

유한 요소법을 이용한 실린더 헤드/ 블록의 변형 및 응력해석



김 범 근*

1. 서 론

산업이 발전하고 자동차 시장이 확대됨에 따라 자동차 기술에 대한 관심도 한층 높아지고 있다. 최근 자동차 업계에서는 차체 경량화를 위한 엔진 설계를 위하여 엔진의 주요 부품들을 알루미늄으로 대체하고자 하는 움직임이 활발하다. 엔진 출력의 증가에 따른 가혹한 하중조건 속의 경량화된 엔진을 설계하기 위해서 자동차 업계에서는 CAE (Computer Aided Engineering) 기법을 업무에 적용하고 있다. 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션을 통해 시험 기간 및 비용을 대폭 감소 시킬 수 있기 때문이다. 또한, 다양한 소비자들의 요구에 대응하기 위하여 CAE를 이용한 효과적인 설계 방법이 확산되어 가고 있다.

2. 유한요소해석의 엔진 적용

폭발압력이 높은 디젤 엔진의 경우나 경량화가 된 가솔린 엔진의 경우 엔진의 연소실이나 Water jacket (냉각수통로) 내부에 미세균열(hair crack)이 발생되는 현상이 보이기도 한다. 이것은 응력집중부위

가 생겨 발생하는 현상인데, 이렇게 미세균열이 발생되면 엔진 수명이 단축되고 결국에는 미세균열이 성장하여 파손에 이르게 된다. 종래에는 설계단계에서부터 응력집중부위를 예측하는 것에 상당한 어려움이 있었으나, 컴퓨터의 발달과 더불어 유한요소법을 이용하여 광범위한 엔진 해석을 수행할 수 있게 되었다. 유한 요소법을 이용한 엔진 해석은 크게 세 과정으로 나누어 볼 수 있다. 첫번째는, 수치해석을 하기위한 준비 과정으로 모델의 기하학적 형상을 이용하여 수치해석 모델로 만들어 하중 및 경계조건을 작성하는 Pre-Process 과정이다. 다음으로는 준비된 모델을 적절한 Solver를 이용하여 수치 해석하는 Solving 과정, 마지막으로 수치 해석된 결과를 검토하는 단계로서 해석 결과를 도식적 또는 가시적으로 출력하여 해석결과 타당성 여부를 체크하고 분석하는 Post processing 과정이다.

당사에서 실시한 해석방법을 통해서 각각의 과정을 단계별로 살펴보기로 한다. 경계조건 및 하중 조건 입력을 위해서는 SDRC사의 유한요소해석 상용프로그램인 IDEAS가 사용되었으며 solver로는 ABAQUS를 사용하였다.

* 현대자동차

2.1 엔진 어셈블리와 FE해석모델

엔진 어셈블리를 Fig. 1에 나타낸다.

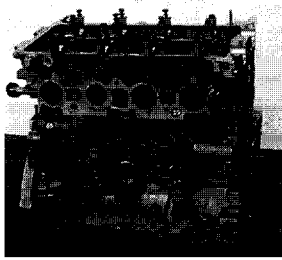


Fig. 1 엔진 어셈블리

신뢰성 있는 해석 결과를 위해서는 엔진 어셈블리의 주요 부품을 해석 대상으로 포함하여야 한다. 이는 각각의 부품간의 체결방법이나 재질에 의하여 변형형상 및 응력분포가 크게 달라질 수 있기 때문이다.

실린더 헤드와 블록의 응력 및 변형형상을 파악하기 위하여 해석모델에 실린더 헤드, 실린더 블록, 라이너, 헤드볼트, 가스켓, 밸브시트, 밸브가이드를 포함한다. 엔진 어셈블리를 해석하기 위한 유한요소 해석 모델을 Fig. 2에 나타낸다.

