

# 가진 하부시스템의 유한 모빌리티를 고려한 연성 보의 SEA 적용

## SEA of Coupled Beams considering Finite Mobility of Excited Subsystem

임종윤\*·홍석윤\*\*

Jong-Yun Lim and Suk-Yoon Hong

**Key Words** : Statistical Energy Analysis(통계적 에너지 해석), Subsystem(하부시스템), Mobility(모빌리티), Coupling Loss Factor(연성손실계수), Modal Density(모드 밀도), Power Flow(파워흐름)

### ABSTRACT

SEA is a useful tool to predict noise and vibration response in high frequency region but has a weak point not to be able to express modal behavior in low frequency region. For a structure with middle subsystem having relatively higher modal density than excited subsystem and receiving subsystem, we studied the possibility that the modal behavior of receiving subsystem can express by considering finite mobility of excited subsystem. For a simply three-coupled beams which is chosen for feasibility study, the response of receiving beam was investigated with varying the length & area moment of inertia of middle beam. In case that the middle beam has relatively higher modal density than exciting beam, the application to finite mobility of excited beam led to express modal behavior of receiving beam relatively well.

## 1. 서 론

기본적으로 통계적 에너지 해석법(statistical energy analysis : SEA)은 해석 주파수 대역에서 하부시스템(subsystem)의 모드 수가 많은 고주파수 영역에서 그 신뢰성을 가지게 되며, 1/1 또는 1/3 옥타브 대역 등의 대역폭을 가지는 주파수 대역에서 주파수 평균된 값으로 SEA 주요 변수와 그 응답을 나타내므로 저주파수 대역의 세밀한 모드 거동을 나타낼 수가 없다<sup>(1)</sup>. 일반적으로 고주파수 대역에서의 모드 거동은 물성치, 조립상태, 경계조건, 주위 환경 등의 여러 내재된 불확실한 요인(uncertainty)들의 작은 변화에 대해 민감하게 반응하여 구체적인 모드 거동을 분석하는 일은 의미가 적지만 저주파수 대역에서는 각각의 모드 거동이 중요한 의미를 갖게 된다. SEA 에서 모드 거동을 나타내지 못하는 가장 큰 이유 중의 하나는 하부시스템의 모드 거동을 나타내는 모빌리티에 대해 무한 모빌리티(infinite mobility)를 사용하는 데 있다. 무한 모빌리티는 하부시스템이 무한한 구조물이라 가정하여 구한 모빌리티로 해석적으로 구하기가 용이하며, 고주파수 대역에서는 실제 구조물의 유한 모빌리티(finite mobility)가

무한 모빌리티에 근접하므로 SEA 에서는 무한 모빌리티를 사용하는 것이다.

SEA 에서 사용되는 연성손실계수는 하부시스템 사이의 연결부가 반무한 구조물 사이에 강체연결되어 있다고 가정하여 구한 것이다. 실제 구조물의 연결부에 대한 구체적인 정보없이 하부시스템 사이의 연결부를 강체연결로 할 경우에는 저주파수 대역 뿐만 아니라 고주파수 대역에서도 진동전달을 적절히 나타낼 수가 없다. 이런 이유로 SEA 는 구조물과 인접 음향 공간간의 소음 경로를 분석하는 데 쉽게 적용할 수 있는 반면에 하부시스템 사이의 진동 전달이 중요한 구조 기인 소음 및 진동에서는 연결부에 대한 구체적인 정보를 필요로 하게 된다.

본 연구에서는 모드 해를 구하기 용이한 연성보에 대해, 가진 하부시스템(excited subsystem)의 유한 모빌리티를 고려하여 SEA 를 수행하는 경우 저주파수 대역에서의 모드 거동을 나타낼 수 있는 조건에 대해 살펴보았다. 또한 하부시스템 사이의 연결부에 대한 정보를 구체적으로 얻기 위해 개선된 연성손실계수를 구하여 SEA 에 적용하였다.

