

# 과도 입력파위에 대한 보와 평판의 파워흐름해석 Transient Power Flow Analysis of Beam and Plate

황 대 응\* · 홍 석 윤† · 서 성 훈\* · 권 현 응\*

Dae-Woong Hwang, Suk-Yoon Hong, Seong-Hoon Seo and Hyun-Wung Kwon

(2007년 5월 1일 접수 ; 2007년 6월 19일 심사완료)

**Key Words** : Transient Input Power(과도입력파위), Power Flow Analysis(파워흐름해석법), Vibration Analysis(진동해석), Fourier Transformation(푸리에변환), Time Distribution(시간분포)

## ABSTRACT

PFA(power flow analysis) has been recognized as a useful method in vibration analysis of medium-to-high frequency ranges. Until now, PFA method has been developed for steady-state vibration problems. In this paper, PFA method has been expanded to transient problem. New energy governing equations are derived considering time dependent terms in beam and plate. Analytic solutions of those equations are found in simple beam and plate, and are verified by comparing with modal solutions.

## 1. 서 론

진동현상은 일반적으로 광범위한 주파수 대역에 걸쳐 나타나지만 모든 주파수 영역에서의 문제를 하나의 해석기법으로 다룰 수 없는 근본적인 어려움이 있다. 진동을 해석하기 위해 널리 사용되는 방법인 유한요소법(FEM)은 저주파 진동해석에 효과적으로 적용되고 있다. 그러나 주파수가 높아지면 진동파의 파장이 짧아지므로 모드형상과 같은 구조물의 변형을 충분히 고려하기 위해서는 구조물을 더욱 작은 요소로 나누거나 요소내의 절점의 수를 늘려야 하므로 계산시간과 비용이 대단히 많이 필요하게 된다. 고주파 영역에서 진동을 해석하는 기법으로 통계적 에너지해석법(SEA)은 하부구조물 당 하나의 평균적인 에너지 값만을 제시하기 때문에 하부구조물 내에서의 에너지의 공간적인 변화를 예측할 수 없고 하부구조물 내의 부분적인 감쇠치리나 파워입력과 같

은 국부적인 효과를 고려하기 어려운 문제점들을 갖고 있다.

이러한 기존의 유한요소법과 통계적 에너지해석법이 가지는 여러 가지 한계점들을 보완하고 개선하기 위해 Belov 등은 구조물의 진동에너지가 열에너지처럼 흐른다고 가정하여 파워흐름해석법(power flow analysis, PFA)을 제안하였다<sup>(1)</sup>. 파워흐름해석법은 정상상태에서 열전도방정식과 유사한 형태의 에너지 지배방정식이라는 고유의 편미분방정식을 기반으로 하기 때문에 공간상에서의 진동에너지의 전반적인 변화뿐만 아니라 진동파위의 전달경로까지 예측할 수 있고 국부적인 감쇠치리와 파워입력도 고려하기 쉽다. 따라서 파워흐름해석법은 이러한 방법들의 근본적인 한계점들을 획기적으로 극복한 방법이라 할 수 있다.

이 논문에서는 이러한 파워흐름해석법이 지금까지 주로 정상상태(steady state)에서만 고려된 점을 감안하여<sup>(2-5)</sup>, 처음으로 진동에너지의 시간 변화를 고려한 과도(transient) 문제로의 확장을 목적으로 보와 평판에 대해 파워흐름해석법을 적용하였다. 정상 상태에서 입력파위가 단절된 모델을 설정하고 이에

† 교신저자 : 정희원, 서울대학교 공과대학 조선해양공학과  
E-mail : syh@snu.ac.kr

Tel : (02) 880-8757, Fax : (02) 888-9298

\* 서울대학교 공과대학 대학원 조선해양공학과

대한 보와 평판의 에너지지배방정식을 구한 다음, 급수해법을 이용하여 시간 항이 포함된 해를 구하였다. 보와 평판에 대한 과도입력파위 문제의 해를 해석적으로 구하는 과정을 통하여 에너지의 시간에 따른 감소가 어떻게 진행되는가에 대해서도 확인하여 보았다.

## 2. 단순 보에 대한 파워흐름해석

### 2.1 횡진동의 에너지지배방정식

단순 보에 대한 PFA 과도 해석을 위해 입력 파워가 일정한 정상상태로부터 시간이 0일 때 입력 파워가 단절되는 상태를 기본 가정으로 하여 에너지지배방정식을 구성하게 된다. 기본적으로 에너지지배방정식은 에너지 손실관계, 에너지 전달관계, 그리고 에너지 평형법칙을 이용하여 구성하게 되는데, 이 과정에서 시간에 대한 평균을 취하지 않은 에너지를 기본 변수로 하여 시간을 고려한, 횡진동에 대한 에너지지배방정식을 구성할 수 있다.

$$-\frac{c_g^2}{n\omega} \frac{\partial^2 e}{\partial x^2} + n\omega e + \frac{\partial e}{\partial t} = \Pi_{in} \delta(x-x_0) \quad (1)$$

여기서  $e$ 는 파장에 대한 공간평균만을 취한 진동에너지 밀도이고,  $c_g$ 는 굽힘파의 군속도로 전파속도의 2배인 값이며,  $n$ 는 구조감쇠에 의한 내부손실계수,  $\omega$ 는 진동주파수이다. 그리고  $\Pi_{in}$ 은 입력 파워이고,  $\delta$ 는 디랙 델타 함수이다.

