

## 디젤 발전기세트의 구조진동특성 연구

Analysis and Prediction of Structural Vibration for Diesel Engine Generator Set

이수목\* · 김관영\* · 김원현\*

S.M.Lee, K.Y.Kim and W.H.Kim

**Key Words** : Structural Vibration, Prediction, Diesel Engine, Generator, Baseframe, FE modeling, Normal Mode, Forced Response, Modal Test, Excitation, HIMSEN Engine, ENFRA, ISO 8528-9

### ABSTRACT

The structural vibration of a diesel generator set was investigated through analyses and tests. FE modeling and normal mode analysis were performed and compared with measured results for both structure components and generator set assembly. The results of component analyses were fairly well coincident with measured results but those of assembled generator set showed more or less discrepancies. Discussions were given about the uncertainties for vibration characteristics of component structures and assembled running structures especially concerning their nonlinearities and damping effects. Detailed excitation analysis followed by forced response analysis was done from the engine and pressure data to compare with the actual measured vibration. As results the vibration prediction for frame structures of reciprocating internal combustion engine was confirmed reliable to some extent.

### 1. 서 론

현대 산업사회에서 전기에너지의 생산은 매우 중요한 문제의 하나로서 그중 디젤엔진 발전기는 뛰어난 에너지 효율과 함께 간편성, 이동성 등의 장점으로 해상용 및 육상용으로 그 수요가 꾸준히 증가하고 있다. 최근 산업용 디젤엔진의 개발은 고출력, 고효율을 추구하면서도 저NOx 배출 등 환경적 요구를 동시에 만족하도록 개발되는 추세인데 이러한 고성능 조건을 실현하기 위해서는 필연적으로 실린더 내의 폭발압력이 증가하게 되며 이에 따라 엔진의 기진력도 비례해서 증가하게 된다. 따라서 고성능의 목적을 달성하면서도 발생하는 진동의 수준을 최소화 할 수 있는 축계 및 구조의 설계기술이 요구되고 이의 구현을 위해서는 FEM 등 수치해석적 방법을 이용한 해석 및 예측기술이 필수적인 요소가 된다.

이중 비틀림 진동을 주로한 왕복동 기관의 축계 진동해석은 계가 단순하고 자유도가 적으며 실무적으로 표준적 방법이 많이 연구되고 알려져 있어 해석적 예측이 상대적으로 쉬운

편이나 엔진 구조의 진동문제는 형태가 복잡하고 자유도가 매우 많으며 여러 개의 부품과 구조가 결합되어 계의 동특성 파악이 용이하지 않다. 따라서 해석 작업에 많은 시간과 노력이 소요되는 반면 예측의 정확도 및 신뢰도는 그리 높지 못한 편인데 이것은 일부 이론적 방법의 한계나 해석 모델의 부적합 혹은 시험 기술상의 오차에 기인하기도 하지만 대부분 대상 구조계가 갖는 복잡함과 동특성 인자들의 불확실성 등 진동계에 대한 정보 부족이 주된 이유로 판단된다. 특히 새로운 엔진 모델이 개발될 시 새로운 설계 개념, 고성능 운전 조건, 최신의 재료 기술, 냉각 및 윤활 공학의 응용 등으로 인해 제반 공학적 특성 인자들이 변하므로 구조진동의 측면에서도 내제된 특성 인자들의 변화를 추출하고 파악하는 작업이 필요하다.

이와 같은 엔진 구조물에 대한 동특성 파악의 측면에서 본 논문에서는 현대중공업(주)에서 자체개발한 엔진모델을 장착한 발전기 세트의 진동특성을 수치적으로 해석하고 실험적으로 검증하여 해석의 정확도를 확인한 일련의 연구 작업 및 결과를 설명하고자 한다. 구체적 내용으로서 발전기 세트의 주요 컴포넌트에 대한 유한요소 모델링 및 고유진동해석 결과를 모드시험을 통한 실험 고유진동수와 비교한 결과를 제시하고 엔진기진력 분석 및 강제진동해석에 의해 계산된 진동응답을 실 운전시 계측한 결과와 비교하여 해석적 예측의 신뢰도를 평가하였다.

