

구조 방사 소음의 해석을 위한 구조물의 진동 획득 방법의 비교

Comparison of various methods to obtain structural vibration for vibro-acoustic noise

왕세명† · 신민철* · 구건모* · 김대성* · 배원기* · 경용수* · 김정선* · 국정환* · Tran ho Vihn Thuy*

Semyung Wang, Mincheol Shin, Kunmo Koo, Daesung Kim, Wonki Bae,
Yongsoo Kyong, Jungseon Kim, Junghwan Kook, Tran Ho Vinh Thuy

Key Words : Modal Expansion Method, MEM (모드 확장법), Laser Doppler Vibrometer, LDV (레이저 진동 측정 센서),
Vibro-acoustic noise (구조 방사 소음)

ABSTRACT

There are several methods to obtain structural vibration for analysis of vibro-acoustic noise. First of all, vibration data can be obtained through the structural analysis using finite element method. Although this method has no need to experiment, the analysis result is unreliable when the structure and the vibration source is complex to model exactly. The second method is to measure vibration using a number of sensors. The analyzed vibro-acoustic noise with directly measured data is getting more reliable when the number of data acquisition points is getting larger. However, it requires large amount of time and effort to measure all vibration data on every node especially when the size of vibrating structure is large. The Modal Expansion Method (MEM), which uses mode information and measurement data, has been introduced to compensate their limits. With a relatively small number of measurement data, the reliable structural vibration for vibro-acoustic noise can be obtained using this semi-analysis method. Although MEM gives reliable result, it is restricted by the number of modes and measurement points. In this paper, structural analysis, direct vibration measurement method and MEM are compared using the simple aluminum box model. Furthermore, the washing machine case is also provided as a comparative example. The Laser Doppler Vibrometer (LDV) was used instead of contact type accelerometer to get vibration data.

기호설명

- f : 변형 벡터, B : 고유 벡터
- c_i : i 번째 모드의 기여도
- $\phi_{i,j}$: j 번째 모드의 i 절점에서의 변위

1. 서론

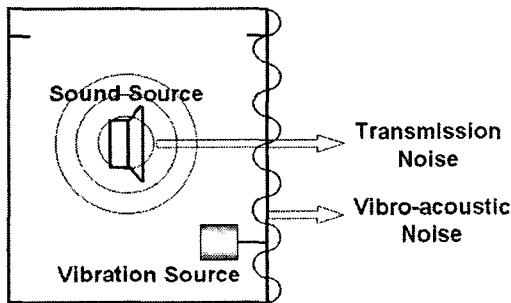


그림 1. 투과 소음과 구조 방사 소음

구조물에서 발생하는 소음은 크게 구조 방사 소음과 투과 소음으로 나눌 수 있다. 그림 1에서 개략적으로 나타낸 것과 같이 구조 방사 소음(Vibro-acoustic noise)의 경우 구조물의 진동으로부터 기인하는 소음이고 투과 소음(Transmission noise)은 구조물을 투과하여 나오는 소음이다. 이

