

# 선박 전선 진동해석 효율성 향상을 위한 프레임워크 개발

## Development of a Framework for Improving Efficiency of Ship Vibration Analysis

조대승† · 김진형\* · 최태목\* · 김경수\*\* · 최성원\*\*  
· 정태석\*\*\* · 이도경\*\*\* · 석호일\*\*\*

Dae-Seung Cho, Jin-Hyeong Kim, Tae-Muk Choi, Kyung-Soo Kim, Sung-Won Choi,  
Tae-Seok Jung, Do-Kyung Lee and Ho-Il Seok

**Key Words** : Ship vibration analysis(선박 진동해석), Standardization(표준화), Free vibration analysis(고유진동해석), Forced vibration analysis(강제진동해석), Response evaluation(응답평가)

### ABSTRACT

Free and forced vibration analysis of the global ship structure using the 3-dimensional finite element(FE) method requires not only the specialized knowledge such as ship structure interacted with fluid, damping and various excitations due to propulsion system but also time-consuming manual tasks in FE modeling, analysis and response evaluation. As a result, the quality of the vibration analysis highly depends on engineer's expertise and experience. In this study, a framework system to improve the efficiency of global ship vibration analysis is introduced. The system promising the utilization of MSC/Patran and MSC/Nastran consists of various modules to support data management, FE modeling of ship structure and loading, input deck generation for free and forced vibration analysis, data extraction and evaluation of analysis results, and databases for FE models of marine diesel engines and vibration criteria. The system may be useful for pursuing standardization of uncertain analysis factors as well as reducing time, cost and human dependency in ship vibration analysis.

### 1. 서 론

선박의 구조 및 장비 손상을 유발하고 승조원의 안락성을 저해하는 선박 진동은 설계단계에서 고유진동 특성 파악 및 기진력에 대한 진동 응답 예측 등의 선박 전선 진동해석을 수행하고, 필요할 경우 적절한 방진 대책을 수립하여 저감할 수 있다<sup>(1,2)}</sup>.

선박 전선 진동해석 업무는 구조, 유체, 추진시스템 등에 대한 복합 전문 지식과 물리적 현상 규명이 미흡한 감쇠, 기진력 평가 등에 대한 암묵지(know-how)를 필요로 한다. 한편, 대부분의 기관에서 선박 방진 설계를 위해 수행하는 범용 FEM S/W를 이용한 전선 진동 해석은 모델링, 해석 및 결과 분석 등에 3~4개월 정도의 시간이 소요되어 진동문제 예측 시 설계 개선 변경안을 반영할 수 있는 적정 공정시간 확보에 어려움이 있으며, 해석자의 능력에 따라 해석 정확도가 달라지고 업무 수행 중 human error 등의 발생 소지가 높다.

본 연구에서는 선박 전선 진동해석 업무의 효율성과 정확도 향상을 통한 저진동·고품질 선박 설계 능력 향상과 선박 진동 전문 기술 인력의 교육 및

† 교신저자; 정회원, 부산대학교 조선해양공학과  
E-mail : daecho@pusan.ac.kr  
Tel : (051) 510-2482, Fax : (051) 512-8836

\* (주)크리에이티브

\*\* 부산대학교 대학원 조선해양공학과

\*\*\* STX조선해양 진동소음연구팀

관련 기술의 표준화 등을 도모하여 저진동·고품질 선박 설계 기술 고도화 달성에 활용하고자 선박 전선 진동해석 업무 지원용 프로그램 GLOVAS (GLOBAL ship Vibration Analysis Support system)를 개발하였다. 또한, 사용 빈도가 높은 선박용 디젤 엔진의 동특성을 고려한 10종의 유한요소 모델 데이터베이스를 구축하여 주기관 모델링 업무의 효율화를 도모하였다.

개발된 프로그램은 범용 유한요소 프로그램인 MSC/Nastran과 이의 전후처리 프로그램인 MSC/Patran<sup>(3)</sup>을 사용하는 것을 전제로 전선 진동해석 업무 단계별 세부 기능을 실행할 수 있는 통합 프레임워크(framework) 양식을 적용하였다. 또한, 프로젝트 전반에 대한 상세정보 입력 모듈, 보강재 물성치 평가 및 유한요소 해석 입력자료 자동 생성 모듈, 고유진동해석 input deck 생성과 해석 결과 분석 모듈, 강제진동해석 input deck 생성 모듈 및 진동응답 평가 모듈 등으로 구성되어 있다. 아울러, 세부 단계별 입·출력 자료는 자동 연동되어 효율적 자료 관리와 결과 분석의 편의성을 도모하였다.

