

〈論 文〉

# 점탄성 제진재를 이용한 비구속형 제진강판의 최적설계에 관한 연구

A Study on Optimum Design of an Unconstrained Damping Steel Plate  
by Using Viscoelastic Damping Material

유 영 훈\* · 양 보 석\*

Yong-Hun Yu and Bo-Suk Yang

〈1995년 5월 27일 접수 ; 1995년 9월 15일 심사완료〉

**Key Words :** Unconstrained Damping Steel Plate(비구속형 제진강판), Viscoelastic Damping Material(점탄성 제진재), Modal Loss Factor(모달 손실계수), Optimum Configuration(최적형상)

## ABSTRACT

Optimum design of a viscoelastic damping layer which is unconstrainedly cohered on a steel plate is discussed from the viewpoint of the modal loss factor. The modal loss factor is analyzed by using the energy method to the base steel plate and cohered damping layer. Optimum distributions of the viscoelastic damping layer for modes are obtained by sequentially changing the position of a piece of damping layer to another position which contributes to maximizing the modal loss factors. Analytical procedure performed by using this method simulated for 3 fundamental modes of an edge-fixed plate. Simulated results indicate that the modal loss factor ratios can be increase by as much as 210%, or more, by optimizing the thickness distribution of the damping layer to two times of the initial condition which is entirely covered. Optimum configurations for the modes are revealed by positions where added damping treatments become most effective. The calculated results by this method are validated by comparison with the experimental results and the calculated results obtained by the Ross-Ungar-Kerwin's model in the case of the layer is uniformly treated over the steel plate.

## 1. 서 론

기계요소 중에서도 소음이 발생하기 쉬운 얇은 강판의 진동을 저감시키기 위해, 강판상에 점탄성 제진재를 피복하는 적층처리가 효과적인 방법의 하나로 알려져 있다. 이러한 적층판의 진동감쇠특성에 관해서는 Oberst<sup>(1)</sup>, Ross<sup>(2)</sup>을 비롯하여, 지금까지

많은 연구가 있고, 최근에는 샌드위치구조의 3층 제진강판이 주목을 받아 세탁기, 냉장고 등의 가전제품에서는 실용화되고 있다.

그러나, 3층 제진강판에 있어서는 구속층이 통상 강철판을 사용하기 때문에 구속층의 고강성에 의해 제진효과가 저감되는 결점이 있다. 또한 기계구조물의 제작경비 및 자동차 등에는 제작 후 운전에 있어서 저효율화등 경제적으로 불리한 면이 있다. 따라서 3층 제진강판의 제3번째 구속층의 질량을 단순히 제진재로 치환하여 비교할 경우 3층 제진강판이 반

\*정회원, 부산수산대학교 공과대학 기계공학과

드시 2층 제진강판보다 뛰어난 제진효과를 갖는다고 결정할 수 없다. 2층 제진강판과 3층 제진강판의 제진효과를 비교한 Kerwin<sup>(3)</sup>의 연구에 의하면, 강판에 대한 제진층의 질량비가 0.2(알루미늄의 경우는 0.4)를 초과할 경우, 3층 제진강판보다 2층 제진강판의 제진성능이 오히려 크게 된다. 더구나 2층 제진강판에서는 적량의 제진재를 적소에 피복하는 방법으로 높은 제진효과를 얻을 수 있으며, 최적화 할 수 있는 장점이 있다<sup>(4)(5)</sup>.

Stevens<sup>(4)</sup>는 주변고정 및 주변단순지지의 정방형 판에 첨부되는 제진재의 도포율과 손실계수의 관계를 조사하였다. Parthasarathy<sup>(5)</sup>는 주변고정판의 한 측면에 동일한 질량의 제진층을 각각 다른 현상으로 도포하였을 경우 모달 손실계수의 값으로 제진층의 도포위치에 대한 제진효과를 조사했다.

이외 유한요소법을 이용한 해석에는 보, 판 및 링 구조의 3층 제진강판의 감쇠를 예측하는 방법이 Johnson<sup>(6)</sup>에 의해, 적층판의 최적설계를 비등방성층의 적층방향의 변화에 의해 최적의 강도를 얻는 것을 목적으로 하는 연구결과<sup>(7),(8)</sup>가 발표되었다. 또한, 다층의 제진강판에 있어서 응답진폭, 하중, 재료비를 목적함수로 하는 최적설계기법이 Saravanas<sup>(9)</sup>에 의해 제안되었으나 한끝단 및 한변을 고정된 내단이 보 및 판을 대상으로 하고 있다.

본 연구에서는 점탄성 제진층이 탄성판의 한 측면에 전면적으로 피복된 2층 제진강판에 있어서 제진층의 최적설계를 손실계수의 증가율로써 결정하였다. 즉, 일정한 두께로 전면 도포되어 있는 제진층을 작은 크기의 조각(piece)으로 분할한 경우, 각각의 조각이 손실계수에 미치는 영향을 손실계수의 증감율로써 평가하여, 계의 손실계수의 감소에 미치는 영향을 손실계수의 증감율로써 평가하여, 계의 손실계수의 감소에 미치는 영향이 가장 미소한 부위의 제진재의 조각을 손실계수의 증가에 미치는 영향이 최대로 되는 위치에 이동시켜 동일질량의 제진재로 최대의 제진효과를 얻을 수 있는 제진재의 최적 설계법을 제안한다. 수치계산은 주변고정 평판의 (1, 1), (1, 2), (1, 3) 모드 성분에 대해 수행하여 최적설계에 의한 손실계수의 증가와 그때, 제진재의 배열형상을 조사하였다. 수치 계산결과는 실험결과와 비교 검토하여 본 최적화기법의 타당성을 확인하였다. 또한, 제진재의 전면도포의 경우는 Ross-Ungar-Kerwin모델<sup>(2)</sup>(이하, RUK모델로 부름)에서도 계산을 수행하여 본 기법의 결과와 비교하였다.