또한 아래와 같은 에너지 전달관계를 통하여 인텐시티에 대한 식도 얻을 수 있다.

$$q = -\frac{c_g^2}{n\omega} \frac{de}{dx} \quad (2)$$

여기서  $q$ 는 원거리영역성분의 파장에 대해 공간 평균된 보의 진동 인텐시티이다. 그리고 시간에 대한 에너지지배방정식을 풀기 위해서 초기조건(initial condition)으로 정상상태의 에너지 분포를 가정한다.

### 2.2 과도 파워흐름해석

Fig. 1은 단순 보의 가장자리가 모두 단순지지 되어있고  $L_1$  지점에 단일주파수의 횡방향 점가진에 의한 입력파위가 작용하고 있는 경우를 보여준다. 이

때, 구조물의 가장자리에는 더 이상 연결된 부재가 없기 때문에 외부로 흘러나가는 파워는 없다고 가정하고 입력파위를 기준으로 두 영역으로 나누어 해를 구한다. 입력파위의 시간에 따른 변화는 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 정상상태에서 입력파위가 순간적으로 단절되는 형태를 갖는다. 이러한 입력파위에 대해 시간 항이 포함된 에너지지배방정식을 다음과 같이 구성하고, 이를 공간과 시간에 대해 독립적인 해로 두고 풀게 된다.

$$-\frac{c_g^2}{n\omega} \frac{\partial^2 e}{\partial x^2} + n\omega e + \frac{\partial e}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

위 식의 일반적인 해를 구하기 위하여 해석적인 방법의 하나로 실제값에 빨리 수렴한다고 알려진 Lévy해 형태<sup>(5)</sup>의 단일급수를 이용하였고, 해는 다음과 같이 얻어진다.

$$e(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} e_n(x, t) \\ = \sum_{n=0}^{\infty} B_n \cos\left(\frac{n\pi}{L} x\right) e^{(k_n - n\omega)t} \quad (4)$$

여기서  $k_n = -\frac{c_g^2}{n\omega} \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2$ 로 표현된다.

이 해는 급수해로 이루어진 시간과 공간에 대한 에너지 분포를 의미하며, 여기서  $k_n$ 은 시간에 따라 에너지가 변화하는 것에 모드에 따른 항이 포함됨을 보여준다.

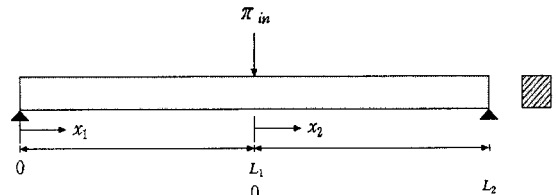


Fig. 1 Simple supports beam

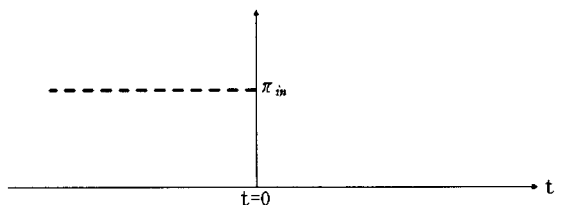


Fig. 2 Input power

$$e(x, 0) = \sum_{n=0}^{\infty} B_n \cos \frac{n\pi}{L} x = e^0(x) \quad (5)$$

여기서  $B_n = \frac{2}{L} \int_0^L e^0(x) \cos \frac{n\pi}{L} x dx$ 을 의미한다. 그리고 초기조건을 이용하여 식(5)로 에너지 분포의 계수  $B_n$ 을 결정한다.

### 3. 단순 평판에 대한 파워흐름해석

#### 3.1 횡진동의 에너지지배방정식

단순 평판에 대한 PFA 과도 해석(6) 또한 입력파위의 형태를 단순 보의 경우와 동일한 상태로 하여 에너지지배방정식을 구성하게 된다. 이 과정에서 시간에 대한 평균을 취하지 않은 에너지를 기본 변수로 하여 시간을 고려한, 횡진동에 대한 에너지지배방정식을 구성할 수 있다.

$$-\frac{c_{eff}^2}{n\omega} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) e_{ff} + n\omega e_{ff} + \frac{\partial e_{ff}}{\partial t} = \Pi_{in} \delta(x-x_0) \delta(y-y_0) \quad (6)$$

또한 인텐시티에 대한 식은 다음과 같다.

$$q_{ff} = -\frac{c_{eff}^2}{n\omega} \left( \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} \right) e_{ff} \quad (7)$$

여기서  $q_{ff}$ 는 원거리영역성분의 파장에 대해 공간 평균된 평판의 진동 인텐시티이다.  $c_{eff}$ 는 횡진동에 대한 굽힘파의 군속도이다.