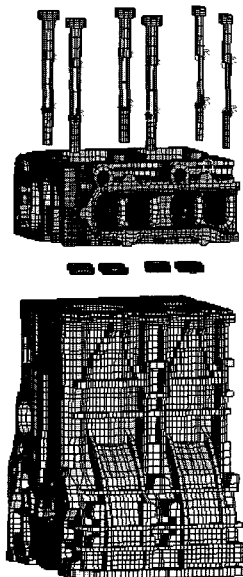
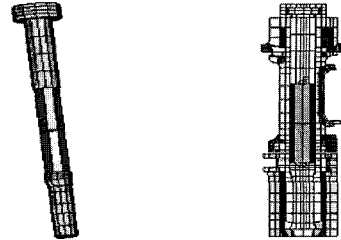


Fig.2 엔진 어셈블리의 해석모델



(a)헤드볼트 모델 (b) 헤드볼트의 조립된 상태

Fig. 3 헤드볼트의 모델링

모두 4개의 실린더 중 첫번째와 두 번째 실린더를 모델 대상으로 하였다. 이는 4개의 실린더 모두를 이용하는 경우 지나치게 해석 모델이 커져서 컴퓨터의 용량을 초과하거나 해석시간이 너무 길어질 수 있기 때문이다. FE 해석모델은 이 두개의 실린더 범위에 해당하는 실린더헤드, 실린더블록, 크랭크샤프트, 실린더 라이너, 헤드 가스켓, 밸브시트, 밸브가이드, 헤드볼트를 포함하였으며 모두 Solid Element를 사용하여 모델링 되었다. 주로 Hexahedron 요소를 사용하였으며 전체요소의 수는 87,482개이며 절점의 수는 126,588개이다. 가스켓 양면의 절점은 실린더헤드, 블록사이 경계조건을 부여할 수 있도록 실린더 헤드와 블록의 절점과 일치시켰다. 헤드볼트는 Fig. 3과 같이 실린더 헤드와 장착되는 쪽과 실린더 블록과 체결되는 쪽을 분리시켰으며 Shank부위를 Beam element로 모델링 하였다.

또한, 실린더 헤드와 장착되는 쪽과 실린더 블록과 체결되는 쪽이 각각 실린더 헤드와 실린더 블록의 절점을 공유하도록 모델링하여 절점간의 경계조건을 부여할 수 있도록 하였다.

라이너는 TDC에서의 첫번째 피스톤링의 윗부분은 세밀하게 모델링하여 라이너의 변형형상을 잘 묘사할 수 있도록 하였으며, 밸브시트의 절점은 실린더 헤드와 접하는 면에 경계조건을 부여할 수 있도록 헤드면의 절점과 일치시켰다.

Global 좌표계는 그 원점이 메인 베어링의 축상 첫번째 실린더의 중심에 놓이도록 위치되어 있으며 x축은 크랭크샤프트 축과 나란히 2번째 실린더를 향하고, z축은 실린더의 중심축과 나란히 실린더 헤드쪽을 향하고 있다. 또한 보어변형을 파악할 수 있도록 각 실린더의 중심에는 Cylindrical 좌표

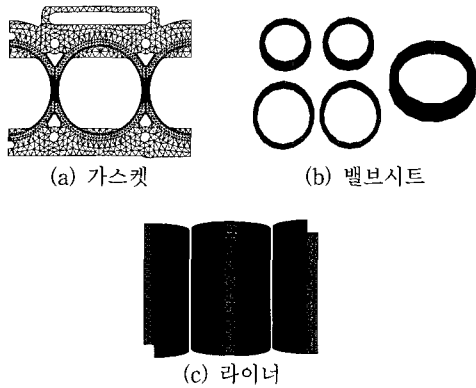


Fig. 4 부품의 모델링

계가 설정하고 밸브시트의 중심에도 Cylindrical 좌표계를 설정하였다.

