

보강된 평판구조물의 음향방사특성에 관한 실험적 고찰

강준수* · 김정태**

(1997년 9월 4일 접수)

Radiation Characteristics on a Stiffened Plate Structure

Jun-Soo Kang and Jeung-Tae Kim

Key Words : Structural Vibration(구조물 진동), Boundary Element Method(경계요소법), Sound Intensity(음향인텐시티), Critical Frequency(임계주파수), Radiation Efficiency(방사효율)

Abstract

It is very important to understand the vibration and noise characteristics of a structure to develop quiet machines and lessen their noise. In this paper, the vibration and sound radiation characteristics of a simple and a bar-stiffened plate have been investigated using numerical and experimental techniques. In numerical process, FEM analysis has been performed for the vibration level ; the time-space squared and averaged velocity and BEM analysis for sound radiation parameters ; sound power and radiation efficiency. In experimental process, FFT signal processing method has been used. While a power from an exciter is applied to the the structure by using a point contact, sound intensity and vibration level has been measured. Based on these two data, the radiation efficiency has been calculated. Results show that the radiation efficiency for the stiffened structure increases compared to the simple plate, due to the extra edges provided by the stiffener.

1. 서론

구조물의 진동에 의해 소음이 방사되는 현상은 기계에서 소음의 발생원으로 볼 수 있기 때문에 기계류의 소음을 예측하거나 저감방안을 제시하기 위해서는 구조물의 동특성과 방사특성을 이해하고 있어야 한다. 특히, 엔진블럭, 펀치프레스, 배의 갑판구조물 등과 같은 대다수의 소음 발생기계는 평판의 형상을 가진 구조물로서 기계적인 충격 등에 의해 그 표면에서 소음이 발생되므로 강성을 증가

시키고, 소음저감을 목적으로 빔(beam)과 같은 보강재를 통해 보강되어 있다.

한편, 평판이나 원판 또는 구와 같은 단순한 형태의 특정구조물은 해석적인 방법으로 그 소음현상을 예측할 수 있다. 특히 경계면을 갖는 단순평판의 경우 아음속 주파수대역에서의 방사효율(radiation efficiency)은 여러 가지 방법과 형태로 유도되어 있다. Beranek은 공진모드(resonant modes), 즉주파수대역에서의 평균모드밀도에 의해서 방사되는 파워(power)값을 이용하여 통계처리하여 구하였고,⁽¹⁾ Cremer와 Heckl 등도 감쇠가 작은 평판에 점가진력(point-excited)이 작용할 경우 임계주파수보다 아주 작은 주파수범위에서의 방사효율을 계산하였다.⁽²⁾ 또한 Lyon은 가역원리를 이용하여

*한국전력공사

**회원, 홍익대학교 기계공학과

아음속주파수대역에서의 방사효율식을 유도하였다.⁽⁶⁾ 그러나 불연속 평판구조물의 진동 및 방사특성은 평판에 대한 순수이론으로는 해석이 어렵게 된다.

본 연구에서는 구조물 진동에 의한 음향방사특성을 수치해석적인 방법을 통해 예측하였으며, 실험(음향인텐시티 측정)을 이를 검증하고자 하였다. 4 변 단순지지된 2차원 평판구조와 보강평판을 그 대상으로 하였으며, 수치해석적인 방법에서는 구조물의 진동해석은 유한요소법으로 음의 방사현상은 경계요소법으로 해석하였다. 그리고 실험은 FFT 신호분석을 통한 음향인텐시티 측정을 통해 방사효율 등을 계산하였다.

2. 평판의 방사특성

진동에 의해 발생하는 소음의 경우에 있어서는 진동에너지는 주로 굽힘파(bending wave)에 의해 전달된다. 이러한 굽힘파는 에너지가 수직으로 구조물 요소를 변형시키면서 인접한 매질과 상호간섭을 일으키며 전파되고 따라서 주위의 공기층과도 에너지를 상호교환하므로 소음발생의 주된 원인이 된다.

