

<논 문> SAE NO. 933731

엔진 내 냉각수 유동형태가 연소실 벽면온도에 미치는 영향에 관한 연구

Effect of Coolant Flow Pattern on Metal Temperature of Combustion Chamber

민 병 순*, 최 재 권**
B. S. Min, J. K. Choi

ABSTRACT

The effect of coolant flow pattern on the metal temperature of the combustion chamber was studied in 1.5L and 1.8L gasoline engines. One of the main important points in the design of the water jacket is the increase of the coolant flow velocity.

In this paper, the water jackets of the cylinder head and the cylinder block were visualized for the purpose of improving the coolant flow pattern. By the use of this technique, the optimal design of the size and the location of the water transfer hole was possible. And, to lower the metal temperatures of the thermally critical parts, the drilled water passages were employed.

To investigate the effect of the improved flow pattern and the drilled water passages, the metal temperatures of the combustion chamber were measured. As a result of the temperature measurement, it was found out that both the change of flow pattern and the drilled water passages have significant effect on the reduction of the peak metal temperature.

주요기술용어 : Coolant flow pattern(냉각수 유동형태), Flow visualization(유동가시화),
Temperature measurement(온도측정), Water transfer hole(물통과구멍),
Drilled water passage(드릴가공 물통로)

1. 서 론

엔진의 고출력화 경향에 따라 연소실의 열적 부하도 그와 함께 증가되어 왔다. 이러한 열부하의 증대는 냉각성능 증대의 필요성을 초래하는데 이의 균형을 맞추지 못할 경우에는 엔진의

피로, 마모 등이 촉진된다. 뿐만 아니라, 냉각성능은 압축비의 증대에 의한 엔진의 효율 및 출력향상을 제한하는 노킹 문제와도 밀접한 관계가 있다고 알려져 있다. 엔진의 피로, 마모, 노킹 등에 증대한 영향을 미치는 냉각성능을 평가하는 기본적인 방법은 각 부위의 실제온도를 측

* 현대자동차 마북리 연구소

** 정회원, 현대자동차 마북리 연구소

정하는 것이다. C.C.J.French[4] 등이 정상상태에서 고정형 열전대(fixed thermocouple), 와이송형 열전대(traversing thermocouple), 파이로메타(pyrometer), 경도법(hardness recovery) 등의 방법으로 엔진 부품의 온도 측정시험을 수행하고 엔진의 운전조건 등이 각 부품의 온도에 미치는 영향에 대하여 소개한 바 있으며, 국내에서도 신승용[1] 등이 엔진 각 부위의 온도 및 열유속에 대한 실험을 수행하였다.

냉각성능의 부족으로 인하여 발생하는 문제를 해결하기 위하여 냉각수 유동속도의 증대, 금속 살두께의 감소, 냉각면적의 증대 등이 엔진 냉각계의 주요한 설계관점으로 등장하였다. 이중 금속 살두께와 냉각면적의 증대는 구조성 및 다른 제약조건이 많아 쉽게 변경시키기는 매우 어려운 일이다. 냉각수 유동속도를 증대시키는 방법으로는 물펌프의 성능증대에 의한 엔진 내 냉각수의 총유량을 증대시키는 방법도 있지만, 각 부위의 불균일한 유속을 완화시켜 유동정체점을 개선시켜 나가는 것이 최적화 설계의 관점에서 바람직하다고 할 수 있다.

山田[2] 등은 물재킷의 구조와 냉각수 유동형태를 변경시킨 개량헤드를 제작하여 냉각수 유속이 연소실 벽면온도와 노킹억제에 미치는 영향에 대하여 조사한 결과를 보고한 바 있으며 물재킷 내의 냉각수 유동형태를 개선시키기 위하여 레이저 유속계를 사용하여 유속을 측정하였다. Yuzo Aoyagi[3] 등은 유동형태를 개선하기 위하여 오일필름법(oil film method)과 트레이서(tracer)를 직접 관찰하는 방법을 사용하였다.

