# CGI를 이용한 대형 디젤엔진의 구조해석

이재옥<sup>†</sup>·이영신<sup>\*</sup>·이현승<sup>\*\*</sup>·김재훈<sup>\*\*\*</sup>·전준탁<sup>\*\*\*\*</sup>·김철구<sup>\*\*\*\*\*</sup>

# Structural Analysis on the Heavy Duty Diesel Engine with Compacted Graphite Iron

Lee Jae-Ok, Lee Young-Shin, Lee Hyun-Seung, Jun Joon-Tak, Kim Jae-Hoon and Kim Chul-Goo

Key Words: the heavy duty diesel engine, the compacted graphite iron (CGI), stress analysis, pre-fit load, assembly load, gas load

#### **Abstract**

The heavy duty diesel engine must have a large output for maintaining excellent mobility. The compacted graphite iron (CGI) is a material currently under study for the engine demanded for high torque, durability, stiffness and fatigue. In this study, three dimensional finite element model of a heavy-duty diesel engine was developed to conduct the stress analysis by using property of CGI. The FE model of the heavy duty diesel engine section consisting with four half cylinder was selected. The heavy duty diesel engine section include cylinder block, cylinder head, liner, bearing cap, bearing and bolt. The loading conditions of engine are pre-fit load, assembly force and gas force.

## 1. 서 론

최근 대형 디젤엔진은 효율성 및 기동성능을 향상시키기 위하여 엔진 연소실 내의 폭발 압력을 증대시킴으로서 단위 중량당 마력비를 높게유지하는 방향으로 개발되어지고 있다. 차량의효율성과 기동성능을 향상시키기 위해서는 엔진의 경량화는 물론 고출력을 유지해야 하지만, 이러한 목적을 달성하기 위해서는 고도의 엔진기술적용을 통한 하드웨어적 개선이 불가피하다. 이러한 고출력, 고효율화를 추구함에 따라 최대 폭발압력이 증가하는 방향으로 엔진개발이 이루어지고 있으며 그에 따라 각 부품들에 발생되는 더

심한 변형과 응력을 설계 단계에서부터 예측하기 위한 노력이 필요하다(1,2,3). 국내에서는 김주연 (4)등은 유한요소법을 이용한 디젤엔진의 실린더 블록-라이너-가스킷-헤드 구조물에 대한 요소해석 을 실시하여 열응력분포 및 열 피로등을 파악하 고 엔진 신뢰성 및 내구성 등을 향상시키고자 하 였다. 김범근(5)등은 엔진의 경량화를 위한 알루 미늄 엔진을 대상으로 유한 요소 모델을 구축하 고 가스켓의 비선형성을 고려한 구조 해석을 수 행하여 엔진 구조특성을 파악하고 내구평가를 실 시하였다. 조남효(1)등은 CGI 재료를 적용하여 다 양한 하중하에서 8리터급 직렬 6기통 대형 디젤 엔진의 열적 피로안전도 분석을 연구하였다. 최 근에 CGI(Compacted Graphite Iron)(6,7,8)의 적용 을 통한 차세대 고성능 디젤엔진이 개발되고 있 으며, 고마력과 고출력을 요하는 디젤엔진개발에 중요한 재료로 채택되고 있다. CGI는 일반강철에 비해 최소한 75% 높은 내구성과 40% 높은 강성, 그리고 회주철보다 2배의 피로 강성을 보이는 장 점을 지닌 재료이다. 국내에서는 고마력, 고출력 을 요하는 대형 디젤엔진의 CGI 적용에 대한 본

↑ 학생회원, 충남대학교 대학원

E-mail: okee23@cnu.ac.kr

TEL: (042)821-7621 FAX: (042)821-8906

\* 충남대학교 기계설계공학과 교수,

BK21 메카트로닉스 사업단장

\*\* 충남대학교 대학원 기계설계공학과

\*\*\* 충남대학교 기계설계공학과 교수

\*\*\*\* 국방과학연구소

\*\*\*\*\* 두산인프라코어 엔진BG 특수개발 1팀

격적인 연구가 미비한 실정이다. 대형 디젤엔진의 경우 내구성향상과 개발관련 기반기술의 부족 등으로 인하여 기술수준이 선진국에 비해 대단히 낮은 실정이다.

