

FEM을 이용한 대칭형 보강재에 보강된 평판의 음향방사에 관한 연구

김종태*(조선대 대학원 기계설계공학과), 김택현(조선대 기계설계공학과)

A Study on Sound Radiation from the Periodic Structure depend on Symmetrical beam space Using FEM

J. T. Kim(Mech. Eng. Dept., CSU), T. H. Kim(Mech. Eng. Dept., CSU)

ABSTRACT

The determination of sound pressure radiated from periodic plate structures is fundamental in the estimation of noise level in aircraft fuselages or ship hull structures. As a robust approach to this problem, here a very general and comprehensive analytical model is developed for predicting the sound radiated by a vibrating plate stiffened by periodically spaced orthogonal symmetrical beams subjected to a sinusoidally time varying point load. In this these, we experiment with the numerical analysis using the space harmonic series and the SYSNOISE for measuring the vibration mode and character of response causedby sound radiation with adding the harmonic point force in the thin isotropic plate supported by the rectangular lattice reinforcement. We used the reinforcements, beams of open type section like the style of 'C' letter; the space of the beams were chosen to be 0.2m, 0.3m, 0.4m. We studied the behavior of sound pressure levels, analysis of vibration mode between support points, connection between frequency function and sound pressure levels, and connection between position function and sound pressure levels.

Key Words : Line Force(선 힘), Line Moment(선 모멘트), Sound Radiation(음향방사), Propagation constant(전파상수), Space Harmonic Coefficient(공간조화계수), Stationary Phase Method(고정위상법)

1. 서 론

등방성 판이나 간단한 단면의 보에 의한 연구는 오래전부터 수행되어져 왔다. 그러나 일반적인 항공기나 선박등에 사용되는 판구조물은 판 만으로 이루어져 있지 않고 일정한 간격의 보에 의해 보강된 주기 구조물의 형태를 취하고 있다. 비행기 동체나 선박의 선체는 길이방향의 종재(stringer)와 원통 방향의 프레임(frame)위에 표피를 씌워서 지지한 2차원 주기구조물로서 구성되어 있다. 이러한 구조물은 종속적인 압력 변동이나 힘에 의한 진동을 종종 받게 된다. 예를 들어 비행기 동체에 대한 자중은 정적인 집중하중으로 모델링 할 수 있지만 동체 주위의 불규칙한 음압으로 인한 진동과 엔진 작동시 불균형력에 의한 진동현상은 새로운 설계변수서 동하중이 된다. 이러한 구조물 진동은 광범위한 주파수 형태로

나타나며, 구조물 부재의 피로현상 및 객실 내 소음의 요인이 되기도 한다. 진동에 관한 연구는 기원전부터 오늘에 이르기까지 많은 과학자에 의해 수행되어 왔다. 특히 1970년 Mead^{(1),(2)}는 주기적으로 지지된 무한보의 파동거동을 고찰하면서 전파상수(propagation constant)의 개념을 소개하였다. 또한 1978년 주기적으로 평행하게 보강된 평판의 음향방사 문제를 연구하였다. 1975년 Rumerman⁽³⁾은 동일한 크기의 리브(rib)에 의해 한 방향으로 보강된 무한 평판의 강제진동 및 전파(wave propation)에 관해 연구하였다. 선박의 선실 구조물의 압력방사 문제는 Greenspon⁽⁴⁾에 의해 연구되었고, 그리고 Greenspon의 해석과정의 오류는 나중에 Mace에 의해 수정되었다. 또한 Mace^{(5)~(7)}는 두쌍의 평행한 보강재에 의해 지지된 무한평판의 음향방사문제를 연구하였는데 이 보강재는 선실 격벽의 기밀을 유지하도록 중간프레

입 역할을 하도록 만들었다. Mace는 격벽과 프레임이 외력의 영향만 받는다는 가정하에서 음향방사기동을 연구하였다. 또한 Mace는 원거리장 압력(far field pressure)하에서 격벽과 링(ring)모양 보강재의 상대적인 운동관계를 규명하였다. 그러나 직각격자형 보강재에 지지된 평판의 음향방사로 인한 진동모드와 주파수에 따른 음압레벨의 연구는 미진한 상태이다.

본 연구에 사용된 보강재는 비틀림과 굽힘모멘트를 동시에 받는 보로서 ㄷ자 개방형 단면을 갖고 있으며, 또한 이들 보강재는 평판에 고정된 상태에서 선 힘(line force)과 선 모멘트(line moment)를 받으며, 회전관성과 전단뒤틀림의 영향을 무시한 상태에서 Euler-Bernoulli 이론을 적용해서 모델링 하기로 한다.

대칭 단면을 갖는 보와 보 사이의 간격을 0.2m, 0.3m, 0.4m로 변화시켜가며, 하중이 보와 보 사이의 정 중앙에 작용했을 때 주파수 100 ~ 10,000Hz범위 내에서 보의 간격을 변화시켜가며 음압레벨(SPL)형상을 수치해석의 방법과 유한요소법을 이용한 상용 패키지인 LMS사의 소음진동 전용 소프트웨어인 SYSNOISE를 사용하여 결과를 비교 고찰한다.

2. 주기구조물의 운동방정식

2.1 형상과 하중조건

Fig.1은 등간격 대칭형 보에 지지된 판구조물의 일부분을 그린 것이다. 보와 보사이의 x축과 y축방향으로 거리는 각각 a와 b이다. 또한 평판은 x축과 y축방향으로 무한히 펼쳐져 있다고 가정한다.

