

# 알루미늄 합금 실린더 블럭을 적용한 가솔린 엔진의 냉각계 개발

## The Development of Cooling System in the Gasoline Engine with the Aluminum Alloy Cylinder Block

한 덕 주, 민 병 순, 신 승 용, 최 재 권  
D. J. Han, B. S. Min, S. Y. Shin, J. K. Choi



한 덕 주  
1961년 생  
연소전공  
현대자동차 중앙연구소  
선임연구원



민 병 순  
1966년 생  
운할 전공  
담임연구원



신 승 용  
1962년 생  
열유체 전공  
열유체 선임연구원



최 재 권  
정회원  
1955년 생  
운할 전공  
현대자동차 중앙연구소  
책임연구원

차의 무게는 각종 부대 장치 추가로 점점 더 무거워지고 있다. 이로 인해 엔진 연소 상태를 통한 연비 향상 뿐만 아니라, 차체 측면에서는 공기역학적인 설계 그리고 재료 측면에서는 경량화 재질을 사용하여 동력 손실을 극소화하는데 주력하고 있는 것이 세계적인 추세이다.

이러한 측면에서 실린더 헤드는 이미 알루미늄 합금화 하였고, 최근에는 알루미늄 블럭을 장착한 엔진이 개발, 적용되고 있다.

알루미늄 블럭을 만들 때 라이너 자체도 알루미늄으로 하는 경우와 주철 라이너를 삽입하는 두가지 형이 있는데, 전자는 내마모성을 유지하기 위해 소재 주조시 라이너 표면에 실리콘을 석출시켜 라이너를 가공하므로 생산성이 떨어져 경주용차 등 일부 특수 목적차에 사용되며, 대량 생산하는 엔진에는 라이너 삽입형만 채택하고 있다.

그런데 주철 라이너 삽입형은 공법상 알루미늄 모재와 라이너 사이에 공간이 존재할 수 밖에 없고, 이 공간은 열전달 측면에서 열접촉 저항이 되어 열흐름을 방해하는 역할을 한다. 따라서 이에 대한 평가가 이루어 져야 함에도 불구하고, 지금까지의 알루미늄 블럭 엔진에 대한 연구는 주로 주조법 자체<sup>(1),(2)</sup>와 소음, 진동<sup>(3)</sup> 그리고 라이너 변형<sup>(4)</sup> 등에 관한 것이었지 열전달 자체에 대한 연구는 전무한 상태이다.

### 1. 서 론

최근에는 자동차의 안전성이 요구되면서, 자동

본 논문에서는 주철 라이너를 삽입한 알루미늄

블럭 엔진 개발 과정에서 주조 불량 발생하였을 때, 냉각계에 일어나는 제반 현상을 분석하고, 이를 해결해 나가는 과정을 기술하였다. 이를 위하여 주철 블럭과 알루미늄 블럭을 장착한 엔진의 피스톤 온도와 블럭의 열유속, 열정산을 측정하였다.

## 2. 배 경

현대자동차에서 자체 개발한 B 엔진의 내구실험 중 주철 블럭에서는 피스톤 손상이 없었으나, 알루미늄 블럭에서는 피스톤 톱랜드 끝단에서 금

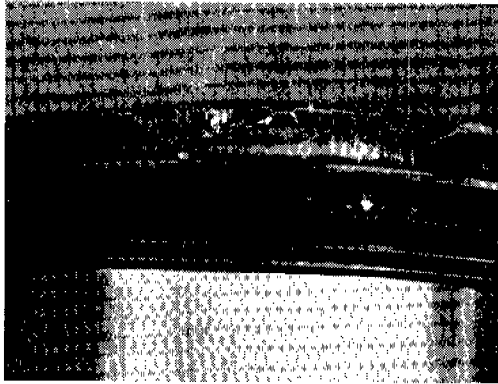


사진 1 알루미늄 블럭 장착 피스톤 톱랜드 끝단에서의 금속 전이 현상

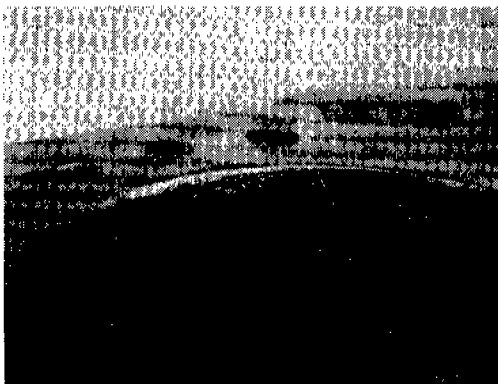


사진 2 알루미늄 블럭 라이너 상단부의 알루미늄 응착 현상

속 전이 현상(사진 1 참조)과 라이너 상단부에 알루미늄 응착 현상(사진 2 참조)이 발생하였다.