## 2. 선박 전선 진동해석 업무 절차 및 전산화 대상 기능

3차원 전선 진동해석 업무는 도면 및 자료 수집, 유한요소 모델링, 고유 및 강제 진동해석, 진동 응답평가 및 보고서 작성 등의 단계로 진행된다. 또한, 일반적으로 선박 진동해석은 복수 이상의 하중조건에 대한 수행이 요구된다.

한편, 선박 진동해석을 범용 유한요소해석 프로그램인 MSC/Nastran과 이의 전·후 처리 프로그램인 MSC/Patran을 이용하여 수행할 경우 업무 단계별로 수작업 공정이 다수 요구된다. 이에 본 연구에서는 전선 진동해석의 효율성 향상을 위하여 Fig.1에 보인 바와 같이 세부 업무 단계 별 전산화 대상 기능을 선정하였다.

### 3. 주기관 F.E 모델 데이터베이스

선박 진동 해석 시 주기관의 동특성을 고려하고, 기진력을 작용 위치에 정확하게 부가하기 위해서는 주기관의 유한요소 모델링이 요구된다. 본 연구에서

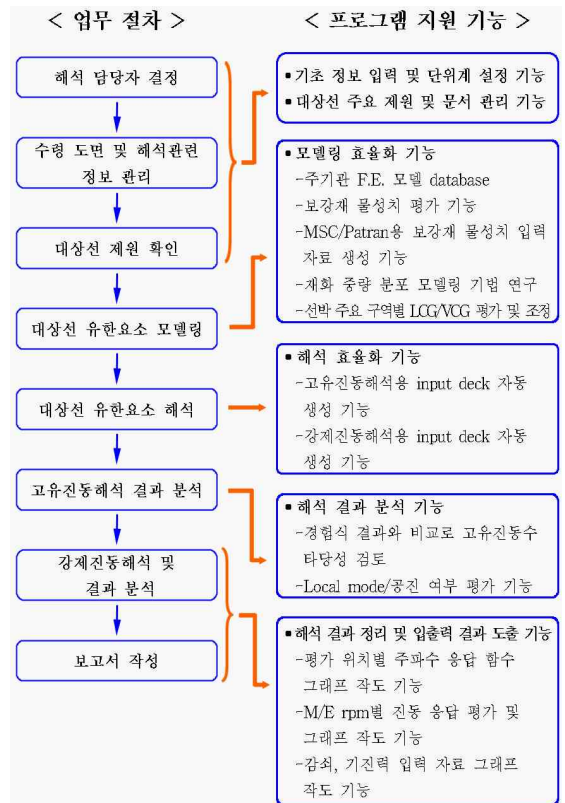


Fig. 1 Ship vibration analysis procedure & interconnection with framework

는 조선사에서 사용 빈도가 높은 MAN B&W사의 선박용 디젤 엔진 10종에 대해 F.E 모델 데이터베이스를 구축하였다. 한편, 주기관의 동특성을 고려한 주기관 모델링은 실무적으로 기관 중량과 무게 중심이 동일한 유한요소 모델을 생성하고, 기관 하부 경계조건이 고정인 조건에서 MAN B&W사에서 추정된 기관의 H-, X- 및 L-형 모드의 고유진동수와 일치하도록 유한요소의 강성을 조정하는 방법으로 수행하였다. 이때, H-, X- 및 L-형 모드 모두의 고유진동수를 맞추기 곤란한 경우 H-형 모드 고유진동수가 가장 부합하도록 모델을 조정하였다. Table 1에는 주기관 유한요소 모델링 데이터베이스에 반영된 10종의 엔진에 대해 top bracing 지지 유무에 따른 유한요소 모델의 고유진동수를 MAN B&W사 제시 자료와 비교하여 나타내었다. 본 연구에서 구축된 주기관 유한요소 모델은 선박 별 기관실 프레임(frame) 간격, 기관실 이중저 구조 및 횡격벽까지의 간격 등을 고려한 미세 수정 작업 후 해당 선박

에 탑재하여 진동해석에 활용할 수 있다.