이렇게 모델링된 엔진의 주요 부품에는 기계적 물성치를 입력하였다. 각 주요구성요소의 재질과 기계적 물성치를 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Mechanical properties of engine assembly

	Properties		
	E(GPa)	ν	$\alpha (10^{-6}/K)$
Cylinder Head	110	0.26	10.2
Cylinder Block	110	0.26	10.2
Valve Seat	180	0.3	11
Head Bolt	210	0.3	11

E : Young's modulus

ν : Poisson's ratio

α : Thermal expansion coefficient

2.2 경계조건 및 하중조건

엔진의 작동 시 하중 조건은 크게 조립 하중 조건, 열 하중 조건, 폭발 하중 조건으로 나눌 수 있다. 조립하중은 볼트 체결력과 밸브시트 및 밸브가이드와 같은 부품의 압입력으로 구성되어 있다. 열 하중 조건과 폭발하중조건은 각각, 엔진 작동시 형성되는 엔진의 온도 분포 및 폭발압으로 구성되어 있다. 엔진의 주요 부품간에는 각 하중조건에 따라 적합한 경계조건이 적용되었다. 본 글에서는 열적인 하중을 제외한 조립하중 및 폭발하중만을 고려한 해석을 소개하고자 한다.

2.2.1 조립하중

전체 엔진의 1/2을 해석대상으로 하였으므로 그 절단면에는 대칭 경계조건을 부여하였다. 엔진 어셈블리 모델의 강제운동을 구속하기 위하여 구조물의 적정부위에 변위 구속조건을 부여하였다. 엔진어셈블리의 각 부위간의 구속조건은 Table 2와 같다. Grommet부위의 실린더 헤드 가스켓과 실린더헤드의 접촉면의 경우에는 헤드 가스켓의 Gas Sealing을 위한 두께의 차이를 IDEAS의 Constraint Equation기능을 사용하여 고려하였다. 조립하중으로는 헤드볼트 Beam Element의 실린더 헤드측과 블록측의 양쪽 끝단 절점에 볼트 축 방향으로 초기 볼트 축력을 적용시켰다.

또한 Intake 밸브시트와 Exhaust 밸브시트의 절점들은 다른 절점들의 온도보다 각각 105°, 95° 높은 온도로 지정하여, 실제의 억지 끼움량에 의한 밸브시트의 압입을 표현하였다.

Table 2 Coupling between Engine parts (Assembly load case)

Coupled parts	Coupled DOF
Head BoltCylinder Head	TZ
Head BoltCylinder Block	TZ
GasketCylinder Head	TX,TY,TZ
GasketCylinder Block	TZ
Gasket(grommet region) Cylinder Block	TZ(0.1mm protrusion included)

* TX, TY, TZ - Translation in X, Y, Z directions

2.2.2 폭발하중

폭발하중의 경우에는 절단면에 대칭 경계조건을 부여하지 않고 절단면이 자유롭게 움직일 수 있으나 항상 절단면은 평면으로 유지되도록 경계조건을 부여하였다. 폭발하중의 경우에도 모델의 강제운동을 구속하기 위하여 구조물에 변위 구속조건을 부여하였으며 메인 베어링 캡과 실린더 블록의 접촉면은 완전히 구속시켰다. 크랭크샤프트와 메인 베어링 캡 사이에도 구속조건을 부여하여 크랭크샤프트에 가해지는 하중이 엔진 어셈블리에 전달되도록 하였다. 엔진 어셈블리 각 부위간의 구속조건은 Table 3과 같다.

Table 3 Coupling between engine parts
(Firing load case)

Coupled parts	Coupled DOF
Head Bolt — Cylinder Head	TZ
Head Bolt — Cylinder Block	TZ
Gasket — Cylinder Head	TX,TY,TZ
Gasket — Cylinder Block	TZ
Gasket(grommet region) — Cylinder Block	TZ

폭발하중의 경우에는 가스켓 Grommet 부위의 두께차이를 고려하지 않고 Z방향의 변위만을 구속하였다. 폭발하중의 경우는 첫번째 실린더가 폭발하는 경우와 두번째 실린더가 폭발하는 두가지의 경우로 나누어 하중조건을 입력하였다. 최대 폭발압을 연소실의 화염면에 적용시켰으며 라이너에도 최대 폭발압을 적용시켰다. 또한 밸브 헤드면에 작용하는 폭발압에 상응하는 폭발압을 밸브시트의 밸브 접촉면에 적용시켰다. 두번째 실린더에 대해서도 같은 하중조건이 적용되었다.

