

# 파워흐름해석 프로그램을 이용한 2300 TEU

## 컨테이너선의 중고주파 대역 진동해석

서성훈\*, 박영호\*, 홍석윤\*\*, 길현권\*\*\*

### Vibration analysis of 2300 TEU container ship using power flow analysis program in medium-to-high frequency ranges

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

#### Abstract

To predict vibrational energy density and intensity of beam-plate coupled complex structures in medium-to-high frequency ranges, Power Flow Finite Element Method(PFFEM) programs for plate, beam and some coupled structural elements are developed. The flexural, longitudinal and shear waves in plates are formulated and the joint element equations for multi-coupled plates are fully developed. Also the wave transmission approach has been introduced to cover the energy transmission and reflection at the joint elements. Using the developed PFFEM program, vibration analysis for 2300TEU container ship model is performed and here the model data for this program are obtained by converting former FE model for structural analysis. This program predicts successfully the vibrational energy density and intensity upto 8,000 Hz for the ship model with over 50,000 DOF.

#### 1. 서언

일반적으로 복합구조물의 진동에너지는 구조요소를 따라 흐르기 때문에 진동원과 멀리 떨어진 곳에서도 고체음(structure-borne noise)이 발생하게 된다. 선박의 경우 선박내부에 탑재된 추진기계류 등에서 발생하는 진동에너지는 마운트, 갑판, 격벽 등 내부 구조물을 통하여 선체 곳곳에 전달되며 전달된 진동에너지는 거주지역인 선실 등에 소음을 발생하기도 하며 수중으로도 상당량이 방사된다. 이러한 고체음을 제어하는 방법으로 고체음의 주요 전달경로에 감쇠물질을 부착시켜 고체음의 전달손실을 증가시키는 방법이 주로 사용되고 있다. 따라서 선박과 같은 대형 구조물의 진동을 해석하기 위해서는 진동에너지의 공간적 분포와 진동에너지의 전달경로에 대한 이해가 절실히 필요하며, 이것은 또한 방사소음해석시스템 구축을 위한 핵심 연구사항이기도 하다.

구조물의 진동을 해석하는 방법으로 구조계에 대한 운동방정식의 해를 이용하는 유한요소법(Finite

Element Method, FEM)은 저주파 영역의 진동해석에 효과적으로 적용되고 있다. 그러나 가진주파수가 커지면 운동해의 파장이 짧아지기 때문에 구조물의 고차모드까지의 진동형상을 효과적으로 표현하기 위해서는 요소(element)의 크기를 더욱 작게 분할하거나 형상함수(shape function)의 차수를 높여야 한다. 따라서 유한요소법을 이용한 중고주파 영역의 진동해석은 계산 시간과 비용이 많이 들어 대형 구조물에 대해서는 효과적이지 못하다. 구조물의 진동을 해석하는 다른 방법으로는 고주파 영역의 랜덤진동현상을 해석하는데 효과적인 통계적에너지해석법(Statistical Energy Analysis, SEA)이 있다. 이 해석법은 전체 진동계를 진동에너지의 형태가 유사한 다수의 하부구조(subsystem)로 분할한 후 이들 각 요소의 시간 및 공간에 대한 평균 모달에너지의 평형조건으로부터 해당 주파수밴드에 대한 평균속도와 평균음압 등 관심 물리량을 얻을 수 있는 방법이다. 통계적에너지해석법은 일반적으로 기존의 유한요소법으로는 공진모드가 많아 해석하기 어려운 고주파 영역에서의 진동해석기법으로 활용되고 있다. 그러나 하부구조간의 파워의 평형조건을 이용하기 때문에 하부구조내의 진동에너지가 하나의 대표값으로 표현되고 모드 밀도가 높지 않은 중주파수 영역에 적용하기에 부적합한 단점이 있다.