이론적으로 경계면을 가지고 있지 않은 무한평판의 경우, 임계주파수를 그 경계로하여 아음속 주파수 대역에서는 음의 방사효율이 zero가 되어 효과적인 음의 방사가 이루어지지 않음을 알 수 있다. 그러나 실제로는 모든 구조물은 경계면을 가지고 있으므로 이러한 경계면에 의한 영향으로 음의 방사는 경계면 인접에서 주로 나타난다. 이때 구조물에서 방사되는 소음의 해석시 임계주파수보다 큰 주파수대역에서는 음향방사현상의 예측이 비교적 용이하나 임계주파수보다 낮은 대역에서는 경계면 조건과 평판의 두께 불균일성이 영향을 주게 된다.

이와같이 구조물의 진동-소음연성문제에 있어서 방사특성을 나타내주는 주요 변수로서 임계주파수(critical frequency)와 방사효율(radiation efficiency)이 매우 중요하게 이용되며 그 의미는 다음과 같다.

2.1 임계주파수

굽힘파가 구조물을 통해 전파되는 속도(phase speed) C_b 는 두께 h 를 갖는 평판의 경우 다음과 같다.⁽⁷⁾

$$C_b = \sqrt{2\pi f \kappa C_l} \quad (1)$$

여기서, f 는 주파수를, C_l 은 종파(longitudinal wave)의 전파속도를 나타내며 κ 는 구조물의 강성과 관련된 값으로서 $h/\sqrt{12}$ 의 값을 갖는다.

윗 식에서 굽힘파의 속도는 종파나 전단파와는 달리 주파수에 따라 변하는데 이러한 현상을 분산(dispersion)이라고 한다. 그리고 굽힘파의 전파속도가 음속과 같을 때의 주파수(f_c)가 음장해석과 관련하여 매우 중요한 의미를 갖는다. 즉, 굽힘파의 전파속도가 아음속인 경우에는 음장을 형성할 수 있는 에너지를 주위의 매질로 충분히 방출하지 못하지만, 공기중의 음속과 같거나 큰 초음속인 경우에는 효율적으로 주위의 매질(공기)로 음향에너지를 전파하게 된다. 따라서 굽힘파의 전파속도가 음속에 해당하는 주파수를 임계주파수(critical frequency)라 하여 음장해석에서 중요한 변수로서 사용된다.

2.2 방사효율

임계주파수와 더불어 구조물의 방사효과를 나타내는 변수로서 방사효율(radiation efficiency)이 있다. 방사효율은 진동체 표면이 유체를 향하여 얼마나 효과적으로 에너지를 방사하는가를 나타내는 척도로서 다음과 같이 정의된다.^(5,7)

$$\begin{aligned} \sigma_{rad} &= \frac{(\text{Sound Power})_{actual}}{(\text{Sound Power})_{plane}} \\ &= \frac{W}{\rho_0 c \langle v^2 \rangle S} \\ &= \frac{I_r}{\rho_0 c \langle v^2 \rangle} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, W 는 실제로 방사된 음향파워를, I_r 는 음향인텐시티를 나타내며, ρ_0 는 공기의 밀도, c 는 음속, S 는 진동체의 표면적, $\langle v^2 \rangle$ 는 시간-공간 평균속도를 의미한다. 따라서 방사효율은 진동체표면이 피스톤 진동과 같이 일정한 표면속도로써 진동시 방사된 음향파워와 실제로 방사된 음향파워의 비가 된다. 방사효율은 평판이나 원판 그리고 구와 같은 단순한 형태의 특정구조물에 대해서만 그 결과를 얻을 수 있으며 형상이 복잡한 구조물의 경우에는 통상 수치해석적인 방법에 의존하게 된다.

특히, 진동구조물에서의 방사효율은 임계주파수와 관련하여 중요한 면을 보여주는데, 진동주파수가 임계주파수 아래영역에서는 방사효율은 1보다

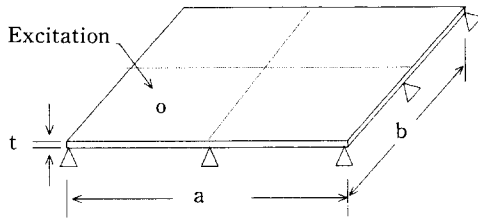


Fig. 1 A simple plate.

Table 1 Material property for the simple plate.

Material	Young's modulus (GPa)	Density (kg/m ³)	Poisson ratio
Al	71	2700	0.33

작은 값을 갖고 임계주파수보다 큰 영역에서는 1보다 크거나 같은 값을 갖는 특징을 보인다.