본 논문에서는 금속 살두께와 냉각면적은 변화시키지 않으면서 냉각수 유동속도를 증대시키는 방법 및 그 효과에 대하여 연구하였다. 물펌프 성능에 의존하는 총유량 증대의 방법이 아닌 물 펌프는 고정시키고 유속이 약한 부분만 상승시켜 유동속도를 개선시켰으며 이의 개선 여부는 냉각수 흐름을 가시화하여 관찰하였다. 냉각수의 유동을 관찰함으로써 냉각수의 유동형태를 결정짓는 중요한 설계변수인 실린더헤드 가스켓의 물 통과구멍을 최적화하였다. 유동 가시화에는 트레이서를 냉각수와 함께 순환시

키며 유동형태를 판단하는 직접관찰법을 사용하였다. 트레이서로서는 거품, 알루미늄 가루 등도 사용되나 본 연구에서는 폴리스티렌 비드(polystyrene bead)를 사용하였다. 재래식 유동형태의 냉각계를 갖고 있는 엔진과 개선된 유동형태의 냉각계를 갖고 있는 엔진의 온도를 각각 측정하여 유동형태가 열부하가 극심한 부위의 온도저감 및 실린더 헤드의 균일한 온도분포에 어떠한 효과를 미치는가를 알아보았다.

이와함께 최근들어 열부하가 특히 높을 것으로 우려되는 부위에 사용되고 있는 드릴가공 물통로의 효과를 확인하기 위하여 드릴가공 물통로가 설치되어 있는 엔진을 그 상태에서 온도를 측정하고, 드릴가공 물통로를 막은 후에 측정한 온도와 비교해 봄으로써 그 효과를 비교 검토하였다.

2. 실험장치 및 측정방법

2.1 실험 엔진

본 실험에서 사용된 엔진은 직렬 4기통 연료 분사식 엔진으로서, 1.5L 엔진과 1.8L 엔진 각각에서 유동가시화 및 온도측정 실험이 이루어졌다. 엔진 및 냉각계의 제원을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Specifications of test engines

ENGINE	A-ENG.	B-ENG.
형식	L-4	L-4
배기량	1495	1795
압축비	10.0	10.0
BORE×STROKE	75.5×83.5	82.0×85.0
밸브배치	DOHC	DOHC
W/PUMP 토출량	130L/min, at 6000rpm 10.4mAq	158L/min, at 6000rpm 10mAq
COOLANT	50% antifreeze	50% antifreeze
온도제어방식	입구제어	입구제어

2.2 유동형태의 개선

2.2.1 유동가시화

실린더 헤드 내의 유동형태를 관찰하기 위하

여 Fig.1과 같이 실린더 헤드의 상부를 물재킷이 보일때까지 절단하였다. 이때 주의해야 할 점은 물재킷의 손상은 최소로 하며 최대의 관측 면적을 확보해야 하는 것이다.

가공된 실린더 헤드의 상면을 눈으로 관찰할 수 있도록 상면을 투명 아크릴 판으로 덮은 후 엔진을 조립하여 외부의 펌프로부터 물을 송출하여 엔진을 통과한 후 수온조절기(thermostat)로 빠져 나갈수 있게 하였다. 실험의 구성도를 Fig.2에 도시하였다. 유동형태의 관찰을 가능하게 하기 위하여 실린더 헤드의 물재킷을 검은 색으로 도색하고 물과 함께 순환시켜 이를 관찰함으로써 물의 유동속도 및 유동형태를 관찰할수 있었다. 이렇게 관찰된 결과를 캠코더(cam-corder)를 통하여 기록해 놓고 후에 분석할 수 있도록 하였다.

실린더헤드가스켓의 물 통과구멍의 위치와 크기를 변화시켜가며 유동을 관찰하여 실린더 헤드 전반에 걸쳐 유동이 균일하고 유동정체점을 만들지 않는 최적의 실린더헤드가스켓을 개