**Table 1** Comparison of diesel engine natural frequencies obtained by FE analysis and maker's empirical data

INDEX	TYPE	(Ref.자료)/(FE모델) 고유진동수(Hz)					
		Without top bracing			With top bracing		
		H-mode	X-mode	L-mode	H-mode	X-mode	L-mode
1	5S70MC	14.0/14.2	21.0/21.7	17.0/19.6	29.0/28.7	37.0/35.2	
2	6S70MC-C7	14.0/13.7	19.0/20.8	17.0/19.2	29.0/29.7	34.0/34.8	
3	6S90MC <sup>1)</sup>	-/10.1	-/15.3	-/15.7	-/22.7	-/29.1	
4	6K90MC	11.0/10.2	15.0/15.7	17.0/18.0	25.0/22.5	29.0/30.3	
5	7S50MC-C	19.0/18.3	26.0/28.0	27.0/27.1	42.0/41.0	48.0/51.5	
6	7S60MC	16.0/16.0	22.0/23.8	23.0/23.2	35.0/34.6	40.0/41.5	
7	7S80MC	12.0/11.5	16.0/16.9	15.0/18.0	27.0/26.2	31.0/31.6	
8	8L60MC	17.0/17.0	22.0/23.5	24.0/24.7	37.0/37.3	41.0/48.1	
9	8K90MC-C	11.0/10.6	14.0/14.8	17.0/20.1	25.0/24.0	27.0/28.0	
10	10K98MC	11.0/11.2	13.0/14.2	17.0/19.5	25.0/25.2	26.0/28.4	

1) Ref. Documentation에 존재하지 않는 모델의 경우, 유사 type 모델의 결과를 이용, 외삽법으로 평가

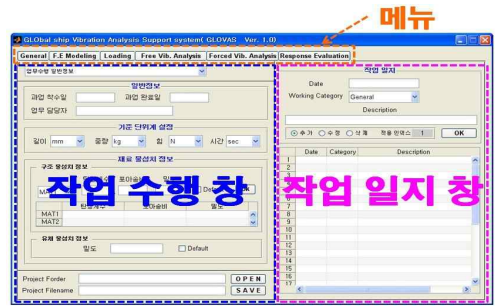
#### 4. 선박 전선 진동해석 업무 효율성 향상을 위한 Framework 구성과 기능

##### 4.1 Framework 구성

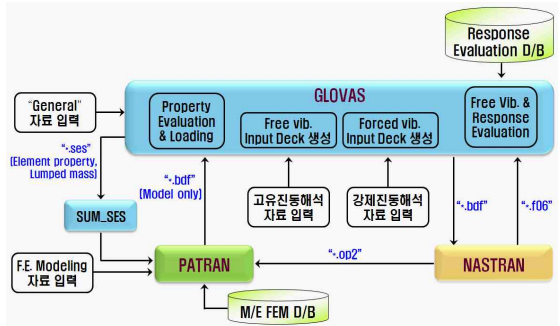
Fig.1에 나타난 선박 진동 해석 업무에 대한 효율성 제고를 위하여 본 연구에서 MATLAB과 Visual C++을 이용하여 개발한 GLOVAS에 구현한 모듈과 각 모듈에서 지원하는 기능은 Table 2에 요약하여 나타내었다. GLOVAS 주 화면 창은 Fig. 2에 보인 바와 같이 메뉴, 작업 수행 창, 작업 일시 창으로 구성되어 있고, “Tab Panel” 형태로 세부 기능 모듈

