

# SEA 파라미터(연성손실계수)를 이용한 선박의 진동 파워흐름해석

<sup>0</sup>박영호\*, 홍석윤\*\*, 박도현\*, 서성훈\*, 길현권\*\*\*

## Vibration Power Flow Analysis of Ship Structures Using SEA Parameter(Coupling Loss Factor)

<sup>0</sup>Young-Ho Park\*, Suk-Yoon Hong\*\*, Do-Hyun Park\*,  
Seong-Hoon Seo\*, Hyun-Gwon Kil\*\*\*

### ABSTRACT

This paper proposes the new hybrid analysis of vibration in the medium to high frequency ranges including PFA and SEA concept. The core part of this method is the applications of coupling loss factor(CLF) instead of power transmission, reflection coefficients in boundary condition. This method shows very promising compared to the classical PFA for the various damping loss factors and wide ranges of frequencies.

Besides this paper presents the applicable method in Power Flow Finite Element Method by forming the joint element matrix with CLF. These hybrid concepts are expected to improve SEA and PFA methods in vibration analysis

### 1.서론

통계적에너지해석법(SEA)이 고주파수 대역에서 과거의 전통적인 진동해석방법(Finite Element Method, Boundary Element Method)보다는 비교적 정확한 해석결과를 보여주나 하나의 subsystem 이 하나의 에너지값을 갖는다는 단점으로 인하여, 보다 자세하고 많은 정보를 제공해 주는 해석방법의 필요성이 대두되었다. 이에, 개발되고 있는 진동해석법 중 하나가 파워흐름해석법(Power Flow Analysis, PFA)인데 이 방법은 정상상태에서 열전도방정식과 유사한 에너지지배방정식이라는 편미분방정식을 기반으로 하기 때문에 공간상에서의 전반적인 진동에너지의 변화뿐만 아니라 진동파워

의 전달경로까지 예측할 수 있는 장점을 가지고 있다.

이러한 파워흐름해석법은 지속적으로 연구되어지면 중고주파수 대역에서의 강력한 진동해석기법으로 발전될 수 있으리라 판단되며, 현안으로는 요소들간의 경계조건(boundary condition)을 구할 때, 파동전달법(wave transmission approach)등을 사용하는데 이런 방법은 요소간의 기본 성질(예: beam, plate, shell 등)이 다른 경우에는 복잡한 문제로 나타난다. 이에 현재 많은 구조 요소에 대하여 알려져 있고 중심 파라미터로 동일한 에너지를 사용하는 통계적에너지해석법의 연성손실계수(coupling loss factor)로 대표되는 요소간의 연성정보를 이용하면 파워흐름해석법의 효율성을 높일 수 있다고 생각된다.

본 연구에서는 이러한 파워흐름해석법과 통계적 에너지해석법의 장점을 이용해 개발한 혼합형 진

\* 정회원, 서울대학교 대학원 조선해양공학과

\*\* 정회원, 서울대학교 공과대학 조선해양공학과

\*\*\* 정회원, 수원대학교 공과대학 기계공학과

동해석법의 타당성을 검증하기 위해서, 임의의 각으로 연성된 2개의 평판으로 이루어진 구조물에서 평판 내의 굽힘파(flexural wave)와 면내파(in-plane wave) 사이의 연성 효과를 고려한 경우에 혼합형 진동해석을 위한 새로운 경계조건을 수립하고 해석하여, 같은 경우에 대해 기존의 파동 전달법을 이용한 파워흐름해석법의 결과와 비교하였다. 또한 이런 혼합형 진동해석을 복합 평판구조물로 확대하기 위해서 파워흐름유한요소법(Power Flow Finite Element Method)에 적용할 수 있는 방법론을 제시하여 선박 형상의 구조물을 경계조건에서 통계적에너지해석법의 연성손실계수를 사용하여 파워흐름유한요소해석을 수행함으로써 구조물 내의 진동에너지 분포와 진동파워의 전달경로를 살펴보았다.

## 2. 평판에서의 혼합형 경계조건의 유도

### 2.1 에너지 지배방정식(energy governing equation)

평판이나 막과 같은 균질한 등방성의 2차원 구조 요소에서 진동응답은 평면파의 선형 중첩으로 생각할 수 있다. 따라서 임의의 한 평면상의 위치  $x=(x_1, x_2)$ 에서의 변위는 다음의 형태로 표현된다.

$$w(x) = \int_0^{2\pi} A(\theta) e^{-ikm(\theta) \cdot x + i\omega t} d\theta \quad (2.1)$$

여기서  $A(\theta)$ 는  $\theta$ 방향으로 전파되는 파동의 복소 진폭이다. 이러한 변위가 발생할 때의 운동에너지 밀도는

$$\begin{aligned} T(x) &= (\rho\omega^2/4)|w(x)|^2 \\ &= (\rho\omega^2/4) \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} A(\theta_1)A^*(\theta_2) e^{-ikm(\theta_1) \cdot x + i\omega t} e^{ikm(\theta_2) \cdot x - i\omega t} d\theta_1 d\theta_2 \end{aligned} \quad (2.2)$$