위와 같은 피스톤 손상 형태는 고온으로 인해 발생하는 열해 현상으로 알려져<sup>(5)</sup>, 주철 블럭 대비 알루미늄 블럭에서 피스톤이 고온이 된 원인을 규명하여 나가기에 이르렀다.

## 3. 실험엔진 및 측정기구

Table 1에 현대자동차에서 개발하고 있는 알루미늄 블럭을 장착한 B 엔진의 제원을 나타내었다. B 엔진의 개발 초기에 Table 2와 같은 주조법을 사용하였으며, 저압주조법은 블럭 상면을 Closed deck으로 하여 라이너 변형을 최소화하기 위해 채택한 공법으로써, 블럭 상면 3mm는 보어 부위도 알루미늄 합금으로 되어 있다.

블럭 각 부위 열유속 측정 센서는 Fig. 1에 나타난 것처럼 자체 설계한 K-type 이송형 열전대로써, 연소실 1mm 전의 금속면에서 3/16mm의 간격으로 온도측정이 가능하여 금속면의 열유속을 구할 수 있다.

피스톤 각 부위의 온도는 현대자동차에서 자체 개발한 가위형 링크기구(Fig. 2 참조)를 이용하여 측정하였다.

냉각수와 오일로의 전열량을 측정할 때 온도에

Table 1 Specifications of test engine.

항 목	제 원
배 기 량	1,795 cc
형 식	L4
보어×스트로크	82×85
최고 속도	6,000rpm

Table 2 Casting method of B engine.

적용 공법	채택 목적
저압 주조법	보어 변형 극소화
하형 주입	크랭크실 치수 안정
알루미늄 용탕 주입시 라이너 삽입	생산성 향상

다른 오차를 최소화하기 위해 엔진 출구의 냉각수 온도와 엔진 입구의 오일 온도를 90°C로 유지하였으며, 냉각수와 오일의 유량은 터어빈 유량계를 사용하여 측정하였다.

#### 4. 실험 결과 및 고찰

##### 4.1 알루미늄 블럭과 주철 블럭의 피스톤 온도

Fig.3의 피스톤 온도 측정 위치에 따라 주철과 알루미늄 블럭의 피스톤 각 부위의 온도를 Fig.4에 나타냈는데, 알루미늄 블럭의 경우가 주철 블럭보다 전반적으로 약 15~20°C 높다.

주철 블럭의 경우 주철 라이너의 두께는 4mm 이고, 주철의 열전도계수는 36.3W/m·K으로써 단위 면적당 열저항은  $0.110 \times 10^{-3} \text{K/W}$ 이다.

반면 알루미늄 블럭의 경우 주철 라이너의 두께는 3mm, 알루미늄 블럭 몸체의 두께는 5mm 이고, 알루미늄의 열전도계수는 150W/m·K으로써 단위 면적당 열저항은  $0.116 \times 10^{-3} \text{K/W}$ 이다.

이와 같이 주철 블럭과 알루미늄 블럭에서 열저항이 비슷하므로 피스톤 온도도 동일할 것으로 예상하였지만, 알루미늄 블럭의 피스톤 온도가 주철 블럭보다 높았다.

이 원인을 분석하기 위해 동일한 운전 조건에서 알루미늄 블럭과 주철 블럭의 각 부위의 온도를 측정, 비교하였다.