단순평판의 경우, 방사효율은 다음과 같이 알려져 있다.⁽³⁾

(i) 아음속 주파수대역

$$\sigma_{rad} = 2\pi \frac{Px}{A} \frac{C_l}{C_o} \sin^{-1} \sqrt{\left(\frac{f}{f_c}\right)} \quad (3)$$

여기서, P 는 평판의 들레질, A 는 평판의 표면적, C_l 은 종파의 전파속도, C_o 는 음속을 그리고 f_c 는 임계주파수를 나타낸다.

(ii) 초음속 주파수대역

$$\sigma_{rad} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \quad (4)$$

3. 대상모델

본 연구에서는 재질이 균일한 얇은 2차원 평판구조와 보강평판을 대상으로 진동에 의한 방사특성을 해석하였다. 사용된 단순평판 및 보강평판과 보강재는 모두 그 재질을 알루미늄으로 하였으며 형상은 사각형으로, 경계조건은 4변 단순지지로 이를 구속하였고 그 형상은 Fig. 1과 Fig. 2에 도식적으로 보여주고 있다. 평판의 재료특성값(material property)과 기하학적 치수(dimension)는 Table 1과 Table 2에 제시되어 있다. 보강평판의 경우 보강재(50×50×3900 mm)는 세로방향 중심선에 30°의 경사를 두고 설치하였으며, 단면은 사각단면으로 하였다.

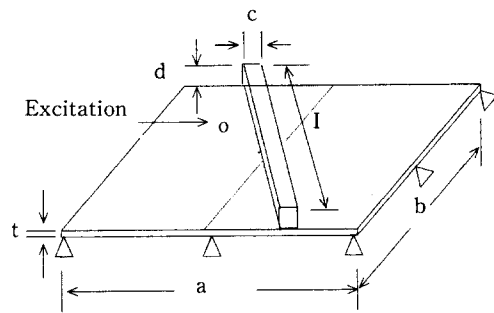


Fig. 2 A stiffened plate.

Table 2 Dimensions for the simple plate and stiffener (mm).

a	b	c	d	l	t	B, C
1000	600	50	50	3900	6	S.S.S.S

이론적으로 단순평판의 경우에 대해서는 음의 방사가 시작되는 임계주파수의 산출이 가능하며, 식 (1)을 이용하여 다음과 같은 식으로 이를 구할 수 있다.

$$C_o = \sqrt{2\pi f_c \alpha C_l} \quad (5)$$

여기서, C_o 는 음속을, f_c 는 임계주파수를 의미한다. 본 연구에 사용된 모델의 경우에는 종파의 전파속도는 5100 m/s이므로 음속을 343 m/s로 했을 때 임계주파수는 2120 Hz가 되며, 이 주파수를 경계로 방사특성이 크게 상이한 면을 보이리라 예상할 수 있다.

4. 경계요소법을 이용한 방사특성

본 연구에서는 단순평판과 보강평판을 그 대상으로 음향방사현상을 전 주파수대역에 걸쳐서 수치해석적인 방법으로 해석하였다. 해석과정에서 평판의 진동크기는 유한요소법을 이용하여 계산하였다. 유한요소해석으로 임의의 평판구조에 대해 진동속도의 제곱평균(v^2)을 구하며, 이 값이 평판에 가해지는 에너지(또는 파워)의 기준값이 되며 음향해석시 필요한 속도경계조건이 된다. 진동특성을 해석한 후, 경계요소법(BEM)을 해석하는 프로그램을 이용하여 단순평판과 보강평판의 음향파워(sound power) 및 방사효율(radiation efficiency) 등을 계산하게 된다. 다음 Fig. 3은 비연성(uncoupled)

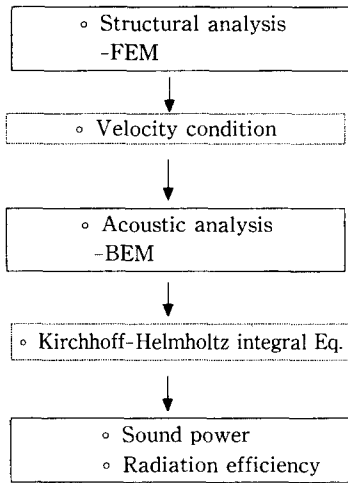


Fig. 3 Numerical analysis process of structural vibration-acoustics coupling problem.

