

## 터보 디젤엔진 피스톤의 열응력 해석에 관한 연구

### A Study on the Thermal Stress Analysis of a Piston in a Turbocharged Diesel Engine

국종영\*  
Jongyoung Kuk

#### ABSTRACT

We determined the heat transfer coefficient through the analysis of three dimensional temperature distribution in comparison with the measured temperature on the piston in the turbocharged diesel engine. And we analyzed the thermal stress and the thermal deformation with that heat transfer coefficient by using finite element method.

According to this results, we found that maximum temperature range of the piston appeared at the upper part of the piston crown and that the heat transfer coefficient of the upper part of the piston is smaller than that of the lower one. It showed that the maximum thermal deformation is shown at the edge of the upper part of piston and that the maximum thermal stress was shown on the lower part of the piston crown.

Finally, we defined the method of determination of a piston heat transfer analysis by using measured temperature on the piston and analyzed temperature with finite element method.

주요기술용어 : Heat transfer(열전달), Thermal stress(열응력), Thermal deformation(열변형), Diesel engine(디젤엔진), Piston(피스톤), Heat transfer coefficient(열전달계수)

#### 1. 서론

산업의 고도성장과 더불어 자동차기술도 한층 발전되어 가고 있다. 특히, 자동차 기술 중에서도 엔진에 대한 관심은 더욱 높아가고 있으며, 고출력 및 신뢰성에 대한 소비자들의 요구가 증대되고 있다. 이에 대한 요구에 대응하기 위해서 엔진의 각 부품들에 대하여 설계단계에서부터 열적 및 기계적인 하중을 예측하여 설계자는 이에 부합하는 설계를 행하지 않으면 안된다.<sup>1,2)</sup>

엔진의 여러 부품 중에서도 특히, 피스톤에 있어서는 국부적인 열유동(Heat Flow)의 증가가

그 부분에서 높은 온도를 초래하고, 이는 열응력을 증가시켜 열에 의한 피로로 말미암은 파손을 유발하며, 또한 윤활유막을 끊어서 피스톤링의 소착 및 윤활유의 탄소화를 초래한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 우선 피스톤 각 부의 온도를 예측하는 것이 필요하다. 종래에는 피스톤의 온도를 예측하는 것은 상당한 어려움이 있었으나, 근래에는 컴퓨터의 발달과 더불어 유한요소법(Finite Element Method)을 도입, 사용함으로써 이러한 어려움을 많이 해결하고 있다.

특히, 터보 과급엔진은 실린더 내의 폭발 압력이 높고 열부하가 더 증대되기 때문에 열응력 집중에 의한 균열의 발생에 대비하여야 한다. 그러나, 지금까지는 엔진 부품들 중 헤드와 블록, 라

\* 회원, 기아자동차

이러, 냉각수 등에 대한 열전달 현상을 규명한 연구는 많이 이루어져 왔으나, 피스톤에 대한 온도 측정이나 열응력 및 열변형에 대한 연구는 상대적으로 빈약하게 이루어져 왔다.

福田 水穂<sup>3)</sup> 등은 유한요소법을 이용하여 피스톤의 변형과 응력분포에 대하여 연구하였으며, 西田 工<sup>4)</sup> 등은 주철제 피스톤에 대한 열적인 신뢰성 및 냉각방법 등에 대하여 유한요소법을 이용하여 수행하였다. 또, Wu<sup>5)</sup> 등은 엔진 토크와 속도에 따른 피스톤의 온도 및 온도분포에 대하여 연구하였으며, 桂木 潔<sup>6)</sup> 등은 피스톤의 열하중, 관내압력, 축압력에 대한 피스톤 변형에 대하여 연구를 수행하였다. 이교승<sup>7)</sup> 등은 디젤엔진 피스톤의 열변형에 대한 연구를 하였다.

