Transactions of KSAE, Vol. 28, No. 1, pp.87-92 (January, 2020)

Check for updates

Copyright ⓒ 2020 KSAE / 170-10
pISSN 1225-6382 / eISSN 2234-0149
DOI http://dx.doi.org/10.7467/KSAE.2020.28.1.087

엔진 어셈블리 구조해석

양 철 호*

안동대학교 기계자동차공학과

A Review on the Structural Analysis of Engine Assembly

Chulho Yang*

Department of Automotive & Mechanical Engineering, Andong National University, Gyeongbuk 36729, Korea

(Received 29 August 2019 / Revised 9 December 2019 / Accepted 9 December 2019)

Abstract : A core material of automotive engine is now replaced by non-ferrous material to reduce weight. Therefore, durability issues could emerge to obtain a robustly designed engine structure. Engine assembly analysis is quite a complicated task due to the enormous size of the FE model and the involvement of inherent nonlinear behavior. The assembly consists of an engine block, a cylinder head, a head gasket and head bolts. An assembled engine model allows the appropriate boundary conditions on each other. A systematic methodology enables effective analysis of the head/block/gasket system for the complete range of engine assembly and engine operating load conditions. Nonlinear gasket behavior, temperature-dependent material properties, elastic-plastic material behavior, contact with friction, head bolt assembly torque, thermal loads and peak cylinder pressure were considered to represent the accurate behavior of engine assembly. The efficient tools of commercial finite element code ABAQUS including the gasket element and Pre_tension section contribute greatly to this complex and CPU intensive analysis.

Key words : Engine assembly analysis(엔진어셈블리해석), Finite element analysis(유한요소해석), Engine cylinder head(엔진헤드), Engine block(엔진 블록), Engine head gasket(엔진헤드 개스킷), ABAQUS(아바쿠스)

1. 서 론

엔진 구조해석은 실린더헤드, 엔진 블록, 헤드 개스킷, 볼트, 크랭크 축, 메인베어링 캡, 커넥팅 로드와 같은 엔진 주요 구성품의 정적/동적 거동에 대한 이해와 효율적인 엔진 설계를 가능하게 하는 중요한 연구 분야이다.[1] 최근의 컴퓨터 계산 능력 향상과 소프트웨어 부문의 발전은 차량 개발에 컴퓨터를 활용하는 CAE설계의 접목을 가능하게 하여 저비용, 최적화된 솔루션을 제공하여 왔다.[2] 자동차 설계의 핵심인 엔진부분의 경우에도 설계에서부터 생산까지 CAE의 활용도는 빠르게 증가하였다. 설계 과정에서 문제를 해결하는 비용은 시제품 단계의 1/10, 양산 단계의 1/100 정도로 추정되어서 CAE를 활용한 엔진 구조해석 및 설계는 비용 절감과 적합한 설계 기회를 제공할 수 있다. 주요 구성부품을 결합한 전체 엔진 어셈블리에 대하여 모델링 및 시뮬레이션을 수행하면 시제품 생산 전에 엔진의 전체적인 거동 및 세부적인 거동을 예측하고 이에 대한 설계 방향을 설정할 수 있어 설계 초기단계에서 설계방향을 설정하는데 많은 도움을 받을 수 있다. 그러므로 효율적인 엔진개발을 진행하기 위해서는 엔진의 주요구성부품인 엔진 블록, 실린더헤드, 헤드개스킷의 상호 유기적인 작용에 대한 체계적인 접근법(A systematic FEA approach)이 필요하다. 각각의 구성부품의 설계요소는 다른 구성부품의 성능에 영향을 미치므로 주요 구성부품을 포함하는 엔진어셈블리 모델은 서로 간의 영향을 포함한 부품간의 적합한 경계조건을 만족시키는데 필수적인 요소이다.[3] 엔진어셈블리를 구성하는 실린더헤드, 엔진 블록, 헤드개스킷, 볼트의 거동에 대한 해석은 재료 물성과 기하학적 비선형을 포함하며 다양한 기계적, 열 하중을 포함한다.[4] 본 연구에서는 엔진의 내구 성능, 특히 엔진 블록, 실린더 헤드 부의 응력 및 피로

*Corresponding author, E-mail: cyang@andong.ac.kr

*This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

성능, 헤드 개스킷의 거동 및 모델링, 헤드 볼트에 대한 엔진어셈블리의 반응 등에 관하여 FE 해석 및 피로 해석, 후처리(Post-processing) 과정을 정리하였고 엔진의 정/동적 하중에 대한 변형 예측 절차에 대한 방안을 소개하고자 한다.

