Transactions of the KSNVE, 24(1) : 21~27, 2014
http://dx.doi.org/10.5050/KSNVE.2013.24.1.021
한국소음진동공학회논문집 제24권 제1호, pp. 21~27, 2014
ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

단순지지 사각 접수 평판의 방사효율 근사식에 관한 연구

A Study on the Approximate Formula for Radiation Efficiency of a Simply Supported Rectangular Plate in Water

김 현 실† · 김 재 승* · 김 봉 기* · 김 상 렬*
Hyun-Sil Kim, Jae-Seung Kim, Bong-Ki Kim and Sang-Ryul Kim

(Received September 26, 2013 ; Revised December 6, 2013 ; Accepted December 17, 2013)

Key Words : Radiation Efficiency(방사효율), Plate in Water(접수평판), Impedance Coefficient(임피던스 계수)

ABSTRACT

In this paper, an approximate formula for radiation efficiency of the plate surround by an infinite rigid baffle is studied. The plate is simply supported and one side is in contact with air, while other side with water. By assuming an infinite plate, the fluid loading effect is derived in terms of an effective mass. Based on the observation that the fluid loading effect decreases as frequency increases, the radiation efficiency formula at high frequency, which was originally derived for a plate vibrating in the air, is modified as the approximate formula for a submerged plate. The fluid loading effect is taken into account in the wavenumber of the plate. Comparisons of the approximate formula with the numerical results shows that they match well except the mid-frequency range in which numerical results show many oscillations. In numerically solving the fully coupled equations of motion, fourfold integrals of the impedance coefficients are reduced to single nonsingular integrals, which results in substantial reduction in computing time.

1. 서 론

방사효율(radiation efficiency)은 판과 같이 면적이 넓고 두께가 얇은 구조물이 진동할 때 운동에너지가 얼마나 음향에너지로 잘 변환되는지 말해주는 중요한 물리적 변수이다. 판이 공기 중에 있을 때에는 공기저항이 판의 진동에 미치는 영향을 무시할 수 있지만, 물과 접한 판은 구조-유체의 연성운동방정식을 동시에 풀어야만 방사효율의 계산이 가능하다. 공기 중 판의 방사효율에 대해서는 판의 진동만 고려하여도 되며 Maidanik[(1)], Vèr 등[(2)], Leppington 등[(3)], Xie 등[(4)] 여러 연구결과가 있다.

접수 평판의 방사효율은 유체하중 효과(fluid loading effect)를 무시할 수 없으며 수치해석적으로 연성방정식 전체를 풀어서 방사효율을 구하여야 하는데 이 과정에서 공간에 대해 다중 적분식으로 주어지는 방사 임피던스 계수(radiation impedance coefficient)를 계산하여야 한다. 주파수가 커지면 많은 모드를 포함하므로 방사 임피던스 계수를 계산하는데 대단히 많은 시간이 소요되며 적분을 효율적으로 하기위한 방법에 여러 연구[(5~9)]가 발표되었다. Kim 등[(10)]은 한쪽은 공기, 다른 쪽은 물과 접한 직사각형 판의 방사효율을 다루었는데 연성방정식의 크로스

† Corresponding Author ; Member, KIMM
E-mail : hskim@kimm.re.kr
Tel : +82-42-868-7461, Fax : +82-42-868-7440
* Member, KIMM

A part of this paper was presented at the KSNVE 2013 Annual Autumn Conference
‡ Recommended by Editor SungSoo Na
ⓒ The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

모드 중 몇 개 또는 몇 십 개의 처음 모드가 판의 진동레벨을 주로 지배한다는 점에 착안하여 전체 매트릭스 식을 푸는 대신 밴드 매트릭스를 풀어서 근사적인 결과를 얻는 방법을 제안하였다. Chen 등[11]과 Andresen[12]은 접수 평판의 방사효율에 대해 등가질량의 개념을 도입하고 공기 중에서처럼 연성방정식에서 크로스 모드의 영향을 무시하고 대각선 항만 고려하였다. 특히 Chen 등[11]은 Xie 등[4]이 공기 중 평판에 대해 제시한 근사식 중 중간 주파수 영역의 코너 모드에 대해 평판의 질량대신 등가질량을 대입하였으며 고주파수영역에 대해서는 Maidanik[1] 식에 공기의 밀도와 음속대신 물의 밀도와 수중에서의 음속을 대입한 근사식을 제안하였다.