위의 해석법들의 단점을 보완하고 정밀도를 향상시키

\*서울대학교 조선해양공학과 대학원  
\*\*서울대학교 조선해양공학과 조교수  
\*\*\*수원대학교 기계공학과 조교수

려는 진동해석 연구가 활발히 진행되고 있는데 그 중에서 파워흐름해석법(Power Flow Analysis, PFA)은 중고 주파 영역에서 특히 신뢰성이 높은 방법으로 평가되고 있다. 파워흐름해석법은 임의의 검사체적(control volume) 내에서의 진동파워평형(vibration power balance)을 고려하기 때문에, 구조모델에서 운동방정식의 운동해로부터 유도되는 에너지지배방정식은 열전도 방정식과 유사한 2차 편미분 형태이며 시간, 공간에 평균된 에너지밀도를 주요변수로 하고 있다. 이 에너지지배방정식을 통하여 중고주파 영역에서 하부요소의 공간적인 진동에너지 분포와 전달경로를 예측할 수 있다. 또한 파워흐름해석은 협대역 및 단일주파수 문제에 대하여 해석이 가능하고 입력파워와 감쇠처리를 국부적인 요소에 적용할 수 있으며 주파수에 평균된 응답을 예측하는 장점도 갖고 있다.

그러나 대형 복합구조물을 파워흐름해석법으로 해석할 경우 경계조건이 많이 필요하고 단위요소의 형상이 일반적이지 않아 에너지지배방정식의 정확한 수학적 해를 구하기가 어렵게 된다. 이러한 경우에 대하여 파워흐름해석법에 유한요소기법을 도입한 파워흐름유한요소법(Power Flow Finite Element Method, PFFEM)을 적용할 수 있는데, 이 방법은 복잡한 구조물을 여러 요소로 나누고 각각의 요소에 형상함수를 적용하여 에너지지배방정식의 해를 수치해석적으로 구하기 때문에 근사적이지만 매우 효과적으로 해를 보여준다. 또한, 파워흐름유한요소법은 구조해석과 진동해석에 필요한 유한요소모델링을 적용할 수 있어 새롭게 모델링 해야하는 통계적에너지해석법에 비해 고주파 영역의 해석비용과 시간을 줄일 수 있는 장점이 있으며, 기존의 유한요소해석보다 훨씬 높은 주파수 영역에 대하여 해석이 가능한데, 이는 에너지밀도와 인텐시티에 시간과 공간에 대한 평균 개념을 적용하였으므로 에너지지배방정식의 해가 조화진동(harmonic vibration)특성이 없는 단조한 값들로 나오기 때문이다. 이러한 장점을 활용한 파워흐름유한요소법으로 1차원요소에 대한 해석은 어느 정도 진전이 있었으나 2차원요소에 대한 해석은 기초적인 수준에 머물렀다. 평판의 경우 단일평판이나 동일평면으로 형성된 평판 구조물 정도에만 적용되어 굽힘파의 입력파워가 입력될 때 면내파(in-plane wave)가 발생하지 않는 경우에 대하여 해석이 이루어졌다. 따라서 본 연구는 파워흐름유한요소법의 적용범위를 넓혀 실제구조물과 가까운 복잡한 형상을 갖는 임의의 평판 구조물로 확장하여 적용하는데 목적이 있다.

## 2. 파워흐름유한요소법

평판요소에 진동파워가 입력되어 정상상태(steady

state)가 되었을 경우에 굽힘파와 면내파의 공간-시간 평균된 에너지밀도를 변수로 하는 에너지지배방정식은 다음과 같다.

$$-\frac{c_{gm}^2}{\eta w} \nabla^2 \langle e \rangle_m + \eta w \langle e \rangle_m = \Pi_m \quad (2.1)$$

여기서  $w$ 는 가진주파수이고  $\eta$ 는 구조강쇠에 의한 내부손실계수이며,  $m$ 은 평판에 존재하는 굽힘파, 종파, 전단파 중 하나의 파형을 의미한다.  $e_m$ 은  $m$  파형의 공간-시간 평균된 에너지밀도이며  $c_{gm}$ 은  $m$  파형의 에너지전달속도로서 굽힘파의 에너지전달속도는 굽힘파 전파속도의 2배이고 면내파의 에너지전달속도는 면내파의 전파속도와 같다.  $\Pi_m$ 은 구조물의 단위평판요소에 입력되는  $m$  파형의 입력파워이다. 또한  $m$  파형에 대한 공간-시간 평균된 원거리영역의 인텐시티  $I_m$ 은 (2.2)식과 같이 에너지밀도의 공간적 구배 관계식으로 표현할 수 있다.

