

중형 디젤엔진용 실린더 프레임에 대한 구조해석

손정호⁺·김무승⁺⁺·안성찬⁺⁺⁺

Structural Analysis of Cylinder Frame for Medium-speed Diesel Engine

Jung-Ho Son⁺, Moo-Seung Kim⁺⁺ and Sung-Chan An⁺⁺⁺

Abstract : Cylinder frame manufactured by casting is assembled with the components such as cylinder head, cylinder liner and main bearing cap, etc. The mechanical contact between all of the neighboring components due to bolt tightening was taken into consideration. The loads used in structural analysis were the bolt tightening forces induced by hydraulic jack and the dynamic forces calculated from kinematic analysis. The difference of forces between the neighboring cylinders was taken into account. The maximum stress, stress amplitude and mean stress calculated from the results of structural analyses were used to evaluate the static and fatigue strength. Gray cast iron which is material of cylinder frame has the material characteristics of very small elongation and different strength in tension and compression. Based on such an material characteristics, the strength evaluation of cylinder frame was carried out with in-house program developed internally.

Key words : Medium-speed Diesel engine(중형 디젤엔진), Gray cast iron(회주철), Assembly analysis(조립해석), Structural analysis(구조해석), Structural strength(구조강도)

기호설명

S_a : Stress amplitude, MPa
 S_m : Mean stress, MPa
 S_1, S_2, S_3 : Principal stress, MPa
 S_{max} : $S_m + S_a$, MPa
 S_{min} : $S_m - S_a$, MPa
 R : Stress ratio(= S_{min}/S_{max})

1. 서론

현대중공업은 독자 중형 디젤엔진(medium-speed diesel engine)인 힘센엔진(HiMSEN engine)을 개발하였으며, 지속적으로 시장과 고객의 수요에 부응할 수 있도록 새로운 힘센엔진 시리즈를 개발해 오고 있

다. 힘센엔진 시리즈(H17/28, H21/32, H25/33)는 개발 초기부터 수십 년간에 축적된 생산기술을 바탕으로 높은 출력과 성능을 발휘할 수 있도록 설계되었다.

점점 고효율 및 고성능화 되어가고 있는 중형 디젤엔진에 있어 엔진을 구성하는 부품들의 내구성은 더욱 중요성이 높아지고 있으며, 한편으로는 경쟁력 향상을 위한 원가절감을 위해 부품의 경량화, 가공 공수의 절감이 요구되고 있다. 개발 초기부터 내구성을 만족시키면서 경쟁력 있는 엔진을 만들기 위해 엔진을 구성하는 부품 또는 엔진 전체에 대한 개발 또는 설계 단계에서 종합적으로 고려해 주어야 한다.

이러한 목적을 비교적 손쉽게 해결해 주는 도구가 CAE(Computer-Aided Engineering)기법이며, CAE기법 중에 대표적인 유한요소해석(finite element

+ 손정호(현대중공업(주) 선박해양연구소 기계설계연구실), E-mail: jhson@hhi.co.kr, Tel: 052)230-7410

++ 김무승, 현대중공업(주) 선박해양연구소 구조연구실

+++ 안성찬, 현대중공업(주) 선박해양연구소 기계설계연구실

analysis, FE analysis)을 이용한 구조해석을 중형 디젤엔진용 실린더 프레임(cylinder frame 또는 engine block)에 적용하여 보았다.

본 연구에서는 실린더 프레임에 대한 여러 가지 설계 파라미터 중에 구조강도(structural strength)에 초점을 맞추었다. 실린더 프레임의 구조강도를 평가하기 위해 실린더 프레임의 재질인 회주철(gray cast iron)의 특성에 대한 이해가 중요하며, 회주철의 취성 특성을 고려한 파손 이론(failure theory)과 피로이론(fatigue theory)을 적용하였다.

전처리 프로그램으로는 Altair/HyperMesh[1]를 사용하였고, 후처리 프로그램으로는 MSC.PATRAN을 사용하였다. 접촉을 포함한 비선형 구조해석 프로그램으로는 ABAQUS/Standard[2]를 사용하였다.

2. 유한요소모델링 및 경계조건

2.1 유한요소모델링

Fig. 1은 8기통 중형 디젤엔진에서 실린더 프레임의 구조해석을 위한 모델링 범위를 보여준다. 전체 모델링 범위는 2번 실린더 1개와 1번 실린더 및 3번 실린더 각각의 1/2을 포함 1/2+1+1/2모델이다.