현재까지의 연구는 단순히 실험 또는 2차원 격자만을 이용하여 피스톤에 대한 열적인 평가를 수행하였지만, 본 연구에서는 지금까지 연구한 것으로 바탕으로 하여 3차원 유한요소 격자를 이용하여 터보 과급엔진의 피스톤에 대한 온도분포 및 그에 따른 열응력과 변형을 예측하고, 이를 실험과 비교 검토를 통하여 피스톤의 유한요소 해석의 기준을 구축하고자 한다.

본 연구의 유한요소법을 이용한 계산은 범용 유한요소 해석 코드인 ABAQUS/Standard<sup>8)</sup>을 이용하여 열전달 해석 및 열응력 해석을 수행한다.

## 2. 유한요소법을 이용한 열전달 해석

피스톤의 각 부에 온도 및 열전달계수를 주어 열전달 해석을 수행한 후, 여기서 나온 각 절점의 온도를 하중조건으로 하여 열변형 및 열응력 해석을 수행한다.

### 2.1 유한요소 모델

피스톤에 대한 유한요소 모델은 2차원으로 구성하여 시간과 비용 절감의 효과를 얻을 수 있으나, 2차원 모델의 경우 전체영역에 대한 열전달 효과를 고려할 수 없으며 피스톤의 열전달 및 열

응력 해석을 수행하기 위해서는 최소한 단순화된 3차원으로 모델을 구성하여 유한요소 해석을 행하여야 한다.

본 연구대상의 터보 과급 엔진 피스톤이 대칭이므로 1/4만 유한 요소 모델로 구성하며, 이에 대한 유한요소 격자는 Fig.1과 같다.

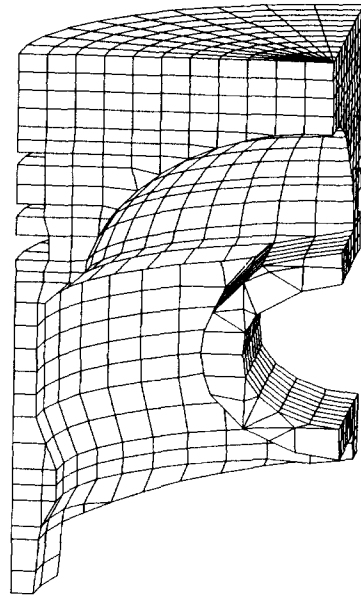


Fig. 1 3-Dimensional finite element grids of the piston

### 2.2 열전달 해석

피스톤의 온도분포를 예측하기 위해서는 냉각수, 오일과의 접촉부에서의 온도분포를 파악해야 한다. 그러나, 정확한 경계조건을 설정하기에는 상당한 어려움이 있어 다음과 같이 가정한다.

피스톤은 3차원이며, 비정상적이나 연소가스의 사이클 변동에 의한 피스톤의 온도변화가 작으므로(알루미늄 피스톤의 경우, 표면에서 약 2 mm 이상의 깊이에서는 거의 정상적), 열전달 해석조건을 단순화 시키면 다음과 같이 가정할 수 있다.<sup>9-11)</sup>

- 1) 연소가스는 순간적으로 평형상태에 있다.
- 2) 연소가스는 이상기체방정식을 만족하며,

정상상태이다.

3) 연소압력과 연소가스온도는 실린더 내에서 일정하다.

피스톤은 연소실 내의 가스로부터 열을 받아 링과 링랜드, 언더 크라운부, 스커트의 3부분으로 열을 방출하게 되는데, 이중 매 피스톤에 유입되는 열량이 같도록 하기 위해 피스톤 크라운 부위의 평균 열전달계수  $h_{gm}$ 과 연소실 내의 평균가스온도  $T_{gm}$ 을 다음과 같이 가정한다.<sup>11)</sup>

