

엔진CON-ROD베어링 耐 SCUFFING性 向上에 관한 研究

A Study for Improvement of Engine Bearing Reliability Based on Temperature Analysis

최 재 권* 이 정 현*
J. K. Choi, J. H. Lee

ABSTRACT

Crank pin temperatures were measured and analyzed to find out practical method which can predict the engine bearing reliability. The measuring points were determined to be near the MOFT region and far from that by theoretical calculation. The effect of engine running condition, oil temperature, the change of oil circuit into bearing and crankshaft endplay on crank pin temperature were experimentally tested. The result obtained was as following. The crank pin temperature was dependent on oil film thickness and directly influenced by the change of test condition. Also the length of the crankshaft endplay was confirmed to be critical to connecting rod bearing failure.

In conclusion, we found that the measurement method of crank pin temperature can be used for predicting the engine bearing reliability.

1. 서 론

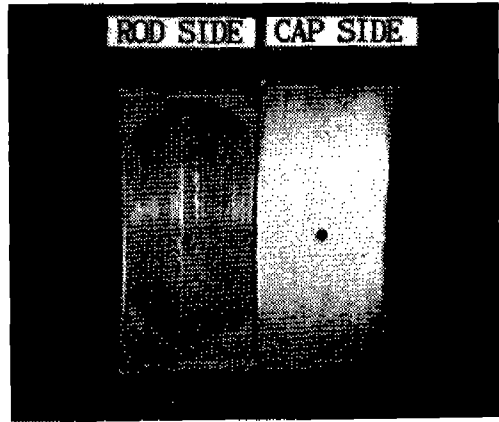
일반적으로 Con-Rod 베어링의 Reliability 예측에는 최소유막두께(Minimum Oil Film Thickness) 해석을 이용하지만, 이는 다음과 같은 문제점이 있다. 1) 계산은 유체유회 해석을 기본으로 하지만 최근의 고회전력, 고회전수 엔진의 경우에는 경계유회(Boundary Lubrication)이 상당부분 존재하며, 이러한 영역에서는 해석의 精度를 보증하기가 어렵다. 2) 여러종류의 베어링 재질 및 Crank Shaft 재질의 조합에 따른 성능 특성을 고

려하기가 어렵다. 3) 또한 계산에서는 Con-Rod, 베어링, Crank Pin 등의 Actual Dimension 및 가공특성 등을 고려할 수 없다. 결론적으로, Con-Rod 베어링의 개발 및 Reliability 평가시에는 실험적으로 최소유막두께를 측정하는 것이 가장 좋은 방법이지만, 이는 정량적으로 신뢰성 있는 Data를 얻기가 매우 어려운 실험으로서 이러한 실험을 수행할 수 있는 곳은 매우 드물다고 알려져 있다.

이러한 이유로 인하여 Con-Rod 베어링의 Scuffing 및 Wear에 대한 내구성 평가,

여러 설계인자가 이에 미치는 영향 등을 알기 위한 새로운 Index의 필요성이 대두된다.

이에, 본 연구에서는 Crank Pin 온도를 측정하고 이를 분석하는 것이 Con-Rod 베어링의 성능 평가 및 개선 업무를 위한 효율적인 방법이 될 수 있음을 확인 하였으며, 여러 엔진운전조건에 따른 Pin 온도특성, 베어링 Scuffing 발생시의 Pin 온도 양상 및 Oil 流量에 관련된 설계 인자의 변화가 Pin 온도에 미치는 영향을 실험적으로 알아 보았다. 또한 간단한 Pin 온도 예측 실험식을 만들었으며, 이의 타당성을 조사하였다.



2. Oil Film Thickness와 Pin 온도와의 관계

엔진 운전중 베어링에 Scuffing이 발생하였을 때는 그림 1과 같이 Con-Rod Side 베어링에서 먼저 진행되며, Crank Pin의 경우에는 Pin Inner Side에서 Scuffing이 먼저 발생한다.

그림 2는 실험 엔진의 해석에 의한 최소유막 발생 위치를 Crank Shaft 및 베어링 주위에 나타낸 것으로서, 최소유막 및 Dwell 영역은 주로 Pin에서는 Inner Side, 베어링에서는 Rod Side에 위치하며, 이러한 경향은 엔진 RPM 증가에 따라 더욱 심화됨을 볼 수 있다.