$$I_m = -\frac{c_{gm}^2}{\eta w} \nabla e_m \quad (2.2)$$

에너지지배방정식인 (2.1)식을 유한요소법으로 근사해를 구하기 위하여, 가중잔여법(Method of Weighted Residual, MWR)을 적용한다. 가중잔여법은 (2.3)식과 같이 잔여함수에 임의의 가중함수(weight function)  $\nu$ 를 취하여 요소의 영역에서의 적분값이 0을 만족하는 해를 찾는 방법이다.

$$\int_D R(x) \nu(x) dD = 0 \quad (2.3)$$

여기서  $R(x)$ 은 잔여함수이며  $D$ 는 요소 영역(element domain)을 의미한다. 에너지지배방정식인 (2.1)식의 잔여함수를 (2.4)식과 같이 정의한다.

$$R(x, y) = -\frac{c_{gm}^2}{\eta w} \nabla^2 e_m + \eta w e_m - \Pi_m \quad (2.4)$$

(2.4)식을 (2.3)식에 대입하고 발산정리를 이용하면 (2.5)식을 얻는다.

$$\int_D \left\{ \frac{C_{gm}^2}{\eta w} \nabla e_m \cdot \nabla \nu + \eta w e_m \nu \right\} dD - \int_D \Pi_m \nu dD - \int_{\Gamma} \nu \left( n \cdot \frac{C_{gm}^2}{\eta w} \nabla e_m \right) d\Gamma = 0 \quad (2.5)$$

여기서  $n$ 은 요소경계  $\Gamma$ 의 법선벡터(normal vector)이다. 진동에너지밀도와 인텐시티의 관계를 의미하는 (2.2)식을 이용하면 (2.6)식은 다음과 같이 표현된다.

$$\int_D \left\{ \frac{C_{gm}^2}{\eta w} \nabla e_m \cdot \nabla \nu + \eta w e_m \nu \right\} dD$$

$$= \int_D \Pi_m \nu dD + \int_{\Gamma} \nu (-n) \cdot I_m d\Gamma \quad (2.6)$$

본 연구에서는 다른 가중잔여법보다 일반적으로 잘 알려져 있는 갤러킨 법을 이용하여 파워흐름유한요소해석을 수행하기 위하여, 위 식의 변수인 에너지밀도  $\langle e_m \rangle$ 의 수치적인 근사해를 다음 (2.7)식과 같이 유한개의 기지함수의 합으로 표현한다.

$$e_m = \sum_{j=1}^n e_{mj} \phi_j \quad (2.7)$$

여기서  $e_{mj}$ 는 노드점에서의 미정된  $m$  파형의 에너지밀도이고  $\phi$ 는 라그랑제 다항식(Lagrange interpolation function)이며  $j$ 는 기지함수의 수이다. 또한 가중함수는 (2.8)식과 같이 근사해의 기지함수로 표현한다.

$$\nu = \sum_{i=1}^n \phi_i \quad (2.8)$$

(2.6)식에 (2.7)식과 (2.8)식을 대입하여 갤러킨 근사식(Galerkin approximation)을 구하면 (2.9)식과 같이 된다.

$$\sum_{j=1}^n \int_D \left( \frac{C_{gm}^2}{\eta w} \nabla \phi_i \cdot \nabla \phi_j + \eta w \phi_i \phi_j \right) dD \left\{ e_j \right\}$$

$$= \int_D \Pi_m \phi_i dD + \int_{\Gamma} \phi_i (-n) \cdot I_m d\Gamma \quad (2.9)$$

(2.9)식을 요소행렬(element matrix) 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$[K_m^{(e)}] \{e_m^{(e)}\} = \{F_m^{(e)}\} + \{Q_m^{(e)}\} \quad (2.10)$$