이러한 경계조건 및 하중조건을 입력하여 Solving 시 각 하중조건 하에서의 응력 집중부위 및 변형 형상을 파악할 수 있으며 엔진 어셈블리의 내구성 취약부위를 알아볼 수 있는 피로 해석 수행이 가능하다. 또한, 이 해석을 바탕으로 효과적인 Gas Sealing을 위한 Gasket 면압 분포와 Oil Consumption 에 영향을 미치는 보어의 변형형상을 파악할 수

Table 4 엔진 내구 해석 결과 및 검토 사항

하중조건	해석결과	중점 검토사항
조립하중	변형/응력 분포 가스켓 면압 분포	응력집중부 파악 가스켓 면압 실린더보어 변형 밸브시트 변형
폭발하중	변형/응력 분포	응력집중부 파악
반복하중	피로안전계수	피로 파손 응력집중부 피로

있다. Table 4은 엔진 어셈블리의 각 하중조건에 따른 주요 해석 결과와 검토사항을 나타낸다.

2.3 해석결과

2.3.1 조립하중 조건시

Fig. 5는 조립하중하의 실린더 헤드의 화염면에서의 최대 주응력과 최소 주응력 분포를 나타낸다. 밸브시트 압입으로 인하여 밸브 브릿지 부위에서 높은 응력값을 보이고 있으며 연소실 실링부위는 가스켓 Grommet을 따라서 높은 압축응력을 나타내고 있다.

원주방향(θ)을 따른 Grommet부위의 가스켓 면압 분포는 Fig. 6와 같다. Fig. 6은 실험에 의한 현상에서와 같이 Grommet 주변에서 가스켓의 면압분포가 고르지 않음을 보여주고 있다. 이는 헤드볼트 변형 등이 원인인 것으로 파악된다. 이것은 Fig. 6의 축력으로 인하여 실린더 헤드와 실린더 블록의

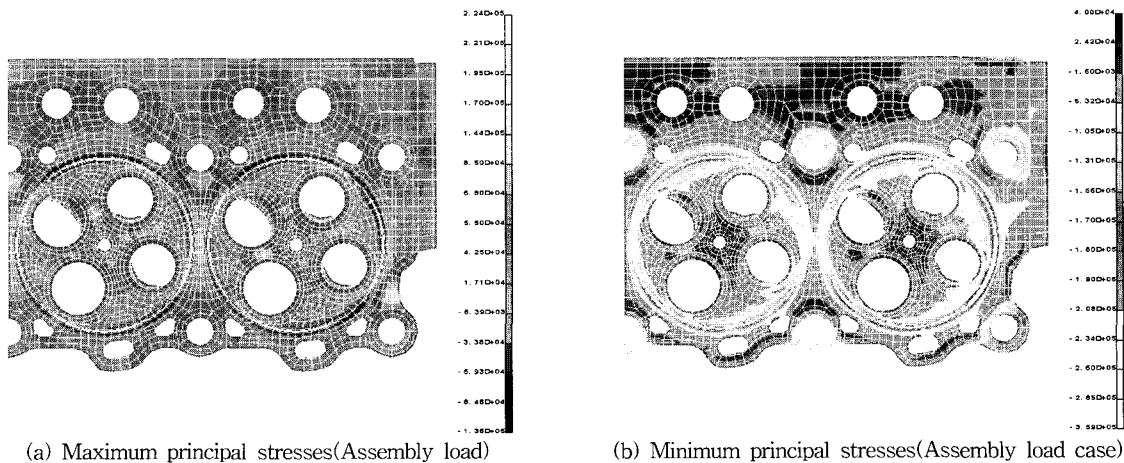


Fig. 5 Principal Stresses at the Firedeck-Gas side

에서도 잘 나타나 있는데 볼트주변 부위에서는 축력으로 인하여 높은 면압을 보이고 있는 반면 볼트에서 떨어진 부위에서는 비교적 낮은 값을 나타내고 있다. 특히, 두개의 보어가 접하는 보어 브릿지 부분에서는 최소값을 나타내었다.