#### 3.2 과도 파워흐름해석

Fig. 3은 단순 평판의 가장자리가 모두 단순지지

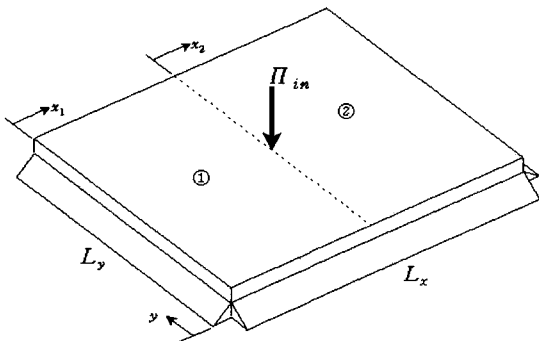


Fig. 3 Simple supports plate

되어있고 앞서 단순 보의 경우와 마찬가지로 Fig. 2에서 보는 바와 같이 입력파위를 가정하게 된다. 또한 평판은 가진 위치를 기준으로 하여 두 영역으로 나누어 해를 구하게 된다.

식(8)은 입력파위를 초기조건으로 두고 이러한 에너지의 분포가 시간에 따라 어떻게 변화하는지 알아 보기 위해 시간을 고려하여 해석적으로 풀기위한 편미분방정식이다.

$$-\frac{c_{eff}^2}{n\omega} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) e + n\omega e + \frac{\partial e}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

변수분리법을 이용하여  $x$ 방향,  $y$ 방향, 그리고 시간에 따라 각각 경계조건을 대입하여 해를 구하면 식(9)와 같이 급수해 형태의 해를 얻을 수 있다.

$$e_{mn}(x, y, t) = X_m(x) Y_n(y) T(t) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} C_{mn} \cos \left( \frac{m\pi}{L_x} x \right) \cos \left( \frac{n\pi}{L_y} y \right) e^{(p_{mn} - n\omega)t}$$

where,  $p_{mn} = -\left( \frac{c_{eff}^2}{n\omega} \left( \frac{m\pi}{L_x} \right)^2 + \frac{c_{eff}^2}{n\omega} \left( \frac{n\pi}{L_y} \right)^2 \right)$  (9)

여기서도 보의 경우와 마찬가지로  $p_{mn}$ 은 시간의 따른 에너지 변화에 공간적인 항이 포함되는 것을 보여주며, 이는 적절한 해의 형태를 말해준다.

$$e_{mn}(x, y, 0) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} C_{mn} \cos \left( \frac{m\pi}{L_x} x \right) \cos \left( \frac{n\pi}{L_y} y \right)$$

$$C_{mn} = \frac{4}{L_x L_y} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} e^0(x, y) \cos \left( \frac{m\pi}{L_x} x \right) \cos \left( \frac{n\pi}{L_y} y \right) dx dy \quad (10)$$

초기조건 역시 식(10)의 이중 역 푸리에적분을 대입하여 에너지의 계수  $C_{mn}$ 이 결정된다.

### 4. 연성 평판에 대한 파워흐름해석

#### 4.1 횡진동의 에너지지배방정식

시간에 대한 평균을 취하지 않은 에너지를 기본 변수로 하여 시간을 고려한, 횡진동에 대한 에너지 지배방정식을 구성할 수 있다.

$$-\frac{c_{eff}^2}{n_i\omega} \left( \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) e_i + n\omega e_i + \frac{\partial e_i}{\partial t} = \Pi_{in} \delta(x-x_0) \delta(y-y_0) \quad (11)$$

여기서  $i$ 는 영역 ①, ②, ③을 나타내고  $e_i$ 는 영역  $i$ 에서 평판의 굽힘파에 대한 진동에너지의 의미를 가진다. 또한 인텐시티에 대한 식은 다음과 같다.

$$q_i = -\frac{c_{gfi}^2}{n_i \omega} \left( \frac{\partial}{\partial x_i} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} \right) e_i \quad (12)$$

#### 4.2 과도 파워흐름해석

Fig. 4와 같이 서로 다른 동적 특성을 가지는 두 개의 연성 평판이 가장자리 모두 단순지지 되어있고 Fig. 2의 형태를 가지는 입력파위를 가정하게 된다. 또한 평판은 가진 위치를 기준으로 하여 두 영역으로 나누고 연성된 부분의 오른쪽을 세 번째 영역으로 두고 해를 구하게 된다.