여기서 위 식의 각 항들은 다음과 같다.

$$K_{mj}^{(e)} = \int_D \left( \frac{C_{gm}^2}{\eta w} \nabla \phi_i \cdot \nabla \phi_j + \eta w \phi_i \phi_j \right) dD \quad (2.11)$$

$$F_{mi}^{(e)} = \int_D \Pi_m \phi_i dD \quad (2.12)$$

$$Q_{mi}^{(e)} = \int_{\Gamma} \frac{C_{gm}^2}{\eta w} \phi_i (-n) \cdot \nabla e d\Gamma \quad (2.13)$$

(2.11)식  $K_{mj}^{(e)}$ 는 강성행렬과 질량행렬 항을 포함하고 있는 계수행렬이며, (2.12)식  $F_{mi}^{(e)}$ 는 입력파워를 의미한다. (2.13)식  $Q_{mi}^{(e)}$ 는 파워흐름을 나타내며

( $-n$ )에서 알 수 있듯이 요소경계의 안쪽으로 들어오는 값을 양으로 한다. (2.10)식을 조립하여 세 가지 파형 굽힘파와 종파와 전단파를 고려한 전체행렬(global matrix)을 구하면 다음 (2.14)식과 같다.

$$\begin{bmatrix} K_f & & \\ & K_l & \\ & & K_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} e_f \\ e_l \\ e_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_f \\ F_l \\ F_s \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} Q_f \\ Q_l \\ Q_s \end{Bmatrix} \quad (2.14)$$

여기서 첨자  $f, l, s$ 는 각각 굽힘파, 종파, 전단파를 의미한다. (2.14)식은 노드에서의 에너지밀도  $e$ 를 변수로 하는 행렬식이며  $K$ 항과  $F$ 항은 주어진거나 계산가능한 항이다. 하지만  $Q$ 항에는  $e$ 항이 미분된 형태를 포함되어 있어 이를 해결하기 위해,  $m$  파형에 대한  $Q$ 항을 전개하면 다음 식과 같다.

$$\{Q_m\} = \{ \dots, \sim Q_m^{(k)}, \sim Q_m^{(k+1)}, \dots \}^T \quad (2.15)$$

여기서  $Q_m^{(k)}$ 과  $Q_m^{(k+1)}$ 은 각각  $k$ 와  $k+1$ 번 요소의 각 요소경계에 대한 파워흐름벡터를 의미한다.  $Q$ 항을 계산하는 과정에서 요소가 연결된 특성에 따라 2가지 경우로 나뉘는데, 첫번째는 동일한 특성을 갖는 두 요소가 인접한 경우이며 두번째는 다른 특성을 갖는 두 요소가 인접한 경우이다. 전자의 경우 그 경계 위에 있는 노드에서는 에너지밀도가 같고, 하나의 요소에서 그 경계를 통하여 흐르는 파워흐름과 다른 요소에서 그 경계를 통하여 흐르는 파워흐름은 크기가 같고 부호만 다른 값을 갖는다. 따라서 전체행렬을 조립할 때 동일한 특성을 갖는 요소가 인접한 경계 위의 노드들은 합치게 된다. 다른 특성을 갖는 두 요소가 인접한 경우에는 에너지밀도가 다르기 때문에 전체행렬을 조립할 때 해당 경계의 노드를 합칠 수 없다. 이때에는 두 구조요소에 연결요소를 삽입하여 두 구조요소를 연결하는데 일반적으로 해당 경계 위의 노드의 에너지밀도와 파워흐름과의 관계를 (2.16)식과 같이 행렬식으로 표현 가능하다.

$$\begin{Bmatrix} Q_f \\ Q_l \\ Q_s \end{Bmatrix} = [J] \begin{Bmatrix} e_f \\ e_l \\ e_s \end{Bmatrix} \quad (2.16)$$

