

모드 확장 기법을 이용한 충격 소음 해석에 관한 연구 Study on the impact noise analysis using modal expansion technique

*정봉부¹, 오진택¹, 박현철¹

*B. B. Jung¹, J. T. Oh¹, #H. C. Park(hcpark@postech.ac.kr)¹

¹ 포항공과대학교 기계공학과

Key words : modal expansion technique, BEM, fourier spectrum, impact noise

1. 서론

충격소음이란 총소리, 풍선 터지는 소리 또는 망치소리와 같은 충격적인 음압의 변화에 의한 소리를 뜻한다. 이러한 충격소음은 사람의 귀가 보호작용을 하기 전에 자극을 주기 때문에 청력손상의 가능성이 매우 높다[1]. 이번 연구에서는 여러 충격소음 중 구조물의 진동에 의하여 발생하는 소음의 해석 기법에 대한 연구를 통하여 충격 시 발생하는 소음을 예측하여 시스템의 개발 완성도를 높일 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

일반적으로 진동에 의하여 발생하는 구조물의 소음분포는 유한 요소법이나 경계 요소법을 이용하여 구할 수 있다. 이 경우 해석의 정확도는 구조물 표면의 속도분포의 정확도에 의하여 결정되고 이러한 속도분포는 유한 요소법을 이용하여 구할 수 있다. 그러나 이 방법은 요소 분할 상태, 가진력, 댐핑계수, 경계조건 등의 수학적 모델링 방법에 따라 정확도에 큰 차이가 발생하는 단점이 있고 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법 중 하나로 모드 확장 기법이 제시되었다[2,3]. 이 방법은 해석에서 발생할 수 있는 오차를 줄이기 위하여 실험데이터를 이용하여 구조물의 속도분포를 구한 후 경계요소해석을 통하여 소음을 예측하는 기법으로 지금까지는 구조물의 진동이 정상상태를 이루고 있는 경우에 대한 연구가 수행되었지만 여기에서는 이 기법을 이용하여 충격소음을 예측하고 실험과의 비교를 통하여 그 정확도를 분석하였다.

2. 모드 확장 이론

모드 확장 기법은 구조물에서 임의의 절점 i 가 j 방향으로 진동할 때의 변위는 초기 m 개의 진동 모드의 선형결합에 의하여 나타낼 수 있다는 사실에서 유도되었고 그 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다[4].

$$u_{ij} = \sum_{k=1}^m a_k \phi_{ijk} \quad (1)$$

여기서 u_{ij} 는 절점 i 의 j 방향 변위이고, a_k 는 k 번째 모드의 modal participation factor, ϕ_{ijk} 는 모드 k 에 대한 절점 i 의 j 방향 변위를 나타낸다. 식(1)에서 u_{ij} 는 실험을 통하여 구할 수 있고, ϕ_{ijk} 는 유한요소해석을 통하여 얻어진다. 따라서 식(1)을 행렬로 나타낸 후 계산을 통하여 a_k 를 구할 수 있다. 이때 실험 데이터의 개수가 해석에 사용하는 모드의 개수보다 작아질 경우 계산식의 개수가 미지수보다 작아지게 되고 이를 해결하기 위하여 SVD(singular value decomposition)을 이용하였다. 이 방법을 통하여 a_k 를 구하게 되면 식(1)에 의하여 모든 절점의 변위를 구할 수 있고 절점에서의 속도는 식(2)를 통하여 구할 수 있다.

$$V_{n,i} = \sum_{k=1}^m (i\omega a_k) \cdot \phi_{n,ik} = \sum_{k=1}^m b_k \cdot \phi_{n,ik} \quad (2)$$

3. 모드 해석

경계요소해석을 하기 위하여 모드 해석을 실시하였다. 사용된 모델은 두께 2 mm, 지름 10 cm 인 원판이고 재질은 일반 강으로 물성치는 $E = 200GPa$, $\rho = 7860kg/m^3$, $\nu = 0.29$

이다. Fig. 1 은 해석에 사용된 mesh 형상을 나타낸다.

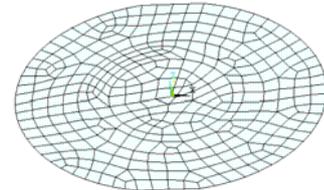


Fig. 1 Meshed model of the plate

Fig. 1 의 mesh 는 경계요소해석에서도 동일하게 사용되며 mesh 생성시 가장 큰 element 의 한 변의 크기가 관심주파수의 1/6 보다 작아야 한다 [4]. 이번 연구에서는 6400 Hz 까지의 주파수에 대한 해석을 수행하였고 이때 element 의 크기는 8.854 mm 보다 작아야 한다. 정확도를 높이기 위하여 Fig. 1 의 mesh 는 가장 큰 element 의 크기가 6 mm 보다 작도록 하였고 실험 시 가속도가 측정되는 부분에 절점이 생성되도록 모델링을 하였다. 모드해석에는 상용 프로그램인 ANSYS 를 이용하여 7000 Hz 내의 모드 12 개에 대한 결과를 얻었고 그 결과를 Table 1 에 정리하였다.

