

저속 대형 디젤 엔진 구조물 구동부의 운동에 따른 동적 구조 해석

이정호* · 정진한* · 김진환*

Dynamic structural analysis due to dynamic motion of driving parts in low speed large diesel engine structures

J.H.Lee, J.H.Jung and J.H.Kim

Key Words : Diesel Engine(디젤 엔진), Finite Element Method(유한요소법), Kinematic Analysis(운동학적 해석), Structural Analysis(구조 해석), Dynamic Stress(동적 응력)

Abstract

Finite element method is used for the structural analysis of low speed large diesel engine structures, and the kinematic and mechanism analysis is performed to compute loads applied to the engine structures. A typical diesel engine is used as an example and static and dynamic structural analyses are demonstrated. Dynamic stress of engine is measured during the sea-trial operation of the ship.

1. 서론

선박용 엔진 구조물은 베드 플레이트(*bed plate*), 실린더 프레임(*cylinder frame*), 프레임 박스(*frame box*) 등이 주 스테이 볼트(*long stay bolt*)에 의하여 체결되어 한 개의 대형 수직 구조물을 이루고 있으며, 프레임 박스의 안내면(*guide plate*)과 베드 플레이트의 베어링 지지부(*bearing support*) 등은 엔진의 폭발력과 선박의 추진력을 직접적으로 받으므로 구조적 결함과 하자 보수의 문제들이 발생하고 있다. 이와 같은 사용상 및 제작상의 제 문제를 해결하기 위해서는 유한요소 구조 해석 능력을 자체 보유하여 구조 설계상의 문제점을 분석하고 엔진 구조물의 취약 부위를 집중 검토하여야 하며, 이를 통해 선박의 운항 중에 일어날 수 있는 사고를 미연에 방지할 수 있다.

그러나 국내에서는 이러한 대형 엔진 구조물의 설계/해석 기술이 거의 없고 구조적 문제점이 발생할 경우에는 모든 사항을 설계사(*licensor*)에 전

적으로 의존하고 있는 실정이다. 한편, 설계 기술을 보유하고 있는 MAN-B&W, NEW SULZER DIESEL 사 등은 정밀 구조 해석을 통하여 기존 엔진 구조물에 대한 안전성 및 신뢰성을 높임과 동시에 신 모델 개발에 박차를 가하고 있으나, 기술 이전은 회피하고 있어 대형 엔진 구조물에 대한 구조 해석 기술의 개발이 시급하다고 할 수 있다.

본 연구의 목적은 대형 엔진 구조물의 구조 해석 기술을 개발하기 위하여 수행되었으며, 수치 해석 방법으로는 유한요소법을 사용하였다. 구조물에 작용하는 하중을 계산하기 위하여 구동부의 운동학적 해석 및 기구학적 해석을 수행하였으며, 구동부의 운동에 따른 동적 응력 해석을 수행하였다. 또한 이를 검증하기 위하여 운전 중인 선박에서 동적 응력을 측정하고 기본적인 설계 방법을 이용하여 구조물의 건전성을 평가하였다.

2. 엔진 구동부의 운동학적 해석

운동학적 해석⁽¹⁾의 목적은 디젤 엔진의 운전으로 인하여 발생하는 동적 하중, 즉 주베어링 지지

* 부산중공업 기술연구원

부 및 안내면에 작용하는 하중을 계산하여 엔진 구조물의 구조 해석 및 건전성 평가를 위한 하중 조건으로 사용하는데 있다.

2.1 운동학적 이론

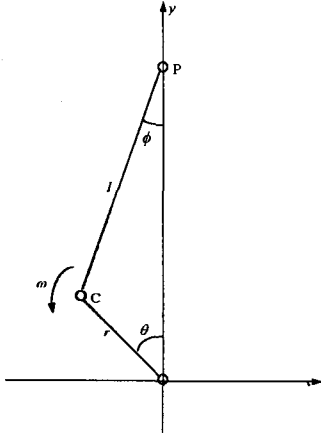


Fig. 1 Piston-crank mechanism

일반적으로 피스톤-크랭크 기구의 질량부는 회전 질량부(m_{rot})와 왕복 질량부(m_{rec})로 나누어 생각할 수 있다. 회전 질량부는 크랭크와 커넥팅로드의 일부를 포함하고, 왕복 질량부는 피스톤과 커넥팅로드의 일부를 포함한다. Fig. 1 과 같은 피스톤-크랭크 기구의 운동에서 크랭크의 각속도 ω 를 일정하다고 가정하여 $\theta = \omega \cdot t$ 로 하고, 회전 질량부와 왕복 질량부의 위치, 속도 및 가속도를 다음과 같이 구할 수 있다.