이 논문에서는 한쪽은 공기, 다른 쪽은 물과 접한 직사각형 판의 방사효율 근사식을 다루었는데 Chen 등[11]이 제시한 근사식을 보완하여 모노폴의 거동이 지배적인 저주파수대역과 고주파수에 대한 근사식에서도 등가질량을 반영하여 유체하중영향을 고려하였다. 또한 근사식의 정확성을 확인하기 위해서는 지배방정식을 수치해석적으로 풀어서 방사효율을 구하여 비교해야 하는데 이 논문에서는 Pierce 등[13]이 제안한 방법에 따라 다중적분형태의 임피던스 계수를 1차원 적분으로 차수를 낮추어 계산하는 방법을 적용하였으며 향후 실질적인 수치해석방법으로 활용할 수 있음을 확인하였다.

2. 방사효율 근사식

Fig. 1과 같이 평판주변이 강체 배플에 단순지지된 직사각형 평판을 고려한다.

평판의 가로와 세로는 각각 a, b이며 두께는 h, 밀도는 ρ_p, 탄성계수는 E, Poisson 비는 ν이다. $z>0$인 공간은 물과 접촉하였고 $z<0$인 공간은 공기와 접촉하였으며 포인트 하중 F_0에 의해 가진된다고 가정하면 공기에 의한 압력은 물에 의한 압력에 비해 무시할 수 있으므로 평판의 변위 w에 대한 지배방정식은 다음과 같이 된다.

$$D(1+i\eta)\nabla^4 w + m_p \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = -p_{z=0} + F_0 \delta(x-x_0, y-y_0) \quad (1)$$

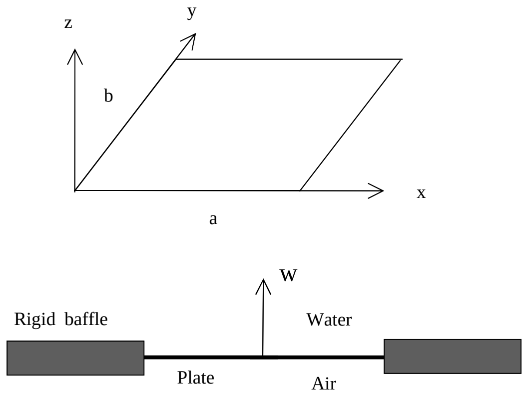

Fig. 1 A baffled plate exposed to air below (z<0) and water above (z>0)

여기서 $D=\dfrac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$, η는 댐핑, $m_p=\rho_p h$, p는 압력, 위치 (x_0, y_0)는 집중하중이 가해지는 지점을 나타낸다.

평판과 물의 접촉면에서의 경계조건은 다음과 같다.

$$\text{At } z=0:\ \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} = -\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}. \quad (2)$$

여기서 ρ는 물의 밀도이다. 한편, 물에 방사되는 음파는 식 (3)의 파동방정식을 만족하며 식 (3)에서 c는 수중에서의 음속이다.

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2}. \quad (3)$$

평판의 방사효율은 다음 식으로 주어진다.

$$\sigma = \frac{W}{\rho c S < v^2 >}. \quad (4)$$

여기서 W는 음향파워, $S=ab$, $< v^2 >$는 속도의 제곱을 평판에 대해 평균한 값이다.