그림 3은 Crank Pin 온도 측정 결과의 예로서, Pin Inner Side의 온도가 Outer Side의 온도보다 높은 것을 볼 수 있는데, 이러한 경향은 RPM이 증가함에 따라 더욱 커진다. 이는 위에서 설명한 Scuffing 발생 경향과 잘 일치하는 것으로서, 최소유막두께 발생 및 Dwell 영역에서는 Scuffing 경향이 커질뿐 아니라 Pin 온도가 높게 측정됨을 알 수 있다. 同 RPM에서의 Pin Inner Side와 Outer Side의 온도차를 보아도 알 수 있듯이 Oil Film Thickness의 증가는 Pin 온도 저하를 나타내기 때문에, Pin Inner Side의 온도를 측정하면, 이는 Con-Rod

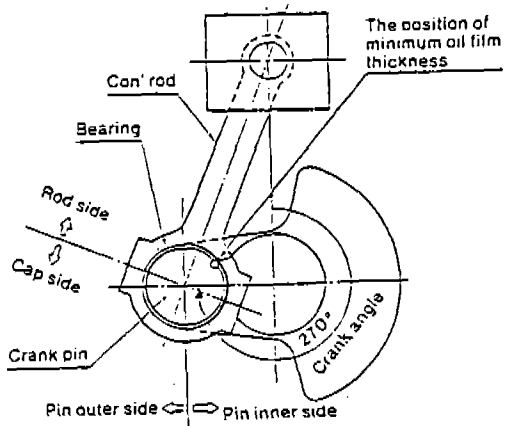


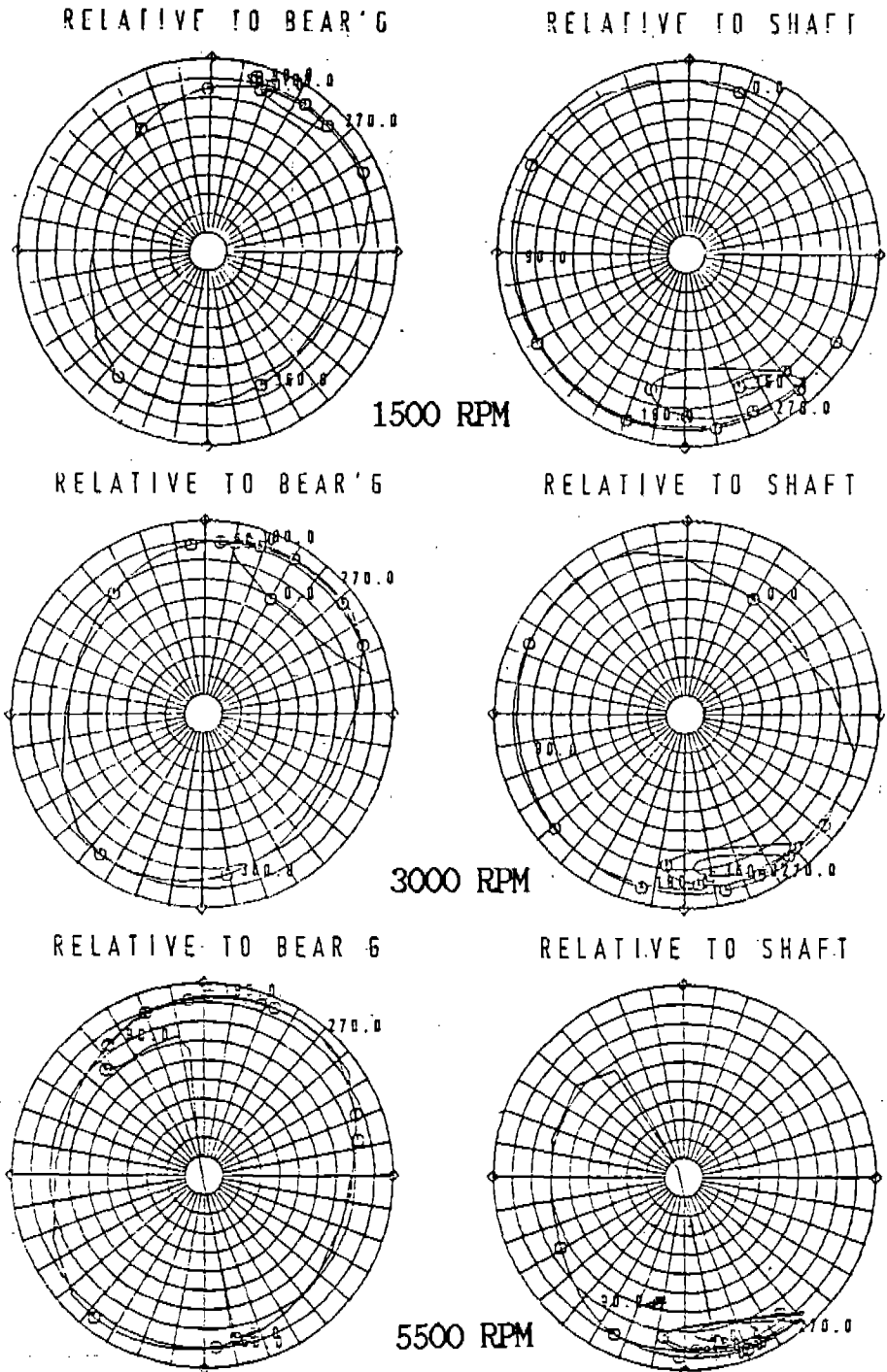
그림 1 베어링 Scuffing 양상

베어링의 내 Scuffing 性 판단기준으로 활용될 수 있다고 보고되어 있다.¹⁾

3. 실험 및 결과

3.1 실험장치 및 방법

표 1은 실험조건 및 엔진의 제원을 나타내며, 온도 측정에 사용한 엔진 및 Crank Shaft가 그림 4에 나타나 있다. Crank Pin의 Inner & Outer Side에 Hole을 뚫고 K-Type 열전대선을 장착하였고, Slip Ring을 통하여 엔진 밖의 계기까지 Lead Wire를 인출하였다.



	1500RPM	3000RPM	5500RPM
크기(μm)	1.24 μm	1.34 μm	1.01 μm

그림 2 Crank Pin 의 최소유막 발생 위치

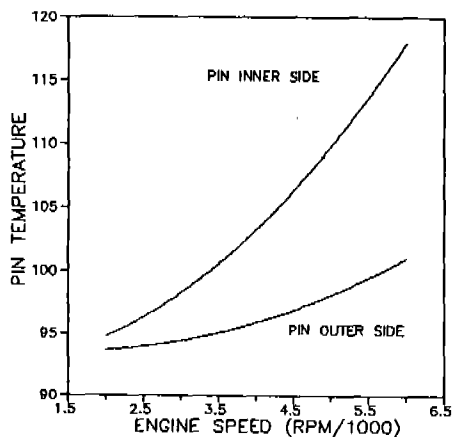