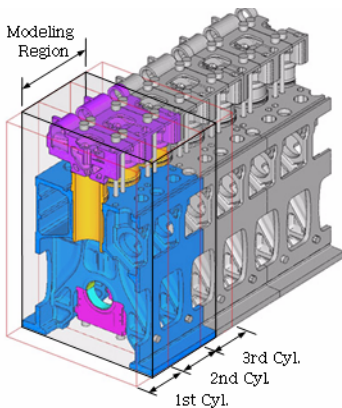


Fig. 1 FE modeling region

구조해석을 위해 1/2+1+1/2 모델에 포함된 각 부품별로 유한요소모델로 만든 후 조립모델을 Fig. 2와 같이 구성하였다.

Fig. 2에 보이는 실린더 프레임을 포함한 조립모델

에는 실린더 헤드(cylinder head), 실린더 라이너(cylinder liner), 개스킷(gasket), 메인 베어링 셸(main bearing shell), 메인 베어링 캡(main bearing cap) 및 볼트류(실린더 헤드 스테드, 메인 베어링 스테드 및 사이드 볼트)가 포함되었다.

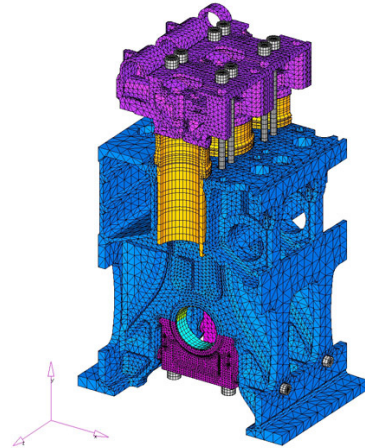


Fig. 2 FE assembly model

Fig. 2와 같이 구성된 구조해석용 모델에 포함된 각 부품 간에는 접촉을 정의하였다. 접촉면의 거동은 ABAQUS/Standard에서 제공하는 미끄럼(sliding) 모델을 사용하였으며, 실제 접촉면 거동을 고려하여 적절하게 정의하였다. 본 구조해석에서 정의된 접촉면의 수는 67개소이며, 엔진을 조립하였을 때 존재하는 접촉면 사이의 공차(clearance)도 정의해 주었다.

2.2 경계조건

엔진이 운전 중에 나타나는 동적 하중을 적용하기 전에 볼트에 의해 각 부품을 조립하는 해석을 수행하였다. 모든 볼트는 유압잭(hydraulic jack)으로 체결되며 볼트를 체결한 후 유압잭을 제거했을 때 나타나는 체결력 감소는 고려하지 않았다.

메인 베어링 스테드를 체결함에 따라 메인 베어링 셸이 실린더 프레임과 메인 베어링 캡 사이에 조립하는 압입(press-fitting)해석은 메인 베어링 셸 사이의 접촉면에 음(-)의 공차를 정의하여 구현하였다.

구조강도를 평가하기 위한 엔진의 운전조건은 과부하조건(overload condition)으로 선정하였으며, 2

번 실린더를 기준으로 모든 하중을 계산하였다.

동적 하중으로는 폭발력(firing pressure)을 포함한 실린더 내의 압력, 구동부 부품의 관성력이며, 이러한 하중은 엔진의 회전에 따라 변하며 각 실린더 사이에도 착화 순서(firing order)에 따라 변하게 된다. 구조해석에서는 실린더 라이너와 피스톤의 접촉에 의한 측압(side force)을 고려하였다. Fig. 3은 실린더 헤드와 실린더 라이너에 적용한 폭발압, 실린더 라이너에 적용한 측압 및 베어링 하중(bearing force)의 분포를 보여준다.

연소실 부품인 실린더 헤드와 실린더 라이너는 열부하(thermal load)를 받아 열변형이 발생하지만, 본 연구에서는 고려하지 않았다.

구조해석을 위한 구속조건은 베이스 프레임(base frame) 또는 기초(foundation)와 닿는 부분의 모든 자유도를 구속하였으며, 양쪽 끝단은 크랭크축 방향 자유도만 구속하였다.

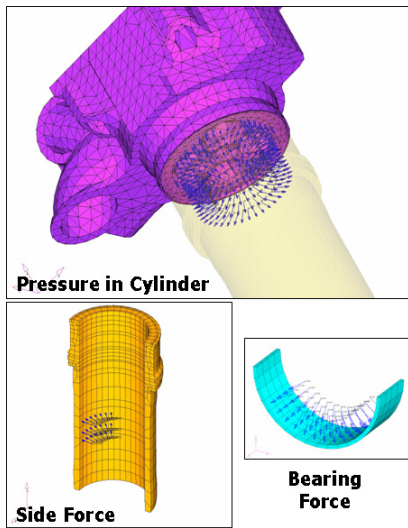


Fig. 3 Application of dynamic loads

실린더 프레임과 실린더 라이너의 재질은 회주철이고, 실린더 헤드와 메인 베어링 캡의 재질은 연성주철(ductile cast iron)이다. 볼트의 재질은 고강도의 저합금강(low alloy steel)이다.