본 논문에서는 CGI를 사용하여 대형 디젤엔진 구조물에 대한 유한요소 해석을 수행하였다. 실린더 블록-실린더 헤드-라이너-베어링-베어링 캡 구조물의 유한 요소 해석을 위한 모델링 기법을 기술하였으며, 베어링의 억지끼워맞춤, 조립 및 가스하중이 작용하는 경우 각 구조물의 응력 및 변형 분포를 통해 대형 디젤엔진의 구조적 결함에 대한 신뢰성을 검토하였다.

# 2.유한요소 모델 및 해석방법

본 논문에서 V형 12기통 엔진 어셈블리를 해석하기 위하여 사용된 유한요소모델은 Fig. 1과 같다. 베어링 캡의 대칭을 고려하여 Fig. 2와 같이 두 개의 완전하지 않은 실린더의 형상을 구현하였으며 실린더 범위에 해당하는 실린더 헤드, 가스켓, 라이너, 베어링 캡, 그리고 베어링을 모델링하였다. 또한 실린더 블록을 지지하고 있는 마운팅 또는, 오일팬의 구조강성을 구현하기 위하여 실린더 블록의 하단에 더미를 모델링하였다.



Fig.1 Finite element modeling of engine assembly



Fig.2 Engine assembly of engine parts

#### 2.1 유한요소 모델

복잡한 형상을 지닌 실린더 블록, 가스켓, 실린더 헤드 그리고 베어링 캡의 경우에는 4절점 사면체요소를 적용하였으며 라이너, 실린더 블록더미, 베어링 그리고 각각의 볼트들은 8절점 육면체요소를 적용하였다. 엔진의 유한요소모델은 전체 849,020여개의 요소와 300,694개의 절점으로격자로 생성하였다. 유한요소 분할은 Hypermesh를 사용하였으며 모델링, 하중 및 경계조건 그리고 Solver로 ABAQUS 6.6을 사용하였다.

#### 2.2 재질 물성치

본 논문의 해석에 적용된 디젤엔진 각 부분에 대한 물성치는 Table 1과 같다. 여기서 E는 탄성 계수(GPa), v는 푸아송비 그리고  $\rho$ 는 밀도  $(kg/m^3)$ 를 나타낸다.

Table 1. Material properties used for analysis

Part	Material	Е	υ	ρ
cylinder block	GJV-450	159	0.27	
cylinder block dummy	-	100	0.3	
cylinder head gasket	GJL-250	105	0.26	7850
bearing cap	GJS-600	171	0.28	
liner	GJV-400	157	0.27	
bearing	steel	215	0.3	

#### 2.3 경계조건

실린더 블록 더미의 하단은 엔진어셈블리의 수 직운동을 억제시키기 위해 하단 하면의 모든 절점을 완전 고정시켰으며 실린더 단면은 대칭조건을 적용하였다. 또한 여러 하중 조건하에서 각부품들 간의 미세한 미끄러짐 운동을 고려하기위해 실린더 블록, 베어링, 베어링 캡, 볼트를 개별적으로 모델링하여 접촉 조건을 적용하였다.

#### 2.4 하중조건

엔진에 가해지는 하중조건은 다음과 같이 크게 억지끼워맞춤, 조립, 가스하중조건으로 나누어 적 용하였다.

#### 2.4.1 억지끼워맞춤

베어링 캡의 압입 시 베어링 캡과 실린더 블록

은 Fig.3과 같은 부분에서 억지끼워맞춤이 되며 간섭량은 upper side의 경우 0.0790 mm, lower side의 경우 0.0855 mm를 적용하여 해석을 실시 하였다.

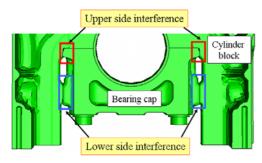


Fig.3 Bearing cap fitting

### 2.4.2 조립하중

실린더 블록과 베어링 캡의 체결 시 발생하는 하중을 조립하중으로 고려하였다. 베어링 캡은 엔진 작동 중 발생되는 가스하중 때문에 변형되기 쉽다. 이를 방지하기 위해 베어링 캡 볼트(bearing cap bolt) 외에, 엔진의 x축 방향으로 사이드 볼트(side bolt)를 적용하였다. 하나의 베어링캡에 각 2개의 베어링 캡 볼트와 사이드 볼트가적용되었으며 각각의 체결력은 베어링 캡 볼트는 232 kN, 사이드 볼트는 128.7 kN을 적용하였다.

#### 2.4.3 가스하중

가스하중은 피스톤의 왕복운동으로 커넥팅 로드에 전달된다. 전달된 하중은 베어링에 의해 45° 방향으로 Fig. 4와 같이 베어링 캡에 분포하중으로 전달된다. 베어링 캡에 가해지는 하중은 가스압력에 피스톤의 단면적을 곱한 값을 적용하였다.

