

## 대형디젤엔진의 열적 피로안전도 분석을 위한 유한요소해석

조 남 호\* · 이 상 업 · 이 상 규 · 이 상 현

고등기술연구원

### Finite Element Analysis of Thermal Fatigue Safety for a Heavy-Duty Diesel Engine

Nam-Hyo Cho\* · Sang-Up Lee · Sang-Kyu Lee · Sang-Heon Lee

Institute for Advanced Engineering, 633-2 Goan-ri, Baegam-myeon, Yongin-si, Gyeonggi-do 449-863, Korea

(Received 6 November 2003 / Accepted 9 December 2003)

**Abstract** : Finite element analysis was performed to analyze structural safety of a new heavy-duty direct injection diesel engine. A half section of the in-line 6-cylinder engine was selected as a computational domain. A mapping method was used to project heat transfer coefficients from CFD results of engine coolant flow onto the FE model. The accurate setting of thermal boundary condition on the FE model was expected to result in improved prediction of temperature, cylinder bore distortion, and stresses. Characteristics of high cycle fatigue were investigated by assuming the engine was operated under the following five loading conditions repeatedly; assembly force, assembly force with thermal loading, alternating maximum gas pressure loading at each cylinder combined with assembly force and thermal loading. Distribution of fatigue safety factor was calculated by using a Haigh diagram in which the maximum and the minimum stresses were selected from the five loading cases.

**Key words** : FEA(Finite Element Analysis; 유한요소법), Thermal analysis(열해석), Engine cylinder head(실린더 헤드), HCF(High Cycle Fatigue), CFD(Computational Fluid Dynamics; 전산유체역학)

#### 1. 서론

점차 강화되어가는 배기규제를 만족시키고 엔진의 고출력, 고효율화를 추구함에 따라 엔진의 비출력이 증대되고 있으며 최대 폭발압력이 증가하는 방향으로 엔진개발이 이루어지고 있다. 이에 따라 엔진의 각 부품은 더욱 심한 변형과 응력에 노출되고 설계안전도가 악화될 수 있으므로 엔진설계과정에서 면밀한 분석이 요구된다. 엔진은 연소열에 의한 열부하를 주기적으로 받으며 엔진의 각 부분은 복잡한 열응력 분포를 갖게 된다.<sup>1)</sup> 또한 고온의 열

적 피로가 반복되면서 심한 경우에는 열응력이 집중되는 부위 등에 미세 균열이 발생하기도 하며 궁극적으로는 엔진파손으로 이어지기도 한다. 특히 연소실, 흡배기포트, 복잡한 냉각수유로가 위치하는 실린더헤드는 상대적으로 심한 열적 부하를 받는 부분으로써 냉각수에 의한 최적의 냉각 능력, 엔진의 경량화 설계에 따른 내구성 문제 등 복잡한 요구 사항들을 내포하고 있다. 따라서 실린더헤드 등 각 부분의 온도 분포를 미리 해석하고 이를 기초로 하여 열응력 및 내구 피로안전계수 분포 등을 분석하는 것이 설계시 중요한 선결 조건이 된다.<sup>1,2)</sup> 특히 실린더 라이너는 고온, 고압의 조건하에 있고 왕복으로 동력을 발생시키는 피스톤과 직접 접촉하므로

\*To whom correspondence should be addressed.  
nhcho@iae.re.kr

변형의 정확한 형상의 예측과 경향의 분석이 요구되며,<sup>3,4)</sup> 복잡한 기계적 특성을 갖는 가스켓의 형상도 전체적, 국소적인 변형 및 응력 발생의 예측을 위한 중요한 변수로 작용된다.<sup>5)</sup> 이러한 정적인 하중 하에서 엔진은 구조적으로 안전한 영역에 위치할 수 있지만, 반복적인 하중 조건 하에서 발생할 수 있는 파괴의 예측을 위한 피로안전도 해석은 필수적으로 수행되어야 한다.<sup>2,6,8)</sup>

최근 다양한 FEA 기법을 적용하여 이러한 실린더헤드의 열응력, 실린더 라이너 변형, 열적 피로안전도 등에 관련한 해석 기반의 연구가 활발히 진행되고 있는데 FEA 기법의 발전과 아울러 해석용 컴퓨터의 고용량 고속화로 인해 정밀한 해석 격자생성과 해석의 정밀도가 높아지고 있다. 본 연구에서는 직렬 6기통 디젤엔진을 3차원 유한요소 모델로 세밀하게 묘사하고 FEA 기법을 적용하여 실제 엔진 운전 시에 나타나는 다양한 하중 아래서의 엔진 각 부분의 온도 분포 및 변형, 응력 분포 및 피로안전도 등을 분석하는 사례를 제시하였다.