##### 4.2 실린더 블럭에서의 온도 구배와 열정산 측정 결과

Fig.5의 알루미늄 블럭의 온도 구배 측정 위치에 따라, Fig.6에 5,000rpm, 전부하에서 이송장치로 측정된 알루미늄 블럭의 온도 구배를 나타내었으며, 접촉 열저항이 존재하지 않는 라이너 사이의 TRR를 제외하고, 주철 라이너와 알루미늄 블럭 모체 사이의 접촉 열저항에 의하여 온도 급강하 구간이 존재함을 알 수 있다.

알루미늄과 주철 라이너의 접촉면에서 열저항이 생기는 것은 피할 수 없으며, 이에 따른 온도 강하 허용치는 2~5°C 정도인 것으로 알려져 있다. 그러나 Fig.4에 나타난 온도 급강하량이 최

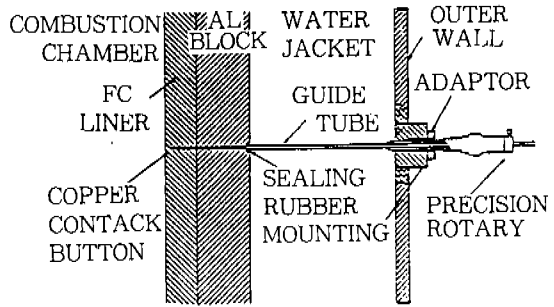


Fig.1 K-type traversing thermocouple.

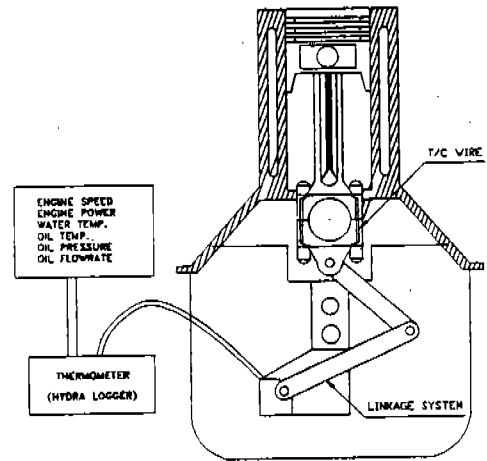


Fig.2 Piston temperature measurement system

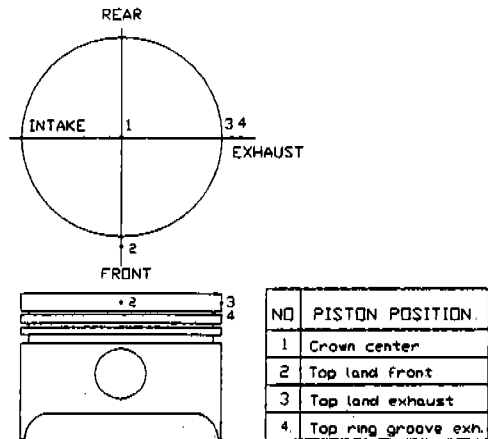


Fig.3 Position of piston temperature measurement.

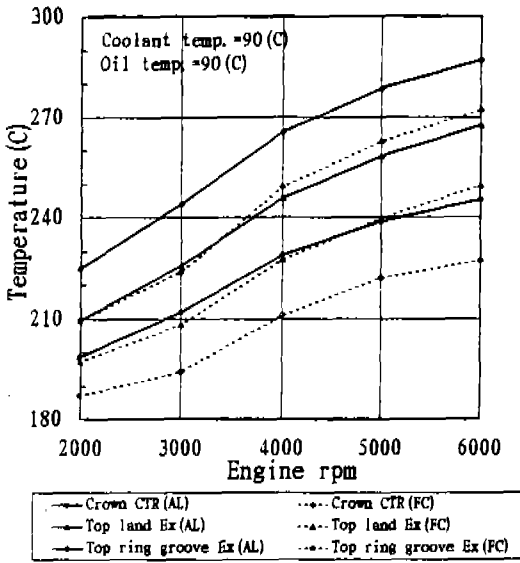


Fig.4 Piston temperature of the Al block & the cast iron block.

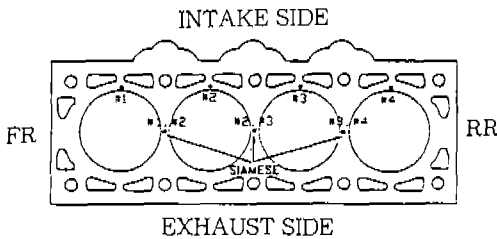


Fig.5 Position of Al block temperature measurement.