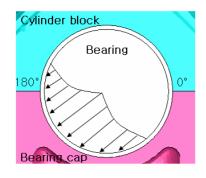


Fig.4 Gas load application on bearing

#### 3. 해석 결과

# 3.1 엔진 어셈블리 거동 해석

Fig.5는 억지끼워맞춤과 조립하중이 작용했을 때 엔진어셈블리의 변형을 보여준다. 엔진 조립시 베어링 캡의 조립에 의한 실린더 블록의 변형이 실린더 헤드의 조립에 의한 변형에 비하여더 많은 영향을 미침을 알 수 있다. 실린더 블록의 변형은 베어링 주변에서 대칭적인 양상을 보인다. Fig.6은 오른쪽 실린더에 250 bar의 가스하중이 작용하였을 때 엔진어셈블리의 변형을 나타낸다. 엔진어셈블리의 주된 변형은 가스하중으로인해 발생하였다. 베어링의 경우 가스하중을 직접적으로 영향을 받는 부분에서 인장이 나타났으며 가스하중의 수직 방향으로는 압축이 발생하였다.

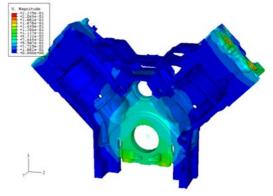


Fig.5 The deformation contour due to bearing cap fitting and assembly load

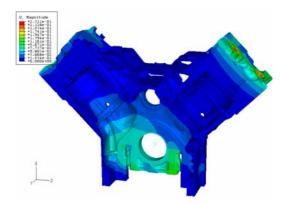


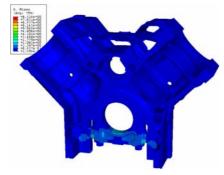
Fig.6 The deformation contour due to bearing cap fitting, assembly and gas load

3.2 응력 해석 결과

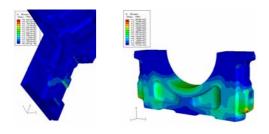
#### 3.2.1 억지끼워맞춤

Fig.7은 실린더 블록에 베어링 캡의 억지끼워맞

춤 시 발생하는 응력 분포이다. 베어링 압입 시 실린더 블록과 베어링 캡에 각각 최대 300 MPa, 180 MPa의 상승된 응력이 발생하지만 이는 압입 시 접촉면에 발생하는 면압응력이다.



(a) cylinder block and bearing cap



(b) cylinder block (c)bearing cap Fig.7 The stress contour due to bearing cap fitting

#### 3.2.2 조립하중

실린더 블록의 조립하중 하에서 응력 집중부위는 볼트 체결 부위를 제외하고는 특별한 응력 집중 부위는 나타나지 않았다. 사이트 볼트의 체결부위에서 실린더 블록의 응력은 200 MPa을 보였으며 헤드 볼트에 의한 실린더 블록의 응력은 150 MPa정도의 응력이 발생하였다. Fig.8은 조립하중에 의한 실린더 블록의 응력 분포를 나타낸다.

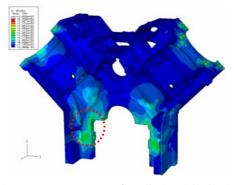


Fig.8 The stress contour of cylinder block due to bearing cap fitting and assembly load

Fig.9는 조립하중에 의한 베어링 캡의 응력분포를 나타내며 볼트에 의한 압축응력이 발생한다. 조립하중에 의한 베어링 캡의 응력집중은 Fig.9의 점선 부위에서 320 MPa이 발생하였다.

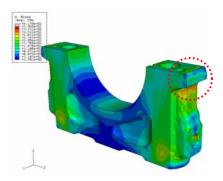


Fig.9 The stress contour of bearing cap due to bearing cap fitting and assembly load

조립하중에 의한 실린더 헤드의 응력은 헤드 볼트 체결 부위를 제외하고는 특별한 응력 집중 부위는 나타나지 않았으며 200 MPa이하의 응력 분포를 보였다. Fig.10은 조립하중 하에서 실린더 헤드의 응력 분포를 보여준다.