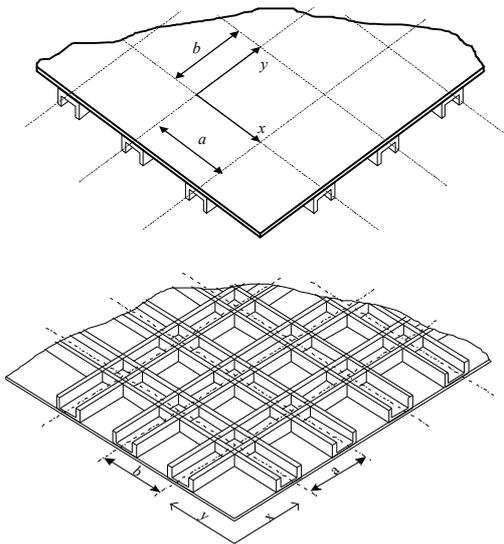


Fig.1 The structure of the isotropic plates stiffened by rectangular grid networks

보의 재질은 알루미늄으로서 전단 중심점S를 통과하는 선을 따라 등간격으로 배열하였고, 그 위에 알루미늄판을 부착하였다. 이와 같은 판 구조물은 표면 위에 전달되는 평면파와 유체압력에 의해 하중을 받게 된다. 따라서 이때 작용된 평판하중은 식(1)과 같이 쓸 수 있다.

$$P(x, y, t) = P_0 \exp[i(\omega t - \alpha_0 x - \beta_0 y)] \quad (1)$$

여기서, α_0 와 β_0 는 대류파수(convection wave number)이다. 식(1)는 일반적인 조화 현상을 중첩시켜 감축한 식으로 매우 유용하다. 그리고 유체압력은 매개물의 밀도가 적을 경우, 큰 오차가 없으므로 무시할 수 있다. 공기 중의 금속 또는 비금속판이 진동하는 경우가 그 좋은 예라 할 수 있다. 그러나 물속에서 판이 진동하는 경우처럼 유체의 밀도가 구조물의 운동에 영향을 줄 정도로 크게 되면 구조물의 탄성력이나 관성력과 함께 유체압력은 더 이상 무시할 수 없다.

2.2 해석을 위한 모델링

2.2.1 주기 구조물의 운동방정식

평판의 $x=ma$ 인 곳에서 발생하는 선 힘 $F_m(y)$ 과 선 모멘트 $M_m(y)$ 를 수식화시키면 다음과 같다.

$$F_m(y) = F_0(y) \exp(-i\alpha_0 am) \quad (2)$$

$$M_m(y) = M_0(y) \exp(-i\alpha_0 am) \quad (3)$$

여기서, $F_0(y)$ 와 $M_0(y)$ 는 $x=0$ 인 선 힘과 선 모멘트이고, 다음과 같은 공간조화급수의 형태로 표현된다.

$$F_0(y) = \sum_s F_s \exp[-i(\beta_0 + 2\pi s/b)y] \quad (4)$$

$$M_0(y) = \sum_s M_s \exp[-i(\beta_0 + 2\pi s/b)y] \quad (5)$$

또한, $y=nb$ 인 선 힘과 선 모멘트는 다음과 같다.

$$G_n(x) = G_0(x) \exp(-i\beta_0 nb) \quad (6)$$

$$N_n(x) = N_0(x) \exp(-i\beta_0 nb) \quad (7)$$

그리고,

$$G_0(x) = \sum_r G_r \exp[-i(\alpha_0 + 2\pi r/a)x] \quad (8)$$

$$N_0(x) = \sum_r N_r \exp[-i(\alpha_0 + 2\pi r/a)x] \quad (9)$$

따라서 평판의 운동방정식은 다음의 식(10)과 같이 쓸 수 있다.

$$[D\nabla^4 - m_p \omega^2]W = P_0 \exp[-i\alpha_0 x - i\beta_0 y] - P_f - \sum_m F_m(y) \delta(x - ma) + \sum_m M_m(y) \frac{d[\delta(x - ma)]}{dx} - \sum_n G_n(x) \delta(y - nb) + \sum_n N_n(x) \frac{d[\delta(y - nb)]}{dy} \quad (10)$$

여기서, 우변의 첫 번째 항은 음향방사로 인한 대류과형태의 가진력이고, P_f 는 유체의 압력을 나타낸다. 식(10)을 푸리에 변환하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
[D\nabla^4 - m_p\omega^2]W &= P_0\exp[-i\alpha_0x - i\beta_0y] - P_f \\
&- \sum_m \sum_s F_s \exp[-i(\beta_0 + 2\pi s/b)y] \\
&\quad \exp[-i\alpha_0am]\delta(x - ma) \\
&+ \sum_m \sum_s M_s \exp[-i(\beta_0 + 2\pi s/b)y] \\
&\quad \exp[-i\alpha_0am] \frac{d[\delta(x - ma)]}{dx} \\
&- \sum_n \sum_r G_r \exp[-i(\alpha_0 + 2\pi r/a)x] \\
&\quad \exp[-i\beta_0nb]\delta(y - nb) \\
&+ \sum_n \sum_r N_r \exp[-i(\alpha_0 + 2\pi r/a)x] \\
&\quad \exp[-i\beta_0nb] \frac{d[\delta(y - nb)]}{dy} \quad (11)
\end{aligned}$$