$$-\frac{c_{gfi}^2}{n_i \omega} \left( \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) e_i + n_i \omega e_i + \frac{\partial e_i}{\partial t} = 0 \quad (13)$$

식 (13)은 시간항이 포함된 완전한 형태의 에너지지배방정식으로서 이를 해석적으로 구하기 위해 변수분리법을 이용한다. 평판의 각 영역에서의 에너지를 가정하고 모드의 합으로 식(14)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} e_i(x_i, y_i, t) &= X_{im}(x_i) Y_{in}(y_i) T_i(t) \\ &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} C_{imn} \cos\left(\frac{m\pi}{L_{xi}} x_i\right) \\ &\quad \cos\left(\frac{n\pi}{L_{yi}} y_i\right) e^{(p_{imn} - n_i \omega)t} \quad (14) \\ p_{imn} &= -\left( \frac{c_{gfi}^2}{n_i \omega} \left( \frac{m\pi}{L_{xi}} \right)^2 + \frac{c_{gfi}^2}{n_i \omega} \left( \frac{n\pi}{L_{yi}} \right)^2 \right) \end{aligned}$$

여기서 두 평판 간의 에너지의 전달 관계는 파워투과반사계수로 결정되며 이는 각 평판의 동적 특성에 의해 얻어진다.

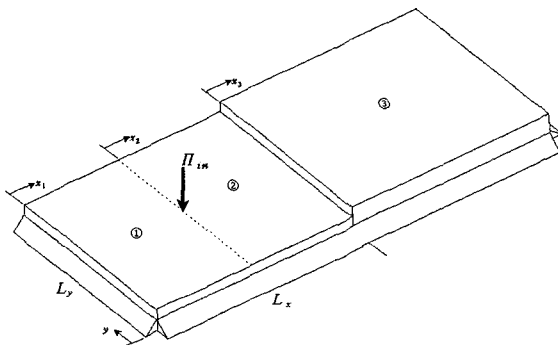


Fig. 4 Simple supports coupled plate

## 5. 결과 및 분석

### 5.1 단순 보의 과도 해석

Fig. 5와 Fig. 6은 시간  $t=0$ 인 위치에서 내부순실계수가 0.1로 동일하고 주파수가 1,000 Hz와 4,000 Hz로 다를 경우의 에너지밀도 분포를 비교한 그림이다. PFA 결과가 모드의 합으로 나타나는 고진해의 경향을 잘 따르는 것을 알 수 있으며 각각의 초기조건으로 입력되었던 정상상태의 에너지를 비교함으로써 시간에 따른 에너지 감쇠를 검증할 수 있다. 또한 고주파 영역으로 갈수록 더 좋은 일치를 보여주게 되는 일반적인 PFA의 경향을 확인할 수 있다.

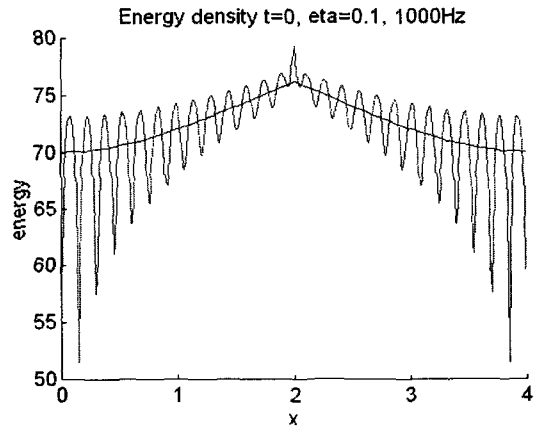


Fig. 5 Energy density distribution  $t=0$  ; - : classical solution, - : proposed solution

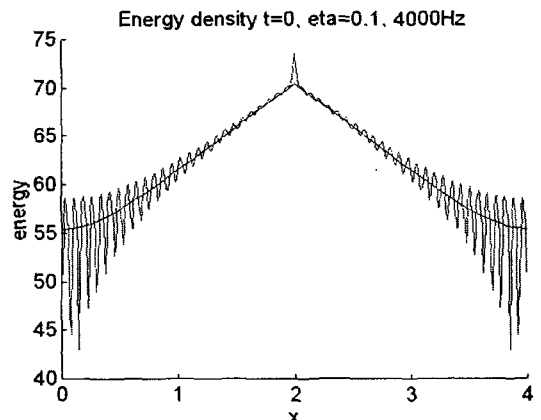


Fig. 6 Energy density distribution  $t=0$  ; - : classical solution, - : proposed solution

