

엔진 물통로 내부 벽면 스케일 축적이 LPG 엔진의 열적 내구성에 미치는 영향에 대한 연구

A Study on Effect of Scale Formation in Water Jacket on Thermal Durability in LPG Engine

류택용*, 신승용*, 최재권*
Taekyong Ryu, Seungyong Shin, Jaekwon Choi

ABSTRACT

In this paper, the effects of scale formation in engine water jacket upon the thermal durability of engine itself and its component parts were studied. To understand the effect of quality of water, a full load engine endurance test for 50 hours was carried out with not-treated underground water.

The followings were found through the tested engine inspection after the endurance test; 1-2 mm thick scale formation in the engine water jacket, valve seat wear, piston top land scuffing, piston pin stick, and cylinder bore scuffing in siamese area. In order to understand the causes of above test results, the heat rejection rate to coolant, the metal surface temperature of combustion chamber, and the oil and exhaust gas temperatures were measured and analyzed.

The scale formed in the engine water jacket played a role as thermal insulator. The scale formed in the engine reduced the heat rejection rate to coolant and it caused to increase the metal surface temperature. The reduced heat rejection rate to coolant increased the heat rejection rate to oil and exhaust gas and increased the oil and exhaust gas temperature. Also, the reasons of valve seat wear, piston top land scuffing and cylinder bore scuffing, and piston pin stick quantitatively analyzed in this paper.

주요기술용어 : Thermal durability(열적 내구성), Heat rejection rate to coolant(냉각수로의 전열량), Scale formation(스케일 생성), Water jacket (물통로), Valve seat wear(밸브시트 마모), Piston scuffing(피스톤 스커핑)

1. 서론

최근 엔진의 고출력화 경향은 엔진 본체

(실린더 헤드, 실린더 블록) 뿐만 아니라 구성 부품(피스톤, 밸브 등)의 열부하를 증대시켜 엔진의 열적 내구성을 확보하기 위한

* 회원, 현대자동차 파워트레인 연구소

연구가 활발히 수행되고 있다.

엔진의 열적 내구성 확보 기술에 대한 연구는 크게 두 부류로 나눌 수 있는데 첫째는, 열응력, 열변형을 최소화하는 엔진 구조 설계나 내열 고급 소재의 적용 그리고 냉각수 유동 최적화를 통한 금속면 온도 저감 등과 같은 엔진 개발 단계에서의 열적 내구성 확보 기술에 대한 연구^{1, 2)}이며 둘째는, 확보된 열적 내구성을 저하시킬 수 있는 인자인 냉각수 수질 관리나 차량 냉각계 최적화 등에 대한 연구이다.

엔진 냉각수의 수질로 인해 엔진 내구성을 저하시키는 인자로는 부식과 스케일(Scale)이 있다. 부식이란 금속이 접하고 있는 환경과의 화학적 또는 전기 화학적 반응에 의해 금속에 가해지는 파괴적인 현상으로 전기 전도도, PH, 금속 표면의 조성, 표면 상태, 용존 산소 농도, 온도 등의 영향을 받는다고 알려져 있다. 부식에는 균일 부식과 특히 열 부하가 큰 곳에서 심하게 발생하는 국부 부식이 있으며, 이런 부식에 의한 산화물이 엔진 물통로에 부착되어 엔진 자체의 열부하를 높이거나, 라디에이터에 퇴적되어 냉각수 통로를 막아 차량의 오버히팅(Overheating)을 유발하기도 한다. 따라서 방식 표면 처리나 냉각수에 첨가하는 부식 방지제에 대해 활발한 연구가 수행되고 있다.^{3, 4)} 한편 스케일은 냉각수중에 용해되어 있거나 현탁되어 있는 물질이 냉각수의 농축, 온도 상승, PH의 상승 등의 영향에 의해 과포화 상태의 농도로 존재하면서 금속 표면에 석출되거나 침전고화된 물질로, 라디에이터 튜브를 폐쇄시켜 열교환 효율을 저하시키거나 부식을 촉진한다고 알려져 있다. 이에 따라 A. Alice Arul Antony 는 냉각계내 스케일 생성을 원천적으

로 차단하는 스케일 생성 방지제에 대해서 연구하였고, Furudera Masaharu 는 생성된 스케일을 제거하는 제거제에 대해서 연구를 수행하였다.^{5, 6)} 이처럼 스케일에 대한 연구는 주로 스케일 생성과 방지에 대한 연구가 대부분을 차지하고 있으며 엔진 물통로에 생성된 스케일이 엔진 본체 및 구성 부품에 미치는 영향 등에 대한 연구는 전무한 실정이다.

