

L-LINK를 이용한 S.I.엔진 피스톤 각 부위의 온도측정에 대한 실험적 연구

An Experimental Study on Piston Temperature Measurement at Various
Locations in a S.I. Engine Utilizing L-LINK Mechanism

김 승 수*, 김 지 연**
Sung Soo Kim Jee Yeun Kim

ABSTRACT

This paper presents the method of piston temperature measurement and its data under various engine operating conditions. In case of high speed engine, the thermocouple wires must be guided from moving piston to stationary place with careful attention. For this purpose L-LINK SYSTEM was made and assembled to a passenger car engine on the test bench and then the piston temperature was successfully measured. The tested engine speed ranged from 1,000 to 4,000 rpm with 500 rpm increments.

Not only the effects of engine speed and load on the piston temperature but those of spark timing, detonation, coolant temperature and Reynolds number based on inlet air condition were studied from the measurement obtained by this L-LINK SYSTEM.

1. 서 론

내연기관이 점차 고효율 경량화 됨에 따라 연소실 각 부위의 온도 및 열 부하가 더욱 증가하게 되었다. 따라서 연소실 벽면에서의 온도분포에 대한 자료는 엔진설계시 기본적으로 요구되는 사항이다. 본 실험에서는 연소실 벽면중 피스톤에 대한 온도분포를 실제 운전상황에서 직접 측정하여 엔진에 대한 기본자료로 얻고자 한다. 여기서 판건이 되는 것은 고속왕복운동을 하는 피스톤에서 발생되는 전기신호를 슬립 링(Slip Ring)이나 그 밖의 재래식 방법에 의하지 않고 직접 측

정점에 설치된 열전대를 통하여 신호를 읽을 수 있도록 열전대를 크랭크 케이스 밖으로 끌어낼 수 있는 장치를 설계, 제작하는 것이다. 이러한 장치로서 L-LINK를 설계, 제작하여 실제엔진에 장착한 뒤 피스톤의 주요부위온도를 측정하였다.

연구의 범위로는 최대 4,000 rpm의 엔진 속도까지 충분한 내구성을 가지는 L-LINK를 설계, 제작하여 엔진속도와 부하의 변동에 따른 피스톤 표면의 평균온도를 측정하였다. 그 밖의 점화시기 조절에 따른 피스톤 온도변화와 Knocking이 발생하는 경우의 피스톤 온도등 여러운전 조건하에서 실험을 행하였다.

* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

** 삼성종합 기술원

2. 실험장치 및 방법

2-1. 실험 장치

2-1-1. 엔진 및 동력계

본 실험에 사용된 엔진의 제원은 표 2-1과 같다.

표 2-1. 실험 엔진 사양

Engine type	Water cooled 4-stroke gasoline engine
Number of cylinder	4
Bore and Stroke	82.5 × 69.8 (mm)
Compression ratio	8.6 : 1
Spark timing	BTDC 6°
Displacement	1,492 cc

엔진에 부하를 걸어주기 위하여 사용한 동력계는 Redman Heenan Froude 사의 Hyd-

raulic Dynamometer type DPX이며 엔진의 회전속도는 Ono Sokki 사의 Digital Tachometer HM-311로 측정하였다.

2-1-2. L-LINK

Fig. 2-1은 L-LINK를 실제엔진에 장착하여 Engine Cooling Fan 방향에서 바라본 그림이다. Fig. 2-2는 LINK와 Bracket를 연결해 주는 Pin Joint 부분에서의 열전대가 유도된 모습을 나타낸 그림이다.

L-LINK는 엔진의 1번 피스톤에 설치되어 있으며 실린더 블럭에 Slit을 내어 엔진의 부와 통할 수 있게 하였다. L-LINK의 한쪽 끝은 직선운동을 하는 피스톤에 결합된 Pin Joint(3)에 끼워져 있고 다른 한쪽 끝은 상사점과 하사점의 중점인 C와 (8)의 수평선상에 놓여있다. (6)부분에서 링크가 분리될 수 있도록 만든 것은 실린더를 통하