여기서, α_0 와 β_0 는 변환 대류파수이다. 그리고, 유압의 변환 변위는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
\bar{P}_f(\alpha, \beta) &= -i\rho_f\omega^2 \bar{W}(\alpha, \beta)/(k^2 - \alpha^2 - \beta^2)^{1/2} \quad (12) \\
\text{그리고, } \alpha_{0m} &= \alpha_0 + 2\pi m/a, \quad \beta_{0s} = \beta_0 + 2\pi s/b \text{ 로} \\
\text{정의한 후, } S_{ms} &\text{를 표현하면 다음과 같다.}
\end{aligned}$$

$$S_{ms} = \left\{ D(\alpha_{0m}^2 + \beta_{0s}^2)^2 - m_p\omega^2 - \frac{i\rho_f\omega^2}{(k^2 - \alpha_{0m}^2 - \alpha_{0s}^2)^{1/2}} \right\}^{-1} \quad (13)$$

따라서, 총 변환변위는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned}
\bar{W}(\alpha, \beta) &= (2\pi)^2 P_0 \delta(\alpha - \alpha_0) \delta(\beta - \beta_0) S_{00} \\
&- \frac{(2\pi)^2}{a} \sum_m \sum_s F_s S_{ms} \delta(\beta - \beta_{0s}) \delta(\alpha - \alpha_{0m}) \\
&- i \frac{(2\pi)^2}{a} \sum_m \sum_s \alpha_{0m} M_s S_{ms} \delta(\beta - \beta_0) \delta(\alpha - \alpha_{0m}) \\
&- \frac{(2\pi)^2}{b} \sum_n \sum_r G_r S_{rn} \delta(\beta - \beta_{0r}) \delta(\alpha - \alpha_{0n}) \\
&- i \frac{(2\pi)^2}{b} \sum_n \sum_r \beta_{0n} N_r S_{rn} \delta(\beta - \beta_{0r}) \delta(\alpha - \alpha_{0n}) \quad (14)
\end{aligned}$$

윗 식은 α 와 β 에 대해서 푸리에 역변환된 것이고, 조화계수 F_s, M_s, G_r, N_r 은 미지수이다. 이런 계수들을 결정하기 위해서 보와 평판의 경계선에서 변위와 기울기는 연속성을 갖는 것으로 가정한다. 이를 효과적으로 수행하기 위하여 $x=0$ 인 지점을 선택하면 식(14)는 다음과 같이 간결해진다.

$$\begin{aligned}
\bar{W}^*(0, \beta) &= 2\pi P_0 S_{00} \delta(\beta - \beta_0) \\
&- \frac{2\pi}{a} \sum_m \sum_s F_s S_{ms} \delta(\beta - \beta_{0s}) \\
&- i \frac{2\pi}{a} \sum_m \sum_s \alpha_{0m} M_s S_{ms} \delta(\beta - \beta_{0s}) \\
&- \frac{2\pi}{b} \sum_n \sum_r G_r S_{rn} \delta(\beta - \beta_{0r})
\end{aligned}$$

$$-i \frac{2\pi}{b} \sum_n \sum_r N_r S_{rn} \beta_{0n} \delta(\beta - \beta_{0r}) \quad (15)$$

여기서, $\bar{W}^*(0, \beta)$ 는 보강재의 변환변위를 나타낸다. 또한 $x=0$ 인 곳의 기울기는 다음과 같다.

$$\phi(x, y)|_{x=0} = \frac{\partial W(x, y)}{\partial x} \Big|_{x=0} \quad (16)$$

그러므로,

$$\bar{\phi}(0, \beta) = (-i\alpha) \bar{W}^*(0, \beta) \quad (17)$$

이다. 식(2)과 식(3)의 모멘트와 힘의 항 M, F 대신 식(4)~식(8)의 관계를 대입하면 다음과 같은 형태가 된다.

$$\begin{aligned}
(EC_{ws})_y \frac{\partial^4 \phi}{\partial y^4} - (GJ)_y \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} - (\rho_b I_s)_y \omega^2 \phi \\
+ (EI'_{yz} S_z)_y \frac{\partial^4 W}{\partial y^4} \\
= \sum_s M_s \exp[-i(\beta_0 + 2\pi s/b)y] \quad (18)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(EI'_y)_y \frac{\partial^4 W}{\partial y^4} - (m_b)_y \omega^2 W + (EI'_{yz} S_z)_y \frac{\partial^4 \phi}{\partial y^4} \\
= \sum_s F_s \exp[-i(\beta_0 + 2\pi s/b)y] \quad (19)
\end{aligned}$$

결국, 식(18)과 식(19)은 $x=0$ 인 곳의 변위 W 와 기울기 ϕ 를 나타내고, 윗 식을 변환하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
K_R(\beta) \bar{\phi}(0, \beta) + K_{TR}(\beta) \bar{W}^*(0, \beta) \\
= 2\pi \sum_s M_s \delta(\beta - \beta_{0s}) \quad (20)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
K_T(\beta) \bar{W}^*(0, \beta) + K_{TR}(\beta) \bar{\phi}(0, \beta) \\
= 2\pi \sum_s F_s \delta(\beta - \beta_{0s}) \quad (21)
\end{aligned}$$

