

〈論 文〉

# 차량소음의 등가소음높이 측정을 위한 마이크로폰 배열 설계

Microphone Array Design for Measurement of the Equivalent Source Height  
of Vehicle Noise

윤 종 락\* · 배 민 자\*\*

Yoon, Jong-Rak and Bae, Min-Ja

〈1995년 1월 31일 접수 ; 1995년 5월 29일 심사완료〉

**Key Words :** Microphone Array (마이크로폰배열), Equivalent Source Height (등가소음높이), Microphone Array Spacing (마이크로폰배열간격), Vehicle Noise Source (차량소음원), Vehicle Noise Source Height (차량소음높이)

## ABSTRACT

Microphone array is designed to measure the equivalent source height of vehicle noise. The equivalent source position is defined for an arbitrary distribution of acoustic sources above a perfectly reflecting plane and a microphone array for its measurement is developed. The normalized errors of the measured equivalent source heights are defined including the effects of background noise, the geometric near field, and source size. Normalized errors of the measured source heights obtained by a numerical simulation for each parameter lead to optimization of the microphone spacing and to the design of an array which gives the equivalent source height as a function of frequency. The performance of the designed array is verified using the stationary loudspeaker experiments.

## 1. 서 론

차량소음을 억제하기 위해서는 일차적으로 차량소음원의 기계적 구성품의 소음 특성을 규명하여 저소음 구성품을 설계해야 하지만 이차적으로는 방음벽을 설치하여 외부환경과 소음원을 격리하여야 한다. 이러한 방음벽의 설계시 고려해야 할 요소중 하나는 차량소음의 지면으로부터의 높이로 방음벽의 소음차단 효과 최적화 및 건설비용을 줄이기 위해서는

차량 소음원 높이 규명이 선행되어야 한다.

현재 사용되고 있는 차량 소음높이에 대한 방음벽 설계 기준자료를 예로들면, 대형트럭, 중형트럭, 승용차에 대한 소음높이를 2.44 m, 0.7 m, 0.0 m로 적용하여 각각에 대한 방음벽 높이는 약 4.0 m, 3.3 m 및 2.1 m로 설계하고 있다<sup>(1)</sup>.

그러나 이들 자료는 경험에 의한 것으로 타이어, 엔진, 연통 등이 저소음 부품으로 구성된 오늘날의 차량에 대해서도 동일하게 적용될 수는 없을 것이다. 또한 방음벽의 차단손실은 소음의 주파수 특성에 좌우되므로 주파수별 차단손실을 예측하기 위해서는 주파수별 소음높이가 규명되어야 할 것이다.

'70년도 중반이후 영국 등 유럽에서는 마이크로폰

\*정회원, 부산수산대학교 정보통신공학과

\*\*부산수산대학교 전자공학과

배열 기술을 이용한 항공기 엔진의 각 부분별 소음 특성이나 공장 기계소음 특성에 대한 연구<sup>(2~11)</sup>가 수행되었다. 차량에 대한 이러한 기술의 적용에는 정지상태의 트럭에서 나오는 소음원의 수평적 분포를 측정하는 연구<sup>(12)</sup>가 있으나 이는 방음벽 설계를 위한 트럭 소음의 수직소음 높이에 대한 자료는 제공하지 못한다. 또한 Glegg 등<sup>(13,14)</sup>은 차량소음의 수직높이 측정을 위한 마이크로폰배열을 설계하여 실제 차량에 적용하였으나 배열간격의 결정과파라미터로 배경잡음만을 고려하여 배열간격에 대한 설계기준이 미흡하다. 이와 더불어 주행중인 자동차의 동적 음향 특성을 보다 정확히 얻기 위해 Mouche<sup>(15)</sup>와 윤<sup>(16)</sup>은 도플러 제거 기법의 하나인 디지털 필터링 방법을 수신 신호처리에 적용하였다.

본 연구에서는 차량소음의 등가소음 높이를 정의하고, 등가소음 높이 측정을 위한 마이크로폰 배열의 설계 기준을 측정환경의 배경잡음에 대한 소음원의 S/N 비, 근거리 음장효과 및 분포소음원의 크기에 대한 함수로 제시하였다. 아울러 스피커를 이용한 실험으로 설계된 배열의 성능을 검증하였다.

## 2. 소음원 높이 측정을 위한 이론

### 2.1 이론적 배경

차량 등의 소음원은 타이어, 연통, 엔진 및 차체 등에 소음원이 분포되어 있어 차량소음의 음장특성을 이론적으로 구하는 것은 불가능하다. 이러한 분포소음원의 음장특성은 마이크로폰 배열을 이용하여 구할 수 있으며 마이크로폰 배열처리의 이론은 Fig.

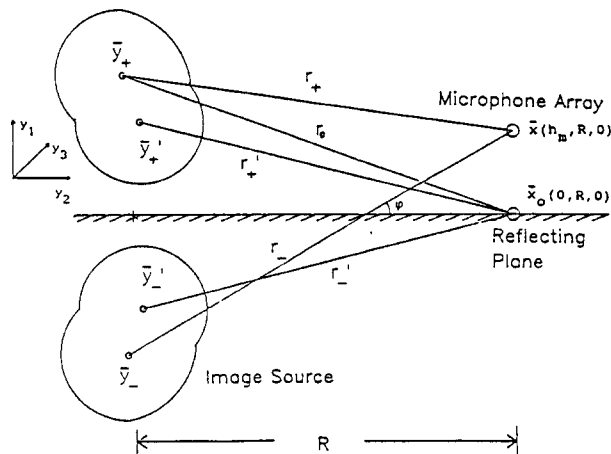


Fig. 1 Diagram showing propagation paths from a source and its image to a microphone array above a reflecting plane.

1과 같이 두 개의 마이크로폰, 소음원, 소음원의 지면에 대한 영상(image) 및 좌표계를 참조하여 유도된다. 지면이 완전반사체로 가정할 수 있는 경우(콘크리트, 아스팔트인 경우에 해당)  $\bar{x}_m(h_m, R, 0)$  위치에 있는 마이크로폰에서 수신되는 음압은 다음식으로 주어진다.

$$P(\bar{x}_m, t) = \int \left( \frac{1}{r_+} q(\bar{y}_+, t - \frac{r_+}{c_0}) d\bar{y}_+ + \frac{1}{r_-} q(\bar{y}_-, t - \frac{r_-}{c_0}) d\bar{y}_- \right) \quad (1)$$

여기서

- $q(\bar{y}, t)$  : 소음원의 세기밀도
- $\bar{y}_\pm$  : 소음원 및 영상 소음원의 위치
- $\bar{r}_\pm$  : Vector  $|\bar{x} - \bar{y}_\pm|$ 의 크기
- $c_0$  : 음속