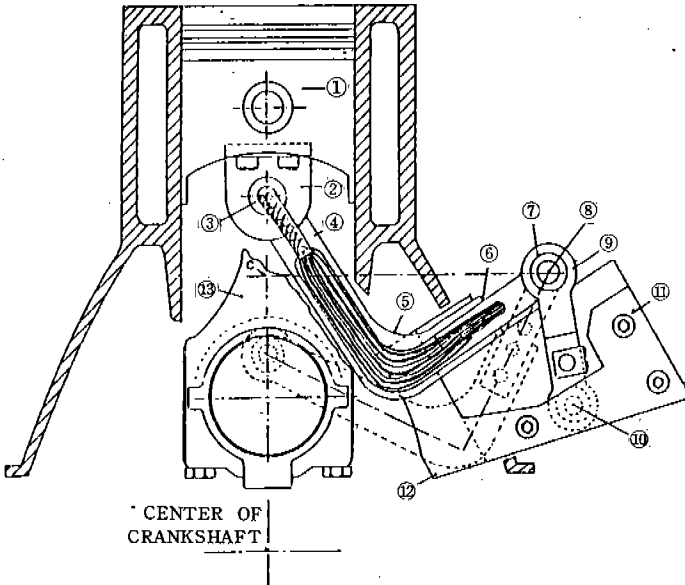


Fig.2-1 L-LINK SYSTEM for guidance of thermocouple wires

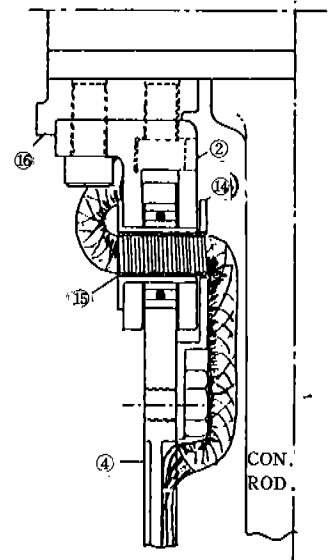


Fig.2-2 Thermocouple wire bundle in Pin Joint(3)

- | | | |
|---------------------|----------------------|----------------------------|
| 1. Piston | 6. L-LINK Connection | 11. Fixed Plate |
| 2. L-LINK Bracket | 7. Part of L-LINK | 13. Piston Connecting Rod |
| 3. Pin Joint | 8. Pin Joint | 14. Plate attached to LINK |
| 4. L-LINK | 9. Swing LINK | 15. Coil Spring |
| 5. Corner of L-LINK | 10. Stationary Point | 16. Piston Pin Boss |

여 피스톤과 링크(4)의 결합체가 들어갈 수 있도록 하기 위함이다. 고정판 (11)은(10) 점을 지지하여 주는 동시에 (12)의 부분은 링크의 좌우요동을 막아주는 L-LINK Slide Guide 역할을 한다. 위와 같은 링크장치에서 취약부분으로 세심한 주위를 요하는 부분이 있는데 이들은 다음과 같다.

1) Pin Joint (3) 부분은 열전대선 묶음이 가로질러 지나가는 곳으로 편은 고정되어 있고 링크가 회전운동을 하므로 비틀림에 의한 벽면과의 마찰 때문에 열전대선이 끊어질 수 있는 것이다. 이에 대한 대책으로 코일스프링을 Pin Joint (3)에 넣어 한쪽 끝은 Pin에 고정시키고 다른 한쪽 끝은 링크에 고정된 (14)의 판에 결합시켰다. 링크가 운동을 할때 코일 스프링 (15)는 비틀림을 받게되며 그 안의 열전대선도 같이 비틀림을 받아 코일스프링과의 상대운동이 없어 끊어지지 않았다.

2) 다음의 취약부분은 L-LINK (5)의 부분으로 이곳에서 가장 큰 응력이 걸리므로 고속운전시 파단의 위험이 있다. 이 점에 대해서는 링크가 받는 힘이 질량의 감속에 의한 관성력이므로 링크의 질량을 감소시키면서 충격에 강한 재질을 선택 하였다. 그리고 단면을 I 형으로 만들어 굽힘응력을 크게 하였으며 Corner (5)부분을 두껍게 하였다. 사용재료는 알루미늄 합금으로 A2024-T6이며 연신율 18.1%, 인장강도 47 kg/mm^2 이다. (응력계산에서 5,000 rpm 인 경우 Corner 부분의 최대응력이 약 1.9 kg/mm^2 이므로 안전계수가 24.7이 되어 충분한 강도의 재료로 판단된다. L-LINK의 대략적인 응력계산은 부록참조)

3) 다음은 측정점으로 부터 L-LINK Bracket 사이에 이르는 열전대 자체가 진동에 끊어지는 것이다. 이를 방지하기 위하여 고온용 실리콘과 에폭시를 사용하여 피스톤 뒷면에 접착시켜도 보았으나 고속운전에 견디지 못하였다. 보다 내구성을 높이기 위하여 Fig.2-3과 같이 지지대를 요소요소

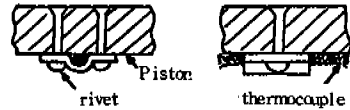


Fig.2-3 Method of supporting thermocouple wire

Riveting하여 실험을 성공적으로 마칠 수 있었다.

2-1-3. 온도측정장치

모두 8개의 열전대를 피스톤 주요부에 심어 L-LINK를 통해 엔진 밖으로 끌어내었다. 열전대는 J type (Iron-Constantan, 선의 지름: 0.25 mm, 측정범위: $-100 \sim 1,200^\circ\text{C}$ 으로 Rotary Selector를 거쳐 1개의 Digital Thermometer에 연결되었다. 이 온도계는 YEW사의 type 2575 Digital Thermometer이다.

2-2 온도측정 위치 및 열전대 설치

2-2-1. 온도측정위치

온도측정점은 모두 8군대이며 그 위치는 Fig. 2-4에 나타내었다.