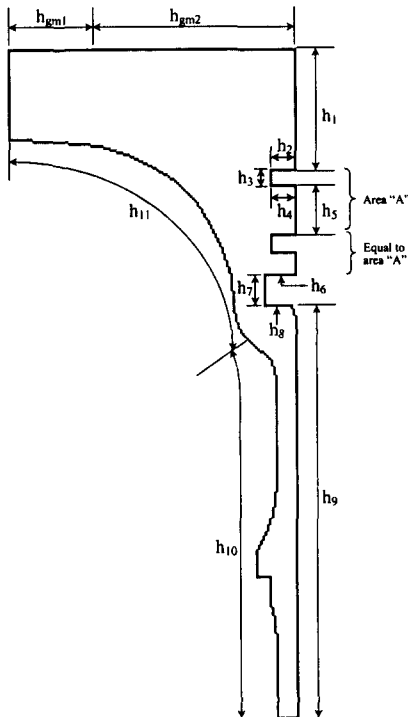
$$h_{gm} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{4\pi} h_g d\phi$$

$$T_{gm} = \frac{1}{4\pi h_{gm}} \int_0^{4\pi} h_g T_g d\phi$$

여기서,  $h_{gm}$ 은 평균 열전달 계수,  $T_{gm}$ 는 연소실 내의 평균 가스온도이다.

연소실 내의 열전달에 적용되는 대표적인 무차원 실험식인 Nusselt 등의 식은 원래 시간에 대한 평균 열유속을 구하기 위한 것이며, 사이클닉 분석이나 열발생을 계산 등에는 Woschi와 Annand의 실험식이 널리 쓰이고 있다. 피스톤의 해석시에는 일반적으로 Annand의 식이 적용된다.<sup>12)</sup>

본 해석에서는 실험에서 구한 온도를 기준으로 하여 피스톤 각 부의 열전달 계수를 사용한다. 각 부의 열전달 계수는 실험과의 온도비교를 통하여 열전달 계수를 변화시키면서 구한다. 이에 대한 피스톤 각 부의 열전달 계수 및 온도조건은 Fig. 2와 같으며, 연소실 내의 평균가스 온도  $T_{gm}$ 과 평균 열전달 계수  $h_{gm}$ 은 980℃와 2850 W/㎡K 및 1800 W/㎡K이며, 실린더 벽의 온도 및 냉각오일 온도는 실험과 동일하게 110℃ 및 100℃로 한다.



Heat transfer coefficient ( W/㎡ K )		Temperature(℃)
$h_{gm1}$	2850	980
$h_{gm2}$	1800	
$h_1$	3100	110
$h_2$	2900	
$h_3$	2650	
$h_4$	2900	
$h_5$	900	
$h_6$	1500	
$h_7$	2700	
$h_8$	2400	
$h_9$	250	
$h_{10}$	200	
$h_{11}$	400	

Fig. 2 Heat coefficient distribution on the piston for analysis

### 2.3 열응력 해석

열전달 해석을 수행하여 구한 각 절점의 온도를 하중조건으로 하여 열변형 및 열응력 해석을 한다. 구속조건은 해석 모델이 대칭이므로 대칭조건을 적용하며, 피스톤의 강제 병진 운동을 막기 위해 피스톤 핀과의 접촉부 끝단 임의 절점의 진행방향을 구속한다.

본 해석에서 사용된 피스톤의 재질 특성은 Table 1과 같다.

Table 1 Material properties of the piston

Material propeties	Property value
Thermal conductivity, $W/m \cdot K$	241
Young's modulus, $Pa$	$6.66 \times 10^{10}$
Poisson's ratio	0.33
Mass density, $kg/m^3$	2677
Specific heat, $J/kg \cdot K$	963
Thermal expansion coefficient, $1/K$	$2.1 \times 10^{-5}$

### 3. 피스톤의 온도 측정 실험

#### 3.1 실험장치

본 연구에 사용된 터보 과급 디젤엔진 피스톤의 각 부위에 대한 온도를 측정하기 위하여 설치된 실험장치의 개략도는 Fig. 3과 같으며, 이에 사용된 엔진의 제원은 Table 2에 나타낸다. 또, 엔진의 운전조건인 부하와 회전수를 제어하기 위한 동력계는 와전류식 동력계이다.