먼저 무한평판의 경우를 고려하면 집중하중이 없는 경우 x방향으로의 해는 다음과 같이 가정할 수 있다[14].

$$w = We^{i(\gamma x - \omega t)}. \quad (5)$$

여기서 γ는 평판의 파수(wavenumber)이다. 수중의

음파도 식 (5)와 유사한 평면파 해를 가정하여 식 (1)~(3)으로부터 다음과 같은 분산식(dispersion equation)을 얻는다[14].

$$\gamma^4 = \frac{\omega^2}{D}(m_p + \frac{\rho}{\sqrt{\gamma^2 - k^2}}). \tag{6}$$

여기서 $k = \omega/c$. 식 (5)에서 (x,y) 방향의 2차원 평면파 해를 가정해도 식 (6)과 동일한 결과를 얻는다. 식 (6)에서 괄호안의 우변 항은 유체에 의한 부가질량(added mass) 항으로 볼 수 있는데 공기 중 판의 파수(wavenumber) k_a를 $k_a = (m_p\omega^2/D)^{1/4}$로 정의하면 식 (6)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\gamma = k_a(1+\epsilon)^{1/4}. \tag{7}$$

여기서

$$\epsilon = \rho/m_p\sqrt{\gamma^2 - k^2}. \tag{8}$$

식 (8)의 ϵ은 유체하중효과(fluid loading effect)를 나타낸다. 식 (6)은 γ^2에 대한 5차 방정식인데 근사식으로 $\epsilon = \rho/m_p\sqrt{k_a^2 - k^2}$를 사용하여 γ를 구하여도 $f < f_c$인 경우는 실제 근에 매우 근접하는데[14] 여기서 일치주파수 $f_c = (c^2/2\pi)\sqrt{m_p/D}$이다.

Fig. 2에는 두께 10 mm와 1 mm인 강판에 대해 유체하중효과를 주파수의 함수로 나타냈는데 주파수가 커질수록 ϵ은 감소함을 알 수 있다. 무한 평판에서 유도한 유체하중효과를 유한한 판에 적용하는 것이 이 논문의 핵심이며 등가 질량은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$m_{eq} = m_p(1+\epsilon). \tag{9}$$

이 논문에서는 Chen 등[11]이 제안한 식과 유사하게 등가질량 항을 반영하여 접수 평판의 방사효율 σ를 다음과 같이 제안한다.

$$\sigma = \frac{4S}{c^2}f^2, \quad f < f_{1,1} \tag{10}$$

$$\sigma = \frac{2\pi^2}{c^2 S}\frac{D}{m_{eq}}, \quad f_{1,1} < f < f_B \tag{11}$$

$$\sigma = \frac{P\lambda_c}{S}g(\alpha), \quad f_B < f < f_c \tag{12}$$

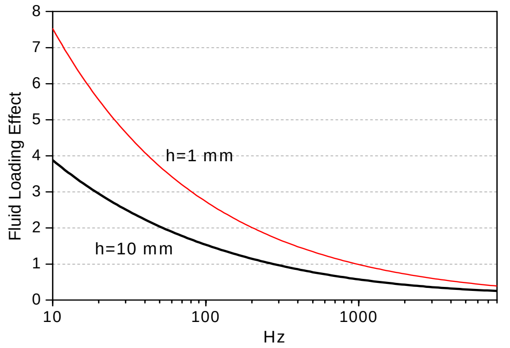

Fig. 2 Fluid loading effect vs. frequency

여기서 $P = 2(a+b)$이며

$$f_{1,1} = \frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{D}{m_{eq}}}(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2}), \tag{13}$$

$$f_B = 100(\frac{\lambda_c}{P})(\frac{c}{P}), \tag{14}$$

$$g(\alpha) = \frac{1}{4\pi^2}\frac{(1-\alpha^2)\ln[(1+\alpha)/(1-\alpha)] + 2\alpha}{(1-\alpha^2)^{1.5}}. \tag{15}$$

식 (10)에서 방사효율은 평판의 첫 번째 고유진동수 $f_{1,1}$보다 작은 주파수에서는 모노폴의 거동을 보이며 공기 중이나 수중이나 같은 방사형태를 보인다. 단, 이 논문에서는 식 (13)에서 면적 질량으로 m_p대신 m_{eq}를 사용하였는데 먼저 공기 중 판의 첫 번째 고유진동수 $f_{1,1}^{air}$에서 γ와 ϵ 및 m_{eq}를 계산하였고 식 (13)을 이용하여 $f_{1,1}$을 계산하였다.

