

# 보강판의 음향방사파워저감을 위한 제진재의 위치선정

<sup>0</sup>안호일\*, 김사수\*

## The selection to position visco-elastic material for reduction radiated sound power from a stiffened plate

Ho Il Ahn, Sa Su Kim

### ABSTRACT

The first purpose of this study investigates the influence of stiffening on the acoustic response of stiffened plates, which are often employed in steel structures. And the radiation efficiency is measured by average mean square velocity and sound intensity of stiffened plates. The second, it determines influence of mass, damp and stiffness due to the partial adhesive visco-elastic material to reduce radiated sound power.

### 1. 서언

구조물의 진동이 공기라는 매질을 통하여 발생하는 것을 구조소음(Structure-Borne Sound)이라 하는데 특히 내부감쇠가 적어 진동전달이 잘되는 강구조물에서는 중요한 소음원이 된다. 이와 같이 진동으로 기인한 소음에서 진동과 소음과의 관계를 나타내는 것을 방사효율(radiation efficiency)이라 하며 G.Maidanik 등에 의해 많은 연구가 이루어졌다. 이러한 구조기인소음을 해석하는 방법에는 진동레벨을 구해 방사효율식에 대입하여 그 발생음의 크기를 구할 수 있으나, 이식은 각 주파수에 따른 방사효율이 조금씩 다르다는 것을 감안하지 않았으므로 진동으로 인한 소음레벨추정이 부정확하게 된다.

그리고 이러한 구조소음을 저감시키기 위해서 제진재를 부착하는데 부착위치에 따른 음향방사패턴을 실험을 통해 조사하여 제진재의 위치를 결정한다.

### 2. 기초이론

#### 2.1 무한평판

#### 방사효율

무한평판에서 진동과 그것에 의한 방사된 음향파워와의 관계를 표시한 중요한 척도인 음향방사효율  $\sigma$ 를 다음식에 의해 정의한다.

$$\sigma = \frac{W}{\rho c \langle v^2 \rangle S} \quad (1)$$

여기서,  $W$ 는 방사음향파워이고,  $S$ 는 방사면적,  $\langle v^2 \rangle$ 은 속도의 시간, 공간평균치이며  $\rho$ 는 공기의 밀도이고  $c$ 는 음속이다.

#### 자유굽힘파의 방사

내부감쇠가 없는 무한평판이 기계적으로 가진되면 Fig.1에 나타난 것처럼 진폭  $v_0$ 의 굽힘파가 속도  $c_B$ 로  $x$ 방향으로 전달할 때,  $y$ 방향의 진동속도  $v$ 는

$$v(x) = v_0 e^{j(\omega t - k_B x)} \quad (2)$$

라하고 굽힘파에 의해  $(x, y)$  공간에 방사된 음파의 음압을  $p(x, y)$ 라 하면

$$p(x, y) = p_0 e^{j(\omega t - k_B x - k_y y)} \quad (4)$$

로 나타내고, Fig.1에서 나타난 wave vector에서

$$k_y^2 = k^2 - k_B^2 \quad (5)$$

\* 부산대학교 조선·해양공학과

이 일어난다.

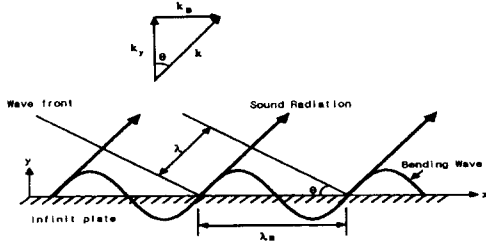


Fig.1 Sound radiation from infinite plate

공기와 판의 경계부분에서 즉,  $y=0$ 에서 평판의 진동속도와 음파의 입자속도가 같아야 한다는 조건을 고려하면 음파의 입자속도  $u(x,y)$ 는

$$u(x,0) = -\frac{1}{j\omega\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \Big|_{y=0} = \frac{p_0 k_y}{\omega\rho} e^{j(\omega t - k_B x)} \quad (6)$$

로 나타내고, 이것이 평판의 진동속도와 같아지므로

$$p(x,y) = \frac{\omega c v_0}{k_y} = \frac{\rho c v_0 k}{k_y} \quad (7)$$

식(5), 식(6)을 식(4)에 대입하면 방사음압은

$$p(x,y) = \frac{\rho c v_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{k_B}{k}\right)^2}} e^{j(\omega t - k_B x)} e^{-jy\sqrt{k^2 - k_B^2}} \quad (8)$$

이 된다. 그리고 Fig.1에서 나타난 방사각도  $\theta$ 는

$$\sin \theta = \frac{k_B}{k} = \frac{\lambda_B}{\lambda} \quad (9)$$

가 된다.

