

〈논 문〉 SAE NO. 98370019

## 직분식 단기통 디젤기관 피스톤의 순간온도 측정에 관한 실험적 연구

### An Experimental Study on the Measurement of the Instantaneous Surface Temperature of the Piston of the DI Mono Cylinder Diesel Engine

이 재 순\*, 이 현 구\*\*, 강 태 경\*\*, 이 응 래\*\*, 정 인 곧\*\*, 안 병 태\*\*  
J. S. Lee, H. K. Lee, T.K.Kang, E. L. Lee, I. G.Jung, B. T. An

#### ABSTRACT

For the experimental measurement of instantaneous surface temperature of the piston of the DI mono cylinder diesel engine, the instantaneous temperature probes, data acquisition system, and grass-hopper type linkage system were developed. The instantaneous temperatures on the piston bowl, crown, lands and skirt were measured and analyzed, and the following conclusions were derived ; (i) The crank angle for the maximum instantaneous temperature during one cycle varies and moves back and forth by the measuring positions and engine speeds. (ii) The engine speeds, the positions of the measuring points and the cooling water temperature had an effect on the instantaneous temperature amplitude. (iii) The instantaneous temperature swing phenomena appeared on the temperature profiles of the piston crown, top and second land of ring, but on the temperature profiles of the parts of the third land of the ring and skirt, they didn't appear. (iv) The isothermal lines in the piston were acquired through the operation of the finite elements method using the measured temperatures as the boundary conditions.

주요기술용어 : Piston Crown(피스톤 크라운), Piston Bowl(피스톤 바울), Temperature Swing(온도 진폭), Instantaneous Surface Temperature(표면순간온도), Linkage system(링크장치)

#### 1. 서 론

상용차 기관으로서 고효율과 저연비 그리고 배  
출가스규제 등의 요구에 알맞은 직분식 디젤엔진

개발이 요구되는 실정이다. 기반기술이 취약한  
현 시점에서 연소실 내부의 열전달 현상을 정확  
히 파악하여, 성능향상과 공해물질 감소를 위한  
기초 자료를 획득하는 것이 절실히 필요한 실정  
이다. 특히 연소실 구성요소로, 움직이는 부분인  
피스톤은 열의 과부하시 파손이 자주 일어난다.  
따라서 피스톤에 대한 순간온도 측정으로 비정상

\* 정회원, 건국대학교 기계공학과

\*\* 건국대학교 기계공학과 대학원

온도 분포를 알아보는 것은 대단히 중요하다.

한 사이클동안 변화하는 연소실 벽표면의 비정상 순간온도 측정은 순간온도 프루브로 채취하는데, 이 프루브는 1953년, Bendersky가 최초로 개발하였으며, Overbye, Hohenberg 및 Enomoto 등이 개선한 바 있다.<sup>1)~3)</sup> 국내에서는 이성렬, 이종태 등이 순간온도를 측정한 바 있다.<sup>4), 5)</sup> 피스톤부의 온도측정을 위한 열전대의 인출을 위해서는 L형, 그라스호퍼(Grass-hopper)형 등의 링크장치를 이용하고 있으며, 텔레메트리 시스템(Telemetry System)을 이용하여 피스톤의 온도를 측정하는 연구도 있다.<sup>6)~8)</sup>

이에 본 연구는 직분식 디젤기관 피스톤부의 표면순간온도 측정을 위한 센서를 제작하고, 데이터를 안전하게 획득하기 위한 그라스호퍼형 링크장치를 개발하여, 피스톤 표면순간온도를 측정하고, 온도거동에 대한 분석을 통하여 향후 엔진 설계에 필요한 기초자료와 기술력을 축적시키고자 한다.

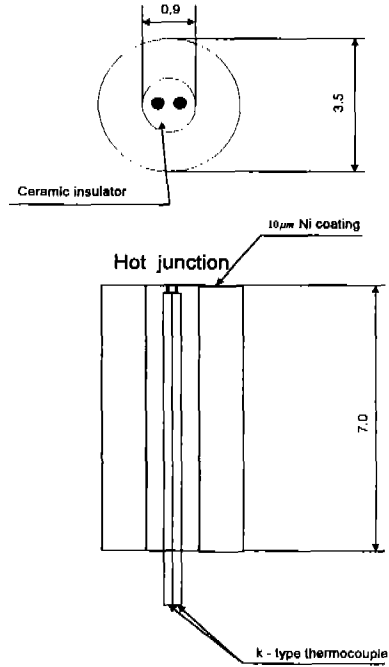


Fig.1 Schematic Diagram of Instantaneous Temperature Probe

## 2. 실험장치

### 2.1 순간온도 측정용 프루브

순간온도프루브는 통상 사용하고 있는 열전대의 시백(Seebeck) 효과를 응용한 것으로, 열전대의 두 소선을 아주 얇은 금속박막으로 접속시켜, 한 사이클 동안 순간적으로 변화하는 연소실 벽온도를 시간지연없이 측정할 수 있도록 한 것이다.<sup>9)</sup>

본 연구에서는 두 소선의 연결을 내구성과 열전도율이 좋은 무전해 니켈도금으로 하였다.