여기서  $[J]$ 는 연결요소행렬(joint element matrix)이며 이에 대한 설명은 다음 장에서 자세히 기술한다. (2.16)식을 (2.14)식에 대입하면 다음과 같은 행렬식이 된다.

$$[K - J] \{e\} = \{F\} \quad (2.17)$$

(2.17)식은 노드에서의 에너지밀도를 변수로 하는 3자

유도 선형문제로서 역행렬을 이용하여 각각의 파형에 대한 에너지밀도를 구할 수 있다. 또한 각 파형에 대한 인텐시티는 (2.7)식을 (2.2)식에 대입하여 다음 (2.18)식과 같이 표현된다.

$$I_m = -\frac{c^2}{\eta w} \sum_{j=1}^n e_{mj} \nabla \phi_j \quad (2.18)$$

### 3. 연결요소행렬식

다른 재료의 두 개의 평판이 동일 평면으로 연성되거나 두 개 이상의 평판이 임의의 각으로 연성되어 있는 경우에 대하여 평판이 연성된 부분을 연결부분(joint)이라 한다. 이러한 구조물의 연결부분에서 파동의 전파 특성이 변화하여 파동변환이 발생하며, 이로 인하여 에너지밀도가 불연속이 되고 파형도 변화한다. 이러한 구조물에 파워흐름유한요소해석을 적용하려면, 구조요소가 서로 접하고 있는 경계 위에 있는 노드들로 구성되는 연결요소를 이용한다. 연결요소에서 연결요소행렬식은 에너지밀도와 파워흐름간의 관계를 나타내는데 다음과 같이 유도된다.

$n$  개의 구조요소가 연성된 경우에 구조요소  $i$  에서 연결부분을 통하여 안쪽과 바깥쪽으로 전달되는 굽힘파의 진동파워흐름을 각각  $q_{if}^+$ ,  $q_{if}^-$  로 표기한다. 마찬가지로 종파와 전단파의 진동파워흐름을 첨자  $l$  와  $s$  를 이용하여  $q_{il}^+$ ,  $q_{il}^-$ ,  $q_{is}^+$ ,  $q_{is}^-$  로 표기한다. 그림 1은 두 개의 구조요소가 연결요소로 연결된 형태를 나타내는데 1번 구조요소와 2번 구조요소에서 각각의 파형에 대한 진동파워흐름의 방향이 연결부분의 안쪽으로 향할 때 양의 부호가 되도록 표현한다. 경계의 안쪽과 바깥쪽을 전달되는 파워흐름을 굽힘파, 종파, 전단파 순으로 나열된 열벡터를 다음 식들과 같이  $3n \times 1$  행렬로 정의한다.

$$q^+ = \{ q_{1f}^+ \dots q_{nf}^+ \sim q_{1i}^+ \dots q_{ni}^+ \sim q_{1s}^+ \dots q_{ns}^+ \} \quad (3.1)$$

$$q^- = \{ q_{1f}^- \dots q_{nf}^- \sim q_{1i}^- \dots q_{ni}^- \sim q_{1s}^- \dots q_{ns}^- \} \quad (3.2)$$

같은 방식으로 경계의 안쪽과 바깥쪽으로 전달되는 에너지밀도도 위의 식들과 유사하게 표현된다.

$$e^+ = \{ e_{1f}^+ \dots e_{nf}^+ \sim e_{1i}^+ \dots e_{ni}^+ \sim e_{1s}^+ \dots e_{ns}^+ \} \quad (3.3)$$

$$e^- = \{ e_{1f}^- \dots e_{nf}^- \sim e_{1i}^- \dots e_{ni}^- \sim e_{1s}^- \dots e_{ns}^- \} \quad (3.4)$$

이 연결부분에서 발생하는 파동변환을 고려하기 위하여 파워투과계수(power transmission coefficient)와 파워반사계수(power reflection coefficient)들로 구성되는 파워계수행렬  $[P]$  을 이용하는데 이 파워계수행렬은 연

결부분의 안쪽과 바깥쪽으로 흐르는 파워흐름의 관계를 다음 식과 같이 나타낸다.

$$\{q^+\} = [P] \{q^-\} \quad (3.5)$$

여기서 파워계수행렬  $[P]$  는  $i$  요소에서 입사하는  $m$  파형의 파워와  $j$  요소로 투과되는  $n$  파형의 파워비인 파워투과계수  $\tau_{mnij}$  와 파워반사계수  $\gamma_{mnij}$  로 구성되는  $3n \times 3n$  행렬이다.