본 논문은 엔진 물통로 내부 벽면에 스케일 축적이 엔진 본체 및 구성부품의 열적 내구성에 미치는 영향을 내구 실험을 통하여 파악하였고, 스케일로 인한 엔진의 열적 내구성 저하 요인을 스케일 축적 전후의 냉각수로의 전열량 측정 실험과 금속면 및 오일 그리고 배기 가스 온도 측정 실험을 통하여 정량적으로 규명하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2. 1 실험 장치

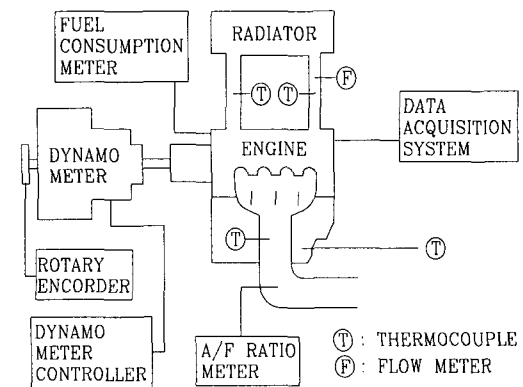


Fig. 1 Schematics of experimental setup

Fig. 1 은 냉각수로의 전열량 측정 장치의 개략도를 나타내고있다. 전열량 측정은 0.8 ℓ LPG 엔진에 실차 라디에이터 시스템을 연

결하여 엔진 동력계에서 측정하였다. 라디에이터 시스템에는 샤워(shower)가 설치되어 있어, 샤워의 물량 조절을 통하여 엔진 냉각수 온도를 제어할 수 있도록 하였으며, 엔진 금속면 온도 측정은 ϕ 1.6 mm sheath 형 K-type 열전대를, 냉각수 및 오일온도 측정은 sheath 형 T-type 열전대를 이용하였다. 또한 냉각수 유량 측정은 터빈 유량계를 이용하였다

금속면 온도 측정 위치는 열적 부하를 가장 많이 받는 곳으로 알려진 실린더 헤드의 점화 플러그와 배기 밸브 시트 사이의 연소실 2mm 전 지점이며 Fig.2 의 'A' 로 나타나 있다.

실험 엔진은 기아자동차의 3 기통 0.8l 급 LPG 엔진으로 제원은 Table 1 에 나타나 있다.

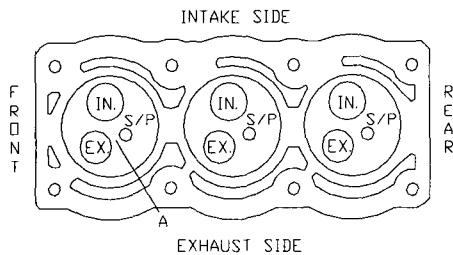


Fig. 2 Temperature measuring point

Table 1 Specifications of test engine

Type	I3
Stroke Volume(cc)	796
Bore(mm)× Stroke(mm)	70× 69
Compression Ratio	9.5
Valve Mechanism	SOHC

한편 내구 실험 시에는 Fig. 1 에 나타나 있는 실차 라디에이터 시스템이 아닌 실험실내 냉각수 쿨러를 이용하여 엔진 냉각수 온도를 제어하였으며 이때 냉각수는 수 처리를 하지

않은 지하수를 사용하였다

2.2 실험 방법

실험은 Table 2 에 나타나 있는 바와 같이, 내구 실험 전과 50 시간 전부하 내구 실험 후 각각에 대해, 전부하, 냉각수 출구온도 90℃ 조건에서 엔진 속도에 따라 냉각수로의 전열량을 측정하였고 동시에 금속면 및 오일 그리고 배기가스 온도를 측정하였다. 이때 내구 실험 중 엔진 물통로 내부 벽면에 스케일이 축적되도록 엔진 냉각수는 수 처리를 하지 않은 지하수를 사용하였다. 따라서 내구 실험 전과 후의 조건은 엔진 물통로 내부에 스케일이 축적되지 않은 상태와 축적된 상태를 의미한다. 또한 엔진 물통로 내부 스케일 축적이 엔진 및 그 구성 부품의 열적 내구성에 미친 영향을 파악하기 위하여 엔진을 분해하여 그 영향을 평가하였다.

