평판에서의 음향 방사파워와 구면파 모델을 이용한 빔형성 파워와의 비교

Comparison Between Radiation Power and Beamforming Power of plate

김 영 기*, 김 양 한*
(Young-Key Kim*, Yang-Hann Kim*)

요 약

빔형성 방법은 측정 범위의 제한에 의해 분해능이 제한되므로, 공간상에 분포되어 있는 소음원에 적용할 경우 소음원의 형상을 스므딩(smoothing)시켜 표현하는 문제점을 갖게 된다. 특히 기계소음과 같은 저주파수 소음에서는 분해능의 향상이 한계를 갖게 되므로, 빔형성 방법의 적용이 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 빔형성 방법에서의 스므딩 현상과 평판의 음향파워 방사 형태와의 관계를 살펴 봄으로써, 낮은 분해능을 갖는 빔형성 방법의 적용가능성을 보이고자 한다. 이 경우, 구면파를 가정한 빔형성 방법의 분해능을 조정하므로써, 빔형성 파워의 형태가 아음속(subsonic) 및 초음속(supersonic) 음향 방사의 형태를 따르는 평판에서의 음향 방사파워의 형태가 됨을 알 수 있으며, 단순지지된 평판의 방사 음장에서 이를 수치적으로 확인하였다.

ABSTRACT

Beamforming method has a limited spatial resolution because of finite aperture size, so that the estimated source distributions are smoothed within the resolution. Especially for low frequency noise such as mechanical noise, this limitation often diminishes the direct use of beamforming method. In this study, the relation between smoothed beamforming and radiation power distribution of plate has been addressed. By adjustment of aperture size of array, the smoothed beamforming power shows radiation power distribution of plate. Numerical simulations are carried for simply supported plate.

Ⅰ. 서 론

빔형성 방법(beamforming method)은 대표적인 어레이 센서를 이용한 소음원 추적 방법으로 수중음향, 지진파 등의 분야에서 평면파 전파 모델을 기본으로 개발되어졌다[1~2]. 또한 근접장의 효과가 크게 나타나는 기계소음에 대한 적용을 위해서 구면파 전파 모델을 기본으로한 빔형성 방법[1~4]이 개발되어 졌으며, 일부 산업현장에서 사용되어지고 있다[5~6]. 그러나, 대부분의 기계소음이 발생하는 저주파수 대역의 경우 어레이 크기(aperture size)의 제한이 불가피 하므로, 빔형성 방법에 의한 소음원 추정 결과는 분해능의 제한에 따른 오차를 포함하게 된다. 따라서 공간상에 연속적으로 존재하는 소음원의 경우, 분해능의 제한은 실제 소음원의 형상을 스므딩(smoothing) 혹은 평균화(averaging)시켜 표현하는 문제점을 갖게 된다.

분해능의 제한에 따른 스므딩 현상은 분해능에 비해 공간상의 위상 및 크기의 변화가 적은 소음원의 경우에는 큰 영향이 없으나, 분해능에 비해 공간상의 위상 및 크기의 변화가 복잡하게 분포된 소음원은 빔형성파워가 상호 상쇄되어 나타나지 않는 결과를 갖게 된다. 분해능의 증가를 위해 MUSIC[3~4]등 기존의 평면파 모델에서 개발된 모델을 기초로한 소음원 추적방법이 개발되었으나, 기계소음의 경우 소음원 사이의 상관관계(coherence)가 크므로 그 적용에 제한이 따른다[7]. 따라서 본 연구에서는 분해능 향상을 위한 노력에 앞서, 이러한 스므딩 현상을 물리적으로 의미있는 소음원의 위치와 연관지어 생각해 보고자 한다.

방사효율[8]면에서 생각해보면, 공기중에서 음파의 파장에 비해 공간상의 위상 및 크기의 변화가 적은 소음원은 방사효율이 높아 원거리에서 의미 있는 소음이라 할 수 있으며, 그 반대의 경우 실제 파워를 원거리까지 방사하지 않으므로 의미 있는 소음원이라 보기 힘들다. 평판의 진동에 의한 음파의 방사의 경우 이러한 현상은 아음속(subsonic) 및 초음속(supersonic) 방사로 정리하여 표현

*한국과학기술원 기계공학과
접수일자 : 1997년 4월 7일

할 수 있다[8]. 따라서 본 연구에서는 구면파를 가정한 빔형성 방법의 분해능을 실제 물리적인 현상에서 일어나는 스므딩 현상과 일치하도록 조정하여 이를 평판의 방사음장의 경우에 적용하여 보고자 한다. 물리적인 스므딩 현상은 음파의 파장을 기준으로 일어나므로 빔형성 파워의 분해능 역시 음파의 파장과 관련지어 생각할 수 있을 것이다.