여기서,

$$K_T(\beta) = (EI'_y)_y \beta^4 - (m_b)_y \omega^2 \quad (22a)$$

$$K_R(\beta) = (EC_{ws})_y \beta^4 + (GJ)_y \beta^2 - (\rho_b I_s)_y \omega^2 \quad (22b)$$

$$K_{TR}(\beta) = (EI'_{yz} S_z)_y \beta^4 \quad (22c)$$

이고, 식(22a), (22b)와 (22c)는 보의 병진운동, 회전운동 및 이들을 연성한 평면운동에 대한 각각의 동적강성이다. 식(15)과 식(17)의 $\bar{W}^*(0, \beta)$ 와 $\bar{\phi}(0, \beta)$ 을 식(20)와 식(21)에 대입한 후 정리하면 다음의 식(23)과 식(24)로 된다.

$$\begin{aligned}
\left[\frac{1}{K_{Ts}} + \frac{1}{a} \sum_m S_{ms} - \frac{i}{a} R_{Ts} \sum_m \alpha_{0m} S_{ms} \right] F_s \\
+ \left[\frac{1}{b} \sum_j G_j S_{js} - \frac{i}{b} R_{Ts} \sum_j \alpha_{0j} G_j S_{js} \right] \\
+ \left[\frac{i}{a} \sum_m \alpha_{0m} S_{ms} + \frac{1}{a} R_{Ts} \sum_m (\alpha_{0m})^2 S_{ms} \right] M_s \\
+ \left[\frac{i}{b} \sum_j \beta_{0s} N_j S_{js} + \frac{1}{b} \sum_j \beta_{0s} \alpha_{0j} N_j S_{js} \right] R_{Ts} \\
= P_0 S_{00} \delta_{0s} - i\alpha_0 P_0 S_{00} R_{Ts} \delta_{0s} \quad (23)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left[-\frac{i}{a} \sum_m \alpha_{0m} S_{ms} + \frac{1}{a} R_{Rs} \sum_m S_{ms} \right] F_s \\
& + \left[-\frac{i}{b} \sum_j \alpha_{0j} G_j S_{js} + \frac{1}{b} R_{Rs} \sum_j G_j S_{js} \right] \\
& + \left[\frac{1}{K_{Rs}} + \frac{1}{a} \sum_m (\alpha_{0m})^2 S_{ms} + \frac{i}{a} R_{Rs} \sum_m \alpha_{0m} S_{ms} \right] M_s \\
& + \left[\frac{1}{b} \sum_j \beta_{0s} \alpha_{0j} N_j S_{js} + \frac{i}{b} R_{Rs} \sum_j \beta_{0s} N_j S_{js} \right] \\
& = -i\alpha_0 P_0 S_{00} \delta_{0s} + P_0 S_{00} R_{Rs} \delta_{0s} \quad (24)
\end{aligned}$$

식(23)과 식(24)에서 $s = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$ 이고,
 $K_{Ts} = K_T(\beta_{0s}), K_{Rs} = K_R(\beta_{0s}), K_{TRs} = K_{TR}(\beta_{0s})$
 $R_{Ts} = K_{TRs}/K_{Ts}, R_{Rs} = K_{TRs}/K_{Rs}$ 이다.
 $y=0$ 인 지점을 선택하여 보의 동 주파수 임피던스
를 정의하면 다음과 같다.

$$Q_T(\alpha) = (EI_y)_x \alpha^4 - (m_b)_x \omega^2 \quad (25a)$$

$$Q_R(\alpha) = (EC_{ws})_x \alpha^4 + (GJ)_x \alpha^2 - (\rho_y I_s)_x \omega^2 \quad (25b)$$

$$Q_{TR}(\alpha) = (EI_y'z)_x \alpha^4 \quad (25c)$$

식(25a)~식(25c)의 관계를 식(20)과 식(21)에 대입
하면 다음의 두 식이 얻어진다.

$$\begin{aligned}
& \left[\frac{1}{a} \sum_s F_s S_{ms} - \frac{i}{a} J_{Tm} \sum_s \beta_{0s} F_s S_{ms} \right] \\
& + \left[\frac{1}{Q_{Tm}} + \frac{1}{b} \sum_s S_{ms} - \frac{i}{b} J_{Tm} \sum_s \beta_{0s} S_{ms} \right] G_m \\
& + \left[\frac{i}{a} \sum_s \alpha_{0m} M_s S_{ms} + \frac{1}{a} J_{Tm} \sum_s \alpha_{0m} \beta_{0s} M_s S_{ms} \right] \\
& + \left[\frac{i}{b} \sum_s \beta_{0s} S_{ms} + \frac{1}{b} J_{Tm} \sum_s (\beta_{0s})^2 S_{ms} \right] N_m \\
& = P_0 S_{00} \delta_{0m} - i\beta_0 J_{Tm} S_{00} \delta_{0m} \quad (26)
\end{aligned}$$

또한,

$$\begin{aligned}
& \left[-\frac{i}{a} \sum_s \beta_{0s} S_{ms} F_s + \frac{1}{a} J_{Rm} \sum_s F_s S_{ms} \right] \\
& + \left[-\frac{i}{b} \sum_s \beta_{0s} S_{ms} + \frac{1}{b} J_{Rm} \sum_s S_{ms} \right] G_m \\
& + \left[\frac{1}{a} \sum_s \alpha_{0m} \beta_{0s} M_s S_{ms} + \frac{i}{a} J_{Rm} \sum_s \alpha_{0m} M_s S_{ms} \right] \\
& + \left[\frac{1}{Q_{Tm}} + \frac{1}{b} \sum_s (\beta_{0s})^2 S_{ms} + \frac{i}{b} J_{Rm} \sum_s \beta_{0s} S_{ms} \right] N_m \\
& = -i\beta_0 P_0 S_{00} \delta_{0m} + P_0 S_{00} J_{Rm} \delta_{0m} \quad (27)
\end{aligned}$$