**Table 2** Target computerization functions to improve efficiency of ship vibration analysis

Module	기능
General	<ul style="list-style-type: none"> <li>대상선의 전선 진동해석용 기초 정보 입력 모듈</li> <li>업무수행 일반정보, 대상선 주요정보, 추진시스템 주요정보, 도면관리 및 프레임 중좌표 설정 등의 4개의 입력창으로 구성</li> <li>작업일, 작업 범위 및 작업 내용 입력, 삭제 및 수정 기능</li> <li>프로젝트 파일 신규 생성 또는 불러오기</li> </ul>
F.E Modeling	<ul style="list-style-type: none"> <li>보강재 물성치 평가 모듈</li> <li>1차원 부재(I-, T-, L-, Bulb 형 보 요소 및 H-, O-형 기둥 요소) 물성치 계산 및 MSC/Patran session 파일 생성 기능</li> </ul>
Loading	<ul style="list-style-type: none"> <li>제하 중량 분포 평가 모듈</li> <li>분포 중량의 절점 별 집중질량 산정 기능</li> <li>산정 결과의 MSC/Patran session 파일 생성 기능</li> </ul>
Free Vib. Analysis	<ul style="list-style-type: none"> <li>고유진동해석용 input deck 자동 생성 모듈</li> <li>해석 및 경험식 결과 비교를 통한 타당성 검증 기능</li> <li>즉부 모드 추출 기능</li> <li>공진 여부 평가 그래프 좌도 기능</li> </ul>
Forced Vib. Analysis	<ul style="list-style-type: none"> <li>강제진동해석용 input deck 자동 생성 모듈</li> <li>강제진동해석을 위한 기진력, 감쇠 및 응답 평가 지점 입력 기능</li> <li>기진력 및 감쇠 그래프 좌도 기능</li> </ul>
Response Evaluation	<ul style="list-style-type: none"> <li>강제진동해석 결과 후처리 모듈</li> <li>진동응답 해석결과 추출 및 평가 대상 물리량 산정 기능</li> <li>해석 지점별 최대 응답값 및 해당 M/E rpm과 차수 또는 주파수 정보 추출 기능</li> <li>해석 지점별 평가 기준 응답과 평가 기준 database 모듈 실행 기능</li> <li>진동응답과 평가 기준치 좌도 및 출력 기능</li> </ul>
기타 실행 파일 (SUM_SES)	<ul style="list-style-type: none"> <li>“F.E Modeling” 모듈에서 생성된 다수의 보강재 및 기둥 session file을 한 개의 session 파일로 통합</li> </ul>



**Fig. 2** GLOVAS program main window



**Fig. 3** Flow chart of framework

을 실행하는 방식으로 개발되었다.

GLOVAS의 세부 “Tab Panel” 모듈은 “General”, “F.E. Modeling”, “Loading”, “Free Vib. Analysis”, “Forced Vib. Analysis” 및 “Response Evaluation” 등으로 구성되어 있으며, 각 모듈은 Fig. 3에 보인 바와 같이 대상 선박에 대한 공통 정보 입력 및 프로젝트 관리, 대상선 및 주기관의 3차원 유한요소 모델링에 요구되는 보강재 강성평가, 하중조건별 집중질량 요소 평가, 고유진동 및 강제진동 input deck 생성, 고유진동 및 강제진동 해석 결과 후처리, 응답 평가 및 결과 입·출력 등의 선박 진동 해석 업무를 순차적으로 지원하는 기능을 수행한다.

##### 4.2 세부 모듈별 주요 기능

###### (1) “F.E. modeling” 모듈

Fig. 4에 나타난 전선 유한요소 모델의 보강재 물성치 평가를 위한 “F.E. Modeling” 모듈에서는 1차원 부재(I-, T-, L-, Bulb 형 보 요소 및 H-, O-형 기둥 요소)의 물성치 계산 및 이의 MSC/Patran 입력용 session 파일을 생성하는 기능을 지원한다.

1차원 부재 물성치는 보강재 또는 기둥 치수 정

보가 입력된 정보 파일을 이용하여 “F.E. modeling” 모듈에서 자동 계산되며, 그 결과는 물성치 평가 결과 파일 및 MSC/Patran 입력용 session 파일 형태로 생성된다. 이때, 보강재의 강성 평가 방법은 판 플랜지의 유효폭을 고려한 보강재 효과 집중 모델링 방법을 적용하였다.

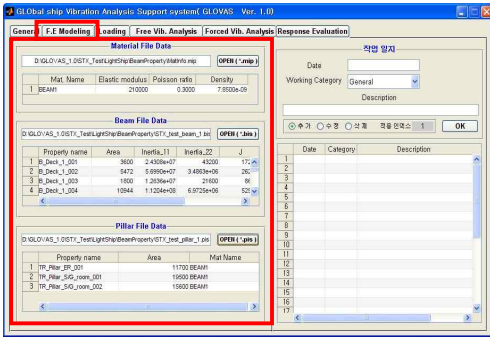


Fig. 4 Evaluation module for 1-dimensional finite element properties

### (2) “Loading” 모듈

“Loading” 모듈은 의장품 및 재화 중량을 다수의 절점에 집중 질량으로 모델링 할 경우 모델링 대상물의 전체 중량과 무게 중심을 고려해서 집중 질량 요소 자료를 생성하기 위한 모듈로서, 대상물의 전체 중량을 분포시킬 절점을 상부 그룹과 하부 그룹으로 나누고, 각 그룹에 분포시킬 중량을 다음과 같이 산정한다.