## 2. 유한요소 모델

### 2.1 유한요소 모델의 구성

Fig. 1은 본 해석에서 사용된 8리터급 직렬6기통 엔진의 헤드와 블록으로 구성된 엔진어셈블리를 보여준다. 구조적으로 매우 복잡한 형상이지만 격자생성을 용이하게 하기 위해 4개의 절점을 가진 사면체 요소를 주로 사용하였으며 실린더 헤드, 실린더 블록, 실린더 라이너, 헤드 가스켓, 크랭크 케이스, 헤드 볼트 등의 형상을 상세히 반영하여 870,000여 개의 요소와 290,000여 개의 절점으로 격자를 생성하였다. 격자생성 코드로는 HyperMesh를 사용하였다. 엔진의 전체적인 거동이 3-4기통 사이의 경계면에 대해 대칭적이라고 가정하여 Fig. 2와 같은 면대칭 모델을 구성하여 해석하였다. 미리 수행된 엔진 냉각수 CFD 결과를 이용하여 상대적으로 열적 조건이 열악한 것으로 평가된 4-5-6번 기통측을 선택함으로써 결과에 대한 안전도를 높이고자 하였다. 해석에 사용된 엔진 각 부분에 대한 물성치는 Table 1과 같다. 가스켓은 비드(Bead)의 돌출부를 포함한 상세한 모델을 Fig. 3과 같이 생성하였고 제조사로

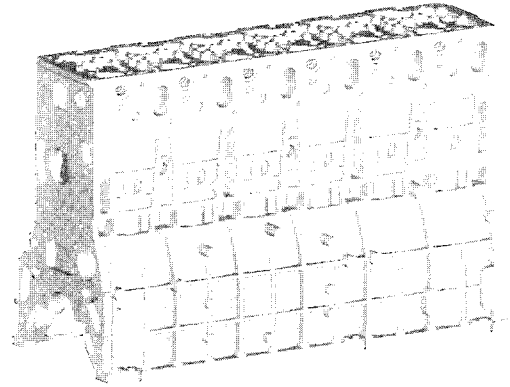


Fig. 1 A CAD solid model of the in-line 6-cylinder engine

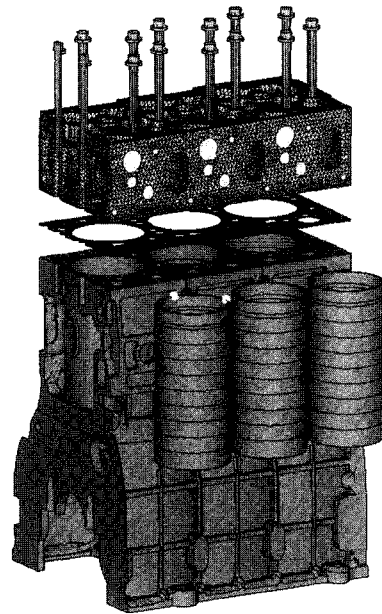


Fig. 2 An FEA model of the half section of the engine (an explosion view with the liners shown outside)

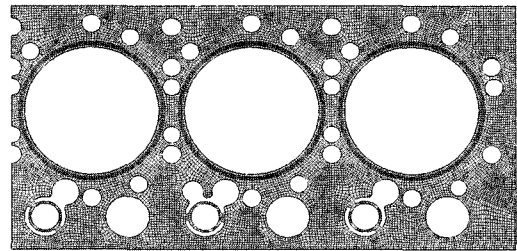


Fig. 3 An FEA mesh of the cylinder head gasket (11,000 hexahedron elements used)

부터 입수한 가스켓 압력특성 선도는 Fig. 4와 같다.