이상에서, 무한평판의 음향방사를 세 가지의 주파수영역으로 나눌 수 있다.

(a)  $k_B = k$  ( $f = f_c$ )

: 굽힘파의 전파속도와 주위매질 안의 음속이 같아질 때, 이때 판에 평행하게 전파한 임의의 점과 시각에 있어서의 방사음압은 그 이전에 방사된 음파가 합쳐지기 때문에 음압은 무한대가 된다. 이때의 주파수  $f_c$ 를 임계주파수(critical frequency)라 한다.

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m''}{B'}} \quad (10)$$

(b)  $k_B < k$  ( $f > f_c$ )

: 굽힘파의 전파속도가 주위 매질 안의 음속보다

클 때, 이때 평판위의 음압과 진동속도는 동위상이 아니고, 평판의 단위면적으로부터 방사된 음향파위  $W$ 는 다음과 같이 나타낸다.

$$W = \frac{1}{2} \text{Re}(p u^*) = \frac{1}{2} \rho c v_0^2 \frac{k}{\sqrt{k^2 - k_B^2}} \quad (11)$$

$$= \rho c \langle v^2 \rangle \frac{k}{\sqrt{k^2 - k_B^2}}$$

따라서, 방사효율은 다음과 같이 된다.

$$\sigma = \frac{k}{\sqrt{k^2 - k_B^2}} = \frac{1}{\cos \theta} \quad (12)$$

(c)  $k_B > k$  ( $f < f_c$ )

: 굽힘파의 전파속도가 주위 매질 안의 음속보다 작을 때, 이때의 방사음압은

$$p(x,y) = \frac{j\rho c v_0}{\sqrt{\left(\frac{k_B}{k}\right)^2 - 1}} e^{j(\omega t - k_B x)} e^{y\sqrt{k_B^2 - k^2}} \quad (13)$$

로 나타내고, 평판위의 음압과 진동속도와는 항상  $90^\circ$  위상으로 벗어나기 때문에 평판의 주위 매질 안으로 음파를 방사하는 것이 불가능하게 되고, 매질 안의 음압은 평판으로부터 떨어짐에 따라서 급속히 감소한다.

## 2.2 유한평판

유한평판의 경우 판의 경계에서 반사된 파에 의해 standing wave가 발생하게 되며 이것에 의해 고유진동수와 고유모드가 발생하게 된다.

### 진동모드에 따른 방사형태

유한평판의 방사특성을 평판위의 굽힘파 파수와 매질내의 음파의 파수의 대소관계에 따라 아래에 나타난 것과 같이 분류할 수 있다.

여기서, 평판의 진동모드를 절선(nodal line), 및 절선으로 둘러싸인 소부분간의 상대위상차를 +, -로 표시한 Fig.2을 사용해서 설명한다.

(a)  $k_{mx} > k$ ,  $k_{ny} > k$  (corner mode)

:  $x, y$ 양방향의 굽힘파의 파장이 음파의 파장보다 짧을 경우;

Fig.2 (a)에 표시된 것과 같이 어떤 소부분으로부터 튀어나오게 된 매질은 인접한 소부분에 흘러들어 효율적으로 압축되지 않기 때문에 방사파위는 특히 작아지게 된다. 이것은  $1/4 \lambda_{mx} \times 1/4 \lambda_{ny}$ 의

음원이 분포해 있으면 모델화가 가능하다. 서로 인접한 +, - 의 음원의 대부분은 서로 부딪혀 없어지기 때문에 이것을 소거해 가면 4corner에서만 음원이 소거되지 않은채 남는다. 그리고 남은 4corner의 음원이 평판의 음향방사에 기여하는 것이기 때문에 이때의 진동모드를 "corner mode"라 한다.