회전 질량부 (점 C)

회전 질량부 점 C 의 수평 및 수직 방향의 위치, 속도, 가속도는 다음과 같다.

$$x_c = -r \cdot \sin \omega t$$

$$\dot{x}_c = -r\omega \cdot \cos \omega t$$

$$\ddot{x}_c = r\omega^2 \cdot \sin \omega t$$

$$y_c = r \cdot \cos \omega t$$

$$\dot{y}_c = -r\omega \cdot \sin \omega t$$

$$\ddot{y}_c = -r\omega^2 \cdot \cos \omega t$$

왕복 질량부 (점 P)

왕복 질량부의 수평 방향 위치, 속도 및 가속도는 모두 0 이고, 수직 방향은 다음과 같다.

$$x_p = \dot{x}_p = \ddot{x}_p = 0$$

$$y_p = r \cdot \left\{ \cos \omega t + \frac{l}{r} - \frac{r}{4l} (1 - \cos 2\omega t) - \frac{r^3}{64l^3} (3 - 4 \cos 2\omega t + \cos 4\omega t) \right\}$$

$$\dot{y}_p = -r\omega \cdot \left\{ \sin \omega t + \frac{r}{2l} \cdot \sin 2\omega t + \frac{r^3}{16l^3} (2 \sin 2\omega t - \sin 4\omega t) \right\}$$

$$\ddot{y}_p = -r\omega^2 \cdot \left\{ \cos \omega t + \frac{r}{l} \cdot \cos 2\omega t + \frac{r^3}{4l^3} (\cos 2\omega t - \cos 4\omega t) \right\}$$

여기에서 $\lambda = \frac{l}{r}$ 이다.

위의 식을 이용하여 피스톤-크랭크 기구의 관성력에 의한 수평 방향 및 수직 방향 힘을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_x = m_{rot} \cdot \ddot{x}_c + m_{rec} \cdot \ddot{x}_p$$

$$F_y = m_{rot} \cdot \ddot{y}_c + m_{rec} \cdot \ddot{y}_p$$

2.2 기구학적 이론

모든 수학적 모델은 잉여 구속(redundant constraint)을 가지고 있으면 물리적인 시스템의 시뮬레이션을 할 수 없다. 따라서 모델에 대한 자유도(D.O.F)를 계산하기 위해서는 다음의 Gruebler 방정식을 사용한다.

$$D.O.F. = 6 \times (\text{Parts} - 1) - \text{Constraints}$$

이 방정식을 이용하여 기구학적 모델의 자유도를 계산하기 위해서는 조립품의 수(Parts) 및 구속 자유도의 수(Constraints)를 구한다.

2.3 하중과 모멘트의 계산

Fig. 2 에는 엔진의 안내력으로 인한 H형 및 X형 모멘트⁽²⁾를 나타내었는데 이것이 엔진 구조물의 고유 진동 모드(mode)의 주파수와 일치하는 주파수를 가질 때 공진(resonance)으로 인하여 구조물에 악영향을 끼친다. Fig. 3 에는 엔진 구조물의 주진동 모드를 나타내었다.

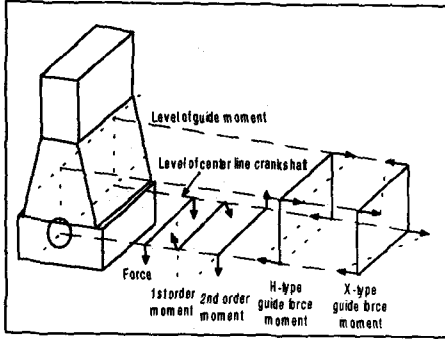


Fig. 2 H & X type moment of the structure

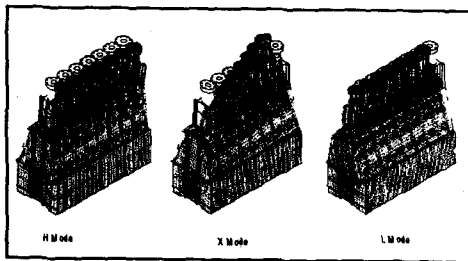


Fig. 3 The global mode of the structure

Fig. 4는 구동부의 운동학적 해석과 정을 순서도로 나타내었고 Fig. 5는 피스톤에 작용하는 1주기 동안의 폭발력을 나타내었으며 Fig. 6, 7은 폭발력을 입력으로 하여 계산된 수평 하중과 수직 하중을 나타내었다.

