

파워흐름해석법을 이용한 진동해석 소프트웨어, PFADS-R3 개발 Development of Vibration Analysis Software, PFADS-R3 using Power Flow Analysis

홍석윤* · 서성훈** · 박영호** · 길현권***

Suk-Yoon Hong, Seong-Hoon Seo, Young-Ho Park and Hyun-Gwon Kil

Key Words : Power Flow Analysis(PFA, 파워흐름해석법), Power Flow Finite Element Method(PFFEM, 파워흐름유한요소법), Medium-to-high Frequency Ranges(중고주파대역)

ABSTRACT

The Power Flow Finite Element Method(PFFEM) offers very promising results in predicting the vibration responses of system structures, and the first PFFEM software, PFADS has been developed in Seoul National University for the vibration predictions and analysis of coupled system structures in medium-to-high frequency ranges. PFFEM is numerical method which solves energy governing equation using finite element technique for complicated structures where the exact solutions are not available.

Through the upgrades, the current version PFADS R3 could cover the general beam and plate structures including various kinds of beam-plate rigid joints, spring-damper connection and rigid body connection within beam and plate in addition. This software is composed of three parts; translator, model converter and solver. The translator makes its own FE-model from bulk data of commercial FE software, and the model converter is used to convert FE-model to PFFE-model automatically. The solver calculates vibrational energy density and intensity for PFFE-model by solving global matrix equations of PFFEM. For the applications of PFADS R3, two vehicle models and a container model are examined with respect to major parameters, and reliable results are obtained.

1. 서 론

구조물에서 진동에너지는 프레임을 따라 전파되어 진동원에서부터 먼 곳까지 고체음을 발생시킨다. 이를 제어하기 위해 고체음이 전달되는 경로를 따라 제진처리(damping treatment)를 함으로써 진동에너지의 전파를 차단하는 방법이 널리 이용되고 있다. 따라서 자동차, 선박, 비행기와 같은 복합구조물의 진동해석을 위해서는 구조물에서 진동에너지의 공간분포와 에너지전달 경로를 이해하는 것이 필수적이다.

중고주파수 대역의 해석에서는, 기존의 결정론적인 해석법인 유한요소법(finite element method, FEM)과 경계요소법(boundary element method, BEM)등의 경우, 해석 비용과 시간이 기하급수적으로 증가하고 해석결과 또한 불확실성의

증가로 인해 신뢰성이 떨어지며, 통계적에너지해석법(statistical energy analysis, SEA)은 고주파수 대역에서는 어느 정도 활용도가 인정되고 있으나 해석결과의 빈약한 정보와 모델링에 따라 상이한 해석결과를 보이는 등 여러 단점들을 갖고 있다.

이러한 문제점들을 극복할 수 있는 대안으로 제안된 방법이 파워흐름해석법(power flow analysis, PFA)인데, 이는 정상상태에서의 열전도방정식과 유사한 2차 편미분 형태의 에너지지배방정식을 가지고 있어 공간상의 에너지와 파워의 분포를 예측할 수 있고, 국부적인 제진처리도 가능하다. 또한 에너지지배방정식을 유한요소법에 적용시킨 파워흐름유한요소법(power flow finite element method, PFFEM)을 이용하여 복합구조물의 진동해석도 수행 할 수 있다. 파워흐름유한요소법은 유한요소모델을 사용하기 때문에 중저주파수 대역의 기존 모델을 그대로 사용할 수 있고 일관성있는 해석결과를 가져다주는 장점이 있다.

서울대학교 선박소음진동연구실(Ship Noise and Vibration Laboratory, SNOVIL)에서는 1999년 파워흐름유한요소법에 기반을 둔 진동해석 프로그램인 PFADS의 첫 번째 버전(PFADS R1)을 MATLAB을 이용하여 개발하였