## 2. 기본개념과 접근방법

주기적으로 진동을 하는 점탄성재의 손실계수를 에너지흡수의 관점으로 표현하면, 손실계수는 제진재료의 내부에서 감쇠에 의해 열로서 소비되어진 에너지와 외부로부터 공급되어진 진동 에너지의 비율로 나타낸다.

본 논문에서는 비구속형 점탄성 제진층을 갖는 2층 제진강판의 해석에 있어서 점탄성층을 Bland의 대응원리<sup>(10)</sup>(correspondence principle)를 적용하여 탄성문제로서 해석하고, 탄성계수 대신에 점탄성재의 복소 탄성계수를 대입하는 해석방법을 이용한다.

Fig. 1에 나타낸 것과 같이 한변의 길이가  $a$ ,  $b$ 인 강판의 전면에 걸쳐 균일하게 도포되어진 2층 제진강판에 있어서 제2변째 층의 점탄성층을 탄성체로 대응한 경우, 탄성판의 총 변형에너지와 총 운동에너지에 대한 관계는 레이레지수(Rayleigh quotient)<sup>(11)</sup>로부터 다음의 식이 얻어진다.

$$\omega^2 = \frac{U}{T} \tag{1}$$

여기서  $U$ 는 탄성판의 총 변형에너지를,  $\omega^2 T$ 는 총 운동에너지를 나타낸다. 탄성문제만의 경우, 각진동수  $\omega^2$ 는 실수이지만, 점탄성층으로 피복된 2층 제진판의 경우에는 복소 표시로써 다음과 같이 나타내어진다.

$$\omega^2 = \left. \begin{aligned} & \text{Re}(\omega^2) + i\text{Im}(\omega^2) \\ & = \omega_n^2(1 + i\eta) \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

여기서  $\text{Re}(\omega^2)$ ,  $\text{Im}(\omega^2)$ 는 각각  $\omega^2$ 의 실수부와 허수부를 나타낸다. 또  $\omega_n$ 과  $\eta$ 는 각각 계의 고유 각진동수와 손실계수를 나타내며,  $i = \sqrt{-1}$ 이다. 식(2)로부터 제진강판의 손실계수  $\eta$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

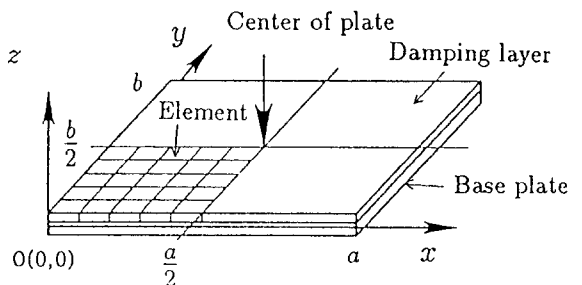


Fig. 1 Coordinate system and element division

$$\eta = \frac{\text{Im}(\omega^2)}{\text{Re}(\omega^2)} \quad (3)$$

### 3. 해 석

점탄성 제진재로 도포되어진 2층 제진강판의 해석에 있어서, 다음과 같은 가정이 성립하는 것으로 한다.

- (1) 각 층의 두께방향의 인장변형 에너지는 굽힘변형 에너지에 비해 무시할 수 있을 정도로 작다.
- (2) 제진층 두께의 변화는 중립면의 변화에 영향을 주지 않는다.
- (3) 2층의 경계면에는 미끄럼이 발생하지 않는다.
- (4) 각 층은 각각 등질, 등방성을 가진다.

#### 3.1 2층 제진강판의 총 변형에너지

2층 제진강판의 총 변형에너지  $U$ 는 탄성기판과 제진층의 변형에너지의 합으로 다음 식과 같이 구해진다.

$$U = U_p + U_d \quad (4)$$

단,  $U_p$ 와  $U_d$ 는 각각 탄성기판과 제진층의 변형에너지를 나타낸다. 해석판을  $N$ 개의 면적요소로 분할한 경우, 2층 제진강판의 총 변형에너지는 각 요소의 변형에너지  $U_{pj}$ ,  $U_{dj}$ 의 합에 의해 다음 식과 같이 얻어진다.

$$U = \sum_{j=1}^N (U_{pj} + U_{dj}) \quad (5)$$

여기서 각 층의 변형에너지를 구하기 위해서는 2층판의 중립면을 결정하여 둘 필요가 있다. Fig. 2에 나타난 2층판요소에 있어서 탄성기판의 두께와 탄성계수를 각각  $t_p$ ,  $E_p$ , 제진층의 두께와 탄성계수를 각각  $t_d$ ,  $E_d$ 라 하면, 2층 요소의 경계면과 중립면 사이의 거리  $t_j$ 는 다음 식과 같이 얻어진다<sup>(5)</sup>.

$$t_j = \frac{t_p(1 - E_r^* t_j^2)}{2(1 + E_r^* t_j)} \quad (6)$$

단,

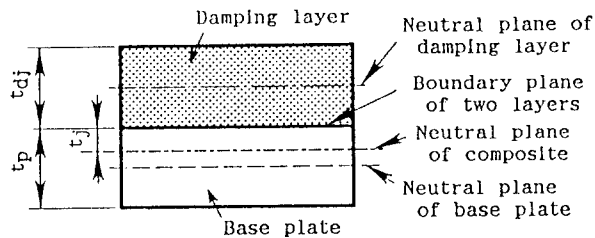


Fig. 2 Neutral plane of an element

$$\left. \begin{aligned} E_r^* &= E_d^* / E_p \\ t_r &= t_d / t_p \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

여기서,  $E_r^*$ 와  $t_r$ 는 각각 탄성기판에 대한 제진층의 탄성계수비와 두께비를 나타낸다.