$$\text{재화중량}_{\text{upper group}} = \frac{((VCG_{\text{total}} - VCG_{\text{lower group}}) \times \text{재화중량}_{\text{total}})}{VCG_{\text{upper group}} - VCG_{\text{lower group}}} \quad (1)$$

$$\text{재화중량}_{\text{lower group}} = \text{재화중량}_{\text{total}} - \text{재화중량}_{\text{upper group}} \quad (2)$$

여기서, VCG는 대상물의 수직방향 무게 중심이다.

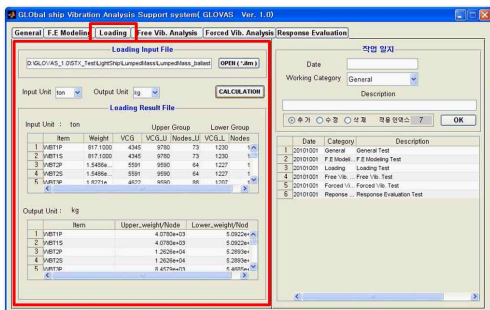


Fig. 5 Evaluation module for lumped mass elements of distributed loadings

한편, 상기와 같이 산정된 각 그룹 별 분포 중량을 해당 그룹에 속하는 절점 개수로 나누면 절점에 부가할 집중질량이 Fig. 5에 보인 바와 같이 산정되며, 그 결과는 MSC/Patran 입력용 session 파일로 출력된다.

### (3) “Free Vib. Analysis” 모듈

전선 유한요소 모델의 고유진동 해석용 입력 자료 생성 및 결과 평가를 위한 모듈로서 Fig. 6에 보인 바와 같이 “고유진동해석 input deck 생성”, “경험식을 활용한 고유진동수 추정”, “국부 모드 추출” 및 “공진 여부 평가 그래프” 등의 4개의 기능 창으로 구성되어 있다.

고유진동해석에 필요한 MSC/Nastran 입력 자료는 사용자가 해석 대상 하중조건에 해당하는 전선 유한요소모델 파일 “\*.bdf”을 지정하고, 접수 유체 조건 부여에 필요한 선체 외판 ID 및 접수조건, 해석 주파수 구간 등을 입력하면 생성된다. GLOVAS에서는 고유진동해석을 MSC/Nastran의 normal mode analysis(Sol 103) 방법을 적용하되 고유치 추출은 Lanczos 방법, 질량은 연성 질량(coupled mass), 접수 유체의 부가질량은 경계요소법을 적용하도록 입력자료를 생성한다.

GLOVAS는 3차원 유한요소 모델의 전선 고유진동해석 결과의 정확도 평가를 위해 현대선박해양연구소에서 제시한 선박 주 선체의 상하 및 수평방향 고유진동수에 대한 보 유추 경험식<sup>(4)</sup>을 이용하여 선체 상하 방향 2절에서 6절, 수평 방향 2절 고유진동수를 추정하는 기능을 제공한다.

또한, 고유진동해석 단계에서 모델링 오류 또는 국부 모드를 파악하기 위하여 정규화 고유모드의 최대 고유 벡터 크기값을 이용하여 국부 모드를 판별할 수 있다. 즉, GLOVAS에서 고유진동해석 결과 파일(\*.f06)을 지정하고 국부모드 판별을 위한 고유 벡터의 최대값 크기 값에 대한 기준치를 지정하면, 기준치를 초과하는 고유벡터 최대값을 갖는 모드와 이의 발생 절점 정보를 제공한다. 아울러, MSC/Patran을 이용한 고유진동 해석 결과 확인 과정에서 해당 모드들을 배제할 수 있는 session 파일을 생성한다. 아울러, Fig. 7에 예시한 바와 같이 기진력 입력정보와 고유진동 해석 결과를 이용하여 공진 여부를 평가할 수 있는 그래프 작도 기능도 제공한다.