중 구조 방사 소음은 구조물의 형상 변경을 통해 소음의 경향을 바꿀 수 있으므로 구조 방사 소음에 대한 연구가 이루어지고 있다. 마이크로폰으로는 구조 방사 소음과 투과 소음이 동시에 측정되기 때문에 진동하는 구조물의 투과 소음을 제외한 구조 방사 소음만을 얻기 위해 구조물 표면의 진동을 측정하여 이를 바탕으로 경계 요소 법을 이용하여 해석하는 방법을 사용한다. 구조 방사 소음을 얻기 위한 구조물의 진동을 얻어내는 방법은 여러 가지가 있는데 본 논문에서는 순수한 해석(유한 요소 해석)을 통한 진동 예측 방법과 직접 진동 측정법, 그리고 모드 확장법 (Modal Expansion Method, MEM)에 대해 고찰해 보았다. 순수한 해석을 통한 진동 예측 방법은 직접 실험을 하지 않아도 구조 방사 소음 해석에 필요한 구조물의 진동을 얻을 수 있다는 장점을 갖고 있지만 구조물이 간단하고 가진원 역시 해석으로 구현이 용이할 때 비교적 정확한 데이터를 얻을 수 있다. 기존에 사용되었던 가속도나 속도 센서가 이용한 직접 진동 측정 방법은 가장 정확한 진동 데이터를 얻을 수 있지만 구조물의 표면에 충분한 진동 데이터를 얻을 수 있도록 여러 개의 센서를 사용하여야 하므로 구조물의 크기가 커짐에 따라 필요한 센서의 개수는 기하급수적으로 늘어난다. 반면 모드 확장법은 순수 해석 방법과 직접 측정 방법의 장점을 취한 방법으로 상대적으로 적은 개수의 진동 데이터를 가지고 구조물의 모드 정보를 사용하여 전체 구조물 표면의 속도 값을 얻어낼 수 있는 방법이다. 본 논문에서는 구조 방사 소음

† 광주과학기술원 기전공학과
E-mail : smwang@gist.ac.kr
Tel : (062) 970-2390, Fax : (062) 970-3263

* 광주과학기술원 기전공학과

해석을 위한 구조물의 진동 획득 방법인 순수 해석 방법, 직접 진동 측정법, 그리고 모드 확장법을 비교하였고 모드 개수 및 진동 측정점 개수에 따른 모드 확장법의 정확도에 대해 간단한 알루미늄 박스 모델을 이용하여 고찰하였다. 가속도 센서와 같은 접촉식 센서의 구조물 표면 왜곡과 센서 자체가 가지는 하중에 의한 영향을 최소화시키기 위해 레이저 도플러 진동 측정기를 사용하여 진동 데이터를 얻었다.

본 논문의 2 장에서는 해석을 통한 진동 예측 방법에 대해 간단하게 언급하였고 3 장은 직접 진동 측정법에 대해서 설명하고 4 장은 모드 확장법의 이론적 배경을 언급 하였다. 5 장은 알루미늄 박스 모델과 세탁기 예제를 통해 각각의 진동 획득 방법의 비교를 다루었다.

2. 해석을 통한 진동 예측 방법

순수한 해석을 통한 진동 예측 방법은 직접 실험을 하지 않아도 구조 방사 소음 해석에 필요한 구조물의 진동을 얻어낼 수 있다는 장점을 갖고 있지만 비교적 구조물이 간단하고 가진원 역시 해석으로 구현이 용이할 때에만 신뢰성이 있는 데이터를 얻을 수 있다.

3. 직접 진동 측정 방법

진동하는 구조물의 구조 방사 소음을 얻기 위해서는 구조물의 전체 진동을 표현할 수 있는 충분한 개수의 데이터를 얻을 수 있도록 여러 개의 센서를 사용하여야 한다. 본 장에서는 이러한 진동을 측정하는 기존의 방법을 소개한다.

3.1 접촉식 가속도 센서를 이용한 진동 측정

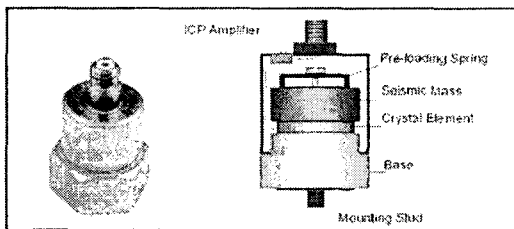


그림 2. 접촉식 센서

그림 2 와 같은 접촉식 센서는 큰 구조물이나 기계류 등에 대해 어느 정도 수용 가능한 측정 결과를 제공한다. 하지만 구조물 표면에 변화를 야기시키고 센서 자체의 질량으로 인한 진동 왜곡 등 한계가 있다.