고 15°C까지 이르는 것으로 볼 때 알루미늄 블럭의 주조시 문제가 있음을 알 수 있다.

알루미늄 블럭 주조시 알루미늄 블럭 외벽의 미세한 기공을 막기 위해 樹脂含浸處理를 하는데, 알루미늄 블럭의 내면을 잘라 보면 사진 3에 나타난 것처럼 주철 라이너와 알루미늄 블럭 사이에 수지가 삼입될 정도로 TCR에서의 공기층이 크다. 그리고 주철에 비하여 알루미늄의 열확

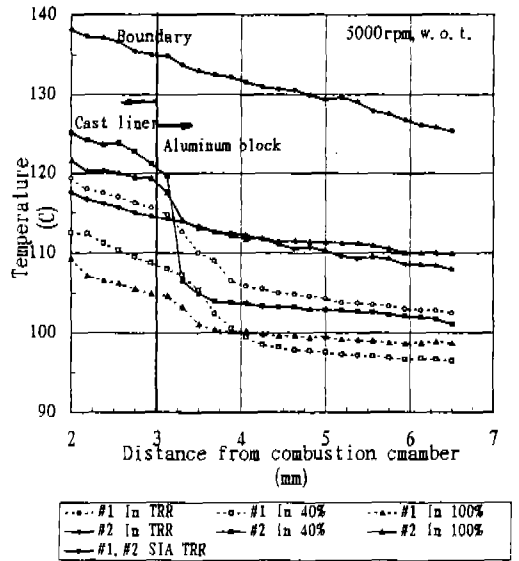


Fig.6 Temperature gradient of the Al block.

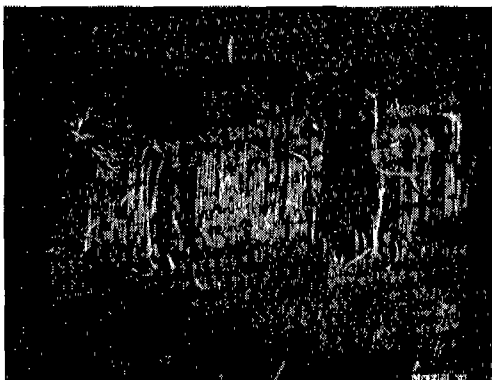


사진 3 알루미늄 블럭과 주철 라이너 사이의 수지 침투 현상



사진 4 알루미늄 블럭 TRR 부위의 용탕주입 불량 상태

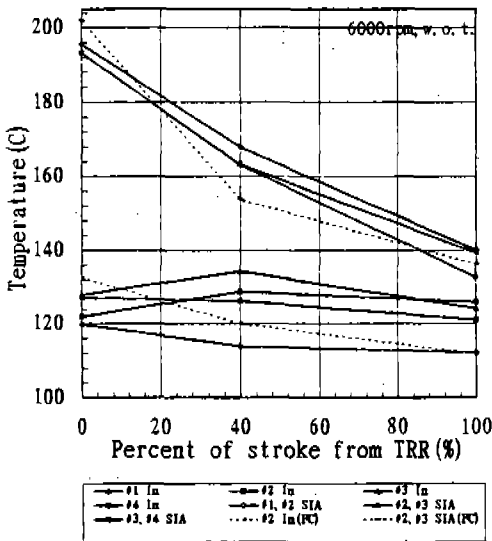


Fig.7 Temperature variation in the direction of stroke.

산계수가 4배 높아 용탕 주입시 액체로 유동할 수 있는 시간이 훨씬 짧기 때문에, 블럭 하부 주입시 형상이 복잡한 블럭 상단부에는 용탕충진이 불완전할 수 있는데, 본 엔진에서도 사진 4와 같이 TRR 부위에 용탕 주입이 않된 주조상태 불량률 나타 내고 있다.