지표면  $\bar{x}_0(0, R, 0)$ 에 위치한 마이크로폰과  $\bar{x}_m$ 에 위치한 마이크로폰과의 상호 스펙트럼밀도(cross spectral density)의 기대치를  $C_m$ 으로 정의하면

$$C_m = \frac{\pi}{T} Ex(P_T(\bar{x}_0, \omega) P_T^*(\bar{x}_m, \omega)) \quad (2)$$

여기서,

$$P_T(\bar{x}_m, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-T}^T P(\bar{x}_m, t) e^{-i\omega t} dt \quad (3)$$

- $P_T^*(\bar{x}_m, \omega)$  :  $P_T(\bar{x}_m, \omega)$ 의 복소공액
- $Ex( )$  : ( )의 기대치
- $T$  : 분석 시간

식 (1)을 식 (3)식에 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned} P_T(\bar{x}_m, \omega) &= \int \frac{1}{2\pi} \int_{-T-\frac{r_+}{c_0}}^{T-\frac{r_+}{c_0}} q(\bar{y}_+, \tau_+) e^{-i\omega\tau_+} \cdot d\tau_+ \frac{e^{-ikr_+}}{r_+} dy_+ \\ &+ \int \frac{1}{2\pi} \int_{-T-\frac{r_-}{c_0}}^{T-\frac{r_-}{c_0}} q(\bar{y}_-, \tau_-) e^{-i\omega\tau_-} \cdot d\tau_- \frac{e^{-ikr_-}}{r_-} dy_- \\ &= \int Q_{T+}(\bar{y}_+, \omega) e^{-ikr_+} dy_+ \\ &+ \int Q_{T-}(\bar{y}_-, \omega) e^{-ikr_-} dy_- \end{aligned}$$

여기서,

$$\tau_+ = t - \frac{r_+}{c_0}, \quad \tau_- = t - \frac{r_-}{c_0}, \quad k = \frac{\omega}{c_0}$$

$$Q_{T\pm}(\bar{y}_\pm, \omega) = \int_{-T-\frac{r_\pm}{c_0}}^{T-\frac{r_\pm}{c_0}} Q(\bar{y}_\pm, \tau_\pm) e^{-i\omega\tau_\pm} d\tau_\pm$$

원신호와 영상신호의 관계는  $q(\bar{y}_+, \tau) = q(\bar{y}_-,$

$r$ )이며 또한  $T \gg \frac{r_{\pm}}{c_0}$ 이면  $Q_{T+}(\bar{y}_+, \omega) \approx \int Q_{T-}(\bar{y}_-, \omega)$

$\omega$ )이므로

$$P_T(\bar{x}_m, \omega) \approx \int Q_{T+} \left( \frac{e^{-ikr_+}}{r_+} + \frac{e^{-ikr_-}}{r_-} \right) d\bar{y}_+ \quad (4)$$

따라서 상호 스펙트럼밀도의 기대치에 대한 식 (2)는 다음과 같이 주어진다.

$$C_m \approx \frac{\pi}{T} Ex \left( \int (Q_{T+}(\bar{y}_+', \omega) \frac{e^{-ikr_+'}}{r_+'} + Q_{T-}(\bar{y}_-', \omega) \frac{e^{-ikr_-'}}{r_-'}) d\bar{y}_+' \cdot \int (Q_{T+}^*(\bar{y}_+, \omega) \frac{e^{ikr_+}}{r_+} + Q_{T-}^*(\bar{y}_-, \omega) \frac{e^{ikr_-}}{r_-}) d\bar{y}_+ \right)$$

여기서  $r_{\pm}' = |\bar{x}_0 - \bar{y}_{\pm}'|$ 이다. 소음원의 구동특성이 확률적으로 정적(stationary)이고 ergodic하며, 서로 다른 위치에 있는 단위 소음들간의 수신 시간차가  $T$ 에 대해 무시할 수 있을 경우에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$Ex(Q_{T-} Q_{T+}^*) = Ex(Q_{T-} Q_{T-}^*) = Ex(Q_{T+} Q_{T+}^*)$$

따라서,

$$C_m \approx \iint \frac{\pi}{T} Ex(Q_{T+}(\bar{y}_+', \omega) Q_{T+}^*(\bar{y}_+, \omega)) \cdot \left( \frac{e^{-ikr_+'}}{r_+'} + \frac{e^{-ikr_-'}}{r_-'} \right) \cdot \left( \frac{e^{ikr_+}}{r_+} + \frac{e^{ikr_-}}{r_-} \right) \cdot d\bar{y}_+ d\bar{y}_+'$$

또한 기준점  $\bar{x}_0$ 는 지표면에 위치하므로  $r_+' = r_-' = r'$ 이다. 그러므로

$$C_m \approx 2 \iint Q(\bar{y}_+, \bar{y}_+', \omega) \frac{e^{-ikr'}}{r'} \left( \frac{e^{ikr_+}}{r_+} + \frac{e^{ikr_-}}{r_-} \right) \cdot d\bar{y}_+ d\bar{y}_+' \quad (5)$$

여기서  $Q(\bar{y}_+, \bar{y}_+', \omega) = \frac{\pi}{T} Ex(Q_{T+}(\bar{y}_+, \omega) Q_{T+}^*(\bar{y}_+', \omega))$ 는 분포소음원 자체의 상호 스펙트럼밀도의 기대치이고 식 (5)는 원거리 음장에서 지표면  $\bar{x}(0, R, 0)$ 에 위치한 기준마이크로폰과  $\bar{x}_m(h_m, R, 0)$ 에 위치한 마이크로폰과의 상호 스펙트럼밀도 기대치가 분포 소음원 자체의 상호 스펙트럼밀도 기대치와 거리에 대한 변수들로 표현됨을 보인다. 분포 소음원과 기준 마이크로폰간의 음파전파경로  $r_0 = |\bar{x}_0 - \bar{y}_+|$ 이므로 식 (5)는 다음 식으로도 표현될 수 있다.

$$C_m \approx 2 \int Q_e(\bar{y}_+, \omega) \left( \frac{e^{ik(r_+-r_0)}}{r_+r_0} + \frac{e^{ik(r_--r_0)}}{r_-r_0} \right) d\bar{y}_+ = \int Q_e(\bar{y}_+, \omega) G(\bar{y}, \bar{x}_m) d\bar{y}_+ \quad (6)$$

여기서

$$Q_e(\bar{y}_+, \omega) = Q(\bar{y}_+, \bar{y}_+', \omega) \frac{r_0}{r_+'} (e^{-ik(r_+-r_0)} + e^{-ik(r_--r_0)}) d\bar{y}_+' \\ G(\bar{y}, \bar{x}_m) = 2 \left( \frac{e^{ik(r_+-r_0)}}{r_+r_0} + \frac{e^{ik(r_--r_0)}}{r_-r_0} \right)$$

$Q_e(\bar{y}_+, \omega)$ 는 분포 소음원의 위치벡터  $\bar{y}$ 에 좌우되고 또한 기준점  $\bar{x}_0$ 에서 측정된  $\bar{y}_+$  위치의 등가 소음 세기로 정의되며 식 (6)의 적분은  $\bar{y}_+$ 에 위치한 소음원과 다른 위치에 있는 소음원들간의 상관효과를 의미한다.