3.2 비접촉식 LDV 를 이용한 진동 측정



그림 3. 비접촉식 Laser Doppler Vibrometer

비접촉 측정장비인 Laser Doppler Vibrometer (LDV)는 측정대상의 표면에서 반사되는 레이저의 파동의 진동수가 달라지는 Doppler Effect 를 이용하여 물체의 표면 진동의 속도를 측정하는 비접촉 진동 센서의 하나이다[1]. 본 논문은 LDV 를 이용하여 진동을 측정하였다.

4. 모드 확장법

4.1 모드 확장법의 개념

유한요소해석은 구조물의 고유진동수와 고유모드에 대해서는 비교적 정확한 결과를 나타내지만 시스템의 작동으로 인해서 가진 되고 있는 구조물의 진동 데이터는 쉽게 구하지 못한다. 반면 실험의 경우 작동중인 구조물의 진동은 정확하게 얻어낼 수 있지만 측정 가능한 센서의 개수가 제한되어 있어 음향 모델의 구조물 방사소음 해석을 위한 경계조건으로 사용되기에는 불충분하다.

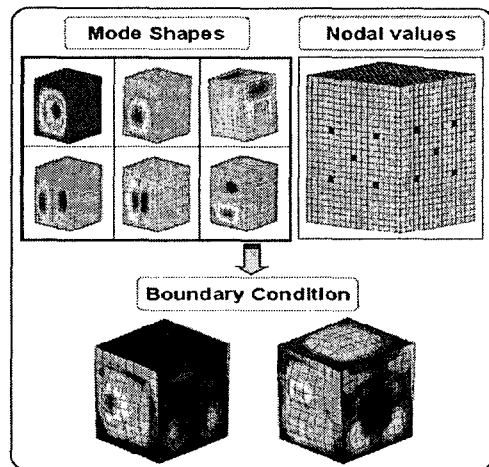


그림 4. 모드 확장법의 개념

그림 4 에서 설명된 바와 같이 모드 확장법은 해석과 실험이 가지고 있는 각각의 장점을 서로 이용하여 실험으로부터 측정된 절점에서의 진동데이터와 유한요소해석으로부터 얻은 모드 정보를 선형 조합함으로써 작동중인 실제 구조물의 전체 진

동을 나타낼 수 있게 된다는 개념을 이용한 방법이다.

4.2 모드 확장법의 이론적 배경 [2,3,4]

모드 확장법은 모드들 사이의 직교 특성을 이용하여 전체 변형은 모드들의 선형 조합으로 그 표현이 가능하다는 원리를 이용한다. n 개의 자유도를 가지는 구조물의 변형 벡터는 Gram-Schmidt Orthogonalization process 에 의해 다음의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f = \frac{(b_1, f)}{(b_1, b_1)} b_1 + \frac{(b_2, f)}{(b_2, b_2)} b_2 + \dots + \frac{(b_n, f)}{(b_n, b_n)} b_n \quad (1)$$

위의 식(1)에서 $f (f \in R^n)$ 는 변형 벡터, $B (B \subset R^n, B = [b_1, b_2, \dots, b_n])$ 는 시스템의 고유 벡터이다. 실제 구조물에서 높은 차수의 모드가 전체 진동에 기여하는 정도는 상대적으로 낮은 차수의 모드에 비해 작기 때문에 낮은 차수의 모드들의 조합으로도 구조물 진동의 예측이 가능하다. 따라서 위의 식(1)은 다음의 식(2)로 표현이 가능하다.

$$f = \frac{(b_1, f)}{(b_1, b_1)} b_1 + \frac{(b_2, f)}{(b_2, b_2)} b_2 + \dots + \frac{(b_m, f)}{(b_m, b_m)} b_m + f' \quad (2)$$

여기서 $m < n$ 이고 $f' (f' \approx 0)$ 는 고차 모드들의 선형 조합을 나타낸다. 또한 임의의 절점에서의 변위는 아래의 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n c_i \bar{\phi}^{(i)} \quad (3)$$