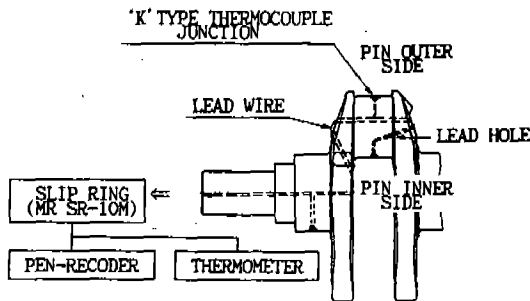


그림 3 실험 엔진의 Crank Pin 온도 경향



표 1 실험조건 및 엔진

Dyno	DC, 150 kw
실험 엔진	2.4L, DOHC
Eng. Oil 성상	SF, 10 W-30
Oil Temperature	90 °C ± 1
Oil Pressure	700 kPa/6000RPM
Water Temp.	90 °C ± 1



3.2 Con-Rod 베어링 Scuffing 과 Pin 온도와의 관계

Pin 온도는 엔진 RPM 및 Main Gallery Oil 온도의 증가에 대하여 그림 5와 같이 계단 형상으로 증가한다.

엔진이 베어링의 Scuffing 발생 가능성이 있는 한계에서 운전되면, 비정상적인 급격한 Pin 온도 상승이 반복되며, 이와같은 상태에서 계속 운전할 경우, 온도의 Peak 점이 떨어지지 않는 Point 가 나타나는데, 이것은 베어링에 Scuffing 이 발생하였음을 나타낸다. 이와같은 경우에서 Scuffing 이 발생한 Con-Rod 베어링의 사진 및 Pen Recorder 에 나타난 베어링 온도의 Peak 점이 그림 6에 나타나 있는데, 이는 후술하는 Con-Rod End Play 변화시험시 나타난 現象이다. 이와같은 현상과 전술한 Pin 온도와 유막두께의 관계

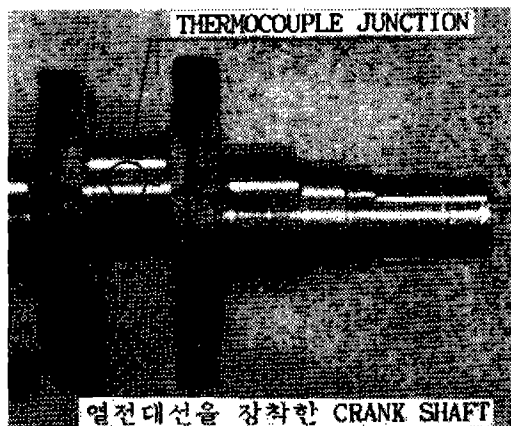


그림 4 온도 측정에 사용된 엔진 및 Crank Shaft

로부터 알 수 있듯이 Pin 온도를 여러 엔진 조건 및 Design 변경 사양에 대하여 측정하면, 제반 인자가 Con-Rod 베어링의 耐 Scuffing 性에 미치는 영향을 알 수 있다.