피스톤에 삽입하는 프루브는 지름 3.5mm, 길이 7.0mm, 내경 0.9mm의 원통형으로, Fig.1은 제작한 순간온도 프루브의 개략도이다.

### 2.2 링크장치

링크장치는 기관운전에 끼치는 영향을 최소화 하면서, 데이터선을 안전하게 보호하여 원하는 신호를 기관의 외부에서 검출할 수 있어야 한다. 따라서 링크장치를 설계할 때 고려하여야 할 사항은 다음과 같다. 링크의 구성요소는 엔진과 간

섭 없이 원활하게 움직이고, 충분한 강도를 가지고 있어야 한다. 엔진구동시 데이터선에 가해지는 반복하중을 없애기 위해 각 링크간에 발생하는 각도 변화량이 적어야 한다. 기관의 운전에 끼치는 영향이 적고, 데이터선 인출시 엔진과의 조립이 용이해야 한다. 일반적으로 링크의 길이를 길게 하면 링크간의 각도 변화량은 적어지지만, 장착이 용이하지 않다. 따라서 기관에 장착하기 위해서는 적당한 길이가 선정되어야 한다. Fig.2는 설계된 링크의 전달 각도와 길이를 나타낸다. 링크는 듀랄루민으로 제작을 하고, 커넥팅로드 하단부 연결링크는 강철재료로 특수용접을 하였다. 링크와 링크의 연결은 직경 10mm의 부시로 처리하고, 센서선이 유출될 수 있도록 직경 5mm의 스프링이 들어갈 수 있는 구멍이 있는 편으로 연결하였다.

Fig.3은 엔진에 링크가 결합된 모습을 나타낸 개략도이다.

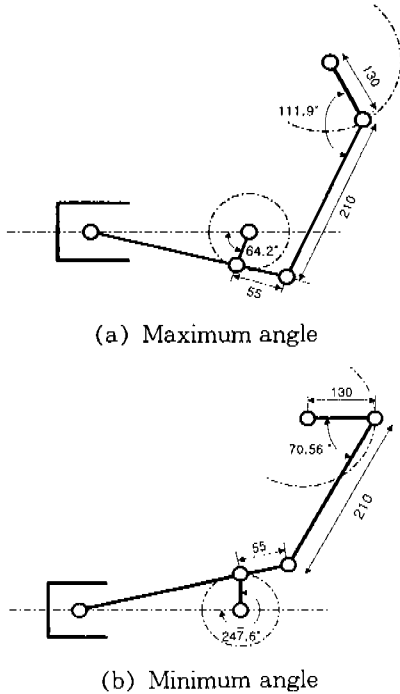


Fig.2 Schematic Diagram of Linkage System Transmission Angle

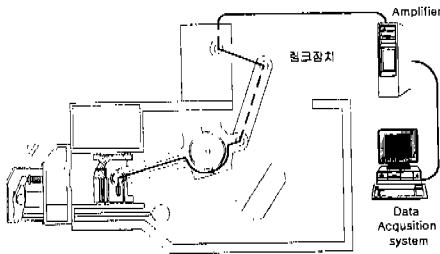


Fig.3 Assembly Diagram of Data Acquisition System

2.3 실험장치 구성

실험장치는 기관, 동력계, 냉각수계, 흡배기계 및 각부의 압력과 온도를 측정하는 데이터 취득부로 구성되었다. 기관의 주요제원은 Table 1과 같다. 온도계측에 사용된 A/D Converter(250 kHz)는 12bit의 DMA(Direct Memory Access) 방식으로 0~10V를 4096 등분할 수 있는 분해

Table 1 Engine specifications

|                           |  |
|---------------------------|--|
| Engine type               | Water cooled<br>DI diesel engine   |
| Bore × stroke             | 95mm × 95mm  |
| Displacement volume       | 673cc  |
| Combustion chamber volume | 39.6cc   |
| Compression ratio         | 18   |
| Number of cylinder        | 1  |
| Valve timing              | IVO : 20degBTDC<br>IVC : 44degABDC<br>EVO : 44degBBDC<br>EVC : 20degATDC |