인 구조물의 진동-소음문제에 대한 수치해석과정을 보여주고 있다.

4.1 수치해석 모델 데이터

구조물의 진동해석은 유한요소해석 상용프로그램인 ANSYS를 이용하였으며 모델링은 해석하고자 하는 최대주파수의 파장당 최소한 4개의 요소의 크기로 모델링하였다. 사용된 요소는 평판의 경우에는 4절점 셀(shell)요소를, 보강재의 경우에는 2절점 빔(beam)요소를 사용하였다. 편의상 재료의 감쇠비(damping ratio)는 전 주파수대역에 걸쳐 일정한 값 0.01로 가정하여 주파수응답해석(frequency response analysis)을 수행하였다. 이때 가진점은 단순평판의 경우 3사분면의 정 중앙점에, 보강평판의 경우에는 2사분면의 정 중앙점으로 하였다. 가진력의 크기는 단위 Force로 하였고 가진주파수는 옥타브 밴드의 중심주파수로 하였다. Fig.1과 Fig.2에 가진점의 위치가 나타나 있다.

구조물의 음의 방사현상은 경계요소해석 상용프로그램인 COMET을 이용하였다. 평판의 경계면 요소의 분할은 4절점 셀요소를 사용하여 ANSYS에서 모델링하였으며, 이때 요소의 크기는 최대관심 주파수 파장의 1/4이하로 하였다. 요소크기를 $\lambda/4$ (λ : 파장의 길이)로 한 것은 최적의 요소의 크기를 사용함으로써 합리적인 결과와 함께 해석시간을 크게 줄일 수 있는 이점이 있기 때문이다.⁽⁸⁾

Table 3은 경계요소해석 모델에 관련된 정보를 보

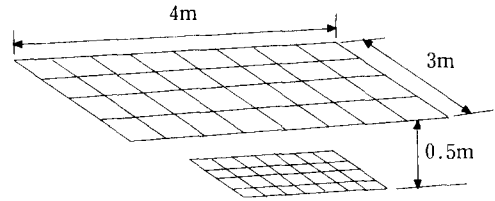


Fig. 4 BEM model for a simple plate.

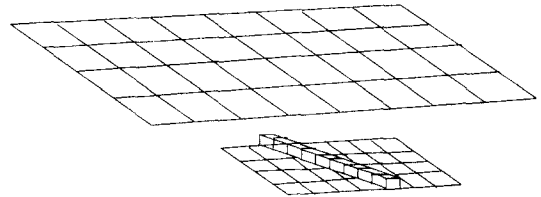


Fig. 5 BEM model for a stiffened plate.

Table 3 Data for BEA model.

Classification	Simple plate	Stiffened plate
Node	756	800
Element	700	764

여주고 있다. 단순평판의 경우, 756개의 절점과 700개의 요소가 형성되었으며, 보강평판은 800개의 절점과 764개의 요소가 형성되었다. Data recovery mesh(4×3 m) 또한 4절점 셀요소를 사용하여 모델링하였으며, 평판으로부터 0.5 m 떨어진 곳에 위치하였다. 본 해석이 전형적인 외부음장문제인 관계로 간접적인 방법(indirect method)을 이용하였으며, 음향계(공기)의 밀도가 구조물의 밀도보다 상대적으로 아주 작은 관계로 비연성이라는 가정하에 해석을 수행하였다. Fig.4와 Fig.5는 단순평판과 보강평판에 대한 경계요소해석 모델을 보여주고 있다.