## 2. 연성 보

### 2.1 모드 해에 의한 급힘진동변위 및 에너지

Fig. 1 과 같이 3 개의 보가 연속적으로 연결되어 있는 연성 보에 대해, 연결부위는 편으로 지지

\* 아주대학교 시스템공학과 대학원, 한국 ESI

E-mail : ljjy@esi.co.kr

Tel : (02) 3664-0073, Fax : (02) 3662-0084

\*\* 서울대학교 조선해양공학과

되어 있어 그 연결부위를 통해 굽힘모멘트만 전달된다고 가정한다. 연결부위에서 전달되는 굽힘모멘트  $T_{12}$ ,  $T_{23}$ 를 각 보에 작용하는 외력으로 고려하면 단순 조화하중에 대해 각 보에서의 굽힘진동변위는 다음 식에 의해 결정된다<sup>(2)~(4)</sup>.

$$\begin{aligned} D_1 \nabla_1^4 u_1(x_1) - m_1 \omega^2 u_1(x_1) &= F_0 \delta(x_1 - x_0) + T_{12} \delta'(x_1 - L_1) \\ D_2 \nabla_2^4 u_2(x_2) - m_2 \omega^2 u_2(x_2) &= -T_{12} \delta'(x_2) + T_{23} \delta'(x_2 - L_2) \\ D_3 \nabla_3^4 u_3(x_3) - m_3 \omega^2 u_3(x_3) &= -T_{23} \delta'(x_3) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

$u_i$  : 각 보의 굽힘진동변위,  $\nabla_i^4 = \frac{\partial^4}{\partial x_i^4}$  : 강성 미분 연산자

$D_i = E_i I_i$  : 각 보의 굽힘강성,  $I_i$  : 각 보의 면적모멘트

$m_i = \rho_i A_i$  : 각 보의 단위 길이당 질량,  $A_i$  : 각 보의 단면적

$T_{12}$  : 보 1과 2의 연결점에서 전달되는 굽힘 모멘트

$T_{23}$  : 보 2와 3의 연결점에서 전달되는 굽힘 모멘트

$i=1, 2, 3$

연성 보의 모든 경계가 단순지지되어 있다고 하면 각 보에서의 굽힘진동변위는 다음과 같이 각 보에서의 모드의 중첩으로 표시할 수 있다.

$$u_i(x_i) = \sum_{m=1}^{\infty} A_{im} \Phi_{im}(x_i), \quad \Phi_{im}(x_i) = \sin\left(\frac{m\pi x_i}{L_i}\right), \quad i=1, 2, 3 \quad (2)$$

식 (2)를 (1)에 대입하고 모드  $\Phi_{im}(x_i)$ 의 직교성에 의해, 식 (2)의 모드 계수  $A_{im}$ 에 대해 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} A_{1m} &= \frac{2[F_m - T_{12} \Phi'_{1m}(L_1)]}{M_1 H_{1m}} \\ A_{2m} &= \frac{2[T_{12} \Phi'_{2m}(0) - T_{23} \Phi'_{2m}(L_2)]}{M_2 H_{2m}} \\ A_{3m} &= \frac{2[T_{23} \Phi'_{3m}(0)]}{M_3 H_{3m}} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,

$M_i = m_i L_i$  : 각 보의 질량

$H_{im} = \omega_{im}^2 - \omega^2 + j\eta_i \omega_m$  : 감쇠손실계수  $\eta_i$ 를 고려

$$\omega_{im}^2 = \frac{D_i}{m_i} \left(\frac{m\pi}{L_i}\right)^4, \quad F_m = F_0 \Phi_{im}(a_0)$$

또한, 연결점에서의 기울기가 같다는 조건에 따라 연결점에서의 모멘트는

$$\begin{aligned} T_{12} &= \frac{\left[ \sum_m \frac{F_m \Phi'_{1m}(L_1)}{M_1 H_{1m}} \right]}{\left[ \sum_m \frac{\Phi_{2m}'^2(L_1) + \Phi_{2m}'^2(0)}{M_1 H_{1m}} + \sum_m \frac{\Phi_{2m}'^2(0)}{M_2 H_{2m}} \right]} - \frac{\left[ \sum_m \frac{\Phi_{2m}'^2(0) \Phi_{2m}'(L_2)}{M_2 H_{2m}} \right]^2}{\left[ \sum_m \frac{\Phi_{2m}'^2(L_2) + \Phi_{3m}'^2(0)}{M_2 H_{2m}} + \sum_m \frac{\Phi_{3m}'^2(0)}{M_3 H_{3m}} \right]} \\ T_{23} &= T_{12} \frac{\left[ \sum_m \frac{\Phi_{2m}'^2(0) \Phi_{2m}'(L_2)}{M_2 H_{2m}} \right]}{\left[ \sum_m \frac{\Phi_{2m}'^2(L_2) + \Phi_{3m}'^2(0)}{M_2 H_{2m}} + \sum_m \frac{\Phi_{3m}'^2(0)}{M_3 H_{3m}} \right]} \end{aligned} \quad (4)$$