구면파 모델을 가정한 빔형성 방법의 경우, 분해능은 어레이의 구경 뿐만아니라 소음원과 어레이 사이의 거리 및 각도에 따라 결정될 것이다. 따라서 평면파의 경우에서 처럼 해석적인 표현이 불가능하므로 분해능의 계산은 수치적인 방법을 이용해야 한다. 본 연구에서는 간단한 모의실험 대상으로서 선형 어레이의 경우 어레이 방향으로의 분해능만을 고려하고자 한다. 또한 이를 간단한 평판의 방사음장에 적용하여 빔형성 파워를 구하고 실제 방사되는 음향 파워의 형태와 비교하여 실제 의미있는 소음원의 파악 가능성을 확인하여 보고자 한다.

Ⅱ. 빔형성 방법(Beamforming Method)

빔형성 방법은 어레이를 구성하는 각 마이크로폰에 적절한 가중치와 위상지연을 주어 어레이 마이크로폰이 일정한 방향을 지향하게 하는 방법을 말한다. 소음원 추정시는 지향 방향을 여러 방향으로 변화시켜가며 출력되는 파워가 가장 큰 방향을 찾아내는 방법을 사용한다[1~2].

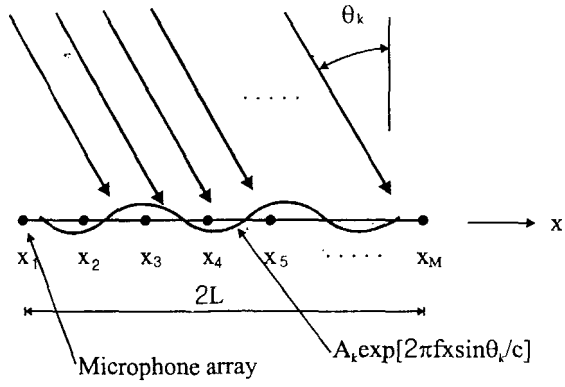


그림 1. 평면파 모델을 이용한 빔형성 방법의 개념도

그림 1과 같이 M개의 마이크로폰으로 구성되어 있는 어레이 마이크로폰에 단일 주파수 f를 가진 K개의 평면파가 입사되고 있는 경우, 마이크로폰 어레이에 수신되는 음압벡터는 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{P}=\left[p_1(f)\quad p_2(f)\quad \cdots\quad p_M(f)\right]^T \tag{1}$$

$$p_m(f)=\sum_{k=1}^{K}A_k\exp\left[2\pi j f x_m \sin\theta_k/c\right] \tag{2}$$

여기서 A_k, θ_k는 각각 k번째 평면파의 복소 크기, 입사각을 의미하며, x_m은 m번째 마이크로폰의 위치 좌표를 나타낸다. 평면파를 가정한 경우, 가중벡터는

$$\mathbf{W}=\left[w_1(f)\quad w_2(f)\quad \cdots\quad w_M(f)\right]^T \tag{3}$$

$$w_m(f)=\frac{1}{\sqrt{M}}\exp\left[2\pi j f x_m \sin\hat{\theta}/c\right] \tag{4}$$

와 같이 가정되는 지향각 $\hat{\theta}$의 함수이며, 이때 빔형성 파워는

$$\mathrm{Power}(\hat{\theta})=\mathbf{W}^H(\hat{\theta})\mathrm{E}\left[\mathbf{P}\mathbf{P}^H\right]\mathbf{W}(\hat{\theta}) \tag{5}$$

로 정의 된다. 만약 실제 음원의 입사각 θ_k와 지향각 $\hat{\theta}$가 일치하는 경우 빔형성 파워는 상대적으로 큰 값을 가지므로 $\hat{\theta}$를 변화시켜가며 빔형성 파워를 계산하여 음원의 위치를 추정할 수 있다.

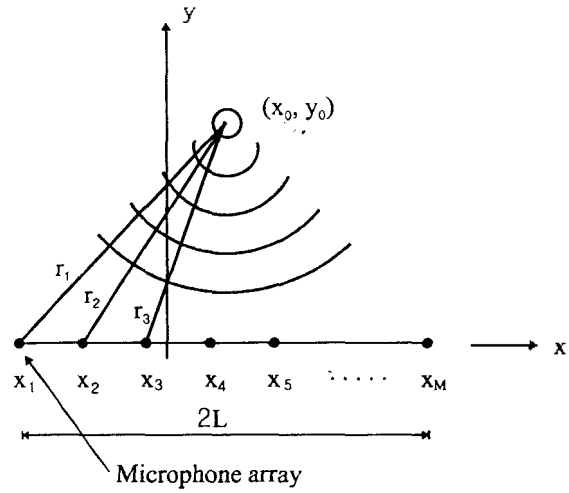


그림 2. 구면파 모델을 이용한 빔형성 방법의 개념도[3].