위의 식에서 \bar{x} 는 임의의 절점에서의 변위를 나타내며, $\bar{\phi}^{(i)}$ 는 i 번째 모드 형상을, c_i 는 i 번째 모드가 전체 구조물 변위에 기여하는 정도를 나타내는 계수이다. 식 (4)는 n 개의 절점을 가지는 구조물의 변위를 3 개의 모드와 해당되는 계수의 선형조합으로 표현한 식이다.

$$\begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & \dots & x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{1,1} & \phi_{2,1} & \phi_{3,1} & \dots & \phi_{n,1} \\ \phi_{1,2} & \phi_{2,2} & \phi_{3,2} & \dots & \phi_{n,2} \\ \phi_{1,3} & \phi_{2,3} & \phi_{3,3} & \dots & \phi_{n,3} \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 $\phi_{i,j}$ 는 j 번째 모드의 i 절점에서의 변위를 나타낸다. 식 (4)에서 3 개의 모드 형상이 주어지고 3 개의 절점에서의 변위를 알 수 있다면 각각의 모드 형상에 해당되는 계수, c_i 를 구할 수 있게 되며, 모든 절점의 변위가 이미 구한 c_i 와 모드 형상의 선형 조합으로 쉽게 표현된다.

5. 알루미늄 박스 모델을 이용한 고찰

5.1 실험 세팅

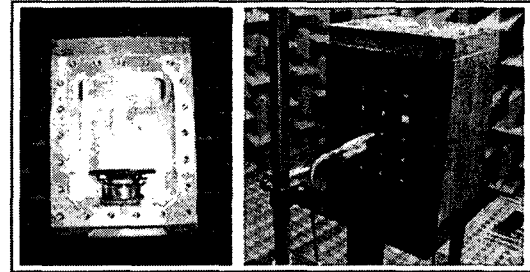


그림 5. 알루미늄 박스 구조물과 소음 실험

그림 5 와 같이 220×170×300mm 의 크기와 30mm 의 두께를 갖는 알루미늄 박스를 제작하고 앞쪽에는 두께 1mm 의 얇은 철판을 볼트로 체결하였다[5]. 알루미늄 박스 안쪽에 스피커를 설치하여 화이트 랜덤 신호로 박스 내부를 가진하고 소음 측정을 무향실에서 실시하였다.

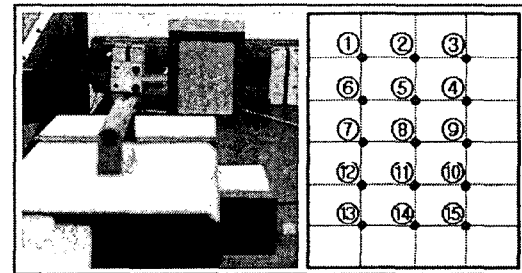


그림 6. LDV 를 이용한 박스 모델의 진동 측정

그림 6 은 그림 5 와 같은 알루미늄 박스 모델과 같은 가진 신호로 가진했을 때 앞 쪽 철판 표면의 진동을 LDV 를 이용하여 측정한 실험이다. 오른쪽 그림과 같이 15 개의 지점에서 진동을 측정하였다.

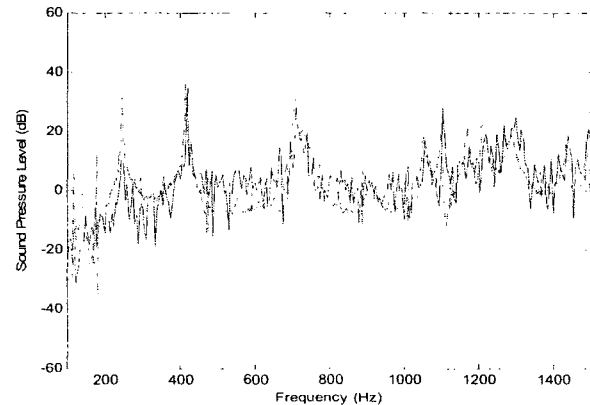


그림 7. 측정 소음과 해석된 구조 방사 소음의 비교 (측정 소음-점선, 구조 방사 소음-실선)