* 서울대학교 공과대학 조선해양공학과

E-mail : syh@snu.ac.kr

Tel : (02)880-7331, Fax : (02) 888-9298

** 서울대학교대학원 조선해양공학과

*** 수원대학교 공과대학 기계공학과

으며 PFADS R1은 보와 평판의 복합구조물 뿐만 아니라 보강평판도 해석이 가능하였다. 2002년에는 PFADS R1을 C++언어로 코딩하고 알고리즘을 개선하여 계산속도와 연산 효율을 높였으며 MFC와 Open GL을 이용해 자체 전후처리 기능을 갖는 PFADS R2를 개발하였다. 최근에는 PFADS R3가 개발되었는데, 이 버전에서는 프로그램의 주요 기능을 모듈화하여 전체 프로그램이 translator, model convertor, main solver로 구성하였고 이를 통해 유지보수와 업데이트가 더욱 용이하게 되었다. 또한 PFADS R3에서는 연계요소(link element)가 추가되어 이전 버전보다 좀더 다양한 일반적인 구조물들을 해석할 수 있게 되었다.

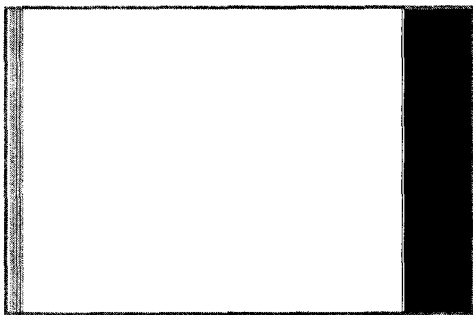


Fig. 1 The Feature of PFADS R1 based on MATLAB

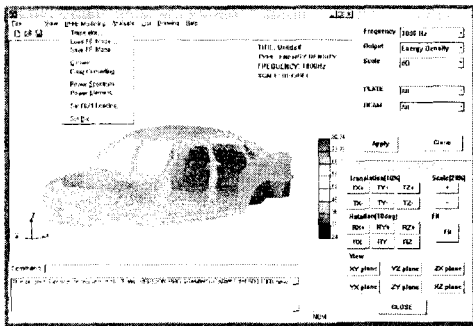


Fig. 2 The Feature of PFADS R2

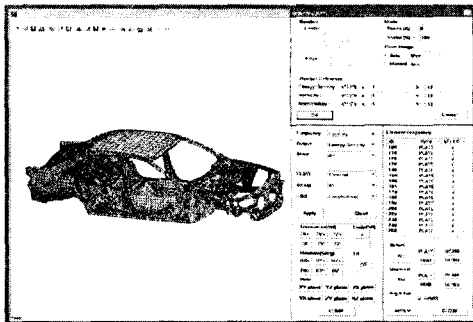


Fig. 3 The Feature of PFADS R3

Fig.1~3은 각각 개발된 PFADS R1~R3의 GUI 메인 프레임을 보여준다. 본 논문에서는 PFADS R3의 기본적인 기능과 이를 이용하여 차량에 적용시킨 결과를 위주로 설명하였다.

2. 프로그램의 구조와 기능

PFADS R3는 파워흐름해석법의 특성상 상용 유한요소프로그램과는 여러 다른 점들이 있는데, 그 특성과 구조는 다음과 같다.

2.1 Translator와 Model Convertor

보통 상용 유한요소모델은 구조요소간의 경계에서 변위의 접합조건만을 만족시키면 되지만 파워흐름유한요소법에서는 노드점에서 에너지밀도가 불연속이기 때문에 상용 유한요소 모델은 그대로 사용할 수가 없다. 따라서 실제 보이지 않지만 에너지밀도의 감쇠를 표현할 수 있는 연결요소(joint element)가 필요하고 이 요소가 유한요소모델(FE model)과 파워흐름유한요소모델(PFFE model)을 구별하는 가장 큰 특징이다. 따라서 PFADS에서 유한요소모델은 수치해석을 위해 기하학적 정보만을 주는 역할을 하고 FE 노드와 물성치, 요소특성치, 요소정보 등, 총 4가지로 구성되어 있다. 여기서 Fig. 4는 PFFE 모델의 데이터 구조를 보여준다.