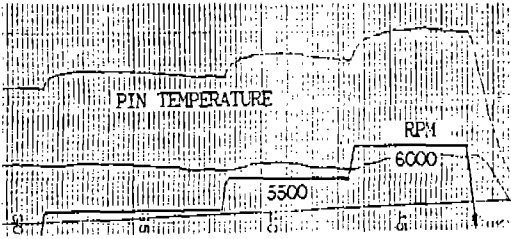


그림 5 엔진 RPM 변화에 대한 Pin 온도

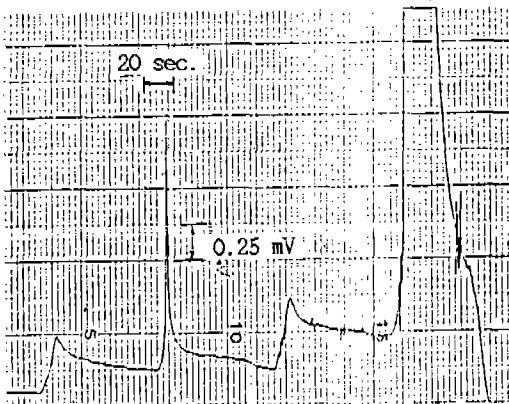
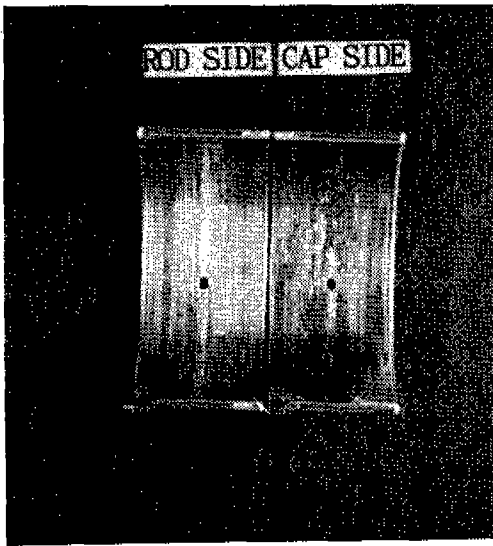


그림 6 베어링 Scuffing 발생시 Pin 온도

3.3 Crank Pin 온도 시험결과

(1) Eng. Speed와 Pin 온도

그림 7은 엔진 RPM 증가에 대한 Crank Pin 온도를 나타낸다. Main Gallery의 Oil 온도를 90°C로 일정하게 유지하고 엔진 회전 속도를 증가시키에 따라 Pin 온도는 Oil의 Shear Rate가 커짐에 따라 증가하는데, 최소 유막 발생 및 Dwell 영역인 Pin Inner Side는 Outer Side에 비하여 기울기가 크다. 그림 8은 엔진을 Motoring 시킨 경우인데, High Speed에서는 Firing과 비교하여 거의 차이가 나지 않고 있다. 이 결과로서 Crank Pin 온도는 慣性力에 의한 영향을 지배적으로 받고 있음을 알 수 있다.