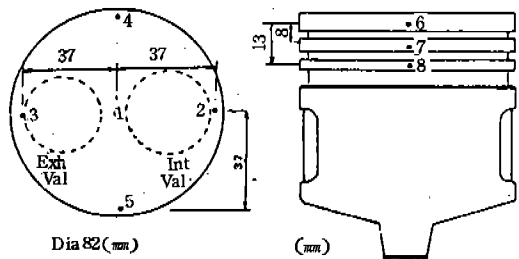


Fig.2-4 Temperature measurement locations on piston surface

2-2-2. 열전대 설치

Fig. 2-5에 나타난 바와 같이 드릴을 사용하여 지름 1 mm의 구멍을 뚫고 표면쪽에 20° 정도의 taper를 내었다. 온납으로 열전대 선의 접합부를 지름 1.5 mm 정도로 만들고 taper진 구멍에 펀치를 사용하여 때려박음을 하였다. 그러므로 측정점은 정확하게 표면이 아니고 그림과 같이 $0.7 \sim 1.0 \text{ mm}$ 이하

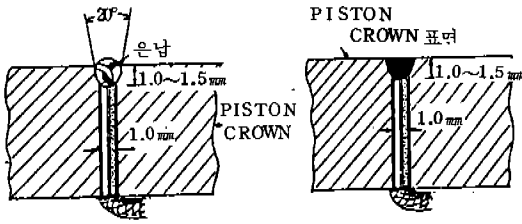


Fig. 2-5 Thermocouple junction at a measurement location

의 위치이다.⁽²⁾ 그러나 표면근처에서 최대온도구배는 3-5°C/mm 정도로 적으므로 비교적 정확한 표면의 온도를 측정하였다고 할 수 있다.⁽³⁾

2-3. 실험방법

2-3-1. 정상연소상태의 온도측정

엔진회전수는 공회전을 포함하여 1,000 rpm부터 4,000 rpm까지 500rpm 간격으로 변화시키면서 측정하였다. 부하는 각 rpm에 대하여 무부하, 25%부하, 50%부하, 75%부하, 전부하의 다섯등급으로 나누어 실험하였다. 모든 실험에서 엔진의 냉각수 출구 온도는 열교환기를 설치하여 80 ± 2°C로, 흡기 온도는 가급적 18-20°C로 유지하면서 실험하였다.

2-3-2. 점화시기의 영향

점화시기(Spark Timing)의 변동에 따른 피스톤의 온도변화를 측정하기 위하여 엔진 속도와 부하를 일정하게 유지하고 점화시기를 조절하면서 실험하였다. 3,000 rpm, 50% 부하인 경우 점화시기를 Original Spark Timing (18° BTDC)에서 5°씩 전진(Advance) 및 후퇴(Retard)시키면서 이로부터 ± 15°의 범위까지 측정하였다.

2-3-3. Knocking의 영향⁽⁴⁾

이상연소로 인해 초기(Audible 혹은 Borderline) Knock이 발생한 경우의 피스톤 온도를 측정하기 위하여 1,000, 2,000, 3,000 rpm의 전부하상태에서 점화시기를 전진시켜 Boderline Knock이 발생할 때의 온도를 측정하였다.

2-3-4. Reynolds 수 측정

Taylor에 의하면 엔진 연소실이나 냉각수 측에서의 열전달 현상은 파이프 유동 열전달과 유사한 형태로 표시될 수 있다고 한다.

$$Nu = K Re^n$$

$$Nu = \frac{h_g D}{k_g} \quad \& \quad Re = \frac{\rho_g V D}{\mu_g}$$

여기서 h_g : 가스과 벽면사이의 열전달계수

k_g : 가스의 열전도 계수

ρ_g : 공기밀도(연소실에서의 압력과 온도상태)

V : 피스톤 평균속도 (2×행정거리 × rpm)

D : 실린더 직경

μ_g : 공기의 점성계수(연소실에서의 온도상태)

K : 상수

n : 지수 상수

3. 실험결과 및 고찰

3-1 정상운전

Fig. 3-1은 피스톤크라운 중심점(1)의 온도를 각 부하에서 rpm의 변화에 따라 나타낸 그림이다.

Fig. 3-2는 동일한 측정점의 각 rpm에서 부하의 변동에 따른 온도분포를 나타낸 그림이

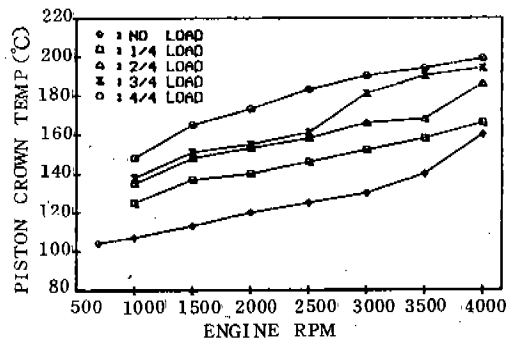


Fig. 3-1 Piston crown temperature versus engine speed (coolant temp.: 80 ± 2°C, inlet air temp.: 18 - 20°C)