## 2.2 등가 소음원 위치 정의 및 측정모델

원거리음장의 상호스펙트럼밀도의 기대치  $C_m$ 으로 정의되는 식 (6)에서  $G(\bar{y}, \bar{x}_m)$ 를 기준점  $\bar{y}_0$ (좌표 기준점)에 대해 Taylor 급수로 전개하고 차량소음이 지면에 대해 수직으로 분포하는  $y_1$  성분만 고려하면 식 (6)은 다음과 같이 주어진다.

$$C_m = G(\bar{y}_0, \bar{x}_m) \int Q_e(\bar{y}_+, \omega) d\bar{y}_+ + \frac{\partial G(\bar{y}_0, \bar{x}_m)}{\partial y_1} \int y_1 Q_e(\bar{y}_+, \omega) d\bar{y}_+ + \frac{\partial^2 G(\bar{y}_0, \bar{x}_m)}{\partial y_1^2} \int y_1^2 Q_e(\bar{y}_+, \omega) d\bar{y}_+ + \dots = \bar{Q}_T \left( G(\bar{y}_0, \bar{x}_m) + \frac{1}{2} \mu^{(2)} \frac{\partial^2 G(\bar{y}_0, \bar{x}_m)}{\partial y_1^2} + \dots \right) \quad (7)$$

여기서,

$$\bar{Q}_T = \int Q_e(\bar{y}_+, \omega) d\bar{y}_+ \\ \mu^{(n)} = \int y_1^n Q_e(\bar{y}_+, \omega) \frac{d\bar{y}_+}{\bar{Q}_T}$$

로  $\bar{Q}_T$ 는 기준 마이크로폰에 측정되는 소음원의 총 세기로 정의되고  $\mu^{(n)}$ 은  $n$ 차 모멘트이며 지면이 완전 반사인 경우 홀수차 모멘트는 영으로 식 (7)은 짝수 차 모멘트만으로 주어진다. 또한 식 (7)에서  $Q_e(\bar{y}_+, \omega)$ 는 일반적으로 복소수이므로 각 모멘트들도 복소수 값이다.

원거리음장 ( $kr \gg 1$ )에서 식 (7)에 대한 미분성분을 Fig. 1에 대한 변수값으로 표시하면 다음과 같다<sup>(13)</sup>.

$$C_m = \bar{Q}_T G(\bar{y}_0, \bar{x}_m) \left( 1 - \frac{1}{2} k^2 \mu^{(2)} \left( \frac{h_m}{r} \right) + \dots \right) \quad (8)$$

식 (8)은 원거리음장에서 상호스펙트럼밀도의 기대치는 분포소음원 자체의 모멘트 결합으로 주어지고 또한 동일한 모멘트 특성을 가질 경우에는 분포소음원의 원거리음장 특성이 같음을 보인다.

등가소음원을 소음세기가  $\bar{Q}_r$ 이고 원거리 음장특성이 식 (8)로 나타낸 분포소음원의 음장 특성과 같은 점음원으로 정의하면 등가점음원의 위치  $\bar{z}(y_e, 0, 0)$ 에 대한 상호스펙트럼 밀도 기대치  $\bar{C}_m$ 은 식 (8)과 같은 형태로 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \bar{C}_m &= \bar{Q}_r G(\bar{y}_0 + \bar{z}, \bar{x}_m) \\ &= \bar{Q}_r G(\bar{y}_0, \bar{x}_m) \left( 1 - \frac{1}{2} k^2 y_e^2 \left( \frac{h_m}{r} \right) + \dots \right) \\ &= \bar{Q}_r G(\bar{y}_0, \bar{x}_m) \cos \left( k y_e \frac{h_m}{r} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

식 (8)과 식 (9)를 비교하여 분포소음원의 등가점소음원 위치  $y_e$ 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$y_e = \sqrt{Re(\mu^{(2)})} \quad (10)$$

따라서 지표면이 완전반사면으로 가정되는 경우 식 (8)과 (9)로부터 등가점소음원의 위치 측정모델은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \frac{C_m}{C_0} &\cong \frac{\bar{C}_m}{\bar{C}_0} = \frac{G(\bar{y}_0, \bar{x}_m)}{G(\bar{y}_0, \bar{x}_0)} \cos \left( k y_e \frac{h_m}{r} \right) \\ \cos \left( k y_e \frac{h_m}{r} \right) &\cong \frac{C_m G(\bar{y}_m, \bar{x}_0)}{C_0 G(\bar{y}_0, \bar{x}_m)} = D_m \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)의 우변은 일반적으로 복소수 값이나, 분포소음원들간의 상호 상관이 없는 경우는 실수값으로 주어진다. 따라서 등가점소음원 위치는 식 (11)로부터 다음식과 같이 구해진다.

$$y_e = \frac{\cos^{-1} D_m}{k \frac{h_m}{r}} \quad (12)$$

식 (11)과 식 (12)에서 측정모델의  $D_m$ 은 기준마이크로폰과  $h_m$ 높이에 위치한 마이크로폰과의 주파수 응답함수  $H_m = \frac{C_m}{C_0}$ 과 함수  $G(\ )$ 를 포함하고 있어 등가 점소음원 위치  $y_e$ 의 측정오차는 주파수 응답함수의 특성과 함수  $G(\ )$ 의 특성에 좌우된다. 2.3절에서는 이들 함수의 특성을 좌우하는 배경잡음, 기하학적 근거리음장 및 분포소음원의 분포크기에 의한 측정오차 특성을 평가한다.

### 2.3 등가점소음원 위치 측정의 오차해석

식 (11)은 주기함수이므로 식 (12)를 이용하여 등가점소음원 위치  $y_e$ 를 구하기 위해서는  $k y_e h_m / r (= \cos^{-1} D_m) \leq |\pm \pi|$  조건을 만족해야 한다. 즉 고주파

수 음원이나 지표면으로부터 높은 위치에 있는 음원에 대해서는 상기의  $k y_e h_m / r \leq |\pm \pi|$  조건을 만족하도록 마이크로폰의 간격을 좁히거나 소음원과 마이크로폰 배열과의 거리  $r$ 을 크게 해야한다. 실제측정에서 측정대상 소음원의 가능한 최대 높이와 소음원과 배열간의 거리가 고정되어 있다고 가정하면 좁은 간격의 마이크로폰 배열이 넓은 간격의 마이크로폰 배열보다 측정가능주파수 범위가 크게될 것이다. 그러나 실제의 측정에서는 배경잡음, 기하학적 근거리음장효과 및 소음원의 분포크기에 의해 배열간격에 대한 측정가능한 주파수범위가 결정된다.