(1) 탄성기판의 변형에너지<sup>(12)</sup>

식 (5)에서 나타난 2층판 요소의 중립면에 대한 탄성기판의 변형에너지  $U_{pj}$ 는 굽힘에 의한 에너지와 비틀림에 의한 에너지의 합에 따라 다음 식과 같이 얻어진다.

$$U_{pj} = \frac{1}{2} \iint_{a_j} (M_{j(x)}K_{j(x)} + M_{j(y)}K_{j(y)} - M_{j(xy)}K_{j(xy)}) dx dy \quad (8)$$

여기서  $a_j$ 는 요소의 면적을,  $M_{j(x)}$ 와  $M_{j(y)}$ 는 각각 요소의  $x$ 축 및  $y$ 축 주위의 굽힘모멘트를,  $M_{j(xy)}$ 는 비틀림우력을 나타낸다. 또한  $K_{j(x)}$ ,  $K_{j(y)}$ 와  $K_{j(xy)}$ 는 각각 요소 중립면의 곡률을 나타내고 이들을 중립면의 처짐  $w$ 의 항으로 각각 표시하면, 다음식과 같이 된다.

$$\left. \begin{aligned} K_{j(x)} &= w_{j(xx)} \\ K_{j(y)} &= w_{j(yy)} \\ K_{j(xy)} &= w_{j(xy)} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

여기서  $w_j$ 는  $j$ 요소의 처짐을 소첨자  $(x)$ ,  $(y)$ 는 각각 방향에 관한 편미분을 나타낸다. 따라서 2층 제진강판의 중립면에 대한 탄성기판의 굽힘모멘트는 다음 식으로 나타내어진다.

$$\left. \begin{aligned} M_{j(x)} &= - \int_{-t_p+t_j}^{t_j} \frac{E_p \{ w_{j(xx)} + \nu_p w_{j(yy)} \} z}{1 - \nu_p} dz \\ M_{j(y)} &= - \int_{-t_p+t_j}^{t_j} \frac{E_p \{ w_{j(yy)} + \nu_p w_{j(xx)} \} z}{1 - \nu_p} dz \\ M_{j(xy)} &= - \int_{-t_p+t_j}^{t_j} \frac{E_p w_{j(xy)} z}{2(1 - \nu_p)} dz \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

식 (10)의  $M_{j(x)}$  및  $M_{j(y)}$ 는 굽힘모멘트에 의한 요소의 변형에너지,  $M_{j(xy)}$ 는 비틀림우력에 의한 요소의 변형에너지,  $\nu_p$ 는 탄성기판의 포아송비를 나타낸다. 따라서 식 (8)은 굽힘모멘트에 의한 요소의 변형에너지와 비틀림우력에 의한 요소의 변형에너지의 합으로 나타내어짐을 의미한다. 여기서 탄성기판의 전체 요소수  $N$ 에 대해서 정리하면 탄성기판의 총 변형에너지  $U_p$ 는 다음 식과 같이 얻어진다<sup>(12)</sup>.

$$U_p = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \iint_{a_j} D_{pj} \{ (\nabla w_j)^2 - 2(1 - \nu_p) G(w_j) \} dx dy \quad (11)$$

단,

$$\left. \begin{aligned} D_{pj} &= 4D_o(1-3h_j+3h_j^2) \\ G(w_j) &= w_{j(xx)}w_{j(yy)} - w_{j(xy)}^2 \\ \nabla w_j &= w_{j(xx)} + w_{j(yy)} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} h_j &= t_j / t_p \\ D_o &= \frac{E_p t_p^3}{12(1-\nu_p^2)} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

여기서  $D_o$ 는 탄성기판만의 경우 굽힘강성을 나타낸다.

(2) 제진층의 변형에너지

제진층의 변형에너지  $U_d$ 는, 중립면에 대한 제진층의 두께 ( $z=t_j, z=t_j+t_{dj}$ )에 관해서 탄성기판과 동일한 방법으로 각 모멘트를 계산하여 정리하면 다음 식으로 된다.

$$U_d = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \iint_{a_j} D_{dj} \{ (\nabla w_j)^2 - 2(1-\nu_d) G(w_j) \} dx dy \quad (14)$$

여기서

$$D_{dj} = \frac{4D_o E_r^* (t_j^3 + 3t_j^2 h_j + 3t_j h_j^2) (1-\nu_p^2)}{(1-\nu_d)} \quad (15)$$

3.2 2층 제진강판의 총 운동에너지

강성기판 및 제진재층의 총 운동에너지  $T$ 는 다음 식으로 나타내어진다.

$$T = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \iint_{a_j} (\rho_p t_p + \rho_d t_{dj}) w_j^2 dx dy \quad (16)$$

여기에서  $\rho_p, \rho_d$ 는 각각 탄성기판과 제진재층의 질량밀도이다.

