

〈논 문〉

개선된 이동 프레임 음향 홀로그래피 방법과 이동 음원의 방사 소음 가시화에 대한 응용

Review of the Improved Moving Frame Acoustic Holography and Its
Application to the Visualization of Moving Noise Sources

박 순 홍* · 김 양 한**

Soon-Hong Park and Yang-Hann Kim

(2000년 4월 17일 접수 : 2000년 7월 3일 심사완료)

Key Words : Acaoustic Holography(음향 홀로그래피), Visualization(가시화), Moving Noise Source(이동음원),
Microphone Array(마이크로폰 어레이).

ABSTRACT

This paper reviews the improved moving frame acoustic holography (MFAH) method and its application. Moving frame acoustic holography was originally proposed to increase the aperture size and the spatial resolution of hologram by using a moving line array of microphones. The hologram of scanned plane can be obtained by assuming the sound field to be a product of spatial and temporal information. Although conventional MFAH was only applied to sinusoidal signals, it allows us to visualize the noise generated by moving noise sources by employing a vertical line array of microphones affixed to the ground. However, the sound field generated by moving sources becomes different from that of stationary ones due to the movement of the sources. Firstly, this paper introduces the effect of moving noise sources on the obtained hologram by MFAH and the applicability of MFAH to the visualization of moving sources. Secondly, this paper also reviews improved MFAH that can visualize a coherent narrow band noise and a pass-by noise. The practical applicability of the improved MFAH was demonstrated by visualizing tire noise during a pass-by test.

1. 서 론

효과적인 소음 제어를 위해 가장 먼저 수행하여야 할 작업으로 소음원의 위치와 발생 소음의 전파 경로를 파악하는 것임은 주지의 사실이다. 1980년대 초반 제안된 근접장 음향 홀로그래피 (nearfield acoustical holography)⁽¹⁾ 방법은 다수의 마이크로폰으로 측정된 음압 분포(홀로그램)를

이용하여 자유 공간(free field)내의 모든 위치에서의 음압, 입자 속도, 음향 인텐시티 및 음향 파워등의 유용한 물리량을 예측해 낼 수 있는 방법이다. 이 방법은 근접장 측정으로 감쇄파 성분을 포함시킴으로써 공간상의 분해능을 파장의 1/2이하로 증가시켰으나, 많은 센서 및 비용이 필요하며 제한된 구경 및 측정점의 이산화에 의해 발생하는 문제점으로 초기에는 실제적인 이용에 제약이 있었다.

이후 연구 방향은 이러한 제약점을 극복하는 형태로 진행되었다. 유한한 측정 구경 및 이산화가 예측 음압에 미치는 영향에 대한 연구는 참고 문헌 (2~5)에서 이루어졌

* 한국과학기술원 대학원 기계공학과

** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

으며, 다수의 센서의 특성 차이 및 부정확한 위치에 기인한 오차에 대한 연구⁽⁶⁾도 수행되었다. 한편으로는 적은 센서에 의한 홀로그래프 측정 방법에 대한 연구들이 활발하게 이루어 졌다⁽⁷⁻¹²⁾. 음장이 정상 상태(stationary)인 경우 순차적으로 홀로그래프를 측정하는 방법⁽⁷⁾이 제안된 이후 여러 개의 독립 음원이 존재하는 경우에 대한 홀로그래프 측정 방법인 STSF(spatial transformation of sound fields) 방법⁽⁸⁾ 및 조건부 전달 함수를 이용하는 방법⁽⁹⁾이 소개되었으며, 최근에는 독립적인 소음원별 음장까지 예측 가능한 방법이 제안되었다⁽¹⁰⁾. 한편 기준 마이크로폰 없이 음향 인텐시티와 음압으로 홀로그래프를 측정하는 방법⁽¹¹⁾도 제안된 바 있다. 위와 같은 순차적 측정 방법을 개선하여 최근에는 음원에 대해 상대속도를 가지고 이동하는 마이크로폰을 이용하여 홀로그래프를 측정하는 이동 프레임 음향 홀로그래피 방법(moving frame acoustic holography, MFAH)⁽¹²⁾이 제안되어, 단시간내에 홀로그래프의 구경 크기 및 공간상의 측정점 간격의 증가가 가능하게 되었다.

최근 환경 소음에 대한 관심의 증가와 각종 환경 관련 규제에 의해 자동차 등의 수송 기계에서 방사되는 소음 가시화 기술의 필요성이 크게 높아졌다. 그러나 이에 음향 홀로그래피 방법을 이용하려면, 음원과 함께 이동하는 평면형 마이크로폰 어레이를 이용하여 홀로그래프를 측정 하여야 하는 문제가 있다. 실제 적용한 예⁽¹³⁾가 있으나 측정 구경 크기의 제한과 바람에 의한 소음, 복잡한 측정 장비로 인한 비용 등의 문제점이 있다. 한편, 기존의 이동 음원에 대한 가시화 방법으로는 선형 마이크로폰 어레이 혹은 십자형이나 X자형의 2차원 마이크로폰 어레이를 이용하는 방법⁽¹⁴⁻²⁰⁾이 소개된 바 있는데 이는 일종의 빔 형성 방법 (beamforming method)으로 주로 고속 전철 등에 적용되었다. 이 방법은 가시화하고자 하는 평면에 가정한 음원들의 크기만을 표현하는 방법으로 실제 음원에서 방사하는 소음의 전파 현상을 표현할 수 없는 단점이 있다. 한편 MFAH 방법은 음원에 대하여 상대 속도로 이동하는 마이크로폰 어레이를 이용하는 방법이므로, 음원이 이동하는 경우 지면에 고정된 선형 마이크로폰 어레이를 이용한 음향 홀로그래피의 적용 가능성을 제시하였다.