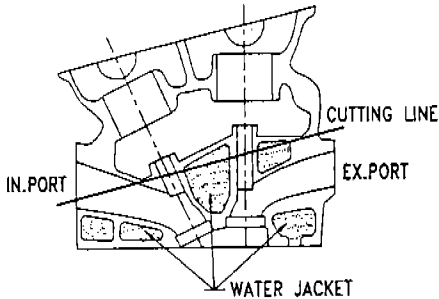


Fig.1 Cross sectional view of water jacket

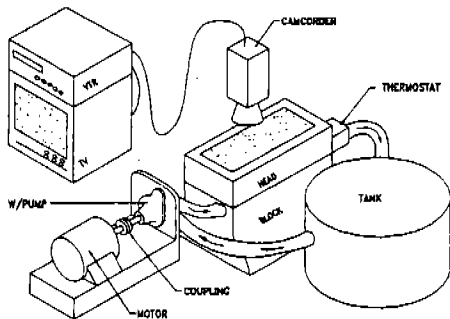


Fig.2 Test rig of flow visualization

발하였다. 또한 개발된 실린더헤드가스켓을 실제 온도측정시험에 투입하여 그 효과를 검토하였다.

2.2.2 유동형태의 비교

앞절에서 기술한 방법으로 균일한 유동을 나타내며 유동정체점을 최소화하는 유동형태를 개발하였으며 이를 Fig.3에 도시하였다. 일반적으로 냉각수의 입구인 물펌프는 실린더블록의 앞쪽에 위치해 있고 출구인 수온조절기는 실린더헤드의 뒷쪽에 있다. 실린더블록에서 출발한 냉각수가 실린더헤드가스켓의 물 통과구멍을 통과하고 실린더헤드를 지나서 빠져나가기 때문에 1번 실린더 주위의 냉각수 유동이 4번 실린더 주위에 비하여 상대적으로 빈약하게 된다. Fig.3(a)에 재래식 냉각수 유동형태를 나타내었다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 헤드내의 각 실린더간 차이를 최소화하는 유동형태를 개발하여 Fig.3(b)에 나타내었다.

실린더블록의 배기측에서 출발한 냉각수가 기존의 유동형태는 배기와 흡기측으로 갈라진 후 실린더헤드로 냉각수를 보내면서 서서히 유동속도가 감소하게 되어 있는데 반해 개발된 유동형태는 블록의 배기측에서 출발한 냉각수가 배기측 1번 실린더에서 일부분 실린더헤드로 빠져나간 후 흡기측 1번 실린더에 도착할 때까지 실린더헤드로 빠지지 않고 속도를 일정하게 유지시키면서 실린더블록을 U자 형태로 한바퀴 돌게 되어 있다. 1번 실린더 주위에 집중되어 있는 물 통과구멍을 통하여 실린더헤드로 상승하기 때문에 실린더헤드 및 실린더블록에서 유동이 균일하게 된다.

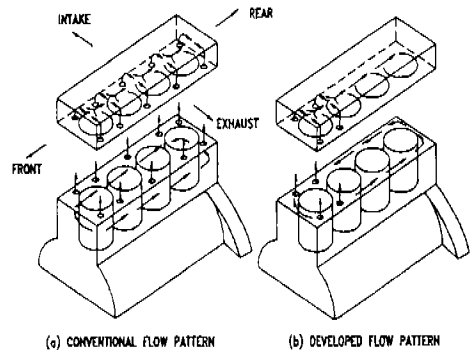


Fig.3 Comparison of coolant flow pattern

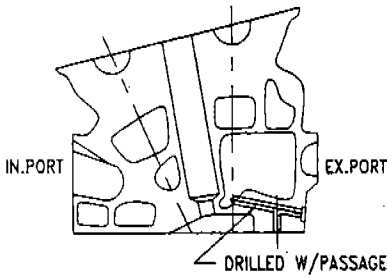


Fig.4 Cross sectional view of water jacket with drilled water passage

2.2.3 드릴가공 물통로

일반적으로 실린더블록보다 실린더헤드의 열부하가 크고 그 중에서도 스파크플러그와 배기밸브시트 사이가 가장 온도가 높다고 알려져 있다. 이 부위의 온도를 저감시키기 위하여 Fig.4에 보는 바와 같이 별도의 물통로를 설치하고 냉각수의 유동량을 증가시켜 열전달 계수의 향상을 꾀하였다. 이 또한 유동가시화로서 흐름을 확인하고 온도측정으로서 그 효과를 검증하였다.