\* 현대중공업(주) 선박해양연구소 동역학연구실  
E-mail : smlee@hhi.co.kr  
Tel : (052)230-5490, Fax : (052) 230-5495

## 2. 발전기 세트

연구의 대상인 디젤엔진 발전기세트의 구조는 6기통 개발용 엔진 및 이에 상응하는 발전기를 동일한 베이스프레임 위에서 연결시킨 형태로서 Fig.1에 조립되어 시험반 위에 설치된 모습을 보였다. 또한 엔진 및 발전기의 간략한 사양은 Table 1과 같다.

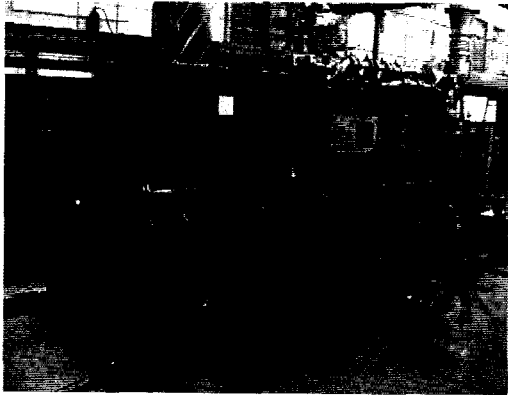


Fig.1 6H21/32 Generator set

Table 1 Specification of Generator Set

부품	모델	사양 / 용량	구조재질 (공법)	중량
디젤 엔진	6H21/32 HIMSEN	bore: 210 mm	FC300 (주조)	13 ton
		stroke: 320 mm		
		속도: 900 rpm		
		Pmax: 200 bar		
		BMEP: 24.1 bar		
		출력: 1,200 kW		
		착화순서: 1-4-2-6-3-5		
발전기	HFC5 632-8P	출력: 1,170 kW	SS400 (용접)	6.3 ton
베이스 프레임	common type		SS400 (용접)	4.7 ton
탄성 마운트	RD214B conical	수직 489 kgf/mm 수평 524 kgf/mm	8개	
전체				24 ton

## 3. 모델링

디젤엔진 발전기의 구조 모델링은 엔진부, 발전기부 및 하부

baseframe으로 크게 나뉘어지며 대부분 판재(plate)요소로 구성된다. 엔진의 모델링에 일부 삼차원 요소(solid)를 적용하였으며 발전기의 판 보강재를 보(beam)로 치환하였다. 각 구조 부재에는 영률, 포아송비, 밀도등 해당하는 재료의 물성치를 적절히 적용하였다. 엔진 크랭크 축 및 플라이 휠, 발전기 로터 축은 집중 질량을 가진 보로 모델링하고 베어링과의 연결부는 적절한 강성을 가진 스프링 요소를 사용하였다. 실린더 헤드, 라이너, 펌프, 배관계 등 장착부품들은 각각 집중 질량으로 처리하고 강력한 bolt로 체결된 엔진과 baseframe, 발전기와 baseframe사이에는 각각 강제 연결조건을 부여하였다. baseframe을 지지하는 고무 마운트는 해당 강성의 스프링으로 표시하였다. 디젤발전기 세트의 전체 모델링은 총 14,304개의 절점과 13,853개의 요소를 사용하였다.

각각의 모델은 고유진동해석 및 모드시험을 통하여 모델의 건전성을 확인한 후 조립되어 전체 해석 모델로 된다. Fig.2에 조립된 발전기세트의 전체 유한요소 모델을 보였다.