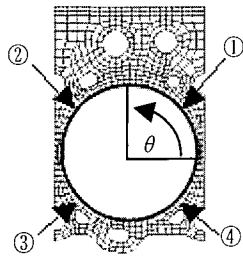


Fig. 6 Pressure distribution around Grommet

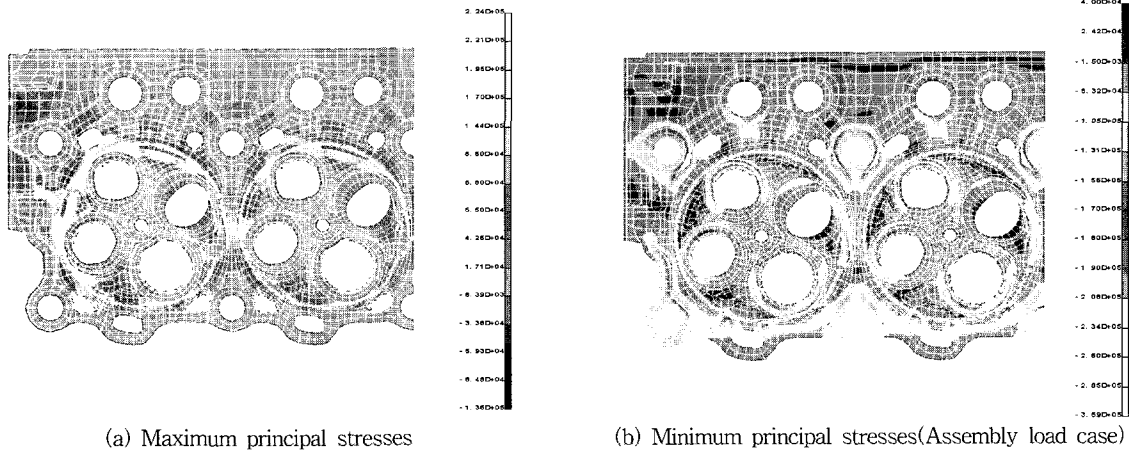
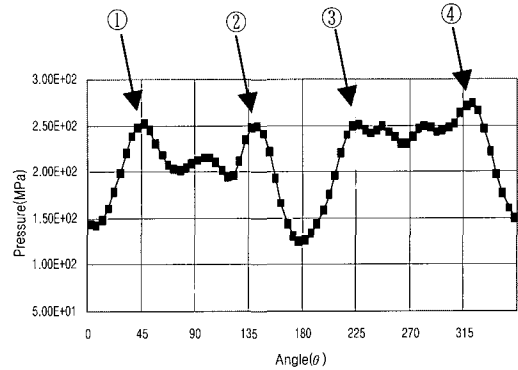


Fig. 7 Principal Stresses at the Firedeck-Water side

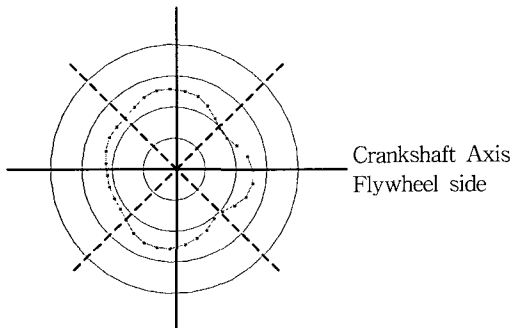


Fig. 8 Liner deformation of cylinder 1 (outer cylinder)