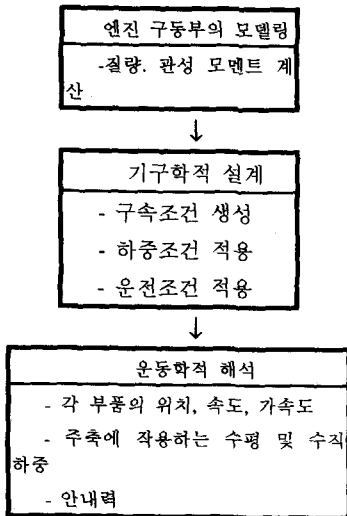


Fig. 4 The mechanism analysis procedure of driving parts

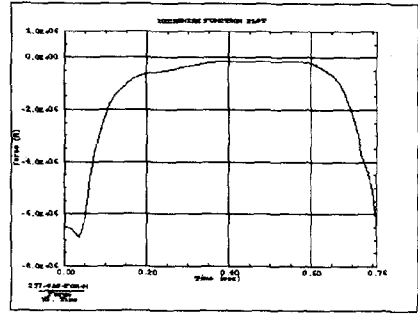


Fig. 5 The applied gas force to the piston

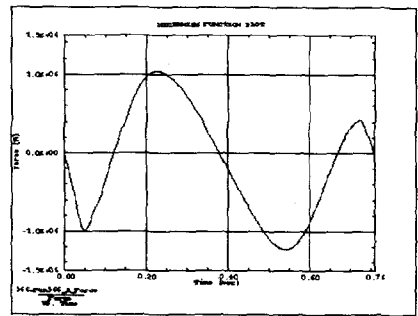


Fig. 6 The applied guide force to the guide plate

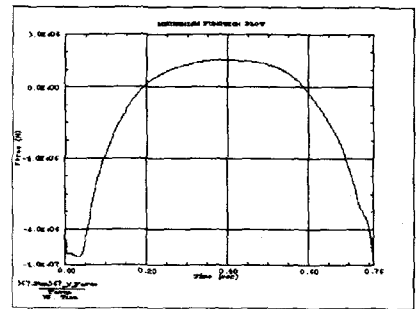


Fig. 7 The applied vertical load to the main bearing support

3. 엔진 구조물의 유한요소 해석

3.1 응력 해석

각 엔진에서 발생하는 폭발력은 실린더 커머 및 실린더 라이너에 작용하는 내압, 프레임 박스의 안내면에 작용하는 안내력, 주 베어링 지지부에 작용하는 전달 하중 등으로 분해하고, 회전각 (총 360°) 마다의 하중 상태를 구하여 실린더 갯수

만큼의 하중 조건으로 만든다.

또 선박의 추진력은 스러스트 베어링(thrust bearing) 부위에 작용하는 분포 하중 조건으로 처리할 수 있다.

선체 바닥에 고정된 베드 플레이트의 체결 부위는 고정 변위 경계 조건으로 단순화하여 취급하고, 각 파트간의 접촉면은 접촉 요소 및 자유도 연성 조건(coupled degree-of-freedom)을 사용하여 적절히 연결하고, 스테이 볼트에는 초기의 체결 하중이 가해져 있으므로 전체 엔진 구조물에도 사전 응력(pre-stressed) 상태에 있음을 고려하여 유한 요소 해석 모델을 만들어야 한다.

위의 경계조건을 이용한 전체 구조물에 대한 유한요소 해석의 경우에 전반적인 응력 분포에서는 신뢰할 만한 수준의 결과를 얻었다고 하더라도 국부적으로 응력이 집중되는 부위의 해는 신뢰하기 어려운 경우가 많다. 그러나 국부적인 응력 집중 부위의 좋은 해를 구하기 위하여 전체 구조를 상세 격자로 구성한다면 노력이나 비용 측면에서 매우 비능률적이다. 따라서 이러한 경우에는 적절한 정도의 전체 구조 해석 결과를 이용하여 국부적인 관심 분야를 정밀하게 해석하는 방법으로 서브모델링(submodeling) 기법이 있는데, 이것은 힘의 실제 분포가 정적 등가 시스템에 대처되고, 응력과 변위가 작용된 하중 근처에서만 변화한다는 St. Venant의 법칙에 기초를 두고 있다⁽³⁾.