본 논문에서는 MFAH 방법에 의한 이동 음원의 가시화 방법 및 그 응용 사례를 소개한다. 먼저 음원의 이동에 기인한 홀로그래프에서의 음압 및 위상 오차의 규명을 통하여 MFAH 방법의 이동 음원 가시화에 대한 적용성을 살펴본다. 또한 기존의 순음 성분(tonal component)⁽¹²⁾ 뿐만 아니라 대역 소음이나 가속 주행(pass-by) 소음 등의 실제적인 소음원에 대한 적용을 통하여 MFAH방법의 이동 음원 가시화의 적용성

을 예시하였다.

2. 이론적 배경

2.1 이동 프레임 음향 홀로그래피(MFAH) 방법과 이동 음원에 대한 적용성

이동하는 음원에 의해 방사되는 음파의 파장은 음원의 이동에 의해 동일 음원이 정지하였을 경우의 방사되는 파장에 비해 음원의 이동 방향으로 짧아지며, 그 반대방향으로는 길어지게 된다. 예를 들어 단극 음원이 이동하는 경우, 파장은 이동 방향으로 정지한 단극 음원에서 방사하는 파장보다 짧아져 주파수가 증가하며, 그 반대 방향으로 길어져 주파수가 감소함을 쉽게 관찰할 수 있다. 즉 음원이 이동하는 경우는 정지한 소음원에 고정된 마이크로폰으로 측정된 홀로그래프와는 달리 지면에 고정된 마이크로폰에 의한 측정 음압, 즉 홀로그래프에 음원의 이동 속도에 의한 영향이 포함될 것임을 짐작할 수 있다.

일반적인 이동 음원에서 방사되는 음압은 일반화된 그린 공식(generalized green's formula)⁽²¹⁾ 또는 Ffowcs Williams와 Hawkings의 방정식⁽²²⁾에 의해 표현될 수 있음은 잘 알려져 있지만 근접장 음향 홀로그래피에서는 홀로그래프의 음압 혹은 입자 속도 정보만 필요하므로 임의의 소음원에 의한 음장을 호이겐스 원리(Huygens' principle)에 기초한 파동 중첩의 방법(wave superposition method)⁽²³⁻²⁵⁾을 이용하여 "무수히 많은 단극 음원의 중첩으로 표현할 수 있다. 이동 음원의 경우에도 파동 중첩의 방법의 적용이 가능하다⁽²⁶⁾. 즉 단위 체적당의 음원 세기를 $q(\vec{Y}, \tau) dV_M(\tau)$ 라 한다면 임의의 이동 음원에 의한 음압을

$$p(\vec{X}, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{V_M(\tau)} \frac{\delta(t - \tau - |\vec{X} - \vec{Y}(\tau)|/c)}{4\pi|\vec{X} - \vec{Y}(\tau)|} \times q(\vec{Y}(\tau), \tau) dV_M(\tau) d\tau \quad (1)$$

와 같이 표현할 수 있다. 여기서, $\delta(\cdot)$ 는 델타함수, τ 음파의 방사 시간, t 는 측정시간을 각각 표현한다.[Fig. 1(a)] 식 (1)은 단극 음원의 무한 중첩의 형태로 이산화 가능하며, 음원의 위치는 방사된 음파가 측정되는 시각 t 에서 동시에 관측되므로 측정 시각의 함수로 표현할 수 있다. 음원이 주파수 f_{h0} 의 음파를 방사하는 경우에는

$$p(X=0, Y, Z=z_n; t) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{q_n}{4\pi r_n(t) \sqrt{1-M^2 \sin^2 \theta_n(t)}} \cdot e^{-i2\pi f_{h0} t + ik \frac{r_n(t)}{1-M^2} [M \cos \theta_n(t) + \sqrt{1-M^2 \sin^2 \theta_n(t)}]} \quad (2)$$