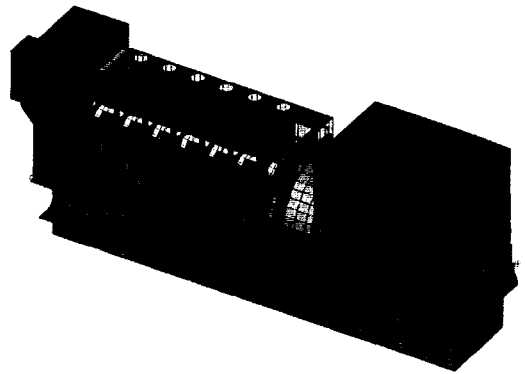


Fig.2 Generator set FE model

## 4. 진동 특성

### 4.1 컴포넌트 진동특성

엔진, 발전기, baseframe등 각각의 부분 구조에 대해 고유진동해석을 수행하여 주요 모드의 고유진동수 및 모드를 파악하고 이후 모드시험을 통한 실험적 결과와 비교하였다. 수치적 고유진동해석은 MSC/NASTRAN (V70.7)을 사용하여 수행하였으며 solution sequence 103 및 Lanczos algorithm을 선택하였다. 충격시험 및 신호취득은 PCB 086D50 충격해머 및 Dytran 3148D 가속도계, B&K PULSE system를 사용하였고 시험모드의 분석은 ME'scope VES (V2.0) S/W를 이용하였다. 각 부분 구조물들의 모드 시험에 구속이 없는 자유경계조건을 부여하기 위하여 Fig.3과 같이 천정 크레인에 매달아 충격시험을 하였다. 해석 및 시험의 비

교분석 결과 엔진, 발전기, baseframe 모두 내부 부품이 장착되지 않은 기본 구조(bare structure)에 대해 모두 비교적 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었고 대표적으로 전체적인 진동특성에 영향이 가장 큰 baseframe에 대하여 그 해석 및 시험 결과를 제시하였다. Fig.4에는 대표적으로 첫 번째 모드인 1절 비틀림 모드에 대한 해석 모드형태를 보였고 Fig.5에는 이에 상응하는 시험모드를 나타내었다.

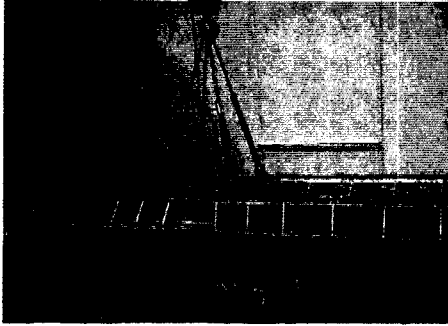


Fig.3 Set-up for modal test of baseframe

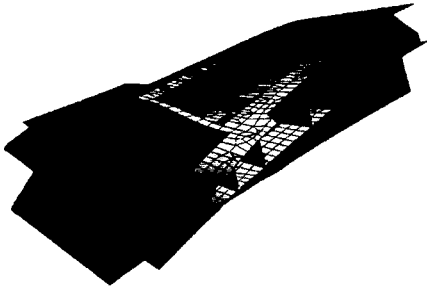


Fig.4 1st mode from the analysis (36.7 Hz)

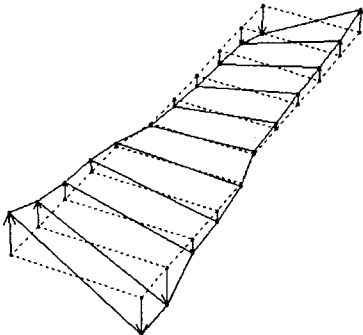


Fig.5 1st mode from the test (37.3 Hz)

Table 2에 baseframe의 5차모드까지 고유진동수를 비교하고 실험적으로 취득한 모드 감쇠비를 열거하였다. 모드 형태 및 고유진동수가 대체로 잘 일치하는 데에서 모델링의 유효성을 충분히 확인할 수 있다. 다만, 해석치가 시험치보다 약간 낮은 경향을 발견할 수 있는데 이는 해석에 사용한 재료의 특성이 실제와 다소 다르기 때문으로 추측된다. 감쇠력의 경우 비틀림 모드의 경우 예상한 대로 대체적으로 1% 미만의 낮은 모드 감쇠비가 추출되었으나 굽힘 모드의 경우는 실험적 편차가 심한 것으로 나타났다.