식(26)와 식(27)에서 $m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$ 이고

$$Q_{Tm} = Q_T(\alpha_{0m}), Q_{Rm} = Q_R(\alpha_{0m}),$$

$$Q_{TRm} = Q_{TR}(\alpha_{0m}), J_{Tm} = Q_{TRm}/Q_{Tm},$$

$$J_{Rm} = Q_{TRm}/Q_{Rm} \text{ 이다.}$$

식(23)과 식(24), 식(26)와 식(27)는 계수 F_s, M_s, G_m, N_m 를 구할 수 있는 무한 선형 연립방정식이다.

또한 주어진 조건에서 $s=\pm k, m=\pm k$ 번째까지 계산하고 이들 방정식은 미지의 계수와 같은 개수 $4(2k+1)$ 의 식으로 유도된다. k 는 오차가 적도록 결정하고, 일단 계수들이 결정되면 방사압력은 계산되어 진다.

2.2.2 주기 구조물의 변환응답

보강재에 고정된 등방성평판의 변환응답을 결정하기 위해 변위를 공간조화함수로 표현하면 다음과 같다.

$$W(x, y) = \sum_m \sum_n W_{mn} \exp[-i\alpha_{0m}x - i\beta_{0n}y] \quad (28)$$

여기서, 변위조화계수 W_{mn} 은 다음과 같이 주어진다.

$$W_{mn} = \left(\frac{1}{ab} \right) \int_0^a \int_0^b W(x, y) \exp[i\alpha_{0m}x + i\beta_{0n}y] dx dy \quad (29)$$

그리고, 평판의 변위는 역 변환식에 의해 얻어진다.

$$\begin{aligned}
W(x, y) &= P_0 T_{00} - \frac{1}{a} \sum_m \sum_n T_{mn} F_n - \frac{1}{b} \sum_r \sum_t T_{rt} G_r \\
&- \frac{i}{a} \sum_m \sum_n \alpha_{0m} T_{mn} M_n - \frac{i}{b} \sum_r \sum_t \beta_{0t} T_{rt} N_r \quad (30)
\end{aligned}$$

여기서, $T_{mn} = S_{mn} \exp[-i(\alpha_{0m}x + \beta_{0n}y)]$ 이다. 또한 식(30)을 식(29)에 대입하면 모든 지수의 항은 소거되고, 변위계수와 힘과 모멘트계수가 주어지면 적분은 쉽게 구해진다.

$$\begin{aligned}
W_{mn} &= P_0 S_{00} \delta_{0m} \delta_{0n} \\
&- S_{mn} \left[\frac{F_n}{a} + i\alpha_{0n} \frac{M_n}{a} + \frac{G_m}{b} + i\beta_{0m} \frac{N_m}{b} \right] \quad (31)
\end{aligned}$$

식(28)~식(29)을 역순으로 대입해서 정리하면 결국, 판 구조물의 변환변위식이 얻어진다.

$$\begin{aligned}
\bar{W}(\alpha, \beta) &= \\
& 4\pi^2 \sum_m \sum_n W_{mn}(\alpha_0, \beta_0) \delta(\alpha - \alpha_{0m}) \delta(\beta - \beta_{0n}) \quad (32)
\end{aligned}$$

여기서, $W_{mn}(\alpha_0, \beta_0)$ 는 식(31)에서 구할 수 있고, W_{mn} 은 α_0 와 β_0 에 의존하며 식(32)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
\bar{W}(\alpha, \beta) &= \\
& 4\pi^2 \sum_m \sum_n U_{mn} \delta(\alpha - \alpha_{0m}) \delta(\beta - \beta_{0n}) P_0(\alpha_0, \beta_0) \quad (33)
\end{aligned}$$

여기서, U_{mn} 은 식(23)~식(24), 식(26)~식(27)에서 $P_0 = 1$ 일 때 단위진폭에 상응하는 변위조화계수이다.

2.2.3 원거리장(far field)의 방사압력

일반적으로 원거리장의 방사압력을 고정위상법(stationary-phase method)에 의해 다음과 같이 나타낸

다⁸⁾.

$$P(R, \theta, \phi) = -\frac{\rho_f \omega^2}{2\pi R} e^{-ikR} \overline{W}(\alpha', \beta') \quad (34)$$

여기서, α' 와 β' 은 고정위상파수 이고, $\alpha' = k \sin \theta \cos \phi$, $\beta' = k \sin \theta \sin \theta$ 이다.