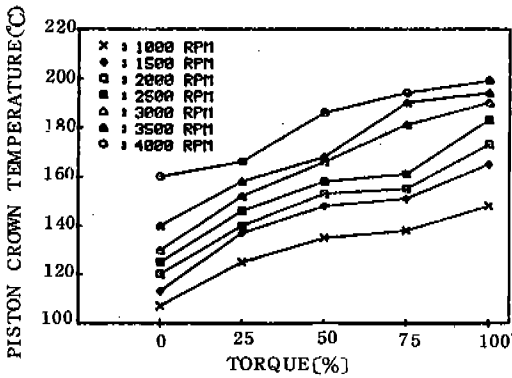


Fig.3-2 Piston crown temperature versus torque (coolant temp.: $80 \pm 2^\circ\text{C}$, inlet air temp.: $18 - 20^\circ\text{C}$)

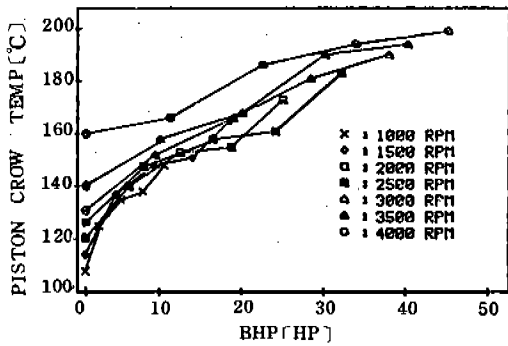


Fig.3-3 Piston crown temperature versus Bhp

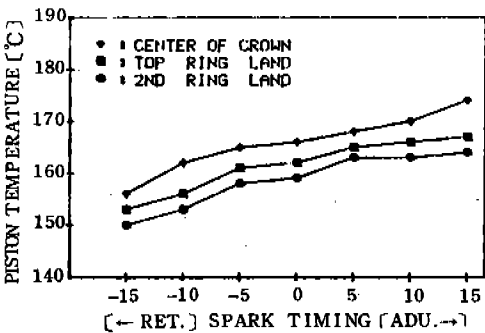


Fig.3-4 Effect of spark timing on piston temperature (3000 rpm, half load)

다. 정상운전시 피스톤표면의 온도는 운전조건에 따라 약 $100 \sim 200^\circ\text{C}$ 사이에서 변화하며 엔진속도와 부하의 증가에 따라 상승함을 나

타내고 있다.

Fig. 3-3은 피스톤크라운 중심점⁽¹⁾의 온도를 출력(Bhp)의 변화에 따라 나타낸 그림이다. 출력은 엔진속도와 부하가 모두 고려된 항이므로 피스톤온도에 대한 엔진속도와 부하의 영향을 동시에 알 수 있다. 출력이 증가함에 따라 피스톤크라운의 온도는 $10 \sim 30$ 마력 사이에서 $20 \sim 25^\circ\text{C}$ 의 온도차를 나타내지만 전체적으로는 출력에 대하여 거의 비례적으로 증가하고 있다.

3-2 점화시기 변동에 의한 온도변화

Fig. 3-4는 점화시기 변동에 따른 피스톤크라운 중심점, Top Ring Land, 2nd Ring Land에서의 온도변화를 나타낸 그림이다. 점화시기 진각변동에 대해 피스톤의 온도는 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

$\pm 15^\circ$ 의 점화시기 변동으로 $10 \sim 20^\circ\text{C}$ 정도의 큰 온도변화를 보이고 있다. 이것은 점화시기가 빨라짐에 따라 최고 연소 압력이 올라감으로 연소가스의 온도도 상승하게 되어 피스톤 온도가 높게 나타나는 것으로 풀이된다.

3-3 Knocking의 효과

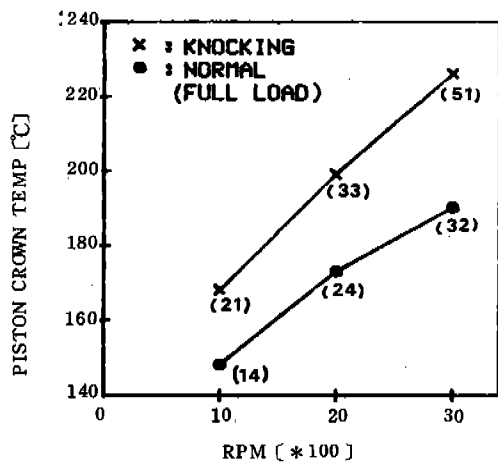


Fig.3-5 Piston crown temperature under knocking and normal operating conditions at full load. (): spark advance in degree

Fig. 3-5는 피스톤 크라운 중심점에서 엔진 속도에 따른 전부하에서의 정상연소와 Borderline Knocking시의 온도를 비교한 것이다. 온도차가 20~40°C 정도의 큰 폭으로 변화하고 있다.

이와 같은 현상은 연소가스의 압력이 급격히 상승함으로 인해 발생한 압력파가 연소실 벽면을 왕복함으로 해서 압력파를 뒤따르는 기체유동에 의하여 열전달량이 증가하여 피스톤의 온도가 상승한 것이라고 생각된다.⁽⁵⁾ 괄호안의 숫자는 상사점으로부터 점화전각을 표시한다. Fig. 3-6은 모든 측정점에서 정상연소시와 Borderline Knocking시의 온도를 비교한 것이다. 어느 측정점에서나 Borderline Knocking에 의한 온도상승의 폭이 약 40°C 정도로 일정하게 나타남을 알 수 있다.

