

중속 디젤엔진 국부 구조물의 진동저감 연구 A Study on Vibration Reduction of Local Structure of Medium-speed Diesel Engine

정건화† · 이준호* · 손정호* · 류영석**

Kun Hwa Jung, Jun Ho Lee, Jung Ho Son and Young Seok Ryoo

Key Words : Diesel Engine(디젤엔진), Local Structure(국부 구조물), Resonance(공진), Mount(마운트)

ABSTRACT

The failures of local structure of marine medium-speed diesel engine occurred in durability test. The vibration response of the whole engine was in an acceptance level, but the local structures were broken. ODS test and vibration measurement were carried out in order to investigate the root cause of durability problem. These tests revealed that the root cause of failures was excessive vibration by 4.5th resonance between engine body and local structure. The best solution to reduce the vibration response is to change the type of mount. After a rigid mount was replaced by a flexible mount, maximum vibration level dropped to 72%.

확인하였다.

1. 서 론

선박 보기 및 육상 발전용으로 사용되는 중속 디젤엔진(medium-speed diesel engine)의 진동 안정성 확보는 고품질화를 통한 고객 만족을 위해 반드시 요구되는 부분이다.

기존에 중속 디젤엔진의 저진동화를 위한 연구(1)(2)(3)(4)가 꾸준히 수행되어 왔으며, 주로 엔진 전체의 진동 안정화에 초점이 맞추어져 왔지만, 본 연구에서는 엔진 내구성 시험 중에 발생한 국부 구조의 파손과 관련하여 엔진 진동과 국부 구조의 응답의 연관성을 살펴보고, 이를 통해 진동을 저감할 수 있는 알아보고자 한다. 국부 구조물 진동은 구조물 자체의 공진이나 기진력을 제공하는 주구조물과의 연성에 의한 것들로 구분해 볼 수 있는데 이를 ODS(operational deflection shape) 시험을 수행하고, 엔진 및 국부 구조물에 대한 진동계측도 수행하였다. 진동저감 안에 대한 검증을 위해 고유진동해석을 수행하여 설계변경 안 적용에 따른 유효성을

2. 국부 구조물의 진동 발생

엔진 연속 운전 시험 중 높은 수준의 진동 발생과 함께 air cooler housing (이후 A/C housing로 지칭함.) 상단에 설치된 국부 구조물에서 피로 파손 현상이 나타났다.

A/C housing은 엔진 블럭에 볼트로 연결되어 엔진 선단 위치에 설치되는 구조물로 필터, 열교환기, 펌프 등이 모듈화되어 있는 부품이며, A/C housing 위에는 터보차저가 설치되어 엔진으로 공기를 공급하게 된다.

개발 초기 수행된 내구성 시험 중 약 100 시간 경과 후 **Figure 1**에서와 같이 A/C housing 상단에 설치된 터보차저의 지지 구조물에서 발생하였으며, 엔진 좌·우 방향으로의 균열 진전 특징을 보였다.

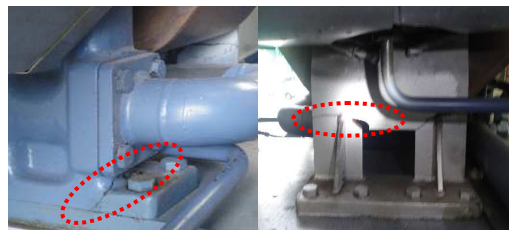


Figure 1 Fractured supporting structures

† 교신저자: 정희원, 현대중공업(주) 엔진연구실

E-mail : oceanpia@hhi.co.kr

Tel : 052-202-4579, Fax : 052-202-5495

* 현대중공업(주) 제품개발연구소 엔진연구실

** 현대중공업(주) 엔진기계사업본부 엔진기술개발부

대상 엔진은 18 기통 V형 엔진이며 실린더 직경은 250mm, 운전 속도는 900 rpm이다.

개발 초기에 적용된 엔진 마운트는 **Figure 2**에 보이는 바와 같다. 강체 마운트(rigid mount)는 바닥에 고정된 레일 받침대와 엔진 블록 사이에 삽입되어 볼트로 구속되는 구조를 가진다.