본 연구에서 다루는 구조물은 복합 평판구조물로서 형상이 복잡하기 때문에 파동전달법을 이용하여 파워투과계수와 반사계수를 계산하고자 한다. 준무한평판  $n$  개가 연성된 경우에 대하여 파동전달법을 적용하여 분산장(diffuse field)으로 고려하기 위해 모든 입사각에 대하여 평균된 값을 사용한다. 한편 각 구조요소에서 연결요소로 흐르는 파워흐름과 진동에너지밀도는 다음과 같은 식을 만족한다.

$$\{q\} = \{q^+\} - \{q^-\} \quad (3.6)$$

$$\{e\} = \{e^+\} + \{e^-\} \quad (3.7)$$

또한 에너지전달관계로 다음과 같은 행렬식을 얻을 수 있다.

$$\{q^+\} = [C] \{e^+\} \quad (3.8)$$

$$\{q^-\} = [C] \{e^-\} \quad (3.9)$$

여기서 행렬  $[C]$  는 에너지전달속도로 구성된 대각행렬이다.

연결부분의 파워흐름과 에너지밀도와의 관계를 구하기 위하여 위에서 구한 식들에 대하여 다음과 같은 과정을 거친다. (3.5)식을 (3.6)식에 대입하여 연결부분으로 흐르는 파워흐름과 연결부분을 통해 나가는 파워흐름간의 관계를 구한다.

$$\{q\} = [P - I] \{q^-\} \quad (3.10)$$

(3.8)식과 (3.9)식을 (3.7)식에 대입하여 에너지밀도와 연결부분을 통해 들어오고 나가는 파워흐름간의 관계를 구한다.

$$[C] \{e\} = \{q^+\} + \{q^-\} \quad (3.11)$$

(3.5)식을 (3.11)식에 대입하여 연결부분으로 흐르는 에너지밀도와 연결부분을 통해 나가는 파워흐름간의 관계를 구한다.

$$[C] \{e\} = [P + I] \{q^-\} \quad (3.12)$$

(3.10)식과 (3.12)식에서 연결부분을 통해 나가는 파워흐름  $\{q^-\}$  을 소거하면, (3.13)식과 같이 연결요소에서의 파워흐름과 에너지밀도와의 관계를 구하게 된다.

$$\{q\} = [P-I][C][P+I]^{-1}\{e\} \quad (3.13)$$

따라서 급행파와 종파와 전단파를 모두 고려한  $n$  개의 구조요소에 대하여 연결요소행렬식  $[J]$  은 다음과 같다.

$$[J] = [P-I][C][P+I]^{-1} \quad (3.14)$$

#### 4. 파워흐름유한요소해석법의 적용

2장과 3장에서 기술한 내용을 바탕으로 파워흐름유한요소해석 프로그램을 작성하였다. 프로그램의 전처리기, 주처리기 그리고 후처리기에 대한 주요내용과 구성은 표 1~3과 같다.

본 프로그램을 이용하여 그림 2과 같은 2300 TEU 컨테이너 선박 모델에 대한 중고주파 대역의 진동해석을 수행하였다. 이 선박 모델은 PATRAN으로 작성된 구조해석용 유한요소(FE)모델을 본 프로그램에서 활용할 수 있는 데이터로 변환하는 과정을 거쳐 얻었으며 울성치 및 요소상수 등은 유한요소 모델 데이터를 그대로 사용하였다. 본 모델은 9,000여개의 평판요소와 3,000여개의 보요소로 구성되어 있고, 유한요소모델을 파워흐름유한요소 모델로 자동 변환되는 과정에서 10,000여개의 연결요소가 생성되었다. 가진원으로는 엔진의 횡방향 진동만을 가정하였고 엔진실 마운트에 급행파위가 입력되도록 하였다.