구면파 모델(그림 2)의 경우, 음원의 추적 방법은 평면파 모델의 경우와 같으며 단지

$$p_m(f)=\sum_{k=1}^{K}A_k\frac{\exp\left[2\pi j f r_{km}/c\right]}{r_{km}} \tag{6}$$

$$w_m(f)=\frac{1}{\sqrt{M}}\frac{\exp\left[2\pi j f \hat{r}_m/c\right]}{\hat{r}_m} \tag{7}$$

와 같이 음압 벡터 및 가중벡터의 차이만이 존재한다. 여기서 r_{km}은 k번째 소음원과 m번째 마이크로폰 사이의 거리를 의미하고, $\hat{r}_m$은 가정되는 음원과 m번째 마이크로폰 사이의 거리를 의미한다. 가중벡터는 $\hat{\mathbf{r}}_m=(\hat{x}_m, \hat{y}_m)$의 함수로서 스캐영역이 평면파의 경우와는 달리 2차원이 된다.

Ⅲ. 빔형성 방법의 분해능

빔형성 방법의 구현에 있어서 나타나는 실제적인 문제점은 어레이의 크기(aperture size)의 제한 및 이산화(discretization)에 의한 오차를 들 수 있다. 측정 범위에 의한 오차를 살펴보기 위해 무한이 많은 측정 지점을 가정하면, 평면파를 가정한 가중치 및 빔형성 파워는 다음과 같다.

$$w(f,x)=\frac{1}{\sqrt{2L}}\exp[2\pi jfx\sin\theta/c] \tag{8}$$

$$\text{Power}(\theta)=\left|\int_{-L}^{L} w^{H}(f,x)p(f,x)dx\right|^{2} \tag{9}$$

또한 여러 방향에서의 소음원을 표현한 식 (2)를 확장하여 모든 방향에 연속적으로 분포하는 소음원을 가정하면, 어레이에 측정되는 음압은

$$p(f,x)=\int_{-\pi/2}^{\pi/2} A(\theta_0)\exp[2\pi jfx\sin\theta_0/c]d\theta_0 \tag{10}$$

과 같이 표현되며 이때 빔형성 파워는 다음과 같다.

$$\text{Power}(\theta)=\left|\int_{-\pi/2}^{\pi/2} A(\theta_0)K_p(\theta,\theta_0)d\theta_0\right|^{2} \tag{11}$$

$$K_p(\theta,\theta_0)=\frac{1}{\sqrt{2L}}\int_{-L}^{L}\exp\left[j\frac{2\pi f}{c}(\sin\theta-\sin\theta_0)x\right]dx$$

$$=\sqrt{2L}\ \frac{\sin(k_x-k_{x0})L}{(k_x-k_{x0})L} \tag{12}$$

여기서 $k_x=2\pi f\sin\theta/c$, $k_{x0}=2\pi f\sin\theta_0/c$를 나타내며, 2L은 어레이의 크기를 나타낸다.

식 (12)로 부터, 빔형성 파워를 통한 소음원의 전파 방향 추정을 실제 전파 방향 $A(\theta_0)$이 커널 $K_p(\theta, \theta_0)$에 의해 스므딩 된 형태임을 알 수 있다. 또한 커널은 잘 알려진 싱크(sinc) 함수의 형태로서 측정 범위 L의 증가 또는 감소에 따라 스므딩의 정도 즉, 분해능이 조정됨을 알 수 있다.

구면파의 경우 마찬가지로 연속적인 측정 지점과 소음원의 분포를 가정할 수 있으므로, 어레이에 측정되는 음압은

$$p(f,x)=\int_{S} A(x_0,y_0)\frac{\exp\left[j\frac{2\pi f}{c}\sqrt{(x_0-x)^2+y_0^2}\right]}{\sqrt{(x_0-x)^2+y_0^2}}dS \tag{13}$$

과 같이 나타낼 수 있으며, 이때 빔형성 파워는 다음식과 같다.

$$\text{Power}(\hat{x}_0,\hat{y}_0)=\left|\int_{S} A(x_0,y_0)K_s(\hat{x}_0,\hat{y}_0;x_0,y_0)dS\right|^{2} \tag{14}$$

$$K_s(\hat{x}_0,\hat{y}_0;x_0,y_0)$$

$$=\int_{-L}^{L}\frac{\exp\left[j\frac{2\pi f}{c}\left\{\sqrt{(\hat{x}_0-x)^2+\hat{y}_0^2}-\sqrt{(x_0-x)^2+y_0^2}\right\}\right]}{\sqrt{(\hat{x}_0-x)^2+\hat{y}_0^2}\sqrt{(x_0-x)^2+y_0^2}}dx \tag{15}$$

평면파를 가정한 빔형성 방법의 경우와 마찬가지로 커널 $K_s(\hat{x}_0, \hat{y}_0; x_0, y_0)$에 의해 실제 소음원의 형태 $A(x_0, y_0)$가 스므딩되고 있는 것을 알 수 있다.