$x = x_0$, $y = y_0$ 인 곳의 점하중은 다음과 같다.

$$\overline{F}(\alpha, \beta) = F_0 \exp(-i\alpha x_0 - i\beta y_0)$$

원거리장 압력을 데시벨 값으로 나타내기 위해서는 기준압력이 필요하다. 기준압력은 고정되지 않는 평판이 고주파의 비동기 음압(asymptotic sound pressure)을 받을 경우이며 다음과 같다.

$$\overline{W}_r(\alpha, \beta) =$$

$$\frac{F_0}{\left[D(\alpha^2 + \beta^2)^2 - m_p \omega^2 - \frac{i\rho_f \omega^2}{(k^2 - \alpha^2 - \beta^2)^{1/2}} \right]}$$

$\Theta=0$ 인 축 위의 방사압력은 다음과 같다.

$$P_r(R, 0, 0) = -\frac{\rho_f \omega^2}{2\pi R} e^{-ikR} \frac{F_0}{\left(-m_p \omega^2 - \frac{i\rho_f \omega^2}{k} \right)}$$

$k = \omega/c$ 이므로 $\omega \rightarrow \infty$ 이다.

$$P_r(R, 0, 0) = +\rho_f F_0 \frac{e^{-ikR}}{2\pi R m_p}$$

축 위의 방사압력은 식(34)에서 $\alpha' = \beta' = 0$ 로 놓음으로써 구해지고, 데시벨 값은 다음과 같은 음압레벨(Sound Pressure Level, SPL)로 표현된다.

$$SPL = 20 \log_{10} \left| \frac{P(R, 0, 0)}{P_r(R, 0, 0)} \right|$$

따라서 $x = x_0$, $y = y_0$ 인 곳에 작용하는 점하중이므로 위 식은 식(35)으로 표현될 수 있다.

$$SPL = 20 \log_{10}$$

$$\left| -m_p \omega^2 \sum_m \sum_n U_{mm} \exp \left[-i \left(\frac{2\pi x_0}{a} + \frac{2\pi y_0}{b} \right) \right] \right| \quad (35)$$

3. 수치해석과 SYSNOISE해석

3.1 수치해석 절차

수치해석 프로그램은 Fig. 2와 같은 알고리즘에 의해 구성하였다. 구조물의 단면성질 및 물성치, 경계조건과 하중조건 등을 고려해서 주파수를 100Hz에서 10,000Hz까지 50Hz씩 증가시켜 가며 힘의 조화계수와 모멘트의 조화계수를 먼저 계산한 다음, 점조하력 가진에 대한 spectral 응답을 구하고, 하중점이 베이의 정 중앙에 작용했을 때 주파수 변화에 따른 음압레벨(SPL)을 계산하였다. 또한 보의 간격을

0.04m 간격으로 바꾸어 가며, 하중이 x, y축 방향의 정 중앙에 작용했을 때 주파수함수와 음압레벨(SPL)의 관계를 조사할 수 있도록 프로그램을 구성하였다.

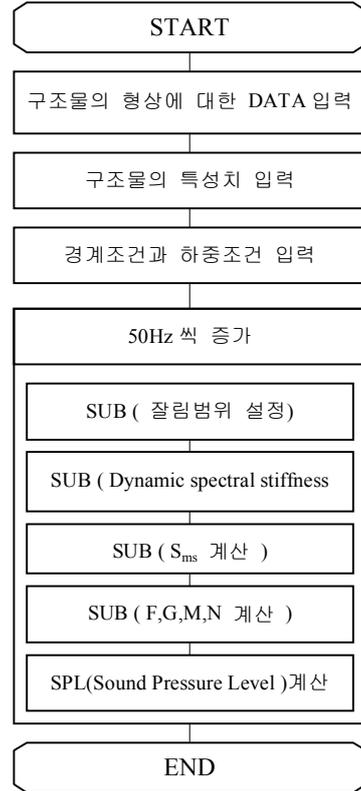


Fig.2 Flow chart of the algorithm

3.2 SYSNOISE를 이용한 해석

최근의 다양한 FEM 소프트웨어 중 소음진동만을 해석하는 전용프로그램으로 가장 신뢰를 가진 SYSNOISE를 사용하였다. SYSNOISE는 BEM/FEM을 이용한 Radiation, Scattering, Cavity Acoustic 문제를 예측하기 위한 LMS 사의 소프트웨어로서 음파의 투과, 반사 및 산란 등의 문제를 예측하며 음압, Acoustic Intensities, 소음의 Contribution, Sound Power Densities, 진동기인 소음의 민감도, Structure Normal Mode등을 계산하는 기능이 있다. 본 연구에서는 이 중 FEM을 이용하였고, 해석방법은 모델을 형상화하여 솔리드를 구성하고 이를 Mesh tool을 이용하여 Mesh의 검사와 수정을 거쳐 해석을 수행하였다.

4. 결과 및 고찰

평판의 강성, 단위면적당 질량 및 감쇠계수는 각각 $D=2326.0\text{N/m}$, $m_p=39.1\text{kg/m}^2$ 그리고 $\eta=0.02$

이다. 보의 밀도, Young계수, 횡탄성계수 그리고 감쇠계수는 각각 7700.0kg/m^3 , $1.95 \times 10^{11}\text{N/m}^2$, $8.1 \times 10^{10}\text{N/m}^2$ 그리고 0.02이다. 매체는 물로서 밀도는 1000.0kg/m^3 이고, 수중에서 소리의 속도는 1500.0m/s 이다. 보와 보사이의 간격은 x와 y방향으로 등간격($L_x=L_y$)이고 주기성을 갖는다. Table 1에 주파수 100Hz일 때 공간조화계수(F, G, M, N)의 값을 나타냈다.

보의 $L_x=L_y$ 이므로 힘 계수인 F와 G 그리고 모멘트 계수인 M과 N은 동일한 값으로 계산되었다.