식 (11)의 $f_{1,1} < f < f_B$인 경우는 코너모드에 해당하며 분모에서 m_p대신 m_{eq}를 사용하였다. 또한 식 (11)에서 계수 2는 원래 식 (2)는 4이며 이는 각 코너모드가 같은 위상(in-phase)으로 거동한다는 가정에 근거한 것으로 이 논문에서는 Chen 등[11]과 마찬가지로 2를 사용하였다. 상한 주파수는 Chen 등[11]은 $f_B = 3c/P$를 사용하였지만 이 논문에서는 Vèr 등[2]의 결과를 적용하여 식 (14)의 값을 채택하였다.

식 (12)의 $f_B < f < f_c$의 경우는 엣지(edge) 모드에 해당한다. Fig. 2에서 확인하였듯이 주파수가 커지면 유체하중효과는 작아지며 근사적으로 유체의 연성거동을 무시할 수 있는데 이는 공기 중에서 유도된 방사효율 근사식을 사용할 수 있음을 의미한다.

Leppington 등[3]은 크기가 $a\times b$인 단순지지 평판에 대해 모드 (m,n)에서 m/ka, n/kb는 일정한 값을 유지하고 k가 커질 때 $f<f_c$인 경우 공기 중 모달방사효율 σ_{mn}의 근사식을 다음과 같이 유도하였다.

$$\sigma_{mn}=\frac{1}{k\sqrt{\mu^2-1}}\left[\frac{1}{b\beta_n}\left(1+\frac{\beta_n^2}{\mu^2-1}\right)+\frac{1}{a\alpha_m}\left(1+\frac{\alpha_m^2}{\mu^2-1}\right)\right]. \quad (16)$$

여기서 $\alpha_m=\dfrac{m\pi}{ka}$, $\beta_n=\dfrac{n\pi}{kb}$, $\mu=\sqrt{\alpha_m^2+\beta_n^2}$.

식 (16)은 $\mu>1, \alpha_m<1, \beta_n<1$인 엣지 모드에 해당한다. 주파수 영역 $(\omega, \omega+\Delta\omega)$에 대한 평균은 m과 n이 매우 크다면 파수벡터 (α_m,β_n)는 연속된 영역으로 볼 수 있으므로 $\alpha_m=\mu\cos\phi$, $\beta_n=\mu\sin\phi$으로 치환하고 다음과 같이 각도 ϕ에 대해 적분하여 구할 수 있다.

$$\bar{\sigma}=\frac{2}{\pi}\int_0^{\pi/2}\sigma_{mn}(\mu,\phi)d\phi. \quad (17)$$

단, 식 (17)에서 적분구간은 $\cos\phi$에 대해서는 $(\pi/2, \cos^{-1}(1/\mu))$, $\sin\phi$에 대해서는 $(\sin^{-1}(1/\mu), 0)$에 대해 수행하여야 하며 $\alpha=1/\mu$를 대입하면 적분결과는 식 (12) 및 (15)로 주어진다. 모드 m과 n이 매우 크면 공기 중에서는 근사적으로 $\alpha\approx k/k_a=\sqrt{f/f_c}$이 성립한다. 이 논문에서는 유체하중효과를 반영하여 수중에서 $\alpha\approx k/\gamma$를 사용하였다. 식 (12)와 (15)는 더 이상 특정 모드 m과 n의 변수가 아니며 공기 중 및 수중 평판의 고주파수 방사효율 근사식으로 사용할 수 있다. 참고문헌[11]에서는 수중에서도 $\alpha=\sqrt{f/f_c}$를 사용하였으나 평판의 두께가 얇아질수록 이 논문처럼 $\alpha=k/\gamma$를 사용하는 것과 큰 오차를 보인다.