본 연구에서는 해석주파수에 변화에 따른 진동응답 비교하였으며, 아울러 보 요소의 영향을 고찰하였다. 그림 3와 그림 4은 각각 가진 중심 주파수가 4,000Hz일 때의 진동에너지밀도와 진동엔텐시티 분포를 보여주고 있다. 전체적으로, 가진원 중심에서 진동에너지 값이 가장 크며 가진원과 멀어지는 선수방향과 상부 구조물 방향으로 점차적으로 감소하는 경향을 보여주고 있다. 또한 진동엔텐시티 벡터의 방향으로 진동에너지의 전달 방향을 확인할 수 있었으며 제진/방진 설계에 효과적으로 적용될 것으로 예측된다. 그림 5는 가진 중심 주파수가 4,000Hz일 때의 진동에너지밀도의 결과를 보여주고 있다. 해석 주파수가 커질수록 진동에너지 감소가 더 많이 발생하는 경향을 확인할 수 있다.

본 프로그램에서는 평판과 보요소의 연성관계를 모두 고려하고 있으며 이를 확인하는 차원에서 평판요소로만 구성된 모델에 대한 해석도 수행하였다. 앞선 모델에서 보강보(stiffener)와 투과보(penetrating beam)를 모두 제거하여 단순히 평판간 연성만을 고려한 모델로 변경하여 해석하였다. 그림 6는 평판요소로만 구성된 모델에 대한 진동에너지밀도의 결과를 보여주고 있다. 예상대로 진동에너지가 전체적으로 가진부에서 멀어질수록

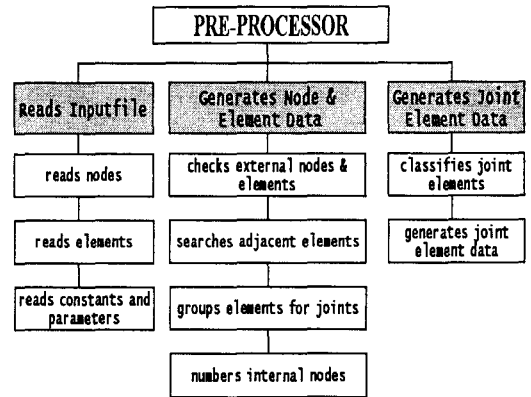


Table 1. Flowchart of the pre-processor of power flow finite element programs

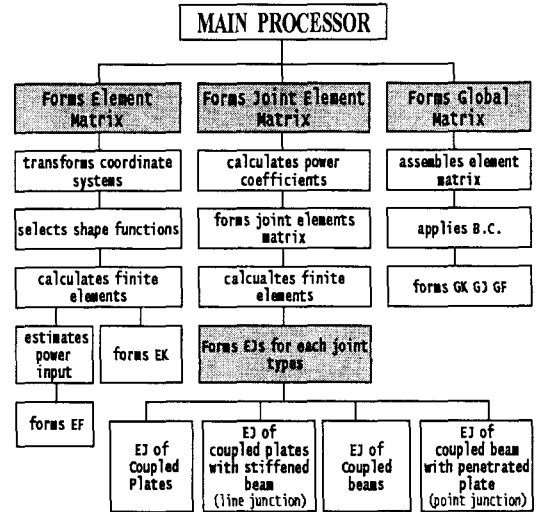


Table 2. Flowchart for the main process of power flow finite element programs

감소하는 경향을 확인할 수 있었다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 중고주파 영역의 진동해석을 위하여

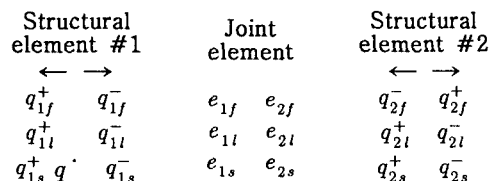


Fig. 1. Joint element scheme

파워흐름유한요소해석 프로그램을 작성하고 이를 이용하여 컨테이너선에 적용하였다. 보와 평판으로 모델링한 컨테이너선 모델의 해석이 대체로 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있었다.