식 (3), (4)로부터  $A_{im}$ 을 구할 수 있으며 식 (2)에서 각 보의 굽힘진동변위  $u_i$ 를 얻을 수 있다.

이제 각 보에서의 에너지는 운동에너지와 탄성에너지의 합으로 표시되며 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} E_i &= \frac{m_i}{4} \int_0^{L_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial t}\right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial t}\right) dx + \frac{D_i}{4} \int_0^{L_i} \left[\left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i^2}\right) \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i^2}\right)\right] dx \\ &= \frac{M_i \omega^2}{8} \sum_{m=1}^{\infty} A_{im}^2 + \frac{D_i L_i}{8} \sum_{m=1}^{\infty} A_{im}^2 \left(\frac{m\pi}{L_i}\right)^4, \quad i=1, 2, 3 \end{aligned} \quad (5)$$

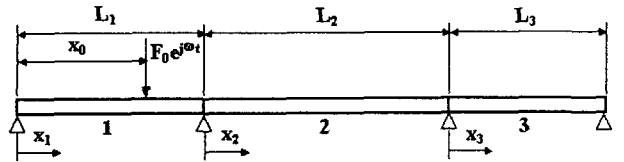


Fig. 1 Three-coupled beams system

## 2.2 가진점에서의 비연성 유한 모빌리티

이제 Fig. 1의 연성 보에 대해 가진되고 있는 보 1을 보 2와 연성시키지 않았을 때의 가진점에서의 보 1의 유한 모빌리티와 하중에 의해 입력된 파워는 다음 식으로 주어진다.

$$Y_{1,dp} = \frac{j\omega}{M_1} \sum_m \frac{\Phi_m^2(x_0)}{\omega_m^2 - \omega^2 + j\omega\omega_m \eta_1}, \quad \Pi_1 = \frac{1}{2} F_0^2 \text{Re}[Y_{1,dp}] \quad (6)$$

## 2.3 개선된 연성손실계수

연성 보의 연성손실계수를 개선하기 위해 보 1과 2, 보 2와 3의 연결점에서의 파워 전달(power flow)을 구하면 다음과 같다. 보 1에서 보 2로의 파워 전달  $\Pi_{12}$ 는

$$\begin{aligned} \Pi_{12} &= \frac{1}{2} \text{Re} \left[ T_{12}(y) \left(\frac{\partial u_1}{\partial t}(L_1)\right)' \right] \\ &= \frac{1}{2} \text{Re} \left[ (-j\omega) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2[F_m - T_{12} \Phi'_{1m}(L_1)]}{M_1 H_{1m}} \Phi'_{1m}(L_1) T_{12} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

보 2에서 보 3으로의 파워 전달  $\Pi_{23}$ 는

$$\Pi_{23} = \frac{1}{2} \text{Re} \left[ (-j\omega) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2[T_{12} \Phi'_{2m}(0) - T_{23} \Phi'_{2m}(L_2)]}{M_2 H_{2m}} \Phi'_{2m}(L_2) T_{23} \right] \quad (8)$$

이제 개선된 연성손실계수를 구하기 위해 SEA 파워 평형 방정식(power balance equation)을 이용한다.

$$\Pi_{12} = \omega \eta_{12} \left[ E_1 - \frac{n_1}{n_2} E_2 \right], \quad \Pi_{23} = \omega \eta_{23} \left[ E_2 - \frac{n_2}{n_3} E_3 \right] \quad (9)$$

여기서 모드 밀도(modal density)는 일반적인

SEA 에서 구해지는 것으로 고주파수 대역에서는 경계조건에 관계없이 다음 식으로 근사화할 수 있다.

$$n_i(\omega) = \frac{L_i}{2\pi\sqrt{\frac{D_i}{m_i}}\sqrt{\omega}}, \quad i=1,2,3 \quad (10)$$