Ⅳ. 구면파 빔형성 방법에 대한 분해능의 수치적 계산

구면파를 가정한 빔형성 방법의 스므딩 효과를 나타낸 식 (15)의 커널은 해석적 해를 얻기 어려운 형태이므로 본 연구에서는 이를 수치적 방법을 통해 계산하고자 한다. 적분 범위 L을 이용해 변수를 $x_0'=x_0/L$, $y_0'=y_0/L$, $\hat{x}_0'=\hat{x}_0/L$, $\hat{y}_0'=\hat{y}_0/L$, $kL=2\pi fL/c$와 같이 무차원화하면 커널은

$$K_s(\hat{x}_0',\hat{y}_0';x_0',y_0')$$

$$=\int_{-1}^{1}\frac{\exp\left[jkL\left\{\sqrt{(\hat{x}_0'-x')^2+\hat{y}_0'^2}-\sqrt{(x_0'-x')^2+y_0'^2}\right\}\right]}{\sqrt{(\hat{x}_0'-x')^2+\hat{y}_0'^2}\sqrt{(x_0'-x')^2+y_0'^2}}dx \tag{16}$$

와 같이 나타낼 수 있으며, 적분 범위내에서 수치 적분이 가능함을 알 수 있다.

그림 3은 식 (16)을 수치적분한 형태를 보여주는 예로서 (a), (b) 모두 소음원의 위치는 $(x_0, y_0)=(0, 0.25)$로 동일하나, 측정범위의 크기가 각각 $kL/2\pi=2$, 4인 경우에 해당한다. 두 경우 모두 어레이가 놓여진 방향(x축 방향)이 직각방향(y축 방향)에 비해 분해능이 훨씬 뛰어남을 알 수 있으며, (a)와 (b)를 비교하여 볼 때 구경의 크기가 증가함에 따라 x, y방향 모두 분해능이 증가하고 있음을 알 수 있다.

분해능의 구체적인 표현은 그림 3에 나타낸 커널의 주엽(main lobe)과 부엽(side lobe)의 크기를 정의하고 이를 주파수 즉, 의 변화에 따라 계산함으로써 가능하다. 또한 이러한 결과로 부터 적절한 분해능을 갖는 어레이의 측정 범위 및 소음원과의 거리 등을 선정할 수 있다. 본 연구에서는 문제를 좀더 단순화하여 그림 4와 같이 소음원으로부터 어레이까지의 거리가 고정된 경우를 가정하여, 어레이 방향(x축 방향)으로의 분해능, 즉 커널의 주엽 크기(main lobe width)를 수치적으로 계산하였다. 이 경우 커널은 그림 5와 같이 $\hat{x}_0'$ 축상에서 표현되므로, 주엽의 크기는 커널의 절대값의 제곱이 1/2로 감소하는 지점을 이용하여 정의하였다.

그림 6은 소음원의 위치가 $\hat{x}_0'=0$인 경우, 커널의 주엽 크기를 소음원과 어레이의 거리, 음파의 파장에 따라 계산한 결과이다. 소음원과 어레이의 거리가 감소함에 따

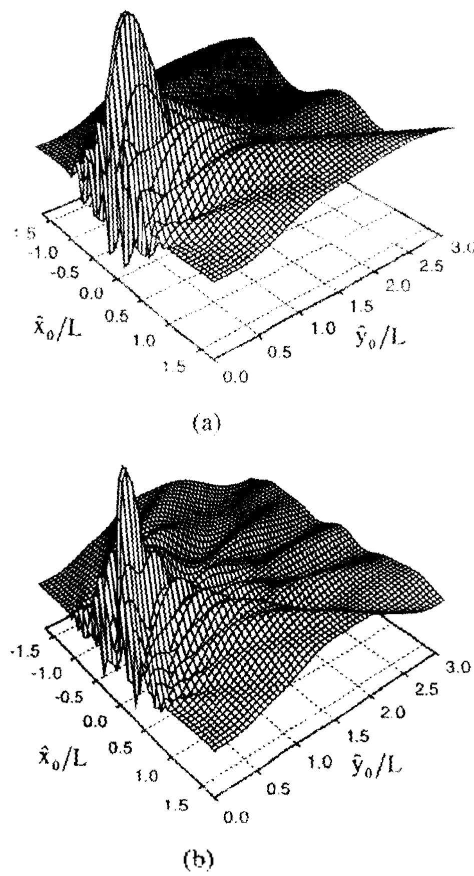


그림 3. 구면파 모델을 가정한 빔형성 방법의 커널(kernel) K, ($\hat{x}_0, \hat{y}_0 | x_0, y_0$). 소음원의 위치는 ($x_0, y_0$) = (0, 0.25)으로 했고, 주파수는 (a) kL/2π=2 (b) kL/2π=4인 경우의 예. 여기서, L은 어레이 길이의 1/2을 나타낸다.