Table 2 Natural frequencies and modal dampings of baseframe vibration mode

Mode	F.E. Analysis	Modal Test	Modal Damping
1-node torsion	36.7 Hz	37.3 Hz	0.92 %
2-node torsion	89.5 Hz	93.5 Hz	0.54 %
2-node bending	138.5 Hz	146.7 Hz	2.08 %
3-node torsion	199.3 Hz	203.8 Hz	0.45 %
3-node bending	299.3 Hz	311.3 Hz	0.17 %

#### 4.2 발전기 세트 진동특성

조립되어 설치된 상태의 엔진의 진동 특성은 앞에서 살펴본 나뉘어 나뉘어 된 부품구조의 이상적 조건의 경우와는 매우 다르다. 우선 각 내부 부품들이 장착되어 질량 효과를 더하고 크랭크 축, 피스톤을 포함한 일부 구동부품들은 유체에 의한 비선형적 특성이 나타나며 연료 및 윤활유, 냉각수 등 유체 함유에 의한 감쇠력이 대폭 증가하는 등 복잡한 변화를 가져온다. 또한 운전중에는 연소실에서 발생하는 고온고압의 열과 하중에 의해 부품의 재료 특성과 부품간 체결상태가 바뀔 수 있으며 이러한 것이 전체 구조 동특성에 상당한 영향을 줄 수 있다. 물론 주요 구조부품간의 볼트 체결조건도 단순한 강체나 스프링으로 완전히 이상화할 수 없는 한계를 갖고 있다. 발전기의 경우는 주로 전자기력에 의해 구동되며 베어링 및 내부 공기유동 외에 기계적 접촉이나 유체 함유나 노출이 없으므로 엔진에 비해 상대적으로 특성 변화가 적을 것을 기대할 수 있다.

한편 하부의 지지강성은 전체구조의 동특성에 큰 영향을 미치는데 지반 및 foundation의 조건에 따라 결정된다. 대부분의 발전기 세트는 그 하부구조 아래에 엔진과 발전기에서 발생하는 진동 및 고체소음을 차단하는 목적으로 방진고무 재질의 탄성 마운트(resilient mount)를 설치하고 있는데 대상인 6기통 힉센 엔진 및 발전기세트의 경우도 baseframe 전후에 각각 4개의 원추형 방진고무 지지대를 갖고 있으며 그 사양은 Table 1에 보인 바와 같고 설치된 모습은 Fig.6과 같다. 탄성 마운트를 가진 경우 하부지지 강성이 다른 구

조물에 비해 매우 유연한 마운트에 의해 결정되므로 마운트 강성을 정확하게 산정하는 것이 중요하다. 대상 발전기 세트의 경우 각 마운트의 등가 강성이 마운트 제조업자가 제시한 수치보다 약 두배 가량 증가함을 모드 시험을 통해 확인할 수 있었다. 방진고무의 특성상 장시간 압력과 진동, 기름 등에 노출되어 경화된 것으로 보이며 이러한 효과를 반영하여 진동해석을 수행하였다.

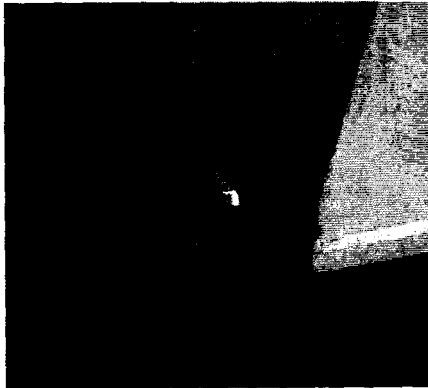


Fig.6 Resilient mounting btwn baseframe and foundation

Table 3에 고유진동해석 및 모드시험에 의해 구한 주요 모드의 고유진동수 및 모드감쇠비를 제시하였다. 전술한 등가 마운트 강성을 bouncing 모드에 tuning하였을 때 다른 강체 모드(rigid body mode)들의 고유진동수도 비교적 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 주요한 두가지 변형 모드(deformed mode)중 굽힘 모드는 해석 및 시험에서 모두 잘 나타났으나 비틀모드는 시험에서 잘 발견되지 않았는데 해당모드에 대해서는 선정된 가진점이 효과적이지 못한 이유로 분석되었다. 감쇠력은 예상대로 매우 큰 값들이 나타났는데 특히 탄성 지지에 의해 지배되는 저차의 강체 모드들의 경우 4% ~ 6%의 큰 감쇠비가 추출되었는데 이는 모드 감쇠비의 형성에 대부분 방진 고무의 감쇠력이 기여한 것으로 보인다.