2.3 온도측정

시험엔진들에 열전대를 장착하고 운전중 각 부위의 온도를 측정하였다. 실린더헤드의 온도 측정위치는 Fig.5와 같이 총 7곳으로 스파크플러그와 배기밸브시트 사이에는 실린더 간의 차이를 보기 위하여 각 실린더에 모두 장착하였고 (Fig.5의 H1, H2, H3, H4) 실린더 중 가장 온도가 높을 것으로 예상되는 2번 실린더에는 스파크플러그/흡기밸브시트(H5), 배기밸브시트/배기밸브시트(H6), 흡기밸브시트/흡기밸브시트(H7) 등 3개의 열전대를 추가로 장착하였다. 실린더블록에서의 온도측정위치는 Fig.5(b)와 같이 총 11곳이다. 여기서 톱데크(top deck)로부터의 깊이는 톱링의 상사점에서의 위치로 하였다.

열전대를 장착할 때 물재킷과의 관통을 피할 수 없는 경우가 많다. 이때 누수를 방지하여야 하는데 이를 위한 장착도를 Fig.6에 나타내었다. 물재킷 앞뒤로 고무시일과 실란트로서 누수를 방지하였고 연소실 1mm 전방까지 뚫린 구멍으로 열전대를 밀어 넣고 고정시켜 연소실 1mm 앞 금속의 온도를 측정하였다.

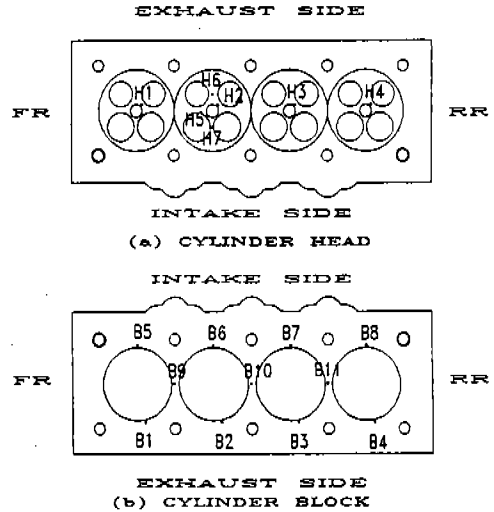


Fig.5 Temperature measurement position

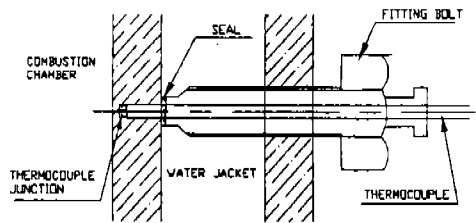


Fig.6 Cross sectional view of thermocouple & fitting device

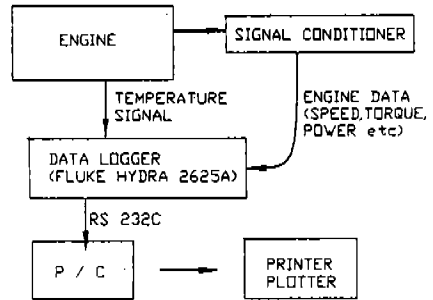


Fig.7 Data logging system

준비된 엔진을 동력계에 설치하고 엔진의 운전조건을 맞춘 후 데이터를 샘플링하였다. 데이터 취득 및 분석 시스템을 Fig.7에 도시하였다. 신호조정기(signal conditioner)를 통한 일반적인 엔진데이터의 신호(엔진회전속도, 토크, 연료

소비율 등)와 장착된 열전대로부터의 온도신호를 데이터 로거(data logger)를 이용하여 샘플링한 후, P/C로 전송하여 분석하였다.