PFADS R3의 파워흐름유한요소모델은 유한요소모델과는 달리 구조요소(structural element)와 연계요소(link element), 연결요소(joint element)로 이루어져 있다. 이 중에 구조요소는 에너지지배방정식으로 표현할 수 있는 감쇠탄성연속체를 의미하며, PFADS R3에서는 평판(plate)과 보(beam), 봉(rod) 구조요소를 지원한다. Fig. 5는 PFADS R3에서 지원하는 구조요소의 특성을 보여준다. 연계요소는 이번 버전에서 도입된 새로운 요소로 비구조요소인 부쉬요소(bush element), 강보요소(rigid bar element)와 원래 구조요소지만 파워흐름유한요소모델에서 연계요소로 변환되는 보강보와 보강봉 요소로 구성되어 있다. 이 연계요소는 해석과정에서는 아래에서 언급할 연결요소에서만 사용된다.

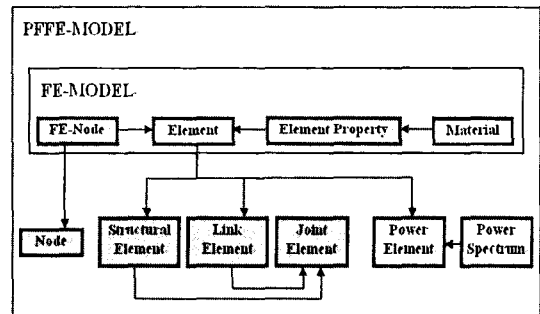


Fig. 4 Data Structures of PFFE model

ELEMENT	SHAPE	DOF	MATERIAL	CROSS SECTION
PLATE4		Flexural wave Longitudinal wave Shear wave	Density Elastic Modulus Poisson ratio Damping coeff.	Thickness
PLATE3		Flexural wave Longitudinal wave Shear wave	Density Elastic Modulus Poisson ratio Damping coeff.	Thickness
BEAM		X-dir. flexural wave Z-dir. flexural wave Longitudinal wave Torsional wave	Density Elastic Modulus Poisson ratio Damping coeff.	Area I _{yy} I _{zz} J
ROD		Longitudinal wave	Density Elastic Modulus Poisson ratio Damping coeff.	Area

Fig. 5 Structural Elements in PFADS R3

ELEMENT	SHAPE	CHARACTERISTICS	MATERIAL
LE-BEAM		Beam Stiffener	Density Elastic Modulus Poisson ratio Damping coeff.
LE-ROD		ROD Stiffener	Density Elastic Modulus Poisson ratio Damping coeff.
LE-BUSH		BUSH element (Damper and Spring)	Spring Coefficients Damping Coefficients
LE-RBAR		RBAR element with rigid bar	No Material Properties

Fig. 6 Link Element in PFADS R3

JOINT TYPE	JOINT SHAPE		
	BEAM-BEAM	PLATE-PLATE	PLATE-BEAM
POINT JUNCTION			
LINE JUNCTION			
POINT JUNCTION with LINK ELEMENT			
LINE JUNCTION with LINK ELEMENT			

Fig. 7 Joint Element in PFADS R3

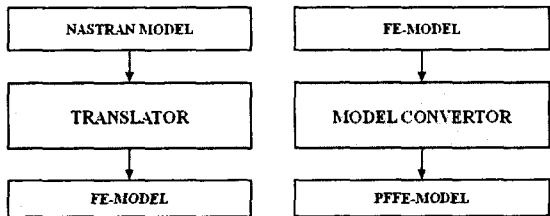


Fig. 8 The function of Translator and Model converter

연결요소는 유한요소모델에서 얻어진 구조요소와 연계요소와는 달리 본 프로그램 내에서 새롭게 생성되는 요소로서 위의 요소들 간의 파워의 전달을 표현하는 역할을 하는 가상요소이다. PFADS R3는 Fig. 6과 Fig. 7 같이 다양한 형태의 연계요소와 연결요소를 지원하고 있다. 파워흐름유한요소모델은 이러한 연결요소 때문에 유한요소모델보다는 더 많은 노드를 갖게 된다. 이밖에도 파워요소(power element)

와 파워스펙트럼(power spectrum)이 필요한데 파워요소는 파워스펙트럼을 가지고 있는 유한요소를 의미하며, 파워스펙트럼은 주파수에 따른 입력파워를 나타낸다.