Table 3 Natural frequencies and modal dampings of generator set vibration mode

Mode	F.E. Analysis	Modal Test	Damping
Bouncing	8.6 Hz	8.6 Hz	6.02 %
Pitching	11.9 Hz	12.6 Hz	3.98 %
Rolling	16.1 Hz	16.8 Hz	3.82 %
Torsion	72.5 Hz	.	
Bending	80.6 Hz	78.9 Hz	1.22 %

대표적인 발전기 세트의 전체 모드(global mode)로서 상하 굽힘모드에 대해 Fig.7에 해석 모드를, Fig.8에 시험 모드를 각각 보였다. 모드형태 및 고유진동수가 잘 일치함을 확인할 수 있다.

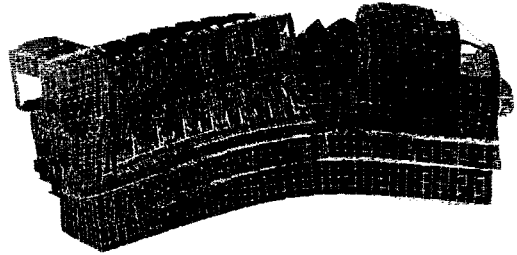


Fig.7 Bending mode from the analysis (80.6 Hz)

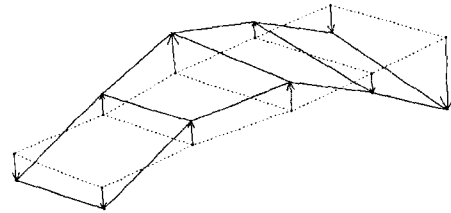


Fig.8 Bending mode from the test (78.9 Hz)

응답측면에서의 진동특성을 검토하기 위해서 두점 간의 transfer frequency response function (전달 FRF)에 대해 해석과 실험의 결과를 비교하였다. Fig.9에서 보는 것 처럼 20 Hz 이하의 강체 모드 및 80 Hz~100 Hz의 변형 모드들에 의한 공진 영역이 비교적 잘 일치하며 특히 20 Hz~70 Hz사이의 비공진영역에서도 FRF의 level이 잘 맞음을 확인할 수 있다. 100 Hz 이상에서의 공진점들은 서로 차이가 있으나 대략적인 FRF의 수준 및 경향은 유사하다. 80 Hz~100 Hz의 응답 곡선의 형태 비교로부터 해석의 고유진동수가 시험의 값보다 약간씩 낮음을 볼 수 있는데 이는 해석에 가정된 부재구조 특히 주조강에 대한 영률 및 컴포넌트 간의 연결 강성이 다소 낮게 산정되었기 때문으로 추정된다. 전반적으로 마운트 강성에 대한 보정외에는 해석과 시험 결과를 일치화시키는 model tuning이 전혀 이루어지지 않은 결과로서 비교적 양호한 진동특성 예측의 평가를 할 수 있다고 본다.