3. 결 과

3.1 유동형태의 효과

Fig.8에 A-ENG. 실린더 헤드의 엔진회전수에 따른 온도측정결과를 나타내었다. 엔진속도의 증가에 따라 출력도 선형적으로 증가하므로 측정된 온도도 같은 양상으로 증가하였다. 재래식 유동형태와 개발된 유동형태에서의 온도값이 저속에서보다 고속으로 가면서 차이가 크게 됨을 알 수 있다. Fig.9에 6000rpm에서 스파크플러그와 배기밸브시트 사이의 온도를 각 연소실 별로 도시해 놓았다. 냉각수 유동형태의 변화에 따라 1, 2번 실린더의 온도가 크게 낮아지고 3번 실린더까지도 효과가 있으며, 4번 실린더의 온도는 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 이는 엔진 전체의 유량은 변화시키지 않으면서 각 실린더 별 냉각수 유동의 불균일한 양을, 유동형태를 개선함으로써 1, 2번 실린더의 유동을 증대시켜 전체적인 차이를 줄인데 기인한다. Table 2에 6000rpm, 전부하에서 스파크플러그와 배기밸브시트 사이의 온도를 각 실린더 별로 표시하였다. 2번 실린더에서의 온도저감으로 인하여 각 실린더간 최대온도차($T_{max} - T_{min}$)가 24.5°C에서 15.9°C로 감소되었다. 이것으로 유동형태가 개선되어 실린더간 온도 불균일량이 9°C정도 개선됨을 알 수 있다.

Fig.10에 개선된 유동형태를 적용시켰을 때 측정된 실린더블록 온도를 나타내었다. 상사점에서 튼링의 위치에서는 각 실린더 사이인 사

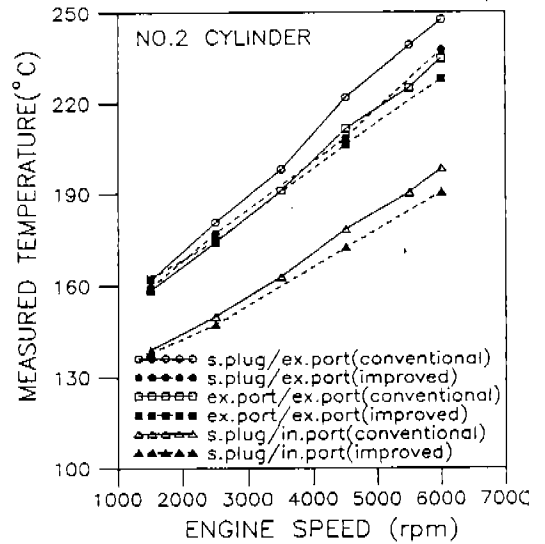


Fig.8 Measured cylinder head temperature of A-ENG.

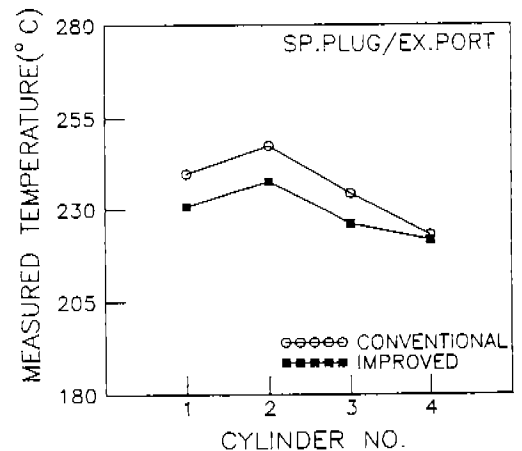


Fig.9 Measured temperature variation of individual cylinder of A-ENG. cylinder head

Table 2 Temperature variation of each cylinder(Sp. plug/Ex. port)

Cylinder No.		1	2	3	4
Temperature (°C : 6000rpm, WOT)	Conventional	239.8	247.6	234.4	223.1
	Improved	230.8	237.7	226.2	221.8
$T_{max} - T_{min}$ (°C)	Conventional	24.5			
	Improved	15.9			

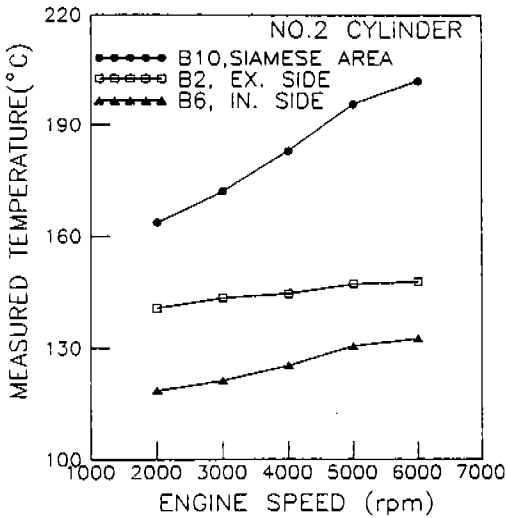


Fig.10 Measured cylinder block temperatures of B-ENG.