Table 1 Material properties

Properties	E	$\nu$	$\alpha$	k
Unit	MPa	-	$10^{-6}/K$	W/mmK
Head (CGI)	130,000	0.27	10.0	0.050
Block (CGI)	130,000	0.27	10.0	0.050
Gasket (steel)	210,000	0.30	11.0	0.039
Crankcase (CGI)	130,000	0.27	10.0	0.050
Liners (CGI)	150,000	0.26	10.0	0.046
Bolts (steel)	210,000	0.30	11.0	0.039

E: Young's modulus,  $\nu$ : Poisson's ratio,  
 $\alpha$ : Thermal expansion coefficient, k: Thermal conductivity

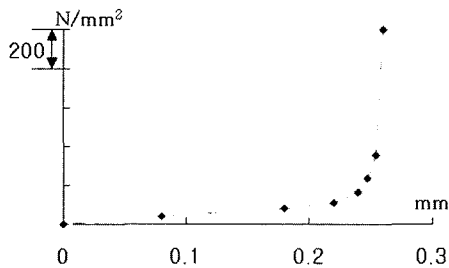


Fig. 4 A loading curve of the cylinder head gasket (bead height: 0.26mm)

### 2.2 경계조건

대칭면을 중심으로 위치한 좌우의 실린더는 구조적으로 동일한 거동을 갖게 되므로 이 면에 포함되는 요소들에는 대칭조건을 부여하였다. FEA 해석상 발생할 수 있는 강제 운동을 제한하기 위하여 블록 상단의 일부를 구속하였다.

### 2.3 하중조건

엔진에 작용하는 하중은 엔진 운전 에 따른 열하중과 폭발압력, 그리고 헤드볼트의 체결력 등으로 구분될 수 있다. 열조건의 설정에는 Ricardo사의 엔진 성능해석 코드인 WAVE 해석결과와 유사 엔진에서 얻어진 경험치를 이용하였다. 연소실 내벽과 흡배기 포트에서의 경계조건은 WAVE 코드를 이용하여 엔진 한 사이클 당 연소실내 평균 가스온도와 평균 열전달계수를 산출하여 사용하였다. 실린더 라이너에 작용하는 가스온도와 열전달계수는 상기 WAVE로 계산한 값을 피스톤 상사점 위치에서의 값으로 설정하고 하사점에서의 값은 경험치로 설정하여 선형 배분을 하였으며 실린더 축 방향으로 10

개의 영역으로 나누어 설정하였다. 냉각수는 평균 온도인 90℃로 가정하였다. 열응력 발생 및 피로안전도 해석에 있어 중요한 역할을 하는 열전달계수는 냉각수유로에 대한 CFD 해석 결과를 FEA 모델 격자의 절점에 상사시키는 방법을 사용하였다. FEA 격자와 CFD 격자가 서로 약간 다른 CAD 데이터를 이용하여 생성되었기 때문에 열전달 경계면에서의 격자면 형상과 상대적 위치가 정확히 일치할 수는 없으므로 적절한 보간법을 사용해야 되었다. 본 연구에서는 최단거리 탐색법을 사용하였는데, 이것은 하나의 FEA 격자점에서 최단거리에 위치하는 CFD 격자점을 찾고 이 점에서의 열전달계수를 그 FEA 격자점에 상사시키는 방법인데 이것을 CFD 격자와 접하는 열전달 경계면상의 모든 FEA 격자점에 적용하였다. Figs. 5, 6은 각각 CFD 해석결과와 FEA 모델에 상사된 열전달계수를 보여주는 데 서로

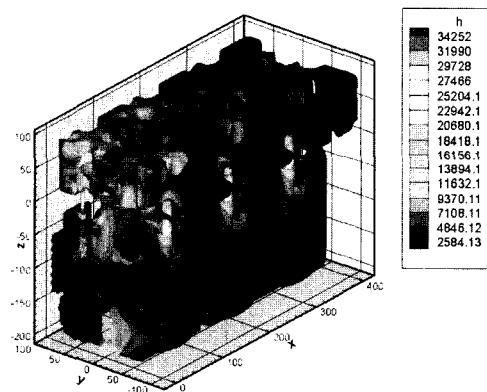


Fig. 5 Heat transfer coefficient calculated from CFD

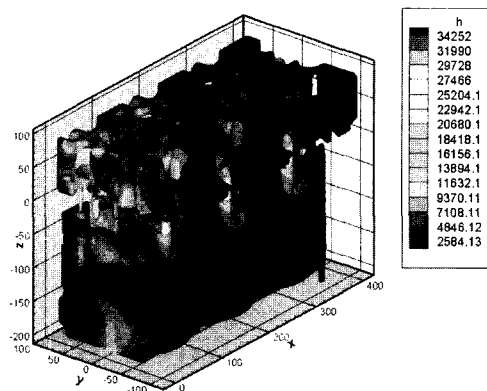


Fig. 6 Mapped heat transfer coefficient on the FEA model

잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 3-4기통사이의 대칭면을 통해서 어떤 열유동도 일어나지 않는다고 가정하고 단일 조건을 설정하였다.