그림 7은 그림 5의 실험에서 측정된 소음과 그림 6에서 측정된 진동 데이터를 가지고 경계 요소 방법으로 해석한 결과를 비교한 그래프이다. 이 결과를 통해 알루미늄 박스 모델에서 측정된 소음은 대부분이 구조 방사 소음이라는 것을 알 수 있으며 두 데이터간의 약간의 차이는 진동 측정점의 개수와 음향 모델의 Mesh 크기에 의해 발생한 것이다.

5.2 순수 해석법과 직접 진동 측정법 비교

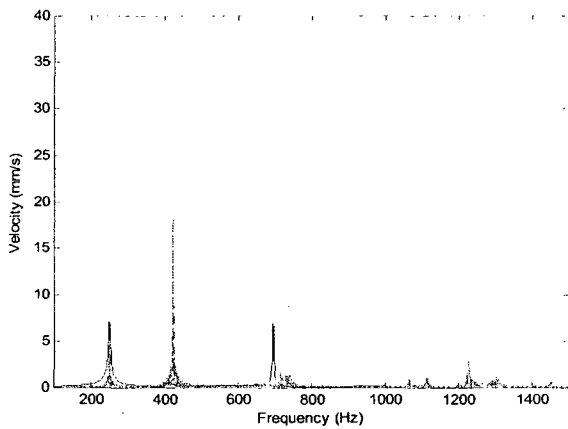


그림 8. 측정 데이터와 순수 해석 데이터의 비교 (측정-점선, 순수 해석-실선)

위의 그림 8은 그림 6의 11번 포인트에서 직접 측정된 진동 데이터와 순수한 해석만을 통해 얻어낸 진동 데이터를 비교한 그래프이다. 구조물의 형태는 비교적 간단하지만 음원을 실제와 가깝게 구현하기에 한계가 있어서 위와 같은 오차를 보였다.

5.3 직접 진동 측정법과 모드 확장법의 비교

직접 진동 측정법과 모드 확장법의 비교를 위한 알루미늄 박스 모델의 모드 정보와 진동 측정점은 다음의 그림 9과 같이 정의하였다.

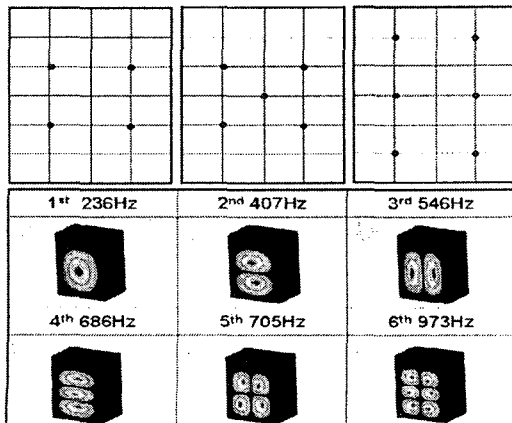
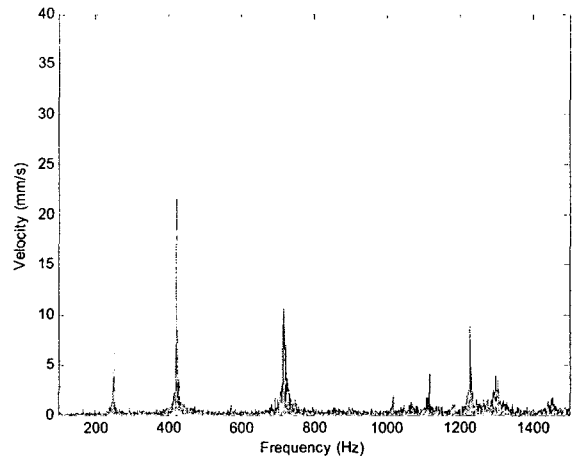
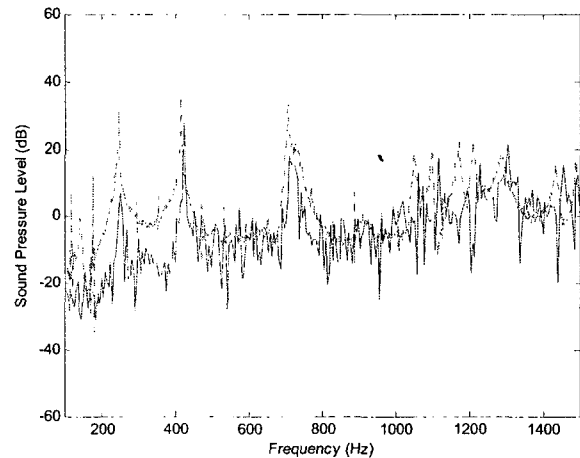