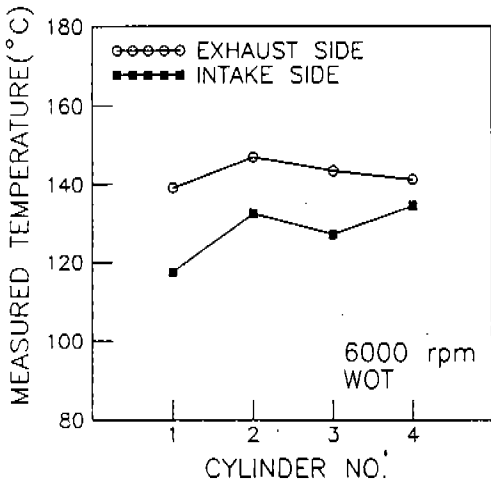


Fig.11 Measured temperature variation of individual cylinder of B-ENG cylinder block

이아미즈(siamese) 부근의 온도가 가장 높고, 배기측이 흡기측보다 온도가 높음을 알 수 있다. Fig.11에 각 실린더간 온도차이를 나타내었는데 헤드로의 상승류가 강하게 존재하는 1번 실린더의 온도는 낮으며 거의 균일한 횡류(side flow)가 형성되는 2, 3, 4번 실린더의 온도변화는 크지 않음을 알 수 있다.

Fig.12에 재래식 유동형태와 개발된 유동형태

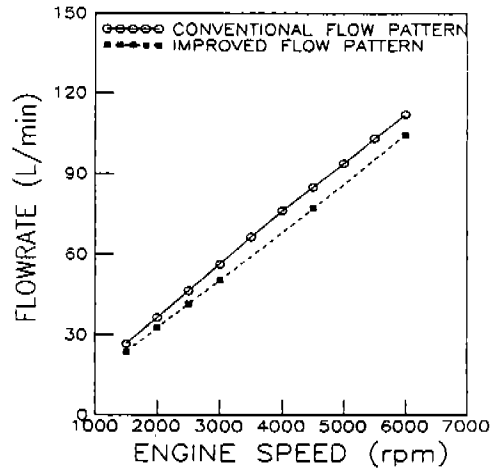


Fig.12 Coolant flowrate of A-ENG.

에서 냉각수의 유량을 도시하였다. 이때 냉각수의 유량은 히터만 빠진 실차냉각시스템을 적용시켰을 때 라디에이터로의 유량을 의미한다. 동일한 엔진에서 동일한 물펌프를 사용하였는데도 냉각수 유량이 6000rpm에서 112L/min에서 개발된 유동형태를 적용할때 7L/min의 감소를 나타내었다. 이는 냉각계의 유동저항의 증가에 기인한다. 일반적으로 냉각수 유량을 결정하는 요인은 물펌프의 성능과 냉각시스템의 저항이며 시스템 저항값에 대한 엔진의 영향은 주로 실린더헤드가스켓 물 통과구멍의 총면적에 의존한다고 알려져 있다.

본 실험에서 물 통과구멍의 총면적이 변하지 않았음에도 불구하고 개선된 유동형태의 냉각수 유량이 줄어든 이유는 냉각수 유로의 길이가 증가되었기 때문이다. 개선된 유동형태는 2, 3, 4번 실린더 주위의 물 통과구멍을 지나 실린더헤드의 수온조절기로 나가는 기존의 유동형태와는 달리 대부분의 냉각수가 실린더블록을 한 바퀴 돌고 헤드의 1번 실린더로 상승하여 4번 실린더까지 지나가기 때문에 냉각수 유로의 길이가 증가되었다. 이에따라 저항값은 20% 가량 커지고 총 유량은 6% 감소되었다.