#### (1) 배경잡음효과

배경잡음의 파워스펙트럼 밀도를  $G_{in}$ 이라 하면 분포소음원들과 배경잡음이 무상관일 경우 등가점소음원 모델은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} D_m' &= \frac{C_m}{C_0 + G_{in}} \frac{G(\bar{y}_0, \bar{x}_0)}{G(\bar{y}_0, \bar{x}_m)} \\ &= \frac{C_m G(\bar{y}_0, \bar{x}_0)}{C_0 G(\bar{y}_0, \bar{x}_m)} \frac{C_0}{C_0 + G_{in}} \\ &= D_m \epsilon \\ &= \cos \left( k y_e' \frac{h_m}{r} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서,  $\epsilon = \frac{C_0}{C_0 + G_{in}}$ 는 배경잡음에 의한  $D_m$ 의 측정오차로 정의되고  $y_e'$ 는 배경잡음이 존재할 때 등가점소음원의 위치이다. 따라서 등가점소음원 위치의 정규화오차  $N_e$ 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

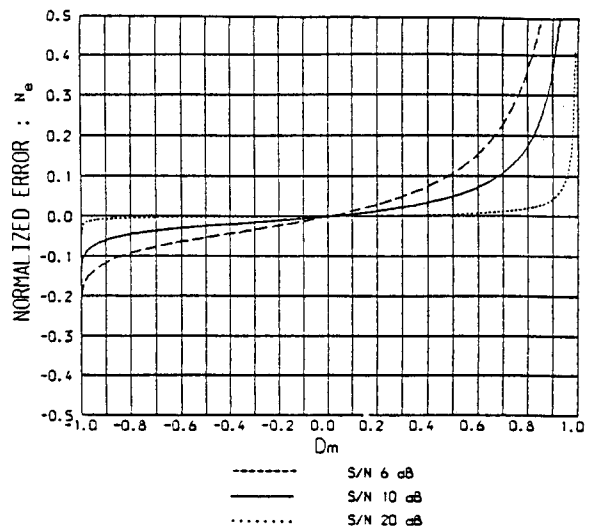


Fig. 2 Normalized error of the measured source height versus  $D_m$  for the different values of the signal to noise ratio (S/N).

$$N_e = \frac{y_e' - y_e}{y_e} = \frac{\cos^{-1}(D_m \epsilon) - \cos^{-1}(D_m)}{\cos^{-1}(D_m)} \quad (14)$$

Fig. 2는 신호대잡음비  $S/N = 10 \log_{10}(C_0/G_{in})$ 에 따른 정규화오차 특성으로  $|D_m|$ 이 1에 접근함에 따라서 정규화 오차는 단조증가하고  $S/N$ 이 10 dB 상인 경우 15% 이하의 정규화 오차를 가정하면  $|D_m|$ 은 약 0.75 이하이어야 한다. 그러나 식 (13)에서 보는 바와 같이  $S/N$ 에 대한 오차  $\epsilon$ 이 동일하더라도 주파수 및 마이크로폰배열 간격  $h_m$ 에 따라 등가점소음원 측정치는 다르게 된다.

Fig. 3은 배열간격 35 cm 및 160 cm,  $S/N$ 은 10

dB, 점소음원의 높이는 84 cm, 소음원과 배열의 수평거리는 7.6 m인 경우의  $D_m$ ,  $D_m'$  및 측정소음원 높이에 대한 수치시뮬레이션 결과이다. 동일한  $S/N$ 에서 배열간격에 따라 측정가능한 주파수범위가 좌우되고 저주파수의 소음높이를 측정하기 위해서는 배열간격이 넓어야함을 보인다.