회주철은 연신율(elongation)이 1% 미만인 취성재(brittle material)이며, 인장보다 압축에서 더 높은 강도를 보여주는 재질이다. 그래서 일반적으로 연

성재(ductile material)에 적용하는 항복조건이나 피로이론을 적용하면 잘못된 평가를 내릴 수 있다.

실린더 프레임에 대한 구조해석 절차는 모든 볼트가 체결되는 조립해석(정적 체결조건)을 수행한 후 과부하조건에서 계산된 최대 하중(최대 하중조건)과 최소 하중(최소 하중조건)을 순차적으로 적용하였다.

3. 해석결과

3.1 정적 강도평가

정적 체결조건과 최대 하중조건에서 계산된 실린더 프레임의 등가응력(von-Mises stress)분포를 Fig. 4에 나타내었다. 정적 체결조건에서는 볼트의 체결과 관련된 영역에서만 응력이 발생하고, 동적 하중이 작용하는 최대 하중조건에서는 정적 체결조건과 달리 체결영역을 제외한 영역에서 응력이 발생하고 있음을 알 수 있다.

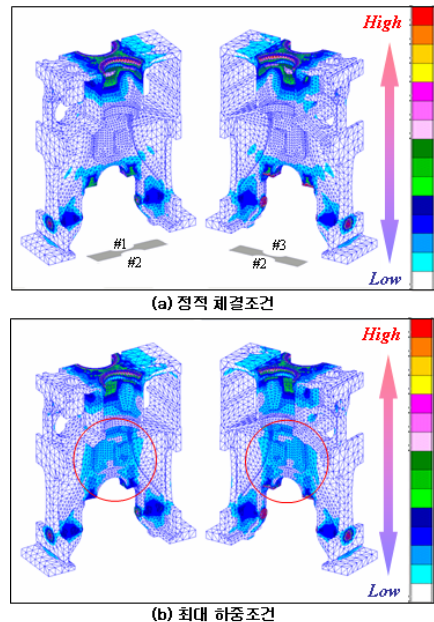


Fig. 4 Stress contour of cylinder frame

회주철로 만들어진 실린더 프레임은 인장강도와 압축강도가 다르기 때문에 이를 반영한 정적 강도를 평가하여야 한다. 인장응력일 때는 최대 주응력 이론

(maximum principal stress theory, Rankine theory)에 따라 강도를 평가하였으며, 압축응력일 때에는 최대 전단변형에너지 이론(maximum distortion energy theory, von-Mises yield criteria)에 따라 강도를 평가하였다.

등가응력은 응력상태가 인장과 압축에 관계없이 양(+)의 값을 주기 때문에 인장과 압축에서 서로 강도가 다른 특성을 반영할 수 없다. 따라서 제1불변량($=S1+S2+S3$)의 부호에 따라 등가응력에 부호를 부여한 등가응력(signed von-Mises stress)으로 변환하여 정적 강도평가를 수행하였으며, Fig. 4를 부호를 가진 등가응력으로 나타내면 Fig. 5(a)와 같다. Fig. 5(b)는 정적 강도에 대한 안전율분포를 보여준다.

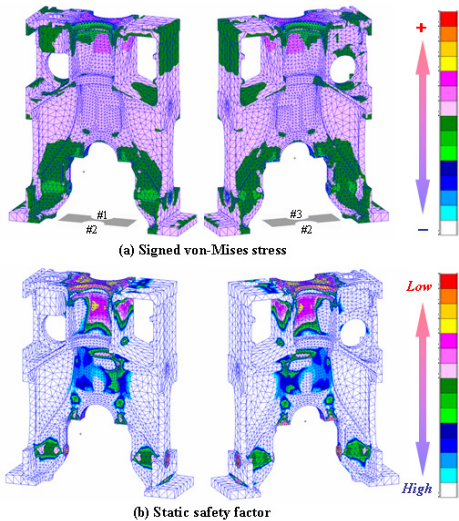


Fig. 5 Signed von-Mises stress and static safety factor contour (cylinder frame)

Fig. 6은 메인 베어링 캡의 등가응력분포 및 정적 강도에 대한 안전율분포이다. 체결 영역에서 높은 응력이 발생하고 동적 하중이 작용할 때 메인 베어링 캡의 중간에서 응력이 발생함을 알 수 있다. 메인 베어링 캡은 최대 전단변형에너지 이론에 따라 강도를 평가하였다.