이다.  $k$ 는  $k_0 - i\omega\eta/2c_g$ 로써 비감쇠파수와 파의 군속도, 손실계수를 사용하여 나타낼 수 있다. 식(2.2)에서  $\theta_1 \neq \theta_2$  일 때 여러 파의 상호작용으로 간섭 항이 나타나는데, 이런 간섭항에 대한 접근법

으로는 앙상블 평균법과 주파수나 공간에 대한 부분적인 평균법이 있다. 이를 이용하면 식(2.2)는 식(2.3)으로 근사시킬 수 있다.

$$T(x) = (\rho\omega^2/4) \int_0^{2\pi} f(\theta) \cdot \exp\{-(\omega\eta/c_g) \cdot n(\theta) \cdot x\} d\theta \quad (2.3)$$

분산장(reverberant field)에서 전체에너지밀도는 운동에너지밀도의 두 배로 근사될 수 있으므로 전체에너지 밀도는

$$\begin{aligned} e(x) &\approx 2T(x) \\ &= (\rho\omega^2/2) \int_0^{2\pi} f(\theta) \cdot \exp\{-(\omega\eta/c_g) \cdot n(\theta) \cdot x\} d\theta \end{aligned} \quad (2.4)$$

와 같다.

따라서 에너지밀도의 구배(gradient)는

$$\nabla e(x) = -(\rho\eta\omega^3/2c_g) \int_0^{2\pi} f(\theta) (\cos\theta \sin\theta) e^{-(\omega\eta/c_g)n(\theta) \cdot x} d\theta \quad (2.5)$$

이다. 여기서 다양한 파 요소가 통계적으로 독립적이면 진행 방향으로 각 평면파의 인텐시티는 에너지전달속도와 에너지밀도의 곱으로 표현된다.

$$I = c_g (\rho\omega^2/2) \int_0^{2\pi} f(\theta) (\cos\theta \sin\theta) e^{-(\omega\eta/c_g)n(\theta) \cdot x} d\theta \quad (2.6)$$

식(2.5)와 식(2.6)으로부터 파워투과 인텐시티와 전체에너지의 구배(gradient)와의 관계를 얻을 수 있다.

$$I = -(c_g^2/\omega\eta) \nabla e \quad (2.7)$$

에너지평형법칙에서 전달된 파워의 양은 입력된 파워에서 내부에서 소실된 파워의 차와 같으므로 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\nabla \cdot I = P_{in} - P_{loss} \quad (2.8)$$

여기서,  $P_{in}$ 은 단위 면적 당 입력된 외부파워를,

$P_{diss}$ 는 단위 면적 당 내부손실파워를 의미한다.

내부손실파워  $P_{diss} = \omega \eta e$ 로 표현되므로 식 (2.7)과 식(2.8)은 파워흐름해석법의 에너지지배방정식으로 유도된다.

$$(c_g^2/\omega\eta)\nabla^2 e - \omega\eta e = -P_{in} \quad (2.9)$$

## 2.2 혼합형 경계조건(boundary condition)

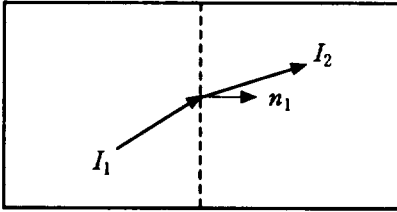


Fig.2-1 Structural intensities at a boundary between two components

연성된 경계 위의 어떤 점에서 단위 길이 당 전체에너지흐름은

$$P_{12} = I_1 \cdot n_1 = I_2 \cdot n_1 \quad (2.10)$$

이다. 여기서  $n_1$ 은 요소1의 바깥쪽을 향하는 수직 벡터이다.

또한 에너지의 경계에서의 흐름은 인텐시티 뿐만 아니라 경계의 파동투과계수를 사용해서 표현할 수 있는데, 경계에서 단위 길이 당 요소1에서 요소2로의 에너지흐름은 다음과 같다.

$$p_{12} = \frac{c_{g1}\rho_1\omega^2}{2} \int_{\theta} r_{12}(\theta) f_1(\theta) e^{-(\omega\eta/c_g)m(\theta)\cdot x} (\cos\theta\sin\theta) \cdot n_1 d\theta \quad (2.11)$$

식(2.11)에서  $p_{12}$ 를 측정하기 위해서는  $f_1(\theta)$ 에 대한 완벽한 지식이 요구된다. 하지만 에너지지배방정식 유도과정에서  $e_1(x)$ 는 식(2.4)에서  $f_1(\theta)$ 의 평균된 값이므로 적절한 가정을 도입하면  $f_1(\theta)$ 은 요소1의 전체에너지밀도, 즉  $e_1(x)$ 으로 표현이 가