3. 수치해석방법

방사효율 근사식의 정확성을 확인하기 위해서는 식 (1)~(3)을 수치해석적으로 풀어서 구한 방사효율 값이 필요하다. 자세한 해석과정은 참고문헌[10]에 제시되어 있는데 가장 중요한 점은 다음 식에 정의된 방사임피던스 계수 Z_{mnrs}를 구하는 것이다.

$$Z_{mnrs}=\int_0^b\int_0^a\int_0^b\int_0^a \phi_m^x\phi_n^y\phi_r^{x'}\phi_s^{y'}\frac{e^{-ikR}}{R}dx'dy'dxdy. \quad (18)$$

여기서 모드 ϕ_m^x, ϕ_n^y과 거리 R은 다음과 같다.

$$\phi_m^x=\sin(\frac{m\pi x}{a}),\quad \phi_n^y=\sin(\frac{n\pi x}{b}), \quad (19)$$

$$R=\sqrt{(x-x')^2+(y-y')^2}. \quad (20)$$

Z_{mnrs}는 모드 (m,n)과 (r,s)에 대한 4중 적분이지만 참고문헌[3,5]에 제시된 좌표변환을 이용하면 2중 적분으로 차수를 2단계 낮출 수 있다. Z_{mnrs}는 (m,n)과 (r,s)에 대해 대칭이며 다음 조건이 성립할 때만 제로가 아닌 값을 갖는다.

$$|m\pm r|,\quad |n\pm s|=0,2,4,6,\cdots. \quad (21)$$

$m=r$, $n=s$인 경우 Z_{mnmn}은 다음과 같이 주어진다.

$$Z_{mnmn}=\int_0^b\int_0^a[(a-\zeta)\cos(\alpha_m\zeta)+\sin(\alpha_m\zeta)/\alpha_m]\times[(b-\tau)\cos(\beta_n\tau)+\sin(\beta_n\tau)/\beta_n]\frac{e^{-ikR}}{R}d\zeta d\tau. \quad (22)$$

여기서 $R=\sqrt{\zeta^2+\tau^2}$.

$m\neq r$, $n\neq s$인 경우는 다음과 같다.

$$Z_{mnrs}=\frac{4}{(\alpha_m^2-\alpha_r^2)(\beta_n^2-\beta_s^2)}\times\int_0^b\int_0^a(\alpha_m\sin\alpha_r\zeta-\alpha_r\sin\alpha_m\zeta)\times(\beta_n\sin\beta_s\tau-\beta_s\sin\beta_n\tau)\frac{e^{-ikR}}{R}d\zeta d\tau. \quad (23)$$

여기서 $\alpha_r=r\pi/a$, $\beta_s=s\pi/b$.

$m=r$, $n\neq s$ 또는 $m\neq r$, $n=s$인 경우에는

Z_{mnrs}는 식 (22)와 (23)의 혼합된 형태로 주어지며 자세한 표현은 참고문헌[5,6]에 나와 있다.