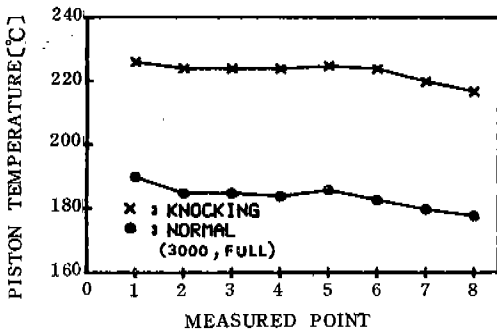


Fig. 3-6 Piston crown temperature under knocking and normal operating conditions at each point of measurement. (3,000 rpm, full load)

3-4 기타인자

3-4-1 측정위치에 따른 온도분포

Fig. 3-7은 피스톤 크라운 중심점과 흡, 배기 밸브 쪽으로 치우친 곳에서 크라운의 온도 분포를 나타낸 것이다. 피스톤 크라운 중심의 온도가 가장 높고 흡기 및 배기 밸브 쪽에서 온도차는 예상보다 큰 차이가 없었으며 흡기밸브 쪽이 0~3°C 정도 배기밸브 쪽보다 낮게 나타났는데 이는 흡기밸브를 통하여 공급되는 새로운 혼합기에 의한 냉각효과로 추정된다.

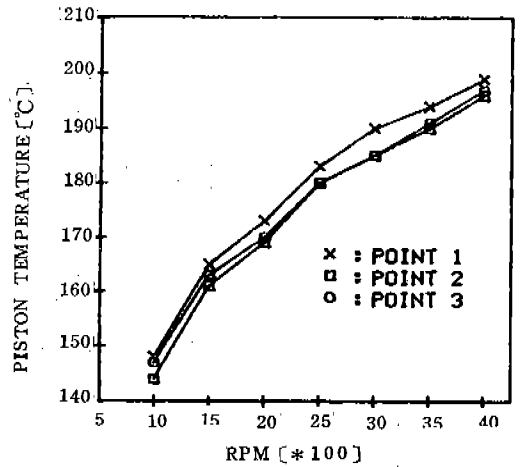


Fig. 3-7 Piston crown temperature versus engine speed in the direction of piston pin (full load)

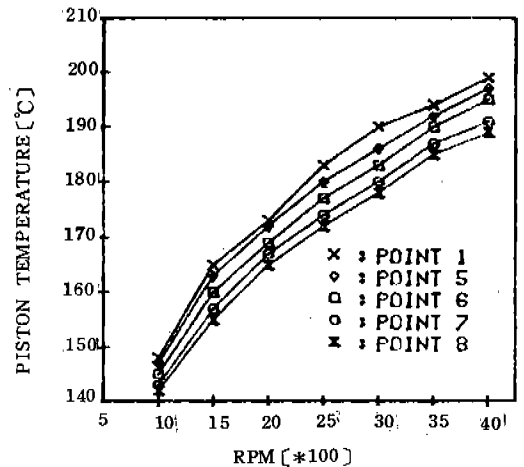


Fig. 3-8 Piston temperature versus engine speed at crown and ring lands (full load)

Fig. 3-8은 피스톤 크라운 중심으로부터 각 피스톤 링 랜드 표면으로의 위치에 따른 온도변화를 보여주는데 중심과 오일 링 랜드 사이의 온도차는 약 6~10°C 정도로 나타남을 알 수 있다.

3-4-2 Reynolds수에 따른 온도 변화

Taylor는 가스 및 냉각수 평균 온도를 각각 일정하게 유지하였을 경우 유사한 엔진의 여러 운전조건에서 $h_g D / k_g$ (가스측 Nusselt수),

T_{sg} (가스측 벽면온도) 및 T_{sc} (냉각수측 벽면온도)는 가스나 냉각수 각각의 Re수와 일정한 지수관계를 갖는다는 것을 보여주고 있다.⁷⁾ 본 연구에서도 이를 확인하기 위하여 여러 엔진조건에서 흡기관 온도 압력 조건하의 Re수와 피스톤 크라운 온도와의 관계를 살펴 보았다. 연소실 가스 Re수를 흡기관 조건의 Re수로 대치하였는데 이는 이들간에 대체적인 비례관계가 있어 목적하는 바에 큰 무리를 주지 않는다고 생각하기 때문이다.

$$\frac{\rho_g VD}{\mu_g} \sim \frac{\rho_i VD}{\mu_i}$$

여기서 하첨자 g는 연소실 평균온도 그리고 i는 흡기 다기관에서의 조건을 뜻한다. Fig. 3-9는 피스톤 크라운 온도와 흡기조건의 Reynolds수를 Log-Log 축에 표시한 것으로 이들간에 비교적 만족스런 지수관계를 갖는다는 것을 보여주고 있다고 본다.