따라서 연결점에서의 파워 전달을 고려한 개선된 연성손실계수는 식 (5), (7), (8), (9), (10)에 의해 다음과 같이 구해진다.

$$\eta_{12} = \frac{\Pi_{12}}{\omega \left[ E_1 - \frac{n_1}{n_2} E_2 \right]}, \quad \eta_{23} = \frac{\Pi_{23}}{\omega \left[ E_2 - \frac{n_2}{n_3} E_3 \right]} \quad (11)$$

여기서 연성손실계수의 개념은 SEA 에서 출발한 것이므로 모드 수가 충분한 주파수 대역에서 타당하나 본 연구에서는 연결점에서의 파워 전달과 각 하부시스템의 에너지를 저주파수 대역까지 고려한 것을 사용하고 연성손실계수는 기존의 SEA 에서 정의된 것을 이용하였다. 이는 SEA 에서 정의된 연성손실계수를 사용하더라도 파워 전달 및 에너지가 저주파수 대역까지 모드 거동이 고려되었다면 SEA 해석에 저주파수 대역까지 적용하는 것이 가능하리라는 판단에서이다.

### 3. SEA

Fig. 1 과 Table 1 의 제원을 가지는 연성 보에 대해, 보 2 의 주요 물성치의 변화에 따라 응답 하부시스템인 보 3 의 에너지 응답을 SEA 를 이용하여 살펴보았다. 가진 부시스템인 보 1 의 무한 모빌리티를 이용한 일반적인 SEA 와 보 1 의 비연성 유한 모빌리티를 이용한 SEA, 그리고 보 1 의 비연성 유한 모빌리티와 개선된 연성손실계수를 적용한 SEA 를 수행하였으며<sup>(5)</sup>, 이를 해석적인 해인 모드 해로부터 얻은 에너지 응답과 비교하였다.

#### 3.1 보 2 의 길이에 따른 보 3 의 에너지 응답

Fig. 2, ~ Fig. 7 은 보 2 의 길이가 보 1 에 비해 상대적으로 작은 경우, 같은 경우, 큰 경우에 대해 보 1 에 입력되는 파워와 응답 부시스템인 보 3 의 에너지 응답을 구한 것이다. 보 1 의 입력파워를 나타내는 그림에서 'Infinite'는 보 1 의 무한 모빌리티를 이용한 일반적인 SEA 를 수행할 때 고려되는 입력파워를 나타내며 모드 거동을 찾아볼 수 없다. 'Uncoupled Finite'는 보 1 의 비연성 유한 모빌리티를 이용하여 얻은 입력파워로서 보 1 의 비연성 모드 거동을 볼 수 있으나 연성된 보

2 나 3 의 영향을 받지 않는다. 'coupled Finite'는 실제 연성 보 1 에 입력되는 파워를 나타내며 보 2 와 3 의 영향을 받는다. Fig. 2, 4, 6 에서 알 수 있듯이 보 2 의 길이가 보 1 에 비해 길어질수록 보 1 의 모드 거동은 비연성 모드 거동에 가까워지며 비연성 모드 주위에 크기가 작은 리플(ripple)이 생긴다는 것을 알 수 있다. 이제 응답 하부시스템인 보 3 의 에너지 응답을 살펴보면, 예상했던 바와 같이 일반적인 SEA 를 사용할 경우에는 모드 거동이 나타나지 않으며 그 값은 모드 거동의 평균적인 값인 것을 알 수 있다(그림에서 'Conventional SEA'). 에너지 응답을 나타내는 그림에서 'Uncoupled Gi'는 보 1 의 비연성 유한 모빌리티를 사용하여 SEA 를 수행한 결과이고, 'Uncoupled Gi, Modified CLF'는 비연성 유한 모빌리티와 함께 개선된 연성손실계수를 적용하여 SEA 를 수행한 결과를 나타낸다. Fig. 3, 5 와 같이 보 2 의 길이가 보 1 의 길이보다 작거나 같을 경우, 비연성 유한 모빌리티를 적용한 SEA 에서 보 3 의 모드 거동을 나타내지 못하는 부분이 있으며 개선된 연성손실계수도 고려한 SEA 에서 부분적인 개선이 있으나 역시 보 3 의 연성 모드 거동을 모두 나타내지는 못하는 것을 알 수 있다. 보 2 의 길이가 보 1 보다 상대적으로 큰 경우에는 전체적으로 본 연구에서 제안한 SEA 를 수행하면 보 3 의 모드 거동을 잘 나타나고 있으며, 비연성 유한 모빌리티만 고려한 경우나 개선된 연성손실계수도 같이 고려한 경우에는 거의 비슷한 결과를 얻을 수 있다. 이는 보 2 의 길이가 보 1 에 비해 상대적으로 큰 경우에는 연성에 의한 영향이 작게 나타나서 보 1 의 모드 거동이 크게 변하지 않고 보 3 로 그대로 전달되기 때문이다. 즉 보 2 의 길이가 보 1 에 비해 상대적으로 큰 경우, 비연성 유한 모빌리티와 개선된 손실계수를 고려하면 SEA 를 수행하더라도 저주파수 대역에서 모드 거동을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