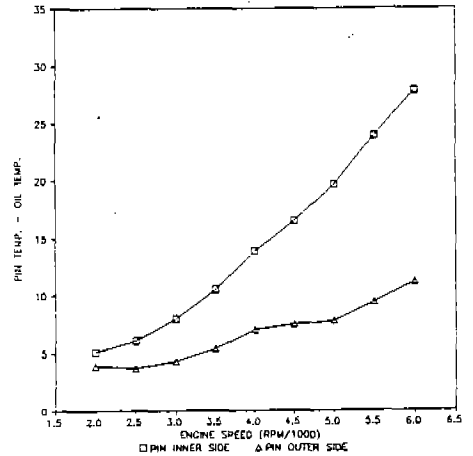


그림 7 엔진 RPM과 Pin 온도의 관계

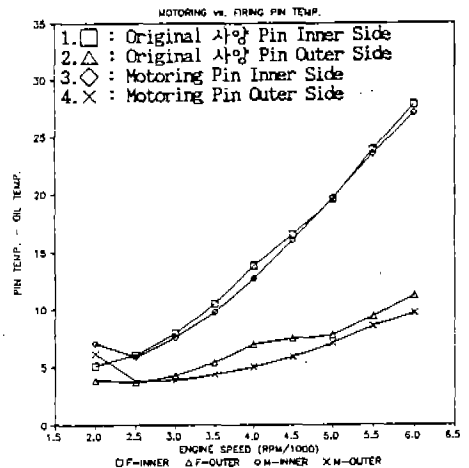


그림 8 Motoring 시의 Pin 온도

(2) 엔진 Load 와 Pin 온도

그림 9는 엔진의 Load 변화가 Crank Pin 온도에 미치는 영향을 나타낸다. 엔진의 Load 가 WOT에서 1/4 Load 까지 변화할 때 Crank Pin 온도변화는 3°C 정도로 적음을 알 수 있다. 이와같은 결과와 전술한 엔진 Speed의 영향에서 알 수 있듯이 베어링 Wear 및 Scuffing 性에 영향을 미치는 설계인자는 Cylinder Pressure 보다는 Con-Rod, Piston 과 같은 습동부의 Mass 및 Crank 회전 반경 등에 관련된 Inertia 임을 알 수 있다.

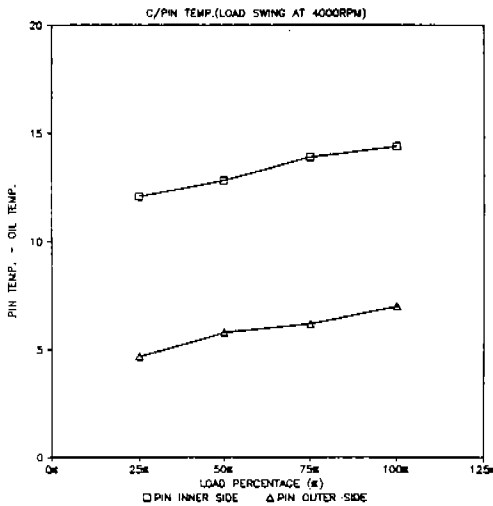


그림 9 엔진 Load 변화에 대한 Pin 온도

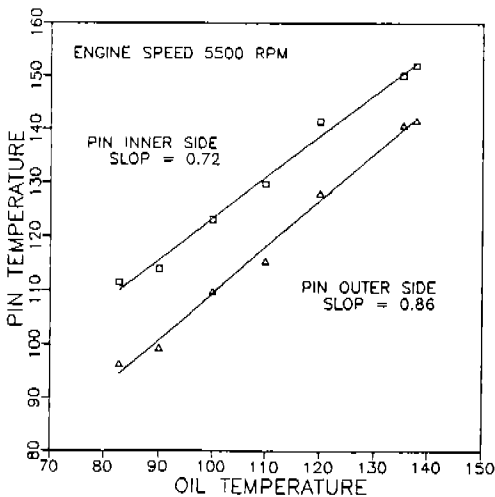


그림 10 Oil 온도 증가에 따른 Pin 온도 증가 양상

(3) Oil 온도와 Pin 온도

그림 10은 Main Gallery Oil 온도 증가에 대한 Crank Pin 온도의 증가 경향을 나타내는데, Oil 온도 증가량에 대하여 Pin Inner Side의 온도 증가량이 1보다 적은 0.72의 기울기를 갖고 있으며, Outer Side는 0.86의 기울기를 갖고 있다. 이것은 Oil의 온도가 증가하면 점도가 떨어지고 결과적으로 Oil의 Shear Rate에 의한 發熱量이 감소하기 때문이다.

3. 4 Crank Pin 온도의 실험식

베어링에서의 熱發生 계산법과 Crank Pin 온도의 실험 값을 이용하여, N.Soda²⁾는 엔진의 여러 설계인자가 포함되는 Crank Pin 온도예측 실험식을 고안하였는데, 이 식을 이용하면 엔진 설계단계에서 Pin 온도를 예측할 수 있으며, Con-Rod 베어링의 耐 Scuffing 性을 정량적으로 간단하게 평가할 수 있는 방법이 됨을 발표하였다. 이와같은 방법을 실험 엔진에 적용하여 다음과 같은 식을 얻었다.

$$\Delta T = 16.45 \left\{ \frac{1 + 0.01 \cdot N^2 / (\lambda DL)}{0.01 \cdot N^2} \right\}^{1/2}$$

$$DN(L)^{1/2} + 0.15 \frac{1 + 0.01 \cdot N^2 / (\lambda DL)}{0.01 \cdot N^2}$$

$$MRDN^3$$

ΔT : Crank Pin 온도 - Main Gallery Oil 온도

N : Eng. Speed (RPM/1000)

D : Bearing Dia. (m)

L : Bearing 폭 (m)

M : Inertia Mass (kg)

R : Stroke (m)

λ : 베어링으로의 Oil 流入量 및 Oil의 Thermal Conductivity에 관한 항

그림 11에 실험값과 위의 식으로부터 계산된 값과의 비교가 나타나 있다. 그림 12에는

여러 설계변수를 변화시켰을 때의 계산된 Crank Pin 온도 경향을 나타내고 있는데, 베어링의 Dimension 및 엔진 제원 변화에 대한 Crank Pin 온도 변화량의 크기를 정량적으로 볼 수 있다.