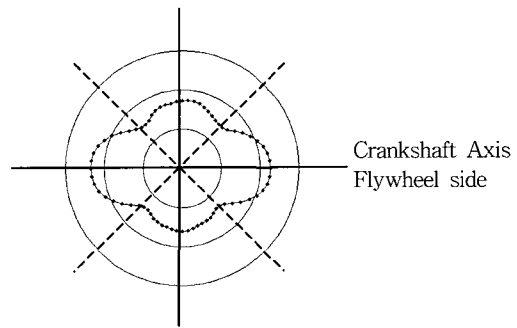


Fig.9 Liner deformation of cylinder 2 (inner cylinder)

Table 5 Harmonic Analysis results(unit: μm)

	Harmonic Order				
	2	3	4	5	6
Cylinder 1	7.1	8.0	8.4	1.0	0.7
Cylinder 2	12.3	0.6	12.1	0.2	1.2

Fig. 8과 Fig. 9은 각각 1번 실린더 보어와 2번 실린더 보어 상면부에서의 수평단면의 변형형상을 나타낸다.

내측 실린더인 2번 실린더 보어의 변형형상은 전형적인 4볼트 타입의 엔진임을 잘 보여주고 있다. 이것은 Harmonic 해석결과(Table 5)에서도 잘

반영되어 졌다. 1번 실린더 보어의 경우에는 외측에 있으므로 예측된 바와 같이 3rd 성분의 값이 내측 실린더에 비해 비교적 컸다.

2.3.2 폭발하중 조건시

Fig. 10은 폭발하중하의 실린더 헤드의 화염면에서의 최대 주응력 과 최소 주응력 분포를 나타낸다.

화염면에는 폭발압으로 인하여 압축응력이 발생되었고 Water jacket쪽은 흡기 및 배기 포트 테두리에 인장응력이 집중되어 있다.(Fig. 11) 이러한 인장 응력은 피로해석의 과정에서 동적하중으로 입력되므로 많은 관심을 가져야 한다.