3.2 드릴가공 물통로의 효과

B-ENG의 드릴가공 물통로를 막고서 온도측

정을 수행하여 그 효과를 확인해 보았다. Fig.13 에 드릴가공 물통로가 있는 경우와 없는 경우에 2번 실린더의 주요 부분에서의 온도를 나타내었다.

실린더블록에서 드릴가공 물통로를 지난 냉각수가 스파크플러그 보스의 배기밸브시트 쪽으로 분출되기 때문에 배기측에만 효과가 있었으며 6000rpm에서 최고 22.5°C의 온도가 상승되었다. Table 3에 드릴가공 물통로의 유무에 따른 최고온도의 변화를 나타내었다.

Table 3으로부터 드릴가공 물통로는 실린더 중에는 2번 실린더가, 그 중에서도 스파크플러그/배기밸브시트 사이가 가장 효과가 크며 그 효과는 약 20°C임을 알 수 있다. 즉 드릴가공물통로는 실린더헤드의 열부하가 가장 큰 위치에

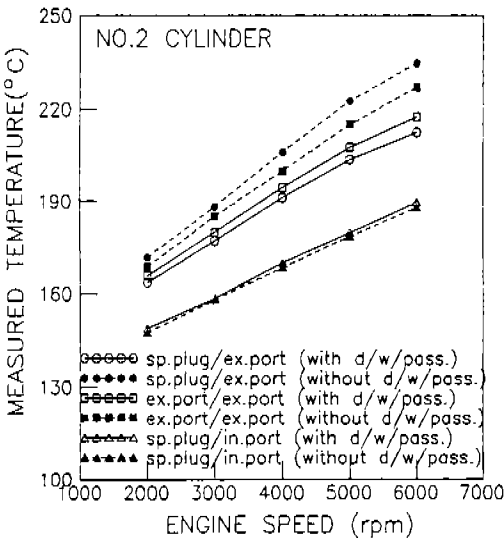


Fig.13 Measured temperature of B-ENG. with & without drilled water passage

Table 3 Metal temperature with & without drilled water passage

Location	Sp.plug/Ex.port			Ex.port/	Sp.plug/
	No.1	No.2	No.4	Ex.port	In.Port
Cylinder	No.1	No.2	No.4	No.2	No.2
유	211.8	212.5	197.3	217.6	189.8
무	221.9	235.6	209.8	227.2	188.0
ΔT	10.1	22.5	12.5	9.6	1.9

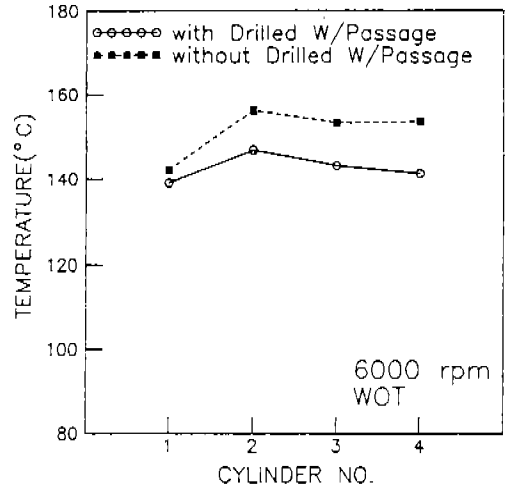


Fig.14 Measured temperature of B-ENG. cylinder block exhaust side TRR

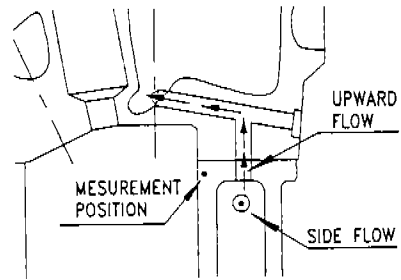


Fig.15 Change of coolant flow pattern with and without drilled w/passage

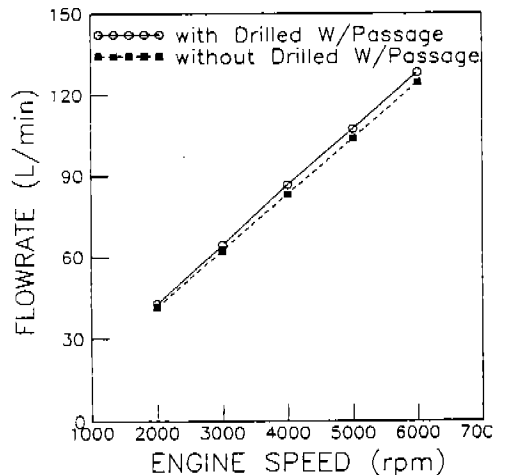


Fig.16 Coolant flowrate of B-ENG.