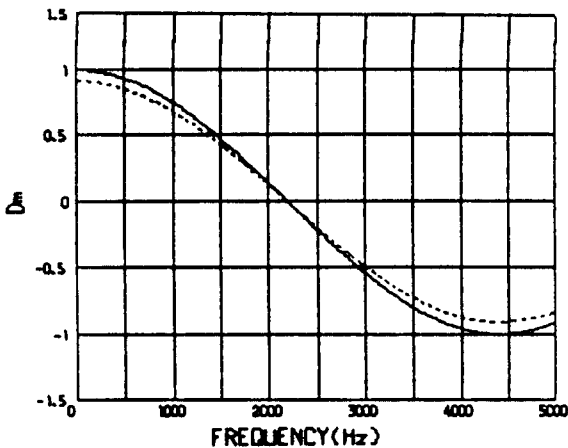
(2) 기하학적 근거리음장효과

식 (8)은 기하학적 원거리음장을 가정하여 유도한 것이다. 즉

$$(r_+ r_0)^{-1} \cong (r_- r_0)^{-1} \cong (rR)^{-1} \quad (15)$$

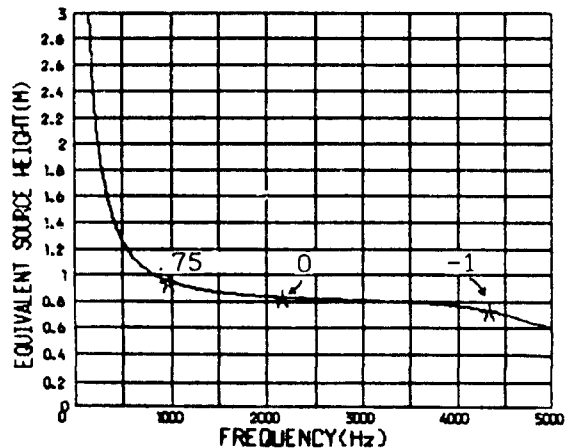
여기서,

$$r_{\pm} = \sqrt{(y_e \mp h_m)^2 + R^2}, \quad r_0 = \sqrt{y_e^2 + R^2},$$

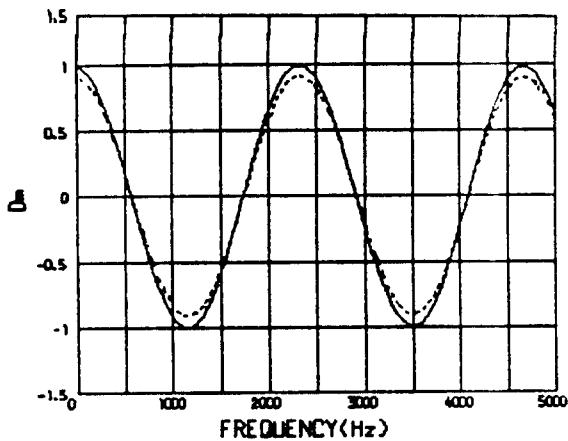


(a)  $h_m$ : 35 cm

$D_m$  —  
 $D_m'$  - - -

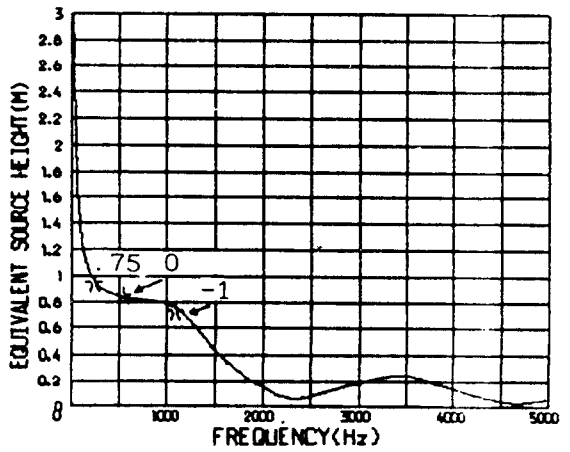


(c)  $h_m$ : 35 cm



(b)  $h_m$ : 160 cm

$D_m$  —  
 $D_m'$  - - -



(d)  $h_m$ : 160 cm

Fig. 3 (a), (b): Comparison of  $D_m$  and  $D_m'$  for two different microphone spacings  
(c), (d): Source height calculated using  $D_m'$ .

$$r = \sqrt{h_m^2 + R^2}$$

$R \gg y_e$ 일 경우 윗식들의 관계는 만족되며, 식 (8)은 정확한 표현이 된다. 그러나 실제 측정에서  $S/N$ 비를 높이기 위해 근거리에서 측정해야 하므로 식 (15)는 만족되지 못하고 측정치는 기하학적 근거리 음장효과에 의한 오차를 포함한다. Fig. 4는  $y_e/R$ 에 대한 정규화오차의 수치시뮬레이션 결과로써 측정거리  $R=7.6$  m로 고정하고 8개 단계의  $h_m/R$ 값에 대한 정규화 오차 특성이다. 허용오차에 따라  $y_e/R$  범위를 임의로 선택할 수 있으나 본 연구에서는 허용오차를 5%로 가정하여  $y_e/R$ 을 약 0.32 이하로 제한하였다. 이 때 측정가능한 최대 등가점소음원의 위치는  $h_m$ 의 최대값을 1.6m로 했을 때 약 2.5 m로 계산된다.

(3) 소음원의 분포크기 효과

무상관 분포소음원을 가정하여 측정모델식 (9)를 식 (8)과 비교하면 각 항들은 정확히 일치하지 않는다. 즉 식 (10)과 같이 2차 모멘트로부터 등가점소음원의 위치  $y_e$ 가 결정된다면 각 모멘트 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\begin{aligned} \mu^{(2)} &= \frac{\sum Q_i y_i^2}{\sum Q_i} = y_e^2 \\ \mu^{(4)} &= \frac{\sum Q_i y_i^4}{\sum Q_i} \neq y_e^4 \left[ = \left( \frac{\sum Q_i y_i^2}{\sum Q_i} \right)^2 \right] \\ \mu^{(2n)} &= \frac{\sum Q_i y_i^{2n}}{\sum Q_i} \neq y_e^{2n} \end{aligned}$$

여기서,  $Q_i$ 와  $y_i$ 는 각 소음성분의 세기 및 위치이

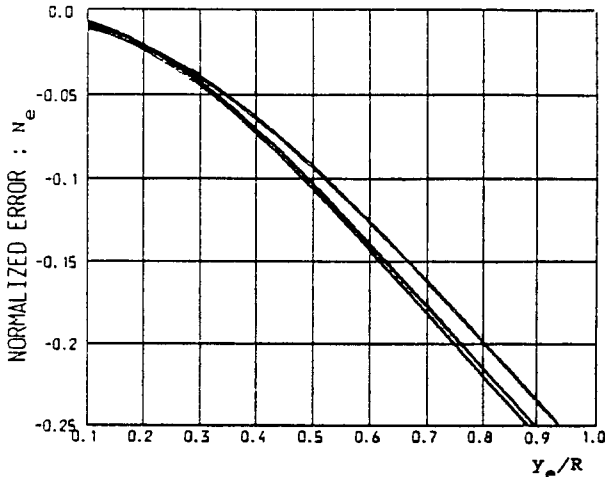


Fig. 4 Normalized error  $N_e$  versus non-dimensionalized factor  $y_e/R$  showing geometric near field effect.

다. 따라서 분포소음원에 대한 등가점소음원 모델의 오차  $E$ 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} E &= \frac{G(\bar{y}_0, \bar{x}_0)}{G(\bar{y}_0, \bar{x}_m)} \left( \frac{C_m}{C_0} - \frac{\bar{C}_m}{\bar{C}_0} \right) = D_m' - D_m \\ &= \left[ 1 - \frac{1}{2} k^2 \mu^{(2)} \left( \frac{h_m}{r} \right)^2 + \dots \right] - \cos \left( k y_e \frac{h_m}{r} \right) \\ &= \frac{1}{4!} k^4 \left( \frac{h_m}{r} \right)^4 (\mu^{(4)} - y_e^4) + \dots \\ &= \frac{1}{4!} k^4 \left( \frac{h_m}{r} \right)^4 (y_e)^4 \left[ \frac{\left( \frac{\sum Q_i (y_i^2 - y_e^2)^2}{y_e^2} \right)}{\sum Q_i} \right] + \dots \end{aligned} \tag{16}$$

고차항의 오차도 마찬가지로 해석할 수 있으며 결과는 항상 양의 값임이 확인된다. 식 (16)은 오차  $E$ 가 등가점소음원 위치에 대한 분포소음원의 기하학적 크기분포의 뻗힌길이와 세기에 관계됨을 보이고 이 경우 측정모델은 다음과 같이 주어진다.

$$\cos \left( k y_e \frac{h_m}{r} \right) = D_m = D_m' - E$$

따라서 정규화오차는  $N_e$ 는

$$\begin{aligned} N_e &= \frac{y_e' - y_e}{y_e} \\ &= \frac{\cos^{-1}(D_m') - \cos^{-1}(D_m)}{\cos^{-1}(D_m)} \\ &= \frac{\cos^{-1}(E + D_m) - \cos^{-1}(D_m)}{\cos^{-1}(D_m)} < 0 \end{aligned} \tag{단, E > 0} \tag{17}$$

그러므로 측정에 의한  $D_m'$ 로 부터 계산되는 등가소음원의 위치는 실제보다 항상 낮게 됨을 알 수 있다.