본 연구의 주요 해석 절차 및 설계고려요소는 엔진 구조해석 분야에서 일반적으로 사용되는 상용 유한요소해석 코드인 ABAQUS[5]에서의 방법을 기반으로 하여 나타내었다.

2. 구조해석

2.1 어셈블리 해석

엔진 어셈블리 모델은 엔진블록, 실린더 헤드, 헤드개스킷, 볼트로 구성된다. 엔진 어셈블리 응력해석의 경우 일반적으로 사용하는 요소는 육면체요소나 사면체요소이다. ABAQUS[5]를 활용한 해석의 경우, 해석의 효율성과 정확도를 고려한 육면체 요소인 C3D8I[5]요소를 사용하거나 접촉의 정확도가 개선된 사면체 요소인 C3D10M[5] 요소를 사용한다. Fig. 1에는 해석에 사용된 변위 경계조건을 나타내었고 Fig. 2에는 약 120만개의 노드와 70만개 정도의 C3D10M으로 구성된 엔진 어셈블리 전체모델을 나타내었다. 해석에 사용된 Workstation의 주요 사양은 Intel Xeon CPU, 32Gb RAM 이며 소성재료모델의 사용여부에 따라 2-4일 정도의 물리적 시간이 해석에 소요되었다. 해석에 사용된 체결 하중과 가스압은 Table 1에 정리하였고 높은 응력의 발생이 예측되는 부분에서는 2-3 mm, 그 밖의 부분에서는 5-7 mm 크기의 요소를 사용하였다.

엔진 어셈블리 모델 해석에서 결과를 도출할 수 있는 각각의 구성품의 주요 해석 내용은 Fig. 3에 정리하였다. 변형 형상이나 취약부에서 응력 및 피로 해석, 개스킷의 밀폐 해석 등이 주요 내용이다. Loading/unloading 시 다른 거동을 나타내는 헤드 개스킷의 거동을 모사하기 위하여 ABAQUS[5]의 개스킷 요소를 사용하였다. 개스킷 요소는 Loading/unloading 조건 하에서의 Hysteretic loops 거동을 나타낼 수 있고 개스킷의 서브 구성요소인 Firing Ring, Gasket body의 기계적 거동을 분리하여 나타낼 수 있다. 볼트 체결하중은 ABAQUS[5]에서 제공하는 Pre_tension기능을 사용하여 예하중(Preload)을 직접 적용한다. 엔진 어셈블리모델은 정확한 대칭성을 지니고 있진 않지만 해석의 용이함을 위하여 일반적으로 I 엔진의 경우는 1/2 모델, V 엔진의 경우 1/4 모델을 사용한다. 또한 작용 하중도 대칭이 아니지만 역시 해석의 용이함으로 인해 대칭 경계조건을 사용한다. 이 경우, 대칭면에서의 결과값의 정확도 손실이 발생할 수 있다. 캠보어와 메인