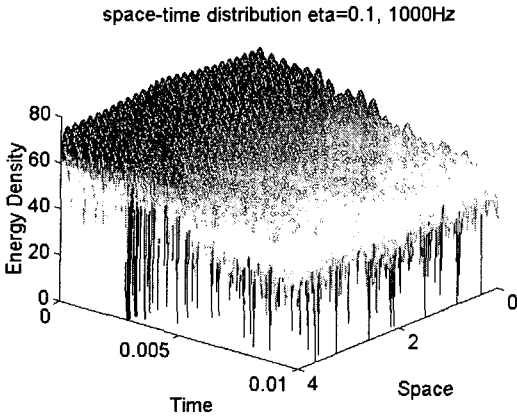


Fig. 7 Space-time distribution of proposed energy

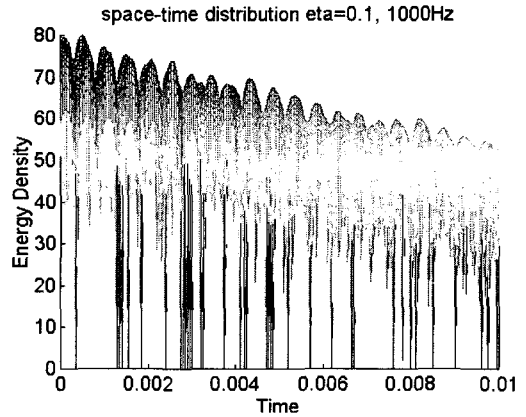


Fig. 9 Time distribution of classical solution energy

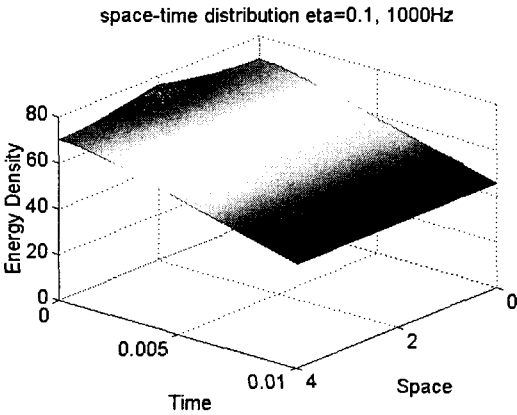


Fig. 8 Space-time distribution of classical solution energy

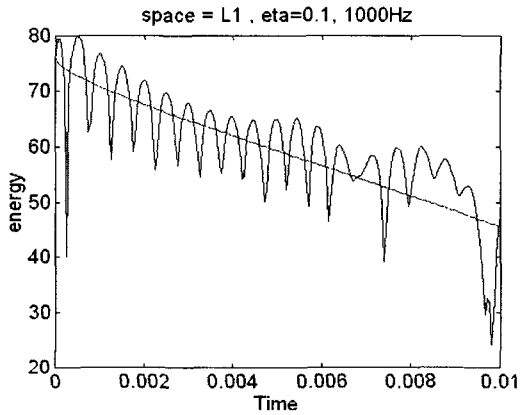


Fig. 10 Comparison of PFA and classical solution energy  $x = x_0$ ; - : classical solution, - - : proposed solution

Fig. 7과 Fig. 8은 과도 PFA 에너지와 고전해 에너지의 공간과 시간의 변화를 동시에 표현될 수 있도록 주파수의 10배의 주기까지 나타낸 그림이다.

보의  $x$ 방향 분포 변화가 그림에서 알 수 있듯이 상당히 짧은 시간 내에 이루어지게 된다. 가진점의 최고값이 공간적으로 평균적인 값을 갖게 되는 시간이 대략 주파수의 2~3주기 내로 볼 수 있으며 시간에 따라 변화하는 것이 그 이후로 이어지게 된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 고전해 에너지를 가로축을 시간영역으로 정하고 구한 결과이다. 에너지가 dB값이기 때문에 선형적으로 감소하는 경향을 두 가지의 경우 공통적으로 보이고 있으며 이러한 결과를 비교해보기 위하여 Fig. 10과 같이 보의 한 지점에서 두 값을 구하였고 해가 잘 일치하는 것으로 PFA 과도 해석이 타당하다는 것을 확인하였다.

### 5.2 단순 평판의 과도 해석

Fig. 11과 Fig. 12는 초기조건으로 입력되는 정상상태의 에너지 분포와 이 장에서 구한 해석적인 과도 파워흐름해석의 결과의 처음 값을 비교해 본 결과이다. Fig. 13을 통하여 평판의 가진 부분을 중심으로 잘라서 비교해 본 결과 Fig. 11로 표현되는 정상상태의 에너지 분포의 최고점이 약간 높은 값을 갖는다는 것을 확인할 수 있다. 이는 정상상태의 경우가 모드해의 합이 더 명확하게 나타난다는 것을 의미한다. 과도 해석의 경우 초기조건을 따르지만 아주 작은 오차 발생을 나타낸다고 할 수 있다. 그러나 이 차이는 매우 작으며 실제 입력된 정상상태의 에너지 분포를 거의 정확하게 대변할 수 있다고 볼 수 있다.