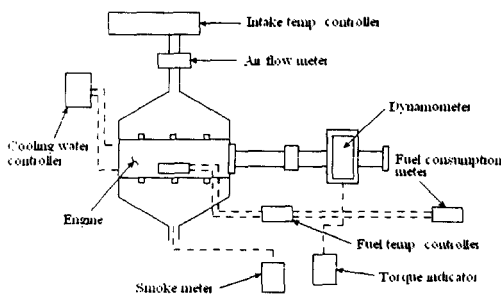


Fig. 3 Schematic diagram of experiment apparatus

Table 2 Specifications of experiment engine

Items	Specifications
Type	Diesel, 4-cycle
No. and arrangement of cylinders	4-cylinder, in-line
Displacement volume	2701cc
Cylinder bore × stroke	92.0 × 101.6 mm
Type of combustion chamber	Swirl floor type
Compression ratio	21.5:1
Fuel injection timing	ATDC 2°
Firing order	1-3-4-2
Idling speed	650 ~ 700 rpm

실린더 내의 연소가스 온도 측정을 위해 제2 번째 기통에 피에조일렉트릭 압력 변환기를 Fig. 4와 같이 설치하고, 압력변환기에서 측정된 압력을 이상기체 상태 방정식을 이용하여 온도로 변환한다. 또, 피스톤의 온도 측정을 위해 제2번째 기통의 피스톤에 7개의 텀플러그를 Fig.5에 나타낸 바와 같은 위치에 설치한다.

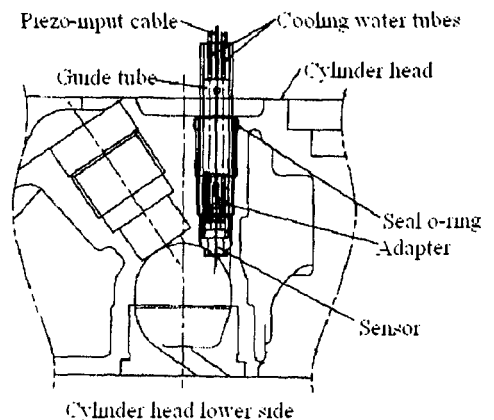


Fig. 4 Pressure transducer mounting instruction

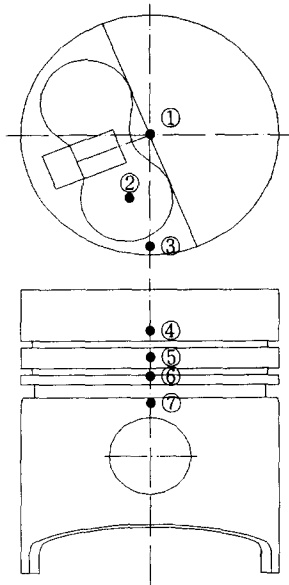


Fig. 5 Installed position of templug in the piston

### 3.2 실험방법

본 연구에서 실험은 전부하 최대 출력을 나타내는 회전수인 3600rpm에서 피스톤에 열부하가 최대로 된다고 간주하고 이 운전 조건에서 피스톤 온도 측정을 하며, 실험을 하는 동안 엔진의 운전 상태를 일정하게 유지하고 피스톤 열전달 현상 해석의 경계조건을 설정하기 위해 크랭크 각의 변화에 따른 실린더 내의 압력 측정을 하고, 냉각수 출구 온도와 오일 온도는 각각  $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 유지한다.