PFADS에서는 이와 같은 파워흐름유한요소모델을 쉽게 얻을 수 있는 기능을 지원하는데, 이 모듈이 translator 모듈과 model convertor 모듈이다. Translator 모듈은 다른 상용유한요소 프로그램의 벌크 파일(bulk file)로부터 PFADS 유한요소모델(FE model)을 생성시키는 역할을 하며, Model convertor 모듈은 translator에 의하여 생성된 유한요소모델을 파워흐름유한요소모델(PFFE model)로 자동적으로 변환해 준다. 이러한 두 모듈을 이용하여 사용자는 손쉽게 파워흐름해석을 위한 모델을 얻게 된다. Fig. 8은 translator와 model convertor의 기능을 보여준다.

2.2 Solver

일반적으로 구조요소의 에너지 전파를 위한 에너지지배방정식은 다음과 같은 2차의 편미분방정식으로 표현된다^{1,3)}.

$$-\frac{C_g^2}{\eta\omega} \nabla^2 \langle e \rangle + \eta\omega \langle e \rangle = \Pi \quad (1)$$

여기서 ω , η 와 C_g 는 각각 주파수, 구조감쇠와 에너지전달 속도를 의미하며 $\langle e \rangle$ 는 시간공간평균된 진동에너지밀도를 나타낸다. 또한 시공간 평균된 파워는 에너지밀도와 다음과 같은 관계가 있다.

$$\langle I \rangle = -\frac{C_g^2}{\eta\omega} \nabla \langle e \rangle \quad (2)$$

에너지지배방정식을 수치적으로 해석하기 위해서 갤러킨가중잔여법(Galerkin Weighted Residual Method)을 사용하면 식 (3)과 같은 요소행렬식을 얻을 수 있다.

$$[K^{(e)}]\{e^{(e)}\} = \{F^{(e)}\} + \{Q^{(e)}\} \quad (3)$$

여기서 $[K^{(e)}]$, $\{F^{(e)}\}$, $\{Q^{(e)}\}$ 는 각각 강성행렬, 입력파워행렬, 전달파워행렬을 의미한다. 위의 요소행렬을 요소의 연결 상태(connectivity of element)에 따라 조립하면 아래의 식과 같은 전체 행렬식(global matrix equation)을 얻게 된다.

$$\begin{bmatrix} K_1 & & \\ & \ddots & \\ & & K_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} e_1 \\ \vdots \\ e_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_n \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} Q_1 \\ \vdots \\ Q_n \end{Bmatrix} \quad (4)$$

여기서 첨자 n은 구조요소의 파동성분을 의미한다. 요소간의 에너지밀도의 불연속을 위해 도입된 연결요소를 이용하면 다음과 같이 파워흐름행렬식을 에너지밀도의 항으로 표현할 수 있고 최종적으로 선형 행렬방정식 (5)를 얻을 수 있다.

$$[K-J]\{e\} = \{F\} \quad (5)$$

여기서 $[J]$ 는 연결요소행렬을 나타낸다. PFADS solver는 식 (5)를 풀어서 파워흐름유한요소모델의 진동에너지밀도를 얻는다. Solver는 빠른 시간 안에 해석결과를 얻기 위해 직접 solver뿐만 아니라 다양한 간접 solver까지 지원한다.

3. PFADS R3 해석

개발된 프로그램의 유용성을 입증하기 위해, 차량 모델과 선박모델에 대하여 PFADS-R3로 진동해석을 수행하였다.

3.1 차량 모델

첫 번째 모델로 Fig. 9에서 보여지는 A-car의 BIW 모델을 사용하였다. BIW의 유한요소모델은 20891개의 노드와 22190개의 동일한 철 재질을 가진 평판요소로 이루어져 있다. 프로그램을 이용하여 총 44908개의 PFFE 노드와 18058개의 연결요소를 생성하였고 평판의 전체 자유도를 고려하기 위해 134724개의 자유도를 해석하였다. 입력파워는 엔진이 장착된 앞 메인 프레임에 가진되었다.