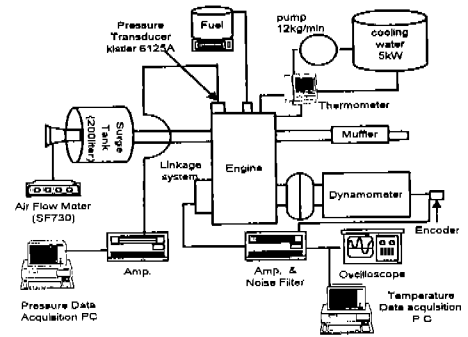


Fig.4 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

능을 가지고 있다. 연소실 압력은 Kistler 6125A1 Piezo Electric Pressure Transducer 센서를 이용하였고, 검출된 전압은 Kistler 5001 Charge Amplifier로 증폭한 뒤, A/D Converter를 통해 PC에 저장하였다. Fig.4는 실험장치의 개략도이다.

3. 결과 및 고찰

실험은 Full-Load 상태에서 냉각수 온도를 고정하고, 1000rpm~1600rpm까지 200rpm 단위로 실시하였다. 피스톤의 온도는 각각의 회전수에 대해 약 1~2분 사이에 정상상태에 도달하였

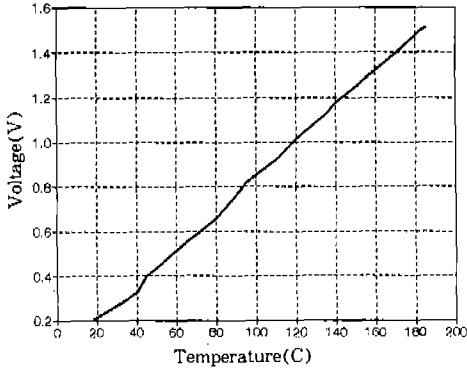


Fig.5 Calibration of Instantaneous Temperature Probe

다.<sup>10)</sup> 열전대의 인출제한으로 측정위치에 따라 바울(Bowl)부, 크라운(Crown)부, 랜드(Land)부와 스커트(Skirt)부로 나누어 각각 실험하였다.

### 3.1 온도 보정선도

본 연구에서 제작된 순간온도 센서들의 보정계수를 구하기 위해, 동일한 방법으로 제작한 여러 센서중에서 임의로 추출하여 온도에 따른 출력전압을 구하여 평균값을 구하였다. 측정된 모든 센서들의 출력전압은 평균값에 대한 오차율이 ±4% 미만이므로 선형성을 보유하고 있는 것으로 본다. Fig.5는 센서보정선도로 기전력이 온도에 따라 선형적으로 변하는 것으로 보았다. 증폭된 출력볼트와 계측된 온도 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$T = 125.87 \times V - 7.82 \quad (1)$$

### 3.2 벽표면 순간온도 거동

Fig.6은 바울, 크라운, 랜드와 스커트부의 온도 측정점의 위치와 연료분사방향을 나타낸다.

바울부는 3번 측정점을 중심으로 상하좌우로 바울 안쪽에 20mm 떨어진 곳에 1, 2, 4, 5번 측정점이 위치하고, 크라운부는 바울의 원주상에서 10mm 떨어진 곳에 6, 7, 8번, 7mm 떨어진 곳에 9, 10, 11번 측정점이 위치한다. 랜드부, 스커트부, 그리고 배면부는 그림과 같이 위치한다.