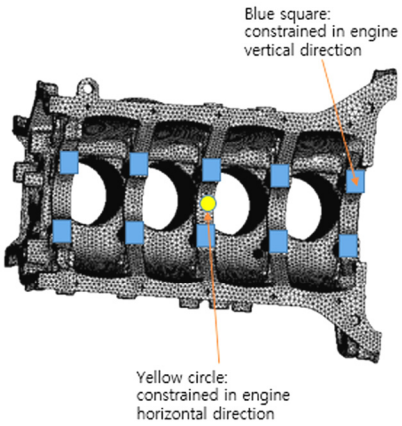

Fig. 1 Displacement boundary condition in engine assembly analysis

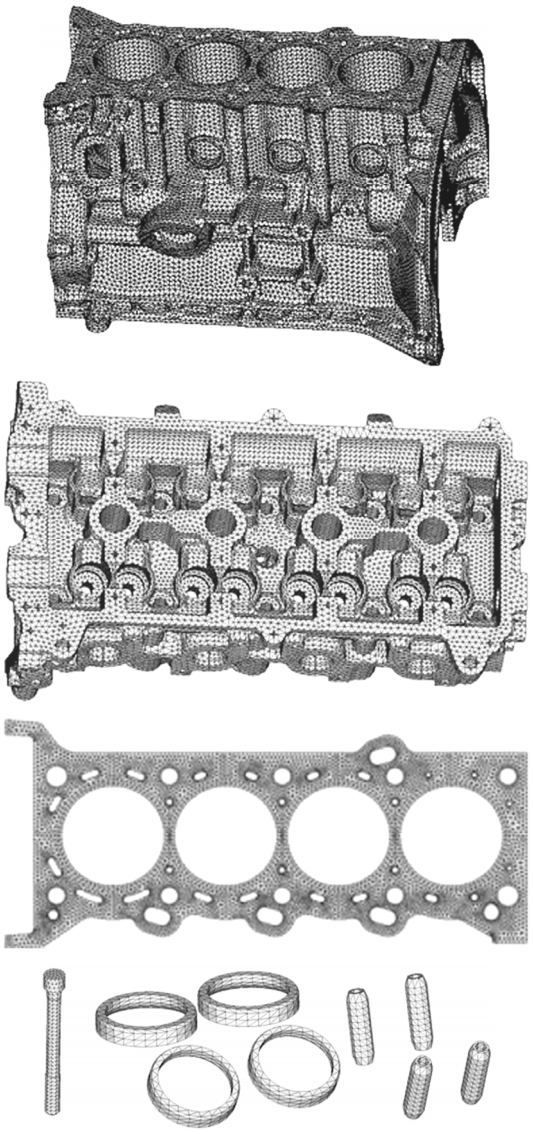

Fig. 2 Components of engine assembly model (From the top, crank case, cylinder head, head gasket, head bolt, valve seat insert, valve guide)

Table 1 Load conditions in engine assembly analysis

Load	Value
Head bolt pre-load	30 kN / bolt
Valve seat press-fFit	42.25 μm (radial)
Valve guide press-fit	18 μm (radial)
Max gas pressure	80 bar

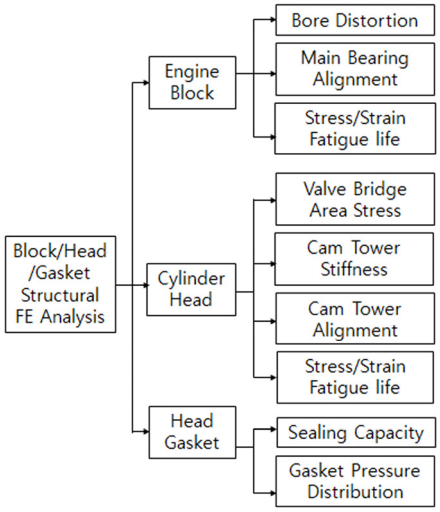

Fig. 3 Analysis types in the engine assembly structural analysis

베어링 정렬해석(Cam bore & Main bearing bore alignment)의 경우는 대칭 모델이 아닌 전체 모델을 사용한다.

엔진어셈블리 모델에 대한 유한요소 해석의 흐름도는 Fig. 4에 나타내었다. 전체 해석상의 전처리(Pre-processing), 처리(Processing), 후처리(Post-processing)과정을 자세히 나타내었다. 엔진어셈블리 모델에 연속적으로 작용하는 하중조건은 Fig. 5에 나타내었다. 하중 적용절차는 실제 엔진 제작과정에서의 조립절차와 엔진 작동하중 하에서의 절차를 따라서 유사하게 나타내었다. FE 모델에서의 엔진 작동하중은 기계적 하중, 기계/열 하중, 기계/열/연소 하중으로 구분되어 나타내었다. 기계적 하중은 접촉, Press-fit, 볼트 체결에 의한 하중을 모사하며 열 하중은 엔진 작동시 발생하는 온도장을 모사하여 나타낸다. 마지막으로 연소하중은 최대연소압력(Peak combustion pressure)에 의한 하중을 나타낸다.

헤드볼트로 체결된 엔진블록/헤드/개스킷 어셈블리에 대한 해석이 Fig. 5와 같은 하중조건을 적용하여 완료되면 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 각각의 부 구성품(Sub component)에 대한 해석 결과를 도출해 낼 수 있다. 각 구성품에 대한 해석 결과는 구성품의 설계요구사항의 적합성에 대한 평가를 가능하게 한다. 엔진 어셈블리의 주요 구성품 간의 강성에 대한 개략도를 스프링 모델로 Fig. 6에 나타내었다.