평판의 시간에 따른 에너지 밀도의 변화를 살펴보

면 가진점 위치의 에너지만 직접 줄어드는 것이 아니라 평판 전체의 에너지가 감소하는 것을 약간 늦

추어 주는 역할로 가진점의 집중 에너지가 작용한다는 것을 확인할 수 있다. 또한 약 2~3주기 내에 가진점에 집중된 에너지가 평판 전체로 평균되어 분포하고 그 이후에 시간에 따른 전체 에너지의 감쇠가 이루어지는 경향을 나타낸다.

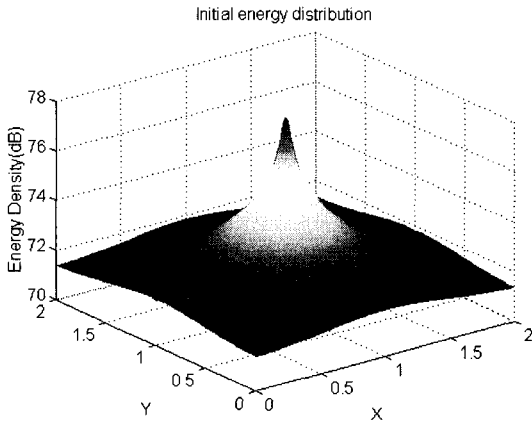


Fig. 11 Initial condition energy distribution

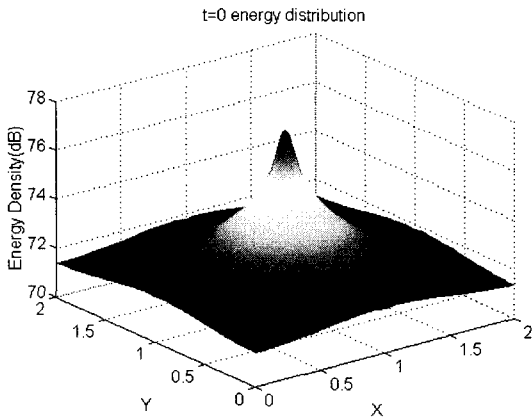


Fig. 12 Initial condition energy distribution

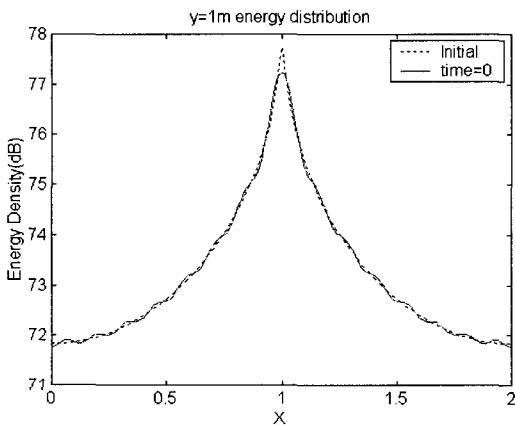


Fig. 13 Comparison of initial and time energy

### 5.3 연성 평판의 과도 해석

Figs. 14~17은 가진점을 중심으로 집중된 에너지가 평판 전체에 분산되는 과정을 짧은 시간 영역 내에서 얻은 결과이다. 왼쪽 평판의 경우 과위투과반사가 이루어지는 부분에서의 에너지 변화가 왼쪽 끝단의 에너지 변화보다 더디게 이루어지는 것을 볼 수 있는데 이것은 평판 간의 에너지 전달 과정에서 에너지 분산이 느리게 진행된다는 것을 보여준다. 그리고 오른쪽 평판에서는 전달되는 에너지의 감소가 즉각적으로 나타나게 되며 왼쪽 가진 위치의 에너지보다 약간 빠르게 에너지 감쇠가 진행된다는 것을