3.5 Oil 유량 변화시험

(1) Oil 流路 면적 증대가 Pin 온도에 미치는 영향

① Crank Shaft Oil Hole 變更

시험 엔진에서, 베어링으로의 流入 油량을

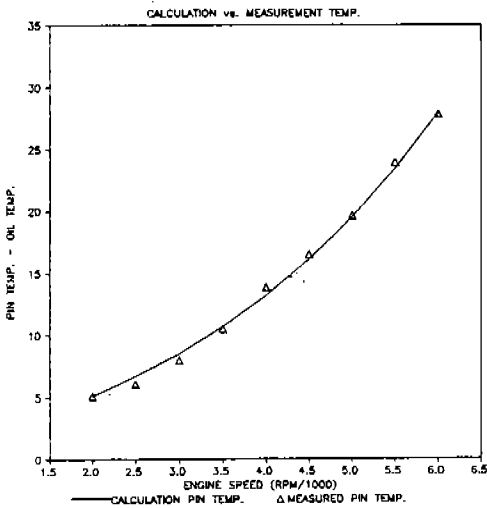


그림 11 계산된 Crank Pin 온도

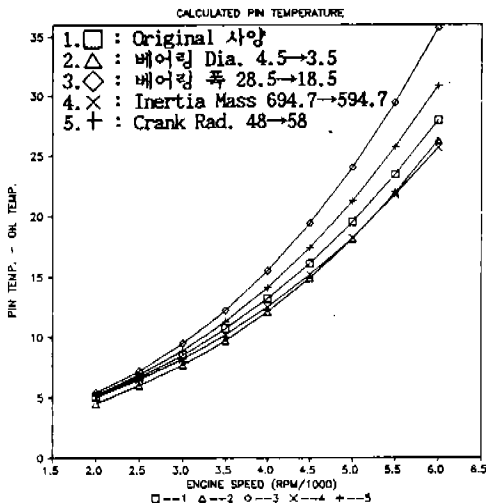
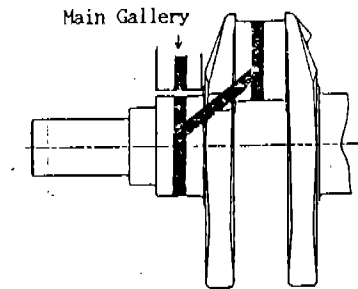
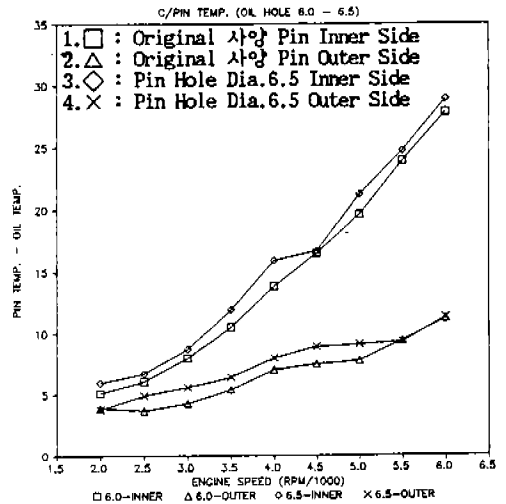


그림 12 각종 변수에 대한 Pin 온도

증가시키기 위하여 Crank Shaft Main Journal 및 Pin 部의 Oil Hole Dia 를 $\phi 6.0$ 에서 $\phi 6.5$ 로 변화시킨 사양에 대한 시험결과가 그림 13에 나타나 있는데, Original 사양에 비교하여 Pin 온도가 약 1°C 정도 높아졌음을 볼 수 있다. 이는 Hole Dia. 증대로 인한 베어링으로 Oil 유입량 증가효과보다는 베어링의 Load Capacity 감소로 인하여 온도가 상승되었다고 사료된다.

② Con-Rod End Play 증가

그림 14는 베어링의 Oil 流出 면적을 증가시키기 위하여 No.1 Con-Rod의 End Play 를 $200\ \mu\text{m}$ 에서 $310\ \mu\text{m}$ 로 증가시킨 경우이다. (Spec.의 상한치는 $250\ \mu\text{m}$) 이때는 실험을 수행하는 No.1 Con-Rod 에만 베어링 Scuffing이 발생(그림 6 참조)하였는데, 이는 End Play의 과도한 증가로 인한 油壓 保持 작용의 감소가 중요한 이유라 생각된다.