Table 2 Test condition

	Scale	Engine speed (rpm)	Measured Items
Before test	×	2000, 3000, 4000, 5000, 5600, w.o.t	· Heat Rejection to Coolant · Metal Temp. · Oil Temp. · Ex. Gas Temp
After 50hr of endurance test(5600rpm, full load)	0		

3. 실험 결과 및 검토

3.1 스케일 유무에 따른 온도 변화

Fig. 3 은 냉각수 출구 온도 90℃ 조건에서 내구 실험 전과 50 시간 전부하 내구 실험 (5600rpm, W.O.T.) 실험 후, 즉 엔진 물통로 내부 벽면의 스케일 축적 유무에 따른 금

속면, 오일 그리고 배기가스 온도 측정 결과를 나타내고 있다. 여기서 측정된 모든 온도는 정상상태의 온도이다

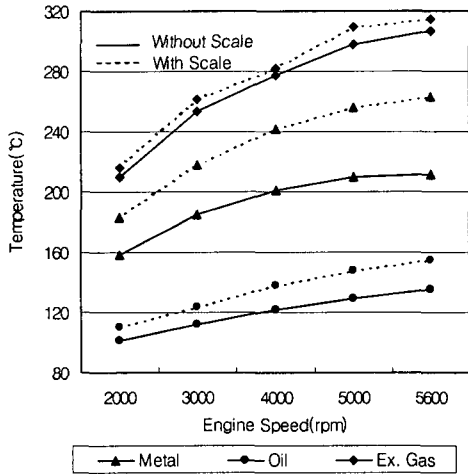
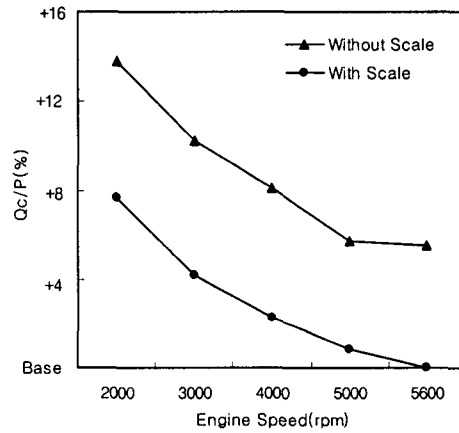


Fig. 3 Temperature variations according to scale formation

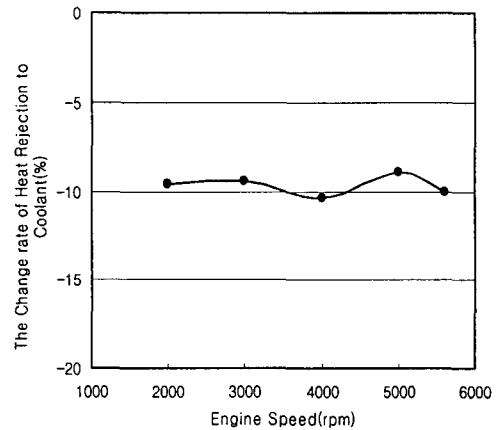
실험 결과, 점화 플러그와 배기 밸브 시트 사이 금속면 온도는 스케일 축적 전에 비해 스케일 축적 후 엔진 속도에 따라 21~51℃ 증가하는 결과를 나타내었다. 또한 오일 및 배기 가스 온도도 스케일 축적 후, 엔진 속도에 따라서 8.6~20℃ 와 5~11℃ 증가하는 결과를 나타내었다. 특히 5600rpm, 전부하 조건에서는 점화 플러그와 배기 밸브 시트 사이 금속면 온도(연소실 2mm 전)가 스케일 축적 전 212℃에서 스케일 축적 후 263℃ (Gas Face 면의 온도로 환산하면(6℃/mm) 275℃)로 51℃나 상승하여 알루미늄 실린더 헤드의 열적 내구성 한계 온도(240℃)를 크게 초과하였고 오일팬의 오일 온도도 스케일 축적 전 135℃에서 스케일 축적 후 155℃로 약 20℃ 상승하여 엔진 무빙계(Moving System) 신뢰성 확보 오일 한계 온도(150℃)를 초과하는 결과를 나타내었다

3.2 스케일 유무에 따른 냉각수로의 전열량 변화

Fig. 4(a), (b)는 냉각수 출구 온도 90℃ 조건에서 엔진 물통로 내부 벽면의 스케일 축적 유무에 따른 출력대비 냉각수로의 전열량비(Qc/P)와 스케일 축적 후 감소된 냉각수로의 전열량 비율을 엔진 회전수에 따라서 나타내고 있다.