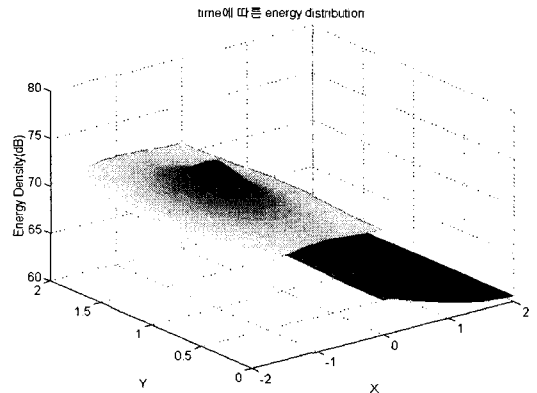


Fig. 14 Coupled plate energy density distribution

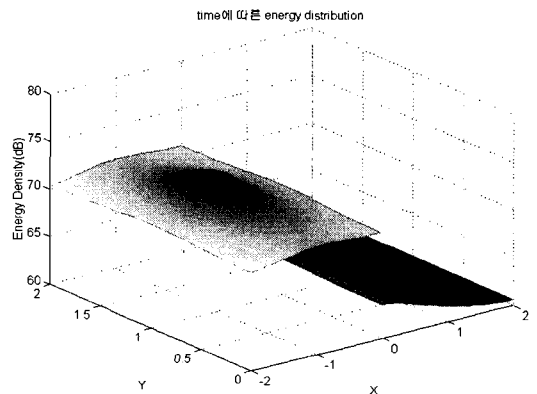


Fig. 15 Coupled plate energy density distribution

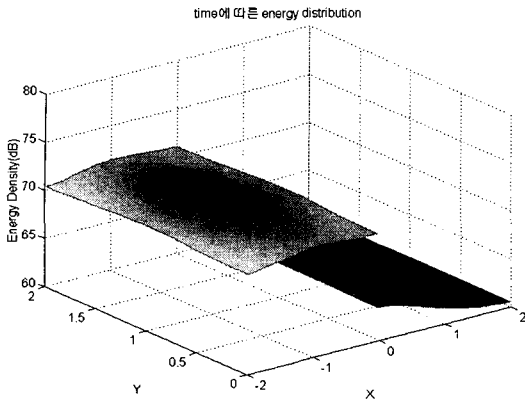


Fig. 16 Coupled plate energy density distribution

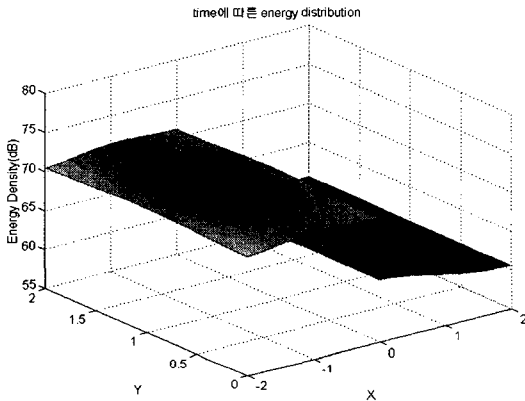


Fig. 17 Coupled plate energy density distribution

알 수 있다. 그러나 전체적으로 분산되어 골고루 평균된 에너지를 갖게 되는 시점부터는 오른쪽 평판의 에너지도 합당한 수준의 감쇠를 보여주게 된다. 이는 Fig. 18로 확인할 수 있는데 오른쪽 평판만 독자적으로 감쇠계수를 갖고 있음에도 불구하고 동적 특성을 반영함과 동시에 파워투과반사계수로 연관되는 에너지의 전달관계도 잘 반영하고 있다는 것을 알 수 있다.

연성 평판의 경우 가진력이 작용하고 있는 평판의 에너지가 조금 더 더딘 감쇠를 보여주는데 이는 평판 내에 골고루 에너지를 분산시키는 과정이 에너지 전달 관계보다 더 오래도록 작용한다는 것을 말해준다. 이는 모드를 반영하는 해석적인 해로서 갖는 당연한 결과이며 실제 해와 유사한 형태라고 생각된다. 에너지 전달 관계를 통해 연결되는 오른쪽 평판의 에너지의 변화도 개별적으로 이루어지는 것처럼 보이지만 두 평판의 연성 관계가 그러한 시간 감쇠의 효과에도 여전히 적용된다는 것을 알 수 있다.

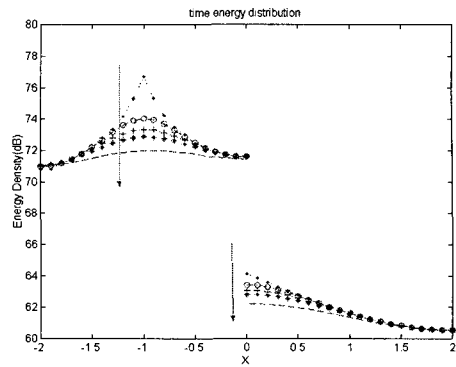


Fig. 18 Time variation for energy density

## 6. 결 론

이 논문에서는 파워흐름해석을 시간 영역으로 확장하는 데에 목적을 두고 과도입력파워 환경에 파워흐름해석을 적용하였다. 단순 보와 평판, 그리고 연성 평판의 과도 PFA 에너지배방정식을 유도하고 단순 보와 평판에 대한 고전해를 각각 시간 평균없이 구하여 이를 해석 모델에 적용하여 보았다. 이러한 과정을 통하여 정상상태로 가진되던 구조물의 진동에너지 분포가 시간에 따라 어떻게 변화하는 지에 대해 알아보았고 각각의 에너지 변화가 의미하는 결론을 얻을 수 있었다.