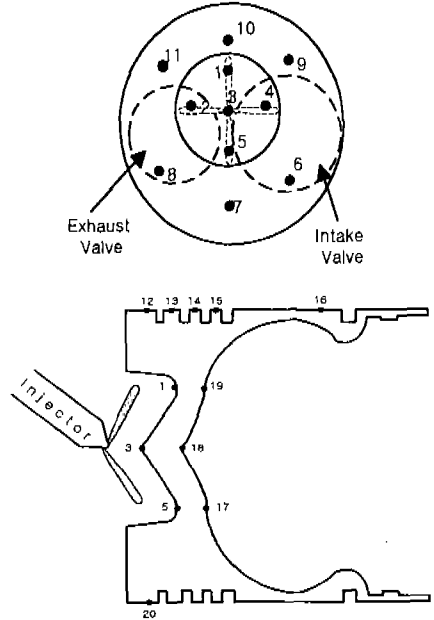


Fig.6 Schematic Diagram of 20 Measuring Points of Instantaneous Temperature

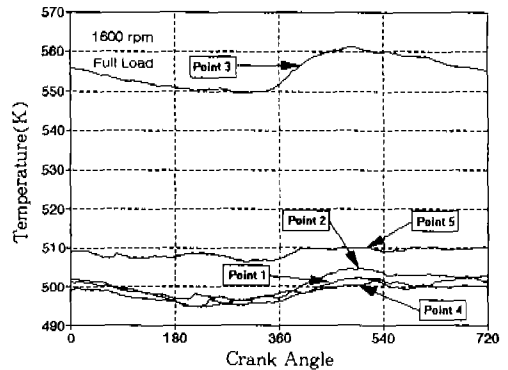


Fig.7 Instantaneous Surface Temperatures of Piston(Bowl, 1,600rpm, full load)

#### 3.2.1 피스톤 바울부의 순간온도 거동

Fig.7은 1,600rpm, 냉각수 온도 70℃에서의 바울부의 순간온도 거동을 나타내고 있다. 측정점 3번의 온도가 가장 높고 1, 2, 4, 5는 낮다. 이것은 연료분사가 Fig.6에서와 같이 1, 2, 4, 5 방향의 바울 내벽으로 이루어지는데, 피스톤 상하운동으로 인한 스퀴시 유동이 바울 정점을 중심으로 하여 바울 바닥을 거쳐 내벽을 따라

선회유동을 하기 때문에 분사 연료가 바울 내부로는 분사가 덜되고, 대부분 피스톤 크라운부로 분사되어 연소되기 때문인 것으로 사료된다. 또한 측정점 1, 2, 3, 4, 5의 순간온도 최고값은 TDC 이후 상당시간이 흐른뒤에 나타난다. 이것도 연료분사가 주로 바울 내부보다는 바울 외부로 분사되어 바울 내부로 분사된 연료의 연소가 지연되기 때문인 것으로 사료된다.

3.2.2 피스톤 크라운부의 순간온도 거동

Fig.8은 1,600rpm에서 크라운부의 순간온도 거동을 나타낸다. 각각의 측정위치에서 최고온도 값과 최저온도값의 차이인 온도진폭은 약 20K~40K 정도로 각각 다르다. Fig.8의 순간온도 거동을 볼 때 순간온도의 최고값이 나타나는 크랭크 각도(Crank Angle)의 크기 비교로 7, 8, 9, 6, 11, 10의 순서로 화염이 도달한다는 것을 알 수 있다. 이것은 연료분사방향과 더불어 연소실 내부의 유동현상으로 발화 및 확산연소가 측정점마다 상이하기 때문인 것으로 사료된다. 측정점 7과 8은 배기밸브에 가까운 곳으로 온도가 높고, 9와 6은 흡기밸브에 가까운 곳으로 온도가 낮다. 특히 측정점 7은 다른 곳과 비교하여 온도 값이 가장 낮은 상태에서 가장 빠르게 최고값에 도달하는데, 이것은 이곳이 연료 분사방향과 일치하고, 흡기밸브와 배기밸브의 중간지점으로 밸브 오버랩으로 인한 왕성한 가스유동이 원인인 것 같다. 측정점 11은 배기밸브 부근으로 전체적으로 고온이지만 발화 및 확산연소가 늦은 것

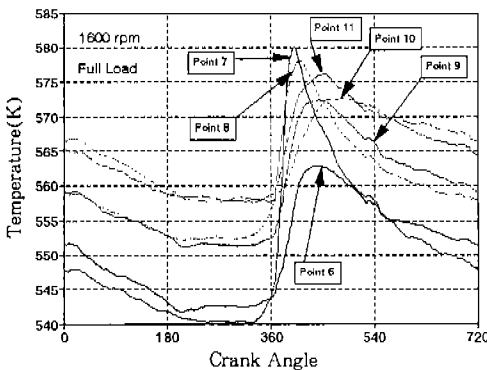


Fig.8 Instantaneous Surface Temperatures of Piston(Crown)

을 볼 수 있다.

Fig.7과 Fig.8을 비교해보면 바울부보다 크라운부의 순간온도 최고값이 높고, 빠르게 도달하며 평균적으로 온도가 높은 것을 알 수 있다. 이것은 연소가 바울 내부보다는 크라운부에서 활발하게 일어나고 있음을 나타낸다. 측정점 10은 바울부의 측정점들과 거의 비슷한 시기에 최고온도값을 나타내고 있다.

