

균열을 갖는 직사각형 진동평판의 음향 방사특성

Sound Radiation Characteristics of Cracked Rectangular Vibrating Plates

김태진* 이우식**

Taejin Kim Usik Lee

ABSTRACT

This paper considers the sound radiation characteristics of a cracked rectangular vibrating plate, varying the orientation angle of a line crack. The vibration response of the cracked vibrating plate is obtained by using ANSYS, the acoustic theory based on the lumped parameter model is used to calculate radiated sound power. The radiated sound powers are computed with varying the orientation angle of the crack: i.e, 0°, 45°, and 90°. It is found that characteristics of the radiated sound power are very closely related to the crack orientation, vibration mode and crack location.

1. 서 론

평판(plate)은 보(beam) 또는 셸(shell)과 더불어 가장 널리 사용되고 있는 기본 구조요소의 하나이다. 예로써, 선박, 철도차량 및 항공기의 바닥구조는 대부분 평판으로 구성되어 있다. 이러한 평판구조는 다양한 가진력에 의해 구조진동유발소음이 발생한다. 만일, 평판에 균열(crack)이 발생한다면 그 이전과 비교하여 다른 양상의 음향특성을 갖는 소음이 발생할 것이다. 따라서, 균열이 발생하기 전후의 음향특성 변화를 역으로 이용하면 균열의 발생여부는 물론 균열의 위치와 상태를 규명할 수 있을 것이다.

베어링과 같은 회전요소의 결함(defect) 검출 기법으로 음향 인텐시티(sound intensity) 기술을 적용한 연구[1,2]가 있고, 또한, 타격(tapping)시에 발생하는 구조물의 거동과 타격음 해석(tapping sound analysis)으로 타격특성을 분석하여 복합재료 구조물 내부의 손상을 탐지하는 연구[3]도 이루어 졌다.

그러나, 본 연구에서는 일반적인 구조물인 평판을 이용하여 균열의 존재를 미리 알고 균열의 방향각을 변수로 모드형상에 따른 균열의 방향각도와 음향파워(sound power)가 어떤 관계가 있는지 고찰하였다. 음향파워를 구하기 위해 방사저항(radiation resistance)과 체적속도(volume velocity)를 구하였으며, 균열을 갖는 직사각형 진동평판에 균열의 방향각이 0°, 45°, 90°인 경우에 대해 방사되는 음향파워를 비교하였다. 구조물의 진동응답은 ANSYS을 이용하여 계산하였고, 구조진동에 의해 방사되는 음향파워는 Koopmann[5]이 제시한 lumped parameter model에 근거한 음향이론을 적용하였다.

* 인하대학교 기계공학과

** 인하대학교 기계공학과 교수

2. 음향파위의 해석기법

2.1 음향파위(sound power) Π_{av}

Lumped parameter model은 구조물을 많은 미세한 구조요소로 나눈 다음 각 구조요소들이 마치 피스톤과 같이 균일한 표면속도를 가지고 진동한다는 가정에서 유도된다. 각 구조요소의 실제 표면속도 분포를 평균 표면속도로 대체할 수 있다는 가정이다.

구조물의 표면에 단극자와 쌍극자 음원의 상호작용이 있는 것으로 생각할 수 있으며, lumped parameter model에서는 요소(element)의 중심에 음원을 설정하고 해당 기저함수(basis function)를 사용하여도 무방하지만 단극자와 쌍극자가 함께 고려된 경우인 삼중극자 음원의 기저함수를 사용하면 저주파에서 고주파까지의 음장특성을 비교적 잘 나타낼 수 있다. 요소들 사이의 음향학적 커플링이 고려된 단극자와 쌍극자 음원의 상호작용인 삼중극자 음원 행렬식의 형태로 간단히 표현할 수 있으며, 시간평균 음향파위(time averaged sound power) Π_{av} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Pi_{av} = \frac{1}{2} \mathbf{u}^H \mathbf{R} \mathbf{u} \quad (1)$$

여기서, \mathbf{u} 는 유한요소법의 해에서 각 노드(node)의 응답으로부터 구한 체적속도이다. 그리고, \mathbf{R} 은 방사저항행렬로 $\mathbf{R} = \text{Re}\{\mathbf{Z}\}$ 이고, \mathbf{Z} 는 방사임피던스이다.