이 논문 연구를 통해 수행된 결과들로부터 이 논문의 종합적인 결론을 다음과 같이 얻었다.

(1) 구조물의 진동에너지가 시간에 따라 감소하는 형태는 먼저 공간적으로 에너지를 분산하여 고른 에너지 분포를 유지하려는 경향을 띤다. 전체적인 에너지의 감쇠 중의 짧은 시간 영역 내에서는 공간적인 평균에너지를 취하려는 과정을 진행하고 이와 동시에 큰 시간 영역 동안 에너지가 순차적으로 감쇠하는 경향을 띤다는 것을 알 수 있다.

(2) 또한 시간에 따른 에너지의 감쇠는 각 구조물의 기하학적 형상과 물성치를 포함하는 감쇠계수를 통하여 이루어지며, 이는 에너지의 시간 변화가 단순히 주파수에만 의존하지 않는다는 것을 말해준다.

(3) 연성 평판의 결과를 통하여 파워흐름해석법의 구조물 연성관계를 이용하면 각각 독립적인 형상과 물성치를 갖는 구조물들의 연성 구조에 대한 시간 변화도 타당한 결과를 얻을 수 있다.

(4) 마지막으로 파워흐름해석법을 통하여 과도입력파워의 문제를 접근하는 것은, 파워흐름해석법의

대표적인 특징인 국부적 감쇠처리와 공간적인 에너지 분포 변화를 타당하게 대변해주는 과정이며, 파워흐름해석법은 단순한 정성적 가정이 아닌 구조물의 특성을 반영하여 시간 영역으로 확장할 수 있다는 것을 확인하였다.

## 후 기

이 연구는 ASERC(첨단조선공학연구센터)의 지원으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Belov, V. D., Rybak, S. A. and Tartakovskii, B. D., 1997, "Propagation of Vibrational Energy in Absorbing Structures", *J. Soviet Physics Acoustics*, Vol. 23, No. 2, pp.115~119.
- (2) Cho, P. E., 1993, "Energy Flow Analysis of Coupled Structures", Ph.D. Dissertation, Purdue University.
- (3) Bouthier, O. M. and Bernhard, R. J., 1992, "Models of Space-averaged Energetics of Plates", *AIAA J.*, Vol. 30, No. 3, pp. 616~623.
- (4) Bouthier, O. M. and Bernhard, R. J., 1995, "Simple Models of the Energetics of Transversely Vibrating Plates", *J. Sound Vib.*, Vol. 182, No. 1, pp. 149~164.
- (5) Rudolph S., 2004, "Theories and Applications of Plate Analysis", pp. 132~135.
- (6) Park, D.-H., Hong, S.-Y. and Kil, H.-G., 1998, "Vibration Power Flow Analysis of Coupled Co-planar Rectangular Plates", *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 8, No. 6, pp. 1053~1061.
- (7) Park, J.-H., Hong, S.-Y. and Kil, H.-G. 1999, "Wave Scattering and Vibration Power Flow Analysis of Plate-beam Coupled Structures", *Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference*, pp. 481~490.
- (8) Seo, S.-H., 2000, "Power Flow Finite Element Method for the Various Plate Structures in Shape", Master's degree, Dissertation, Seoul National University.
- (9) Seo, S.-H., Hong, S.-Y., Park, D.-H. and Kil, H.-G., 2000, "Development of PPFEM, the New Vibroacoustic Analysis System in Medium-to-high Frequency Ranges", *Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference*, pp. 325~333.
- (10) Seo, S.-H., Park, Y.-H., Hong, S.-Y., Kil, H.-G., 2001, "Vibration Analysis of 2300 TEU Container Ship Using Power Flow Analysis Program in Medium-to-high Frequency Ranges", *Proceedings of the KSNVE Autumn Annual Conference*, pp. 1061~1066.
- (11) Park, D.-H., Kim, I.-H., Hong, S.-Y. and Kil, H.-G., 2002, "Power Flow Analysis for Medium-to-high Frequency Vibration of Shell Structures", *Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference*, pp. 1177~1184.
- (12) Lee, H. W., Hong, S. Y., Park, Y. H., Kil, H. G., Kim, C. Y., Jeon, J. J., and Ryu, J. S. 2002, "Vibration Experiments of the Cylindrical Structures for Verifying the Reliability of Power Flow Finite Element Method", *Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference*, pp. 290~297.
- (13) Seo, S.-H., Hong, S.-Y. and Kil, H.-K. 2004, "Wave Transmission Analysis of Beam/Plate Point-coupled Structures", *Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference*, pp. 457~467.
- (14) Lee, J.-M., Hong, S.-Y. and Park, Y.-H., 2005, "Research on Frequency Average Analysis of Vibrational Power Flow Analysis", *Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference*, pp. 971~977.