연소실내 폭발압력은 상사점 부근에서 160 bar의 조건을 설정하였다. 실린더별로 6개의 헤드 볼트가 작용하며 그 체결력은 볼트 당 110 kN으로 주어졌고 대칭면에 위치한 볼트의 경우에는 그 절반인 55 kN을 설정하였다.

### 2.4 접촉 설정

엔진은 여러 부품들로 구성된 결합체이기 때문에 다양한 하중 조건 아래에서 각 부품들 간의 미세한 미끄러짐 운동이 발생한다. 이것은 엔진을 단일 강체로 가정했을 경우 해석상의 오차로 나타난다. 따라서 본 연구에서는 헤드, 볼트, 블록, 가스켓, 라이너를 개별 모델로 구성하여 접촉 알고리즘을 적용하여 상호간의 제한적 미끄러짐이 가능하도록 하여 해석 오차를 최소화하려 하였다.

### 3. 유한요소 해석

본 해석에서는 여러 하중 조건아래에서의 결과를 비교하여 보다 신뢰할 수 있는 결과를 얻기 위해 열하중에 의한 온도해석, 볼트 체결력해석, 연소압력 영향 해석 등의 해석을 독립적 또는 복합적으로 적용하여 해석하였다. 사용한 코드는 KISTI의 IBM 슈퍼컴퓨터에 설치되어 있는 ABAQUS v.6.3을 사용하였다.

엔진의 온도분포를 계산하기 위해 2.3절에서 언급한 것과 같이 연소실 내부와 냉각수유로, 그리고 흡배기포트의 온도 및 열전달 계수 등의 열조건을 적용하여 해석하였으며 이 결과는 열응력 해석에 사용된다. 열응력 해석에는 전체 모델이 열적 평형을 이루는 정상상태로 가정되었다. 볼트의 체결력에 의한 엔진변형과 응력변화도 해석하였다. 운전 중의 엔진은 체결력과 열하중을 동시에 받으므로 발생하는 응력은 각각의 하중 아래에서의 응력의 단순 합으로 가정되어질 수 없다. 따라서 각 하중간의 상승효과를 고려한 해석을 추가하였다.

연소실 내부의 최대 연소압력이 실린더별로 순차적이고 반복적으로 발생하는 것으로 가정하여 해석

하되 정적하중인 체결력과 열하중에 추가하여 동적하중으로 적용하는 것으로 가정하면 HCF피로해석이 가능하다. 엔진 내 FEA 질점에서의 최대 주응력을 추출하여 Haigh 선도를 이용하면 구조적 취약부위를 예측할 수 있다.

## 4. 유한요소 해석 결과

### 4.1 온도 분포

Fig. 7은 온도 분포 해석결과의 일부인 연소실의 벽 온도 분포를 보여준다. 배기밸브 브릿지 사이에서 가장 온도가 높아 국부적으로는 설계기준 온도까지 상승하고 있다. 실린더 블록에서는 최상단 부근에서 국부적으로 약 260°C 이상의 값을 보이지만 하단으로 갈수록 냉각수의 역할로 인해 온도가 크게 떨어지게 된다.

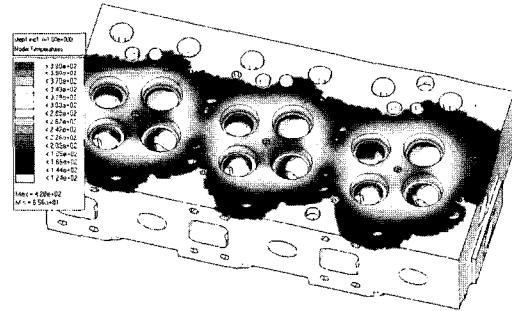


Fig. 7 Temperature distribution of the cylinder head fire deck

### 4.2 응력 분포

Fig. 8은 헤드 볼트의 체결력에 의한 응력 분포를 보여준다. 해석 결과 볼트 주변과 가스켓비드를 따라 집중되고 있으며 최대 250Mpa정도의 압축 응력이 발생하였다. 이는 실제 엔진에서 부하가 걸리는 위치와 매우 유사한데 이것은 가스켓 형상과 여러

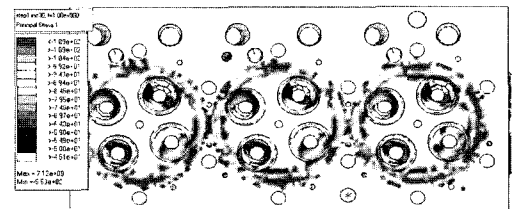


Fig. 8 Stress distribution on the cylinder head face resulting from the assembly load

조건들을 적절히 설정한데 기인한다. 열하중에 의해 발생한 각 부분의 온도차에 의해 열응력이 발생하게 된다. 발생한 열응력의 최대값은 연소실 인접부에 집중되어 나타났는데 응력 분포는 온도 분포와 유사한 양상을 보여 주었다.