### 4. 결과 및 검토

Fig.5에 나타난 위치에서의 유한요소 해석결과와 실험에서 측정한 온도 결과를 Fig.6에 나타낸다. Fig.6에서 보이는 바와 같이 해석과 실험의 온도 결과의 차이는 약 5%로 큰 차이를 나타내지 않으며, 실험 및 유한요소 해석 오차 등을 고려한 결과이므로 본 연구에서 사용된 열전달계수 및 초기온도는 타당하다고 할 수 있으며, 이를 기준으로 하여 피스톤의 열적인

평가를 수행한다.

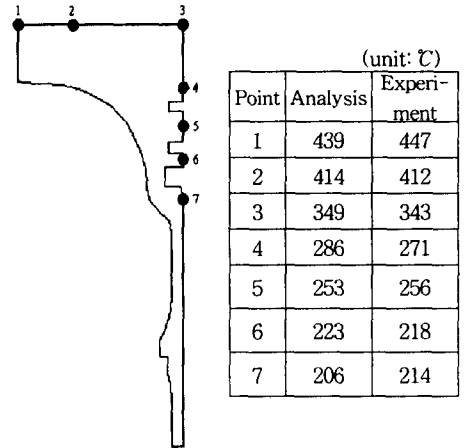


Fig. 6 Comparison with temperature results of the piston for analysis and experiment

본 연구대상인 터보 과급 디젤엔진 피스톤의 온도 분포를 Fig.7에 나타낸다.

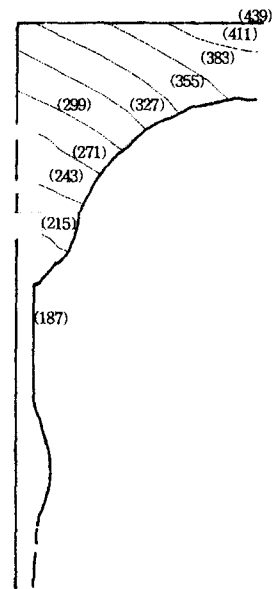


Fig. 7 Temperature distribution of a piston (Unit:  $^{\circ}\text{C}$ )

Fig.7의 해석결과를 보면 피스톤의 온도분포

는 피스톤의 밑면에서 크라운부를 향하여 점진적으로 증가하며, 크라운부 끝단에서 중심을 향하여 증가함을 알 수 있고, 최고온도는 피스톤 크라운부의 중앙부위에서 나타남을 볼 수 있다.

Fig.8에는 열전달 해석에서 얻은 온도분포를 하중조건으로 하여 구한 열응력 해석의 결과를 나타냈다. 피스톤에 대한 최고응력은 피스톤의 크라운 하부이다.

Fig.8에서 보이는 바와 같이 전반적으로 크라운 하부에 응력이 집중되어 있고, 크라운 상부는 크라운 하부에 비해서 상대적으로 낮게 나타났다. 이런 결과로 볼 때, 피스톤의 초기 설계시에 크라운부에 대한 고려가 충분히 있어야만 피스톤의 강도가 유지될 수 있다는 것을 알 수 있다.

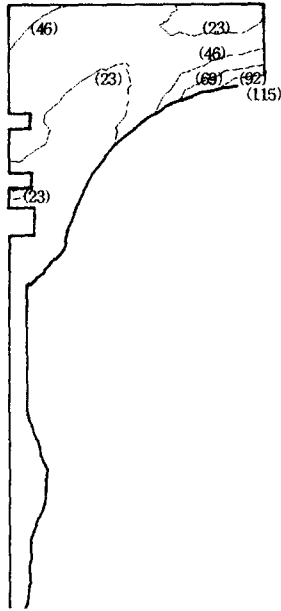


Fig. 8 Thermal stress distribution of a piston(unit:MPa)

열변형에 대한 개략도는 Fig.9에 나타내었으며, 피스톤의 크라운 끝단부의 원주방향과 크라운 중앙부의 피스톤 진행방향의 변형이 상대적으로 다른 부위보다 크므로 실린더 및 헤드와의 마찰이 발생되지 않는 범위에서의 설계가 이루어져야 한다.