3.2 피로강도 평가

실린더 프레임의 피로강도를 평가하기 위해 최대 하중조건과 최소 하중조건으로부터 변동응력(stress amplitude)과 평균응력(mean stress)을 계산하였다. 일반적으로 구조물에서 변동응력과 평균응력은 1축 응력(uniaxial stress) 상태가 아니고 다축응력(multi-axial stress) 상태이기 때문에 이러한 응력 상태를 고려해 주어야 한다[3].

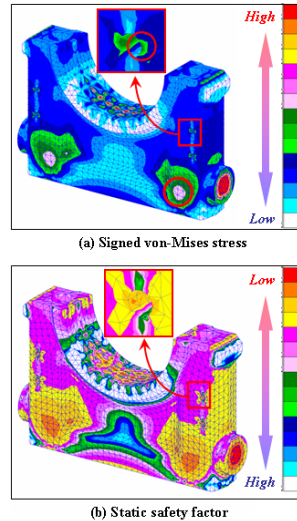


Fig. 6 Von-Mises stress and static safety factor contour (main bearing cap)

실린더 프레임은 정적 강도평가에서와 마찬가지로 인장과 압축으로 나누어 피로강도를 평가하였다. 평균응력이 영(zero)보다 크면 최대 주응력을 변동응력으로 사용하였으며, 영보다 작으면 등가응력을 변동응력으로 사용하였다.

평균응력 효과를 고려하기 위해서는 일반적으로 굿맨 선도(Goodman curve)를 많이 사용하지만, 회주철의 경우 높은 평균응력이 작용할 때 평균응력이 증가함에 따라 피로강도가 선형적으로 감소하지 않고 응력비(stress ratio)가 약 0.7인 지점까지 거의 일정하게 유지되다가 응력비가 0.7을 넘어서면 급격하게 감소하여 최대응력($S_{max}=S_m+S_a$)이 인장강도와 같아지면 피로파손이 발생한다. 따라서 평균응력이 큰 경우 굿맨 선도를 이용하여 피로강도를 평가하면 강도평가가 결과가 보수적일 가능성이 있다.

회주철의 이러한 특성을 고려하여 피로강도를 평가

하였고 실린더 프레임의 피로안전율분포를 Fig. 7에 나타내었다. 실린더 라이너 시팅부(seating area, 실린더 프레임 상단)와 메인 베어링 캡 사이 영역에서 동적 하중의 변화에 따라 피로 안전율이 낮게 나타나고 있다.

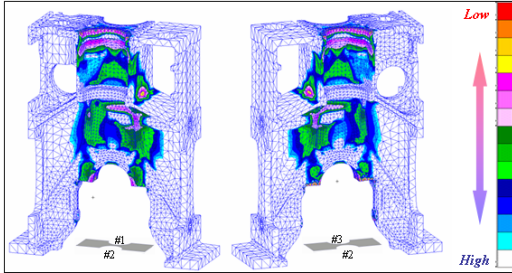


Fig. 7 Fatigue safety factor (cylinder frame)

Fig. 8은 메인 베어링 캡의 피로안전율분포를 보여 준다. 상대적으로 체결 영역보다 메인 베어링 아래 동적 하중을 받는 영역이 피로 안전율이 작음을 알 수 있다. 메인 베어링 캡의 평균응력 효과는 굿맨 선도를 사용하여 고려하였다.

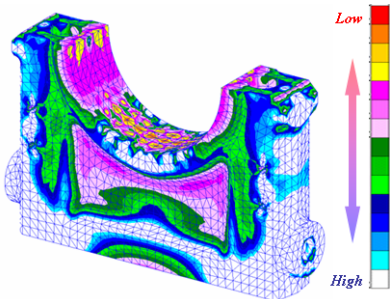


Fig. 8 Fatigue safety factor (main bearing cap)

피로강도의 기준이 되는 실린더 프레임과 메인 베어링 캡의 피로한도(fatigue limit)는 표면가공 상태, 응력상태 등을 고려하여 결정하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 중형 디젤엔진을 구성하는 부품의 하나인 실린더 프레임에 대한 구조해석으로부터 실린더 프레임과 메인 베어링 캡의 구조 거동 및 강도를

확인하였다. 실린더 프레임에 대한 구조해석에서는 실린더 프레임에 조립되는 부품 사이의 접촉을 고려하였고, 볼트의 체결에 해당하는 조립해석이 포함되었다. 구조강도 평가에서는 실린더 프레임의 재질인 회주철의 파손이론과 피로이론을 적용하여 보았다.

참고문헌

- [1] Altair/HyperMesh User's Manual, 2004.
- [2] ABAQUS/Standard User's manual, Vol. I, 2000.
- [3] N. E. Dowling, Mechanical Behavior of Materials : Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue, Prentice Hall International, Inc., 1997.