■ Dia. 변화부위

그림 13 Oil Hole Dia. 변화시 Pin 온도

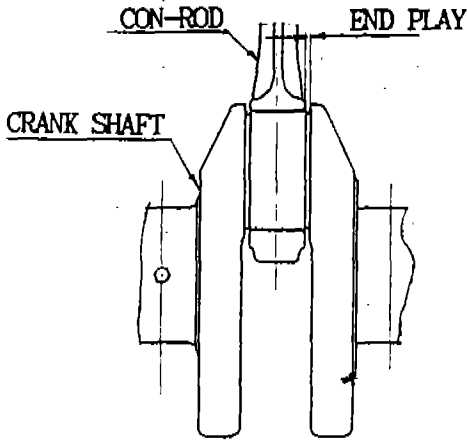
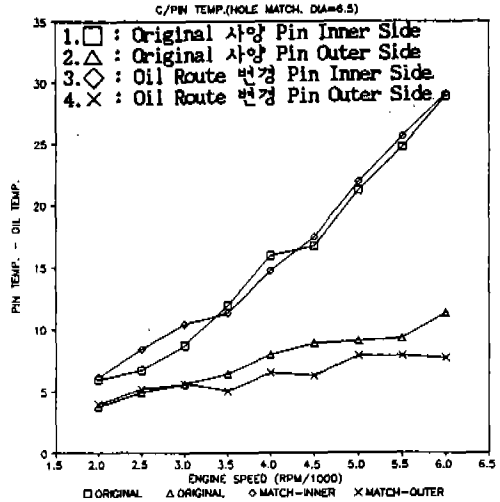
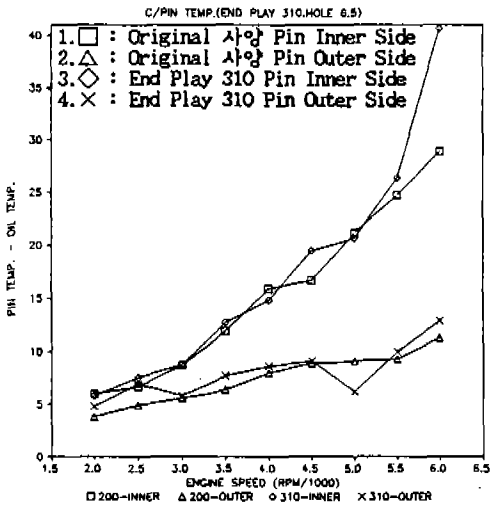


그림 14 Con. Rod End Play 증가시 Pin 온도

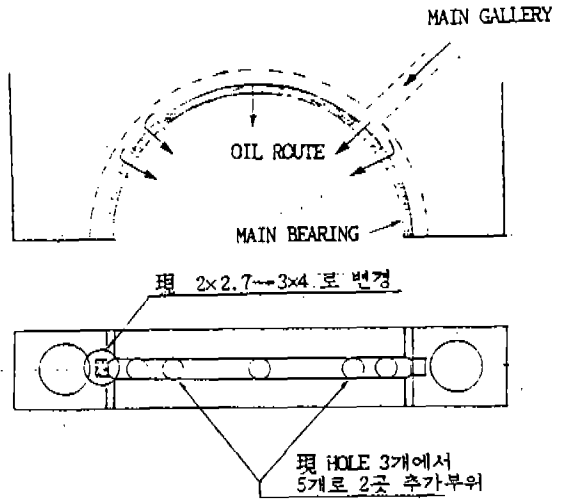


그림 15 Main Bearing Groove의 Oil Route 변경시 Pin 온도

③ Main Bearing Oil Route 變更

위의 변경 사양들의 시험결과에서 Pin 온도 저감효과를 얻지 못하였는 바, 이는 Main Bearing의 Groove 부분이 流路의 Bottle Neck이 되지 않는가 생각되어, Main Bearing에서 Main Journal로의 Oil Route를 변경시켜 보았으며, 이때 측정된 Pin 온도가 그림 15에 나타나 있는데, 이 경우에도 Pin 온도 저감 효과를 얻지 못하였다.