### 4.3 변형

#### 4.3.1 실린더 헤드 변형

Fig. 9는 열하중과 체결하중에 대하여 5번 실린더에 최대 폭발압력 160 bar가 작용했을 때 나타나는 실린더 헤드 단면의 변형을 보여준다. 5번 연소실을 기준으로 했을 때의 최대 변형량은 체결력만 작용하였을 경우 41 $\mu\text{m}$ , 체결력에 열하중을 더했을 경우 83 $\mu\text{m}$ , 체결력과 열하중에 폭발압력을 5번 실린더에 더했을 경우 76 $\mu\text{m}$ 의 변형량을 보여주었다. 이는 실린더 헤드의 변형은 상기 언급한 세 가지의 하중에 의해 모두 영향을 받는데 연소실 폭발압력에 의한 변형은 상대적으로 작지만 주로 해당 실린더에만 관여하고 있음을 보여주고 있다.



Fig. 9 A cross-section of the deformed cylinder head

#### 4.3.2 실린더 라이너 변형

Figs. 10, 11은 체결력만 작용했을 때, Figs. 12, 13는 열하중과 5번 실린더의 폭발압력이 더해졌을 때의 라이너의 변형 모습을 나타낸다. 그림에서도 분명하게 볼 수 있는 것처럼 체결력에 의한 라이너의 변형은 상단에 집중되는데 주위에 위치한 6개의 볼트 위치를 따라 보다 크게 이루어진다. 열하중과 폭발압력에 의해 전체적으로 더 큰 변형이 발생하게 되는데, 상사점 부근에서의 가스 폭발압력 작용으로 인해 체결력에 의한 변형효과는 작아지는 한편 변형의 제한조건이 없는 엔진의 세로 방향으로 변형이 커지는 것을 볼 수 있다. 라이너 변형은 윤활유 소모와 엔진마찰 등에 영향을 미치는데 일반적으로 변형량의 하모닉 분석을 통한 3차 오더의 값을 참고

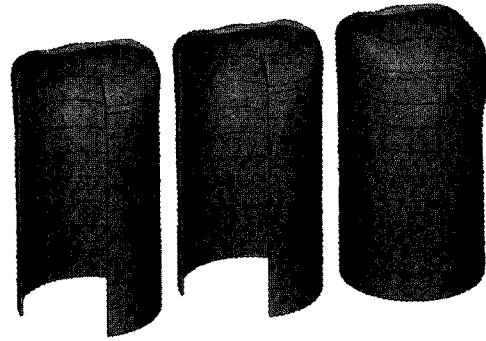


Fig. 10 Liner deformation: assembly load (scale  $\times 1000$ ) (Cut-out view for #4, #5 cylinders)

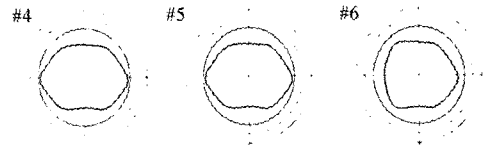


Fig. 11 Liner deformation at the top section (assembly load)

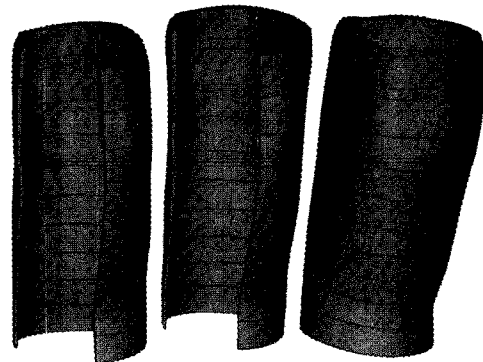


Fig. 12 Liner deformation: A+T+G#5 gas (scale  $\times 500$ ) (A: Assembly, T: Thermal, G: Gas load at # cylinder)

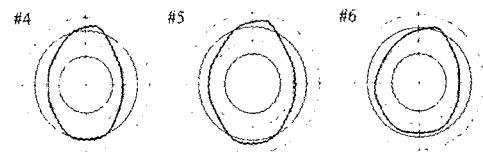


Fig. 13 Liner deformation at the top section (A+T+G#5 gas load)

하게 된다. Fig. 14와 같이 표현될 수 있는 운전 중의 변형은 평가하기 어렵기 때문에 엔진 조립시나 운전후의 변형을 측정하고 경험치 등과 비교하여 평가하게 되는데 3차 오더가 20~25  $\mu\text{m}$  정도 이하면 큰 문제가 없는 것으로 알려져 있다.