3-4-3 냉각수온도의 영향

Fig. 3-10은 엔진 냉각수 온도의 변화에 따른 피스톤 표면의 온도변화를 나타낸 것이다. 엔진 냉각수의 온도를 60°C에서 90°C까지 10°C 간격으로 변화시키면서 실험을 하였다. 냉각수의 온도가 상승하게 되면 실린더와 접하고 있는 피스톤의 온도도 냉각수 온도상승의 80~90% 정도의 온도상승을 보여주고 있다.

3-4-4 측정온도에 대한 링크운동의 영향

열전대가 측정점으로부터 측정시기 사이에서 비틀림과 흔들림 등의 운동을 받기 때문에 이것으로 인한 영향을 살펴보기 위하여 다음과 같은 실험을 하였다.

1) 엔진이 실험실의 온도로 냉각된 후 피스톤의 온도를 측정하였는데 14°C이었다. 다음 엔진에 설치되어 있는 4개의 Spark Plug를 모두 빼내어 단열압축의 효과를 최소로 줄이며 점화가 되지 않도록 하면서 2개의 Battery를 병렬로 연결하여 Starting Motor로 엔진을 구동시켰는데(250~300 rpm) 피스톤의 초기온도는 역시 14°C로 측정되었다. 약 50

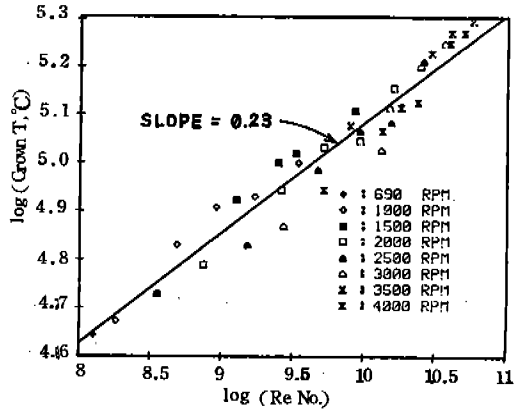


Fig.3-9 Piston crown temperature versus Reynolds number(No load, 25%, 50%, 75% & full load)

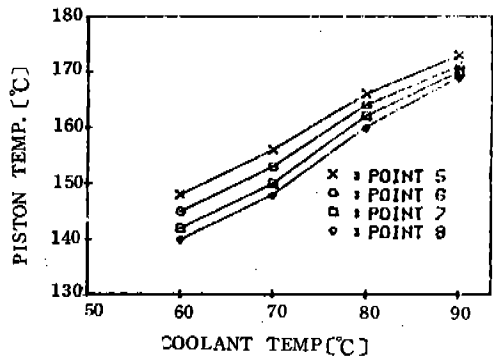


Fig.3-10 Effect of engine coolant temperature on piston temperature (2000 rpm, full load)

~60초 후에 15°C로 1°C의 온도가 상승하였는데 이것은 피스톤 링과 실린더 벽면과의 마찰에 의한 것으로 설명될 수 있다. 엔진의 회전수를 증가시켜 실험하기 위하여 다음의 방법을 사용하였다.

2) 열전대가 설치되어 있는 1번 실린더의 Spark Plug만 빼내어 1번 실린더에서는 단열압축의 효과를 줄이며 점화가 되지 않도록 하고 나머지 3개의 Spark Plug를 사용하여 엔진을 작동시켰다(1,000 ± 200rpm). 피스톤의 온도는 계속 작동전의 온도(15°C)를 유지하다가 20~30초 이후에 16°C로 1°C가 상승하였다. 위의 실험에서 나타난 바와 같이 마찰

에 의해 피스톤의 온도가 상승하기 전까지는 정지상태의 온도가 계속 유지되었던 것으로 보아 링크의 운동이 측정온도에 별다른 영향을 미치지 않는다고 생각된다.

4. 결 론

이상과 같은 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1) L-LINK 장치를 실엔진에 장착하여 1,000 rpm에서 4,000 rpm까지 500 rpm 간격으로 그리고 각 엔진속도에서 무부하, 25%, 50%, 75% 및 전부하의 운전조건에서 피스톤 주요 부위 온도를 직접 측정할 수 있었다.

2) 정상운전 상태에서 피스톤의 표면온도는 대체로 100~200°C 사이에서 변동되며 엔진속도와 부하의 증가에 따라 상승하였다.

3) Engine Borderline Knock이 발생하기 시작하는 경우 피스톤 표면온도는 Borderline Knock이 발생하지 않을때보다 20~40°C 상승하였다.

4) 피스톤 표면은 점화시기 변동에 대해서 거의 점화진각에 비례하는 선형적인 온도의 변화를 나타내었다.

5) 피스톤의 온도는 엔진 냉각수의 온도변화에 따라 거의 비슷한 폭으로 변동함을 알 수 있다.

6) 열전대선이나 측정점의 운동에 따른 온도측정 신호에 주는 영향은 별로 나타나지 않았다.

7) 피스톤 크라운 온도는 엔진의 여러 rpm

및 부하조건에서 흡기관 가스의 Reynolds 수와 일정한 지수관계를 갖는 것으로 판명되었다.

후 기

본 연구는 한국기계연구소(KIMM)의 위탁 연구개발 과제로서 이의 지원에 감사드립니다.