2.2 체적속도(volume velocity) u

체적속도는 유한요소해석 등으로부터 계산된 각 노드의 응답으로부터 구한다. 노드점에서 표면의 수직벡터방향 속도 $\hat{\mathbf{v}}$ 는 다음 식과 같다.

$$\hat{\mathbf{v}} \cdot \mathbf{n} = -i\omega \hat{\mathbf{a}} \cdot \mathbf{n} \quad (2)$$

여기서, $\hat{\mathbf{a}}$ 는 유한요소해석 등에서 구한 노드점의 응답이다. 한 요소의 체적속도는 다음과 같다.

$$\hat{\mathbf{u}} = \iint_S \hat{\mathbf{v}} \cdot \mathbf{n} \, dS \quad (3)$$

여기서, S 는 진동하는 요소의 표면적이고, \mathbf{n} 은 요소의 단위법선벡터이다.

또한, 실험으로 음향파위를 구하기 위해서는 진동하는 구조물의 체적속도를 구해야 한다. 이를 위해 진동하는 구조물의 각 위치마다 가속도계를 이용하여 속도를 측정하므로써 체적속도를 얻을 수 있다. 이 각 측정위치에서 얻어진 체적속도를 벡터로 표시하면 다음과 같다.

$$\hat{\mathbf{u}} = \{ \hat{u}_1, \hat{u}_2, \hat{u}_3, \dots, \hat{u}_n \} \quad (4)$$

2.3 방사저항(radiation resistance) R

j 번째 요소의 중심에 위치한 삼중극자 음원과 i 번째 요소의 측정점에서의 관계로 방사저항 $R_{i,j}$ 을 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{i,j} = \frac{k^2 \rho c}{4\pi S^2} \iint_{S_i} \iint_{S_j} \text{Im}\{ \mathcal{G}(x/x_s)/k \} dS(x_s) dS(x) \quad (5)$$

여기서, k 는 파수(wave number)이고, ρ 는 매질의 밀도이며, c 는 음속이다. 그리고, \hat{G} 는 자유공간의 그린함수(Green's function)이다. 또한, 방사저항 측정기(radiation resistance probe)로 방사저항행렬 R 를 구하면 다음 식과 같다.

$$[R] = \begin{bmatrix} R_{1,1} & R_{1,2} & \cdots & R_{1,n} \\ R_{2,1} & R_{2,2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ R_{n,1} & & & R_{n,n} \end{bmatrix} \quad (6)$$

3. 수치예제

3.1 해석모델

본 논문에서는 균열이 없을 때와 있을 때의 직사각형 진동평판에 균열의 방향각도에 대해 방사되는 음향파위를 서로 비교하고자 한다. Fig. 1은 수치해석 과정을 통해 음향파위를 구하는 절차를 나타낸 것이다. 단계별로 살펴보면, 첫 단계에서 구조물의 기하학적 구조데이터와 진동응답을 구하게 된다. 다음 단계로 그 데이터와 진동응답을 입력데이터로 사용하여 체적속도를 구하며 방사저항행렬과 음향파위를 구하게 된다.

