

단순구조물 진동에 대한 파워흐름해석법의 실험적 연구

Experimental Study On Power Flow Analysis of Vibration of Simple Structures

⁰이 병철* · 길 현권** · 이 용현** · 이 효행** · 홍 석윤***

B.-C. Lee, H.-G. Kil, Y.-H. Lee, H.-H. Lee, , S.-Y. Hong

Key Words : Power Flow Analysis(파워흐름해석법), Loss Factoe(손실계수), Modal Density(모드밀도),
Experimental Analysis(실험 해석), Medium-to-high Frequency (중고주파수), Vibration of Plates (평판진동)

ABSTRACT

The power flow analysis(PFA) can be effectively used to predict structural vibration in medium-to-high frequency ranges. In this paper, vibration experiment has been performed to observe the analytical characteristics of the power flow analysis of the vibration of a plate. In the experiment, the loss factor of the plate and the input mobility at a source point have been measured. The data for the loss factor has been used as the input data to predict the vibration of the plate with PFA. The frequency response functions have been measured over the surface of the plate. The comparison between the experimental results and the predicted results for the frequency response functions showed that PFA can be an effective tool to predict structural vibration in medium-to-high frequency ranges.

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 단

점이 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 에너지 지배 방정식을 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].

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. 실험에서는 자유 지지되어 진동하는 평판의 손실계수를 측정하여, 파워흐름해석법의 입력 데이터로 활용하였다. 그리고 평판의 여러 지점에

* 수원대학교 기계공학과
E-mail : dhldark@hotmail.com
Tel : (031)225-8556, Fax : (031) 220-2494

** 수원대학교 기계공학과

*** 서울대학교 조선해양공학과

대한 주파수 응답함수(FRF, Frequency Response Function)를 측정하고 파워흐름해석 해와 비교를 하였다. 이러한 비교를 통하여, 파워흐름해석법이 중고주파수 대역의 구조 진동을 해석하기 위하여 효과적으로 활용될 수 있음을 보였다.

2. 파워흐름해석 (PFA)

구조 진동의 경우 여러 특성을 갖는 면외 및 면내 파동의 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. 일반적으로 진동에너지 방정식은 진동수 ω 에서 공간-시간 평균 진동에너지 밀도 $\langle e \rangle$ 에 대하여 다음과 같이 표시된다.

$$-\frac{c_g^2}{\eta\omega} \nabla^2 \langle e \rangle + \eta\omega \langle e \rangle = \langle \Pi_{in} \rangle \quad (1)$$

여기서 η 는 구조감쇠에 의한 내부에너지 손실계수, c_g 는 해당 파동의 에너지 전파 속도, 그리고 Π_{in} 는 가진력에 의한 입력 파워를 나타낸다. 또한 진동 인텐시티 벡터는 $\langle q \rangle$ 다음과 같이 진동에너지밀도로 표시된다.

$$\langle q \rangle = -\frac{c_g^2}{\eta\omega} \nabla \langle e \rangle \quad (2)$$

식(1)과(2)에 해당 구조물의 경계에서의 경계조건을 적용함으로써 진동에너지 밀도와 진동인텐시티 벡터를 구할 수 있게 된다. 자유지지된 단순 평판의 경우 경계 지점으로부터 입력 파워가 없다는 경계조건을 고려하게 된다. 적용 방법으로는 해석적 방법을 이용할 수 있으며, 또한 식(1)과(2)의 해를 구하기 위하여 유한요소법을 이용하는 파워흐름유한요소법(PFFEM, Power Flow Finite Element Method)[7]을 적용할 수 있다. 본 논문에서는 진동 에너지밀도를 series 형태로 나타내어 해를 구하는 해석적 방법을 적용하기로 하며, 자세한 적용 방법은 참고문헌 [8]을 참고할 수 있다.

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

$$\Pi_m = \frac{1}{2} |F|^2 Re \left\{ \frac{1}{Z_m} \right\} \quad (3)$$

그리고 중고주파수 영역을 고려하는 경우, 무한 평판에 대한 임피던스 값을 다음과 같이 고려할 수 있다.

$$Z = 8\sqrt{B\rho h} \quad (4)$$

여기서 $B = h^3/[12(1-\nu^2)]$, h , ρ , ν 는 평판의 두께와 밀도 및 Poisson비를 나타낸다.