(b)  $k_{mx} > k$ ,  $k_{ny} < k$  (edge mode)

: y방향의 굽힘파의 파장이 음파의 파장보다 길고, x방향의 굽힘파의 파장이 음파의 파장보다 짧을 때;

Fig.2 (b)에 표시된 것과 같이 y방향은 절선 부근을 제외하고 대부분 없어지지 않으며, x방향에는  $\lambda_{mx}/4$ 의 큰 +, -의 음원이 인접해 있기 때문에 서로 부딪혀 없어진다. 이 때문에 y축에 평행한 양단부에 있는 음원만이 남고 이것이 음향방사에 기여하는 것이 되기 때문에, 이때의 진동모드를 "edge mode"라 한다.

$k_{mx} < k$ ,  $k_{ny} > k$ 일 때는 x축에 평행한 양단부만이 음향방사에 기여하는 edge mode가 된다.

(c)  $k_{mx} < k$ ,  $k_{ny} < k$  (surface mode)

: x, y양방향의 굽힘파의 파장이 음파의 파장보다 길 때;

절선 근방을 제외하고는 부딪혀 없어지지 않기 때문에 거의 전면으로부터 음이 방사된다.

이때의 진동모드를 "surface mode"라 한다.

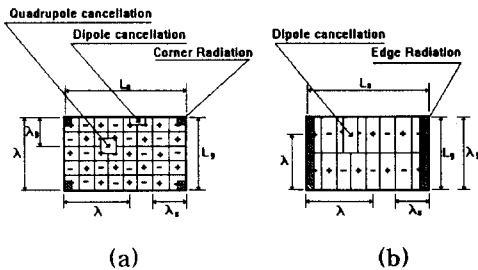


Fig.2 corner and edge radiation for finite plate

### 2.3 음향인텐시티

음향인텐시티는 단위면적을 단위시간에 흐르는 음향에너지이고 계측점의 음압  $p(t)$ 과 입사속도  $u(t)$ 의 시간평균치로서 정의된 벡터량

$$I = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} p(t) u(t) dt \quad (14)$$

이다.

음원으로부터 방사된 음향파워  $W$ 는 음원을 감싸는 폐곡면을  $S$ , 법선벡터를  $dS$ 라 하면

$$W = \int_S I \cdot dS = \int_S I_n dS \quad (15)$$

가 된다. 여기서,  $I_n$ 은 음원을 감싸는 곡면  $S$ 를 법선방향으로 통과하는 음향인텐시티이다.

### 2.4 제진재

음향방사에너지는 진동에너지와 밀접은 관계가 있는 것이기 때문에 구조부재의 감쇠를 크게해서 진동에너지를 감소시키는 것이 소음저감의 유효한 수단이 된다. 그방법으로서는 재진강판 등을 이용하여 재료 자체의 내부감쇠를 증가시키는 방법과 감쇠가 큰 점탄성재료(visc-elastic merterial)를 첨부하는 방법등이 있다. 점탄성재는 mechanism은 재료에 힘을 가해 변형이 발생하면 구조내부조직이 재구성하는데 에너지를 소모하게 된다. 점탄성의 modaling으로 다음과 같은 응력-변형률의 선형 관계식이 사용된다.

$$\sigma + \sigma \frac{d\sigma}{dt} = E\epsilon + \beta \frac{d\epsilon}{dt} \quad (16)$$

$\alpha = \beta = 0$ 이 되면 Hooke's law이 된다. 응력과 변형율이 조화진동을 한다면 즉,

$$\sigma = \sigma_0 e^{j\omega t}, \quad \epsilon = \epsilon_0 e^{j\omega t} \quad (17)$$

이면 응력-변형률관계식은

$$\sigma_0 = \frac{1 + j\omega\beta}{1 + j\omega\alpha} E \epsilon_0 \quad (18)$$

가 되며 실수부와 허수부를 분리하면

$$\sigma_0 = (E' + jE'') \epsilon_0 = E'(1 + j\eta) \epsilon_0 = E^* \epsilon_0 \quad (19)$$

로 표현한다. 여기서,  $E'$ 은 저장탄성율로 에너지 보존항이고,  $E''$ 는 손실탄성율로 에너지손실항이고,  $\eta = E''/E'$ 로 loss factor이다.  $E', E''$ 와  $\eta$ 는 주파수와 온도에 따라 변화한다.