Table 1 Dimensions & physical properties of each beam

	Beam 1	Beam 2	Beam 3
Length (m)	0.5	0.2 0.7 3.0	0.6
Cross-Sectional Area (m <sup>2</sup> )	0.0015	0.0015	0.0015
Area Moment of Inertia (m <sup>4</sup> )	3.125e-10	3.125e-12 3.15e-10 3.125e-8	3.125e-10
Young's Modulus (Pa)	2.1e11	2.1e11	2.1e11
Mass Density (kg/m <sup>3</sup> )	7800	7800	7800
Damping Factor	0.01	0.01	0.01

x<sub>0</sub> = 0.2 (m), F<sub>0</sub> = 1 (N)

### 3.2 보 2의 면적모멘트에 따른 보 3의 에너지 응답

Fig. 4, 5와 Fig. 8 ~ Fig. 11은 보 2의 면적모멘트를 보 1에 비해 상대적으로 작은 경우, 같은 경우, 큰 경우에 대해 보 1의 입력파워와 보 3의 에너지 응답을 나타낸 것이다. Fig. 8에서 보듯이 보 2의 면적모멘트가 상대적으로 작은 경우, 보 1의 실제 입력파워('Coupled Finite')는 비연성 유한 모빌리티를 고려한 입력파워와 매우 유사함을 알 수 있다. 면적모멘트가 커질수록 실제 입력파워의 모드 거동은 비연성 유한 모빌리티를 고려한 입력파워와 차이가 나기 시작한다(Fig. 4, 10). 보 3의 에너지 응답은 보 2의 면적모멘트가 작을 경우, 비연성 모빌리티를 고려한 SEA와 주요 모드 거동은 잘 나타나나 그 크기가 더 크게 나타난다. 이는 기존의 SEA가 연결점에서의 연성상태를 강체연결로 가정하였기 때문이며 강체연결은 연결점에서 단순지지된 연성보다 더 강한 연성이기 때문인 것으로 생각된다. 이를 해결하기 위해 개선된 연실계수를 적용하면 그림과 같이 모드 해와 매우 일치하는 결과를 얻을 수 있다.

보 2의 면적모멘트가 커짐에 따라 모드 해로부터 얻은 보 3의 에너지 응답의 모드 거동은 비연성 유한 모빌리티로부터 얻은 에너지 응답의 거동과 차이가 났으며 개선된 손실계수를 적용하면 향상된 결과를 얻을 수 있었다.

