하는것은 보다 자세한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

### 3-3. Acceleration with Oil-Supply

상온에서 오일을 공급하면서 27000 rpm까지 40초

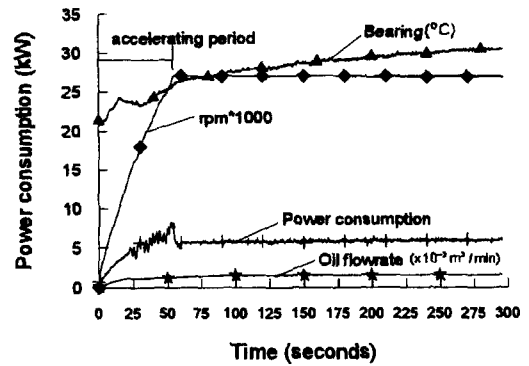


Fig. 8. The bearing temperature during acceleration with oil-supply (from 0 to 27000 rpm).

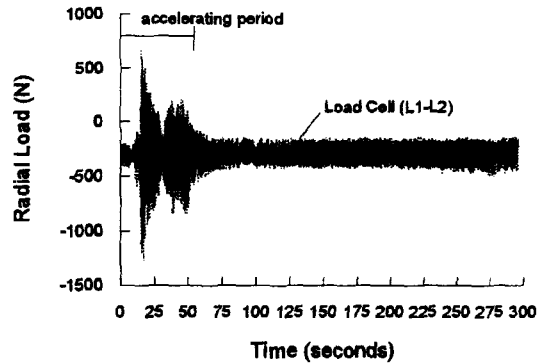


Fig. 9. The change of the radial load under the ball bearing support during acceleration with oil-supply (from 0 to 27000 rpm).

내에 가속을 하는 조건을 simulation하여 시험을 실시하였으며 그 결과를 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. 구동motor의 응답 특성 때문에 실제 가속 시간이 약 55초가 소요되었으며 오일 공급은 oil-pump를 시험 시작과 동시에 가동하여 시험을 수행하였다. 베어링의 온도는 약 55초동안에 10°C정도 증가하여 30초측정 마지막시 30°C에 달하였고 유량은 0.35 MPa의 압력에서 약  $1.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$ 이 공급 되었다. 가속시간에 있어 실제 엔진에서보다 긴 시간이 소요되었지만 측정된 베어링온도 및 구동motor동력 소비량으로부터 가속 시의 베어링의 윤활특성에는 이상이 없다고 판단된다.

베어링에서의 resistance는 Fig. 9로부터 알 수 있듯이 초기 가속 시에 증가한 후 베어링 내부로의 오일 공급이 초기에 비하여 증가하는 약 18초 이후부터 베

어링 내부 frictional resistance가 감소하여 약 35초 시점에 최저치를 보이고 오일 공급량의 증대로 인하여 다시 오일 자체의 저항에 기인한 resistance가 증가한 후 속도가 일정 속도에 이르면서 일정한 값을 보이고 있다. 그러나, 약 13초와 38초 시점에서의 저항치는 회전축의 공진과 관련되어 나타난 것으로 보이므로, 본 시험에서 저온에 의한 오일의 점성 증가에 따른 마찰저항 증가 문제는 구동motor의 동력소비량의 측정 값으로부터 가속 시에 약간의 증가가 있는 것 같으나 가속이 끝난 시점 이후에는 없는 것으로 추정되어진다. 왜냐하면 점성 증가에 기인한 마찰저항 증가 문제가 야기되었다면 가속이 끝난 시점 이후의 구동motor동력소비량의 값이 정상 운전 시에서의 측정 결과 (Fig. 4)인 5.358 kW보다 훨씬 큰 값이어야 하나 이 값과 거의 같은 값을 나타내 주고 있기 때문이다. 가속 시의 구동motor동력소비량이 8.232 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 엔진에 사용되는 ball bearing의 oil-starvation 윤활특성을 베어링의 회전속도 및 오일 유량을 제어하면서 고속에서 실험적으로 관찰하였다. 실제엔진에 사용되는 bearing support와 housing을 사용하여 베어링의 운용 상태를 엔진과 유사하게 구현하고, 엔진에서의 oil-starvation 조건들을 simulation하여 시험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 공급 오일 유량을 감소시키면, 베어링에서의 저항 특성은 현저히 좋아지며, 이를 가시화 할 수 있었다.
2. 고속에서 bearing cavity oil에 기인한 resistance가 베어링에서 발생하는 resistance의 지배 요인이었으며, 27000 rpm에서 resistance의 약 75% 이상을 점유하고 있다.
3. 상온 가속시 저온 고점도 오일에 기인한 resistance가 존재하나 bearing thermal performance 측면에서 윤활에 문제를 발생시키지는 않는다.
4. 소량의 오일이 베어링 내부에 존재한다면 엔진에서의 실제 운용시 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 윤활시 가스터어빈용 고속 ball bearing 윤활특성," 한국윤활학회지, 제12권 제4호, pp. 28-34, 1996.
5. Olaru, D. N. and Gafitanu, M. D., "Starvation in Ball Bearings," Wear, Vol.170, No.2, pp.219-234, 1993.