4.2 수치해석결과

단순평판과 보강평판의 각각의 경우에 대해서 해석결과가 Fig.6과 Fig.7에 나타나 있으며, Fig.8은 평판의 방사효율에 대한 이론곡선과 함께 해석결과를 보여주고 있다. 해석결과, 보강평판의 방사효율이 단순평판보다 컸음을 알 수 있었다. 그렇지만 이론식과는 상당한 오차를 보여주고 있다. 특히, 단순평판의 경우 가진주파수가 임계주파수보다 낮은 영역인 250 Hz와 500 Hz에서는 방사효율은

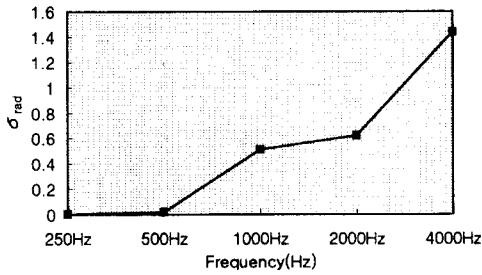


Fig. 6 Radiation efficiency : a simple plate. (BEA result)

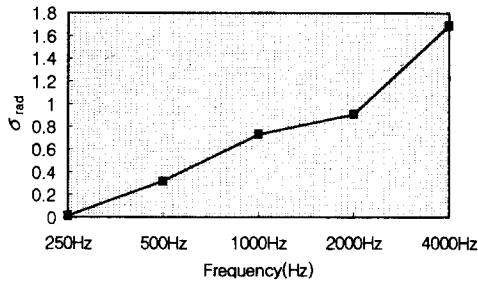


Fig. 7 Radiation efficiency : a stiffened plate. (BEA result).

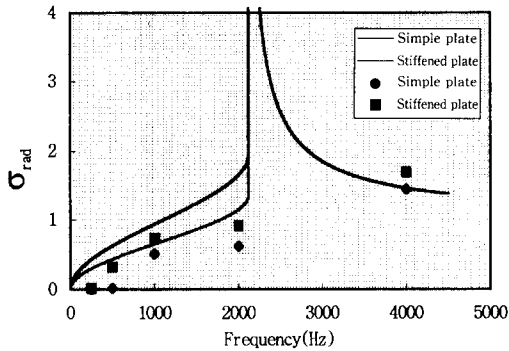


Fig. 8 Plate structure : BEA result.

매우 낮은 값을 나타냈으며, 보강평판과는 10배 이상 큰 차를 보여주고 있다. 그리고 가진주파수가 임계주파수보다 큰 4,000 Hz에서는 단순평판의 방사효율이 이론식에 거의 근접했으며 보강평판보다는 낮은 값을 보여주었다.

5. 방사효율의 측정

구조물의 주요 음향방사 특성변수인 방사효율을 계산하기 위해서는 음향인텐시티를 알아야 한다. 음향인텐시티는 공간상에서 전파되는 소음의 에너지밀도로서 크기와 방향을 가지고 있는 벡터량이다.

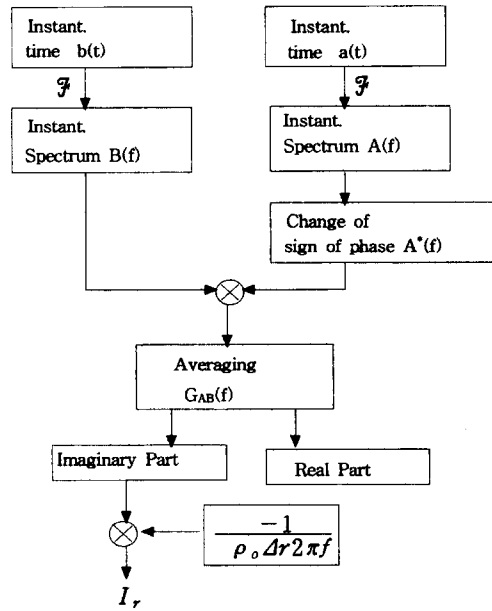


Fig. 9 Evaluation of sound intensity using FFT method.

다. 즉, 음향인텐시티는 음파의 진행방향에 수직한 단위면적당 에너지의 흐름률을 나타내며 다음과 같은 식으로 표현된다.⁽⁴⁾

$$I = \langle pv \rangle_t = \frac{1}{t} \int_0^t pv dt$$

여기서, p 는 압력, v 는 공기입자의 속도를 나타낸다.