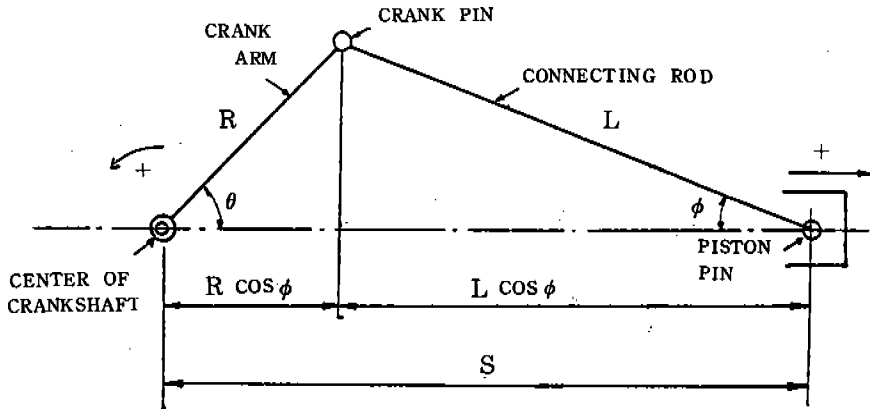
참 고 문 헌

1. Shoichi Furuhashi and Yoshiteru Enomoto "Piston Temperature of Automobile Gasoline Engine in Driving on the Road" Bulletin of JSME, Vol. 16, No. 99, Sep. 1973.
2. 內燃機關 22 卷, 5-9 號 Vol.22, No.277-281, 1983.
3. Yoshiteru Enomoto "Heat Loss to Combustion Chamber Wall of 4-Stroke Gasoline Engine" Bulletin of JSME, Vol. 28, No. 238, Apr. 1985.
4. W. Lee and H.J. Schaefer "Analysis of Local Pressure, Surface Temperature, and Engine Damages under Knocking Conditions" SAE 830508, 1983.
5. Edward F. Obert "Internal Combustion Engines and Air Pollution" p. 291-299.
6. Charles Fayette Taylor "The Internal-Combustion Engine in Theory and Practice" Vol. II, p. 240-246, MIT Press.
7. Charles Fayette Taylor "The Internal-Combustion Engine in Theory and Practice" Vol. I, p. 274-280, MIT Press.

부 록

L-LINK의 응력계산

1. 가속도의 계산



Crank and con-rod mechanism⁽⁶⁾

○ Piston Displacement

$$S = R \cos \theta + L \cos \phi \dots\dots\dots (1)$$

$$R \sin \theta = L \sin \phi \quad \text{or} \quad \sin \phi = \frac{R}{L} \sin \theta$$

$$\cos \phi = \sqrt{1 - \sin^2 \phi} = \sqrt{1 - \left(\frac{R}{L}\right)^2 \sin^2 \theta}$$

by binomial series

$$\sqrt{1 - \left(\frac{R}{L}\right)^2 \sin^2 \theta} = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{R}{L}\right)^2 \sin^2 \theta - \frac{1}{8} \left(\frac{R}{L}\right)^4 \sin^4 \theta - \frac{1}{16} \left(\frac{R}{L}\right)^6 \sin^6 \theta + \dots\dots$$

$$\sin^{2n} \chi = \frac{1}{2^{2n}} \left\{ \sum_{k=0}^{n-1} (-1)^{n-k} 2 \cdot \binom{2n}{k} \cos 2(n-k) \chi + \binom{2n}{n} \right\} \quad \text{이므로}$$

$$\cos \phi = a_0' + a_2' \cos 2\theta + a_4' \cos 4\theta + a_6' \cos 6\theta + \dots\dots\dots (3)$$

Where, $a_0' = 1 - \left[\frac{1}{4} \left(\frac{R}{L}\right)^2 + \frac{3}{64} \left(\frac{R}{L}\right)^4 + \frac{5}{256} \left(\frac{R}{L}\right)^6 + \dots\dots \right]$

$$a_2' = \left[\frac{1}{4} \left(\frac{R}{L}\right)^2 + \frac{1}{16} \left(\frac{R}{L}\right)^4 + \frac{15}{512} \left(\frac{R}{L}\right)^6 + \dots\dots \right]$$

$$a_4' = - \left[\frac{1}{64} \left(\frac{R}{L}\right)^4 + \frac{3}{256} \left(\frac{R}{L}\right)^6 + \dots\dots\dots \right]$$

$$a_6' = \left[\frac{6}{512} \left(\frac{R}{L}\right)^6 + \dots\dots\dots \right]$$

그러므로,

$$S = R \left(\cos \theta + \frac{L}{R} \cos \phi \right)$$

$$= R \left[\cos \theta + \frac{L}{R} \left(a'_0 + a'_2 \cos 2\theta + a'_4 \cos 4\theta + a'_6 \cos 6\theta + \dots \right) \right] \dots \dots \dots (4)$$

$$\left(\text{let } a_0 = \frac{L}{R} a'_0, \quad a_2 = \frac{L}{R} a'_2, \quad a_4 = \frac{L}{R} a'_4, \dots \right)$$

$$S = R(a_0 + \cos \theta + a_2 \cos 2\theta + a_4 \cos 4\theta + a_6 \cos 6\theta + \dots) \dots \dots \dots (5)$$