(a) Heat rejection to coolant against the brake power



(b)The Reduced Change Rate of Heat Rejection to Coolant After Endurance Test

Fig. 4 Effect of scale formation on heat rejection to coolant

실험 결과, 엔진 물통로 내부 벽면에 스케

일이 축적 된 후, 출력 대비 냉각수로의 전열량비(Qc/P)는 엔진 회전수 변화에 따라 4.9 ~ 6.1% 포인트 감소하는 결과를 나타내었다. 또한 감소된 냉각수로의 전열량 비율은 약 10% 내외로 나타났다. 이는 실차에서 100℃의 냉각수온을 7℃ 정도 저감시킬 수 있는 양이다. 한편 스케일에 의한 냉각수로의 전열량 감소는 그 부위의 열전달이 연소 후 과정이기 때문에 엔진 출력 및 연비 개선에 영향을 주지 못하나, 3.1 절의 실험 결과로 볼 때 오일 및 배기가스로의 전열량 증대를 유발함을 알 수 있다.

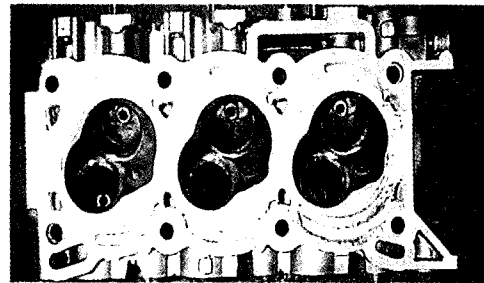
Fig. 3 과 4 의 실험 결과를 종합해 보면, 엔진 물통로 내부 벽면의 스케일 축적은 냉각수로의 전열량을 감소시켜 금속면 온도를 상승시키고, 감소된 냉각수로의 전열량 만큼 오일 및 배기 가스로의 전열량이 증대되어 오일 및 배기가스 온도 상승을 유발함을 알 수 있다.

3.3 스케일이 엔진 내구성에 미치는 영향

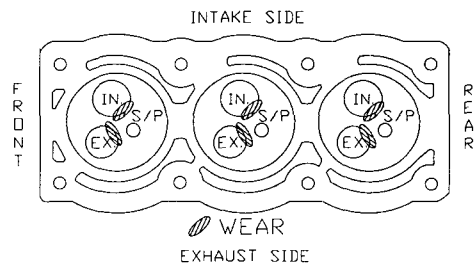
엔진 물통로 내부의 스케일 축적은 알루미늄 실린더 헤드의 열적 내구성 한계 온도(240℃)와 엔진 Moving 계 신뢰성 확보 오일 한계 온도(150℃)를 초과할 만큼 금속면 및 오일 온도를 상승시켰다. 이에 따라 본 실험에 사용된 0.8 ℓ LPG 엔진을 50 시간 전부하 내구 실험 진행 후 완전 분해하여 스케일 축적이 엔진 및 구성 부품의 열적 내구성에 미친 영향 평가를 수행하였는데, 분해결과 실험 엔진은 밸브 시트 마모와 피스톤 스커핑 및 피스톤 핀 소착, 그리고 실린더 블록 사이아미즈(Siamese) 부위 스커핑 등의 문제가 유발 되어 있음을 알았다. 아래에 발생 메커니즘을 설명하였다.