그림 9. 진동 측정점과 박스 모델의 모드 정보

진동 측정점의 경우 해당되는 측정점 개수를 가지고 판의 진동을 잘 표현할 수 있는 배치를 사용하였고 모드 정보의 경우 실험값과 2%미만의 차이를 가졌다.



(a) 측정된 진동과 해석된 진동의 비교



(b) 측정 소음과 해석된 구조 방사 소음의 비교

그림 10. 측정 데이터와 해석 데이터의 비교 (측정-점선, 모드 확장법 해석-실선)

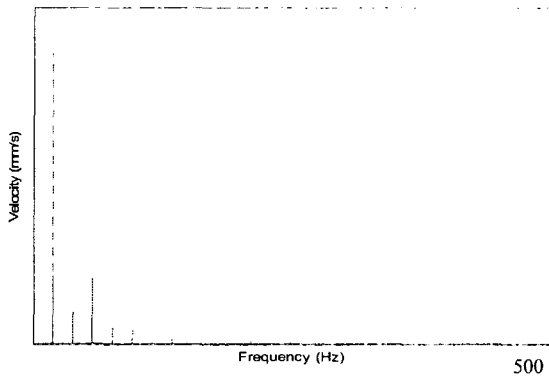
그림 10(a)는 그림 6의 11번 포인트에서 측정된 진동 데이터와 같은 지점에 대해 6개의 모드, 6개의 측정점을 가지고 모드 확장법을 이용해 예측한 진동 데이터를 비교한 것이고 그림 10(b)는 같은 정보를 가지고 모드 확장법으로 해석된 구조 방사 소음과 실제 측정된 소음 신호를 비교한 그래프이다. 모드 확장법에서 중요한 변수인 측정점의 개수와 모드의 개수를 변경하여 실제 측정 데이터와의 모드 확장법을 이용해 해석된 데이터를 비교하여 각각의 변수들이 해석된 정보의 정확도

에 어떠한 영향을 주는지 표 1에 나타내었다.

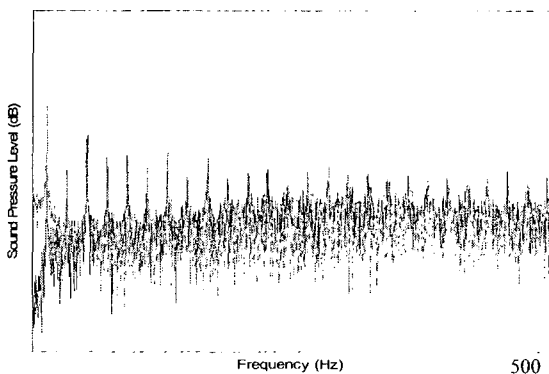
표 1. 모드 개수와 측정점 개수에 따른 모드 확장법을 이용하여 예측된 데이터의 오차