능하다. 이를 위해 통계적에너지해석법과 같이 해당 파동장이 분산장이라는 가정을 하면 각각의 파머리에서의 인텐시티가 같게 된다는 사실과 감쇠계수  $\eta=0$ 이고  $e(x) = \text{constant}$ 이면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} T(x) &= (\rho\omega^2/4) \int_0^{2\pi} f(\theta) \cdot e^{-(\omega\eta/c_g)m(\theta)\cdot x} d\theta \\ e &= 2T = (\rho\omega^2/2) \int_0^{2\pi} f(\theta) \cdot e^{-(\omega\eta/c_g)m(\theta)\cdot x} d\theta \\ \Rightarrow e &= (\rho\omega^2/2) \cdot 2\pi \cdot \{f(\theta) \cdot e^{-(\omega\eta/c_g)m(\theta)\cdot x}\} \end{aligned} \quad (2.12)$$

이를 이용하면 아래의 식을 유도할 수 있다.

$$f_1(\theta) e^{-(\omega\eta/c_g)m(\theta)\cdot x} = e_1(x)/(\pi\rho_1\omega^2) \quad \forall \theta \quad (2.13)$$

여기서 다시 식(2.13)을 식(2.11)에 적용하면 요소1에서 요소2로 흐르는 파워를 얻게 된다.

$$p_{12} = (c_{g1}/2\pi) e_1(x) \int_{\theta} r_{12}(\theta) (\cos\theta\sin\theta) \cdot n_1 d\theta \quad (2.14)$$

또한 분산장에서 파동투과계수,  $\langle r_{12} \rangle$ 는 다음 식 (2.15)에서  $\theta$ 에 대한 적분 값인

$$\langle r_{12} \rangle = \frac{1}{2} \int_{\theta} r_{12}(\theta) (\cos\theta\sin\theta) \cdot n_1 d\theta \quad (2.15)$$

이므로 이를 포함한 통계적에너지해석법에서 2차원 선형 경계의 연성손실계수

$$\eta_{12} = c_{g1} \cdot L \cdot \langle r_{12} \rangle / (\omega\pi S_1) \quad (2.16)$$

을 이용하면 요소1에서 요소2의 사이를 흐르는 파워를 다음과 같이 통계적에너지해석법의 연성손실계수를 이용하여 표현할 수 있다.

$$p_{12} = (\omega S_1/L) \eta_{12} e_1(x) \quad (2.17)$$

$$p_{21} = (\omega S_2/L) \eta_{21} e_2(x) \quad (2.18)$$

따라서 요소1에서 요소2로의 전체에너지흐름은  $p_{12} - p_{21}$ 이므로 식(2.7),(2.10)과 식(2.17),(2.18)을 사용하면 평판의 선형경계에서의 혼합형 경계조건

을 아래의 식으로 나타낼 수 있다

$$\begin{aligned}
 P_{12} &= I_1 \cdot n_1 = I_2 \cdot n_2 \\
 &= -(c_{21}^2/\omega\eta_1)\nabla e_1 \cdot n_1 = -(c_{22}^2/\omega\eta_2)\nabla e_2 \cdot n_2 \quad (2.19) \\
 &= p_{12} - p_{21} = (\omega/L)[S_1\eta_{12}e_1 - S_2\eta_{21}e_2]
 \end{aligned}$$

### 3. 임의의 각으로 연성된 평판의 혼합형 진동파워흐름해석

#### 3.1 경계조건(boundary condition)

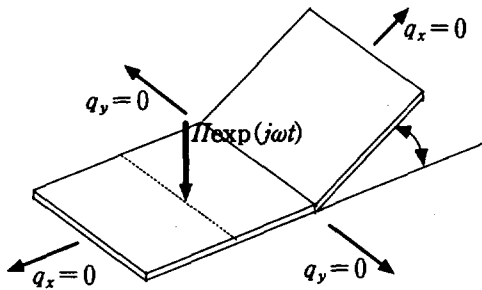


Fig.3-1 Plate structure coupled at an arbitrary angle

알루미늄 재질의 임의의 각으로 연성된 두 평판 구조물을 해석대상으로 했다.

두 개의 평판이 0이 아닌 각으로 연성되어 있으면 비록 하나의 파 성분이 가진력으로 입력되더라도 평판사이에서 각 파동간에 연성 효과로 인하여 각 평판에 다른 파 성분이 발생하게 된다. 따라서 만약 한 평판이 굽힘파로 가진되더라도 각 평판에는 굽힘파 뿐만 아니라 면내파인 종파(longitudinal wave)와 전단파(shear wave)도 존재한다.

이런 경우에 경계조건에 통계적에너지해석법의 연성손실계수를 사용하기 위해서는 에너지전달관계와 에너지보존측면에서 하나의 파동만을 고려한 경계조건식의 재설정이 요구된다.