점탄성은 취급하는 방법에 따라 인장변형에 따른 점탄성 히스테리시스를 이용해서 진동에너지를 흡수하는 Free-layer treatment와 전단변형에 의한 점탄성히스테리시스를 이용한 Cnstrained-layer treatment으로 구분된다.

이실험에서는 실험의 편의를 위해 Free-layer treatment를 사용하고 nomographer는 Fig.3에 나타내었다.

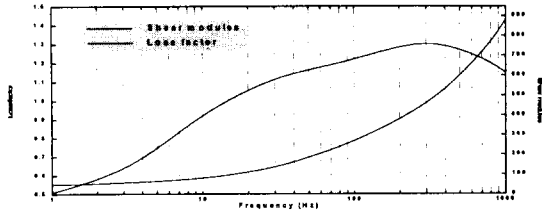


Fig.3 The shear modulus and loss factor of visco-elastic material at temperature 20 °C

### 3. 실험

#### 3.1 실험의 목적

음을 방사하고 있는 보강판에 제진재를 부착했을 경우 부착위치에 따라 방사된 음향파워와 방사효율이 어떻게 변화하는가를 실험적으로 비교하는데 있다.

#### 3.2 실험모델

보강재를 부착한 방사파워에 대한영향을 측정하기 위한 실험 모델로서 fig.4에 표시된 것을 사용한다. 음을 방사하는 진동평판에는 10mm×6mm의 보강재가 2개있는 600mm×400mm×3.2mm의 직사각형강판을 사용하고 free-free의 경계조건을 실현하기 위해 현으로 매어 현은 흡음처리하였으며 진동판을 뒷면으로부터 가진기로 가진함으로써 음을 방사시킨다.

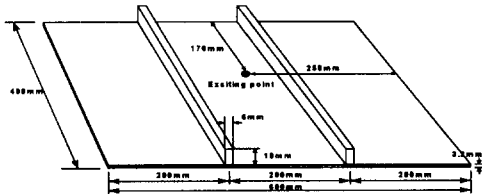


Fig.4 Experiment Model

가진점의 위치는 fig.4에 나타나 있다. 그리고 이번 실험의 개략적인 구성도는 Fig.5와 같다.

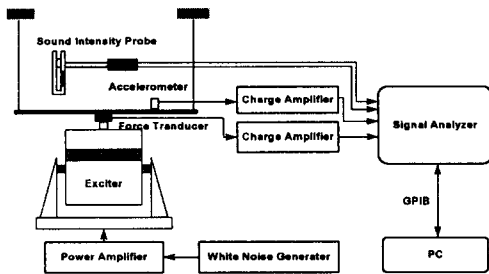


Fig.5 Experimental set-up

#### 3.3 평판의 진동모드의 계측

진동방사음의 원인인 보강판의 진동 특성을 알아 보기위해 보강판에 대해 modal test를 하였다. 이 실험에서는 free-free condition으로 하고 Random가 진하여 FRF를 측정했다.

가속도는 보강판을 40mm간격으로 mesh를 분할하여 16×11의 176점에 대해서 가속도pick-up을 이동시켜 측정했다. Fig.6는 A지점에서 보강판의 FRF를 표시하고 있다.

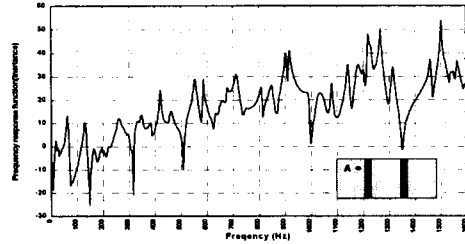


Fig.6 Inertane of bare stiffened plate

Fig.7은 modal test결과 제진재가 없는 보강판의 대표적인 고유진동수와 모드이다.

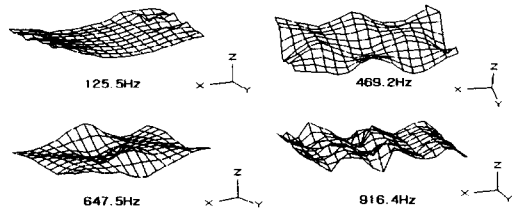


Fig.7 Mode shape of bare stiffened plate

#### 3.4 제진재의 부착위치

제진재의 부착위치는 제진재가 없는 상태에서의 Fig.8에 나타난 공진모드에 영향을 주는 부분에 부착했다.