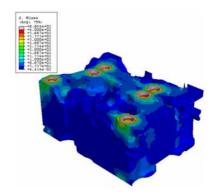


Fig.10 The stress contour of cylinder head due to bearing cap fitting and assembly load

# 3.2.3 가스하중

Fig.11은 억지끼워맞춤, 조립하중 그리고 가스하중 하에서 실린더 블록의 응력 분포를 보여준다. 오른쪽 실린더의 가스하중에 의하여 실린더블록의 왼쪽 부위로 힘이 전달되었으며 이로 인해 그림과 같이 베어링 캡과 접촉되는 부위에서 400 MPa의 국부적인 응력 집중이 발생하였다.

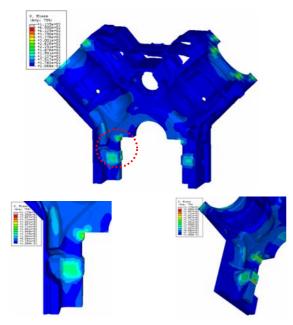


Fig.11 The stress contour of cylinder block due to bearing cap fitting, assembly and gas load

가스하중으로 인한 베어링 캡의 응력 집중은 Fig.12와 같이 국부적으로 500 MPa이 발생하였다. 이는 실린더 블록과 접촉되는 표면에 소성변형이 일어나는 부위로 사료되어지며 피로 해석을 통하여 더 정확한 분석이 요구되어 진다.

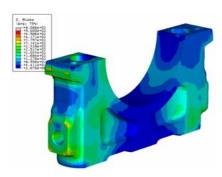


Fig.12 The stress contour of bearing cap due to bearing cap fitting, assembly and gas load

# 4. 결 론

본 논문에서는 CGI를 사용한 V형 12기통 초형디젤엔진의 실린더블록-실린더헤드-가스켓-라이너-베어링-베어링 캡 구조물에 대한 유한요소 해석을 수행하였다. 베어링 캡과 라이너의 변형과실린더 블록, 베어링 캡, 실린더 헤드의 응력해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 베어링 압입 시 실린더 블록과 베어링 캡에

각각 최대 300 MPa, 180 MPa의 응력이 발생하였다.

(2) 조립하중에 의한 실린더 블록의 응력은 사이트 볼트의 체결 부위에서 200 MPa의 응력이 발생하였으며 베어링 캡은 실린더 블록과 접촉하는 부위의 하단에서 320 MPa의 응력이 발생하였다.

(3)가스하중으로 인하여 실린더 블록과 베어링 캡의 국부적인 부위에서 각각 400 MPa, 500 MPa 의 응력이 발생되었다. 이는 실린더 블록과 베어 링 캡의 접촉부위의 면압응력으로 사료되어지며 피로해석을 통한 정확한 분석이 요구되어 진다.

## 후 기

본 연구는 두산인프라코어의 지원을 받아 수행 되었으며 이에 감사드립니다.

# 참고문헌

- (1) Cho, N.H., Lee, S.U., Lee, S.K., 2004, "Finite Element Analysis of Thermal Fatigue Safety for a Heavy-Duty Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol. 12, No. 1, pp.122-129
- (2) Koch, F., Decker, P., 1998, "Cylinder Liner Deformation Analysis-Measurements and Calculations," *SAE* 980567
- (3) Lee, K.S., Assanis D.N., Lee, J.H., Chun, K.M., 1999, "Measurements and Predictions of Steady-State and Transient Stress Distributions in a Diesel Engine Cylinder Head," *SAE*, 1999-01-0973
- (4) Kim, J.Y., Ahn, S.H., 1997, "An Analysis of Diesel Engine Cylinder Block-Liner-Gasket-Head Compound by Finite Element Method," Transactions of KSAE, Vol. 5, No. 3, pp.147-158
- (5) Kim, B. K., Chang, H., 2003, "Finite Element Analysis of Cylinder Head/Block Compound," Transactions of KSAE, Vol. 11, No. 3, pp.28-38
- (6) Steve, D., 1999, "Compacted Graphite Iron: Mechanical and Physical Properties for Engine Design," Sintercast Corp.
- (7) Warrick, R.J., Ellis, G.G., Grupke, C.,C, Khamseh, A.R., McLachlan, T.H., Gerkits, C., 1999, "Development and Application of Enhanced Compacted Graphite Iron for the Bedplate of the

New Chrysler 4.7 Liter V-8 Engine," *SAE* 1999-01-0325

(8) Dawson, S., Hollinger, I., Robbins, M., Daeth, J., Reuter, U., Schulz, H., 2001, "The Effect of Metallurgical Variables on the Machinability of Compacted Graphite Iron," *SAE* 2001-01-0409