참고문헌[13]에서 제안한 방법에 따라 식 (22)와 (23)은 1-D 적분으로 차수를 하나 낮출 수 있는데 다음과 같이 (R,θ)로 좌표를 변환한다.

$$\zeta = R\cos\theta,\ \tau = R\sin\theta\ . \tag{24}$$

식 (22)는 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$Z_{mnmn} = \int_0^{\theta_0}\int_0^{a/\cos\theta}\sum_{j=1}^{4} H_i e^{iB_jR} dRd\theta + \int_{\theta_0}^{\pi/2}\int_0^{b/\sin\theta}\sum_{j=1}^{4} H_i e^{iB_jR} dRd\theta\ . \tag{25}$$

적분항 H_i의 첫 번째 경우는 다음과 같이 주어진다.

$$H_1 = A_2R^2 + A_1R + A_0\ , \tag{26}$$

$$A_2 = \cos\theta\sin\theta\ , \tag{27}$$

$$A_1 = -b\cos\theta - a\sin\theta - \frac{1}{i}\left(\frac{\cos\theta}{\beta_n} + \frac{\sin\theta}{\alpha_m}\right)\ , \tag{28}$$

$$A_0 = -ab - \frac{1}{\alpha_m\beta_n} + \frac{1}{i}\left(\frac{a}{\beta_n} + \frac{b}{\alpha_m}\right)\ , \tag{29}$$

$$B_1 = \alpha_m\cos\theta + \beta_n\sin\theta - k\ . \tag{30}$$

식 (25)의 적분은 R에 대해서 해석적으로 수행이 가능하며 예를 들어 R^2항에 대한 적분 값은 다음과 같이 주어진다.

$$J = \int_0^{R_0} R^2 e^{iB_1R} dR = \left(\frac{R_0^2}{iB_1} + \frac{2R_0}{B_1^2} - \frac{2}{iB_1^3}\right)e^{iB_1R_0} + \frac{2}{iB_1^3}.\quad (R_0 = a/\cos\theta,\ \text{or}\ b/\sin\theta) \tag{31}$$

식 (30)에서 $B_1 = 0$가 되는 θ가 존재하며 식 (31)의 분모는 제로가 되는 특이점이 발생한다. 그러나 $e^{iB_1R_0}$를 매우 작은 B_1에 대해 Taylor 급수 전개하면 특이점은 사라지고 식 (31)의 적분 값은 다음과 같이 유한한 값을 가짐을 확인 할 수 있다.

$$\lim_{B_1\to 0} J = R_0^3 + O(B_1). \tag{32}$$

같은 방법으로 $\int_0^{R_0} Re^{iBR_0} dR$도 $B\to 0$일 때 유한한 적분 값을 가짐을 알 수 있다. 식 (25)에서 나머지 H_i에 대한 적분도 같은 방법으로 수행하면 된다. 결과적으로 식 (25)의 2차원 적분은 θ에 관한 1차원 적분으로 단순화되며 이로 인해 Z_{mnrs} 계산시 적분 시간이 크게 줄어들게 된다.

4. 수치해석예제

예제로 Fig. 3에는 크기가 $1.41\times 0.91\,\text{m}$, 두께는 10 mm인 강판과 Fig. 4에는 $0.455\times 0.375\,\text{m}$, 두께 1 mm인 강판의 방사효율을 나타냈다. 그림에서 “Present Method”는 이 논문에서 제안한 근사식 (10)~(15)를 나타내며, “Full Eq.”는 참고문헌[10]에서 제안한 밴드 매트릭스 식을 이용하여 연성방정식 전체를 푼 결과이며 “Leppington’s formula”는 참고문헌[3]에 제시된 공기 중 방사효율 근사식에 물의 밀도와 수중에서의 음속을 대입한 결과이다. 또한 Fig. 3에서 “Empirical formula”는 참고문헌[15]에 제시된 측정결과에 근거를 둔 경험식을 나타낸다.