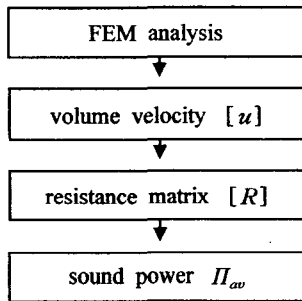


Fig. 1 Flow chart for the sound power calculation

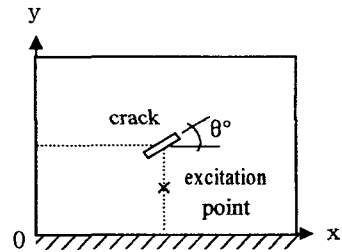


Fig. 2 A plate with a crack of orientation θ°

Fig. 2는 해석에 사용된 평판모델이며 알루미늄 외팔판(cantilever plate)을 대상으로 하였다. 평판의 가로, 세로 및 높이는 $0.4 \times 0.3 \times 0.003\text{m}$ 이고, 균열의 위치는 평판의 중심에서 $0.05 \times 0.01 \times 0.003\text{m}$ 의 크기를 갖으며 방향각도는 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 순으로 바꾸어 가며 비교하였다. 가진점은 균열의 중심에서 $-y$ 축방향으로 0.1m 떨어진 지점에서 1N 의 힘을 주었다. 물성치데이터로 탄성계수는 69GPa 이고, 밀도는 2705kg/m^3 이고, 푸아송비는 0.33 이며, 구조감쇠는 0.01 을 주었다.

Fig. 3은 직사각형 평판을 12개의 요소인 4×3 의 요소망(mesh)으로 나누고, 방사저항행렬을 이론과 실험으로 구한 결과를 비교한 것이다. 실험치는 방사저항기를 이용하였으며, 해석에 사용한 모델을 12개의 요소로 나누었기 때문에 방사저항행렬은 12×12 형태로 나오는데 그 중에서 6가지만 아래와 같이 나타내었으며, 이론과 실험값이 비슷하다.

또한, 주파수대역별로 계산을 하여 보면 저주파수대역에서는 모든 요소가 비슷한 값으로 나타나

는데 1번째 요소만 진동하여도 모든 요소에서 1번째 요소와 비슷한 결과값으로 나타난다. 고주파 수대역으로 갈수록 대각선항(digonal term)이 지배적인데 1번째 요소만 진동하면 1번째 요소에만 집중적인 영향을 미친다.

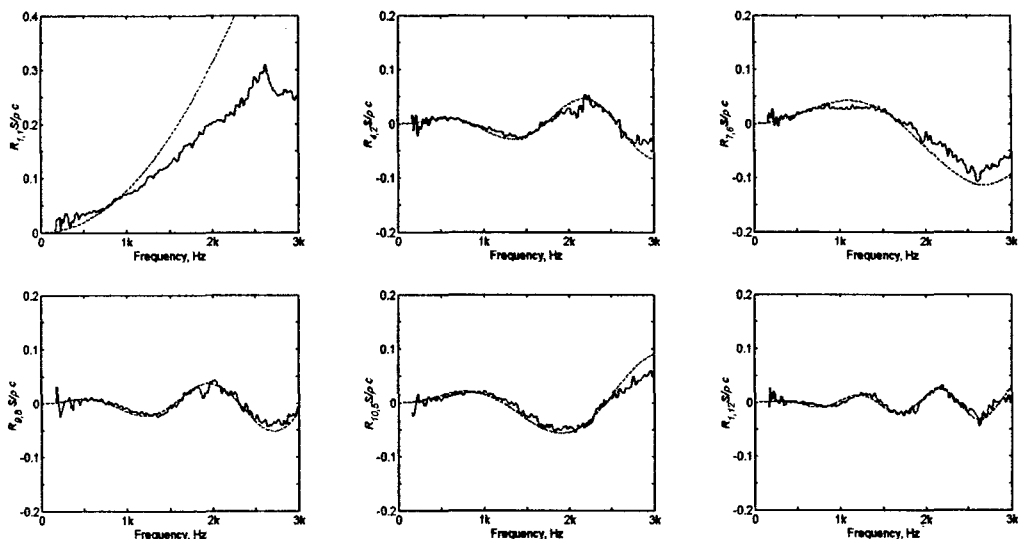


Fig. 3 Radiation resistance of rectangular vibrating plate(..... theoretical, — experimental)

3.2 고유진동수와 모드형상

진동응답은 ANSYS을 이용하여 고유진동수와 모드형상을 구하였다. 요소의 분할은 균열의 폭과 비슷한 크기로 작게 나누고, 모드해석을 통해 다음 결과를 산출하였다. 균열이 없을 때와 있을 때를 살펴보면 균열이 있으므로 해서 고유진동수는 감소하고 모드형상의 경사각이 조금 증가하는 경향을 보였다. 또한, 모드형상이 위아래로 대칭 모드형상은 음향파위가 서로 상쇄되어 공진주파수에서 피크가 나타나지 않았다. Table 1은 균열의 유무에 따른 음향파위 결과 중 31차 공진주파수까지만 나타낸 것이다.