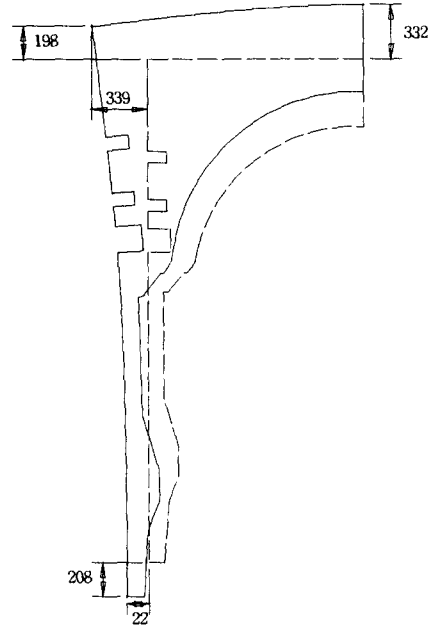


Fig. 9 Thermal deformation of a piston(unit:mm)

#### 4. 결론

실험으로 측정된 피스톤의 온도를 기준으로 하여 유한요소법을 이용한 피스톤의 열전달 및 열응력 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 피스톤의 온도는 피스톤의 밑면에서 크라운부를 향하여 점진적으로 증가하며 크라운부 끝단에서 중심으로 향하여 증가함을 알 수 있었고, 최고온도는 크라운부의 중앙에서 나타났다.

2) 열전달해석에서 구한 온도분포를 기준으로 하여 피스톤의 열응력은 피스톤의 크라운 하부에서 최대 열응력이 발생하였다.

3) 열변형은 피스톤의 끝단부에서 가장 크게 나타났으며 특히, 피스톤의 원주 방향으로의 변형이 다른 부위보다 크게 나타났다.

4) 엔진의 경량화 및 저공해화와 고연비화를 위해서 선행적으로 검토해야 할 디젤엔진의 피스톤에 대한 열적인 평가 방법을 확립하였다.

### 참 고 문 헌

- 1) 古浜 壓一, "內燃機關の熱的諸問題(4)", 內燃機關, Vol.22, No.280, 1983.
- 2) F.J.Wallace, T.K.Kao, W.D.Alexander, A.Cole, and M.Tarabad, "Thermal Barrier Pistons and Their Effect on the Performance of Compound Diesel Engine Cycles", SAE 830123, 1983.
- 3) 福田 水穂, 志賀 聰, 吉井 直澄, 岡村 英司, "有限要素法による內燃機關用ピストインの構造解析", 日産技報, No.15, 1979.
- 4) 西田 工, 樫本 正章, 山内 博文, 櫻井 茂, "鑄鐵製ピストインの信賴性に關する一考察", 自動車技術會 學術講演會前刷集902, 1990. 10.
- 5) H.Wu and C.Chiu, "A Study of Temperature Distribution in a Diesel Piston-Comparison of Analytical and Experimental Results", SAE 861278, 1986.
- 6) 桂木 潔, 黒田 良一, "ピストン連結棒の信賴性設計", 內燃機關, Vol.31, No.1, 1992.
- 7) 이교승, 이진호, "Study on the Thermal Deformation Characteristics of the Automotive Diesel Engine Piston", SAE 97370018, 1997.
- 8) "ABAQUS/Standard User's Manual(I), (II), (III)", Ver 5.8, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc.
- 9) S.J.Pachernegg, "Heat Flow in Engine Pistons", SAE 670928, 1967.
- 10) G.Woschni et al., "Determination of Local Heat Transfer Coefficients at the Piston of a High Speed Diesel Engine by Evaluation of Measured Temperature Distribution", SAE 790834, 1979.
- 11) Chin-Hsiu L., "Piston Thermal Deformation and Friction Considerations", SAE 820086, 1982.
- 12) E.Khoshravan, "Heat Transfer Studies in an Adiabatic Diesel Engine", SAE 912502, 1991.