3.4.1 밸브 시트 마모

50 시간 전부하 내구 실험 후 엔진 분해 결과, 실험 엔진은 밸브 시트에 마모가 발생하였다. Fig. 5 에 고품 헤드 사진 및 밸브 시트 마모 발생 부위를 나타내었고, 이를 정량적으로 분석하기 위하여 Table 3 과 4 에 내구 실험 전후의 흡·배기 밸브 시트 폭과 런아웃(Run out) 변화를 나타내었다



(a) Picture of cylinder head after test



(b) Locations of valve seat wear

Fig. 5 Locations of valve seat wear after endurance test

Table 3 Variation of intake and exhaust valve seat width

		#1	#2	#3
In.	Before test	1.4	1.45	1.4
	After test	2.0	2.25	1.9
Increased width (mm)		0.6	0.8	0.5
Ex.	Before test	1.35	1.35	1.4
	After test	2.5	2.5	2.3
Increased width (mm)		1.15	1.15	0.9

Table 4 Variation of valve seat run-out

	Intake Valve Seat			Exhaust Valve Seat		
	#1	#2	#3	#1	#2	#3
Before test	28.7	28.3	24.2	16.6	3.2	10.8
After test	111.6	122.4	89.5	188.8	89.4	117.6
Increased quantity (μm)	82.9	94.1	65.3	172.2	86.2	106.8

내구 실험 전후의 밸브 시트 폭 측정결과, 흡기 밸브 시트 폭 변화는 0.5~0.8mm, 배기 밸브시트 폭 변화는 0.9~1.15mm 로 나타났다. 또한 내구 실험 전후의 밸브 시트 런아웃 측정결과, 흡기 밸브 시트 런아웃 변화는 65.3~94.1 μm , 배기 밸브시트 런아웃 변화는 86.2~172.2 μm 로 나타나 시트 마모는 편마모 형태를 나타내었다.

즉, 엔진 물통로 내부 벽면 스케일 축적은 밸브 시트에 편마모를 유발시켰는데, 이의 원인은 아래와 같다.

연소가스로부터 밸브로 전달된 열은 밸브 스템(Stem)을 통해 약 25%, 밸브 시트를 통해 약 75%가 방출되며, 밸브 시트의 냉각은 물통로를 지나는 냉각수에 전적으로 의존한다. 따라서 물통로 내부의 스케일 축적은 실린더 헤드 모재인 알루미늄 합금의 열적 내구성 한계를 넘겨 모재의 열변형이 유발되고 이에 따라 밸브 시트가 변형된다. 또한, 밸브 시트로부터 냉각수로의 열전달이 차단되 밸브 시트가 고온이 되어 물성 저하를 수반하게 된다. 이와 같은 밸브 시트의 열변형과 물성저하로 편마모가 발생한다.

이렇게 밸브 시트에 편마모 현상이 발생하게 되면 출력 저하, 엔진 부조, HC 배출가스 증대, 연료 소비율이 증대하는 문제점이 발생한다.

본 실험은 50 시간 내구 후 엔진을 분해했기 때문에 실린더 헤드 모재 파손과 베어링 손상이 이 발생되지 않았으나 실험 시간을 늘리면 헤드 모재도 변형 또는 균열 등의 파손과 베어링 손상이 발생 할 것으로 판단된다.

3.4.2 피스톤 스커핑 및 피스톤 핀 소착

Fig. 6은 50 시간 내구 실험 후의 피스톤 고품을 나타내고 있다.

사진에 나타나 있는 바와 같이 피스톤은 핀 방향 톱 랜드(Top Land) 부위에 스커핑이 발생 하였고 또한 피스톤 핀 소착 문제가 발생하였다

이런 문제점이 발생하는 원인을 설명하면 아래와 같다.

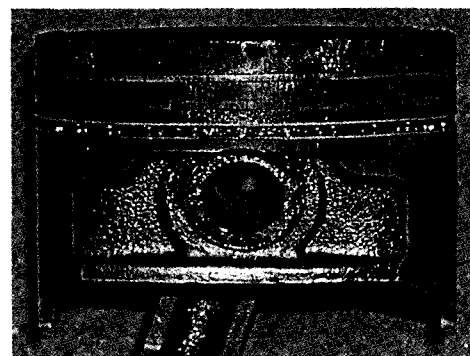


Fig. 6 Picture of piston top land after test

피스톤이 받은 열중 약 70%가 피스톤 링을 거쳐 실린더 블록의 라이너로 전달 되고, 라이너의 냉각은 그 주위를 지나는 냉각수의 영향을 받게 된다.