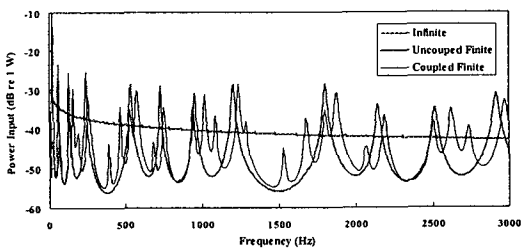


Fig. 2 Input power of excited beam 1 with  $L_2=0.2$  m

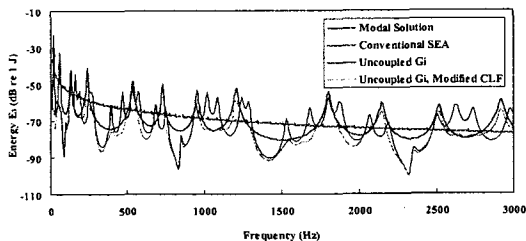


Fig. 3 Energy of receiving beam 3 with  $L_2=0.2$  m

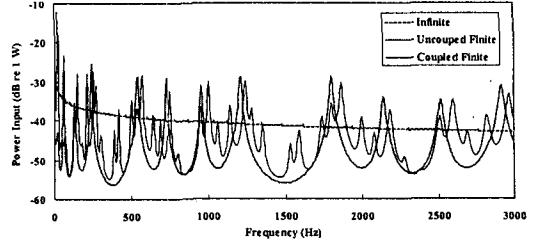


Fig. 4 Input power of excited beam 1 with  $L_2=0.7$  m

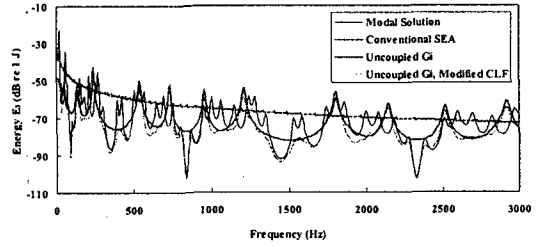


Fig. 5 Energy of receiving beam 3 with  $L_2=0.7$  m

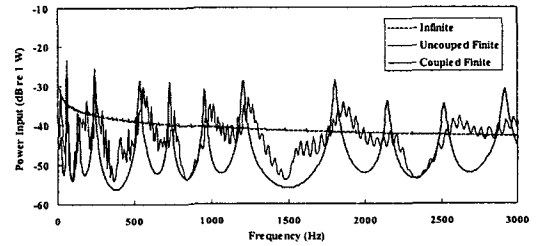


Fig. 6 Input power of excited beam 1 with  $L_2=3.0$  m

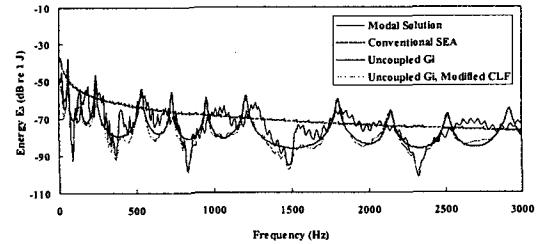


Fig. 7 Energy of receiving beam 3 with  $L_2=3.0$  m

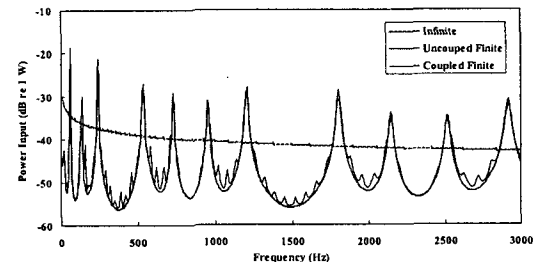


Fig. 8 Input power of excited beam 1 with  $L_2=3.125e^{-12}$  m

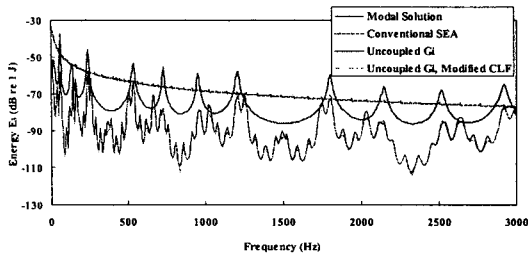


Fig. 9 Energy of receiving beam 3 with  $I_2=3.125e^{-12} m^4$

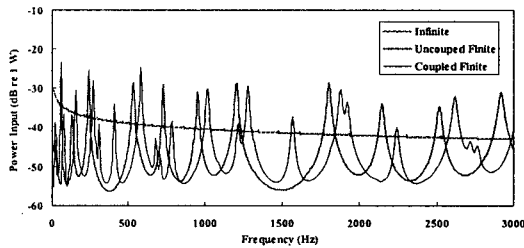


Fig. 10 Input power of excited beam 1 with  $I_2=3.125e^{-8} m^4$

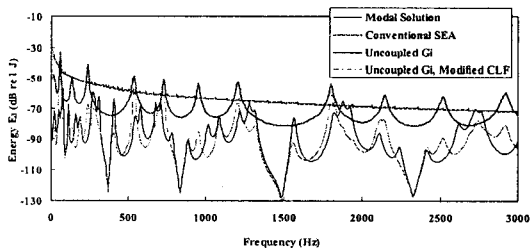


Fig. 11 Energy of receiving beam 3 with  $I_2=3.125e^{-8} m^4$

#### 4. 결론

연성 보에 대해 가진 하부시스템의 비연성 유한 모빌리티와 연결점에서의 파워전달을 고려한 개선된 연성손실계수를 적용하여 SEA 를 수행하면 저주파수 대역에서의 모드 거동을 응답 하부시스템에서 나타낼 수 있었다. 가진 하부시스템과 응답 하부시스템 사이에 있는 하부시스템 (middle subsystem)의 길이가 클수록, 면적모멘트가 작을수록 가진 하부시스템의 입력파워는 비연성된 입력파워와 유사했으며 또한 비연성 유한 모빌리티를 고려한 SEA 에서 비교적 응답 하부시스템의 모드 거동을 잘 나타낼 수 있었다. 즉 중앙의 하부시스템의 모드 밀도가 클수록 주위 하부시스템으로부터의 연성효과가 줄어들어, 가진 하부시스