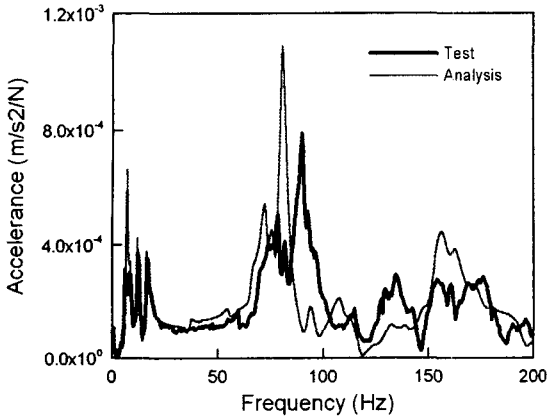


Fig.9 Comparison of frequency response function (FRF) btwn analysis and test

## 5. 진동응답예측

### 5.1 강제진동해석

엔진의 진동특성 및 응답을 예측하기 위해서 전용의 해석 system 및 절차를 구축하여 신속한 예측이 가능하도록 하였다. 해석 절차는 3가지 과정으로 분류되는데 엔진, 발전기 및 baseframe의 FE 모델링 및 고유모드해석을 수행하는 과정, 엔진의 설계자료 및 simulation (혹은 계측)된 압력으로 부터 기진력을 계산하여 해석모델에 적용하는 과정, 그리고 이들의 자료를 사용하여 강제진동응답을 구하고 평가하는 과정으로 나누어진다.

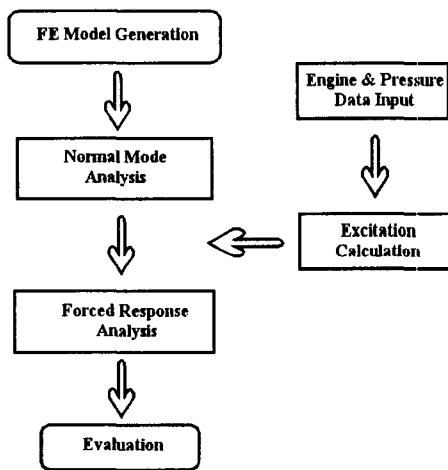


Fig.10 Forced response analysis (ENFRA) procedure

이중 모델링 및 고유치 해석은 MSC/PATRAN 및 MSC/NASTRAN 등의 범용 프로그램을 사용하여 수행하며 기진력 계산과 강제진동해석의 작업은 자체개발한 별도의 전용 S/W (ENFRA)를 사용하여 수행한다. 기본적인 응답계산의 방법은 일반적인 구조동역학적 접근법으로서 실 고유치 해석결과를 이용한 모드 중첩법을 사용하며 아래의 간단한 운동방정식 및 응답관계식으로 대변될 수 있을 것이다.

일반적인 관계식이므로 각 수식의 자세한 설명은 생략한다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f(t) \quad (1)$$

$$x_j(t) = Re \left\{ \sum_{k=1}^N \sum_{r=1}^M \frac{\phi_{kr} \phi_{jr} f_k e^{i\psi_k}}{\omega_r^2 - \omega^2 + i2\zeta_r \omega_r \omega} e^{i\omega t} \right\} \quad (2)$$

### 5.2 기진력 분석

임의의 운전조건에서의 기진력은 관성에 의한 기진력과 가스압에 의한 기진력으로 구분되는데 관성 기진력은 엔진의 회전속도(rpm)의 함수로, 가스압에 의한 기진력은 부하(load)조건에 의해 주어진다. 본 연구에서는 관성력과 가스압에 의한 힘을 통합하여 분석한 Shiao와 Moskwa [1]의 관계식을 사용하여 기진력을 해석하였다. 실제적인 실린더내 가스압력 변화의 예로서 Fig. 11에 대표적인 경우의 실측된 실린더 압력 선도를, Fig. 12에 실린더 압력의 조화 계수를 제시하였다.