○ Piston Speed

$$\dot{S} = \frac{dS}{dt} = -\Omega R(\sin \theta + 2 a_2 \sin 2\theta + 4 a_4 \sin 4\theta + \dots) \dots \dots \dots (6)$$

○ Piston Acceleration

$$\ddot{S} = \frac{d^2S}{dt^2} = -\Omega^2 R(\cos \theta + 4 a_2 \cos 2\theta + 16 a_4 \cos 4\theta + \dots) \dots \dots \dots (7)$$

(Ω : angular velocity)

최대 가속도는 상사점 (TDC)과 하사점 (BDC)에서 발생하므로

$$\ddot{S}_{\max} = \Omega^2 R(\cos \theta + 4 a_2 \cos 2\theta + \dots) \Big|_{\theta = 0}$$

$$\doteq \Omega^2 R \left(1 + \frac{R}{L} \right) \dots \dots \dots (8)$$

2. L-LINK 의 최대 응력점에서 응력의 계산

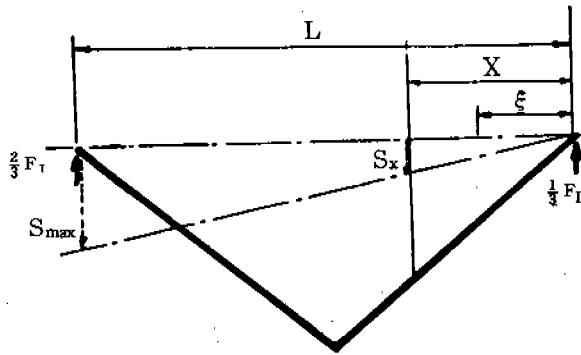


Fig.A-2 Schematic Diagram of L-LINK

F_I : Inertia Force

M : Total Mass of Link ($m=M/L$)

I : Second Moment of Area

M_{bx} : Bending Moment

$$\dot{S} = \dot{S}_{\max} \cdot \frac{x}{L}$$

$$F_{Ix} = \int_0^x m \ddot{S}_x dx = \int_0^x \frac{m \ddot{S}_{\max}}{L} \cdot x dx$$

$$F_1 = \frac{m\ddot{S}_{\max}}{L} \int_0^L x dx = \frac{mL\ddot{S}_{\max}}{2} = \frac{M\ddot{S}_{\max}}{2}$$

$$M_{bx} = \frac{F_1}{3} \cdot x - \frac{x}{3} \int_0^x m\ddot{S}_{\max} \cdot \frac{\xi}{L} d\xi = \frac{mL\ddot{S}_{\max}}{6} \cdot x - \frac{m\ddot{S}_{\max}}{6L} \cdot x^3$$

$$\frac{dM_{bx}}{dx} = \frac{mL\ddot{S}_{\max}}{6} - \frac{m\ddot{S}_{\max}}{2L} x^2 = 0$$

$$x^2 = \frac{1}{3} L^2$$

그러므로 최대 Moment는 $x = \frac{1}{\sqrt{3}} L$ 에서 발생한다.

$$M_{b\max} = M_{bx} \Big|_{x=L/\sqrt{3}} = \frac{mL\ddot{S}_{\max}}{6} \cdot \frac{L}{\sqrt{3}} - \frac{m\ddot{S}_{\max}}{6L} \left(\frac{L}{\sqrt{3}}\right)^3 = \frac{mL^2\ddot{S}_{\max}}{9\sqrt{3}}$$

$x = \frac{L}{\sqrt{3}}$ 에서의 최대응력은 $y = h/2$ 에서 발생하므로

$$\sigma_{\max} = \left(\frac{M_{b\max} \cdot y}{I} \right)_{y=h/2} = \frac{mL^2\ddot{S}_{\max}h}{18\sqrt{3}I} = \frac{ML\ddot{S}_{\max}h}{18\sqrt{3}I}$$

Second Moment of Area about the Neutral Axis.

$$I = \frac{1}{12}(0.006)(0.02)^3 - \frac{1}{12}(0.001)(0.014)^3 - \frac{1}{12}(0.003)(0.014)^3 = 3 \times 10^{-9} (m^4)$$

$$(M=0.05kg, L=0.135m, R=0.035m, h=0.02m)$$

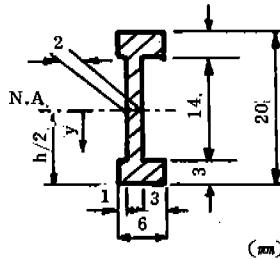


Fig.A-3 Cross section of L-LINK

계산결과,

$$4000 \text{ RPM} : \sigma_{\max} \doteq 1.2 (kg/mm^2)$$

$$5000 \text{ RPM} : \sigma_{\max} \doteq 1.9 (kg/mm^2)$$

* 재료의 강도 : 47 kg/mm² (A2024-T6)

* 충격 하중시 안전계수 : 12~15

엔진 속도 5000 RPM인 경우 안전계수가 24.7정도가 되어 충분한 강도의 설계로 판단된다.