템의 비연성 모드 거동이 응답 하부시스템으로 큰 왜곡없이 전달되었다. 이는 중앙의 하부시스템의 모드 밀도가 비교적 큰 경우에는 가진 하부시스템의 모드 특성을 왜곡시키지 않고 응답 하부시스템에 그대로 전달하는 것을 의미하여 중앙의 하부시스템은 일종의 완전한 필터 (smooth filter) 역할을 하는 것으로 판단할 수 있었다. 중앙 하부시스템의 모드 밀도가 상대적으로 크지 않은 경우에는 주위 하부시스템으로의 연성의 효과가 나타나 비연성 유한 모빌리티를 이용하면 모드 거동을 모두 나타낼 수는 없었다. 그러나 주요 모드 거동의 일부는 나타나며 주파수 대역폭을 조금 늘려 평균하면 기존의 SEA 보다 저주파수 대역에서 유용한 응답을 얻을 수 있으리라 예상된다.

비연성 유한 모빌리티와 함께 실제 구조물의 연결부에서의 파워흐름을 고려한 개선한 연성손실계수를 적용하면 더욱 개선된 에너지 응답을 얻을 수 있었다. 이는 기존의 SEA 가 연결부가 강체연결되어 있다라는 가정아래 연성손실계수를 적용하여 생기는 에너지 응답의 차이를 연결점에서의 파워흐름을 고려함으로써 보정할 수 있다는 의미라고 생각된다. 즉, 중앙의 하부시스템이 모드 밀도가 비교적 크다면, 개선된 연성손실계수는 모드 거동의 주파수 특성에는 큰 영향을 주지않고 응답의 크기에 주로 영향을 끼친다는 것이다.

결론적으로 가진 하부시스템과 응답 하부시스템 사이의 하부시스템이 비교적 큰 모드 밀도를 가지고 있다면 가진 하부시스템의 모드 거동의 주파수 특성이 응답 하부시스템을 지배하고 이는 가진 하부시스템의 비연성 유한 모빌리티를 고려함으로써 응답 하부시스템의 모드 거동을 살펴볼 수 있다는 것을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

- (1) R. H. Lyon and R. G. DeJong, 1995, Theory and Application of Statistical Energy Analysis, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Boston.
- (2) H. G. Davies and M. A. Wahab, 1981, "Ensemble Averages of Power Flow in Randomly Excited Beam", Journal of Sound and Vibration, Vol. 77, pp. 311-321.
- (3) J. C. Wohlever and R. J. Bernhard, 1992, "Mechanical Energy Flow Models of Rods and Beams", Journal of Sound and Vibration, Vol. 153(1), pp. 1-19.
- (4) 김현실, 강원주 등, 1993, "연결된 보의 랜덤진동해", 대한기계학회, Vol. 17(10), pp. 2491-2497.
- (5) ESI Group & Vibro-Acoustic Sciences, "AutoSEA2 User's Guide", 2005