Fig. 3과 Fig. 4에서 이 논문에서 제안한 근사식은 $f_{1,1}$이하에서는 잘 맞으며 $f_{1,1} < f < f_B$의 주파수 영역에서는 연성방정식을 풀어 구한 값의 대략적인 평균값보다 크게 나타남을 알 수 있다. 판의 두께가 10 mm인 Fig. 3에서는 “Full Eq.”과 경험식[15]이 차이가 크지만 두께가 1 mm인 Fig. 4에서는 “Full Eq.”과 경험식이 대등하다. 반면, 고주파수대역에서 이 논문에서 제안한 근사식은 Fig. 3에서는 “Full Eq.”과 대등하나 Fig. 4에서는 차이가 커지는데 이는 Fig. 2에서 보듯이 두께가 얇을수록 유체하중효과가 더 커짐에 기인한 것으로 보인다. 참고문헌[15]의 측정은 수면가까이 박스형 구조를 담그고 박스 위에서 가진하여 측정하였는데 수표면에 의한 반사 및 가진 위치 등을 고려할 때 엄밀히 말하면 이 논문에서 고려한 상황과 다르다고 할 수 있다.

Fig. 4에서 “Leppington’s formula”는 근사식에 비해 전반적으로 높은 방사효율 값을 주는데 두께가

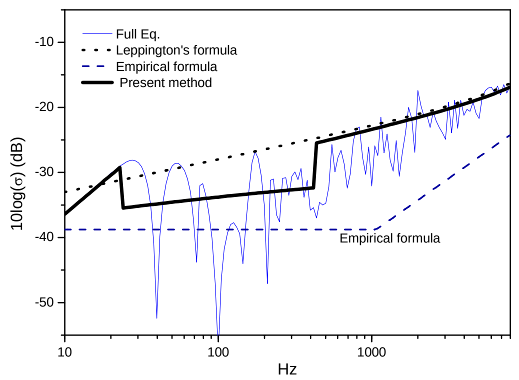

Fig. 3 Radiation efficiency of the steel plate (1.41×0.91 m, h= 10 mm), $f_{1,1}$ = 23.5 Hz, f_B = 456 Hz, f_c = 22,930 Hz

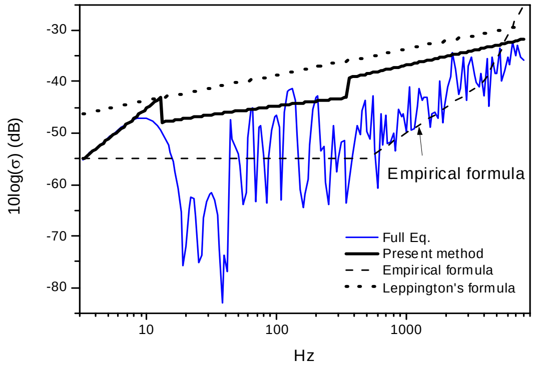

Fig. 4 Radiation efficiency of the steel plate (0.455×0.375 m, h=1 mm), $f_{1,1}$ = 12 Hz, f_B = 356 Hz, f_c = 229,300 Hz

얇은 판에서 고주파수로 갈수록 유체하중효과가 더 커져서 Leppington의 식에서 사용한 $\alpha \approx k/k_a$와 이 논문에서 사용한 $\alpha \approx k/\gamma$가 차이가 커지기 때문이다. 이 논문에서 제안한 근사식은 중간주파수대역에서 꺾이므로 비현실적으로 보일 수도 있는데, 이 영역은 특정 모드 (m,n)에 크게 좌우되는 변화가 많은 영역으로 단일 선으로 대표하기에는 무리가 있으며 이는 공기 중 근사식[(2)]도 마찬가지이다.

5. 결 론

이 논문에서는 무한 접수 평판에 대해서 유도된 유체하중효과를 반영하여 물과 접한 유한한 평판의 방사효율 근사식을 제안하였다. 주파수가 커질수록 유체하중효과가 작아짐에 착안하여 고주파수 영역에서는 평판-유체 연성효과를 무시한 공기 중 방사효율 근사식을 이용하였으며 평판의 파수를 구하는 과정에서 등가질량 효과를 고려하였다. 연성방정식을 푼 수치해석 결과와 비교한 결과, 변화가 매우 심한 중간 주파수 영역을 제외하고 두께 10 mm 판에서는 근사식은 수치해석 결과와 비교적 잘 일치하나 두께 1 mm 판에서는 과장되게 예측함을 알 수 있었다. 또한 수치해석 과정에서 기존의 다중 적분 항을 1차원 적분으로 변환이 가능하며 이로 인해 향후 수치해석과정에서 계산시간을 크게 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 연구는 한국기계연구원 임무형과제의 지원을 받아 수행한 연구과제이다.