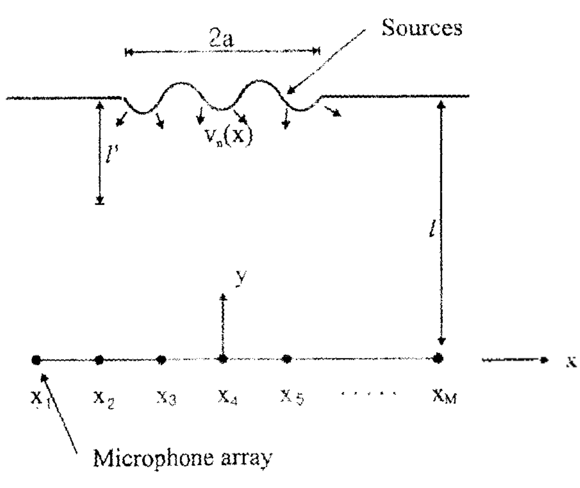


그림 4. 평판의 방사음장에 대한 빔형성 방법의 적용

라 분해능이 증가($2\Delta\hat{x}_0/\lambda$의 감소)하고 있음을 알 수 있다. 또한 소음원과 어레이의 거리가 증가함에 따라, 음파의 파장에 관계 없이 점선으로 표시된 평면파 빔형성 방법의 분해능에 접근하는 것을 알 수 있다. 그림에서 일부 계단 형식의 값을 보이는 것은 수치적 계산에 의한 오차

이다. 또한 그림 7은 소음원의 위치가 어레이 중심에서 벗어남에 따른 [illegible] 방사[illegible] 대칭적인 [illegible] 거동 [illegible] 변화하[illegible] 주엽의 [illegible] 예상했던 [illegible] 알 수 있다.

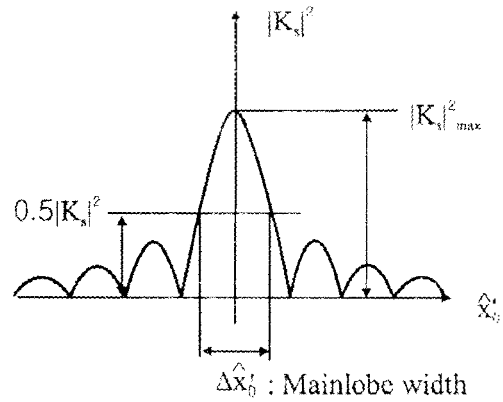


그림 5. 구면파 모델을 가정한 빔형성 방법에서의 어레이 방향의 분해능: 메인로브 폭(main lobe width)

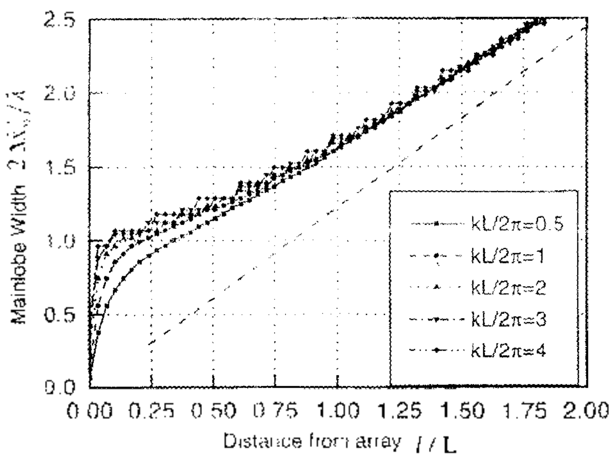


그림 6. 주파수와 소음원-어레이 거리에 따른 구면파 모델을 가정한 빔형성 방법에서의 주엽 크기(mainlobe width). 여기서, L은 어레이 길이의 1/2, [illegible] 거리, λ는 음파의 파장, $\Delta\hat{x}_0$는 메인 주엽의 크기(그림 5)를 나타낸다.

V. 평판에서의 아음속(Subsonic) 및 초음속(Supersonic) 방사

평판에서의 파동은 분산(dispersion) 특성으로 인해 주파수에 따라 파동의 속도가 변화한다. 이때 음속에 비해 파동의 속도가 작은 경우(평판에 발생하는 파동의 파장이 음파의 파장에 비해 작은 경우)를 아음속이라 하며, 반