한편, 최근의 엔진은 경량화 추세에 따라 Compact 화 됨으로써 라이너와 라이너 사이에 물통로가 없는 사이아미즈(Siamese) 형태를 취하고 있다. 따라서 라이너 주위의 금속

면 온도는 사이아미즈 부위의 온도가 가장 높게 된다. 또한 재질이 알루미늄인 피스톤은 재질이 주철인 라이너에 비해 열팽창 계수가 대략 2 배정도 크기 때문에 동일 수준의 금속면 온도 상승은 피스톤과 라이너 사이의 간극을 좁히는 결과를 초래한다.

따라서 라이너 주위 물통로 내벽의 스케일 축적은 라이너의 냉각을 차단, 전반적인 피스톤 온도를 상승시키고 또한 라이너의 원주 방향으로 온도가 가장 높은 곳인 사이아미즈 부위에 더 많은 스케일이 부착되어 피스톤 핀 방향 부위의 열부하를 집중적으로 증대시켜 그 부위에서 피스톤 스커핑을 유발시킨 것으로 판단된다. 이러한 스케일 열차단과 스커핑에 의한 피스톤 온도의 급격한 상승은 피스톤 핀내의 오일 유막을 파괴시켜 피스톤 핀 소착 문제를 유발시킨 것으로 판단된다.

3.4.3 실린더 블록 사이아미즈 부 스커핑

Fig. 7 은 50 시간 내구 실험 후 분해한 실린더 블록 사진이며 라이너의 스커핑 발생 위치를 타원형으로 나타내었다..

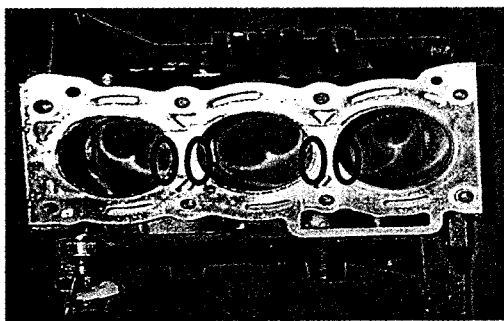


Fig. 7 Locations of liner scuffing

Fig. 7 에 나타나 있는 바와 같이 엔진 물통로 내부 벽면의 스케일 축적은 실린더 블록 사이아미즈 부위의 라이너 스커핑을 초래하였는데, 이는 3.4.2 절에 서술한 바와 같

이 스케일의 단열효과로 인해 피스톤 핀 방향 부위의 열부하가 증대되고 이에 따라 피스톤과 라이너가 서로 맞닿아 라이너 스커핑을 유발시켰음을 알 수 있다.

3.5 스케일 성분 분석

Fig. 8 은 물통로 내부 벽면에 축적된 스케일을 나타내고 있는데, 두께는 약 1~2 mm 정도 였고 색은 연한 갈색을 띠었다.

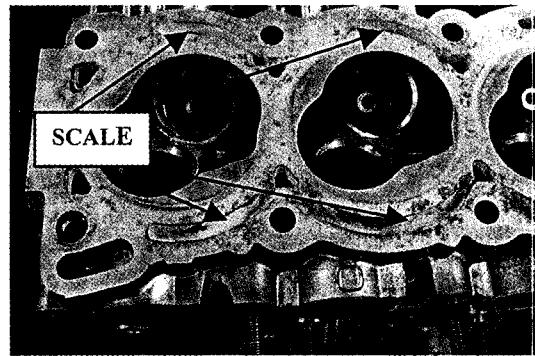


Fig. 8 Scale formed after test

Table 5 는 엔진 물통로에 축적된 스케일 성분 및 조성 비율 분석 결과를 나타내고 있으며 Table 6 은 각종 물질에 대한 열전달을 나타내고 있다.

Table 5 Scale compositions

Composition	Portion(wt,%)
SiO ₃	8.7
Fe ₂ O ₃	13.4
P ₂ O ₃	0.5
CaO	35.2
MgO	1.7
SO ₃	1.0
Ignition Loss	39.5

Table 6 Thermal conductivity of each substance

Substance	Thermal conductivity (Kcal/m·hr·°C)
scale with silicate as main component	0.2~0.4
scale with carbonate as main component	0.4~0.6
scale with sulfate as main component	0.5~2.0
scale with phosphate as main component	0.5~0.7
Iron oxide	1~5
Al alloy	130
Cast Iron	37

스케일 성분 분석 결과, 주성분은 칼슘염이었으며 그밖에 규산염과 철산화물 등이 다량 함유되어 있는 것으로 나타났는데, Table 6에 나타나 있는 바와 같이, 이런 성분의 스케일은 열전도율이 알루미늄 합금의 1/650~1/26 배, 주철의 1/185~1/7 배에 지나지 않음을 알 수 있다.