본 연구에서 대상으로 하는 측정가능 소음원의 높이는 (2)절의 결과에 의해 2.5 m이므로 분포소음원 크기가 2.5 m인 경우 허용 정규화오차의 기준을 마련하기 위해 Fig. 5와 같이 50가지 서로 다른 소음 분포 특성에 대하여 수치시뮬레이션을 행하였다. 그림의 특성은 기하학적 근거리 음장효과에 의한 5%의 정규오차를 포함하고 있으며 이를 포함하여 소음원 분포크기에 의한 허용오차를 15% 이내로 가정하면  $D_m$ 은 0보다 커야한다. 따라서 (1)절에서 구한  $D_m$ 의 상한치 0.75와 결합하면  $D_m$ 의 범위는 다음과 같다.

$$0 \leq D_m \leq 0.75 \tag{18}$$

또는

$$0.7227 \leq k y_e \frac{h_m}{r} \leq 1.5707 \tag{19}$$

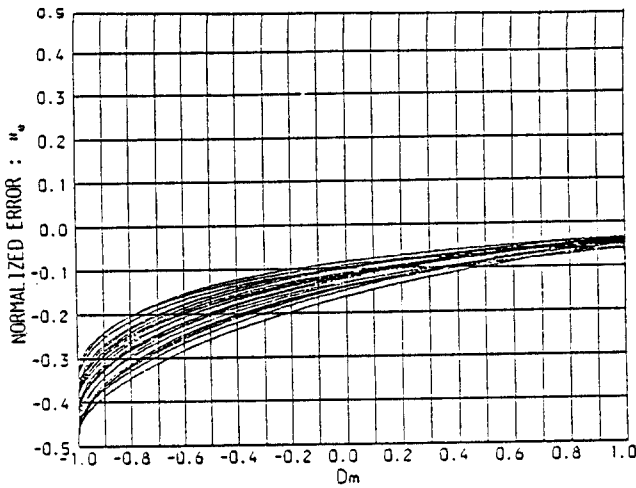


Fig. 5 Normalized error  $N_e$  of source height measurement for 50 different source distribution;  $0.0 < y_i < 2.5$  m,  $1.0 < Q_i < 10.0$ .

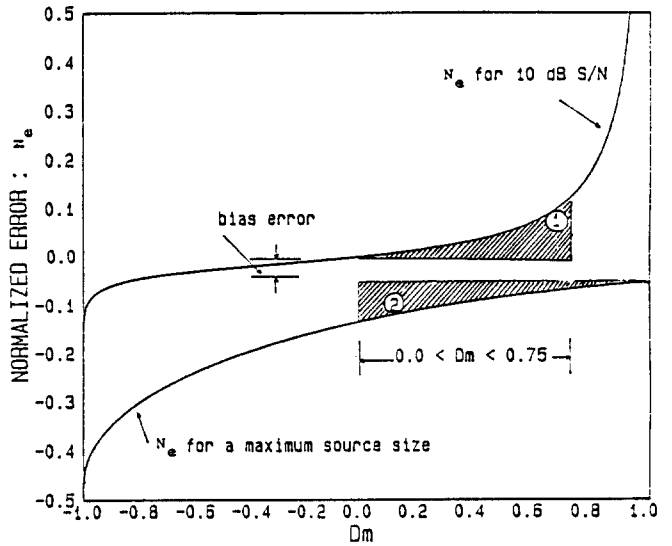


Fig. 6  $D_m$  bounds used in the array design and variations of normalized error.

### 3. 마이크로폰 배열설계 및 정지소음원 실험결과

#### 3.1 최적배열설계

2장에서 유도한 결과로부터 배경잡음이 없는 경우에는 한쌍의 마이크로폰으로 전주파수영역에 대한 등가점음원 위치측정이 가능하지만 배경잡음이 존재하는 경우 저주파수 영역에서는 넓은 간격의 마이크로폰쌍, 고주파수 영역에서는 좁은 간격의 마이크로폰쌍이 요구되므로 마이크로폰 배열은 각 주파수 영역을 분담하는 복수개의 쌍으로 구성되어야 한다. 또한 배경잡음효과외에 기하학적 근거리음장효과와 소음원의 분포크기에 의해 배열간격이 좌우된다.

$S/N$  10 dB, 소음원과 배열간의 수평거리 7.6 m, 분포소음원의 최대크기를 2.5 m로 하여 정규화 측정오차 범위를 15%이하로 가정하면 측정파라메타  $D_m$ 의 범위는 식 (18)로 주어진다.

Fig. 6은  $D_m$ 의 범위에 따른 15%의 정규화오차 특성으로 빗금친 영역 1은 배경잡음에 대한 정규화오차 특성으로  $S/N$ 이 10 dB 이상이면 영역 내부에 위치한다. 빗금영역 2는 Fig. 5에서 정의된 소음원의 분포크기에 대한 정규화오차 특성으로 분포크기가 작으면 영역 내부에 위치한다. 또한 그림에는 기하학적 근거리음장에 대한 오차(bias error)도 표시되어 있다. 따라서 식 (18)에 대응되는 식 (19)에 의해 마이크로폰 간격이 결정된다. 즉 마이크로폰 높이의 최대치 및 등가점소음원의 위치를 각각 1.6 m, 2.5 m로 두면 식 (19)에 의해 이 마이크로폰의

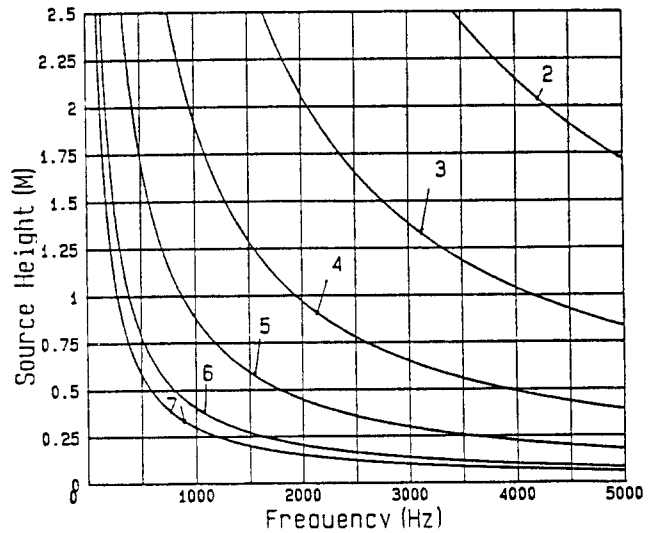


Fig. 7 Equivalent source height which may be measured at each frequency for the array designed using the criteria  $0.0 < D_m < 0.75$ .

측정가능 주파수 범위가 결정되고 이것의 상한 주파수가 다음 마이크로폰의 하한 주파수가 되므로 다음과 같이 마이크로폰 위치가 결정된다. (단위는 cm)

$$h_m = (0.0, 3.5, 7.5, 15.5, 33.0, 72.0, 160)$$

Fig. 7은 각 마이크로폰의 측정 가능 주파수 범위 및 등가소음원 높이로써 그림에 표기된 번호는 각 마이크로폰의 번호로 지표면에 위치한 기준 마이크로폰은 1번, 1.6 m의 최고 높이 마이크로폰은 7번으로

로, 표시된 번호의 우측영역이 각 마이크로폰의 측정 가능 주파수 범위 및 등가소음원 높이 범위이다.