3. 실험 해석

실험 모델은 그림 1과 같이 자유 지지된 평판으로 면외진동을 고려한다. 평판의 모드 특성은 모드밀도 n 을 측정함으로써 알 수 있으며, 이를 위하여 다음과 같은 관계를 이용할 수 있다[9].

$$n(f_c) = \frac{1}{f_2 - f_1} \int_{f_1}^{f_2} 4mA Re\{Y\} df \quad (5)$$

여기서 m , A , Y 는 단위 면적당 질량, 면적 및 입력지점의 모빌리티를 각각 나타낸다. 그리고 f_c 는 주파수 대역 $f_1 \leq f \leq f_2$ 의 중심주파수를 나타낸다. 그러므로 입력지점의 모빌리티를 측정함으로써 모드밀도를 구할 수 있다. 그러므로 해당 주파수 대역에 대한 모드 수는 다음과 같이 구해진다.

$$N(f_c) = \int_{f_1}^{f_2} n(f) df \quad (6)$$

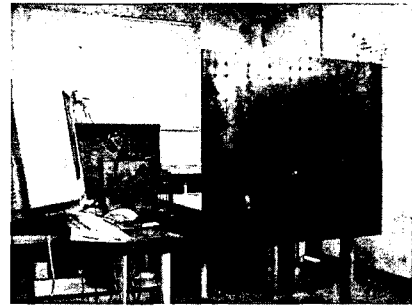


그림 1. 자유지지된 평판의 진동 측정 실험 배열

평판의 손실계수를 측정하기 위하여 다음과 같이 파워주입법(power injection method)을 이용할 수 있다[9].

$$\eta(f_c) = \frac{1}{f_2 - f_1} \int_{f_1}^{f_2} \frac{\langle \Pi_{in} \rangle 2\pi f}{\langle \frac{1}{a^2} \rangle mA} df \quad (7)$$

여기서 $\langle \Pi_{in} \rangle$, $\langle \bar{a}^2 \rangle$ 는 입력파워와 가속도의 시간에 대한 제곱평균 및 공간 평균값을 나타낸다. 그러므로 이들 값을 측정함으로써 손실계수를 구할 수 있다. 파워흐름해석법에서는 실험에 의한 손실계수 값들을 식(1)의 입력 데이터로써 이용하게 된다.

본 논문의 모드밀도와 모드 수를 구하기 위한 실험에서 가진 조건으로 충격해머를 이용하였다. 가진 지점으로 3지점을 선정하여 가진 지점에 대한 모빌리티를 구한 후, 식(5), (6)에 의하여 모드밀도와 모드 수를 구한 후 평균값을 취하였다.

손실계수를 구하기 위한 실험으로서는 가진 지점으로 3지점을 선정하고 각 가진지점에 대하여 입력 파워를 측정하였다. 또한 각 가지지점을 가진 하면서 34 지점에서 가속도를 측정하였다. 각 가진 지점을 고려하여 식(7)에 의하여 손실계수를 구하였으며, 3 손실계수 값에 대한 평균값을 취하였다. 이 경우에도 가진 조건으로 충격해머를 이용하였고, 가역성의 원리를 이용하여 가진 지점에 가속도계를 부착시키고, 충격해머를 이용하여 34 지점을 차례로 가진시키면서 주파수 응답함수 값을 측정하였다. 그러므로 단위 가진력에 대한 입력 파워 및 가속도 값으로 고려한 경우에 해당한다.

4. 결과 및 고찰

그림 2는 1/3 옥타브 주파수 대역에 대한 모드 수를 보여 준다. 실험 결과가 이론 예측 결과에 비교적 잘 일치하는 결과를 나타내주고 있다. 그리고 중심주파수 300 Hz를 갖는 대역에 이르러야 모두 수 5-6개 정도의 모드 수를 갖게 됨을 알 수 있다.

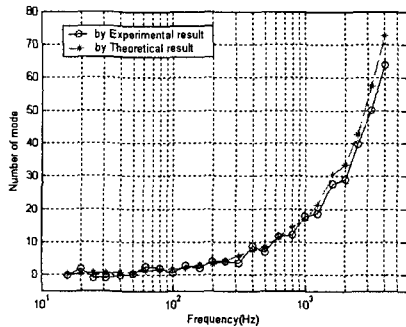


그림 2. 1/3 옥타브 주파수 대역에 대한 평판의 모드 수

그림 3은 평판의 주파수에 따른 손실계수 측정값을 보여 준다. 손실계수의 일반적인 경향은 1 kHz 이후 주파수 증가에 따라 감소하다가 4kHz에서 증가하고 있음을 알 수 있다. 그러나 본 실험에서는 최대 주파수 5 kHz까지 고려하였으므로, 보다 정확한 경향에 대한 분석은 더 높은 주파수 범위까지의 실험 데이터를 필요로 한다.