Table 1 Resonance frequencies of the plate

Mode	1	3	4	7	8	11	12	13	16	20	22	24	28	31	
Without crack	28.464	137.05	180.41	341.06	498.79	579.22	675.00	791.76	983.81	1167.3	1389.7	1586.2	1802.0	1965.5	
With crack	$\theta=0^\circ$	28.360	136.84	177.65	337.79	497.89	578.55	670.90	788.84	972.19	1156.6	1388.4	1583.2	1780.5	1960.6
	$\theta=45^\circ$	28.412	136.58	178.82	338.27	497.90	576.60	671.65	786.63	978.11	1161.3	1383.2	1578.9	1787.6	1962.4
	$\theta=90^\circ$	28.446	136.08	179.68	338.67	498.36	573.63	672.40	783.64	982.11	1163.6	1376.0	1570.6	1799.2	1960.7

3.3 방향각도와 음향파위의 관계

기계적인 충격 등에 의해 구조물에 진동이 전달되면 표면에서 구조물에 파동(wave motion)이 발생하고 소음이 방사된다. 일반적으로 소음발생은 음원의 강도에 따른 진동량에 비례한다.

Fig. 4는 균열의 방향각도를 0°, 45°, 90°로 바꾸어 가며 음향파위를 나타낸 것이다. 300~1300 Hz와 2000~2500 Hz부분은 균열의 방향각도와 모드형상과의 관계를 뚜렷하게 나타내어 주는 부분이다. 그리고, 저주파에서 고주파로 갈수록 음향파위가 크게 나타나는 경향을 보인다. 또한, 균열이 없을 때보다 있을 때의 음향파위가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 저주파대역에서 방향각도가 파위값에 변화를 주지 않고 거의 비슷한 이유는 저주파수대역에서는 모드형상의 변화가 적기 때문에 균열의 유무가 파동의 주기에 영향을 거의 주지 않는다.

모드형상을 살펴보면 노드선(nodal line)과 균열의 방향이 같은 방향으로 되면 음향파위가 커지는데, 부분적인 불연속 구조물에서 파가 진행하면서 반사(reflection) 또는 전파(propagation)가 발생한다. 파가 진행하면서 균열의 경계면을 만나면 반사파가 생겨 위상차가 생긴다. 다시 그 반사파가 경계면을 만나면 반사가 되어 위상차가 생긴다. 이런 과정을 진행하다 보면 진동량이 커지고 음향파위도 증가하게 된다.

Fig. 5는 방향각도에 따른 모드형상을 등고선으로 나타낸 것이다. 방향각이 0°의 경우는 8, 16, 36차의 공진주파수에서, 방향각이 45°의 경우는 7, 12, 20차의 공진주파수에서 그리고 방향각이 90°의 경우는 11, 22, 34차의 공진주파수에서 뚜렷한 변화를 나타내고 있다.