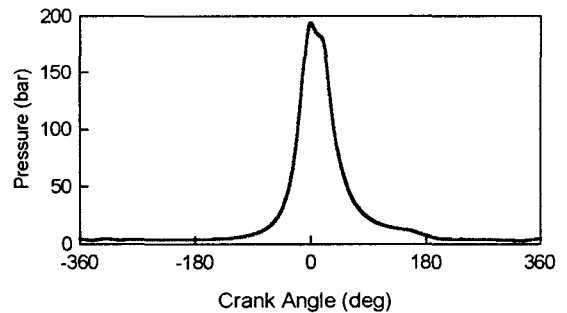


Fig.11 Typical cylinder pressure variation

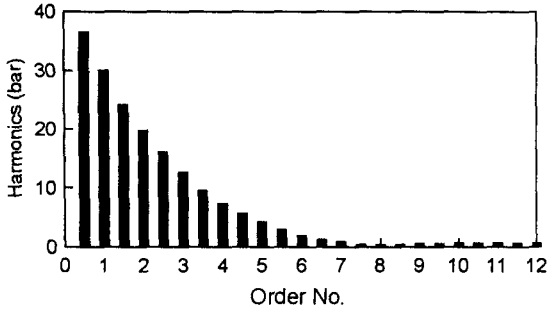


Fig.12 Harmonic analysis of cylinder pressure  
HIMSEN 엔진의 각 기통별 기진력 특성을 Table 4에 열거하였다. 표에서 볼 수 있듯이 동일한 엔진에 대해서도 그 실린더 수에 따라 기진력은 매우 크게 변하며 또한 이것이 엔진의 출력에 비해하지 않는다는 점이 흥미롭다. 예를 들면 9기통 엔진은 동일한 운전조건에서 5기통 엔진보다 1.8배의 큰 출력을 제공하지만 기진력은 작아서 공진 가능성의 문제를 배제하면 상대적으로 훨씬 낮은 진동을 발생할 것임을 간단히 추측해 볼 수 있다. 본 연구의 대상인 시험용 개발엔진은 6기통으로서 매우 좋은 기진력 및 진동특성을 가지며 이러한 이유 때문에 개발용 엔진을 흔히 6기통으로 한다.

Table 4 Excitations of HIMSEN engine  
(900 rpm full load base, kN-m)

no. of cylinder	$M_{1V}$	$M_{2V}$	$M_{H1}$	$M_{H2}$
5	10.3	28.9	24.2	9.0
6	0.	0.	12.8	6.4
7	6.1	5.8	23.7	4.4
8	0.	0.	20.7	3.0
9	4.5	3.2	19.3	2.1

(여기서  $M_H$ 는 회전 축을 기준으로 한 모멘트,  $M_V$ 는 그 직각인 수평축을 기준으로 한 모멘트를 의미하며 숫자 첨자는 차수 성분의 구분 표시이다.)

그러나 Table 4는 기본적으로 각 기통별 엔진의 특정 운전 조건에서 외부적으로 나타나는 기진력의 특성을 요약한 것이며 실제로 엔진 및 발전기 세트의 진동을 보다 정도높게 예측하기 위해서는 기진력(excitation)을 엔진 내부에서 작용하는 위치에 최대한 가깝게 적용해 주어야 한다. 이때 학화순서를 고려한 실린더별 위상, 회전속도 및 실린더 압력변화를 반영하여 0.5차부터 12차 혹은 24차정도에 이르기까지 차수성분별 기진력을 작용한다. Fig.13에 하나의 실린더에 대한 기진력의 작용점을 도시하였다. 실린더헤드 수직력은 헤드 볼트 개수를 고려하여 4점으로 나누어 작용하고 라이너에 미치는 피스톤의 수평력은 실린더 라이너와 엔진 블록 구조의 접합부인 상면과 하면에 각각 2점을 작용시켰다. 그

리고 크랭크 축에 작용하는 수직력 및 수평력은 모델링된 축 모델의 1개 중앙점에 작용하였다.

### 5.3 응답 평가

Fig. 14에 75% 부하조건에서의 예측된 baseframe 응답과 실제 시운전시 계측된 응답을 비교하였다. 3차, 4.5차, 6차성분에 대해 각각 비교하였는데 정확히 일치하는 성분은 없으나 3차 성분의 경우 경향이, 4.5차 성분의 경우 평균적 level이 근사하다. 6차 성분의 경우 다소 차이가 있으나 전반적으로 매우 낮은 수준의 양호한 진동결과를 나타내었다. 대개 엔진 및 발전기의 진동의 평가는 왕복동 내연기관에 대한 평가기준인 ISO 8528의 part 9를 적용한다. 전술한 바와 같이 model tuning의 과정없이 이러한 정도의 진동응답의 근사는 양호한 예측으로 보인다. 결과가 매우 잘 일치한 경우로서 무부하 상태에서 baseframe의 3차 진동성분을 Fig.15에 예시하였다.