윗식을 보면, 음향인텐시티를 결정하기 위해서는 공기의 입자속도를 측정해야 한다. 그러나 아직까지는 입자속도를 직접 측정할 수 있는 보편적인 기술이 개발되어 있지 않으며, 따라서 현재의 2개의 마이크로폰을 이용하여 간접적으로 이를 측정한다. 이러한 방법은 기본적으로 음압측정을 바탕으로 FFT 분석을 이용하고 있다. 즉, 공기입자의 속도를 측정하기 쉬운 변수인 압력으로 표현하면 음향인텐시티는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.⁽⁹⁾

$$I(f) = \frac{-2}{\omega \rho_0 \Delta r} \text{Im}(S_{12}) = \frac{-\text{Im}(G_{12})}{\omega \rho_0 \Delta r}$$

여기서, ω 는 주파수, ρ_0 는 공기의 밀도, $\text{Im}(S_{12})$ 는 1지점과 2지점에서 측정된 음압의 상호 스펙트럼(cross spectrum)의 허수부이다.

Fig. 9는 2개의 마이크로폰을 이용하여 FFT 분석을 통해 음향인텐시티를 측정하는 방법을 보여주

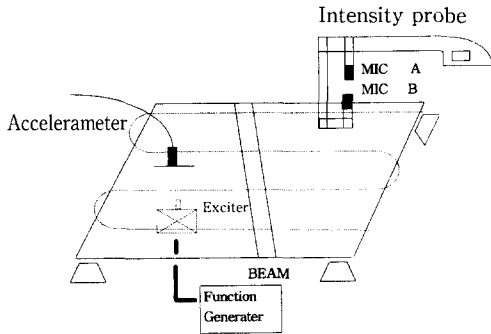


Fig. 10 Experimental diagram.

Table 4 The specification of the experiment equipment.

Instrument	Specification
FFT	Larson-Davis model 3200
Sound intensity	B&K type 3548
Signal generator	SRS model DS-360
Exciter	B&K type 4810
Accelerameter	PCB model 353B03

고 있다.

5.1 실험장치의 구성

FFT 분석기를 이용한 음향인텐시티 측정방법으로 구조물의 방사효율을 실험적으로 측정하였다. 실험은 Table 1과 Table 2에 제시되어 있는 구조물에 대하여 실행되었으며, FFT분석기(FFT signal analyser)와 신호발생기(function generator), 그리고 2개의 마이크로폰으로 이루어진 음향인텐시티 측정센서(intensity probe)와 가속도센서(accelerometer)를 이용하였다.

마이크로폰은 B&K社의 Type 4181을 사용하였다. 사용된 마이크로폰의 직경은 1/2"이며, 두 마이크로폰의 간격은 8.5 mm를 유지하였다. 이때 측정가능한 주파수 범위는 20Hz~7.1 kHz이다. 또한 위상특성(phase matching)을 보면 20 Hz와 250 Hz 사이에서는 0.05°를, 250 Hz 이상에서는 (frequency/5000)°를 나타내고 있다. 감도(sensitivity)는 각각 10.5 mV/Pa과 10.6 mV/Pa이었다. 한편 가속도센서는 PCB社의 Model No. 353B03을 사용하였다. 가속도의 공진주파수는 47.5 kHz이며, 무게는

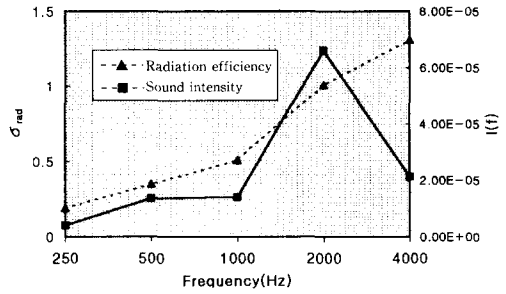


Fig. 11 Sound intensity and radiation efficiency for a simple plate. (Experiment result)

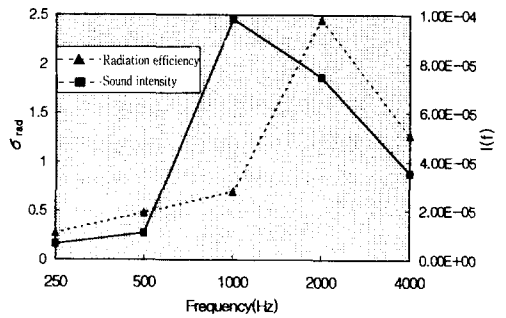


Fig. 12 Sound intensity and radiation efficiency for a stiffened plate. (Experiment result)

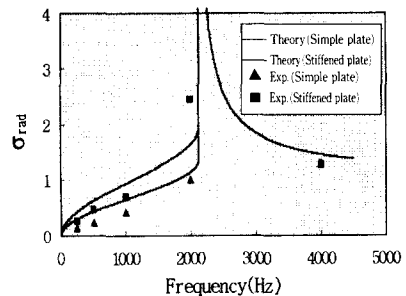


Fig. 13 Comparison of theory and experiment for radiation efficiency.