경계조건에서 평판의 모서리쪽으로는 파워의 흐름이 없다고 하면

$$\nabla e \cdot n = 0 \quad (3.1)$$

을 경계조건으로 적용할 수 있고 두 평판사이의

선형 경계에서는 통계적에너지해석법의 상반관계와 각 파간의 연성을 고려하여 다음과 같이 식(2.19)를 확장해 3개의 파동을 고려하여 표현할 수 있다.

$$-(c_{22}^2/\omega\eta_2)\nabla e_2 \cdot n_2 = \frac{\omega}{L}(S_2\eta_{23}e_2 - S_3\eta_{32}e_3) \quad (3.2)$$

$$-(c_{33}^2/\omega\eta_3)\nabla e_3 \cdot n_2 = \frac{\omega}{L}(S_2\eta_{23}e_2 - S_3\eta_{32}e_3) \quad (3.3)$$

#### 3.2 수치해석(numerical analysis)

여기서 파워흐름해석을 위한 에너지배방정식의 일반해를 구하기 위하여 해석적인 방법의 하나로 실제값에 빨리 수렴한다고 알려진 Levy해 형태의 단일급수해법을 적용한다. 그러면 위 경계조건을 만족하는 일반해는 다음과 같이 y에 대한 cosine의 단일급수로 표현할 수 있다.

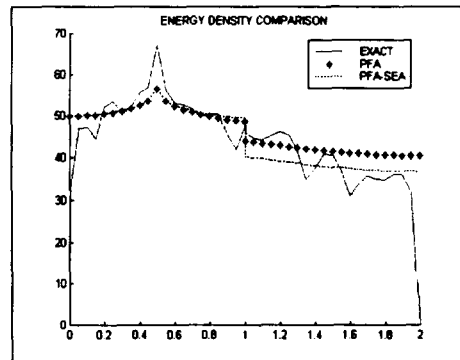
각 파동, 즉 굽힘파와 종파, 전단파에 대한 급수해는 다음과 같다.

$$\langle \overline{e_{fj}} \rangle(x_i, y) = \sum_{n=0}^{\infty} E_{in}(x_i) \cos k_n y \quad (3.4)$$

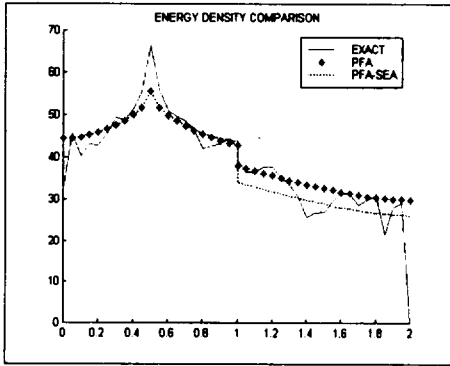
$$\langle \overline{e_{li}} \rangle(x_i, y) = \sum_{n=0}^{\infty} L_{in}(x_i) \cos k_n y \quad (3.5)$$

$$\langle \overline{e_{si}} \rangle(x_i, y) = \sum_{n=0}^{\infty} S_{in}(x_i) \cos k_n y \quad (3.6)$$

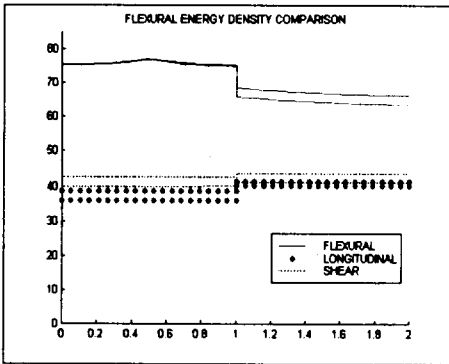
이를 이용하여 임의의 각으로 연성된 평판의 진동에너지밀도(dB)와 진동인텐시티의 해석결과는 다음과 같다.