Figure 2 Type of rigid mount

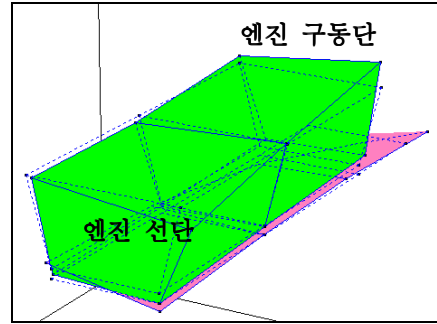
2. 진동 원인 규명

터보차저의 지지 구조물의 피로 파손의 원인이 국부적인 과대 진동으로 판단하였으나, A/C housing에서 나타난 높은 진동이 A/C housing 단독 국부진동에 의한 것인지 아니면, 엔진 블록과의 연성 진동인지에 대한 규명이 있어야 그에 따른 저감방안 도출이 가능하다.

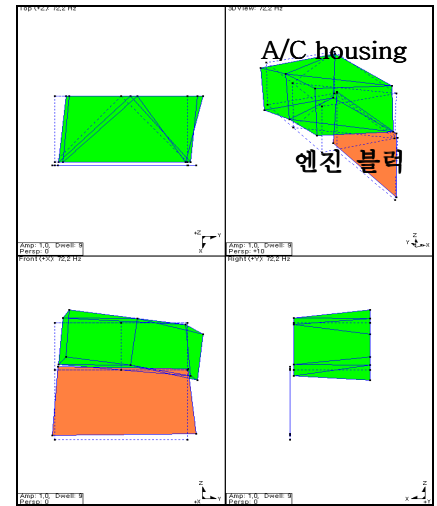
터보차저의 지지 구조물에 나타난 피로 파손의 원인을 규명하기 위해 엔진의 본체(engine body)와 A/C housing에 대한 시스템 고유 특성을 알아야 할 필요가 있다. 이를 위해 엔진 정지 조건에서의 충격 가진 시험을 수행하였으며, 그 결과를 **Table 1**에 나타내었다.

Table 1 Natural mode and frequency of engine assembly and A/C housing

| 엔진 블록 | | A/C housing | |
|-------|---------|-------------|---------|
| 모드 형태 | 고유진동수 | 모드 형태 | 고유진동수 |
| L 형 | 45.6 Hz | 상·하 거동 | 25.6 Hz |
| H 형 | 59.2 Hz | 좌·우 거동 | 42.2 Hz |
| X 형 | 73 Hz | Rolling 거동 | 72.2 Hz |



(a) X mode shape of engine assembly(73 Hz)



(b) Rolling mode shape of A/C housing(72.2 Hz)

Figure 3 Mode shape of engine assembly and A/C housing

각 주파수별 주요 모드를 **Figure 3**에 나타내었다. **Figure 3(a)**는 73 Hz인 엔진 블록의 X형 모드를 보여주며 **Figure 3(b)**는 72.2 Hz인 A/C housing의 rolling 모드를 보여주는 것으로 2개 모드에 대한 주파수가 거의 동일함을 알 수 있다. 엔진 기진력에 의한 모드 가진이 있을 때 엔진 블록과 A/C housing의 연성 거동이 나타날 수 있어 A/C housing의 단독 국부 공진보다는 연성 진동의 가능성이 더 높음을 알 수 있다.

실제 엔진에서 나타난 진동 수준 및 특성 파악을 위해 A/C housing을 포함한 엔진 어셈블리에서 진동 계측을 수행하였으며, 기진 24 차 성분을 고려한 차수(order)로 결과를 분석⁽⁶⁾ 하였다.

Figure 4는 A/C housing 상단과 인접해 있는 엔진 블록 상단 수직 방향에서의 계측 결과를 비교한 것이다. 2 개 지점 모두에서 4.5차 진동이 지배적으로 나타남을 알 수 있다.

엔진 운전 속도가 증가함에 따라 진동 수준도 같이 증가하는 특성을 보이고 있어 운전속도 900 rpm에서의 최대 진동 응답은 충격시험을 통해 확인된 X형 고유 진동 모드(73 Hz)와의 공진에 의한 것으로 판단하였다.

엔진 4.5차 기진 주파수를 고려할 때 공진 피크(resonance peak)는 운전 속도 900 rpm 이후에서 나타날 것으로 예상된다.

A/C housing을 포함한 엔진 전체 어셈블리에서 4.5차 공진 특성이 동일하게 나타나고 있지만, A/C housing 상단에서의 진동 수준이 가장 높은 것으로 파악되었으며 국제 규정⁽⁶⁾에 의한 진동 허용치를 초과하고 있다.