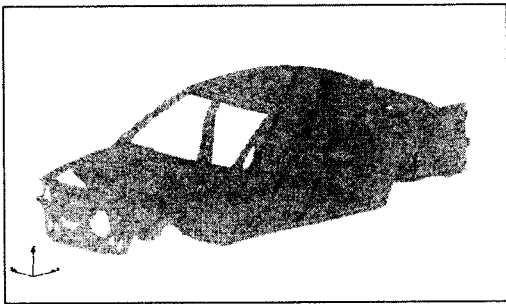


Fig. 9 BIW FE Model of an Automobile



Fig. 10 Energy Density in the Whole Body

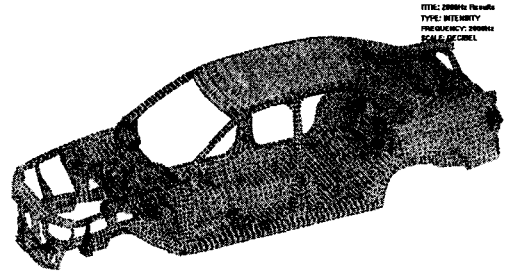


Fig. 11 Intensity distribution in the whole body

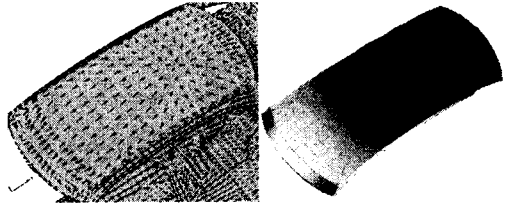


Fig. 12 Intensity and Energy Density of the Roof

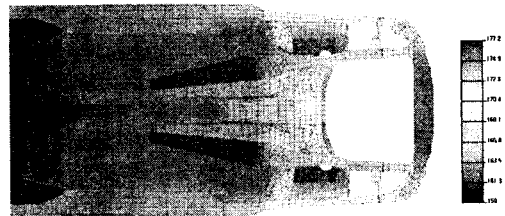


Fig. 13 RMS Acceleration Level of the Floor

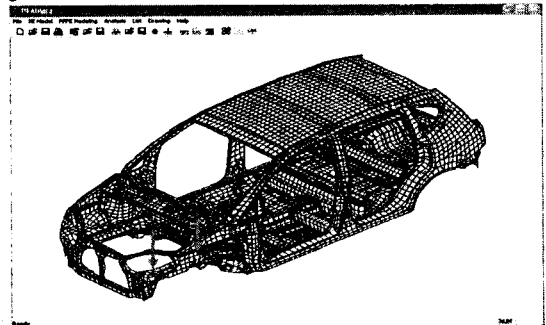


Fig. 14 BIW FE Model of R-car

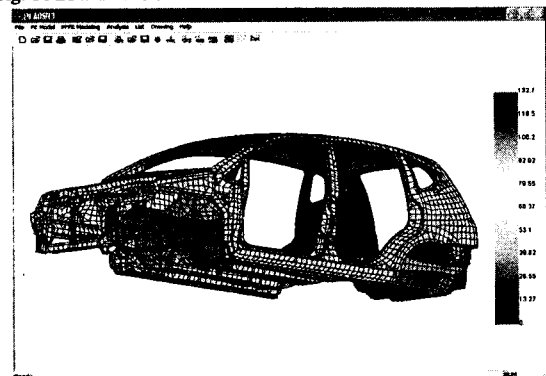


Fig. 15 Flexural Energy Density in the Whole Body

Fig. 10는 파워흐름유한요소법에서 가진점으로부터 에너지가 감쇠되며 퍼져나가는 에너지밀도 분포의 일반적인 경향을 보여준다. Fig. 11은 진동인텐시티의 분포로써 통계적 에너지해석법에서는 볼 수 없는 결과로 진동에너지의 전달 경로를 잘 나타낸다.

Fig. 12은 차량의 천정부부의 상세한 에너지밀도와 인텐시티 분포를 보여주는 그림으로 파워흐름해석법의 장점을 잘 표현하고 있다. Fig.13는 Fig. 10에서의 에너지밀도를 이용하여 구한 rms 가속도레벨을 나타낸다. PFADS R3은 주요 변수인 에너지밀도를 이용하여 인텐시티, 가속도레벨, 속도레벨 등 여러 가지 공학적 단위를 얻을 수 있다.

앞에서의 자동차 A보다 많은 자유도와 이번 버전에서 새로 포함된 연계요소(link element)를 가지고 있는 미니밴 스타일의 차량이 적용되었다.