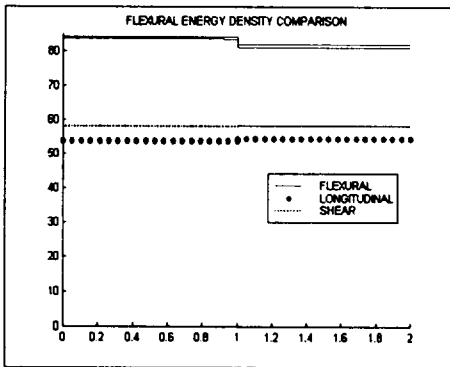
(a) 1000Hz,  $\eta=0.2$



(b) 3000Hz,  $\eta = 0.2$

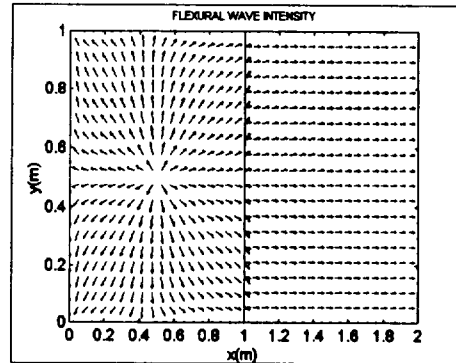


(c) 3000Hz,  $\eta = 0.02, 90^\circ$



(d) 3000Hz,  $\eta = 0.002, 90^\circ$

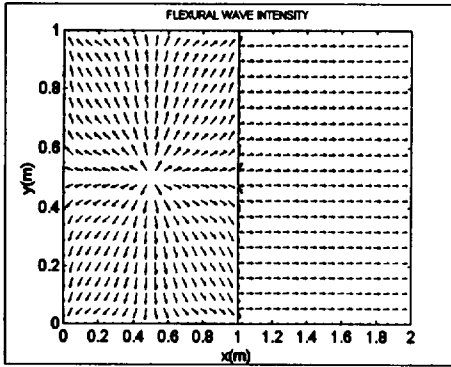
중고주파수 대역에서 고전해와 잘 일치하는 것으로 알려진 기존의 파워흐름해석법의 결과와 혼합형 진동해석의 결과가 거의 일치함을 알 수 있다. 주파수 변화에 따라서는 두 해석방법의 차이점이 나타나지 않았다. 이는 파워흐름해석법과 통계적에너지해석법이 모두 고주파수대역에서 잘 맞는 방법이기 때문이라고 생각되며, 손실계수에 따른 변화는 혼합형 경계조건을 유도할 때 사용한 가정에 맞게 손실계수가 0에 가까울수록 두 해석 결과가 같아지는 경향을 확인할 수 있었다. 하지만 가진력이 입력되지 않은 이웃의 평판의 에너지밀도가 기존의 파워흐름해석의 결과보다 약간 낮은 결과를 얻었는데 이는 경계조건에서 사용된 에너지밀도가 통계적에너지해석법의 경우처럼 각 평판을 대표하는 값이 아닌 경계위치에서의 값을 사용한 이유라고 생각된다. 따라서 기존의 파워흐름해석법과 더욱 가까운 결과를 얻으려면 앞으로 경계에서의 에너지밀도를 경계조건에 사용하기보다는 각 요소의 평균된 에너지를 사용하는 새로운 방법을 적용해야 할 것이다.



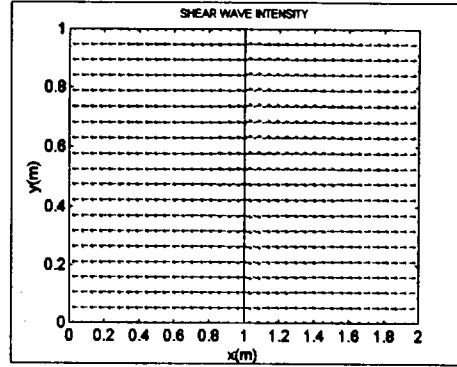
(a) 3000Hz,  $\eta = 0.02, 90^\circ$  (flexural wave)  
-classical PFA-

Fig.3-2 Energy density comparison with classical solution, classical PFA and hybrid PFA

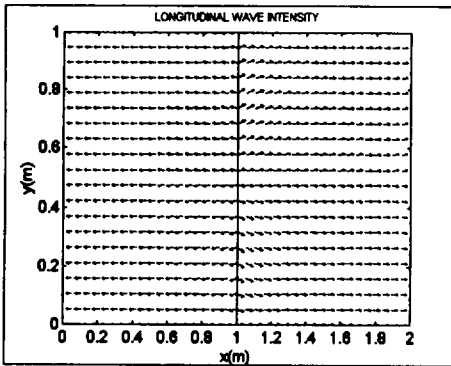
수치해석결과를 보면 주파수 변화에 따른 결과는



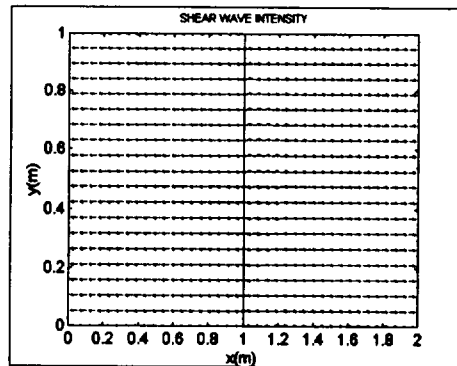
(b) 3000Hz,  $\eta=0.02$ ,  $90^\circ$  (flexural wave)  
-hybrid PFA-



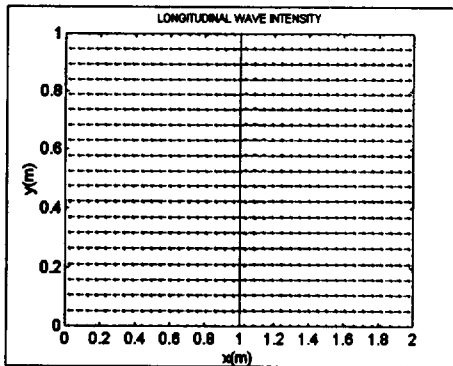
(e) 3000Hz,  $\eta=0.02$ ,  $90^\circ$  (shear wave)  
-classical PFA-



(c) 3000Hz,  $\eta=0.02$ ,  $90^\circ$  (longi- wave)  
-classical PFA-



(f) 3000Hz,  $\eta=0.02$ ,  $90^\circ$  (shear wave)  
-hybrid PFA-



(d) 3000Hz,  $\eta=0.02$ ,  $90^\circ$  (longi- wave)  
-hybrid PFA-

Fig.3-3 Intensity comparison with  
classical PFA and hybrid PFA

하지만 인텐시티의 경우는 그림(3-3)에서 볼 수 있듯이 혼합형 진동해석은 통계적에너지해석법에서는 볼 수 없는 평판 내부에서의 파워흐름방향을 알 수 있으며, 이러한 인텐시티는 에너지밀도와는 달리 주파수와 손실계수의 크기와는 관계없이 기존의 파워흐름해석법의 결과와 혼합형 진동해석의 결과가 잘 일치함을 확인할 수 있다.