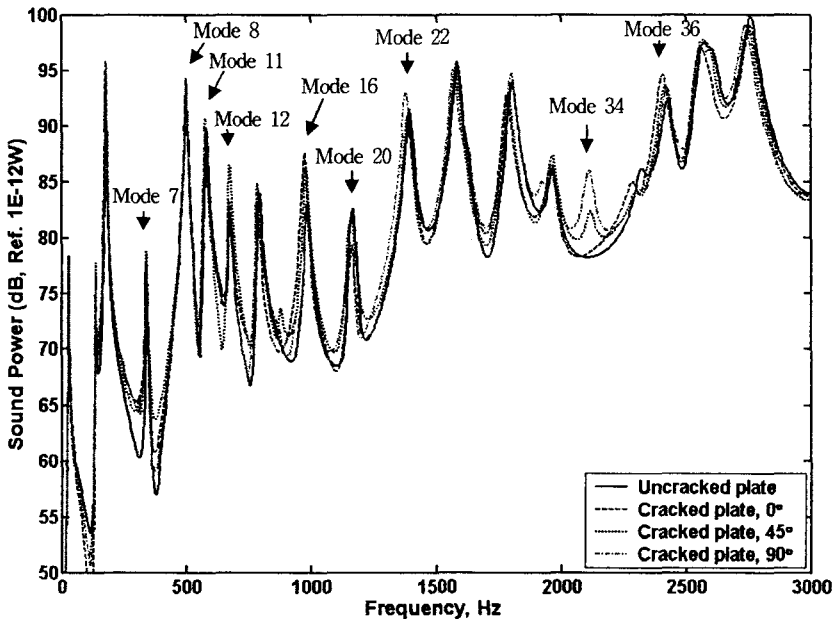


Fig. 4 Sound power as the orientation angle

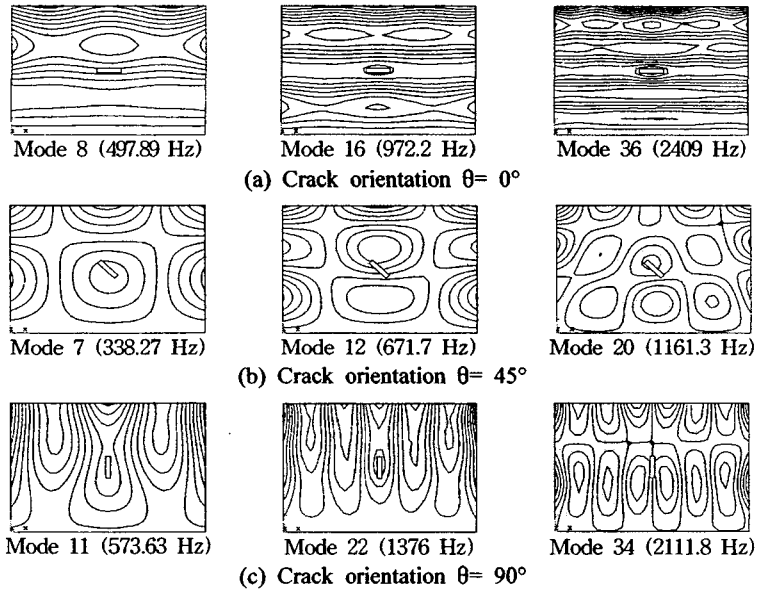


Fig. 5 Vibration mode of high sound radiation

4. 결 론

본 논문에서는 균열을 갖는 진동평판의 음향 방사특성과 방향각도의 관계를 연구하였다. 구조물에 균열이 발생하면 고유진동수가 감소하고 모드형상 변화가 있으며 진동응답이 증가하여 음향파위가 커지는 것을 알 수 있었다. 모드형상을 살펴보면 노드선과 균열의 방향이 동일한 경우 특정 공진주파수에서 특별한 음향 방사특성을 나타내었다. 충격에 의한 파동의 진행이 균열의 방향각도와 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에 구조물에 음향 방사특성을 나타내는 것이다. 그리고, 방향각이 90°인 경우 최고 8 dB의 차이값을 보이고 가청주파수 범위에서 균열의 방향각에 따른 소음도를 구별할 수 있었다.

참고문헌

1. Gade, S., Ginn. K. B., Roth, O. and Brock, M. (1983), "Sound Power Determination in Highly Reactive Environments Using Sound Intensity Measurements," Proc. INTER-NOISE 83, pp. 1047-1054.
2. 이준서, 차경옥 (1998), "굴림 베어링 요소의 결함 검출시 음향 인텐시티 기술 적용에 관한 실질적인 연구," 한국박용기관학회지, Vol. 23, No. 4, pp. 473-479.
3. 황준석, 송준영, 김승조 (2000), "타격음을 이용한 복합재료 구조물의 손상탐지법의 개발," 한국복합재료학회, 춘계학술대회 논문집, pp. 171-174.
4. Fahline, J. B. and Koopmann, G. H. (1997), "Numerical Implementation of the Lumped Parameter Model for the Acoustic Power Output of a Vibrating Structure," Journal of Acoustical Society of America, Vol. 102, pp. 179-191.