9.7 g으로 감도는 9.89 mV/g이었다. Table 4는 사용된 측정장비의 사양을 보여주고 있으며, Fig. 10은 실험장치를 도식적으로 보여주고 있다. 실험시 가진기는 신호발생기를 이용하여 가진시켰으며, 이때 가진신호는 진폭이 3 mV인 정현파로서 주파수는 옥타브 밴드의 중심주파수로 하였다. 가진기는 평판아래에 위치시켰는데, 이는 가진기와 평판의 접촉에 의한 소음의 영향을 줄이기 위한 것이다. 또한 실험을 전후로 하여 가속도센서에 대한 교정(calibration)을 실시하였다. 사용된 교정기

Table 5 Estimated value of the time-space averaged velocity.

	Frequency (Hz)	$\rho_0 \Delta r$	$\text{Im}(G_{12})$	I_{actual}
I_{actual}	250	10.285E-03	-6.56E-05	4.06E-06
	500		-4.39E-04	1.36E-05
	1000		-9.05E-04	1.40E-05
	2000		-8.54E-03	6.61E-05
	4000		-5.51E-03	2.13E-05
	Frequency (Hz)	$\rho_0 c$	$\langle v^2 \rangle$	I_{plane}
I_{plane}	250	415.03	2.27E-04	0.094
	500		3.06E-04	0.127
	1000		2.57E-04	0.107
	2000		3.97E-04	0.165
	4000		1.98E-04	0.082

(calibrator)의 가진신호의 주파수는 79.6 Hz였으며, 가속도는 1 g였다.

5.2 실험 및 결과 분석

실험은 가진기(exciter)를 이용하여 구조물에 진동을 야기시킨 후, 구조물 표면에서의 음향인텐시티를 진동크기와 함께 공간상의 여러곳에서 측정한다. 이의 평균값을 구하였다. 먼저, 구조물 표면에 가속도센서를 설치한 다음 가진기를 이용하여 구조물을 가진시킨 다음 여러 위치(20지점)에서 속도스펙트럼을 구하고 이들을 산술평균하였다. 이와 병행하여 두 개의 마이크로폰으로 이루어진 음향인텐시티 측정센서를 이용하여 구조물 표면의 여러 위치에 대한 음향인텐시티값을 산술평균하여 구하였다. 그리고 그 결과를 방사효율식 (2)에 대입하여 방사효율값을 구하였다.

Table 5와 Table 6은 각각 단순평판과 보강평판의 음향인텐시티 계산과정을 보여주고 있다. 진동크기는 각각의 위치에서 10초간격의 Averaging을 2번씩 측정하여 산술평균한 값이며, 음향인텐시티는 20초간격의 Averaging으로 10번을 측정하여 산술평균한 값이다. Fig. 11과 Fig. 12에 단순평판과 보강평판의 방사효율에 대한 실험결과치가 나타나

Table 6 The sound intensity value.

	Frequency (Hz)	$\rho_0 \Delta r$	$\text{Im}(G_{12})$	I_{actual}
I_{actual}	250	10.285E-03	-1.04E-04	6.44E-06
	500		-3.49E-04	1.08E-05
	1000		-6.35E-03	9.84E-05
	2000		-9.65E-03	7.47E-05
	4000		-9.12E-03	3.53E-05
	Frequency (Hz)	$\rho_0 c$	$\langle v^2 \rangle$	I_{plane}
I_{plane}	250	415.03	2.40E-04	0.100
	500		2.33E-04	0.097
	1000		5.82E-04	0.242
	2000		3.05E-04	0.127
	4000		2.61E-04	0.108