3.3 2층 제진강판의 손실계수

이제 식 (11), (14), (16)을 식 (1)에 대입하여 정리하면 탄성체로써 나타낸 2층 제진강판의  $\omega^2$ 은 다음 식과 같이 얻어진다.

$$\omega^2 = \frac{D_o \sum_{j=1}^N [A_j I_{2j} + B_j I_{3j} + E_r^* (C_j I_{2j} + D_j I_{3j})]}{\sum_{j=1}^N [\rho_p t_p + \rho_d t_{dj}] I_{1j}} \quad (17)$$

단,

$$\left. \begin{aligned} A_j &= 4(1-3h_j+3h_j^2) \\ B_j &= -2(1-\nu_p) A_j \\ C_j &= \frac{4(t_j^3 + 3t_j^2 h_j + 3t_j h_j^2) (1-\nu_p^2)}{(1-\nu_d^2)} \\ D_j &= -2(1-\nu_d) C_j \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$$\left. \begin{aligned} I_{1j} &= \iint_{a_j} w_j^2 dx dy \\ I_{2j} &= \iint_{a_j} (\nabla w_j)^2 dx dy \\ I_{3j} &= \iint_{a_j} G(w_j) dx dy \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

여기서  $A_j \sim D_j$ 는 각각 탄성판과 제진층 요소의 형상 함수를,  $I_{1j}, I_{2j}, I_{3j}$ 는 진동모드에 관한 요소의 처짐 함수를 나타낸다.

지금까지의 변형에너지의 계산으로는 제진층을 탄성체로서 해석하였지만, 제진층의 점탄성계수  $E_d^*$ 를 복소수  $E_d(1-in_d)$ 로 표시하면 탄성판과 제진층의 탄성계수비  $E_r^*$ 는 다음 식과 같이 복소수로 나타내어진다.

$$E_r^* = E_r(1+in_d) \quad (20)$$

여기서  $\eta_d$ 는 제진재의 손실계수이다.

이제, 식 (17)에 식 (20)의 탄성계수비의 복소수를 대입하고, 식 (3)에 정의한 2층 제진강판의 손실계수는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\eta = \frac{\eta_d E_r \sum_{j=1}^N (C_j I_{2j} + D_j I_{3j})}{\sum_{j=1}^N [A_j I_{2j} + B_j I_{3j} + E_r (C_j I_{2j} + D_j I_{3j})]} \quad (21)$$

식 (21)의 손실계수를 구하기 위해서는 식 (19)과 같은 각 요소의 처짐에 관한 파라메타  $I_{2j}, I_{3j}$ 를 평가할 필요가 있다. 구체적으로 해석을 수행하기 위하여, 본 연구에서는 주변 고정판의 (1, 1), (1, 2), (1, 3) 모드에 관해서 수치해석을 수행하기로 한다. 주변 고정판의 각 모드에 대한 처짐  $w$ 는 양단 고정정보의 이론으로 얻어진다<sup>(13)</sup>.

3.4 손실계수의 최적화

2층 제진강판의 손실계수는, 식 (21)로부터 다음 식으로 나타낼 수 있으며

$$\eta = \frac{\eta_d E_r \left( \frac{\sum_{j=1}^N R_j}{\sum_{j=1}^N Q_j} \right)}{1 + E_r \left( \frac{\sum_{j=1}^N R_j}{\sum_{j=1}^N Q_j} \right)} \quad (22)$$

여기서

$$\left. \begin{aligned} Q_j &= A_j I_{2j} + B_j I_{3j} \\ R_j &= C_j I_{2j} + D_j I_{3j} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

이기 때문에 식 (22)의 손실계수를 최대로 얻기 위해서는

$$\sum_{j=1}^N R_j / \sum_{j=1}^N Q_j \Rightarrow \text{Maximum}$$

로 되어야 한다. 여기서  $R_j$ ,  $Q_j$ 는 각각 제진층의 형상과 탄성기판의 모드에 대한 처짐의 함수이다. 식 (23)과 식 (18), (19)의 관계로부터 각 요소에서의  $R_j$ 는 제진층의 변화에 크게 영향을 받지만  $Q_j$ 는 무시할 정도로 작음을 알 수 있다. 왜냐하면 일반적으로 탄성판과 점탄성 제진재의 탄성계수비  $E_r$ 은 매우 작기 때문에 제진층의 변화에 의한 중립면  $t_d$ 의 변화도 작게되어 식 (13)에서  $h_j$ 의 변화는 더욱 작아지기 때문이다. 따라서 2층 제진강판의 손실계수는 거의  $R_j$ 에 의한 제진층의 두께와 처짐의 상관관계에 의해 결정된다. 바꿔 말하면 각 요소에서의  $R_j$ ,  $Q_j$ 는 해석판의 경계조건과 모드에 관한 식 (18)과 각 요소의 두께에 관한 파라메타를 나타내는 식 (19)에 의해 결정되기 때문에, 판전체에 의한  $\sum R_j$ 의 값이 최대로 되도록 제진재층의 요소를 이동하면 손실계수가 증가하게 된다. 따라서 제진재 요소의 이동은 각 요소가 계의 손실계수에 기여하는 증감율의 크기로 비교하여 결정할 수 있다. 손실계수의 증감율은 요소의 이동전 손실계수를  $\eta_o$ , 요소의 소거 또는 첨가 후의 손실계수를  $\eta_i$ 라고 하면 손실계수의 증감율  $\delta\eta_i$ 는 다음 식과 같이 얻어진다.

$$\delta\eta_i = \frac{\eta_i - \eta_o}{\eta_o} \times 100 (\%) \quad (24)$$

점탄성 제진층의 최적화를 수행하기 위한 수치계산에서는

- (a) 제진층의 재료특성 및 최초의 피복형상,
- (b) 최적화하는 제진층의 최대두께 ( $t_d^{max}$ ),
- (c) 요소의 분할수

등을 미리 결정하여 둘 필요가 있다.