Fig.9와 Fig.10은 각 rpm단위로 측정점의 위치에 따라 순간온도의 진폭과 최고값이 변화하는 것을 보여주고 있다. Fig.9는 측정점 8로 기관속도의 변화에 따라 순간온도의 진폭 변화가 일정하지 않다. 그러나 Fig.10은 측정점 10으로 기관속도가 상승함에 따라 순간온도의 진폭이 감소

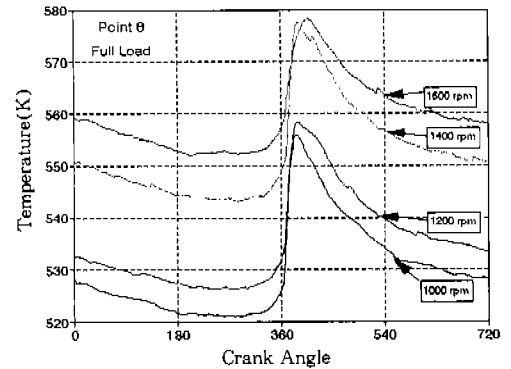


Fig.9 Instantaneous Surface Temperatures of Piston(Point 8 ; each engine speed)

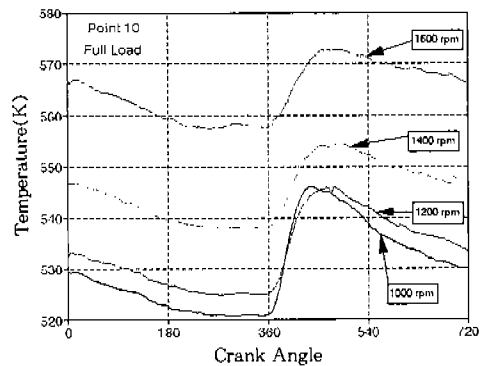


Fig.10 Instantaneous Surface Temperatures of Piston(Point 10 ; each engine speed)

하고, 순간온도 최고값을 나타내는 크랭크 각의 위치가 지연되는 것을 볼 수 있다.

Fig.11은 크라운부 각 측정점에서 순간온도 최고값과 최저값의 차이인 온도진폭을 기관회전수에 대해 나타낸 것이다. 측정점 6, 9, 10은 흡기밸브 부근으로 엔진 회전수가 상승함에 따라 온도진폭이 감소하는 것을 볼 수 있다. 그러나 측정점 7, 8, 11은 배기밸브 부근과 밸브 부리지 부근으로 기관회전수와는 무관하게 온도진폭이 변화하는 것을 볼 수 있다. 이것은 기관회전수가 상승함에 따라 흡배기밸브의 개폐속도도 따라서 증가한다. 그러나 실린더내 연소가스의 유동은 기관속도와 일정한 관계로 변한다기 보다는 랜덤하게 변하는 것 같다. 이로인해 연소실 내부 유동이 영향을 받는 것 같다.

특히 6, 9, 10은 흡기밸브 부근이므로 잦은 흡기밸브의 개폐작용으로 흡기유동과 그로인한 흡기냉각의 영향으로 온도진폭이 낮아지는 것으로 사료된다.

이것으로 피스톤 표면 순간온도 거동은 측정위치와 기관회전수에 의해 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 즉 연소실 내부의 연소현상과 발화 및 확산연소는 기관회전수와 피스톤의 형상과 밀접한 관계가 있다.

### 3.2.3 피스톤 랜드부의 순간온도

Fig.12는 1,600rpm에서의 피스톤 링랜드부의 온도를 나타내는 것으로서 제일 위의 것은 Fig.6의 측정점 12의 톱(Top) 랜드 온도이고, 세 번

째 것은 Second 랜드 온도이고, 넷째와 다섯째는 Third 랜드, Fourth 랜드 그리고 여섯째는 스킵트부의 순간온도 거동을 나타내고 있다. 두 번째 것은 측정점 20으로 측정점 12와 180° 위치한 밀면의 톱 랜드 온도이다. 온도 진폭을 보면, 톱 랜드는 약 8K, Second 랜드는 5K 정도의 온도 진폭이 발생한다. 그리고 Third 랜드, Fourth 랜드는 온도진폭이 나타나지 않는다. 따라서 톱과 Second 랜드에 온도진폭이 발생하는 것을 보고, 고온의 연소가스가 톱 링을 통하여 Second 링 쪽으로 누출된다는 것을 알 수 있다. 측정점 20의 톱 랜드의 온도는 측정점 12의 톱