#### 4. 다양한 형상의 복합평판구조물에 대한 혼합형 파워흐름유한요소해석

위에서 사용한 Levy해 형태의 단일급수해법으로는 다양한 형상과 밀폐된 구조물에 적용하기 어려운 한계가 있다. 따라서 선박과 같은 복합평판구조물에 혼합형 진동해석을 하기 위해서는 기존의 파워흐름유한요소법(Power Flow Finite Element Method, PFFEM)과 마찬가지로 혼합형 진동 파워흐름해석법에 유한요소기법을 적용할 필요가 있다.

##### 4.1 연결요소행렬(joint matrix)의 수립

파워흐름해석법의 유한요소법에 대한 적용은 파동전달법을 통해 얻은 파워투과계수와 파워반사계수를 사용하여 Cho가 연결요소가 하나있을 경우에 여러 파동에 대하여 연결요소행렬을 수립했고, 그 후 서성훈은 연결요소가 n개까지 있는 경우까지 연결요소행렬식을 확장했다. 하지만 이들 방법은 연결요소행렬을 파동전달법으로 구한 파워투과, 반사계수를 사용하여 만들었으므로 통계적에너지해석법의 연성손실계수를 사용하려면 새로운 연결요소행렬의 수립이 필요하다.

파워흐름해석법의 에너지지배방장식을 유한요소법에 적용하기 위해 우선 잔여함수(residual)를 식(4.1)과 같이 정의한다.

$$R(x, y) = -\frac{c_x^2}{\eta\omega} \nabla^2 \langle e \rangle + \eta\omega \langle e \rangle - \Pi \quad (4.1)$$

수치적인 근사해를 구하기 위해 가중잔여법 중에서 갤러킨법을 사용하여 갤러킨 근사식(Galerkin approximation)을 구하면 식(4.2)을 얻을 수 있고 식(4.2)을 요소행렬식으로 표현하면 식(4.3)이 된다.

$$\sum_{i=1}^N \left\{ \int_D \left( \frac{c_x^2}{\eta\omega} \nabla \phi_i \nabla \phi_i + \eta\omega \phi_i \phi_i \right) dD \right\} e_i = \int_D \Pi \phi_i dD + \int_{\Gamma} \left( \frac{c_x^2}{\eta\omega} \right) \phi_i n \cdot \nabla e d\Gamma \quad (4.2)$$

$$[K^{(e)}] \{e^{(e)}\} = \{F^{(e)}\} + \{Q^{(e)}\} \quad (4.3)$$

식(5.3)의 각 항은 다음과 같다.

$$K_{ij}^{(e)} = \int_D \left( \frac{c_x^2}{\eta\omega} \nabla \phi_i \nabla \phi_j + \eta\omega \phi_i \phi_j \right) dD \quad (4.4)$$

$$F_i^{(e)} = \int_D \Pi \phi_i dD \quad (4.5)$$

$$Q_i^{(e)} = \int_{\Gamma} \frac{c_x^2}{\eta\omega} \phi_i (-n) \cdot \nabla e d\Gamma \quad (4.6)$$

여기서 요소강성행렬과 입력파워행렬은 기존의 파워흐름유한요소법과 차이가 없으나 식(4.6)으로 나타나는 연결요소행렬은 수정이 필요하다.

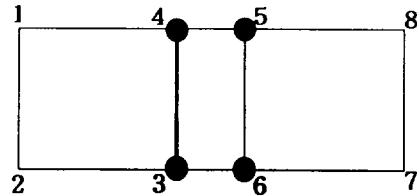


Fig.4-1 Two 4-node quadrilateral elements with both global and local node numbering

혼합형 파워흐름유한요소법의 연결요소행렬식은 식(3.1)과 식(3.2)을 식(4.6)에 적용하여 만들 수 있다.

##### 4.2 열린 상자 구조물에 대한 혼합형 파워흐름유한요소해석

열린 상자형 구조물에 대하여 바닥의 평판에 점가진을 했을 때 기존의 파워흐름유한요소해석과 혼합형 파워흐름유한요소해석의 결과를 비교하였다.