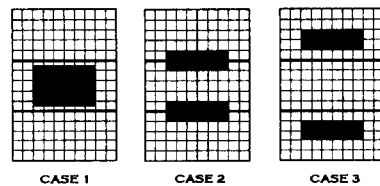


Fig.8 Adhesive position of visco-elastic merterial

#### 3.4 보강판으로부터 음향방사파워의 계측

##### 음향방사 파워의 계측방법

음향파워는 발생음의 크기를 표시하는 기본적인

양이고 본 연구에서의 평가방법으로 이것을 사용한다.

보강판으로부터 방사된 음향파위를 측정하는 방법에는 직접 측정하는 물리량으로 음압을 사용하는 방법과 음향인텐시티를 사용하는 방법이 있다. 음압을 측정하는 방법에서는 음압으로부터 음향파위를 구하기 때문에 잔향실이나 무향실에서 측정해야 하지만 음향인텐시티에 의해 측정하는 방법은 음향인텐시티 자체가 단위면적을 통과하는 음향파위를 표현하는 물리량이고 음장에 대해서 거의 제한을 받지 않고 일반적으로 음향파위를 구하는 것이 가능하다. 그러므로, 본 연구에서는 음향파위의 측정에는 음향인텐시티를 사용한다.

인텐시티계측지점을 진동계측지점과 동일하게 하기 위해 모델을 감싸는 640mm×440mm×200mm의 가상공간을 생각하고 이 표면을 40mm×40mm의 요소에 176분할했다. 각 요소의 중심에서 분할요소를 통과하는 음향인텐시티의 외향 법선성분을 계측하고, 그 값을 요소의 대표값으로 가상공간의 표면에서 면적분을 구했다.

이와같이해서 제진재의 부착위치에 따른 방사음효과를 평가하였다.

측정에 사용한 음향인텐시티프로브는 1/2인치 마이크로폰을 조합한 지향성페어마이크로폰으로 구성된다. 이것을 사용해서 계측한 2점의 음압으로부터 Analyzer로 인텐시티를 산출한다. 마이크로폰은 calibrator로 교정해서 사용한다. 마이크로폰의 배치는 face-to-face로서 그 간격은 스페이서에 의해 일정하게 되는 것이다.

음향인텐시티의 측정오차에도 큰 영향을 주는 마이크로폰 간격의 선정에 대해 기술한다. 마이크로폰간격을 크게 하는 것으로 저주파에 있어 음향인텐시티 측정하한치를 낮게 하는 것이 가능하지만, 동시에 측정 가능한 주파수의 상한을 억제하는 것도 된다. 본 실험에 사용한 음향인텐시티프로브의 스페이서는 측정오차가 ±1dB이하의 주파수 범위를 만족시키기 위해 50mm로 한다. 이때의 측정가능 주파수는 31.5Hz~1.25kHz가 된다.

### 3.5 실험결과

제진재가 부착된 상태에서 각case별 Loss factor 측정결과를 Fig.9에 나타내었으며, 각 진동모드에 antinode에 제진재를 부착하였을 경우 손실계수가 커짐을 알 수 있다.

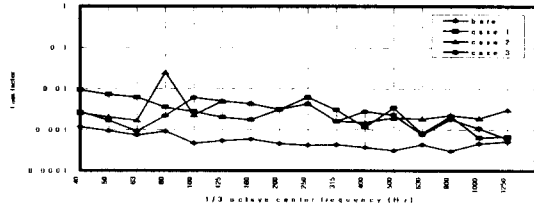


Fig.9 Loss factor

제진재가 부착된 상태에서 각case별 방사음향파위 측정결과를 Fig.10에 나타나 있으며 제진재가 있는 경우 확연히 방사음향이 줄어들고 또 case1(중앙에 제진재가 있는 경우)이 방사음이 가장 작음을 알 수 있다.

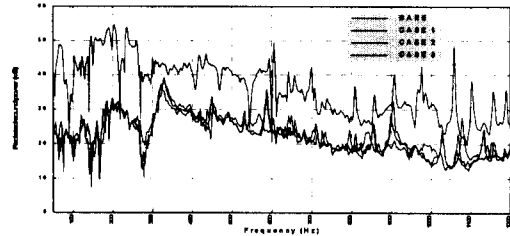


Fig.10 Radiated sound power level

제진재가 부착된 상태에서 각case별 square mean velocity 측정결과를 Fig.11나 나타내었으며 제진효과를 case1, case2, case3순으로 있었다.