Table 1. Harmonic force and moment

coefficients at 100Hz F,G [N] M,N [Nm]				
m,n	RE (F)	IM (F)	RE (G)	IM (G)
-3	-3.0651E-07	-1.5889E-05	-3.0651E-07	-1.5889E-05
-2	-7.4895E-07	-3.8579E-05	-7.4895E-07	-3.8579E-05
-1	-2.2155E-06	-1.1267E-04	-2.2155E-06	-1.1267E-04
0	6.0984E-06	3.1238E-04	6.0984E-06	3.1238E-04
1	-2.2155E-06	-1.1267E-04	-2.2155E-06	-1.1267E-04
2	-7.4895E-07	-3.8579E-05	-7.4895E-07	-3.8579E-05
3	-3.0651E-07	-1.5889E-05	-3.0651E-07	-1.5889E-05
m,n	RE (M)	IM (M)	RE (N)	IM (N)
-3	-1.0953E-14	3.2361E-16	-1.0953E-14	3.2361E-16
-2	-3.9253E-14	9.5009E-17	-3.9253E-14	9.5009E-17
-1	-1.3265E-14	1.0156E-16	-1.3265E-14	1.0156E-16
0	1.7746E-17	-1.5529E-18	1.7746E-17	-1.5529E-18
1	-1.3265E-14	1.0156E-16	-1.3265E-14	1.0156E-16
2	-3.9253E-14	9.5009E-17	-3.9253E-14	9.5009E-17
3	-1.0953E-14	3.2361E-16	-1.0953E-14	3.2361E-16

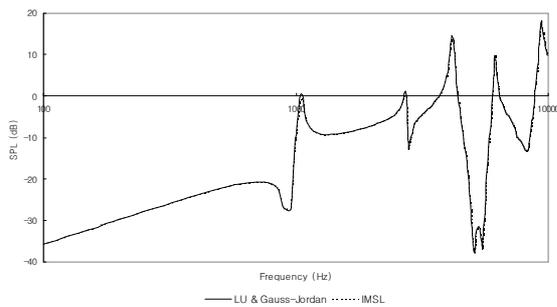


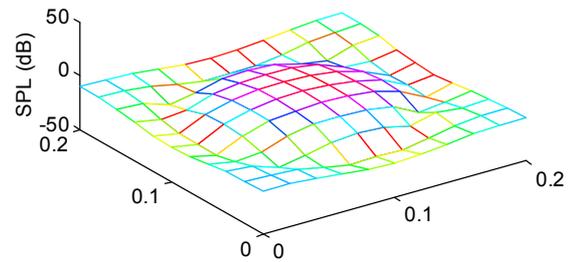
Fig. 3 SPL vs. Frequency at the loading point ($L_x/2, L_y/2$) in case of bay spacing 0.2m

Fig.3은 $x=0.1, y=0.1$ 인 곳에 하중이 작용했을 때 주파수에 대한 음압레벨의 관계를 Gauss-Jordan법과 LU분해법을 이용해서 개발한 본 연구의 알고리즘에 의한 계산결과를 IMSL패키지에 의한 계산치와 비교 검토한 결과그린 것으로 각 모드별로 뚜렷한 3개의 피크 값을 갖고 있지만 고주파에서는 각 모드가 근접해 있어 피크값들을 분별해 내기가 어려웠으며, Gauss-Jordan법과 LU분해법을 이용한 계산결과와

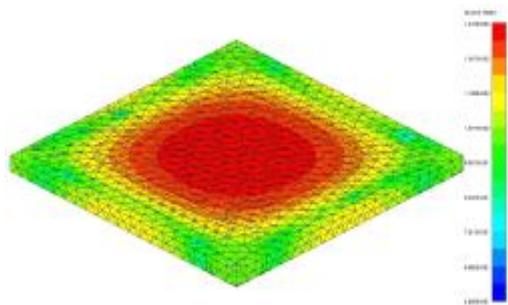
IMSL패키지에 의한 계산결과과 매우 잘 일치함을 보여주고 있다.

Fig. 4은 보의 간격이 0.2m이고, 판의 중심부에 점조화하중을 가했을 때 첫번째 피크가 발생한 주파수(1050Hz)에서 xy평면에 대한 음압레벨(Sound Pressure Level) 모드형상(mode shape)을 그린 것이다. 보의 중앙부에 볼록한 모드형상이 생겼고, 대칭된 모양을 보였다. Fig. 5는 보의 간격이 0.3m이고, 점조화하중이 보의 중앙에 작용했을 때 세번째 피크가 발생한 주파수(2500Hz)에서 모드형상을 그린 것이다. 보의 중앙이 오목하게 들어가는 모드형상이 생겼고, 그 주위는 볼록하게 튀어나오는 형상을 하고 있다. Fig. 6은 보의 간격이 0.4m이고, 점조화하중을 보의 중앙에 작용했을 때 5번째 피크가 발생한 주파수(3800Hz)에서 모드형상을 그린 것이다. 이 경우는 고주파수에서 판구조물이 진동을 하는 경우이고, 9개의 작은 봉우리를 형성하고 있다.

모드형상 결과들을 조합해보면 수치해석으로 나온 결과와 SYSNOISE로 해석한 결과 SPL값에 대한 오차를 갖으나 전반적인 모드 형상은 일치함을 볼 수가 있다.