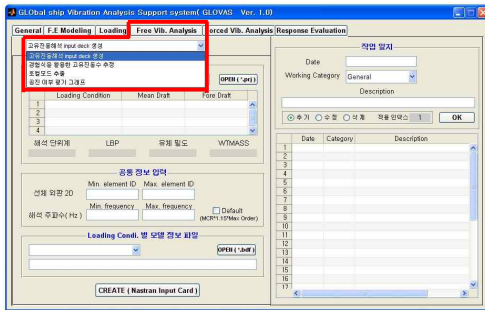


Fig. 6 Free vibration analysis module

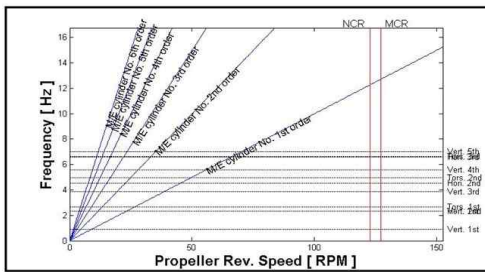


Fig. 7 An example of Campbell diagram generated in GLOVAS for main engine excitation forces

(4) “Forced Vib. Analysis” 모듈

Fig. 8에 나타 낸 강제진동응답 해석 모듈에서는 사용자가 기진력 크기와 기준 속도 및 이의 작용 위치와 방향, 감쇠 정보 및 응답 평가 위치에 해당하는 절점과 방향을 입력하면 GLOVAS에서 마련되었거나 사용자가 별도 준비한 MSC/Nastran 고유진동해석용 “\*.bdf” 파일을 이용하여 강제진동 응답 해석용 MSC/Nastran 입력 자료 파일을 생성한다.

강제진동해석은 MSC/Nastran의 모드 중첩법 (Mode superposition method, Sol 111)으로 수행하며, 입력된 기진력 자료는 기진력 유형과 기진 차수를 고려하여 subcase로 자동 구분하여 생성한다. 입력 가능한 기진력은 디젤엔진의 불평형력, 불평형모멘트 및 안내력 모멘트, 프로펠러의 표면 전달력과 축전달력, 사용자 정의 기타 기진력이 있다. 입력된 기진력 정보는 Fig. 9에 보인 바와 같이 그래프로 전시할 수 있다. 한편, 주기관과 프로펠러 기진력의 크기는 기준 속도에서의 값만 정의되며, 운전속도 변화 시 기진력은 속도 비례승수를 이용하여 산정한다. 한편, 모달 감쇠비는 복수의 (주파수, 모달감쇠비)로 정의한다.

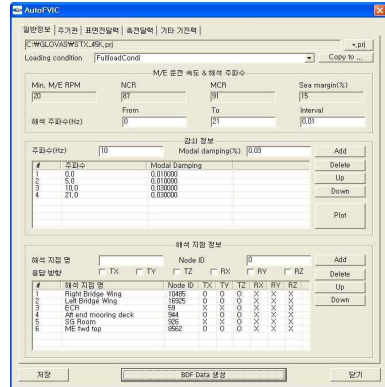


Fig. 8 Input deck generation module for forced vibration analysis

Type	Order	Order (in highest)	Rot RPM	Phase
Unbalance moment	1	1	1000	0
Baffle base moment	1	1	1000	0
Baffle base moment	1	1	1000	0
Baffle base moment	1	1	1000	0
Baffle base moment	1	1	1000	0

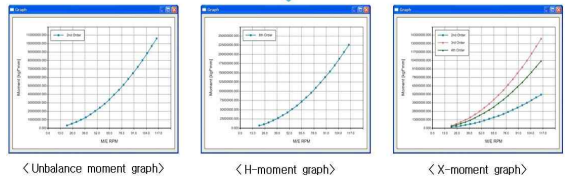


Fig. 9 Examples of excitation force graph generation of main engine

(5) “Response Evaluation” 모듈

진동 응답 평가 모듈에서는 문자 파일 (\*.f06)로 출력되는 MSC/Nastran의 강제진동응답 해석 결과를 이용하여 해석 지점 및 방향 별로 M/E rpm 차수 또는 주파수 별 응답과 주파수 응답함수(frequency response function; FRF)를 “\*.dat” 파일로 추출한다. 추출된 자료들은 Fig. 10에 보인 바와 같이 결과 추출 창에 해석 지점에 대한 절점 ID, 해석 지점명, 응답 방향, 평가기준, 응답 유형(M/E rpm 차수 별 응답, 주파수 응답함수), 응답 물리량(속도, 가속도), 최대 응답 값 및 해당 rpm과 차수 또는 주파수가 자동 전시된다. 아울러, 평가 대상 진동응답과 평가 기준은 Fig. 11에 예시한 바와 같이 그래프로 작도할 수 있다.