#### 4. 수치계산예와 고찰

수치계산은 2층 제진강판의 두께비  $t_r$ 을 1, 최적화하는 제진층의 최대두께  $t_d^{max}$ 는 각각  $1.5t_d$ 와  $2t_d$ 로 수치해석을 수행하였다. 요소의 분할은 전면으로 균일하게 피복된 제진층을 100개의 동일면적 요소로 분할하고 각 요소를 두께 방향으로 4분할 하였다. 따라서, 제진층은 전체 400개의 조각으로 분할되며, 이때 하나의 분할요소를 이하 피스라고 한다.

Fig. 3은 2층 제진강판에 있어서 제진층의 요소분할과 피스이동의 상태를 해석판의 전체에 대하여 대칭의 1/4면적에 관해서 보인다. 따라서 판의 전체면에 대한 피스의 이동은 대칭적으로 수행된다. 피스의 이동은 피스가 제거 또는 첨가되었을 때 식 (24)

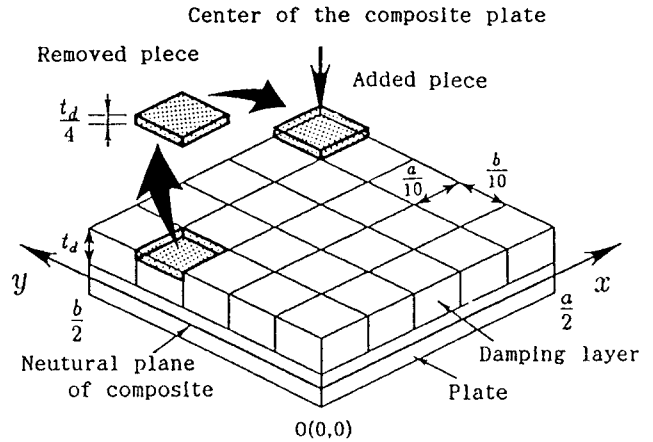
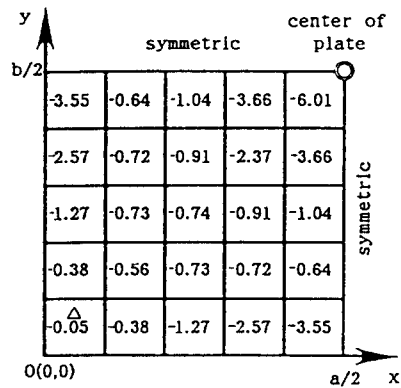
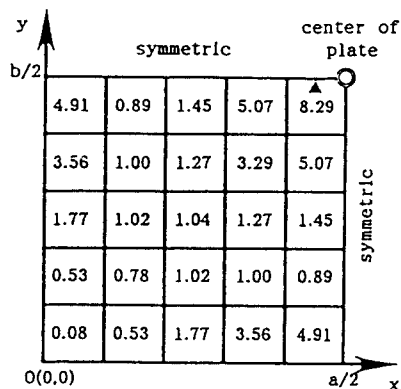


Fig. 3 Piece movement and the size of a piece



(a) Removed piece



(b) Added piece

Fig. 4 Decreasing and increasing ratios of the modal loss factors for the first mode.

에 나타난 손실계수의 증감율로써 결정한다.