한편 Fig.7에 스트로크에 따른 실린더 라이너 금속면 온도를 나타내었는데, 주철 라이너와 알루미늄 블럭 몸체 사이의 온도 강하량과 편차가 적은 #1 연소실에서 주철 블럭에 비하여 스트로크 방향에 따른 온도 분포가 균일하다. 즉 알루미늄 블럭의 주조가 완벽하게 되어 TCR에서의 온도 강하가 기준 내에 들어오면, 주철 블럭에 비하여 스트로크 방향에 따른 금속면 온도 분포가 좀 더 균일하게 됨을 알 수 있다.

Fig.8에는 알루미늄 블럭과 주철 블럭을 장착한 엔진에서의 방열량 실험 결과가 나타나 있다. 전 영역에 걸쳐 주철 블럭보다 알루미늄 블럭 엔진의 출력 대비 냉각수의 방열량의 비가 적으며, 6,000rpm, 전부하에서 알루미늄 블럭은 38.3%이고, 주철 블럭은 44.1% 이다.

알루미늄 블럭과 주철 블럭 엔진에서 같은 실린더 헤드를 사용하므로 냉각수의 전열량에 변

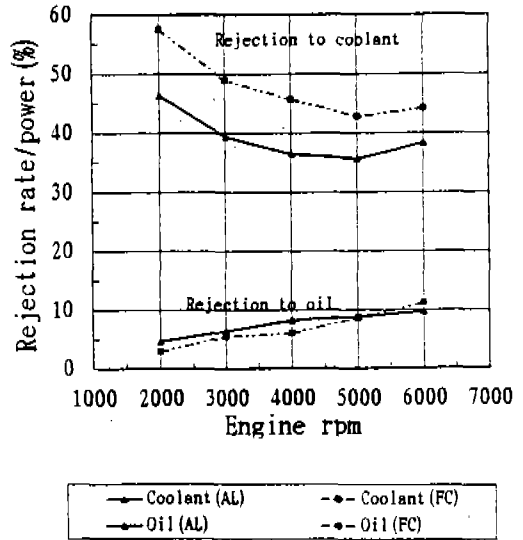


Fig.8 Heat balance vs. engine speed.  
(A/F=13,  $T_{water, out} = T_{oil, in} = 90^{\circ}C$ )

화를 주는 것은 블럭에서의 열전달 형태이다. 그런데 알루미늄 블럭과 주철 블럭의 열저항이 비슷한데도 불구하고, 알루미늄 블럭에서 냉각수로의 전열량이 주철 블럭보다 적다.

결론적으로, 알루미늄 블럭 제작시 주조성 불량에 의하여 열유동 저항이 커져 피스톤에서 라이너로의 전열량이 줄어들어 따라 냉각수로의 전열량이 감소하고, 그에 따라 피스톤 온도가 상승한 것으로 판단된다.

### 4.3 피스톤 온도 감소 위한 오일젯 적용

실린더 블럭의 주조성을 개선하지 않은 상태에서 피스톤 온도를 효과적으로 낮출 수 있는 방법은 오일젯 적용인데,<sup>(6),(7)</sup> 이에 대한 효과 및 엔진 냉각계에의 영향을 평가하고자 한다. 오일젯의 위치는 Fig.9와 같이 라이너 하단부의 배기 쪽에 있고, 오일젯을 통한 오일 분출유량은 일정 온도에서 엔진 회전수에는 관계없이 메인 갤러리 오일 압력에만 의존한다.

Fig.10은 오일과 냉각수의 온도를 각각 120°C, 110°C로 일정하게 유지했을 때, 오일젯 유무에 따라 알루미늄 블럭을 장착한 B 엔진의 피스톤 부위별 온도를 나타낸다. 오일젯을 설치하

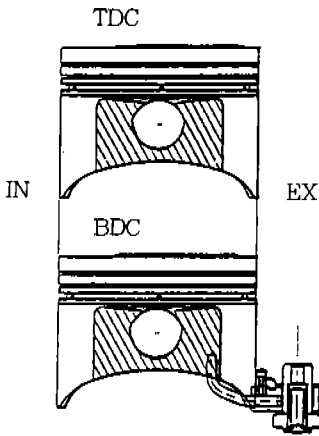


Fig.9 Position of the oil jet nozzle.