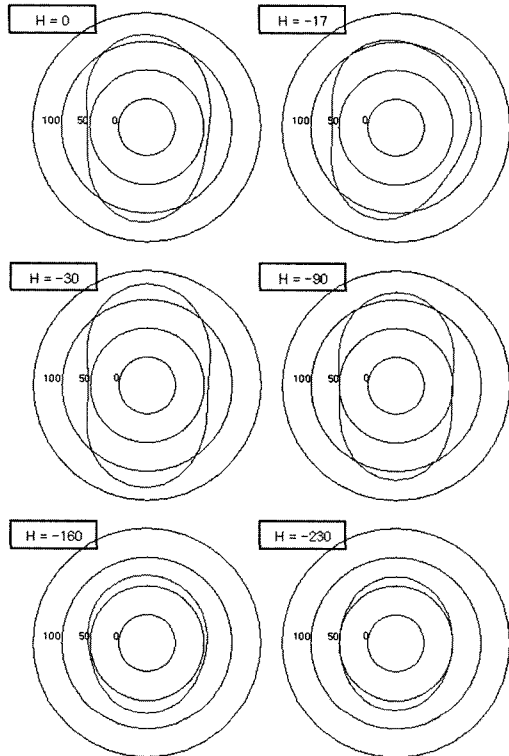


Fig. 14 3rd order liner deformation in  $\mu\text{m}$  along the liner height (A+T+G#5 gas load)

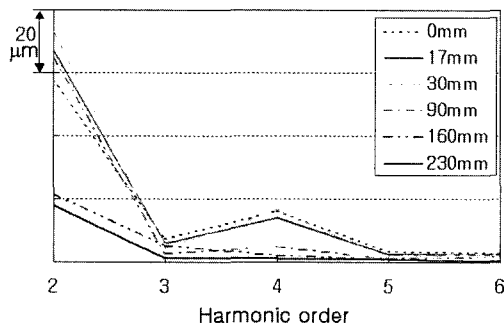


Fig. 15 Harmonic analysis of the liner deformation in  $\mu\text{m}$  along the liner height (A+T+G#5 gas load)

Fig. 15는 체결력과 열하중에 추가하여 5번 실린더에 폭발압력 하중이 작용할 때의 라이너 길이방향으로의 변형을 하모닉 분석을 한 것인데 설계상 별다른 문제는 없어 보인다.

#### 4.4 실린더 헤드가스켓 압력

가스켓 비드 부분에는 그 형태와 기능상 응력이

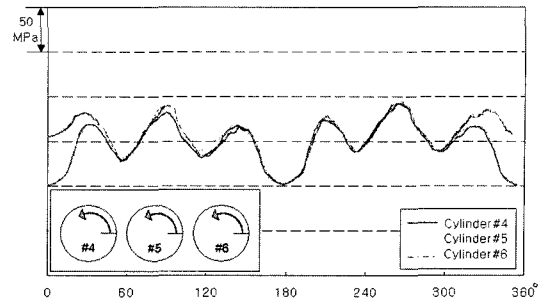


Fig. 16 Head gasket pressure (MPa) (assembly load only)

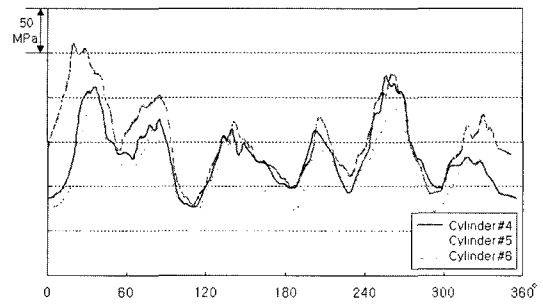


Fig. 17 Head gasket pressure (MPa) (A+T+G#5 gas load)

집중되는데 그 응력은 비드 둘레를 따라 위치한 6개의 체결 볼트의 영향을 크게 받는다. Figs. 16, 17은 가스켓 비드의 내측 원주방향으로의 응력변화율을 도시한 것으로서 이러한 경향을 잘 보여주고 있다.

