다양한 연성 평판 진동에 대한 파워흐름해석법의 실험적 연구

Experimental Study On Power Flow Analysis of Vibration of Various Coupled Plates

[O]황 성국* · 길 현권** · 이 규형** · 이 진영** · 홍 석윤***
S.-G. Hwang, H.-G. Kil, G.-H. Lee, J.-Y. Lee, S.-Y. Hong

Key Words : Power Flow Analysis(파워흐름해석법), Loss Factor(손실계수), Input Mobility(입력모빌리티) Experimental Analysis(실험 해석), Medium-to-high Frequency (중고주파수), Vibration of Coupled Plates (연성평판진동)

ABSTRACT

The power flow analysis (PFA) can be effectively used to predict structural vibration in medium-to-high frequency ranges. In this paper, vibration experiments have been performed to observe the analytical characteristics of the power flow analysis of the vibration of various coupled plates. Those plates include two plates coupled with angles of 90° and 30°, respectively. In the experiment, the loss factor and the input mobility at a source point on each coupled plate have been measured. The data for the loss factors have been used as the input data to predict the vibration of the coupled plates with PFA. The frequency response functions have been measured over the surface of the coupled plates. The comparison between the experimental results and the predicted PFA results for the frequency response functions has been performed.

1. 서 론

복합구조물의 진동을 줄이고 또한 방사되는 소음을 줄이기 위하여서는 진동에너지의 공간적 분포와 에너지 흐름의 경로를 알기 위한 해석이 필요하다. 진동에너지 해석을 위하여 일반적으로 저주파수 영역에서는 유한요소해석법[1]이 그리고 고주파수 영역에서는 통계적 에너지해석법[2]이 널리 사용되고 있다. 유한요소 해석법의 경우는 진동수가 증가하게 되면 진동장을 형성하는 파동의 파장이 작아지므로 구조체를 더욱 작은 요소로 나누어야 한다. 따라서 고주파수 영역에서의 적용은 많은 계산 시간을 요하게 된다는 단점이 있다. 통계적 에너지해석법의 경우에는 복합구조물 각 요소의 진동에너지에 대한 공간적인 평균값만을 제공하게 된다는 단점이 있다. 역에서의 적용은 많은 계산 시간을 요하게 된다는 단점이 있다. 통계적 에너지해석법의 경우에는 복합구조물 각 요소의 진동에너지에 대한 공간적인 평균값만을 제공하게 된다는 단점이 있다.

유한요소법과 통계적 에너지해석법의 한계점들을 보완하기 위한 여러 근사법들 중에서 최근에 국외에서 연구가 활발히 진행되고 있는 파워흐름해석법 (Power Flow Analysis, PFA)을 들 수가 있다. 이 방법은 Belov등[3]에 의하여 제안되었으며, 진동에너지 흐름 형태에 따른 고유의 에너지지배방정식을 정립하고 해석함으로써 진동에너지의 공간적인 분포와 전달 경로 등을 제시할 수 있는 방법이다. 이러한 파워흐름해석법은 주로 고주파수 대역에서 적용되어지나, 중주파수 영역에까지 확대 적용될 수 있는 방법으로 인식되어 왔다[4,5,6].

* 수원대학교 기계공학과
E-mail : freehsk1116@hotmail.com
Tel : (031)225-8556, Fax : (031) 220-2527
** 수원대학교 기계공학과
*** 서울대학교 조선해양공학과

그러나 파워흐름해석법의 수치 해에 대한 신뢰성은 해석이 가능한 구조물의 해석 해와의 비교를 통하여 평가되어 왔다. 따라서 본 논문에서는 실험에 의한 결과와 파워흐름해석 해와의 비교를 통하여, 파워흐름해석법의 신뢰성을 검증하고 해석상의 특징들을 검토하고자 한다. 실험 모델로서는 두 개의 평판 요소가 90° 및 30° 각도로 각각 연결된 연성평판을 고려하였다. 실험에서는 자유 지지되어 진동하는 해당 연성평판의 손실계수를 측정하여, 파워흐름해석법의 입력 데이터로 활용하였다. 그리고 연성 평판의 여러 지점에 대한 주파수응답함수(FRF, Frequency Response Function)를 측정하고 파워흐름해석법에 의한 예측 결과와 비교를 하였다. 이러한 비교를 통하여, 파워흐름해석법이 중고주파수 대역의 구조 진동을 해석하기 위하여 효과적으로 활용될 수 있음을 보였다.