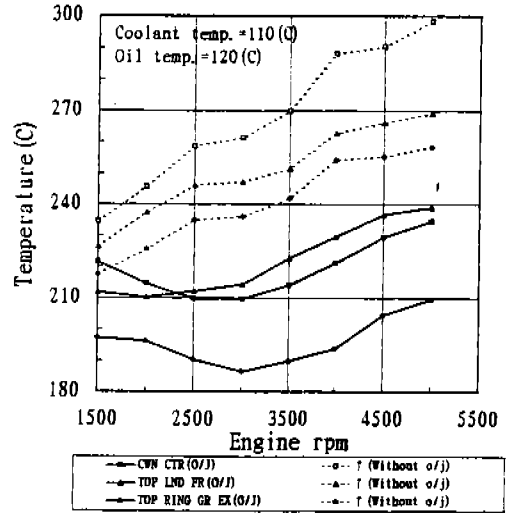


Fig.10 Piston temperature with & without the oil jet.

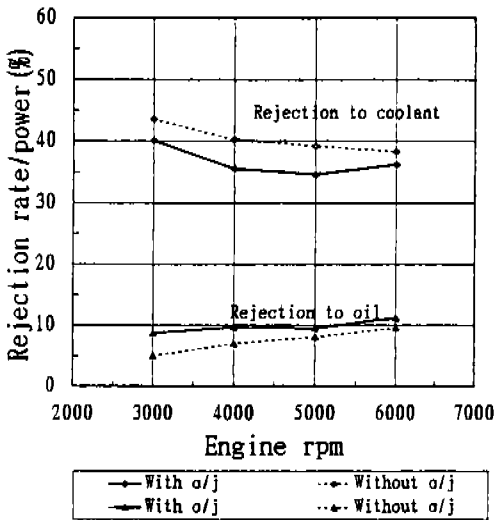


Fig.11 Heat balance vs. engine speed.  
(A/F=13,  $T_{water, out} = T_{oil, in} = 90^{\circ}C$ )

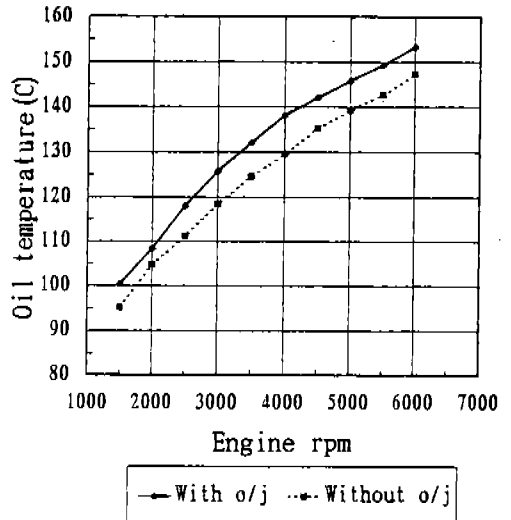


Fig.12 Oil temperature vs. engine rpm.

면 엔진 회전속도가 증가함에 따라 분출 유량이 증가하여 중속까지는 피스톤 온도가 오히려 감소하며, 중속 이후에 증가한다. 오일젯의 효과는 오일이 직접 부딪히는 크라운에서 가장 크며, 톱링 그루브와 톱랜드는 이차적인 온도 감소 효과를 보인다.

#### 4.3.2 엔진 오일 온도 상승

Fig.11에는 오일젯 유무에 따라 알루미늄 블록을 장착한 B 엔진의 단위 파워 당 냉각수와 오일로의 방열량의 비가 나타나 있다. 6000rpm, 전부하에서 오일젯 적용시 출력 대비 냉각수의 방열량의 비가 38.3%에서 36.2%로 감소하고,

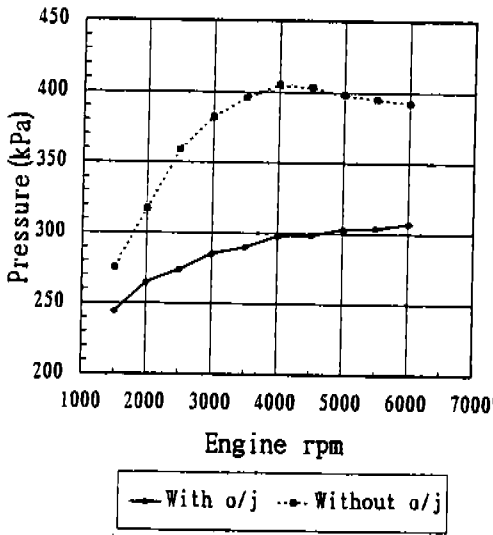


Fig.13 Oil pressure vs. engine rpm.