한편, 진동응답 평가 기준은 진동응답허용치 데이터베이스 모듈에서 관리된다. GLOVAS에 탑재된

평가 기준으로서 ISO 6954 (1984)<sup>(5)</sup>, ISO 6954 (2000)<sup>(6)</sup>, MAN B&W recommendation<sup>(7)</sup> 등이 있으며, 주파수 구간 별 허용치 또는 총합 진동값에 의거한 허용치 등을 사용자가 정의할 수 있는 기능을 제공하고 있다.

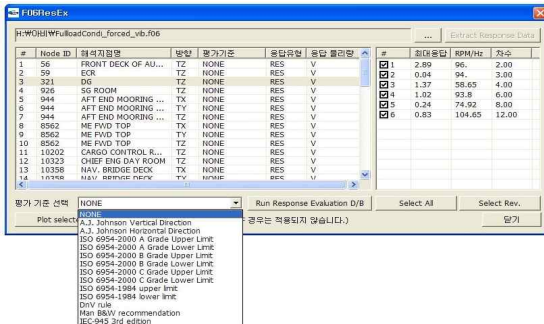


Fig. 10 Evaluation module of vibratory responses

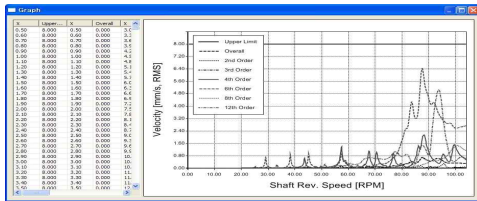


Fig. 11 An example of vibratory responses with respect to M/E rpm

### 5. 결 론

본 연구에서는 저진동·고품질 선박 설계 기술 고도화 달성에 활용할 수 있는 선박 전선 진동해석 지원용 프로그램인 GLOVAS를 개발하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 사용빈도가 높은 선박용 디젤 엔진 10종에 대해 엔진 동특성이 적용된 F.E 모델 데이터베이스를 구축하였다. 구축된 디젤엔진 유한요소 모델은 동형 엔진을 탑재하는 선박의 디젤엔진 모델로 활용될 수 있어 전선진동해석 업무의 효율성 제고에 기여할 수 있다고 판단한다.

(2) 본 연구에서 개발한 GLOVAS 프로그램을 활용하면, 진동해석 및 평가에 요구되는 선박 3차원 유한요소 모델링, 고유 및 강제진동해석 입력 자료 생성과 결과 분석, 진동응답 평가 및 보고서 작성

등에 요구되는 기존 수작업의 최소화와 해석자의 잠재적 오류 예방이 가능하여 선박 전선 진동해석 업무의 효율성을 향상할 수 있다.

(3) GLOVAS 프로그램은 각종 해석 인자 변경시의 선박 진동 재해석의 편의성이 높아 해석 및 계측 결과와의 비교·검증 작업의 효율성 확보가 가능하여 감쇠, 운항 속도 별 기진력 크기 등 불확실한 선박 진동 해석 인자의 규명과 표준화에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

### 참 고 문 헌

- (1) KR, 1997, Control of Ship Vibration and Noise, Korean Register of Shipping.
- (2) Yang, B. S. and et al., 2005, Development of NASTRAN-based Optimization Framework for Vibration Optimum Design of Ship Structure, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 11, pp.1223~1231.
- (3) MSC, 2008, Basic/Advanced Dynamic Analysis User's Guide.
- (4) Park, J. H., Chung, K. Y. and Lee, S. M., 1996, Empirical Formulae for Hull Girder Natural Frequencies, Proceedings of the SNAK Annual Autumn Meeting, pp. 434-437.
- (5) ISO 6954-1984, 1984, Mechanical Vibration and Shock - Guidelines for the Overall Evaluation of Vibration in Merchant Ship.
- (6) ISO 6954-2000, 2000, Mechanical Vibration - Guidelines for the Measurement, Reporting and Evaluation of Vibration with regard to Habitability on Passenger and Merchant Ship.
- (7) Bryndum, L. and Jakobsen, S. B., 1987, Vibration Characteristic of Two Stroke Low Speed Diesel Engine, International Marine Propulsion Conference, 9th, pp. 22~49.