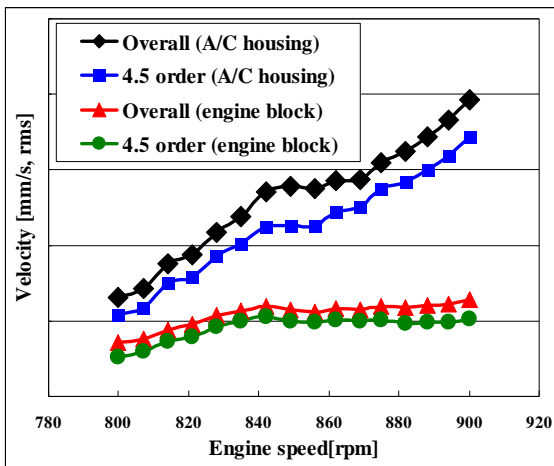


Figure 4 Measured vibration response

엔진 운전 중에 나타나는 A/C housing의 진동 양상을 확인하고 엔진 블럭과의 연성 진동 관계를 파악하기 위해 ODS(operational deflection shape) 계측⁽⁷⁾을 수행하였다.

Figure 5에 보이는 바와 같이 최대 진동 수준을 보인 900 rpm에서 수행된 ODS 시험 결과를 보면 엔진 운전 시 엔진 블럭의 선단의 X형 거동이 A/C housing의 rolling 거동과 연성되고 있음을 알 수 있다.

이상의 결과로 A/C housing에서 나타난 높은 수준의 진동은 엔진 4.5차 기진력에 의한 엔진 X형 모드와의 공진이 A/C housing의 rolling 연성 거동을 유발하였고, 67.5 Hz의 고 주기(high cycle)의 진동이 터보차저 받침 구조물의 피로 파손을 유발한 것으로 판단하였다.

따라서, A/C housing에서 발생한 연성 진동 저감

을 위해서는 국부 구조물의 개선 설계 보다는 공진 회피를 통한 진동 저감 대책이 적절함을 알 수 있었다.

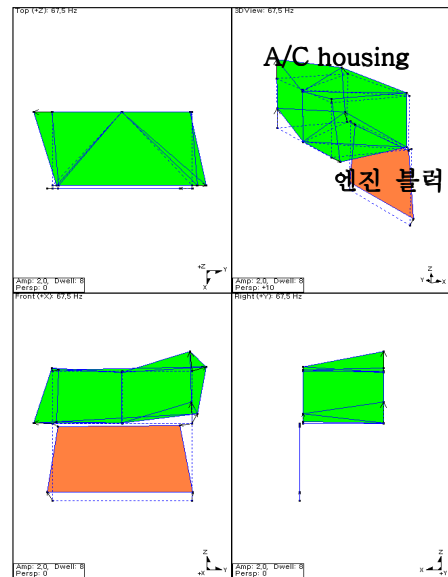


Figure 5 ODS test result at 900 rpm

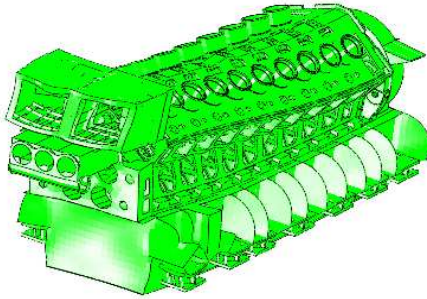
3. 공진회피 및 진동개선 검증

일반적으로 공진 회피는 기진 주파수나 구조물의 고유 진동수 이동을 통해 가능하지만 엔진의 기진 주파수 변경이 어려운 상황에서 엔진 고유진동수 이동으로 문제를 해결하고자 하였다.

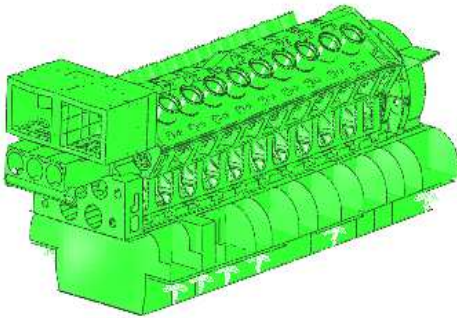
모드 발현 형상으로 볼 때 엔진이 갖고 있는 고유 모드는 구조물의 탄성(flexible) 변형 모드가 아닌 강체(rigid body) 모드의 특성을 보이고 있으며, 강체 모드의 경우 엔진 하부 경계 조건인 마운트 강성에 따라 고유 진동수 이동이 가능하다는 점을 이용해 강체 마운트를 고무 탄성 마운트로 교체하는 것이 검토되었다. 즉, 엔진에 장착된 마운트 강성 변화를 통해 엔진 X형 모드의 고유 진동수를 이동시키고 기진 주파수와와의 공진 회피를 통해 엔진 블럭은 물론 A/C housing에서의 진동 수준을 저감하고자 하였다.