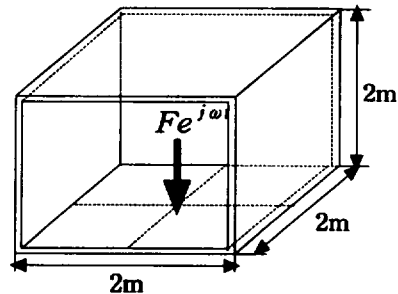
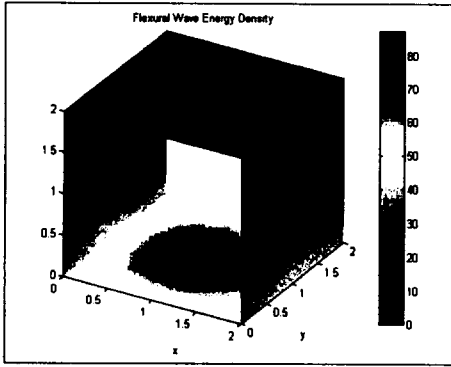
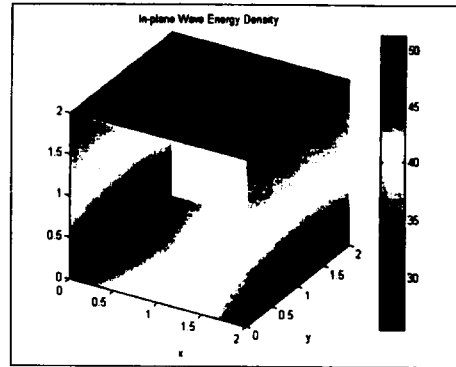


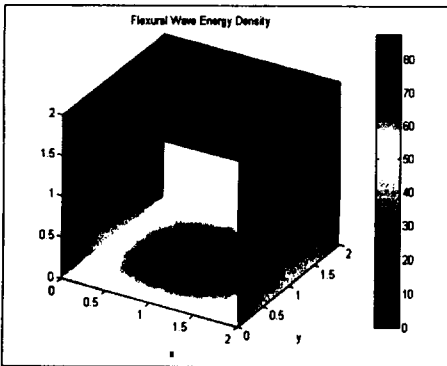
Fig.4-2 Plate structures of open box-type



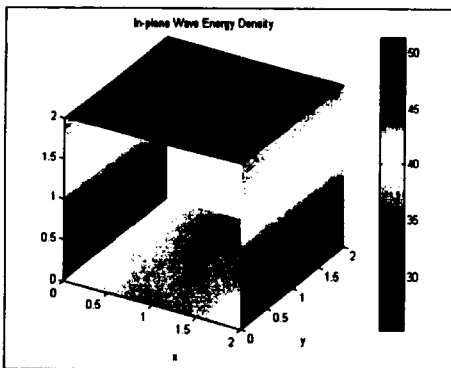
(a) Flexural wave energy density(dB) of classical PPFEM



(d) In-plane wave energy density(dB) of hybrid PPFEM



(b) Flexural wave energy density(dB) of hybrid PPFEM



(c) In-plane wave energy density(dB) of classical PPFEM

Fig.4-3 Energy density of open box-type plate structure

위의 구조물은 알루미늄 재료의 열린 상자형 평판에 10000Hz에서 100N으로 점 가진했을 때, 내부 손실계수가 0.02일 경우 기존의 파워흐름유한요소법과 혼합형 파워흐름유한요소법의 해석결과이다.

두 방법에서 약간의 차이는 나지만 거의 같은 결과를 제시해 증을 확인할 수 있다. 굽힘에너지밀도는 1~2dB 정도의 차이를 보였으나 면내파의 경우는 최고값에서 3dB의 차이를 나타낸 것 이외에 다른 부분에서는 경향이 거의 일치하였다. 이러한 차이는 주파수가 높고 손실계수가 0.02로 조금은 큰 값을 사용했기 때문으로 판단된다.

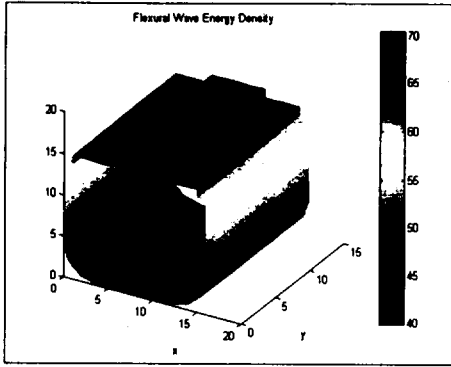
#### 4.3 선박의 중앙평행부의 외갑판의 파워흐름유한요소해석

위의 절에서 혼합형 파워흐름유한요소법의 적용 가능성을 검토하였으므로 이번에는 해석 모델을 선박의 외형 모양의 블록 형태의 복합평판구조물을 택하였다.

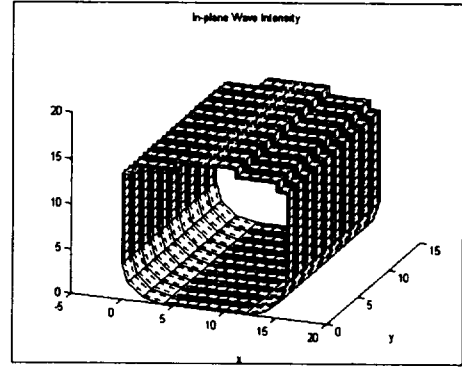
평판에 수직으로 바닥의 중심에 100N의 점가진을 하였으며 위와 마찬가지로 10000Hz에서 손실계수 0.02로 해석하였다.

이 모델의 혼합형 파워흐름유한요소해석 결과는 아래와 같고 마찬가지로 열린 상자구조물의 해석 결과와 같은 결과를 얻을 수 있었다.