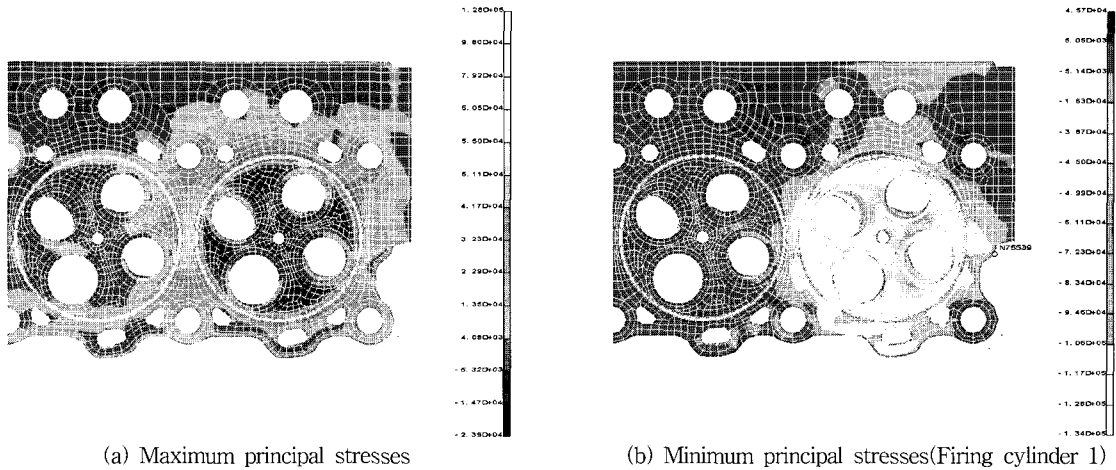


Fig. 10 Principal Stresses at the Firedeck-Gas side

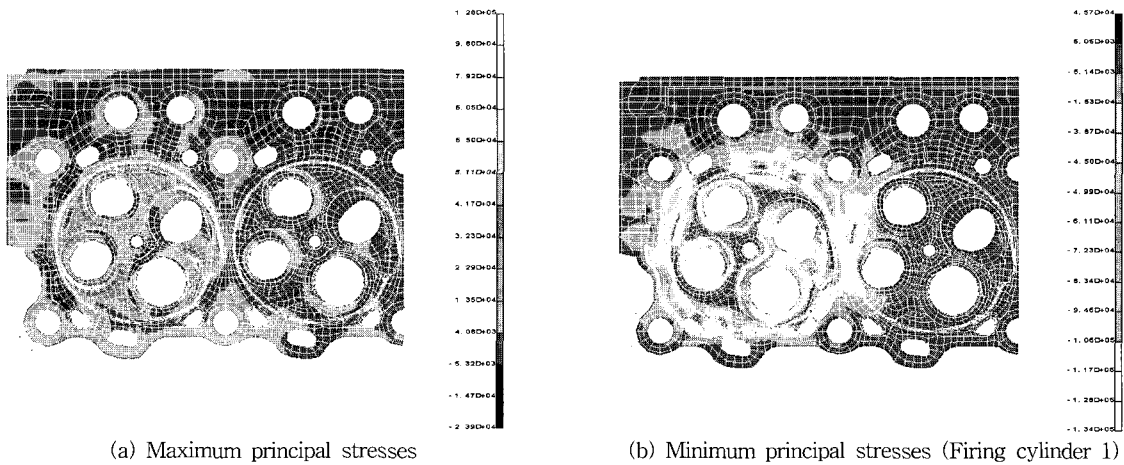


Fig. 11 Principal Stresses at the Firedeck-Water side

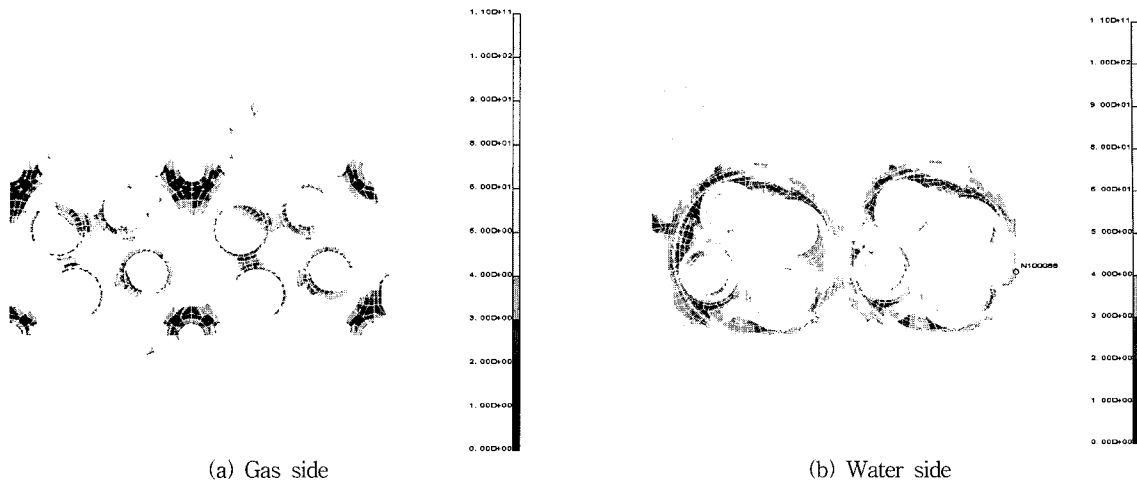


Fig.12 Fatigue Safety Values of Cylinder Head

2.3.3 High Cycle Fatigue평가

실린더 헤드 및 블록에서 내구성이 취약한 부위들을 파악하기 위하여, Goodman Theory에 의한 High Cycle 피로 평가가 수행되었다. 피로 안전 계수는, 조립하중에 의한 정적 응력과 첫번째 실린더에 폭발하중이 가해졌을 때 발생하는 동적 응력을 합한 값(S1) 과, 조립하중에 의한 정적 응력과 두번째 실린더에 폭발하중이 가해졌을 때의 발생하는 동적 응력을 합한 값(S2)이 반복되는 것으로 가정하여 계산되었다.