본 연구에서는 정규화 측정오차의 허용범위를 15% 이하로 가정하여 배열을 설계하였다. 허용오차 범위가 다를 경우에도 본 연구의 결과가 마찬가지로 적용될 수 있고, 설계된 배열의 마이크로폰 간격 및 갯수만이 다른값을 갖게 될 것이다.

### 3.2 스피커 실험결과

#### (1) 실험방법

제시된 마이크로폰 배열을 이용한 소음원 높이 측정결과를 검증하기 위해 Fig. 8과 같이 소음원으로 스피커를 이용하고 수평거리 7.6m 위치에 배열을 설치하였다. 각 마이크로폰의 수신신호를 7채널 녹음기에 녹음하여 실험실에서 분석하였다. 신호는 초당 23,808회 샘플링되고 1024점 FFT에 의해 기준 마이크로폰에 대한 각 마이크로폰의 상호상관스펙트럼 밀도를 계산하여 저장하고 이 자료는 등가소음원 위치결정을 위한 입력자료로 이용되었다.

단일 소음원에 대한 실험은 한 개의 스피커를 사용하였고 분포소음원에 대한 실험은 두 개의 스피커를 서로 다른 높이에 설치하여 행하였다. 또한 스피커 내부의 트위터(tweeter)는 제거하고 우퍼(wooper)만 사용하여 음원 위치를 우퍼의 중심점이 되도록 하였다. 스피커는 증폭기를 통한 백색잡음 신호발생기로 구동되었고 배경잡음의 영향을 해석하기 위해서는 증폭기의 이득을 조정하였다.

#### (2) 점소음원 실험결과

Fig. 8에서 한개의 스피커만 구동하고 스피커 높

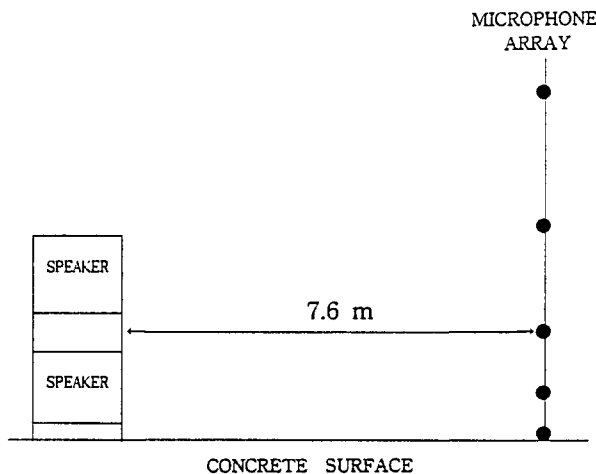


Fig. 8 Experimental setup of equivalent source height measurement using loudspeakers.

이를 달리하며 실험을 하였다. 배경잡음의 영향을 평가하기 위해 백색잡음 신호발생기에 연결된 증폭기의 이득을 조정하였다. Fig. 9는 스피커의 위치가 88cm와 167cm일 때의 결과로 실험조건에서 S/N비가 10dB 이상인 경우이다. Fig. 7에서 보인 각 마이크로폰쌍에 대한 측정 주파수범위와 잘 일치한다.

S/N이 10dB 이상이므로 실제 높이보다 낮게 측정된 주파수 영역은 배경잡음영향보다는 기하학적 근거리음장 효과에 의한 오차로 해석할 수 있다. 전체적으로 실제높이의  $\pm 15\%$  이내로 이론적인 예측결과와 잘 일치한다.

#### (3) 분포 소음원 실험결과

분포 소음원에 대한 측정모델을 검증하기 위해 Fig. 8과 같이 두 개의 스피커를 서로 다른 위치에 설치하고 그 간격을 조정하여 분포 소음원의 크기(두 개 스피커의 간격)에 따른 오차 특성을 실험하

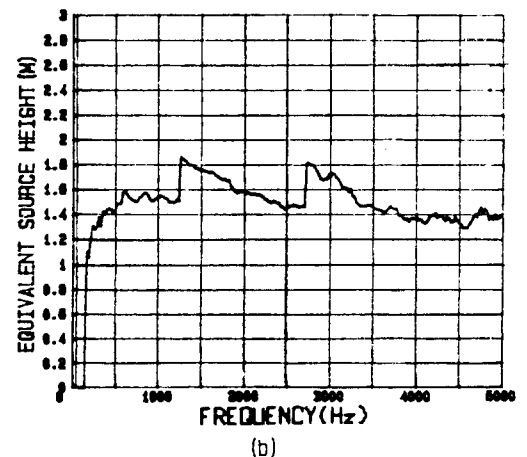
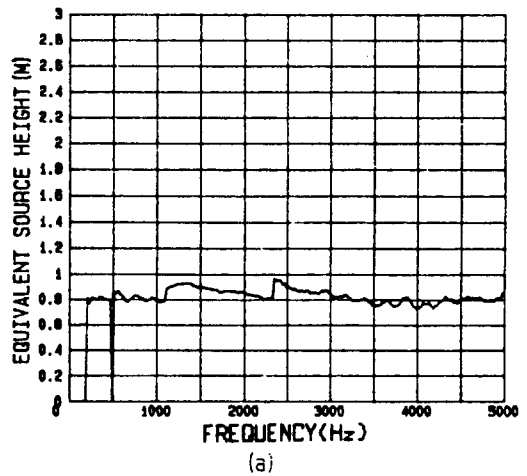


Fig. 9 The measured source height as a function of frequency for a loudspeaker placed 88 cm above the ground.