즉, 엔진 물통로내 축적된 스케일은 열전달을 차단하는 단열재의 역할을 수행함을 알 수 있다.

그런데 이러한 스케일은 부동액을 사용한다고 해서 제거 되는 것이 아니고, 특수한 화학 약품을 이용해 차량 냉각계를 플라싱(Flushing)을 해야만 제거 되는데, 이 약품은 엔진 본체 및 냉각계 부품에 손상을 주는 것으로 알려져 있다.

따라서 스케일 축적에 의한 엔진 열해를 방지 하기 위해서는 검증된 공인 기관의 부동액을 상수도와 혼합하여 사계절 사용 해야 한다.

4. 결 론

본 실험을 통하여 아래와 같은 실험 결과와 결론을 도출 할 수 있었다.

- 1)엔진 물통로 내부 벽면의 스케일 축적은 냉각수로의 전열량을 10% 정도 감소시키고 감소된 냉각수로의 전열량 만큼 오일 및 배기 가스로의 전열량을 증대 시킨다
- 2)엔진 물통로 내부 벽면의 스케일 축적은, 실린더 헤드의 점화 플러그와 밸브 밸브 사이 온도를 최대 51°C, 오일 온도와 배기 가스 온도를 각각 최대 20°C, 11°C 상승 시켰다.
- 3)엔진 물통로 내부 벽면에 축적된 스케일은 엔진 금속면 및 오일 온도 상승을 유발시키는데, 이는 스케일의 낮은 열전도율로 인해 냉각수로 전달되는 열을 차단하기 때문이다.
- 4)엔진 물통로 내부의 스케일 축적은 엔진의 열부하를 증대시켜, 밸브 시트 마모와 피스톤 스커핑 및 피스톤 핀 소착, 그리고 실린더 블록 사이아미즈(Siamese) 부위 스커핑 등의 문제를 유발 한다.
- 5)본 실험을 통하여, 엔진 물통로내 스케일 축적에 의한 엔진의 열적 내구성 저하로 나타나는 엔진 본체 및 구성 부품의 손상을 밝혀 낼 수 있었고, 그 원인을 정량적으로 규명 할 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) J. Affenzeller and E. Gschweilt, "Contribution to the Design Optimization of Water Cooled Cylinder Heads", ASME paper 86-ICE-17, 1986
- 2) 류택용, 신승용, 이은현, 최재권, "엔진 냉

- 각계 개선을 통한 가솔린엔진의 성능 향상”, 자동차공학회논문집 제 6 권 제 3 호, pp.1-10, 1998.
- 3) 川本 普, 鈴木尙男, “The Problem of Using Anti-Freeze and Anti-Rust in Aluminum Engines”, 内燃機關と防青劑, No.3, pp.21, 1974.
- 4) B. D. Oakes., “Observations on Aluminum Water Pump Cavitation Tests”, ASTM STP 887, pp.231, 1981.
- 5) A. Alice Arul Antony and G. Paruthimal Kalaignan, “Study on Scale Inhibitors for Industry Waters”, Proceedings of International Conference on Corrosion(CORCON-97), Vol.2, pp.871-877, 1998.
- 6) F. Masaharu and N. Kiichi, “The Development of Heat Exchanger for Geothermal Hot Water(2nd Report) : Water Analysis, Corrosion Test, Silica Scale”, Hitachi Zosen Technical Review Japan, Vol.46, No.3, pp.145-155, 1985.
- 7) Taek-Yong Ryu, Seung-Yong Shin, Eun-Hyun Lee, Jae-Kwon Choi, “Effects of Break-in of a Gasoline Engine on Heat Rejection to Coolant and Engine Metal Temperature”, SAE 972870, 1997.
- 8) L. J. Danis, “Engine Valve Cooling”, SAE 730055, 1973.
- 9) J. B. Heywood, “Internal Combustion Engine Fundamentals”, McGraw-Hill Book Company, pp.698-701. 1988.