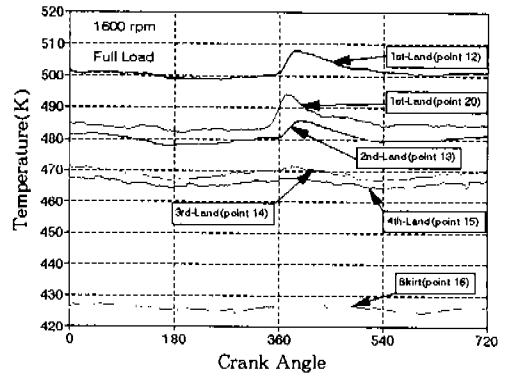


Fig.12 Instantaneous Surface Temperatures of Piston(Lands and Skirt)

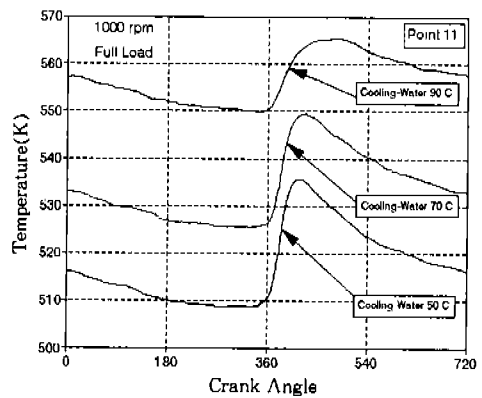


Fig.13 Variation of Cooling Water Temperature Versus Instantaneous Surface Temperature of Piston (Crown ; measuring point 11)

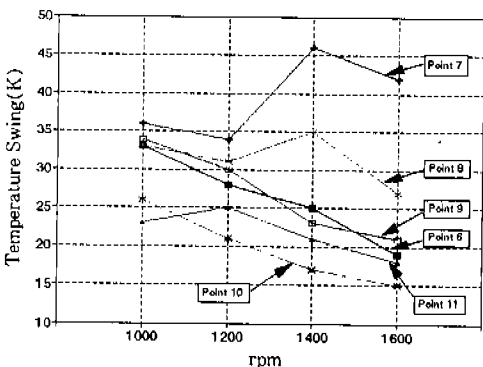


Fig.11 Temperature Swing Versus Engine Speed(Crown)

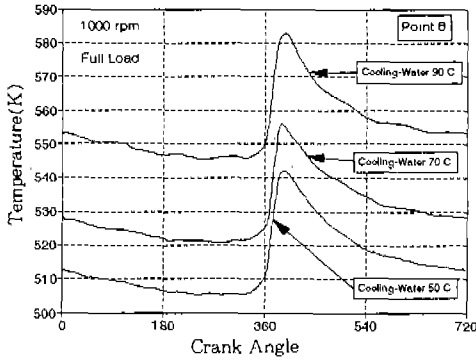


Fig.14 Variation of Cooling Water Temperature Versus Instantaneous Surface Temperature of Piston (Crown ; measuring point 8)

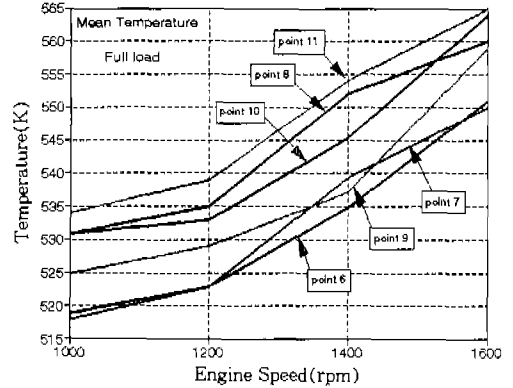


Fig.15 Variation of Engine Speed Versus Mean Temperatures of Piston (Crown)

랜드보다 평균적으로 17K 정도 낮다. 이것은 실험 엔진이 횡형으로 되어 있어서, 측정점 20이 측정점 12에 비해 피스톤의 하단부에 위치해 있어 엔진오일에 의한 냉각이 용이하고, 피스톤 형상 자체가 하단부쪽이 두껍게 되어있기 때문이라 생각된다.