2. 파워흐름해석 (PFA)

구조 진동의 경우 면외파동(굽힘파) 및 면내파동(전단파, 종파)의 전파에 의하여 발생된다. 파워흐름해석법의 경우, 각 파동과 관련된 진동에너지 흐름 형태에 따른 고유의 에너지지배방정식을 정립하고 해석함으로써 진동에너지의 공간적인 분포와 전달 경로 등을 제시할 수 있는 방법이다. m 파동에 대한 진동에너지 방정식은 진동수 ω에서 공간-시간 평균 진동 에너지 밀도 $\langle e \rangle_m$에 대하여 다음과 같이 표시된다[4].

$$-\frac{c_{gm}^2}{\eta\omega}\nabla^2\langle e\rangle_m+\eta\omega\langle e\rangle_m=\langle \Pi\rangle_m \qquad (1)$$

여기서 η 는 구조감쇠에 의한 내부에너지 손실계수, c_{gm} 는 m파동의 에너지 전파 속도, 그리고 $\langle \Pi\rangle_m$는 가진력에 의하여 m파동에 전달되는 입력 파워를 나타낸다. 또한 m 파동에 대한 진동 인텐시티 벡터 $\langle I\rangle_m$는 다음과 같이 진동에너지밀도로 표시된다.

$$\langle \boldsymbol{I}\rangle_m=-\frac{c_g^2}{\eta\omega}\nabla\langle e\rangle_m \qquad (2)$$

식(1)과 (2)에 해당 구조물의 경계에서의 경계조건을 적용함으로써 진동에너지 밀도와 진동 인텐시티 벡터를 구할 수 있게 된다. 자유지지된 연성 평판의 경우 경계 지점으로부터 입력 파워가 없다는 경계조건을 고려하게 된다. 또한 평판요소간의 연결부분에서는 파동들간의 연성이 발생하므로 파동들간의 연성에 의한 에너지 투과와 반사 현상을 나타내기 위한 경계조건을 고려하여야 한다. 이를 위하여 반무한 평판을 고려한 파동전달법([7])을 적용한다. 해를 구하기 위한 방법으로서는 해석적 방법을 이용할 수 있으며, 또한 식(1)과(2)의 해를 구하기 위하여 유한요소법을 이용하는 파워흐름유한요소법(PFFEM, Power Flow Finite Element Method)[8]을 적용할 수 있다. 본 논문에서는 진동 에너지 밀도를 series 형태로 나타내어 해를 구하는 해석적 방법을 적용하기로 하며, 자세한 적용 방법은 참고문헌 [9]를 참고할 수 있다.

파워흐름해석법 적용시 입력 파워의 시간 평균값은 가진 지점의 모빌리티 Y_m 를 이용하여 다음과 같이 고려할 수 있다.

$$\langle \Pi\rangle_m=\frac{1}{2}|F|^2 Re\{Y_m\} \qquad (3)$$

면외가진의 경우 굽힘파동과 관련된 입력파워를 고려하며, 중고주파수 영역에 대하여, 무한 평판에 대한 모빌리티 값을 다음과 같이 고려할 수 있다.

(4)

여기서 $B=h^3/[12(1-\nu^3)]$, h,ρ,ν는 평판의 두께와 밀도 및 Poisson비를 나타낸다.

3. 실험 해석

연성구조물에 있어 면외 가진 경우라도 연결지점에서 발생하는 파동 연성에 의하여 면외 및 면내 진동이 동시에 발생한다. 파워흐름해석법에 대한 입력 변수로서 실험으로 구할 수 있는 진동 특성으로서는 내부손실계수와 입력파워를 고려할 수 있다. 본 연구에서는 면외 및 면내 진동에 대한 내부손실계수 값은 같다고 가정한다. 또한 실험에서는 면외가진을 고려하여 면내진동은 면외진동에 비하여 무시할 수 있다고 가정한다.

연성평판의 내부감쇠를 측정하기 위하여 2개의 하부시스템의 조합으로 나누게 되면, 파워평형조건은 중심 주파수 ω 를 갖는 주파수 대역 폭에 대해서 다음과 같은 식으로 표현된다[10].

$$\{\Pi\}=\frac{1}{\omega}[E]\{\eta\} \qquad (5)$$

여기서

$$\{\eta\}=\begin{Bmatrix}\eta_1\\ \eta_2\end{Bmatrix},\quad \{\Pi\}=\begin{Bmatrix}\Pi_1\\ \Pi_2\end{Bmatrix},\quad [E]=\begin{bmatrix}E_{11}E_{21}\\ E_{12}E_{22}\end{bmatrix} \qquad (6)$$

η_i와 Π_i는 i 하부시스템의 내부손실계수와 해당 하부시스템에 가해지는 입력 파워를 나타낸다. 그리고 E_{ij}는 j 하부시스템에 입력 파워가 가해지는 경우 i 하부시스템에 발생되는 진동에너지의 공간 및 시간 평균값을 나타낸다. 그러므로 내부손실계수는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\{\eta\} = \frac{1}{\omega}[E]^{-1}\{\Pi\} \tag{7}$$

그러므로 식(7)은 각 하부시스템을 가진 하면서 입력파워와 하부시스템의 진동에너지를 측정함으로써 내부감쇠계수가 결정될 수 있음을 의미한다. 입력파워는 식(3)에서와 같이 가진 지점에서의 입력 모빌리티를 측정함으로써 구할 수 있다.