이번 해석용 모델은 R-car의 BIW로써 총 30074개의 유한요소 노드와 30422개의 구조요소, 1989개의 강보요소(rigid bar element)로 이루어져 있으며, 본 프로그램을 통하여 60185개의 PFFE 노드와 34444개의 연결요소가 생성되었다. 마찬가지로 차량의 전체 자유도를 고려하기 위해 총 180555개의 자유도를 해석하였다. Fig. 14은 R-car의 BIW FE 모델을 보여주며 화살표가 가리키는 두 곳에 굽힘파위를 가진하였다. Fig. 15~17은 1000Hz에서의 평판의 각 파동의 에너지밀도의 분포를 나타내며, Fig. 18은 차량의 왼쪽 측면프레임의 인텐시티 분포를 나타낸다.

3.2 선박 모델

선박모델에 대하여 진동해석을 수행하기 위하여, 2300TEU급 컨테이너선을 선정하여 Fig. 19와 같이 유한요소모델을 생성하였다. 평판요소와 보요소로 구성된 이 선박 모델은 요 10287개의 요소와 5430개의 절점이 사용되었다. 실제 선박과 최대한 유사하게 모델링하기위해서 5개의 재료물성치와 98개의 요소물성치를 적용하였다. Fig. 20은 유한요소모델을 PFADS가 지원하는 모델변환기를 이용하여 파워흐름유한요소모델을 생성하는 과정을 보여주고 있으며 왼쪽그림은 유한요소모델을, 오른쪽그림은 파워흐름유한요소모델을 나타내고 있다. 파워흐름유한요소모델은 31879개의 유한요소절점과 10261개의 연결요소 정보가 추가되어 구성된다. 입력파워로는 균일한 분포파위가 엔진베드 일부에 굽힘파 형태로 공급된다고 가정하였다. Fig. 21은 이 입력파워를 부가하는 과정을 보여주며, 아래쪽그림은 파워스펙트럼을 생성하는 대화창이고, 오른쪽그림은 파워스펙트럼의 파워를 절점이나 요소에 부여하는 대화창이다. 왼쪽그림은 엔진베드만을 본 그림으로 그림내 색이 다른 왼쪽 두요소가 입력파워가 적용된 요소를 나타내고 있다. 이와 같이 모델링한 선박 모델에 대하여 PFADS R3의 솔버를 이용하여 전체 자유도에 대한 진동해석을 수행하였다. Fig. 22-24은 각각 1000Hz의 진동원에 대한 굽힘파, 종파, 전단파의 진동에너지밀도의

해석결과를 보여주고 있다. 이 그림들을 비교해보면, 굽힘파의 진동에너지분포가 가장 크다는 것을 알 수 있는데, 이는 입력되는 진동원이 굽힘파의 진동파워이기 때문이다. 또한 가진원을 중심을 진동에너지가 전체적으로 서서히 감소하는 경향이 일반적인 중고주파 진동현상과 일치함을 알 수 있다.

4. 결론

중고주파수 대역에서 자동차, 선박, 비행기 등의 실제 복합구조물의 소음진동해석을 위해 파워흐름해석유한요소법을 기반으로 한 PFADS R3가 성공적으로 개발되었으며 다음과 같은 성과를 얻었다.

- 1) 전 버전보다 더욱 구조적이고 효율적인 프로그램 데이터 구조가 확립되었다.
- 2) 전체 프로그램의 모듈화는 프로그램의 유지, 보수와 업그레이드를 용이하게 하였다.
- 3) PFADS R3는 사용자의 편의를 위해 translator와 같은 모델링 유틸리티를 지원한다.
- 4) 약 20만 자유도 정도의 실제 복합구조물의 진동해석을 성공적으로 수행하였다.