Fig. 4는 주변고정의 (1, 1) 모드의 경우, 최초의 이동피스를 결정하기 위하여 평가된 각 요소에서의

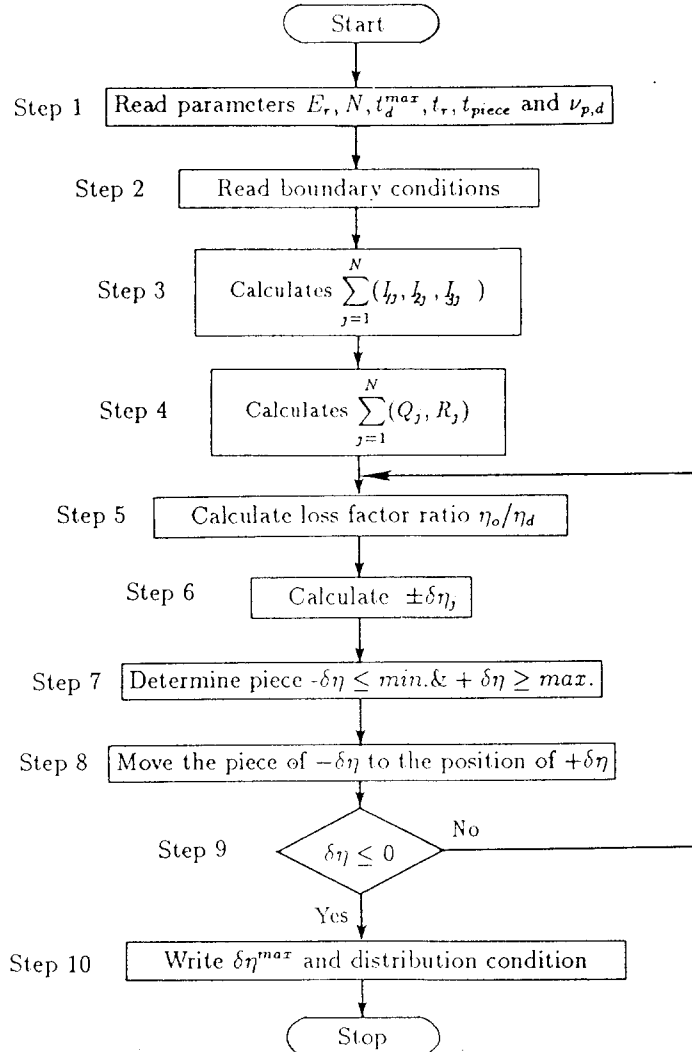


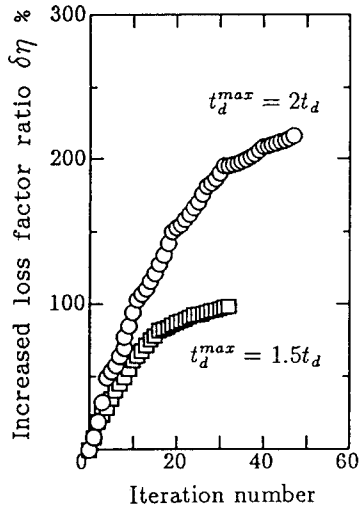
Fig. 5 Flow chart

손실계수의 증감율을 보인다. Fig. 4(a)는 각 요소에서 하나의 피스를 제거하였을 경우 손실계수의 감소율을, Fig. 4(b)는 피스를 첨가하였을 경우 손실계수의 증가율을 나타낸다. 피스의 이동은 손실계수의 증가를 최대로 하기 위하여 감소율이 가장 작은 부분의 피스를 떼어내어 증가율이 최대인 장소로 이동시킨다. 즉, Fig. 4(a)에서  $\Delta$  표시로 나타낸 피스를, Fig. 4(b)의  $\blacktriangle$  표시의 부분으로 이동시키면 손실계수의 증가율이 최대로 된다. 그 뒤에 각 요소의 증감율을 재평가하고, 최대의 손실계수가 얻어질 때까지 피스의 이동을 수행한다. 제진재의 최적설계에 있어서 본 연구에서 이용한 요소이동에 의한 최적화과정의 흐름도를 Fig. 5에 보인다.

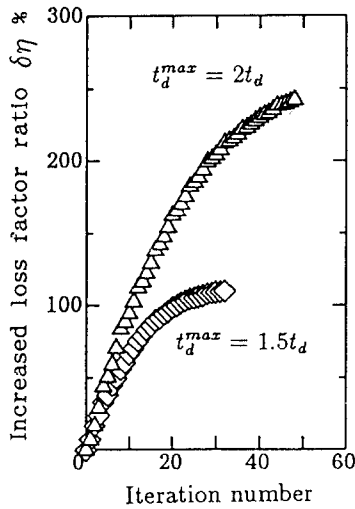
Fig. 6은 주변고정의 (1, 1), (1, 3) 모드에 대해

서 제진층의 최대두께  $t_d^{max}$ 를 각각  $1.5t_d$ ,  $2t_d$ 에 대하여 최적화까지의 피스이동횟수와 손실계수비의 증가율을 보인다. 최적화결과  $t_d^{max}$ 가  $1.5t_d$ 의 경우에는 약 100%,  $2t_d$ 의 경우에는 210% 이상 손실계수비가 증가함을 알 수 있다. 수치계산의 결과, 최적화 후의 손실계수비와 그의 증가율을 Table 1에 나타낸다.

Fig. 7의 (a), (b)는 제진층의 최적두께  $t_d^{max}$ 가  $2t_d$ 의 경우에 관해서 주변고정의 (1, 1), (1, 3)모드의 최적 피복형상을 판전체의 1/4면적으로 나타내었다. 그림에서 점선은 최초의 제진층의 전면도포의 피복형상을, 굵은 실선은 최적화된 제진층의 형상을 나타낸다. 최적화 형상에 있어서 가는 선은 4개의 피스를 포함하는 하나의 요소를 나타낸다.



(a) (1,1) mode



(b) (1,3) mode

Fig. 6 Proceedings of the optimization for the (1, 1) and (1, 3) modes.

Table 1 Maximum loss factor ratios by optimization

$t_r=1, E_r=0.004736, \nu_p=0.3, \nu_d=0.5$						
Modes	(1,1)mode		(1,2)mode		(1,3)mode	
$t_d^{max}$	$1.5t_d$	$2t_d$	$1.5t_d$	$2t_d$	$1.5t_d$	$2t_d$
$\eta_o / \eta_d$	0.069	0.069	0.069	0.069	0.069	0.069
$\eta^{max} / \eta_d$	0.137	0.219	0.142	0.228	0.144	0.236
I.R.(%)	98	218	105	231	110	242

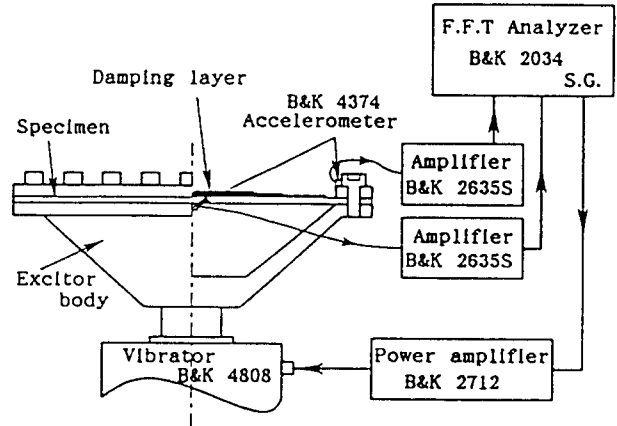


Fig. 7 Experimental set-up

## 5. 실험

### 5.1 실험장치 및 실험방법

2층 제진강판의 진동 및 제진특성을 측정하는 실험장치와 측정시스템의 개략도를 Fig. 8에 나타낸다. 시험편을 고정하는 가진대는 그 강성을 높게 하기 위하여 원추형상으로 제작되었다. 시험편은 각 실험 조건의 재현성을 갖기 위해 24개의 볼트에 각각 40 N·m의 토크로 고정하였다. 또한 가진기에 걸리는 가진대의 중량을 줄이기 위하여 4개의 고무로 중량 제거(weight cancel)를 수행하였다. 각 시험편의 손실계수는 가진대를 정현가진하고, 시험편의 중간과 가진대에 설치한 2개의 가속도계의 신호를 주파수분석한 결과로부터 반진폭법(half power method)으로 구하였다. 실험은 항온실에서 동일한 환경 ( $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ) 하에서 수행되었다.