Fig. 8 엔진 구조물의 거시적 해석 결과를 나타내었다. Fig. 9에는 국부 해석된 결과를 나타내었다.

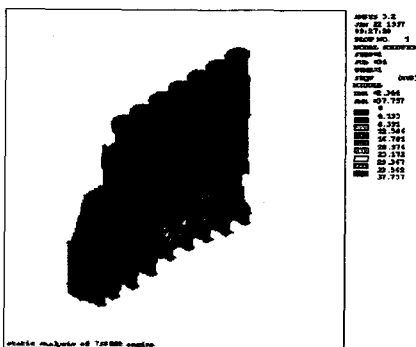


Fig. 8 The result of the structure

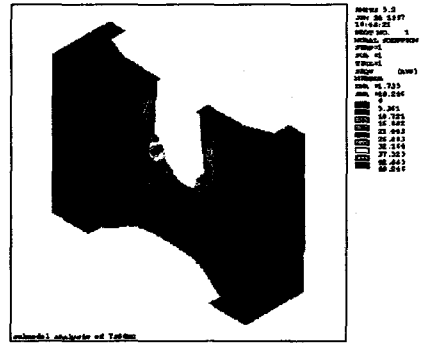


Fig. 9 The result of the local model

3.2 응력 측정

엔진이 선박에 설치된 후 시험 운전 기간 동안 응력 측정을 수행하였다. 측정을 위하여 베드플레이트의 베어링 서포트(bearing support)에 Fig. 10처럼 스트레인 게이지를 부착하였다.



Fig. 10 The strain gauge equipped on bed plate of engine

3.3 결과 분석

대형 엔진은 고가의 대형 제품이므로 연구를 위하여 제품을 제작할 수 없는 실정이므로 해석 시점과 측정 시점을 동시에 할 수 없어서 앞 절의 모델을 측정할 수 없었다. 따라서 측정된 엔진의 베드 플레이트 1 블록만의 유한 요소 해석을 수행하였다. Fig. 11에 유한 요소 모델을 나타내었고 최대한의 실 형상을 따라가며 모델링 되었다.

엔진의 베어링 서포트는 크랭크 샤프트를 지지하고 있고 크랭크 샤프트와 베어링 서포트 사이에

는 베어링 메탈이 있다. 엔진의 폭발력은 크랭크 샤프트를 통하여 베어링 서포트에 전달되며 발생하는 하중은 베어링 서포트에 Fig. 12 와 같은 하중 분포를 가질 것이다. 그리고 베어링 서포트는 보의 지지점과 같은 역할을 하며 이웃하는 실린더에서 발생하는 폭발력의 1/2 을 지지하고 있을 것이라는 가정하에 해석은 수행되었다.

베어링 서포트에 작용하는 하중을 수직 방향 하중과 수평 방향 하중으로 분력 하여 각 위상에 따라 해석을 수행하여야 한다. 그러나 해석 범위가 선형탄성 해석 범위이므로 각 방향의 단위하중만 작용시켜 유한 요소 해석을 수행하고 수직 방향과 수평방향의 하중을 선형 중첩시켜 그 결과를 360 개의 위상에 따라 계산하여 나타내었다. Fig. 13 은 실제 측정치와 계산치를 비교한 것으로 베어링 메탈 직하부의 값을 나타내고 있다.

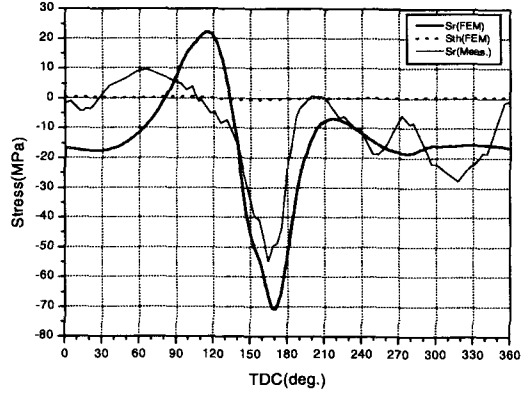


Fig. 13 The measured & calculated stress under the bearing metal during one cycle