Table 1. Results of the modal analysis

Mode #	Frequency (Hz)	Mode #	Frequency (Hz)
1	569.3	7	3812.2
2	653.5	8	3990.9
3	1753.8	9	4166.2
4	1837.7	10	5988.3
5	1853.4	11	6471.3
6	3599.2	12	6830.2

4. 실험 및 데이터

실험은 Fig. 1 과 같은 형태로 제작된 시편에 질량 3.54 g 의 쇠구슬을 시편의 중앙에 10 cm 의 높이에서 떨어뜨릴 때 판의 중심에서 10 cm 떨어진 곳에서 마이크로폰을 이용하여 충격소음을 측정하고 판의 중심과 임의의 점 두 곳에서 가속도를 측정하였다. 실험에 사용된 센서, FFT 및 분석 software 는 모두 B&K 사의 제품을 사용하였다.

일정한 주파수를 갖는 힘에 의하여 가진 되어 정상상태를 이루고 있는 구조물의 경우 각 절점에서의 가속도는 모두 동일한 phase 를 이루고 있기 때문에 각 절점에서의 변위, 속도 또는 가속도의 크기만 측정하면 되므로 동일 순간에 측정을 하지 않아도 그 크기의 측정이 가능한 반면 충격의 경우 각 센서의 응답이 동일 순간이 아닐 경우 측정 데이터의 일관성을 유지할 수 없다. 또한 충격에 의한 힘은 모든 주파수를 포함하고 있기 때문에 모든 주파수에 대한 센서의 응답 특성을 알아야 한다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 진동 측정 시 software 상에서 두 개의 가속도 센서에 대한 가속도 신호를 Fourier Spectrum 의 real/imaginary 값으로 동시에 얻었고 이 데이터를 universal file format(UFF)으로 후처리하여 SYSNOISE 의 입력 데이터로 사용하였다. SYSNOISE 에서 사용 가능한 UFF 는 Format 58 번이고 이를 이용한 데이터 중에서도 Fourier Spectrum, Frequency Response Function, Cross

Spectrum 등 몇 가지 데이터만이 인식이 가능하다. Fig. 2는 실험을 통하여 얻어진 진동 신호를 나타낸다.

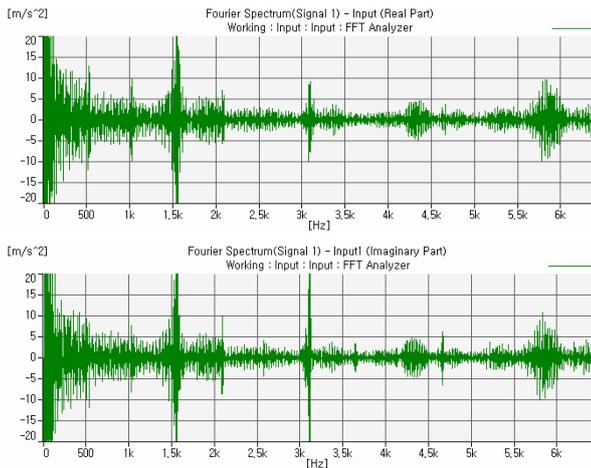


Fig. 2 Acceleration signal for specimen center

진동신호를 보면 real 값과 imaginary 값에 차이가 있는 것을 볼 수 있는데 이는 주파수에 따른 진동이 모두 in-phase 가 아니기 때문이다. 또한 저주파 영역에서 매우 큰 가속도가 발생하고 있는 것을 볼 수 있는데 이는 충격신호의 특성으로 구조물 자체의 진동보다는 지지조건 및 센서의 특성에 의하여 발생하는 가상의 값으로 실제 소음측정 결과 나타나지 않는다.

충격소음은 측정 순간에 따라서 그 값의 변동이 매우 심하기 때문에 실험 회수를 증가하여 충격소음의 일정한 측정 여부를 확인하였고 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

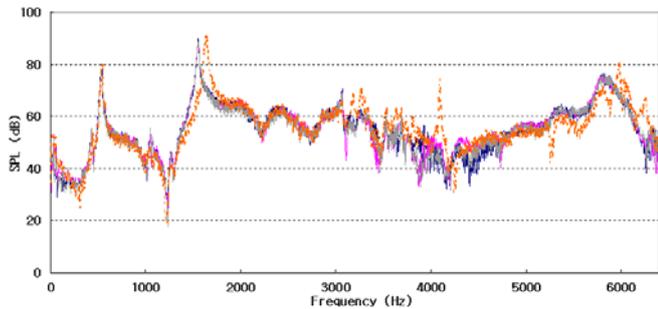


Fig. 3 Impact noise measurement

Fig. 3에서 실선으로 표시된 세 개의 데이터는 가속도 센서를 붙인 상태에서의 측정 결과를 나타내고 있는데 소음이 거의 일정하게 발생하고 있음을 알 수 있다. 점선으로 표시된 데이터는 가속도 센서를 제거한 상태에서의 소음으로 주파수 변화 및 고주파 영역에서 peak 이 더 많이 생기는 것을 볼 수 있다. 이는 센서 부착에 의한 질량 부과 효과로 인해 주파수 shift 및 damping 효과에 의한 것이다. 따라서 해석 결과는 실제 발생 소음에 가속도 센서에 의한 질량 부과 효과를 합한 경우에 대한 결과가 나오게 되는 단점이 발생한다. 이와 같은 단점은 구조물의 크기가 매우 클 경우 무시할 수 있고 또한 레이저 센서와 같은 비접촉식 센서의 사용을 통하여 제거할 수 있다.