### 5.2 점탄성 제진재의 물성치와 시험편

본 연구에서 사용한 아스팔트계의 점탄성 제진재의 물성치는 Jones<sup>(14)</sup>가 제안한 공진실험모델을 이용하여 구하였다. 이때 구하여진 제진재의 물성치를 Table 2에 나타내었다. 시험편은 주변고정의 고정부를 제외한 치수는  $0.3 \times 0.27\text{m}$ , 두께가 0.8mm의 강판을 탄성기판으로 하고, 그 한쪽면에 점탄성 제진재를  $150^\circ\text{C}$ 의 오븐내에서 30분간 열을 가하여 접착시키는 방법으로 피복한 것을 사용하였다. 각 시험편은 전면 또는 부분피복의 2개의 그룹으로 Table 3과 Table 4에 각각의 제원을 보인다.

### 5.3 실험결과와 수치계산결과의 비교

실험은 주변고정판의 기본모드에 관해서 수행하였

다. 제진재의 전면도포의 경우, 제진강판의 기본모드에 관한 수치계산결과와 실험결과를 Table 3에 나타낸다. 실험결과는 각각 4회씩 측정을 수행하여 그의 평균치를 사용하였다. 더욱이 이들의 결과를 RUK모델에 의한 계산결과와의 비교를 Fig. 9에 나타낸다. 제진재의 전면도포의 경우 본 수법에 의한 수치계산결과는 실험결과와 RUK모델에 의한 계산결과와 잘 일치함을 보인다. 단, RUK모델에 의한 계산식은 다음과 같다<sup>(2)</sup>.

$$\eta = \frac{\eta_d E_r H_r (3 + 6H_r + 4H_r^2)}{1 + E_r (3 + 6H_r + 4H_r^2)} \quad (25)$$

여기서  $H_r$ 은 전면도포의 경우 기초강판과 제진층의 두께비 ( $t_r$ )를 나타낸다. 제진층의 부분피복의 경우, 동일질량의 제진재에 의한 피복형상에 따른 손실계수의 변화를 조사하기 위해 시험편 Plate-A와 동일

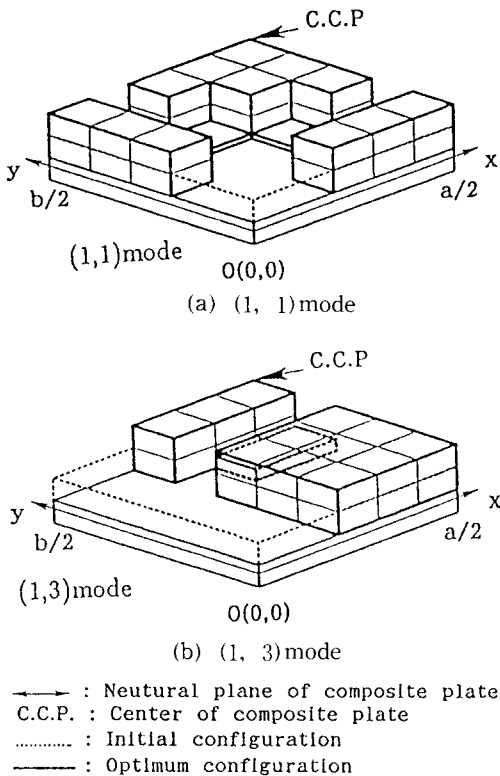


Fig. 8 Optimum configurations of the damping layer for the (1, 1) and (1, 3) modes.

Table 2 Mechanical properties of the damping layer

Young's modulus(N/m <sup>2</sup> )	9.701×10 <sup>8</sup>
Density(kg/m <sup>3</sup> )	1.469×10 <sup>3</sup>
Loss factor	0.25064

질량의 제진재 0.148kg를 두께 2.1, 3.0, 3.5mm의 제진층으로 치환하여 탄성기판의 중앙부분에 피복하여진 경우와 비교한다. 이때, 피복면적은 자동적으

Table 3 Loss factor ratios for entirely covered types

$t_p=0.8mm, E_r=0.004736, \nu_p=0.3, \nu_d=0.5$

Specimens	Damping layer		Loss factor ratios	
	$t_d$ (mm)	Mass(kg)	Exp.	Cal.
Plate A	1.2	0.148	0.158	0.1515
Plate B	2.1	0.259	0.398	0.4047
Plate C	3.0	0.365	0.581	0.6263
Plate D	3.5	0.428	0.685	0.7129
Plate E	5.0	0.609	0.822	0.8564

Table 4 Loss factor ratios for partially covered types with equal mass

$t_p=0.8mm, E_r=0.004736, \nu_p=0.3, \nu_d=0.5$   
Mass of damping layer ; 0.148kg

Specimens	Damping Layer		Loss factor ratios	
	$t_d$ (mm)	Area(mm <sup>2</sup> )	Exp.	Cal.
Plate F	2.1	228×2061	0.238	0.2207
Plate G	3.0	191×173	0.382	0.3966
Plate H	3.5	177×159	0.414	0.4145