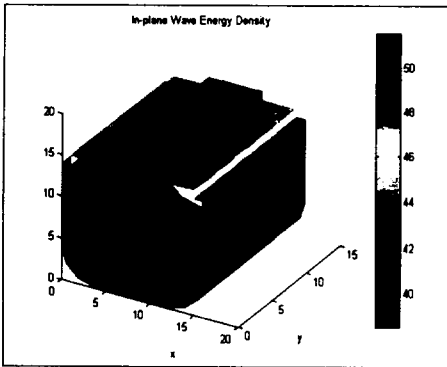


(a) Flexural energy density (dB)



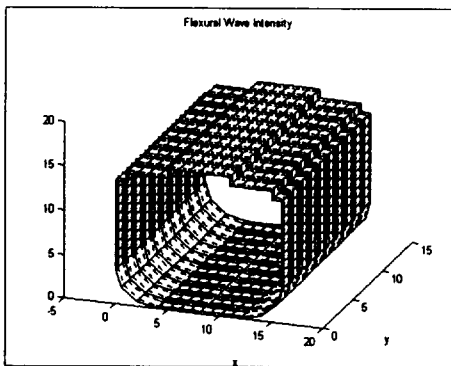
(b) In-plane wave intensity

Fig.4-5 Wave intensity of ship's parallel body



(b) In-plane energy density (dB)

Fig.5-4 Energy density of ship's parallel body



(a) Flexural wave intensity

## 5. 결론

본 연구에서는 기존 파워흐름해석법의 경계조건에 파워투과, 반사계수가 아닌 통계적에너지해석법의 연성손실계수를 이용한 새로운 경계조건을 면내파(in-plane wave)까지 확장하여 혼합형 파워흐름해석을 수행하고, 마찬가지로 기존의 파워흐름유한요소법에도 혼합형 경계조건을 이용한 연결요소행렬을 새롭게 작성하여 혼합형 파워흐름유한요소해석을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 평판요소의 손실계수가 작아 통계적에너지해석법의 가정에 가까워지면 기존의 파워흐름해석법의 에너지밀도결과와 연성손실계수를 이용한 혼합형 파워흐름해석의 결과가 일치됨을 알 수 있었다.
- 2) 이러한 경향은 하나의 파동뿐만 아니라 면내파의 연성까지 확장하더라도 같은 결과를 얻을 수 있었다.
- 3) 파워의 방향을 나타내는 인텐시티의 경우는 에너지밀도와는 달리 주파수와 손실계수에 상관없이 두 방법의 결과가 거의 일치하였다.
- 4) 통계적에너지해석법의 연성손실계수를 이용해 연결요소행렬을 구성하여, 혼합형 파워흐름유한요소해석을 복합평판구조물에 적용해 본 결과 위에서와 같은 경향을 얻을 수 있었다.
- 5) 통계적에너지해석법은 구조요소내의 파워의 흐름을 알 수 없는데 반해, 혼합형 파워흐름해석은

구조요소내의 파워의 흐름을 알 수 있는 장점이 있다.

6) 실제 금속 평판구조물은 손실계수가 매우 작으므로 많은 요소간의 연성 정보를 가지고 있는 통계적에너지해석법을 파워흐름해석법에 이용하면 두 방법의 단점을 극복할 수 있는 가능성이 있을 것으로 생각된다.

7) 추후 에너지밀도의 정확성을 높이기 위해서 요소 내의 에너지를 평균한 값을 경계에서의 에너지로 사용하는 알고리즘을 개발할 필요가 있다고 생각된다.

[10] 서성훈, 2000, "다양한 형상의 구조물에 대한 파워흐름유한요소해석", 공학석사학위논문, 서울대학교

#### 참고문헌

[1] R. H. Lyon, R. G. Dejong, 1995, "Theory and Application of Statistical Energy Analysis" Butterworth-Heinemann, Oxford

[2] R.S. Langley, 1995, "On the vibrational conductivity approach to high frequency dynamics for two-dimensional structural components", Journal of Sound and Vibration, 182(4), pp. 637~657

[3] L. Cremer, M. Heckl, E.E. Ungar, 1973, "Structure-Borne Sound", Springer-Verlag, Berlin.

[4] O.M. Bouthier, R.J. Bernhard, 1995, "Simple Models of the energetics of transversely vibrating plates," Journal of Sound and Vibration, 182(1), pp.149~164

[5] D.J. Nefske, S.H. Sung, 1989, "Power Flow Finite Analysis of Dynamic Systems: Basic Theory and Application to Beams," J. Vib. Acoustics, Stress and Reliability in Design, 111, pp. 94~100

[6] P.E. Cho, 1993, "Energy Flow Analysis of Coupled Structures," Ph.D. Dissertation, Purdue University

[7] A.N. Norris and C. Vemula, 1995, "Scattering of Flexural Waves on thin plates," Journal of Sound and Vibration, 181(1), pp. 115~125

[8] Jack R. Vinson, "Structural Mechanics: The Behavior of Plates and Shells", John Wiley & Sons, New York London Sydney Toronto

[9] 박도현, 1999, "연성된 평판 및 상자형 구조물의 진동 파워흐름해석", 공학석사학위논문, 서울대학교