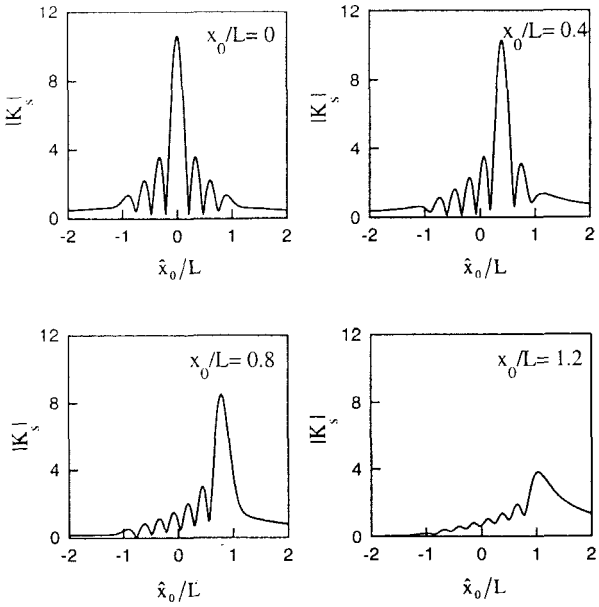


그림 7. 소음원의 위치가 어레이의 중심에서 벗어남에 따른 커널의 변화. 여기서, L은 어레이 구경의 1/2를 나타낸다.

대의 경우를 초음속이라 한다[8]. 아음속의 경우 공기중으로 방사되는 음은 거리에 따라 지수적으로 감소하게 되어 멀리 떨어진 곳까지 전파하지 않으므로, 소음원으로 부터 멀리 떨어진 곳에서는 초음속 소음원만이 의미를 갖게 된다.

그림 4와 같이 표면에서 속도 $v_n(x)$를 갖는 유한한 크기(size)의 평판의 경우 평판으로 부터 거리 l'만큼 떨어진 위치에서의 음압은 다음과 같다[8].

$$p(f,x)\Big|_{y=l-l'} = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\tilde{V}(k_x)\frac{\omega\rho_0\exp\left[j\{k_x x - k_y(l-l')\}\right]}{k_y}dk_x \quad (17)$$

$$\tilde{V}(k_x) = \int_{-y_2}^{y_2} v_n(x)\exp[-jk_x x]dx \quad (18)$$

$$k_y = \begin{cases}\sqrt{k^2-k_x^2}, & \text{if} \quad k^2 > k_x^2\\ j\sqrt{k^2-k_x^2}, & \text{if} \quad k^2 < k_x^2\end{cases} \quad (19)$$

여기서 $\tilde{V}(k_x)$는 평판에 나타나는 파수 성분의 크기로 이 중 초음속 성분($k^2 > k_x^2$)은 멀리까지 방사되며, 아음속 성분($k^2 > k_x^2$)은 k_y가 허수가 되므로 거리에 따라 지수적으로 감소함을 알 수 있다.

양끝단이 단순 지지(simply supported)되어 있는 평판의 경우를 고려하여 평판에서의 속도 분포를

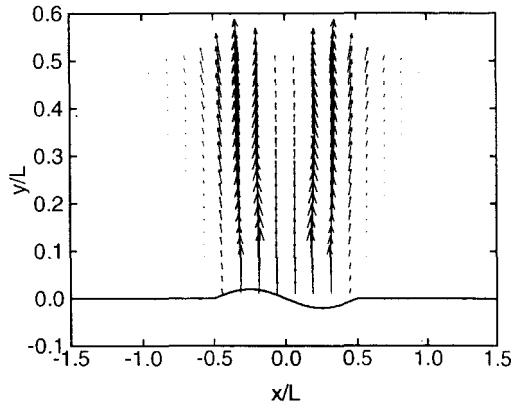
$$v_n(x) = \begin{cases}\tilde{v}_p\sin\left\{\frac{p\pi}{a}\left(x+\frac{a}{2}\right)\right\}, & \text{if} \quad |x| < a/2\\ 0, & \text{if} \quad |x| \geq a/2\end{cases} \quad (20)$$

라 하면, 파수 성분은

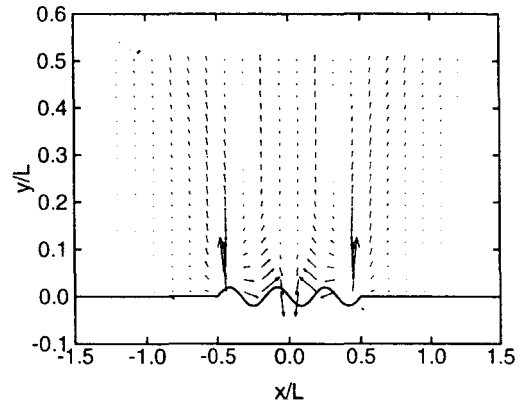
$$\tilde{V}(k_x) = \tilde{v}_p\left(\frac{p\pi}{a}\right)\frac{(-1)^p\exp\left(-j\frac{kxa}{2}\right)-\exp\left(j\frac{kxa}{2}\right)}{k_x^2-\left(\frac{p\pi}{a}\right)^2} \quad (21)$$

과 같이 표현된다[8]. 식 (21)의 분모항의 형태로 부터 파수 성분은 $k_x = p\pi/a$ 근처에 집중됨을 알 수 있으며, 모우드수 p에 따라, 주성분이 아음속과 초음속으로 구별됨을 알 수 있다.