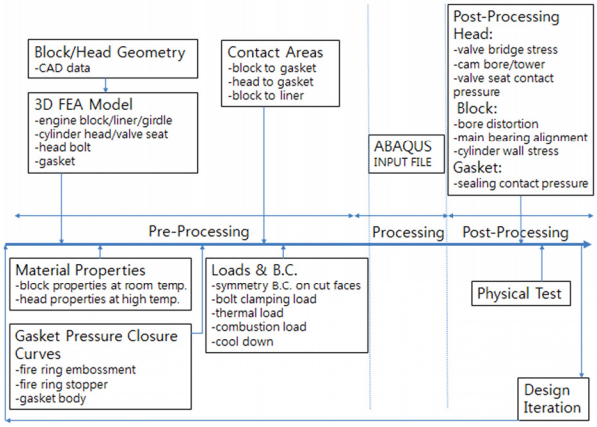

Fig. 4 Procedures of engine assembly FE analysis

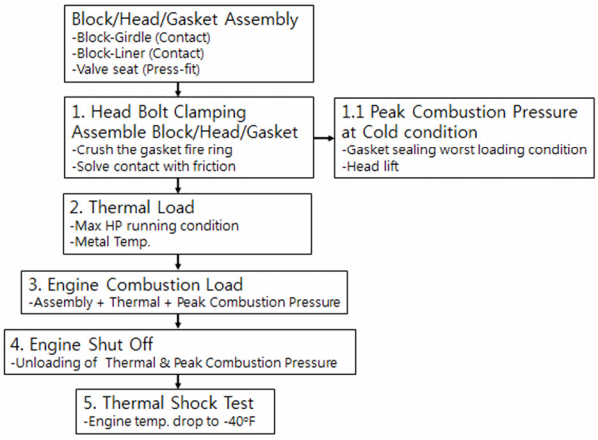

Fig. 5 Loading sequence of engine assembly model

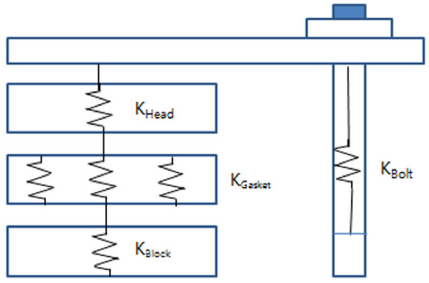

Fig. 6 Head bolt spring representation with serial spring connections of head, gasket, and block

2.2 엔진 블록 해석

엔진 블록 해석에 대한 흐름도를 Fig. 7에 나타내었다. 엔진블록 모델은 개스킷, 헤드 등 다른 어셈블리 구성품과의 경계면에서의 정확한 강성 경계조건을 만족하기 위하여 단독 모델이 아닌 어셈블리 모델해석을 사용한다. 여기서, 강성 경계조건은 열하중, 볼트체결하중, 엔진폭발하중 작용시에 정확한 하중의 전달경로를 나타낼 수 있어서 보다 정확한 엔진 블록의 거동을 나타낼 수 있다.