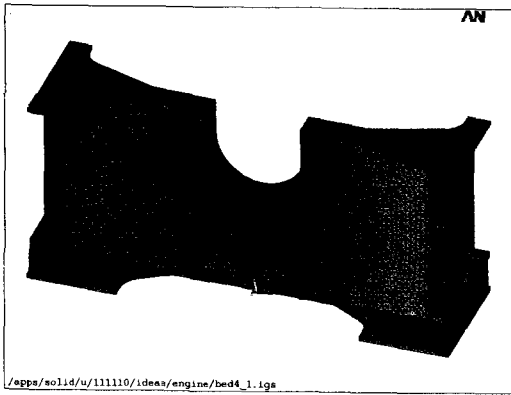


Fig. 11 The finite element model of the bed plate

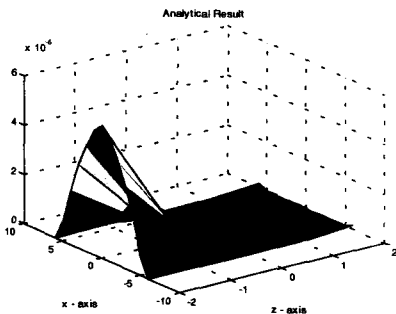


Fig. 12 The pressure distribution between bearing metal & bearing support

을 미치는 변수는 변동 응력인 σ_a 와 평균 응력

4. 구조적 건전성 평가 방법

4.1 정적하중에 의한 파손

구조의 전주기를 통하여 간헐적으로 부과될 수 있는 극한하중(ultimate load)에 대해서는 구조의 최소한 기능 유지(재료의 파단 방지위한 인장강도)를 설계 기준으로 하고, 통상 운전 상태에서 적용되는 최대 하중에 대해서는 구조의 정상적 기능 유지(영구변형을 막기 위한 항복응력)를 설계 기준으로 하고 있다.

- 극한 하중에 의한 재료의 파손 조건

$$\sigma_{au} = \sigma_u / S_f$$

S_f : safety factor

σ_{au} : allowable stress for ultimate load

σ_u : tensile strength

- 작용 하중에 의한 구조물의 변형 조건

$$\sigma_{ay} = \sigma_y / S_f$$

σ_{ay} : allowable stress for applied load

σ_y : yield stress

변동 하중에 의한 파손

엔진 구조물에서와 같이 반복되는 폭발력, 추력 등에 의하여 변동 하중이 작용될 경우에는 인장 강도(tensile strength) 이하에서 재료의 파손이 일어날 수 있다. 이러한 현상을 변동 하중에 의한 피로 파괴라고 한다, 여기서 피로 강도에 큰 영향인 σ_m 이며, 피로 강도를 예측하기 위하여 교번 하

중($\sigma_w=0$)을 받는 표준 시편에 대한 피로 수명 곡선(S-N 곡선)이 규격(JIS 등)으로 만들어져 있다. 엔진 구조물과 같이 계속적으로 반복되는 하중을 받는 구조물의 경우에는 무한 수명 설계(infinite-life design)가 필수적이다. 이러한 설계에 필요한 재료의 피로 파손에 대한 조건식으로 여러 가지(modified Goodman, Soderberg, Gerber, SAE 등)가 있으나 강재의 경우에는 modified Goodman 식⁽⁴⁾을 많이 사용하고 있다.

- 변동 하중에 의한 재료의 파손 조건

$$\sigma_{wo} = \sigma_a / S_f$$

$$\sigma_a = \sigma_c \left(1 - \frac{\sigma_w}{\sigma_u}\right) \text{ for modified Goodman}$$

위 식에서 σ_w , σ_c 는 각각 인장 강도 및 피로 한도(endurance limit)를 나타낸다.

5. 결론

본 연구에서는 대형 엔진 구조물의 구조 해석 기술을 개발하기 위하여 특정 모델의 엔진을 실험으로 사용하였다. 운동학적 해석을 통하여 구조물에 작용하는 하중을 계산하여 유한요소모델에 적용하였으며, 엔진의 회전 중 발생하는 각 회전 위치에서의 발생 응력은 선형 중첩법을 이용하여 해결하였다. 또 실제 운전 중인 엔진의 응력 측정을 통하여 해석의 타당성 및 건전성을 입증하였으며 향후 이 방법은 엔진의 설계 및 평가에 충분히 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) 자동차 기술 핸드북(기초이론편).
- (2) "Vibration Characteristics of Two-Stroke Low Speed Diesel Engine", Technical Report, MAN B&W.
- (3) 1993, ANSYS Verification Manual, Swanson Analysis System Inc.
- (4) J.A.Bannantine, J.J.Comer, J.L.Handrock, 1990, "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis", Prentice Hall.