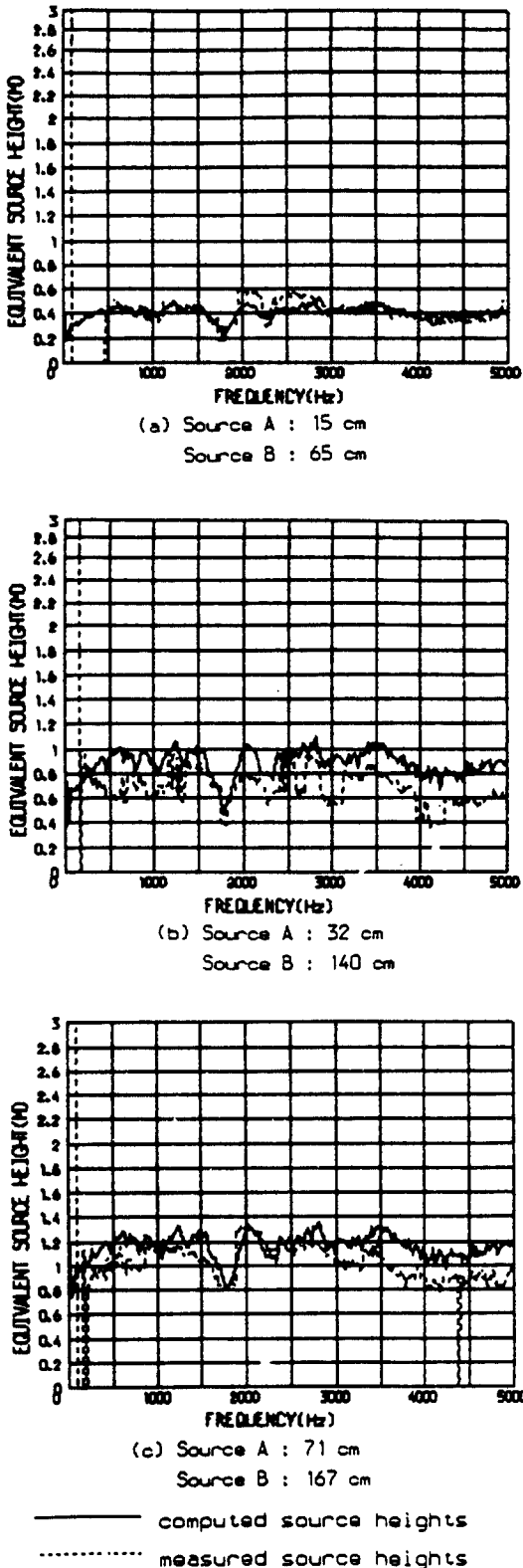


Fig. 10 The measured source heights compared with the computed source height for the three different distributed source setups.

였다. Fig. 10은 3가지의 분포크기에 대한 실험결과로 분포크기가 작은 Fig. 10(a)의 경우는 이론치와 실험치가 5% 이내로 일치하고 분포크기가 약 1m인 Fig. 10(b)(c)의 경우는 2장에서 이론적으로 해석한 바와 같이 측정치는 이론치보다 낮은 값으로 측정되지만 15% 이내에서 일치함을 보인다. 결론적으로 두개의 스피커를 이용한 실험결과는 분포소음원에 대해서도 등가소음원의 위치가 설정된 오차범위 내에서 이론치와 일치하므로 본 연구에서 제안한 이론적 모델, 마이크로폰 배열 설계 기준은 타당함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

방음벽 설계를 위해서는 차량 소음의 지면으로부터 높이자료가 필수적이다. 본 연구의 목적은 차량 소음의 등가소음 높이를 측정하기 위한 마이크로폰 배열을 설계하는 것으로 측정환경에서 수반되는 배경잡음, 소음원 분포크기 및 근거리 음장효과에 의한 측정치의 정규화 오차 특성을 이론적으로 해석하고 이를 기준으로 시뮬레이션에 의해 최적의 배열을 설계하였다.  $S/N$ 이 10 dB 이상, 소음원의 최대분포크기가 2.5m 및 배열과 소음원과의 수평거리가 7.6m 일때 측정치의 정규화 오차가  $\pm 15\%$  범위로 측정될 수 있도록 배열간격을 설계하였고 스피커를 이용한 설계된 배열의 성능검증 실험결과는 설계치와 일치하였다. 실제 차량측정시 제안된 배열을 적용하기 위해서는 차량소음이 배경소음보다 최소 10 dB 이상 높아야 하지만 이는 일반적으로 만족되는 조건이다. 또한 제안된 마이크로폰 배열을 이용하여 측정되는 소음높이는 주파수함수로 주어지므로 차단 손실 계산치가 보다 정확히 구해질 수 있을 것이다.

#### 후 기

이 연구는 1991년도 한국과학재단(과제번호: 913-0810-018-2) 연구비 지원에 의한 결과임.

#### 참 고 문 헌

- (1) FHWA Highway Traffic Noise Prediction Model, FHWA-RD-77-108, U. S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration.
- (2) Fisher, M. J., Harper-Bonrne, M., and Glegg, S. A. L., 1977, "Jet Engine Noise Source

- Location: The Polar Correlation Technique," Journal of Sound and Vibration Vol. 51 (1) pp. 23~54.
- (3) Glegg, S., 1977, "Some Theoretical Considerations of Far Field Source Location Techniques and Their Application," 9th International Congress on Acoustics, Madrid.
- (4) Fisher, M. J., and Glegg, S., 1977, "Source Location", Conference on Time Series Analysis, Southampton.
- (5) Glegg, S., 1981, "The Application of Jet Noise Source Location Techniques to Three Dimensional Source Distribution," Institute of Acoustics Conference on Noise Source Location.
- (6) Glegg, S., 1982, "The Application of Source Distributions Measured by Using Polar Correlation," Journal of Sound and Vibration, Vol. 80 (1) pp. 31~40.
- (7) King III, W. F., "On Microphone Arrays used to Locate Sound Sources on Moving Vehicles," Inter-noise 79, C17C, Warsaw, Poland.
- (8) Boone, M. M. and Berkhout, A. T., 1983, "Syntacan: A Highly Directional Synthetic Acoustic Antenna for Industrial Noise Measurement," Inter-noise 83, p 1094, Edinburgh. U. K.
- (9) Fisher, M. J., 1981, "The Source Breakdown Technique," Institute of Acoustics Conference on Noise Souce Location.
- (10) Billingsley, J. and Kinns, R., 1776, "The Acoustic Telescope," Journal of Sound and Vibration, Vol. 48, pp. 485~510.
- (11) Kinns, R., 1976, "Binaural Source Location," Journal of Sound and Vibration Vol. 44, pp. 275~289.
- (12) Jean, P. A. H., 1983, "Development of a Three Dimensional Source Assesment Technique And Application to the Study of a Lorry," Master Thesis, Univ. of Southampton, U. K.
- (13) Glegg, S. A. L., and Yoon, J. R., 1990, "Determination of Noise Source Height, Part I: The Measurement of Equivalent Acoustic Source Height Above a Reflecting Surface," Journal of Sound and Vibration, Vol. 143 (1), pp. 19~37.
- (14) Glegg, S. A. L., and Yoon, J. R., 1990, "Determination of Noise Source Height, Part II: Measurement of The Equivalent Source Height of Highway Vehicles," Journal of Sound and Vibration, Vol. 143 (1), pp. 39~50.
- (15) Mouches, J. M., 1989, "The De-Dopplerization Using Digital Filters," Master Thesis, Florida Atlantic University.
- (16) 윤종락, 1993, "소음 차단벽 설계를 위한 운동 소음원 특성 측정에 있어서 도플러 효과," 한국과학기술 재단 신진 연구 보고서 (KOSEF 913-0810-018-2).