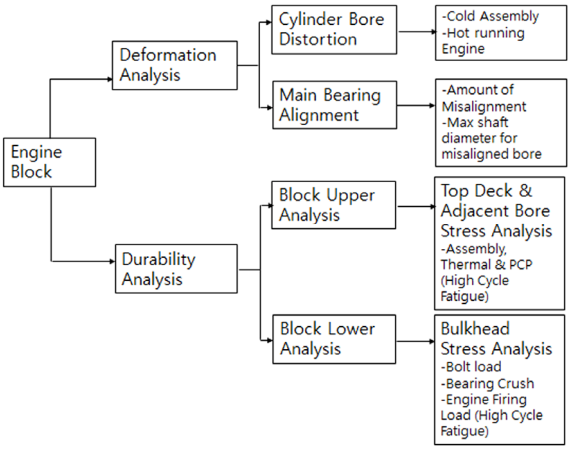

Fig. 7 Engine block FE analysis flow chart

실린더 보어 찌그러짐 해석(Cylinder bore distortion)의 경우에서 해석 결과에 영향을 미치는 주요 설계변수는 Deck 상단의 두께(Top deck thickness), 라이너 벽 두께(Liner wall thickness), 측면 벽 두께(Side wall thickness), 헤드 볼트의 크기, 위치, 하중 등이다. 상대적으로 작용하중의 영향을 많이 받는 하부 블록의 벌크헤드 응력해석(Bulkhead stress analysis)의 해석 결과에 영향을 미치는 주요 설계변수는 벌크헤드의 두께(Bulkhead thickness), 베어링크러쉬 량(Bearing crush amount), 벌크헤드 통기창의 설치 여부, 헤드 볼트의 크기, 길이, 수량, 하중 등이다.[6]

엔진블록 모델해석에서 관찰이 필요한 주요 설계 변수는 헤드 볼트 위치, 헤드볼트 길이, 엔진보어 찌그러짐(Distortion), 캠축지지, 벌크헤드, 메인베어링 캡 등이다. 헤드볼트의 위치와 길이는 엔진보어 찌그러짐과 깊은 연관이 있으며 엔진보어 찌그러짐은 엔진의 성능에 큰 영향을 미친다. 엔진블록은 전단 잠김(Shear locking)에 대한 영향을 줄이기 위하여 육면체요소를 사용한 FE모델은 C3D8I[5]요소를 주로 사용한다.

2.3 엔진 실린더헤드 해석

엔진 실린더헤드 해석 프로세스에 연관된 해석에 대한 흐름도를 Fig. 8에 나타내었다. 실린더헤드 해석에 작용하는 하중순서는 Fig. 5에 나타내었다. 실린더헤드는 가장 높은 응력을 받는 엔진 구성품 중의 하나이다. 높은 연소압(High combustion pressure), 높은 온도 및 구배(High temperature & gradient), 구성품간의 이종 재료(Dissimilar material among the components), 흡/배기 밸브 홀 사이의 좁은 공간 같은 물리적 조건 및 하중 조건들은 높은 응력 발생의 원인이다. 또한 엔진 경량화 추세에 따른 알루미늄 헤드의 적용은 저주기피로(Low cycle fatigue) 방지 설계 방법에 대한 연구를 필요로 한다.[7]

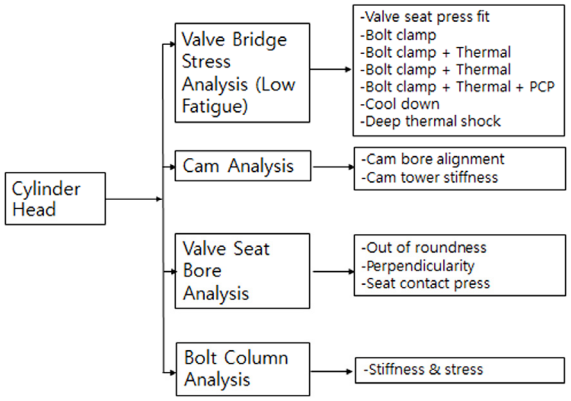

Fig. 8 Cylinder head FE analysis flow chart

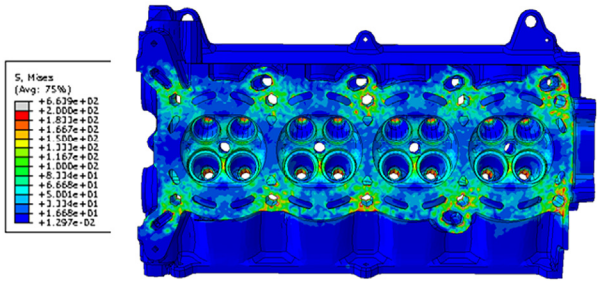

Fig. 9 Contour plat of Von-Mises stress at firing

엔진 실린더헤드의 응력 집중 부분 중 가장 위험한 부분(Critical region)은 흡/배기 밸브 사이의 밸브 브리지(Valve bridge) 부분이다. 크랙은 보통 점화플러그 나사산 부위나 흡/배기 통로(Intake/exhaust port)에서 시작한다.[8] Fig. 9에는 1번 실린더에 폭발하중이 작용하였을 때의 응력 분포를 나타내었다. 흡/배기 밸브 통로 사이에서 높은 응력상태(Hot spot)가 나타남을 확인할 수 있다.