출력 대비 오일로의 방열량의 비는 9.6%에서 11.2%로 증가한다.

오일젯이 있을 때 오일로의 방열량이 커지고, 냉각수로의 방열량은 적어지는데, 이는 오일젯을 통과한 오일이 피스톤에서 열을 빼앗아, 피스톤에서 라이너를 거쳐 냉각수로 전열되는 열량이 적어지기 때문이다. 이로 인하여 Fig.12와 같이 동일 조건에서 오일젯을 장착하였을 때 오일 온도는 전 운전 영역에서 4~9°C 증가한다.

Fig.13에서 알 수 있듯이 오일젯을 장착하였을 때, 전 운전 영역에서 0.3~1bar의 압력 강하가 발생하고, 전 운전영역에서 메인 갤러리아에서의 오일 압력은 3bar 이하로 매우 낮은 수준이다. 이로 인해 각 섹션부로 공급되는 오일 유량이 감소하여 과도한 마모가 발생할 가능성이 있다.

즉 4.3.2 항과 4.3.3 항의 결과로부터 오일젯 적용시 오일 펌프의 용량 증대와 동시에 오일 온도 감소를 추진하여야 함을 알 수 있다.

본 연구에서는 오일 펌프의 용량 증대에 의한 영향은 파악하지 못하였으며, 4.3.4 항에 오일 온도 감소 방안에 대해서만 언급하고자 한다.

Fig.14에 오일젯 장착 유무 사양에 대하여 냉각수 온도에 따른 오일 온도 변화를 나타내었는

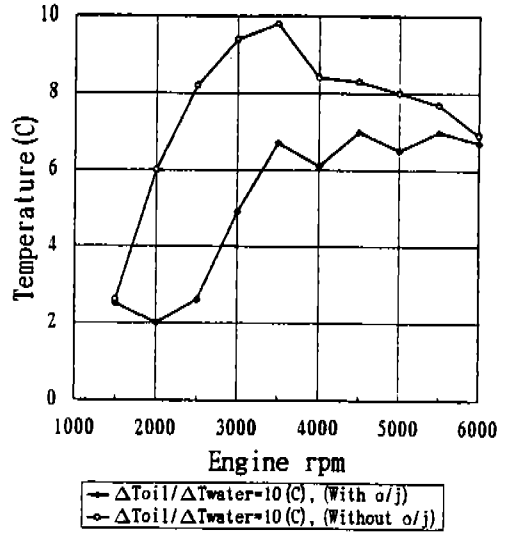


Fig.14 Oil temperature increment vs. water temperature with & without the oil jet.

데, 오일젯 적용시 냉각수 온도에 따른 오일 온도의 변화가 적다는 것을 알 수 있다.

이는 오일젯을 통해 피스톤을 냉각시킨 오일이 냉각수 통로와 접촉하지 않고 오일 팬으로 직접 떨어져 오일과 냉각수 사이에 열교환이 이뤄지지 않기 때문이다.

위의 시험 결과에서 오일 온도를 효과적으로 낮추기 위해서는 냉각수와 오일의 전열 면적이 넓은 오일 쿨러 장착이 필수적임을 알 수 있다.

전술한 바를 종합하면, 실린더 라이너의 구조 상태 개선 없이, 알루미늄 블럭을 장착한 엔진의 피스톤 손상을 방지하기 위하여 오일젯과 오일 쿨러 장착 그리고 오일 펌프 용량 증대를 위한 대폭적인 설계 변경이 요구된다는 것을 알 수 있다.