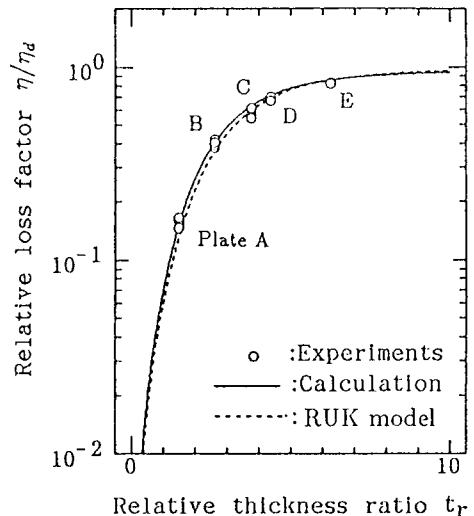


Fig. 9 Relative loss factor ratios for the entirely covered composite plates.



로 결정되며, 이 경우 수치계산에 있어서 요소의 분할은 동일면적으로 분할하기가 곤란하기 때문에 제진층의 끝부분이 요소의 분할선으로 되도록 요소를 분할하여 수치해석을 수행하였다. 부분피복의 경우, 동일질량의 제진재를 강판의 중앙부에 부분적으로 피복하였을 때 손실계수의 실험결과 및 수치계산결과를 Table 4에 나타낸다. 본 수법에 의한 수치계산결과와 실험결과는 잘 일치하여, 요소분할에 의한 제진층의 최적설계법의 타당성을 보이고 있다.

## 6. 결 론

2층 제진강판의 최적설계를 수행함에 있어서, 제2층의 제진층요소의 피스를 이동하는 본 수법에 의해 구하여진 손실계수의 수치계산결과를 RUK모델에 의한 계산결과 및 실험결과와 비교 고찰하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 제진재 전면도포의 경우, 손실계수에 관한 수치계산의 결과는 RUK모델에 의한 계산결과 및 실험결과와 잘 일치하여 제진층의 요소분할을 이용한 본 수법이 유용하다는 것을 명백히 하였다.

(2) 제진재 최적도포의 경우, 분할된 요소의 위치에 따른 손실계수 증감의 감도를 해석하여 제진층요소의 피스를 이동하는 것에 의한 2층 제진강판의 최적설계와 그 결과로 각 모드에 관한 최적 피복형상을 구하는 것이 가능하다.

(3) 주변고정의 2층 제진강판에 관하여 수행한 최적설계의 결과, 전면에 걸쳐 도포되어진 동일질량의 제진층의 두께  $t_d$ 에 대하여 최대두께 ( $t_d^{max}$ )를 1.5배로 한 경우에는 약 100%,  $t_d^{max}$ 를  $2t_d$ 로 할 경우에는 210% 이상으로 손실계수비를 증가하는 것이 가능하다.

## 참 고 문 헌

(1) Oberst, H., and Frankenfelt, K., 1952, "Über die Dämpfung Der Biegeschwingungen Dünner Bleche durch Fest Haftende Beläge," *Acustica*, Vol. 2, pp. AB181~AB194.

(2) Ross, D., Ungar, D. E. E., and Kerwin, E. M., 1959, "Damping of Plate Flexural Vibrations by means of Viscoelastic Laminate," J. E. Ruzicka

(ed), *Structural Damping*, Sec. 3, ASME, pp. 49~87.

(3) Kerwin, E.M. and Ross, D., 1959, "A Comparison of the Effectiveness of Homogeneous Layer and Constrained Layer of Viscoelastic Material in Damping Flexural Wave in Plates," *Proc. 3rd. Intl. Congr. on Acoustics, Stuttgart*, pp. 410~412.

(4) Stevens, K. K., Kung, C. H., and Dunn, S. E., 1981, "Partial Damping Layer Treatments for Plates," *Proc. Inter-Noise'81*, pp. 363~366.

(5) Parthasarathy, G., Reddy, C. V. R., and Ganesen, N., 1985, "Optimum Thickness Distribution of Unconstrained Viscoelastic Damping Treatments for Plates," *J. Sound Vib.*, Vol. 103, pp. 183~199.

(6) Johnson, C. D. and Kienholz, D. A., 1984, "Finite Element Prediction of Damping in Structures with Constrained Viscoelastic Layers," *AIAA Journal*, Vol. 20, No. 9, pp. 1284~1290.

(7) Saravanos, D. A. and Chamis, C. C., 1992, "Multiobjective Shape and Material Optimization of Composite Structures Including Damping," *AIAA Journal*, Vol. 30, No. 3, pp. 805~813.

(8) Vanderplaats, G. N. and Weisshaar, T. A., 1989, "Optimum Design of Composite Structures," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 27, pp. 437~448.

(9) Wang, B. P. and Costin, D. P., 1992, "Optimum Design of a Composite Structure with Three Type Manufacturing Constraints," *AIAA Journal*, Vol. 30, No. 3, pp. 1667~1669.

(10) Bland, D. R., 1960, *Theory of Linear Viscoelasticity*, Pergamon Press, London.

(11) Rayleigh, J. S. W., 1945, *The Theory of Sound*, Vol 1, pp. 109~115.

(12) Timoshenko, S. and Woinowsky-Krieger, S., 1959, *Theory of Plates and Shells*, Second Edi., pp. 33~47.

(13) Leissa, A. W., 1969, *Vibration of Plates*, NASA SP-160, pp. 58~60.

(14) Jones, D. I. G., 1974, "Temperature-Frequency Dependency of Dynamic Properties of Damping Materials," *J. Sound Vib.*, Vol. 33, pp. 451~470.