다만 마운트 교체 시 마운트 타입의 변화에 따라 엔진 탄성 변형 모드의 주파수 변화는 발생하지 않기 때문에 엔진 기진 4.5차에 의한 공진 가능 주파수 구간(60 Hz ~ 70 Hz)에서 마운트 교체에 따른 모드 존재 여부에 대한 알아보기 위해 엔진에 대한 고유 진동 해석을 수행하였다. 마운트 조건에 따라

대상 주파수 구간에서 나타난 모드 해석 결과를 Figure 6에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 관련 모드는 탄성 마운트 적용 후 사라졌음을 알 수 있다. Figure 7은 탄성 마운트로 교체되어 엔진에 조립된 모습을 보여주고 있다.



(a) Rigid mount, 66.7 Hz



(b) Flexible mount, 65.3 Hz

Figure 6 Free vibration analysis results



Figure 7 Replaced flexible mount

진동 저감 효과 검증을 위해 탄성 마운트 교체 후 진동 계측이 수행되었으며, A/C housing 상부 수직 방향에서 마운트 교체 전·후 결과를 비교하여 Figure 8에 나타내었다.

탄성 마운트로 교체했을 때 공진이 회피되어 엔진 운전 구간 내에서 4.5차 진동이 급격히 감소하였으

며, 주운전 속도인 900 rpm에서 합산(overall) 진동 수준이 최대 72% 저감되었다.

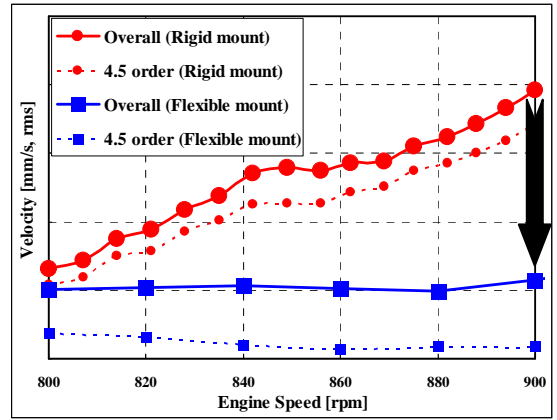


Figure 8 Reduced vibration response after flexible mount application

4. 결 론

- (1) 중속 디젤엔진에서 높은 수준의 진동 발생 및 국부 구조물의 피로 파손이 나타났으며, 엔진 진동 저감 목적의 연구가 진행되었다.
- (2) 다양한 진동계측을 통해 국부 구조물의 진동은 엔진 4.5차 기진력에 의한 공진 현상이며, 엔진 블럭과 연성된 국부 구조물의 진동이 구조물 파손의 원인으로 파악되었다.
- (3) 공진회피를 통한 진동 저감을 위해 마운트 교체가 시도되었으며, 해석 및 계측 검증을 통해 엔진 주운전 속도에서 최대 72%의 진동 저감을 확인하였다.

참 고 문 헌

- (1) Lee, S. M., Kim, W. H., Kim, H. S. and Bae, J. G., 2007, Anti-vibration Design of HiMSEN Engine, CIMAC World Congress 2007, Paper No. 257.
- (2) Kim, W. H., Lee, T. K., Jung, K. H., Lee, G. H. and Bae, J. G., 2007, Prediction and Reduction of Medium Speed Diesel Engine Vibration using Database, Proceedings of the KSNVE Spring Conference, pp. 399~406.
- (3) Jenzer, J., 1996, Dynamic Aspects in Diesel

Power Plants with Two-Stroke Diesel Engine, Wartsila
New Sulzer Diesel Technical Paper, pp. 1~28.

(4) Loredan, V., Besio, G., 1991, Evolution of Noise and Vibration Control Criteria in Diesel Engines, CIMAC World Congress 1991.

(5) Gade, S., Herlufsen, H., Konstantin-Hansen, H. and Wismer, N. J., 1995, Order Tracking Analysis, Technical Review No. 2, Bruel & Kjaer.

(6) ISO 10816-6, 1995, Mechanical Vibration Evaluation of Machine Vibration by Measurement on Non-rotating part – Part. 6: Reciprocating Machine with Power Rating above 100 kW.

(7) Ewins, D. J., 1984, Modal Testing: Theory and Practice, Research Studies Press Ltd. & John Wiley & Sons Inc.