실린더헤드의 경우도 C3D8I[5]요소를 사용한 육면체요소 FE모델이 추천되지만 대부분의 경우 메시 작업시간을 단축하기 위하여 사면체 요소인 C3D10M[5]요소를 사용한 자동메시(Automatic meshing)방법을 활용한다.

2.4 엔진 실린더헤드 개스킷 해석

엔진 실린더 헤드개스킷에 사용되는 다층 강 개스킷(Multi-layered steel gasket)의 두께 방향 거동은 복잡한 양상을 나타낸다. 개스킷의 두께와 초기 갭(Initial gap)은 실린더 보어와 오일/개스 홀(Hole)에서의 밀폐압력(Sealing pressure)을 충족시키기 위하여 개스킷의 위치에 따라 다른 두께를 사용한다. 적합한 접촉압력을 유지하기 위하여 작용되는 헤드볼트 하중의 증가는 엔진 블록과 헤드의 찌그러짐(Distortion)현상에 영향을 준다.[9] 헤드 개스킷의 두께 방향 거동에 대한 정확한 모델링은 이러한 찌그러짐의 예측을 가능하게 한다. 개스킷의 두께는 길이

나 폭에 비해서 상대적으로 매우 얇아서 일반적인 3D 요소를 사용하여 메시(Mesh)를 구성하면 적합한 요소 품질을 유지하기 위해서는 두께 방향으로 많은 요소를 생성하게 된다. 또한 개스킷은 압축 하중이 가해지면 두께 방향으로 비선형 거동을 나타내는 반면에 면내 방향으로는 변형이 작고 선형거동을 나타낸다. 일반적인 3D요소는 이러한 거동을 나타내는데 어려움이 있으므로 이러한 목적에 활용하기 위해 개발된 개스킷요소를 이용하면 해석 결과나 해석 효율 면에서 장점을 지니게 된다. ABAQUS[5] 에서 제공하는 개스킷 요소(GK3D6, GK3D8)들은 개스킷의 위치에 따른 두께 변화량을 초기 갭(Initial gap)을 사용하여 나타낼 수 있다. 실린더 보어 부근의 개스킷 Fire ring은 충분한 밀폐 압력을 유지하기 위하여 다른 개스킷의 부분보다 두꺼운 두께를 지니는데 개스킷 요소는 이러한 물리적 특성을 나타낼 수 있다. 개스킷의 두께 방향 거동은 실제 압력-닫힘 곡선(Pressure-closure curve) 테스트 결과를 사용하여 나타낸다.

엔진 실린더헤드 개스킷 해석에 대한 설계변수 프로세스 흐름도를 Fig. 10에 나타내었다.

어셈블리상태나 작용하중 하에서의 헤드 개스킷의 Fire ring 부분의 접촉압력은 개스킷의 밀폐성능을 예측하는데 사용된다. Fig. 11에는 헤드개스킷의 접촉압이 개스킷 바디부보다 높은 실린더보어와 근접한 Fire ring 부분의 접촉압을 보여준다. Fire ring 부분의 접촉압은 적색으로 표시되었다. 실린더 헤드 개스킷은 블록과 헤드사이에서 연소 가스, 냉각수, 윤활유의 밀폐 작용을 하며, 엔진 블록과 실린더 헤드와의 적절한 접촉 압력을 유지

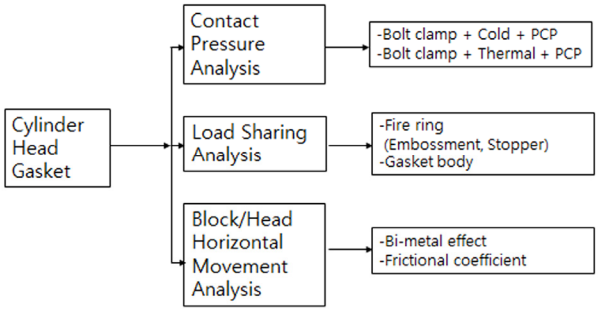

Fig. 10 Engine head gasket FE analysis flow chart

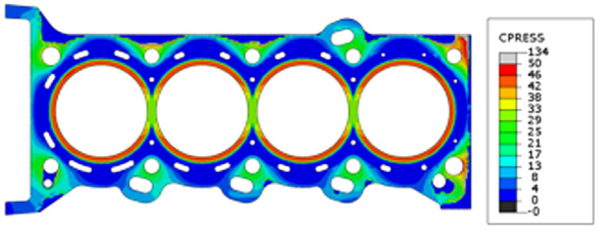

Fig. 11 Contour plots of contact pressure of the head gasket

못할 경우에 누출이 발생한다. 일반적으로 누출을 방지하기 위해서는 해석에서 계산된 Fire ring 부분의 접촉 압력의 크기가 개스킷/헤드, 개스킷/블록간의 상대적 운동을 제한하여야 한다.