3.2.4 냉각수 온도변화에 따른 순간온도 거동

Fig.13과 Fig.14는 1,000rpm에서 냉각수 온도를 50°C, 70°C, 90°C로 변경했을 때, 측정점 11과 8에서의 순간온도를 나타낸다. Fig.13은 Fig.14에 비해 냉각수 온도가 상승함에 따라 최고값에 이르는 진폭이 저하되고 순간온도 최고값을 나타내는 크랭크 각이 지연되는 것을 볼 수 있다. 위치에 따라 다르지만 냉각수 온도변화에 따라 순간온도의 거동이 영향을 받는다. 냉각수 온도가 상승함에 따라 피스톤의 평균온도가 올라가는 것은 냉각수 온도가 상승함에 따라 냉각수로 전달되는 열량(헤드와 라이너)이 적어지고, 피스톤으로 그 출입량이 많아지기 때문이다. 냉각수 온도가 20K 변할 때 피스톤 크라운부 각 측정점의 온도변화는 평균적으로 약 17K~22K 정도였다.

3.3 평균온도 분포

Fig.15는 크라운부의 측정점 6, 7, 8, 9, 10, 11의 기관회전수 변화에 따른 평균온도값을 나

타낸다. 기관회전수가 상승할수록 평균온도값이 상승하는 것을 볼 수 있다. 측정점 11과 8은 배기밸브쪽으로 온도가 높고, 6, 7, 9는 흡기밸브쪽으로 상대적으로 낮다. 평균온도값은 일정 기관속도에서 측정위치마다 그 차가 15K~20K로 나타났다.

3.4 2차원 유한요소해석을 통한 등온선도

Fig.16과 Fig.17은 1,000rpm과 1,600rpm에서 실험에 의해 구해진 온도데이터를 경계조건으로 하여 2차원 유한요소 해석을 통한 피스톤 단면의 등온도분포를 나타낸다. 열유동의 방향이 등온도선에 직각으로 흐르는 것을 감안하면, 등온도선에서 열의 흐름은 바울부와 크라운부에서는 피스톤 길이방향으로 흐르지않고 있다. 그러나 스커트부에서는 피스톤 길이방향으로 흐른다. Fig.16과 Fig.17에서 피스톤 단면 온도는 크라운부, 바울의 돌출부, 바울 내측의 순으로 온도 분포를 이루고 있고, 1,000rpm보다는 1,600rpm의 등온선 경사가 피스톤 축에 대해서 더욱 급한 것을 볼 수 있다. Fig.16에서는 피스톤 이면 내측의 온도가 탑링그루브(Top Ring Groove)와 동일한 온도분포를 나타내고 있으나, Fig.17에서는 피스톤 이면 내측의 온도가 톱 랜드부와 동일한 온도분포를 나타내고 있다. 또한 피스톤의 이면 내측보다는 라이너와 인접한 외측 부분이 더

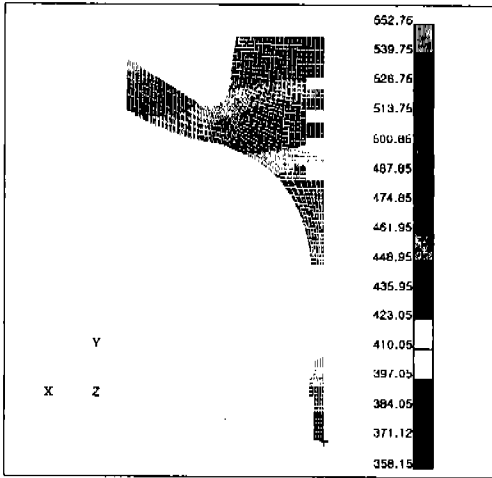


Fig.16 Isothermal-Lines of the Piston (1,000rpm)

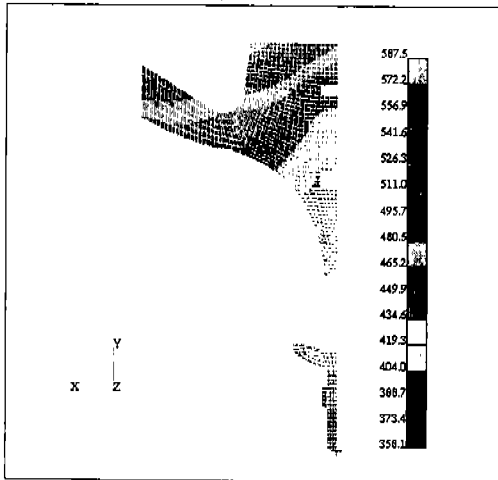


Fig.17 Isothermal-Lines of the Piston (1,600rpm)

잘 생각되고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

직분식 디젤기관 피스톤의 표면순간온도를 측정할 수 있는 센서와, 센서선을 안전하게 기관밖으로 인출하기 위한 그라스 호퍼형 링크장치를 설계, 개발하여 순간온도를 측정할 수 있었다.