(2) Main Gallery Oil 압력과 Pin 온도
 同一 RPM, Oil 온도의 조건에서 베어링으

로의 Oil 流量을 감소시키기 위해 Main Gallery에서 Oil Pan으로 Oil 을 By-Pass 시켜가며 시험한 경우가 그림 16에 나타나 있다. 이때 Oil 압력은 4000RPM인 경우 620 kPa 에서 460 kPa 로 감소하였는데, 이로 인한 Oil 유량의 감소에도 불구하고 Pin 온도는 거의 영향을 받지 않고 있다. 이는 전술한 油量증가시험과 서로 Matching 되는 결과로서, 실험 엔진의 경우 Main Gallery 에서 Crank Pin 까지의 Oil 流入量은 부족하지 않으며, Con-Rod 베어링의 耐 Scufing性 향

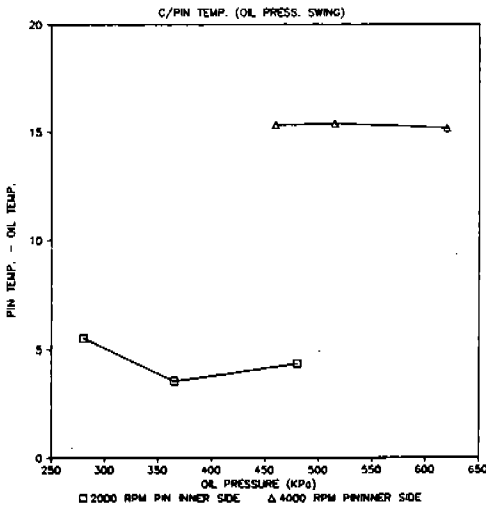


그림 16 Oil Pressure 변화에 대한 Pin 온도

상을 위하여는 다른 관점—즉, Crank Pin Oil Hole 위치, 베어링 Material, Pin의 가공법 등—에서 접근해야 함을 시사한다.

4. 결 론

1. 엔진 운전중 Crank Pin 온도는 Con-Rod 베어링의 최소유막 크기 및 발생위치와 밀접한 관계가 있으며, Con-Rod 베어링의 설계타당성 검토 및 개발시耐 Scuffing 性を 정량적으로 평가할 수 있는 판단기준으로 활용될 수 있다.

2. Crank Pin 온도는 Cylinder Pressure 보다는 엔진 RPM, 습동부의 Mass에 관련된 Inertia와 Oil 온도에 주로 영향을 받는다.

3. 6000RPM에서 Crank Pin의 Inner Side는 117.8°C, Outer Side는 101.2°C로서 Inner Side가 Outer Side에 비하여 16.6°C 높게 측정되었는 바, 이는 Inner Side가 최소유막두께 발생 및 Dwell 영역임에 기인하며, 이로부터 Oil Film Thickness가 감소하면 Pin 온도는 높아짐을 알 수 있다.

4. 실험 엔진에서 Oil 온도 증가에 따른 Pin Inner Side 온도는 0.72, Outer Side는

0.86의 기울기를 가지고 증가한다.

5. 실험 엔진에서 Crank Pin Oil Hole Dia. 및 Oil Route 등을 변경하여 Oil의流入량을 증가시켰으나 이로인한 Pin 온도 변화는 1°C 정도로 적었으며, Main Gallery의 Oil Pressure를 낮추어 Pin으로의 Oil流入량을 감소시킨 경우에도 온도변화는 적었다. 이는 실험 엔진의 경우 Crank Pin으로 공급되는 입구측의油量은 충분하며, Con-Rod 베어링의耐 Scuffing 性を 향상시키기 위하여는 다른 관점에서 접근해야 함을 시사한다.

6. Con-Rod 베어링의 Oil 유출면적을 증가시키기 위하여 Con-Rod End Play를 Spec.의 상한치 보다 60μm 증가시켰을 때 Con-Rod 베어링에 Scuffing이 발생하였는 바, 이는 End Play의 증가로 인한油壓 保持작용의 감소가 중요한 이유라 생각되며, End Play가耐 Scuffing 性に 영향을 미치는 중요한 인자임을 나타낸다.

7. 실험값을 기초로 Pin 온도를 비교적 정확히 예측할 수 있는 실험식을 만들었는데, 이는 베어링 Dimension 및 엔진 설계인자 변화에 대한 Pin 온도경향을 정량적으로 볼 수 있는 간편한 방법이 될 수 있다.

참 고 문 헌

1. K. Onogawa, M. Teramoto, and S. Uchida, "A Method for Predicting Connecting Rod Bearings Reliability Based on Seizure and Wear Analysis", SAE No. 880568, 1988.
2. N. Soda, "Bearings", Iwanami Shoten, p. 245, 1981. (in Japanese)
3. Paul R. Meernic, "Lubricant Flow to Connecting-Rod Bearings Through a Rotating Crankshaft", SAE No. 860229, 1986.
4. B.D. Campbell, R. Gojon, and Y. Serre, "Developments in Engine Bearing Design Techniques", AE Technical Symposium 1986, Paper No. 11.

5. S. Furuhami, “內燃機關の熱的諸問題(3)”, 內燃機關, Vol. 22, No. 279, pp. 50~54, 1983.
6. P.K. Goenka, R.F. Stumbo, “A Method for Determining Optimum Crankshaft Oil-Hole Location”, SAE No. 860357, 1986.