2.5 엔진 실린더헤드 볼트

헤드 볼트는 블록/헤드/개스킷으로 이루어진 어셈블리를 체결한다. ABAQUS[5]의 'Pre_tension'기능은 볼트 체결력을 자동으로 제공하는 기능이다. 'Pre_tension'기능은 실제 볼트와 같이 지정된 정확한 볼트하중을 구성품간의 체결에 작용하고 어셈블된 전체 구조체에 외부하중이 작용하면 구조체의 반응에 상응하여 하중이 변화하도록 한다. 이러한 기능은 열하중, 연소하중을 반복적으로 받는 엔진어셈블리의 헤드 볼트에 적용하는데 유용하다.

엔진 블록과 체결되는 헤드 볼트의 첫 번째 나사산을 통하여 약 80 % 정도의 하중이 전달되고 나머지 나사산에서의 하중은 점차로 감소되는 경향을 나타낸다.[10] 그러므로 실제 나사산의 형상을 지닌 FE 모델이 아닌 보요소(Beam element)와 같은 간략화된 볼트 모델을 사용할 때는 적어도 3번째 나사산까지는 정확한 나사산의 위치를 지정해야 한다.

3. 엔진어셈블리 작용 하중, 경계조건, 재료모델

엔진어셈블리 해석에 적용한 하중 순서를 Fig. 5에 나타내었다. 작용 하중 중에서 엔진 내구성에 영향을 크게 미치는 하중은 다음과 같다. 먼저 어셈블리 하중인 볼트 체결 하중의 경우 대부분의 하중이 상대적으로 강성이 강한 개스킷의 Fire ring을 통하여 전달된다. 볼트하중과 개스킷에 작용하는 압력은 실린더 보어에 굽힘 모멘트로 작용하여 보어의 찌그러짐을 생성한다. Fig. 12에 볼트 체결 하중과 폭발하중을 작용하였을 때의 실린더 보어의 찌그러진 형상을 나타내었다.

그 다음 영향을 미치는 하중은 엔진 작동 중의 온도하중이다. 엔진 실린더 헤드는 연소하중으로 인해서 매우 높은 온도가 관찰되며 온도 분포는 FE 해석에서 열하중으로 작용한다.[11] CFD 해석으로부터 구한 열전달계수와 가스온도를 이용한 열전달 해석의 결과로 온도장(Temperature field)을 구한다. 계산된 온도장은 볼트 체결 후의 열 하중(Thermal load)으로서 엔진어셈블리 구조해석에 적용한다.

엔진어셈블리 해석에는 접촉에 의한 기하학적 비선형과 재료 비선형 문제가 적용된다. 실린더 헤드 연소실(Combustion chamber)의 흡/배기 밸브(Intake/exhaust valves)는 개폐시 마모가 발생하므로 접촉 부위인 Seat insert는

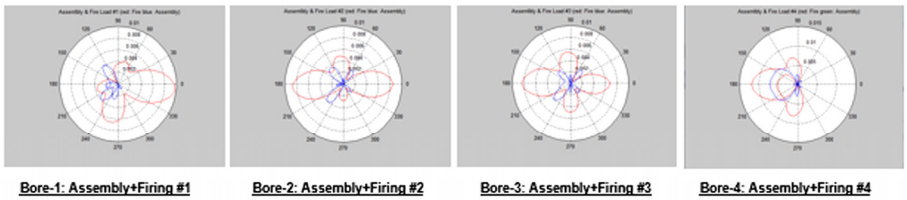

Fig. 12 Distorted shape of cylinder bore at assembled and firing state

마모에 강한 재료를 선택한다. Seat insert는 Press-fit을 사용하여 밸브 홀(Valve opening)에 삽입되고 Seat insert와 Valve seat의 접촉면은 탈착을 방지하기 위하여 충분한 양의 Interference fit이 작용된다. ABAQUS[5]에서는 '*contact interference'명령어를 사용하여 Interference fit을 구현한다. 일반적으로 CPU 시간을 줄이기 위하여 개스킷과 블록 사이의 접촉은 Tied contact을 이용하고 실린더 헤드와의 접촉은 마찰계수가 있는 일반적인 접촉조건을 적용한다.