References

(1) Maidanik, G., 1962, Response of Ribbed Panels to Reverberant Acoustic Fields, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 34, No. 6, pp. 809~826.

(2) Ver, I. L. and Holmer, C. I., 1988, Noise and Vibration Control, edited by Beranek, L. L., McGraw-Hill, New York, pp. 287~296.

(3) Leppington, F. G., Broadbent, E. G. and Heron, K. H., 1982, The Acoustic Radiation Efficiency of Rectangular Panels, Proceedings of the Royal Society London, A 382, pp. 245~271.

(4) Xie, G., Thompson, D. J. and Jones, C. J. C., 2005, The Radiation Efficiency of Baffled Plates and Strips, Journal of Sound and Vibration, Vol. 280, pp. 181~209.

(5) Li, W. L. and Gibeling, H. J., 2000, Determination of the Mutual Radiation Resistances of a Rectangular Plate and their Impact on the Radiated Sound Power, Journal of Sound and Vibration, Vol. 229, No. 5, pp. 1213~1233.

(6) Li, W. L., 2001, An Analytical Solution for the Self-and Mutual Radiation Resistances of a Rectangular Plate, Journal of Sound and Vibration, Vol. 245, No. 1,

pp. 1~16.

(7) Snyder, S. D. and Tanaka, N., 1994, Calculating Total Acoustic Power Output using Modal Radiation Efficiency, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 97, No. 3, pp. 1702~1709.

(8) Berry, A., 1994, A New Formulation for the Vibrations and Sound Radiation of Fluid-Loaded Plates with Elastic Boundary Conditions, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 96, No. 2, pp. 889~901.

(9) Atalla, N. and Berry, A., 1994, Acoustic Radiation from a Coupled Planar Semi-complex Structure in Heavy Fluid, Journal of Ship Research, Vol. 38, No. 3, pp. 213~224.

(10) Kim, H. S., Kim, J. S., Kim, B. K., Kim, S. R. and Lee, S. H., 2012, An Analysis of Radiation Efficiency of the Simply Supported Rectangular Plate in Water with Consideration of Low Order Cross Modes, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 22, No. 8, pp. 800~807.

(11) Chen, Z., Fan, J., Wang, B. and Tang, W., 2012, Radiation Efficiency of Submerged Rectangular Plates, Applied Acoustics, Vol. 73, pp. 150~157.

(12) Andresen, K., 1999, Underwater Noise from Ship Hulls, Proceedings of the International Conference on Noise and Vibration in the Marine Engineering, London, pp. 1~22.

(13) Pierce, A. D., Cleveland, R. O. and Zampolli M., 2002, Radiation Impedance Matrices for Rectangular Interfaces within Rigid Baffles: Calculation Methodology and Applications, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 111, No. 2, pp. 672~684.

(14) Junger, M. C. and Feit, D., 1986, Sound, Structures, and Their Interaction, 2nd Ed., MIT Press, Chap. 8.2.

(15) Uchida, S., Yamanaka, Y., Ikeuchi, K., Hattori, K. and Nakamachi, K., 1986, Prediction of Underwater Noise Radiated from Ship's Hull(in Japanese), Bulletin of the Society of Naval Architects of Japan, No. 686, pp. 36~45.

Hyun-Sil Kim received his B.S. degree from Seoul National University in 1980, M.S. degree from KAIST in 1982, and Ph.D. from GIT in 1989. He has been a principal researcher in KIMM since 1991. His research area includes structural acoustics, architectural acoustics and noise control in machineries.