그림 8(a)~(b)는 $ka/2\pi = 4$, $a/L = 0.5$이며, 모우드수가 각각 p=2, 6로 초음속 및 아음속에 해당하는 경우에 방사되는 음장의 인텐시티 분포를 나타낸 것이다. 평판의 파장이 음파의 파장에 비해 긴 초음속의 경우(a)는 본래 소음원의 형태를 유지하며 음이 전파되고 있음을 보여주나, 평판의 파장이 음파의 파장에 비해 작은 아음속의 경우(b)는 주로 양 끝단에서만 음향 파워가 방사됨을 알 수



(a)



(b)

그림 8. 양 끝이 단순 지지단(simply surpported end)인 평판에서 방사되는 음장의 인텐시티 분포; 소음원의 크기는 인 $ka/2\pi = 4$인 경우로서, (a)는 평판의 모우드수가 p=2로 초음속 방사에 해당하며 (b)는 p=6로 아음속 방사에 해당한다.

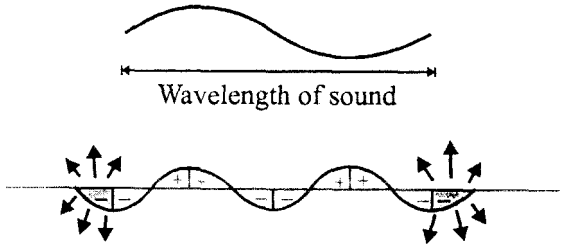
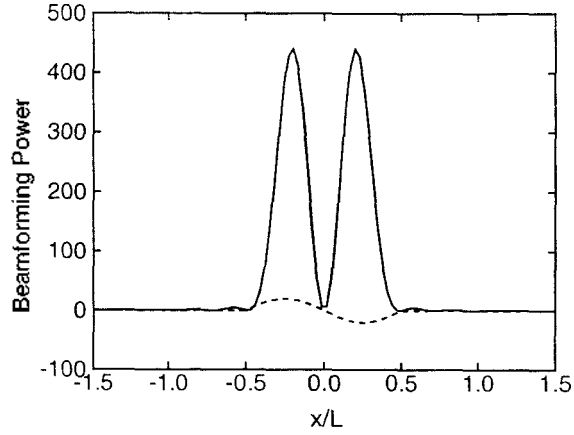


그림 9. 아음속 방사에서 소음원의 상호 상쇄[8]



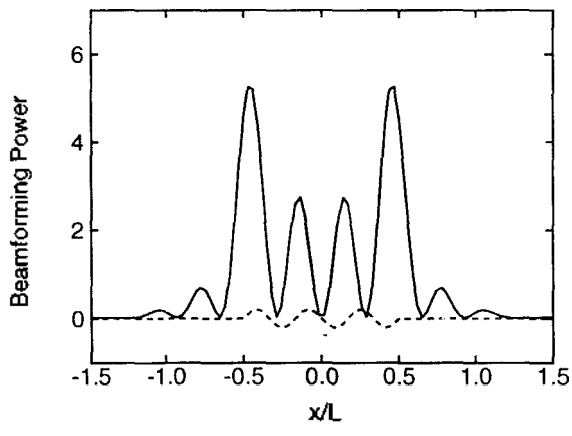


그림 10. 양 끝이 단순 지지단(simply surpported end)인 평판에서 방사되는 음장에 빔형성 방법을 적용한 경우 얻어지는 빔형성 파워; 어레이 및 소음원의 크기는 각각 $kL/2\pi = 2$, $ka/2\pi = 4$인 경우, (a)는 평판의 모우드수가 $p=2$로 초음속 방사에 해당하며 (b)는 $p=6$로 아음속 방사에 해당한다.

있다. 이는 그림 9에 표현된 것과 같이 음파의 반파장내에서 변화되는 소음원의 위상이 상호 상쇄 혹은 스므딩되어, 양 끝단에서의 음압 성분만이 남게되는 형태로 생각해 볼 수 있다[8].

Ⅵ. 모의 실험; 평판의 방사음장에 대한 빔형성 방법의 적용

위 5절에서 살펴본 아음속 방사에서 나타난 소음원의 상쇄 혹은 스므딩 현상은 3절에서 살펴본 빔형성 방법에서의 낮은 분해능에 의한 스므딩 현상과 유사한 형태임을 알 수 있다. 또한 그림 9에 설명된 바와 같이 평판의 아음속 방사의 경우 음파의 반파장을 기준으로 스므딩이 일어나므로, 본 연구에서는 빔형성 방법의 분해능을 음파의 반파장으로 조정하여 그림 4의 평판의 방사음장에 적용하였다. 분해능의 조정은 앞 4절에서 계산된 수치적 계산 결과(그림 6)을 이용하였다.