이로써 파워흐름해석기법과 개발된 프로그램은, 실제 구조물의 대부분을 차지하고 있는 평판과 보 요소의 시스템 구조물에 대한 차세대 진동해석기법으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

- [1] Bouthier, O.M. & Bernhard, R.J., 1992, "Models of Space-Averaged Energetics of Plates", AIAA J., 30(3), pp.616-623.
- [2] Cho, P.E. & Bernhard, R.J., 1993, "A Simple Method for Predicting Energy Flow Distributions in Frame Structures", 4th International Congress on Intensity Techniques, pp.347-354.
- [3] 박도현, 홍석운, 길현권, 1998, " 동일 평면상에서 연성된 직사각형 평판의 진동파워흐름해석 ", 한국소음진동공학회지, 8(6), pp.1053-1061.
- [4] D.-H. Park, S.-Y. Hong, H.-G. Kil and J.-J. Jeon, "Power Flow Models and Analysis of In-plane Waves in Finite Coupled Thin Plates", J. Sound Vib, 244(4), pp.651-668,2001

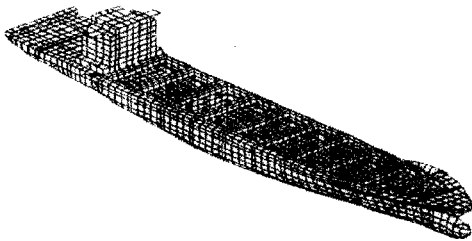


Fig.2 2300TEU container model.

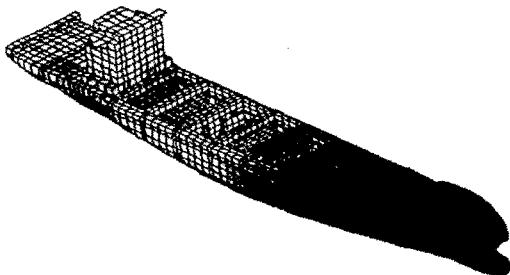


Fig.3 Energy density field at 4,000Hz.

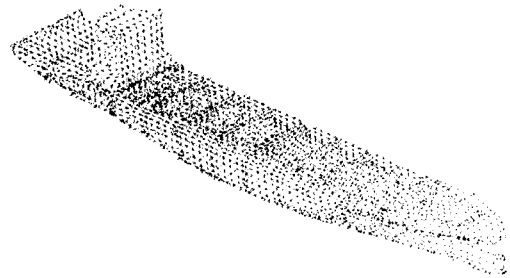


Fig.4 Intensity field at 4,000Hz.

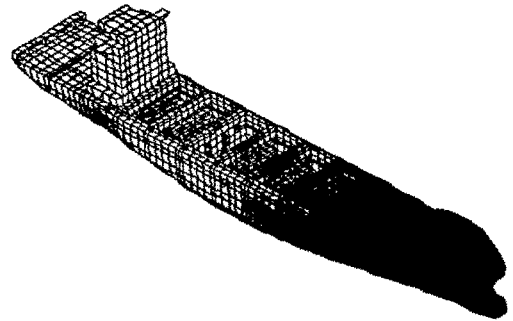


Fig.5 Energy density field at 8,000Hz.

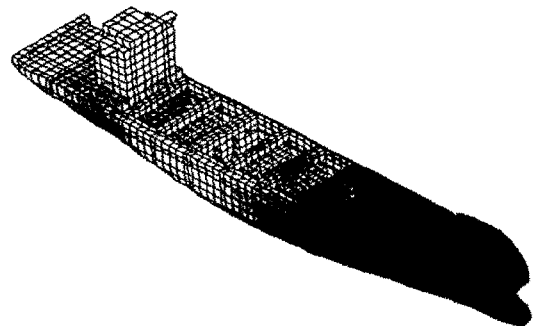


Fig.6 Energy density field at 4,000Hz for plate model.