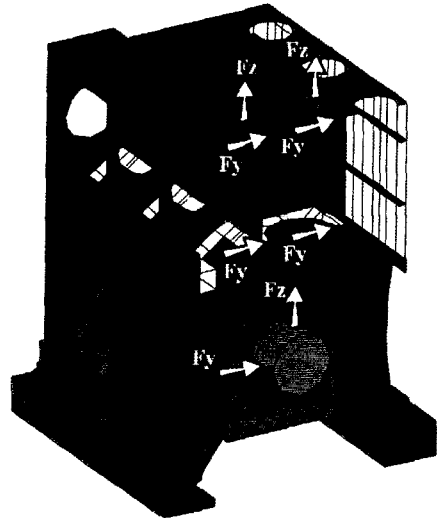


Fig.13 Points and directions for engine excitation

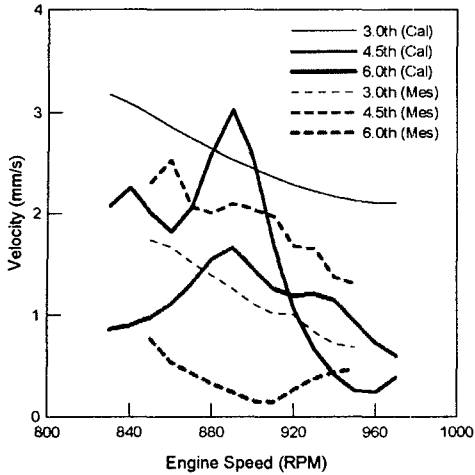


Fig.14 Comparison of actual responses (75% load, baseframe engine side)

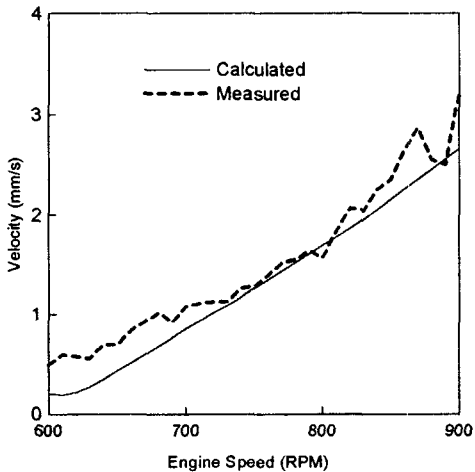


Fig.15 Comparison of actual responses (idle condition, baseframe generator side)

## 6. 결론

현대중공업(주)에서 자체개발한 중형엔진 모델 힘센 엔진의 발전기 세트에 대한 구조진동특성을 해석과 실험에 의해서 연구 조사하였다. 왕복동 내연기관의 구조진동 해석에 있어 일반적인 선형 구조물의 동적 해석 이론을 적용하여 진동 특성 및 응답을 계산하고 해석적 예측의 신뢰성 관점에서 결과를 비교 분석하였다. 분석 결과 진동 특성 및 응답은 해석과 계측결과의 경향과 수준이 대체로 일치하는 만족스런 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 여전히 상존하는 예측 오차는 보다 정확도 높은 해석방법과 예측체계를 요구하며 이를

위하여 진동해석 이론의 정립과 정교한 시험 방법의 습득 뿐 아니라 대상물에 대한 현장적 지식과 실험적 정보의 취득이 결정적 요소임을 확인하였다.

## 참고 문헌

- (1) Shiao & Moskwa, "An investigation of load force and dynamic error magnitude using lumped mass connecting rod model", SAE paper 930617, 1993
- (2) 유광택, 박정근, "4행정 중형 디젤엔진의 진동특성 및 방진대책", 소음진동공학회 추계학술발표회, 1998
- (3) 이수목, 김원현, "엔진본체구조 강제응답해석 프로그램 ENFRA 개발 보고서", 현대중공업 선박해양연구소 내부보고서, 2002