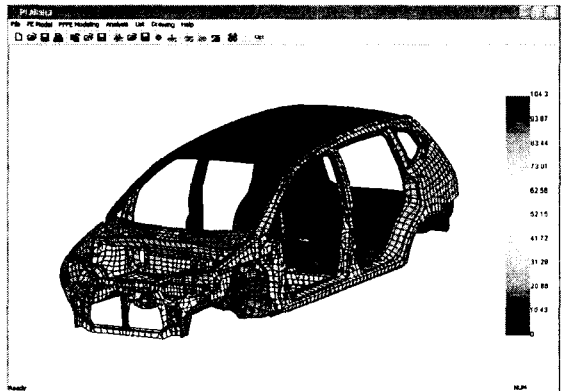


Fig. 16 Longitudinal Energy Density in the Whole Body

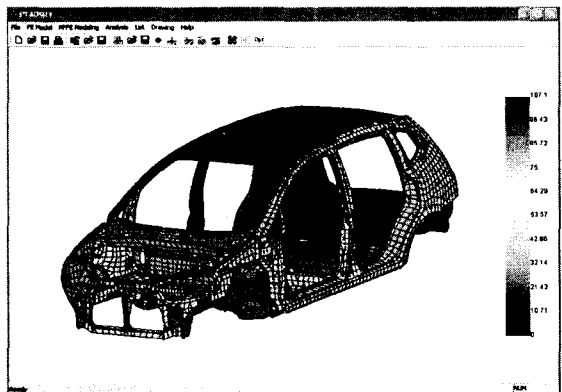


Fig. 17 Shear Energy Density in the Whole Body

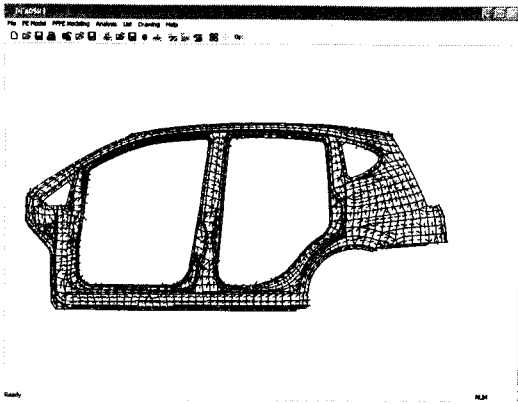


Fig. 18 Intensity distribution of left side frame

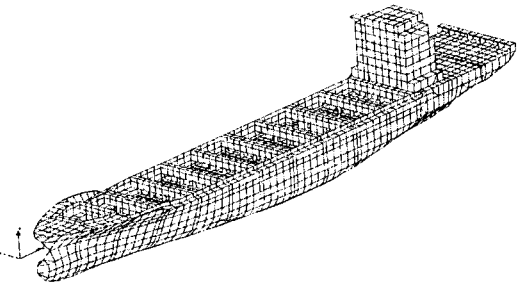


Fig. 19 Container model

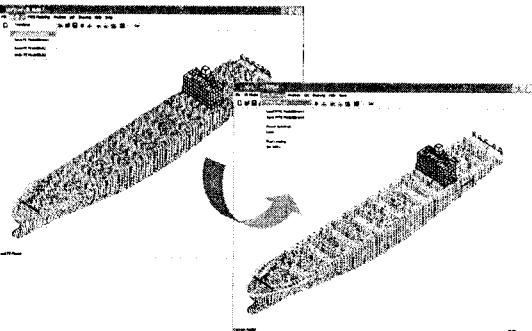


Fig. 20 Converting FE model to PFFE model

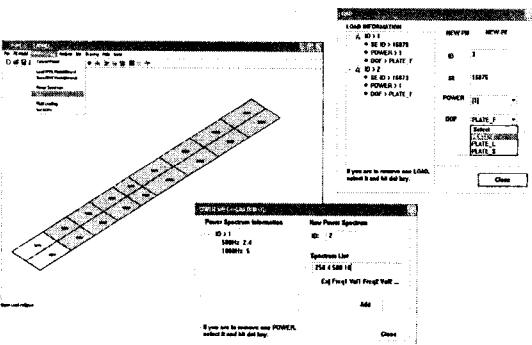


Fig. 21 Modeling of input power

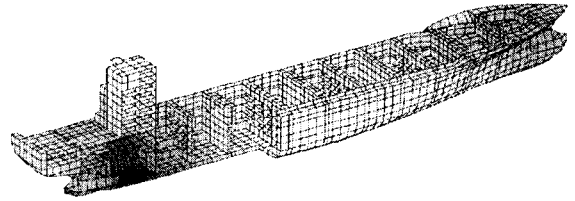


Fig. 22 Flexural energy density at 1000Hz

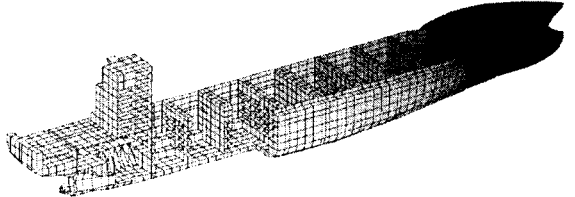


Fig. 23 Longitudinal energy density at 1000Hz

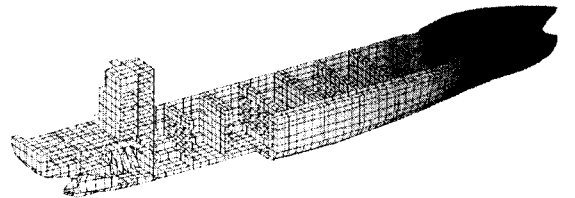


Fig. 24 Shear energy density at 1000Hz

참 고 문 헌

- (1) J.C. Wohlever, R.J. Bernhard, "Mechanical Energy Flow Models of Rods and Beams", JSV, 153(1), 1-19, 1992.
- (2) O.M. Bouthier, R.J. Bernhard, "Simple Models of the Energetics of Transversely Plates", JSV, 182(1), 149-166, 1995.
- (3) D.H. Park, S.Y. Hong, H.G. Kil, J.J. Jeon, "Power Flow Model and Analysis of In-plane Waves of Finite Coupled Thin Plates", JSV, 244(4), 651-668, 2001.
- (4) P.E. Cho, Energy Flow Analysis of Coupled Structures, Ph.D. Thesis, Purdue University, 1993.