6개의 헤드 볼트 사이의 각도인 60°, 120° 등에서 극소값을 잘 보여준다. Fig. 16은 체결력만에 의한 가스켓 압력을, Fig. 17은 체결력과 열하중에 추가하여 5번 실린더에 폭발압력이 가해진 경우의 가스켓 면압을 보여준다. 헤드와 블록의 열팽창으로 인해 가스켓이 받는 압력은 증가하고 연소실 내 폭발압력의 영향으로 5번 실린더 부근의 발생 응력이 상대적으로 낮아졌음을 볼 수 있다.

#### 4.5 HCF 안전계수

실제 엔진의 운전시에는 위에서 기술한 여러 하중 조건이 반복되면서 국부적으로 엔진의 피로 현상을 유발하게 되는데 본 해석에서는 Table 2와 같이 5가지 하중조건을 고려하였다. 1, 2 조건은 정하중 조건이며 3~5 조건은 엔진 폭발압력이 실린더별로 교차로 작용하는 동하중 조건을 상사한 것이다.

Table 2 Loading cases for the fatigue analysis

	Loading conditions	Remark
1	A	Max. principal stress
2	A + T	Max. principal stress
3	A + T + G #4	Max. principal stress
4	A + T + G #5	Max. principal stress
5	A + T + G #6	Max. principal stress

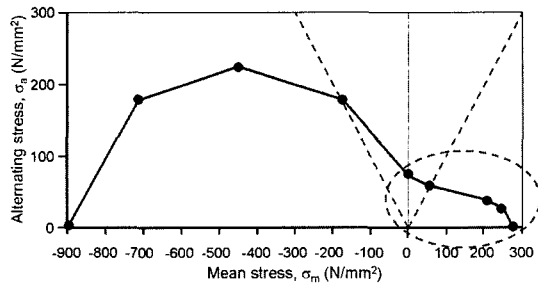
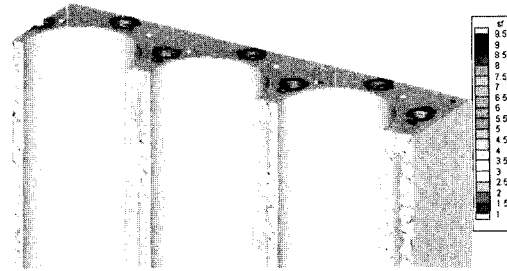


Fig. 18 A Haigh diagram of a typical cast iron

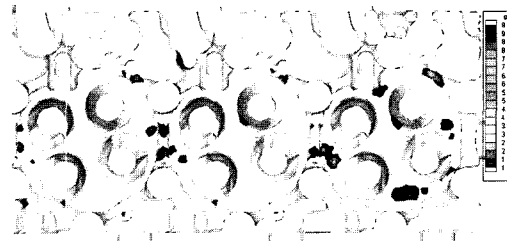
이러한 5가지 조건에 따른 최대 주응력의 분포를 추출한 후, 이 결과를 Fig. 18과 같은 Haigh 선도에 적용하여 HCF 피로안전계수를 산출하게 된다. 이 선도에서 가로축은 평균응력, 세로축은 응력 진폭을 나타내는데 압축응력 상태에서의 피로 분석은 큰 의미가 없으므로 평가 대상에서 제외하였으며 그림에서 등근 타원으로 표시된 영역의 인장응력 상태만을 분석 대상으로 설정하였다.

Fig. 19에서 보듯이 해석된 피로안전계수는 상당히 높게 나타나 전반적으로 피로 측면에서는 안전한 것으로 평가되었다. Fig. 19a는 실린더 블록의 볼트 위치 주변에서 피로안전 계수가 상대적으로 낮은 것으로 보여주고 있으나 그 값이 3~4이상으로써 설계안전도 측면에서는 문제가 없는 것으로 평가된다.