모드 개수	측정 개수	Error (%) 진동 데이터 @ 11 th point
4	6	2.07
5	6	1.01
6	6	0.93
6	5	21.07
6	4	22.46

다음의 그림 11은 실제 세탁기를 대상으로 위의 알루미늄 박스의 경우와 같이 직접 측정된 진동 데이터와 6개의 모드 정보와 25개의 측정점을 가지고 모드 확장법을 이용하여 예측된 진동 데이터를 그림 11(a)에서 비교하였고 각각을 경계 요소법을 이용하여 구조 소음을 해석한 결과를 그림 11(b)에 나타내었다.



(a) 측정된 진동과 해석된 진동의 비교



(b) 측정된 진동을 이용한 해석과 모드 확장법을 이용해 해석된 소음의 비교

그림 11. 직접 측정법과 모드 확장법의 비교 (측정-점선, 모드 확장법 해석-실선)

6. 결론

본 논문은 구조 방사 소음 해석을 위한 구조물의 진동을 획득하는 방법 중 순수 해석을 이용한 방법과 직접 측정에 의한 방법, 그리고 모드 확장법에 의한 방법에 대해 고찰하였다. 알루미늄 박스를 제작하여 투과 소음의 영향을 줄이고 모드 확장법에서 쓰이는 모드 개수와 측정점 개수를 달리하여 해석된 결과와 직접 측정된 결과를 서로 비교하였다. 알루미늄 박스 모델과 같이 간단한 구조물에서는 모드의 개수 보다는 측정점의 개수가 진동 데이터 예측에 더 큰 영향을 주며 측정점의 개수가 6개 이상이면 비교적 정확한 구조물의 진동을 얻을 수 있었다. 세탁기의 경우 복잡한 형상으로 인해 구조물의 정확한 모드를 도출하는데 어려움이 있고 세탁기 내부의 여러 가진원과 소음원으로 인한 캐비닛의 변형을 실제 모드와 오차를 가지는 적은 수의 모드들의 조합으로 표현하기에는 한계가 있어서 모드 확장법으로 해석된 진동과 소음이 실제 측정값과 많은 차이를 나타내었다. 직접 측정법을 이용하여 얻은 진동 데이터는 가장 정확한 구조 방사 소음을 예측할 수 있었으나 많은 수고와 노력이 필요했다. 하지만 모드 확장법의 경우 비교적 적은 노력으로 알루미늄 박스와 같은 간단한 모델에 대해 실제 진동 및 소음과 비슷한 수준의 결과를 얻을 수 있었다. 순수 해석을 통한 방법의 경우 실험이 필요하지 않았지만 모델과 소음원이 해석에 용이하지 않은 경우에는 실제 측정된 진동과 많은 오차를 나타내었다.

참고문헌

- (1) 라종필 등, 2002, "모드형상분석을 위한 연속 스캐닝 레이저 도플러 진동 측정기", 춘계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회, pp. 274~280
- (2) Singiresu S. Rao, 2004, Mechanical Vibrations, Prentice Hall, Chap. 6.
- (3) Vladimir I. Shin, 2005, Applied Engineering Mathematics, GIST Lecture note
- (4) SYSNOISE 5.6 User Manual, 5.3.4 Vibrating Panel: Expand from Measurements
- (5) Rene Visser, 2003, "Acoustic Source Localization based on Pressure and Particle Velocity Measurements", Internoise, pp. 665 ~ 670
- (6) www.dliengineering.com, www.bksv.com
- (7) www.em4sys.co.kr
- (8) 라종필 등, 2003, "호모다인 간섭계를 이용한 레이저 진동 측정기의 개발", 춘계학술대회논문집, 한국소음진동공학회 pp. 397~402
- (9) 왕세명 등, 2003, "연속 스캐닝 진동계를 위한 체비셰프와 힐버트 방식의 비교", 춘계학술대회논문집, 한국소음진동공학회 pp. 414~ 419