실험 모델은 두 종류의 연성 평판으로서 두 개의 평판 요소가 90° 및 30° 각도로 각각 연결된 연성평판을 고려하였다. 이 연성평판의 재질은 강이며 평판 요소의 두께는 $0.003m$이며, 평판 요소의 크기는 각각 $0.85\times0.7m$, $0.65\times0.7m$ 로 비대칭 연성평판에 해당한다. 그림 1은 30° 각도로 연결된 연성평판의 실험 배열을 보여준다. 내부손실계수를 구하기 위한 실험으로서는 두 종류 연성평판 각각에 대하여 가진 지점으로 각 평판 요소마다 3 지점 즉 총 6 지점을 선정하고 각 가진 지점에 대하여 입력 파워를 측정하였다. 이 경우 가진 지점은 입력 모빌리티의 실수 값이 주파수 영역에 걸쳐서 상대적으로 균등한 값을 갖는 지점을 택하였다. 또한 각 가진 지점을 가진 하면서 한 평판 요소 당 임의 30-40 지점에서 가속도를 측정하였다. 이 경우에 가진 조건으로 충격해머를 이용하였고, 가역성의 원리를 이용하여 가진 지점에 가속도계를 부착 시키고, 충격 해머를 이용하여 70 지점을 차례로 가진 시키면서 주파수응답함수 값을 측정하였다. 그러므로 단위 가진력에 대한 입력 파워 및 가속도 값으로 고려한 경우에 해당한다.

그림 1. 자유지지 된 연성평판(30°)의 실험 배열

4. 결과 및 고찰

그림 2는 90°로 연결된 연성평판의 경우 1/3 옥타브 주파수 대역에 대한 가진 지점에서의 입력 모빌리티 값을 보여준다. 연성평판에 대한 모빌리티가 주파수가 증가할수록 무한평판 값에 근사해 감을 알 수 있다. 그림 3은 30°로 연결된 연성평판의 경우 주파수에 따른 손실계수 측정값을 보여 준다. 손실계수의 일반적인 경향은 주파수 증가에 따라 감소하고 있음을 알 수 있다. 또한, 그림 4(a),(b)는 90° 및 30°로 각각 연결된 연성평판에 대한 주파수응답함수의 실험 결과와 파워흐름해석법에 의한 예측 결과와의 비교를 보여준다. 90°로 연결된 연성평판의 경우(그림 4(a)), 가진 지점(x = 1.091m y = 0.139m)에 대한 측정 지점(x = 0.608m, y = 0.265m)에서 구한 주파수응답함수를 고려하며, 30°로 연결된 연성평판의 경우(그림4(b))에는 가진 지점(x = 1.314m y = 0.368m)에 대한 측정 지점(x = 0.535m, y = 0.280m)에서 구한 주파수응답함수를 고려하였다 실험 결과와 파워흐름해석 결과를 비교하여 보면, 약 300 Hz 이상부터는 파워흐름해석 결과가 실험 결과를 잘 예측하고 있음을 알 수가 있다. 또한 약 100 Hz까지도 주파수 의존도를 비교적 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 다양한 연성 평판 진동에 대한 파워흐름해석법의 실험적 연구를 수행하였다. 실험 모델로서는 두 개의 평판 요소가 90° 및 30° 각도로 각각 연결된 연성평판을 고려하였다. 실험에서는 자유 지지되어 진동하는 해당 연성평판의 손실계수를 측정하여, 파워흐름해석법의 입력 데이터로 활용하였다. 그리고 연성 평판의 여러 지점에 대한 주파수응답함수를 측정하고 파워흐름해석법의 예측 결과와 비교를 하였다. 이러한 비교를 통하여, 파워흐름해석법이 중고주파수 대역의 구조 진동을 해석하기 위하여 효과적으로 활용될 수 있음을 보였다.

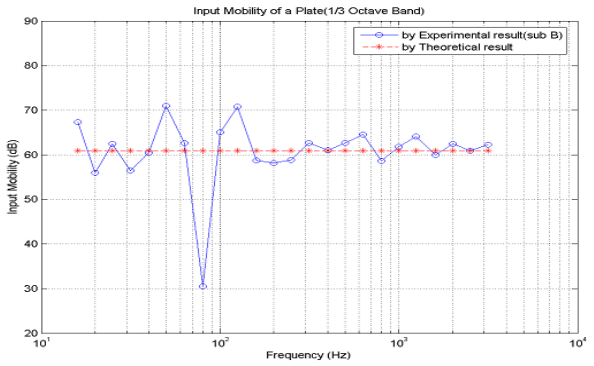


그림 2 90°로 연결된 연성평판에 대한 가진 지점 입력 모빌리티 실험 결과와 무한평판 값과의 비교.