Fig. 12는 실린더 헤드의 주요부위에서의 피로 안전 계수 분포를 나타낸다. 화염면내 흡기 및 배기 밸브 사이의 밸브 브릿지 부위에서 낮은 피로 안전 계수가 나타나며, 최근 엔진 개발시 피로 파손이 종종 목격되고 있는 Water jacket쪽의 포트 주변 부위에도 낮은 피로 안전 계수가 나타나고 있다. 특히 외측 흡기 포트 주변과 배기 포트의 합류지점에서 가장 낮은 피로 안전 계수가 나타난다. 이와 같은 부위들은, 최근 엔진의 성능 증대에 따른 과대한 폭발 압력 증대에 따라 새로운 내구성 취약 부위들로 부각되고 있다.

볼트 체결 부위들에서의 낮은 피로 안전 계수는, 볼트 경계 조건 부여에 의해 생긴 국부적인 수치 에러로 파악되므로, 중요하지 않다.

3. 결 론

본 글에서는 유한 요소 해석법이 엔진 내구 구조

해석에 어떻게 적용되어지는지를 살펴보았다. 엔진 작동중 발생하는 열적 하중 조건이 고려되어 있지 않으므로, 포괄적인 내구 현상 파악 및 평가에 이용되기에는 다소 미흡하나, 실린더 헤드 및 블록에 대하여 다음과 같은 현상들이 검토될 수 있었다.

유한 요소 해석법이 엔진 내구 구조 해석에 적용될 경우,

- 1) 엔진의 조립 및 폭발하중 작용에 의해 발생하는 주요 응력 집중 부위들 및 그 발생 원인들을 파악할 수 있다. 특히 복잡한 형상을 가지고 있는 실린더 헤드의 주요 응력집중 부위 예측이 가능하다.
- 2) 엔진 초기 조립하중 조건에서 실린더 헤드 가스켓의 면압 분포를 산출 및 평가할 수 있으므로, 헤드 가스켓의 기밀성 향상 측면에서 유리한 실린더 헤드 및 블록의 구조 및 형상 최적화가 가능하다.
- 3) 조립하중 및 폭발하중 조건하에서 얻어진 임의 형상의 실린더 보어 변형을 Harmonic Analysis를 통해 정량화 시킬 수 있으므로, Oil consumption (Emission), Blow-by 및 마찰 저감 측면에서 유리한 실린더 블록의 형상 최적화가 가능하다.
- 4) Goodman Theory에 의한 피로 안전 계수를 계산하여 3차원적으로 표시해주는 Utility 프로그램의 개발 및 적용으로 인하여, 주요 취약 부위들에 대한 위치 파악이 쉬워졌다.

현재까지 개발된 실린더 헤드/블록 변형 및 응력 해석 절차는, 설계 초기 및 내구 문제 발생시, 위에서 언급된 엔진 성능 및 내구성 증대를 위한 실린더 헤드와 블록의 형상 최적화에 많은 도움이 될 것으로 판단된다. 더욱 신뢰성은 있는 해석 결과를 얻기 위해서는 좀 더 상세한 모델링 방법 및 경계 조건 입력 방법 개발과 많은 데이터베이스의 축적에 노력해야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. T. Tronel and G P D Whitham, "Predictive and Measurement Techniques in Cylinder Head Gasket Development", T&N Technical Symposium, Paper 30, 1995
2. K. Loenne and R. Ziemba, "The GEOTZ Cylinder Distortion Measurement System and the Possibilities of Reducing Cylinder Distortions", SAE880142, 1988
3. S J Green and R J Tyrrell, "Analysis of Bore Distortion and Design for Low Oil Consumption", Autotech '89 Congress, 1989
4. 장훈, 조돈부, "Cylinder Block의 Bore Distortion에 대한 실험적 고찰", 한국 자동차공학회 2000년 구조강도 학술강연회 논문집, 2000
5. U. Ergezen, "3D FE-Analysis of Cylinder Head/Block Compound", AVL LIST GmbH, 1999 