이로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 실험에 사용된 순간온도 프루브는 장시간의 운전에도 이상없이 데이터를 얻을 수 있도록 응답성과 내구성이 양호함을 확인하였다. 그리고 개발한 링크장치도 기능과 내구성이 양호함을 확인할 수 있었다.
- 2) 순간온도 최고값을 나타내는 크랭크 각도를 기준으로 살펴보면 측정위치에 따라 그 각도가 상이하다. 이것은 디젤기관의 연소 특성으로서 측정부위에 따라 발화시간과 연소가스의 유동이 상이함으로 인한 것으로 해석이 된다.
- 3) 엔진 회전수 증가에 따라 피스톤 표면의 순간온도 진폭은 흡기밸브 부근은 낮아지나 배기밸브 부근은 그 현상이 상이하다. 이것은 흡배기밸브의 속도가 기관속도에 비례하여 변하지만 실린더내 가스유동은 기관속도에 따른 일정한 관계 즉, 일정한 율로 상승하거나 하강하는 변화는 보이지 않고 특정한 기관속도에서는 더 증가하거나 또는 더 떨어지거나 하는 일정치 않은 랜덤하게 변하기 때문인 것으로 사료된다.
- 4) 바울부 안쪽의 온도는 크라운부의 온도보다 낮고 순간온도 진폭도 낮은 것을 확인할 수 있었다. 또한 톱 링으로 연소가스의 출입이 있다는 것을 알 수 있었다.
- 5) 냉각수 온도증가는 연소실 내부의 연소현상을 변화시켜, 피스톤의 순간온도 거동을 변화시키고, 평균온도를 상승시키는 것을 확인할 수 있었다.
- 6) 일정한 엔진회전수에서 평균온도값은 배기밸브 부근이 흡기밸브 부근보다 높고, 측정위치마다 그 값이 다른데, 그 차가 15K ~ 20K로 나타났다.
- 7) 2차원 유한요소 해석을 통한 피스톤 단면의 등온도분포를 통해서 피스톤 단면의 온도는 크라운부, 바울 중앙돌출부, 바울내측의 순으로 온도 분포를 이루고 있고, 엔진회전수가 증가할수록 등온선 경사가 피스톤 측에 대해 더욱 급하고, 피스톤의 이면 내측보다는 라이너와 인접한 외측부분이



더 잘 생각되고 있음을 확인할 수 있었다.

- 8) 피스톤 표면의 순간온도 측정으로 피스톤 각부의 온도변화가 다양함을 확인할 수 있었다. 피스톤의 형상설계를 위해서는 더욱 정확하고 다양한 실험과 분석이 추가되어야겠다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단의 97년도 핵심전문연구과제 지원에 의해 수행된 내용 중 일부분으로 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Overbye, et al., "Unsteady Heat Transfer in Engines", SAE Transaction Vol. 69, No. 461, pp. 461~494, 1961.
2. Günter F. Hohenberg., "Advanced Approaches for Heat Transfer Calculations", SAE paper 790825, pp. 61~80, 1979.
3. Enomoto, "Measurement of Heat-Flux and Heat Transfer Coefficient on Combustion Chamber Wall", Journal of the Society of Automotive Japan, Vol. 39, No. 11, pp. 1270~1278, 1985.
4. 이성열, 이종태, 이영조, 송영식, "순간온도 측정 프루브를 이용한 피스톤 표면온도 측정", 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 694~699, 1990.
5. 이종태, 조진우, 류영, 김기준, 최경호, "디젤기관의 연소실 벽면에서의 비정상 벽표면 순간온도 및 열유속 측정", 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집 Vol. 1, pp. 170~176, 1995.
6. 이영조, "스파크 점화기관의 피스톤 표면 온도 및 열유속에 관한 연구", 성균관대학교 석사학위 논문, 1989.
7. 류영, 위신환, 송영식, 최경호, 이종태, "선박용 디젤기관의 피스톤 벽표면 온도 및 열유속 측정", 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집, 96380126, pp. 349~355, 1996.
8. Robert W. Burrahm, J. Keith Davis, William D. Perry, and Armando De Los Santos, "Development of a Piston Temperature Telemetry System", SAE paper 920232, pp. 284~294, 1992.
9. Enomoto et al., "Study on Thin Film Thermocouple for Measuring Instantaneous Temperature on Surface of Combustion Chamber Wall in Internal Combustion Engine", JSME, Vol. 28, No. 235, pp. 108~116, 1985.
10. 이정현, 최재순, 이현순, "Linkage System을 이용한 피스톤의 온도측정", 한국자동차공학회 춘계학술대회 초록집, 1989.