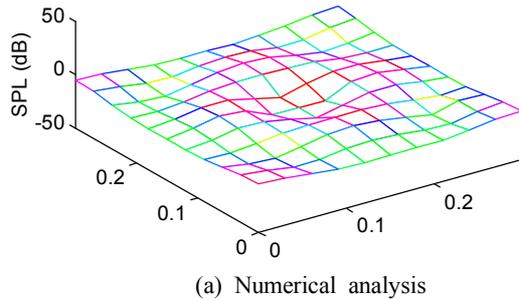


(a) Numerical analysis

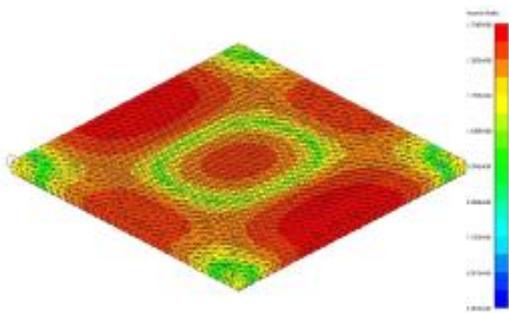


(b) SYSNOISE

Fig. 4 Mode shape in case of beam spacing 0.2m

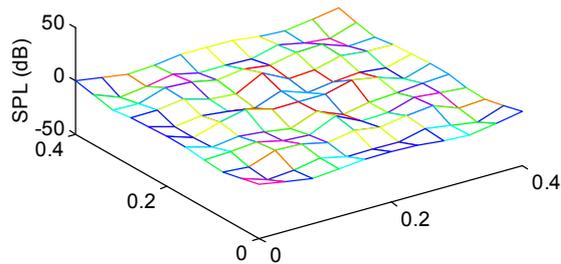


(a) Numerical analysis

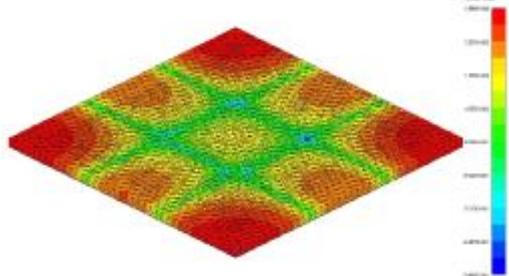


(b) SYSNOIES

Fig. 5 Mode shape in case of beam spacing 0.3m



(a) Numerical analysis



(b) SYSNOIES

Fig. 6 Mode shape in case of beam spacing 0.4m

5. 결 론

본 연구에서는 직각 격자형 보강재에 지지된 얇은 등방성 판에 시간함수의 점조화하중을 가하면서 음향방사로 인한 응답특성을 연구하기 위하여 Fourier변환을 행하여 수치해석하였고 그 결과를 SYSNOISE를 이용한 분석결과와 비교 하였다. 보강재는 π 자형 개방형 단면의 보로서 대칭형을 사용했으며, 보와 보사이의 간격은 0.2m, 0.3m, 0.4m인 세 가지 경우로 모델링하였으며 점조화하중을 가했을 때 보의 간격과 주파수함수와 음압레벨의 관계, 모드형상 등을 고찰하였다. 이러한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 점조화하중이 보의 교차점에서 중앙점으로 이동함에 따라 음압레벨의 피크값은 증가하였다.
 2. 보의 간격이 증가할수록 음압레벨의 발생회수가 증가하였다.
 3. 보의 간격, 하중점의 위치, 보의 단면, 보의 거리, 주파수 변화와 음압레벨의 관계를 종합적으로 고찰해 봄으로써 보의 간격이 넓어질수록 음압레벨 모드형상의 기복이 심하였다.
- 이러한 결과들을 응용하여 판을 이용한 구조물의 설계에 유용하게 이용되는 기초자료가 되리라 사료된다.

후 기

본 연구는 2003년 조선대학교 학술연구비 지원에 의해 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

- (1) Mead, D. J., "Free Wave Propagation in Periodically Supported by Infinite Beams", *J. Sound & Vib.*, Vol.11, No.2, pp.181~197, 1970.
- (2) Mead, D. T. and Mallik, A. K., "An Approximate Theory for the Sound Radiated from a Periodic Line-Supported Plate", *J. Sound & Vib.*, Vol. 61, No. 3, pp.315~326, 1978.
- (3) Rumerman, M. L., "Vibration and Wave Propagation in Ribbed Plates", *J. of Acoustics Soc. Am.*, Vol. 57, No. 2, pp. 370~373, 1974.
- (4) Greenspon, J. E., "Sound Radiation from and Orthotropic Plate Supported by a Double Set of Stiffeners", *J. G. Engineering Research Associate*, Baltimore, MD, Report No.0-75-1, 1975.
- (5) Mace, B. R., "Sound Radiation from a Plate Reinforced by Two Sets of Parallel Stiffeners", *J. Sound & Vib.*, Vol. 71, No.3, pp. 435~441, 1980.
- (6) Mace, B. R., "Periodically Stiffened Fluid-Loaded Plates(I)", *J. Sound & Vib.*, Vol. 73,

No.4, pp.473-486, 1980.

(7) Mace, B. R., "Sound Radiation from Fluid-Loaded Orthogonally Stiffened Plates," J. Sound & Vib., Vol. 79, No. 3, pp. 439-452, 1981.

(8) Harris, C. M., "Shock and Vibration Handbook", McGRAW-HILL, pp. 21.1~21.74, 1997.

(9) 한상보, "구조물-가진기 상호작용에 의한 공진주파수 변동에 대한 해석", 대한기계학회 논문집 Arnjs, 제20권, 제7호, pp. 2108~2117, 1996.