인텐서티 분포를 살펴본 경우와 마찬가지로 $ka/2\pi = 4$이며 평판의 모우드수가 각각 $p=2$, 6으로 초음속 및 아음속 방사인 경우에 대하여 빔형성 방법을 적용하였다. 평판의 길이와 측정 범위의 비는 $a/L = 0.5$로 하여, 소음원이 어레이의 중심에서 크게 벗어나지 않도록 하였다. 이 경우 $kL/2\pi = 2$이며, 그림 6으로 부터 l/L가 0.2일때 분해능과 음파의 반파장이 같아지는 것을 알 수 있다. 그림 10(a)~(b)는 각각 초음속 및 아음속 방사의 경우 빔형성 파워를 나타낸 것이다. 그림 8(a)~(b) 의 인텐서티 분포와 비교해 볼때, 두 경우 모두 실제 파워가 방사되고 있는 위치를 비교적 잘 표현하고 있음을 알 수 있다.

Ⅶ. 결 론

본 연구에서는 빔형성 방법의 분해능의 제한에 따른 스므딩 현상을 살펴보기 위하여 공간상에 연속적으로 분포하는 소음원에 의한 빔형성 파워를 해석적으로 유도하였다. 이로부터 실제 소음원의 형태를 스므딩하는 커널을 파악할 수 있었으며, 어레이 방향에 제한하여 커널의 주엽 크기를 수치적으로 계산할 수 있었다. 또한 평판에서의 아음속 및 초음속 방사에서 일어나는 스므딩 현상을 고찰하여 이를 빔형성 방법에서의 스므딩 현상과 연관지을 수 있었다. 어레이 방향만의 빔형성 방법을 고려할 때, 커널의 주엽 크기를 음파의 반파장으로 조정하면 빔형성 파워의 형태는 실제 평판에서의 물리적인 스므딩에 의한 방사 파워의 형태와 같아짐을 알 수 있었다. 수치적인 확인을 위해, 단순 지지된 평판의 진동에 의한 음장에서 인텐시티 분포와 빔형성 파워를 비교하였다. 아음속 및 초음속의 경우 모두 음향 방사 파워의 분포와 빔형성 파워의 분포가 잘 일치함을 알 수 있었다.

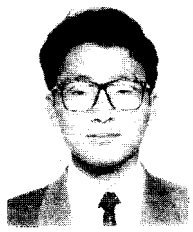
본 연구에서는 어레이 방향으로의 주사(scanning)만이 가능한 단순한 빔형성 방법의 경우에 대한 예제를 다루었다. 또한, 소음원의 형태도 비교적 단순한 평판 모델을 사용하였다. 이는 식 (15)에 표현된 구면파를 가정한 빔형성 방법의 커널의 주엽 및 부엽의 크기를 묘사하는 일반적인 해석적 표현 혹은 단순한 형태의 수치적 자료로의 표현이 어렵기 때문이다. 따라서 앞으로 식 (15)의 커널에

대한 단순화 혹은 근사화를 위한 연구가 필요하며, 이로 노해 적용범위의 확대가 가능할 것이다.

참 고 문 헌

1. D. H. Johnson and D. E. Dudgeon, *Array signal processing*, Prentice-Hall, Englewood cliffs, 1993
2. S. U. Pillai, Array signal processing, Springer-Verlag, New York, 1989.
3. J. -W. Choi and Y. -H. Kim, "Spherical beam-forming and MUSIC methods for estimation of location and strength of spherical sound sources," Journal of Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.9, No.5, pp. 569-588, 1995.
4. J. -W. Choi and Y. -H. Kim, "Estimation of locations and strengths of broadband planar and spherical noise sources using coherent signal subspace," Journal of Acoustical Society of America, Vol.98, No.4, pp.2082-2093.
5. Y. Moritoh, Y. Zenda and K. Nagakura, "Noise control of high speed shinkansen," Journal of Sound and Vibraiton, Vol. 193, No. 1, pp. 319-334, 1996.
6. B. Barsikow, "Experiences with various configurations of microphone arrays used to locate sound sources on railway trains operated by the DB AG," Journal of Sound and Vibration, Vol. 193, No. 1, pp. 283-293, 1996.
7. 김시곤, 김양한, "독립/비독립 음원이 동시에 존재할 경우 선형 마이크로폰 어레이를 이용한 소음원 탐지 방법," 한국소음진동공학회지, 제6권6호, pp. 835-842, 1996.
8. F. Fahy, *Sound and structural vibration*, Academic Press, London, pp. 64, 60-89, 1985.

▲김 영 기(Young-Key Kim) 1972년 4월 22일생



1993년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학사)

1995년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학사)

1995년 3월~현재 : 한국과학기술원 기계공학과 박사과정

▲김 양 한(Yang-Hann Kim) 1950년 8월 21일생

현재 : 한국과학기술원 기계공학과 교수

(1988년 제7권 5호 참조)