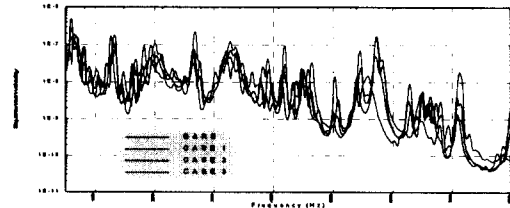


Fig.11 Square mean velocity

Fig 12은 제진재의 각부착위치에서의 보강판 방사효율을 나타낸 것이다. 제진재가 없는 보강판의 방사율이 가장 크게 나타남을 알수있었고 보강재가 없는 평판의 방사효율과 제진재가 부착된 보강판의 방사효율이 유사하다는 것을 알 수 있다.

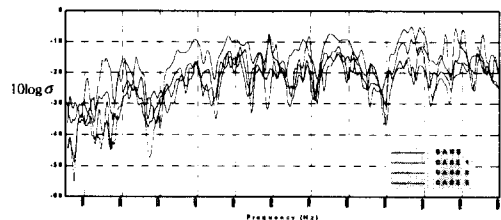


Fig.12 Radiation efficiency curve

진동모드에 따른 음향방사의 관계를 알아보기 위해서 Fig.13에 제진재가 없는 보강판에 대해 나타내었다. 그 결과 진동분포와 음향방사분포가 거의 일치함을 알 수 있다.

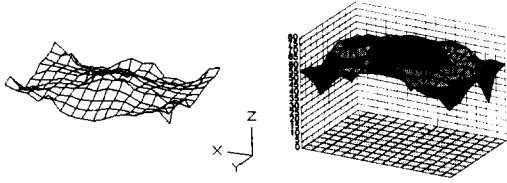


Fig.13 Vibration mode and radiated sound pattern at 1/3 octave center freq. 315Hz

고유진동수를 살펴보면 Fig.14에서 알 수 있듯이 제진재의 각 부착위치에 따라 고유진동수가 제진재가 없는 것에 비해 낮게됨을 알 수 있다.

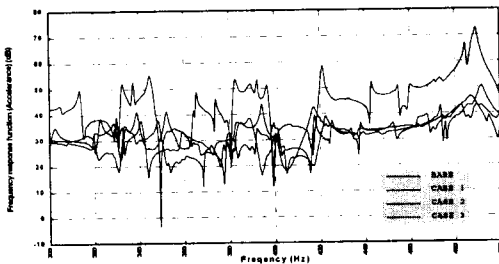


Fig.14 Frequency response function

## 5. 결론

네번 자유인 경계조건하의 보강판의 방사효율과 제진재에 의한 방사패턴을 조사해 본 결과는 다음과 같다.

1. 보강판의 방사효율을 조사해 본 결과 평판에 비해 높게 나왔으며 그 원인은 보강재에 의해 유효 주변길이가 증가하여 edge mode나 corner mode의 증가에 기인한 영향과 평판만의 음향방사뿐만 아니라 보강재에 의한 방사로 기인한 영향이라 본다.
2. 진동판의 속도분포는 음향파위에 직접적으로 영향을 준다. 그러므로 제진재를 이용하여 진동속도를 줄이므로 방사되는 음향도 줄일 수 있을 것이다.
3. 제진재의 부착위치에 따라 감소뿐만 아니라 질량과 강성에도 영향을 미친다.
  - ① 감쇠값의 증가에 가장 큰 영향을 미치는 부착 위치는 각 진동 모드를 구속하는 곳이다.
  - ② 제진재에 의해 판의 질량과 강성을 바꾸어 고유진동수가 변화하게 되는데 방사효율이 낮은 곳으로 이동시키면 방사음을 저감시키는 효과가 있다.

을 것이라 생각된다.

## 참고문헌

- [1] L.Cremer, M.Heckl, E.E.Unger, "Structure-Borne Sound", Springer-Verlag, 1973.
- [2] Loe L.Beranek, "Noise and Vibration Control", McGraw Hill book company, 1971.
- [3] Gindeon Maidanik, "Response of Ribbed Panels to Reverberant Acoustic Fields", The Journal of the Acoustical Society of America, Vol.34, No.6, p809-826, 1962.