- (5) S.H. Seo, S.Y. Hong, H.G. Kil, "Power Flow Analysis of Reinforced Beam-Plate Coupled Structures", JSV, 259, 1109-1129, 2003.
- (6) 홍석운, 박영호, "차량의 중고주파 진동해석을 위한 파워흐름해석 프로그램의 개발현황과 이를 이용한 승용차의 진동해석 예", 한국자동차공학회 추계연구발표회 논문집, pp.768-773, 2001.
- (7) 박영호, 홍석운, "Hybrid Type Vibration Power Flow Analysis Method using SEA Parameters", 한국음향학회지, 21권, 4E호, p.164-169, 2002.12.
- (8) S.H. Seo, S.Y. Hong, Y.H. Park, "Vibration Power Flow Analysis of Submarine-shaped Structures using Developed Software", Journal of Ship and Ocean

Technology, Vol6(2), pp1-11, 2002.

(9) 박영호, 홍석운, 서성훈, 길현권, "파워흐름유한요소 해석 프로그램의 특성과 이를 이용한 자동차 진동해석", 한국소음진동공학회 추계연구발표회 논문집, pp.1083-1088, 2001.

(10) 박진원, 홍석운, 서성훈, 박영호, "파워흐름유한요소 해석을 이용한 선박소음예측의 통계적에너지해석적 접근", 대한조선학회 추계학술대회, 2002.

(11) 박도현, 홍석운, 이호원, "파워흐름경계요소법을 이용한 중고주파 차량 소음 해석", 대한자동차공학회 추계학술대회, 2002.

(12) 김일환, 홍석운, 박도현, 길현권, "연성된 셸 구조물의 진동 파워흐름해석", 한국소음진동공학회 추계학술대회, 2002.

(13) 송지훈, 홍석운, 박영호, 박도현, 길현권, "파워흐름 해석을 위한 비보존 조인트로 연성된 평판 구조물의 파워투과반사계수 해석" 한국소음진동공학회 추계학술대회, 2002.

(14) 이호원, 홍석운, 서성훈, 박도현, 박영호, "원통형 구조물의 진동실험을 통한 파워흐름유한요소법 (PFFEM)의 분석", 대한조선학회 선박구조연구회, 2002.

(15) 홍석운, 서성훈, 박영호, "파워흐름해석프로그램을 이용한 선박의 진동해석", 대한조선학회 춘계학술대회, 2002.

(16) 이호원, 홍석운, 박영호, 길현권 "파워흐름해석법의 신뢰성 검증을 위한 원통형 구조물의 진동실험", 한국소음진동공학회 춘계학술대회, 2002.