경량화가 필요한 엔진은 일반적으로 경금속인 알루미늄을 적용한다. 비철재료인 알루미늄은 철 재료에 비하여 30 % 정도 낮은 강도와 3배 정도 높은 열팽창계수를 지녀 내구성 설계에 어려움이 따르게 된다. 실린더 헤드는 높은 열하중을 받게 되는데 알루미늄으로 제작된 실린더 헤드는 일부 부위에서 소성변형과 이로 인한 저주기 피로가 발생한다. 알루미늄은 열에 의해 쉽게 연화되므로 탄소성 물성 뿐 아니라 온도 의존(Temperature dependent) 변형 거동을 나타낸다. 이러한 재료 거동을 나타내기 위하여 일반적인 등방성 경화(Isotropic hardening), 또는 키네매틱 경화(Kinematic hardening) 모델을 사용한다.

4. 결 론

엔진어셈블리 해석에 사용되는 주요 해석 절차 및 일부 결과들을 설명하였다. 해석의 주요 목적은 응력 및 변형 거동, 피로 거동에 대한 관찰 및 정량화를 통하여 강건한 엔진 구조물 설계를 하고자 함이다. 제시한 방법을 통하여 재료, 기하학적 비선형을 포함하는 엔진 어셈블리의 거동을 효과적으로 나타낼 수 있고 이를 통하여 시제품 개발에 필요한 물리적 자원 및 개발 시간의 단축이 가능할 것으로 기대된다. 현재 엔진 어셈블리 해석을 진행하기 위해서는 많은 물리적 자원(Physical resources)을 필요로 한다. 이러한 물리적 자원을 효율적으로 사용하기 위해서는 먼저 전처리 단계인 FE 모델링 작업시 육면체 요소 자동 생성, 효율적인 작업을 위한 메싱가이드, 정형화된 해석 절차 등이 필요할 것으로 판단된다. 그리고 주조에 의해 제작되는 실린더 헤드, 엔진 블록의 잔류 응력을 FE 모델에 포함할 수 있으면 더욱 정확한 엔진 어셈블리의 거동 예측이 가능할 것이다.

후 기

이 논문은 안동대학교 기본연구지원사업에 의하여 연구되었음.

References

1) S. W. Lee and C. H. Yang, "Robust Design Engine Head Gasket," Transactions of KSAE, Vol.24, No.4, pp.416-424, 2016.
2) J. Y. Kim and S. H. Ahn, "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, 1997.
3) B. Biswas and D. Dewhirst, Engine Structural Analysis, Engine Block Analysis and Design: Part 1, Ford Internal Report, pp.1-12, 1999.
4) B. Kim and H. Chang, "Finite Element Analysis of Cylinder Head/Block Compound," Transactions of KSAE, Vol.11, No.3, pp.28-38, 2003.
5) ABAQUS Users Manual, Ver.6.13, HKS, 2013.
6) C. Yang, Fatigue Analysis of New V6 3.5L 3D Bulkhead Including Balance Shaft, Ford Internal Report, pp.1-17, 2000.
7) A. Ghasemi, "Cylinder Head High/Low Cycle Fatigue CAE Analysis," SAE 2012-01-1991, 2012.
8) Q. Zhang, Z. Zuo and J. Liu, "Failure Analysis of a Diesel Engine Cylinder Head Based on Finite Element Method," Engineering Failure Analysis, Vol.34, pp.51-58, 2013.
9) G. Novak. M. Sadowski, E. Widder and R. Capretta, "The Role of the Stopper in the Mechanics of Combustion Seals," SAE 980575, 1998.
10) R. Juvinall and K. Marshek, Fundamentals of Machine Component Design, 3rd Edn., John Wiley & Sons, New York, 2002.
11) N. H. Cho, S. Y. Lee, S. K. Lee and S. H. Lee, "Finite Element Analysis of Thermal Fatigue Safety for a Heavy-duty Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.12, No.1, pp.122-129, 2004.