5. 해석 결과

3 절과 4 절의 결과를 입력 데이터로 사용하여 충격 시 발생하는 소음에 대한 해석을 수행하여 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 실험 결과와 해석 결과를 비교해 보면 크게 세가지 특성을 나타내고 있다 첫째, 특정 대역에서 발생하는 소음의 peak 을 잘 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 이는 발생하고 있는 충격소음이 시편의 진동에 의하여 방사되고 있음을 나타내며 모드 확장 기법을 이용한 소음 해석

이 적절함을 알 수 있다.

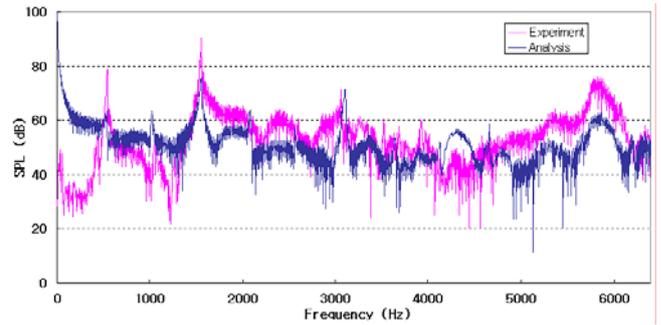


Fig. 4 Comparison of analysis and experimental results

두 번째 특성은 해석 결과 실제와 달리 저주파 영역에서 매우 큰 소음이 발생하는 것인데 이는 진술한 바와 같이 판의 떨림과 무관한 진동 측정값에 의한 값이다. 마지막으로 해석 결과는 실험 결과와 비교하여 전반적으로 낮은 값을 나타내고 있는데 이는 충격에 의한 진동이 시간에 따라 매우 빨리 감소하는 특성을 갖고 있기 때문에 소음과 진동을 동시에 측정하여도 판에서 발생한 소리가 마이크로폰에 도달하는 시간 동안 진동의 감소가 생기기 때문이다. 이러한 문제점은 소음과 진동의 측정 시간 값을 설정하거나 측정 데이터를 recorder 를 이용하여 매우 작은 시간 간격으로 저장하여 데이터 분석을 함으로써 정확도를 향상시킬 수 있다[5].

4. 결론

본 논문에서는 구조물에서 발생하는 충격소음을 예측하기 위한 방법으로 모드 확장 기법을 사용하였다. 이 방법은 음장 해석에 필요한 경계조건인 속도분포를 실험데이터와 진동모드를 이용하는 것으로 해석에 의하여 속도 분포를 구하여 예측하는 방법에 비하여 수학적 모델링으로 표현하기 어려운 부분에 대한 값이 측정에 의하여 포함되고 이에 따라 더 정확한 예측 값의 산출이 가능한 장점이 있다. 이번 연구에서는 기존의 방법과 달리 충격소음에 대한 해석을 하기 위한 측정 및 데이터 처리 방법을 사용하였으며 실험과의 비교를 통하여 그 정확도를 확인하였다. 해석 결과 모든 주파수 범위에 대하여 실제 특성과 상당히 유사한 특성을 갖는 결과를 얻을 수 있었지만 정상상태의 구조물에 대한 예측과는 달리 충격에 의한 소음은 실험에 있어서도 측정이 어려우며 해석 결과의 정확도도 약간 떨어지는 것을 알 수 있다. 따라서 충격소음의 예측 정확도를 높이기 위한 방법에 대한 제시를 하여 모드 확장 기법의 적용 가능성을 향상시켰다.

참고문헌

1. H. Donald, S. Malini, A. G. Michael and S. S. Samuel, "Impact Noise: The Importance of Level, Duration and Repetition Rate," J. of Acoustical Soc. of Am., **89**, 3, 1350~1357, 1991.
2. 김관주, 이봉노, "모드 확장 기법을 이용한 평판의 진동·소음 해석," 한국소음진동공학회지, **8**, 4, 654-652, 1998.
3. Bernad C., Vila L. and Buli F., "Application of the modal expansion technique to improve the results of FEM/BEM acoustic radiation," 3rd Inter. Con. on Modeling & Experimental Measurement in Acoustics, Cadiz, Spain, 16-18 June, 161-170, 2003.
4. LMS SYSNOISE Revision 5.5 Users Manual, LMS International, 2000.
5. PULSE-Getting Started, Bruel & Kjaer, 2003.