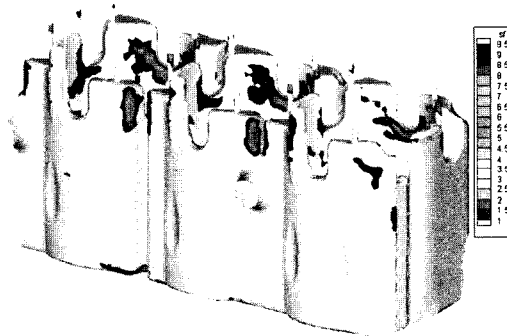
Fig. 19b, 19c는 각각 헤드와 블록의 냉각수 측의 피로안전계수 분포를 보여 준다. 연소실 주변에서 상대적으로 낮은 값을 보여주고 있지만 충분히 안전한 범위에 있으므로 구조적인 문제는 없으므로 예상된다. 이것은 최대 주응력 값 전체를 보여주는 Fig. 20을 보면 좀 더 분명하게 알 수 있다. 응력 진폭 자체가 피로한도 응력보다 상대적으로 작은 부분에 위치하는 것을 볼 수 있다.



(a) Safety factor of the gas side of the cylinder block



(b) Safety factor of the coolant side of the cylinder head



(c) Safety factor of the coolant side of the cylinder block

Fig. 19 Distribution of fatigue safety factor

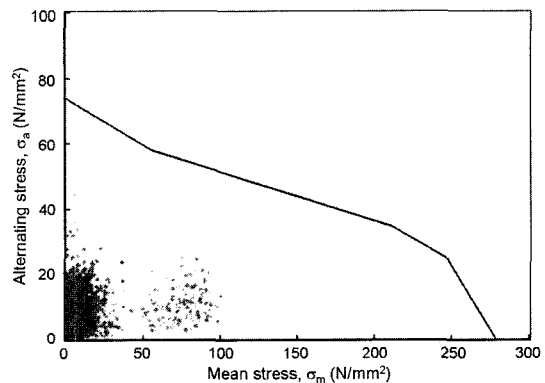


Fig. 20 All the max. principal stresses plotted in the tensile side of the Haigh diagram

## 5. 결론

실린더 헤드와 블록의 결합체로 이루어진 8리터 급 직렬 6기통 대형디젤엔진의 절반모델에 대한 유한요소해석을 통해 온도분포, 변형, 응력, 피로안전계수 등을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 정확한 온도분포 해석을 위해 엔진냉각수 CFD 결과인 냉각수 유로 표면에서의 열전달계수를 추출하여 FEA 모델에 상사시키는 방법을 적용하였다. 상사 방법으로써 최소거리 탐색방법을 사용하였으며 CFD 모델과 FEA 모델이 약간 상이하더라도 정확하게 상사하는 결과를 보여주었다.
- 2) 엔진의 내구성능 조건을 모사할 수 있는 피로안전계수 계산을 위해 5가지 반복적인 부하조건을 설정하고 FEA를 수행하였다. 즉 체결력, 체결력에 열부하 설정의 정적 부하조건 2가지와 체결력과 열부하 조건위에 기통별로 상사점에 최대폭 발압력 설정하는 동적 부하조건 3가지를 해석하였다. 이 중에서 최대, 최소 주응력을 추출하고 이것을 Haigh 선도에 적용하여 피로안전계수를 계산한 결과 피로 취약부위 분석이 가능하였다.

## References

- 1) M. W. Sohn, J. M. Park, B. T. Kim, "Finite Element Analysis for the Temperature and Thermal Stress Distributions of a Cylinder Head," *Trans. of KSAE*, Vol.10, No.1, pp.42-52, 1988.
- 2) F. J. Maassen, "Simulation of Endurance and Thermo Cycle Testing for Highly Loaded HSDI Diesel Cylinder Heads," SAE 2001-01-3226, 2001.
- 3) S. Abe, M. Suzuki, "Analysis of Cylinder Bore Distortion During Engine Operation," SAE 950541, 1995.
- 4) F. Koch, P. Decker, R. Guelpen, F.-J. Quadflieg, M. Loeprecht, "Cylinder Liner Deformation Analysis - Measurements and Calculations," SAE 980567, 1998.
- 5) T. Y. Chen, J. Zwick, B. Tripathy, G. Novak, "3D Engine Analysis and MLS Cylinder Head Gaskets Design," SAE 2002-01-0663, 2002.
- 6) K. I. Ko, S. J. Kim, "Development of Fatigue Analysis Procedure by using CAE and Its Application," *Trans. of KSAE*, Vol.7, No.4, pp.287-294, 1999.
- 7) F. J. Maassen, F. Koch et al., "Analytical and Empirical Methods for Optimization of Cylinder Liner Bore Distortion," SAE 2001-01-0569, 2001
- 8) W. Steiner, G. Steiwender, B. Unger, "Fatigue Simulation of Power Train Components During the Design Process," FISITA Paper F2000G 296, Seoul, Korea, June 12-15, 2000.