### 5. 실린더 라이너의 구조 상태 개선

실린더 라이너 주변의 용탕 유동성을 좋게 하기 위해 실린더 라이너의 그루브 형태를 변경하여 보았지만 효과가 없었다. 이에 대한 대안으로 알루미늄 용탕 주입시 주철 라이너 예열 온도를

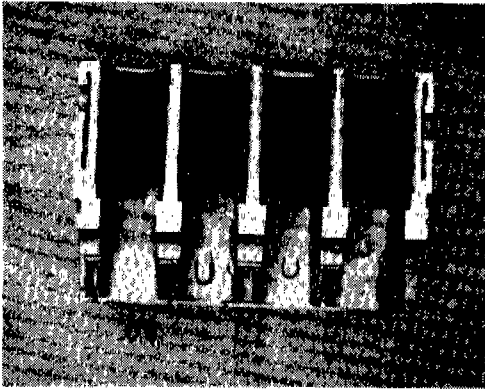


사진 5 알루미늄 블럭의 용탕 주입 개선후의 상태

변경시키고, 기존의 블럭 하부 주입에서 블럭 상부 주입으로 용탕 주입 방향을 바꾸어 용탕 입구 면적 확보가 어려운 실린더 블럭 상면에 용탕이 먼저 주입됨에 따라 TRR부위의 용탕 주입 불량은 대폭적으로 개선되었다(사진 5 참조).

## 6. 결 론

주철 블럭 엔진에서 알루미늄 블럭을 장착한 엔진 내구 시험시 발생하였던 피스톤 손상 원인 파악을 위해, 피스톤 온도와 블럭 금속면 각 부위의 열유속 및 열전산을 측정된 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

① 알루미늄 블럭 제작시 주철 라이너와 알루미늄 블럭 사이에 공기층이 크거나, 용탕 충전이 불완전한 주조 불량이 발생하면 열접촉 저항이 커져 엔진 열전달 경로에 큰 영향을 준다.

② 알루미늄 블럭 제작시 주조 불량이 발생하면 피스톤에서 라이너로의 전열량이 줄어들어 따라 냉각수로의 전열량은 감소하는데, 6,000rpm, 전부하에서 알루미늄 블럭의 출력 대비 냉각수로의 방열량의 비는 38.3%이고, 주철 블럭은 44.1%이다.

③ 알루미늄 블럭 제작시 주조 불량이 발생하면, 피스톤 온도가 15~20°C 정도 상승하여 피스톤 손상을 유발시킬 수 있다.

④ 알루미늄 블럭의 주조가 완벽하게 되어 주철 라이너와 알루미늄 몸체 사이에서의 열접촉 저항이 없다면, 스토르크 방향에 따른 금속면 온도 분포가 균일하게 된다.

⑤ 실린더 라이너의 주조 상태 개선없이 오일젯을 사용한 결과 피스톤의 온도를 만족할 만한 수준으로 감소시켰다.

⑥ 6000rpm, 전부하에서 오일젯 적용시 출력 대비 냉각수로의 방열량의 비가 38.3%에서 36.2%로 감소하고, 출력 대비 오일로의 방열량의 비는 9.6%에서 11.2%로 증가한다.

⑦ 오일젯 적용시 오일 펌프의 용량 증대와 오일 쿨러의 장착이 필수적이다.

## 참 고 문 헌

1. Hans-Heinz Hofmann, Klaus Schellmann, 1983, "Aluminum 390 Alloy Engine Blocks; Design and Manufacturing", Paper 830007 presented at SAE.
2. Gerhard Rennigner, Dietuch Abendroth, 1983, "Casting Engine Blocks in GK A l Si17 Cu4 Mg", Paper 830003 presented at SAE.
3. Makoto Shimura, Yoshiyuki Kimura, 1994. 12. "新型 Twin-Cam VQ Engine", 내연기관 33권 12호.
4. Horst Nauman, 1983, "Cylinder Head Gasket Requirements for Opened and Closed Deck 390 Engine", Paper 830002 presented at SAE.
5. Kazuo Izumi, Masato Soaki, 1989. 10, "Piston Top Ring Groove Wear 現狀解釋", 일본 자동차 공학회 학술강연회 초록집.
6. Manfred Rohrlé, 1976, "Gasoline Engine Piston Temperature-Some Influencing Factors", pp. 133~138.
7. Whitehouse. N. D., Stottes. A., Gray. C., 1964~1965, "Piston Thermal Loading", Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol.179 Pt. 3c, Paper 10