있다. 두 그림을 비교해 보면 아음속 주파수대역의 경우, 보강평판의 방사효율이 250 Hz에서는 42%, 500 Hz에서는 37%, 1000 Hz에서는 37%, 2000 Hz에서는 142% 정도 큰 값을 보여주고 있으며, 초음속 주파수대역인 4000 Hz에서는 4% 정도의 오차로 거의 비슷한 값을 보여주고 있다. 따라서 전반적으로 보강평판의 방사효율이 단순평판보다 크게 나타나고 있으며, 단순평판에서는 주파수가 점차 증가하면 방사효율이 1로 접근하는 것을 볼 수 있다. 이는 수치해석결과와 같은 경향을 보여주고 있다. 따라서 보강재의 영향이 방사효율에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있으며, 이는 보강재로 인한 불연속면의 존재가 평판의 유효 둘레길이를 증가시킨 결과로 판단된다. Fig. 13은 실험결과치와 이론식과의 비교를 보여주고 있다. 단순평판의 경우, 250 Hz에서는 53.8%, 500 Hz에서는 47.5%, 1000 Hz에서는 37.3%, 2000 Hz에서는 12.2% 정도의 오차를, 보강평판의 경우, 250 Hz에서는 38.6%, 500 Hz에서는 23.7%, 1000 Hz에서는 25.5%, 2000 Hz에서는 -48.5% 정도의 오차를 보여주고, 임계주파수보다 낮은 아음속 주파수대역에서 실험치와 이론값의 오차에 대한 근본적인 원인은 방사되는 음향파위의 절대치 자체가 작기 때문이며, 임계주파수대역에서는 이론값이 실제 준

재하지 않기 때문이다. 그러나, 이와 같은 오차의 존재에도 불구하고, 실험의 결과로부터 도출된 방사효율의 값들은 임계주파수 전, 후를 경계로 이른치의 경우와 같이 아유속 주파수대역의 방사효율특성과 초음속 대역의 방사효율특성을 따라가고 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

실제 기계구조물은 대부분 단순평판이 아니라, 부분부분 보강재에 의해 강성을 증가시킨 형상을 가지고 있다. 따라서, 실제의 물체에 접근한 구조물의 진동과 음향방사특성에 대한 연구는 중요하리라 판단되어 단순평판과 보강평판을 그 대상으로 연구를 수행하였다.

수치해석과 실험을 통해서 보강평판의 방사효율은 단순평판보다 높게 나타남을 알 수 있었다. 이는 임계주파수 이하의 주파수대역에서는 음의 방사가 평판의 경계면에서 주로 일어난다는 사실로 미루어 볼때, 보강재로 인한 불연속면의 존재는 평판의 유효 둘레길이를 증가시키므로 방사효율이 증가되었다고 판단된다. 한편, 보강재로 인해 구조물의 강성이 증가되었고 평판의 유효두께가 커진 관계로 임계주파수값이 낮아지고 진동에너지가 불연속면인 보강재(빔)부분에서 소음에너지로 추가방사되는 것도 방사효율증가의 원인으로 사료된다.

후 기

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구 조성비(기계공학: ME96-D-29)에 의하여 연구되었으며, 지원해 주신 관계기관에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Beranek, L. L., 1971, *Noise and Vibration Control*, McGraw-Hill book company.
- (2) Cremer, L., 1973, Heckl, M. & Ungar, E., *Structure-borne Sound*, Berlin ; Springer-Verlag.
- (3) Lyon, R. H., 1987, *Machinery Noise and Diagnostics*, Butterworths.
- (4) Kinsler, L. E., 1981, *Fundamentals of Acoustics*, John Wiley and Sons.
- (5) Fahy, F., 1985, *Sound and Structural Vibration*, Academic Press, Inc.
- (6) Bernhard, R. J. and Keltie, R. F. (Eds), 1989, "Numerical Techniques in Acoustic Radiation," *WAM Meeting of ASME, NCA-Vol 6*, Dec 10-15.
- (7) 김광준, 김정태 등 공역, 1996, "소음과 진동," 반도출판사.
- (8) 김정태, 강준수, 1997, "구조물 진동·소음의 수치해석시 최적요소크기는 $\lambda/4$ 이다.", 대한기계학회논문집(A), 제21권, 제4호, pp. 1950~1956.
- (9) Fahy, F. J., 1989, *Sound Intensity*, Elsevier Applied Science.