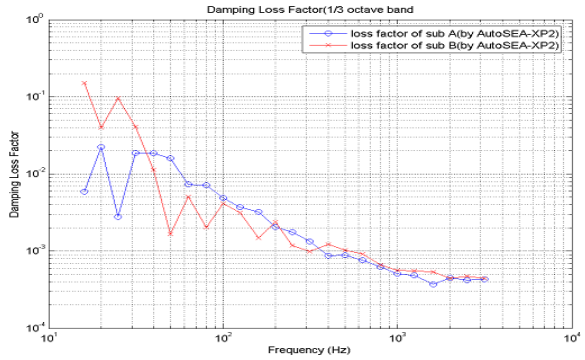
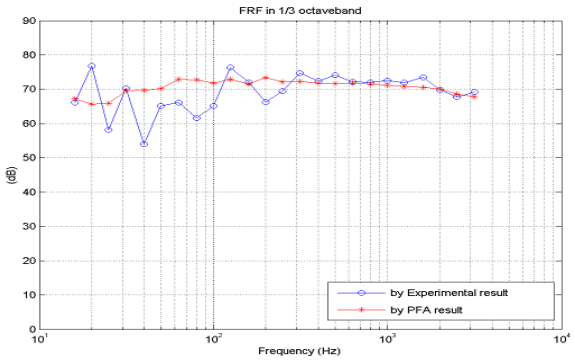


그림 3. 30°로 연결된 연성평판에 대한 각 세부 시스템의 내부손실계수

(a)



(b)

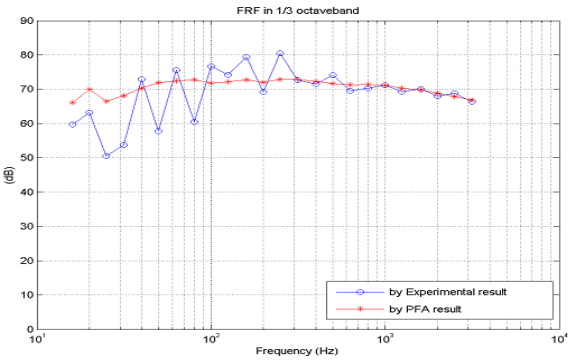


그림 4. (a) 90° 및 (b) 30° 로 각각 연결된 연성평판에 대한 주파수응답함수의 실험 결과와 파워흐름해석법에 의한 예측 결과와의 비교.

참고 문헌

(1) O.C. Zienkiewicz, 1977, *The Finite Element Method,* 3rd ed. McGraw-Hill, LondonS.A. Hambric, "Powe Flow

(2) R.H. Lyon, Statistical Analysis of Dynamic Systems: Theory and Applications, MIT Press, 1975.

(3) V.D. Belov, S.A. Rybak, B.D. Tartakovskii, "Propagation of Vibrational Energy in Absorbing Structures,"" J. Soviet Physics Acoustics, 23(2), pp. 115-119, 1977.

(4) D.J. Nefske, S.H. Sung, "Power Flow Finite Element Analysis of Dynamic Systems : Basic Theory and Application to Beams," J. Vib. Acoustics, Stress and Reliability in Design, 111, pp.94-100, 1989.

(5) P.E. Cho and R.J. Bernhard, "A Simple Method for predicting Energy Flow Distributions in Frame Structures," 4th International Congress on Intensity Techniques, pp.347-354,1993.

(6) O.M. Bouthier, R.J. Bernhard, "Models of Space-Averaged Energetics of Plates," AIAA J., 30((3), pp.616-623, 1992.

(7) L. Cremer, M. Heckl, E.E. Ungar, Structure-Borne Sound, Springer-Verlag, Berlin, 1973.

(8) S.S. Seo, S.Y. Hong, Y.H. park, H.G. Kil,"Vibration Analysis of Vehicle Systems in Medium to High Frequemcy Ranges Using a Newly Developed PFFEM Software," Inter-Noise 2002

(9) 최재성, 길현권, 홍석윤,"임의 방향 점가진력에 의한 연성 평판 진동의 파워흐름해석", 한국소음진동공학회지, 11권 6호, 181-192, 2001.

(10) B. Cimmerman, T, Bharj, G. Borello,"Ovwerview of the Experimental Approach to Statistical Energy Analysis," SAE Noise & Vibration Conference, 97NV169, 1997.