그림 4와 5는 3 가진 지점을 각각 가진 하면서 서로 다른 두 지점(No. 1과 No. 2 지점)에서의 속도 값을 보여 주고 있

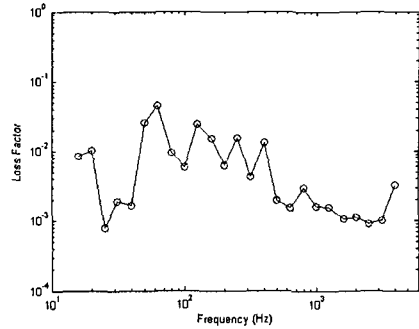
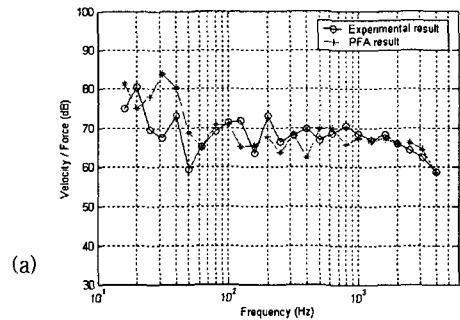
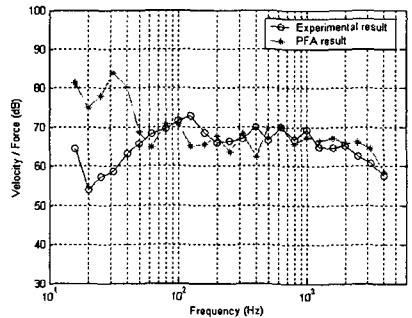


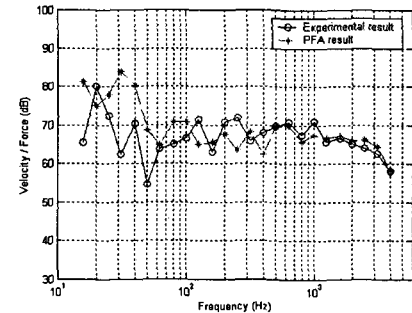
그림 3. 1/3 옥타브 주파수 대역에 대한 평판의 손실계수



(a)



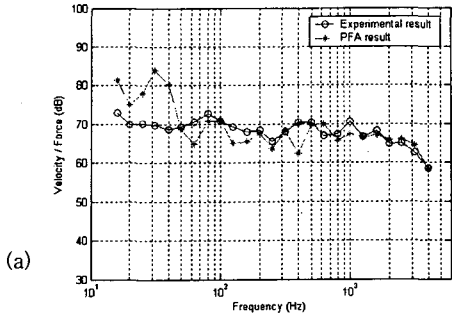
(b)



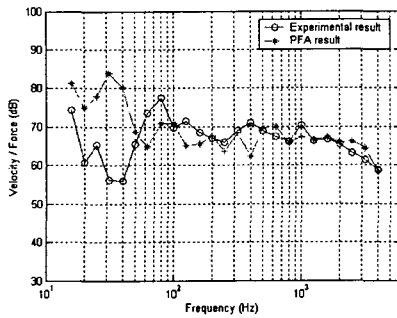
(c)

그림 4. 3 가진 지점을 각각 가진 하는 경우 측정 지점

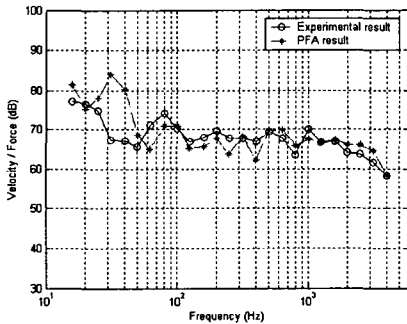
(No. 1)에서의 속도 (1/3 옥타브 대역 고려)



(a)



(b)



(c)

그림 5. 3 가진 지점을 각각 가진 하는 경우 측정 지점 (No. 2)에서의 속도 (1/3옥타브 대역 고려)

다. 이 경우 단위 가진력을 고려하였으므로 속도 값은 해당 지점에서의 주파수 응답함수를 나타낸다. 실험 결과와 파워 흐름해석 결과를 비교하여 보면, 약 500 Hz 이상부터는 파워 흐름해석 결과가 실험 결과를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 또한 약 100 Hz까지도 주파수 의존도를 비교적 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 실험에 의한 결과와 파워흐름해석해와의 비교를 통하여, 파워흐름해석법의 신뢰성을 검증하고자 하였다. 실험에서는 자유 지지되어 진동하는 평판의 손실계수를 측정하여, 파워흐름해석법의 입력 데이터를 활용하였다. 그리고 평판의 여러 지점에 대한 주파수 응답함수(FRA, Frequency Response Function)를 측정하고 파워흐름해석해와 비교를 하였다. 이러한 비교를 통하여, 파워흐름해석법이 중고주파수 대역의 구조 진동을 해석하기 위하여 효과적으로 활용될 수 있음을 보였다.

참고 문헌

- (1) O.C. Zienkiewicz, 1977, *The Finite Element Method*, 3rd ed. McGraw-Hill, London.S.A. Hambric, "Power 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) S.S. Seo, S.Y. Hong, Y.H. park, H.G. Kil,"Vibration Analysis of Vehicle Systems in Medium to High Frequency Ranges Using a Newly Developed PPFEM Software," *Inter-Noise 2002*
- (8) 최재성, 길현권, 홍석윤,"임의 방향 점가진력에 의한 연성 평판 진동의 파워흐름해석", *한국소음진동공학회지*, 11권 6호, 181-192, 2001.
- (9) B.L. Clarkson, R.J. Pope, " Experimental Determination of Modal Densities and Loss factors of Flat Plates and Cylinders," *J. Sound Vibration*, 77(4), pp. 535-549, 1981.