서 20°C의 냉각효과가 있음을 확인하였다.

드릴가공 물통로를 막고 블록온도를 측정할 결과 흡기측과 사이아미즈측의 온도는 변화가 없었으며 배기측의 온도만 변화하였는데 이를 Fig.14에 도시하였다. 1번 실린더를 제외한 2, 3, 4번 실린더들이 모두 10°C정도의 온도가 상승됨을 알 수 있었다. 드릴가공 물통로에 의해 배기측 온도가 10°C저감되는 것은 Fig.15에서 보는 바와 같이 튼 테크를 관통하는 물 통과구멍에 의해 펄류 외에 상승류가 추가됨으로써 유동이 증대되어 열전달계수가 커지고 열전달경로도 짧아 지는데 기인한다. 1번 실린더 주위에는 물 통과구멍이 많아 냉각수의 유동유량이 원래 활발하기 때문에 드릴가공 물통로의 영향을 상대적으로 적게 받기 때문이다.

드릴가공 물통로가 있을 경우와 막았을 경우의 냉각수 유량을 Fig.16에 도시하였다. 6000 rpm에서 막았을 경우 128.5L/min에서 125.4L/min으로 3.1L/min의 유량감소를 보였다. 드릴가공 물통로가 막히면서 실린더헤드가스켓의 물 통과구멍의 면적이 감소함에 따라 냉각계 유동저항이 증가하였고 그 결과로 유량이 감소하였다. 유동형태에 따른 냉각수 유량변화와 함께 생각해 보면 냉각수 유량에 영향을 미치는 인자로서는 냉각수 유동형태와 물 통과구멍의 면적이 중요하게 작용하고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

1. 연소실 벽면 각 부위의 온도측정을 통해 개선된 유동형태와 드릴가공 물통로가 온도저감에 미치는 영향을 확인하였다.
2. 엔진 전체적인 냉각수 유량을 증대시키지 않고 냉각수 유동상태를 최적화함으로써 엔진의

최고온도를 낮출수 있었으며 그에따라 온도 불균일도 개선시킬 수 있었다.

3. 실험엔진에서 유동형태의 최적화에 의해 개선시킬 수 있는 온도의 불균일량은 9°C정도 이었다.
4. 열부하가 특별히 큰 부위에 드릴가공 물통로로서 냉각시켜줄 때에 20°C정도의 온도저감 효과가 있음을 알 수 있었다.
5. 실린더헤드가스켓의 물 통과구멍의 총면적에 뿐만 아니라 냉각수의 유동형태에 따라서도 냉각수 유량이 변한다. 이는 유동경로의 길이가 변화함에 따라서도 냉각계 유동저항이 변화하기 때문이다.

참 고 문 헌

1. 신승용, 이현순 "열전대를 이용한 가솔린 엔진의 실린더 헤드 각 부위의 온도와 열량 측정에 대한 실험적 연구", 한국 자동차공학회 추계학술대회 논문 초록집, 1987
2. 山田 敏生, 吉野 志健男, 紳田 睦美, 岩下 義博, 横井 農, 片桐 晴郎, "冷却系改良によるノシク改善" JSAE paper No. 902146, 1990
3. Yuzo Aoyagi, Yoshihide Takenaka, Satoshi Niino, Akira Watanebe and Isao Joko "Numerical Simulation and Experimental Observation of Coolant Flow around Cylinder Liners in V-8 Engine" SAE paper No.880109, 1988
4. C.C.J.French, K.A.Atkins, "Thermal Loading of a Petrol Engine", Proc. Instn Mech. Engrs Vol. 187 49/73, 1973
5. Taylor.C.F. "The Internal Combustion Engines in Theory and Practice", Vol. 1, 2nd Edn, MIT Press