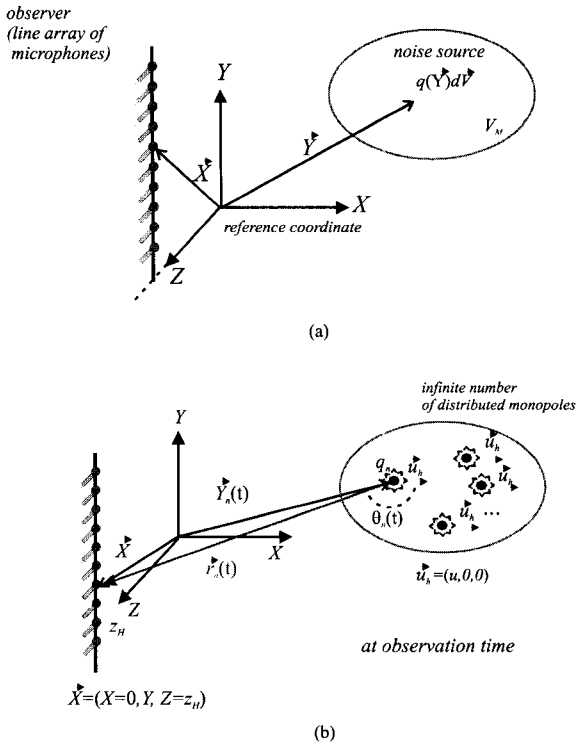


Fig. 1 (a) Position vectors indicating source distribution in V_M and an observer (a line array of microphones) in the reference coordinate. Note that the reference coordinate is affixed to the ground. (b) Position vectors of distributed monopole sources and a line array of microphones in the reference coordinate at the observation time

으로 표현할 수 있다. [자세한 유도과정은 참고문헌 (26)을 참조하기 바람.] 이 식은 $\vec{X} = (X=0, Y, Z=z_H)$ 에 고정된 마이크로폰에서 측정된 $\vec{u}_h = (u, 0, 0)$ 의 속도(마하수 $M = u/c$)로 이동하는 음원의 방사 음압을 표현한다. 여기서 q_n 와 \vec{Y}_n 는 n 번째 이동 단극 음원의 크기 및 위치 벡터를, $k = 2\pi f_{h0}/c$, $r_n(t) = |\vec{X} - \vec{Y}_n(t)|$, $\theta_n(t)$ 는 속도 벡터 \vec{u}_h 와 $\vec{r}_n(t)$ 이 이루는 각을 표현한다.[Fig. 1(b)]

MFAH는 음원에 고정되어 음원의 이동을 표현하는 홀로그램 좌표계 (x_h, y_h, z_h) 와 마이크로폰 어레이가 고정된 측정 좌표계 (x_m, y_m, z_m) 간의 상대 좌표 변환을 통하여 측정음압에 도플러 효과로서 표현된 음장 정보인 홀로그램을 얻어내는 방법이다(Fig. 2). 이때 마이크로폰과 음원간의 상대 속도를 $u_{m/h}(t) = u_m(t) - u_h(t)$ 와 같이 표현하고, 가속도에 의한 영향은 무시할 수 있을 만큼 적다고 가정한다.

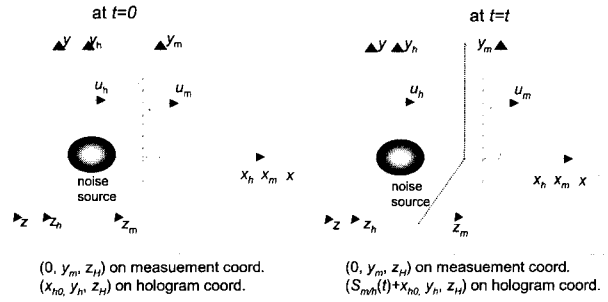


Fig. 2 Three coordinate systems employed in moving frame acoustic holography and the relative coordinate transformation. Left figure indicates the coordinate systems at $t=0$. The coordinate $(0, y_m, z_H)$ on the measurement coordinate system corresponds to (x_{h0}, y_h, z_{H0}) on the hologram coordinate system. Right figures shows the coordinate systems at $t=t$. Notice that the coordinate $(0, y_m, z_H)$ on the measurement coordinate system corresponds to $(S_{m/h}(t) + x_{h0}, y_h, z_{H0})$ on the hologram coordinate system due to the relative motion. Dashed coordinate system denotes the measurement coordinate system at $t=0$

다. 음원이 이동하고 마이크로폰이 정지한 경우는 기준 좌표계 (X, Y, Z) 가 측정 좌표계와 항상 동일하므로 식 (2)로 표현되는 기준 좌표계에서의 음압은 측정 좌표계에서의 음압 p_m 으로

$$p(X=0, Y, Z=z_H; t) = p_m(x_m=0, y_m, z_m=z_H; t) \quad (3)$$

와 같이 표현할 수 있다. 따라서 홀로그램 좌표계에서의 음압 p_h 는

$$x_h = S_{m/h}(t) + x_m, \quad y_h = y_m, \quad z_h = z_m, \quad (S_{m/h}(t) = \int_0^t u_{m/h}(\tau) d\tau) \quad (4)$$

의 상대 좌표 변환(Fig. 2)을 이용하여,

$$p_m(0, y_m, z_H; t) = p_h(S_{m/h}(t), y_h, z_H; t) \quad (5)$$

과 같이 얻을 수 있다. 이동 음원의 홀로그램을 얻기 전에, MFAH의 이해를 위해 가장 간단한 경우인 평면파 음장을 생각해 보기로 한다. 임의의 평면 $z_h = z_H$ 에서

$$p_h(x_h, y_h, z_H; t) = P_0 e^{ik_x x_h} e^{-i2\pi f_{h0} t} \quad (6)$$

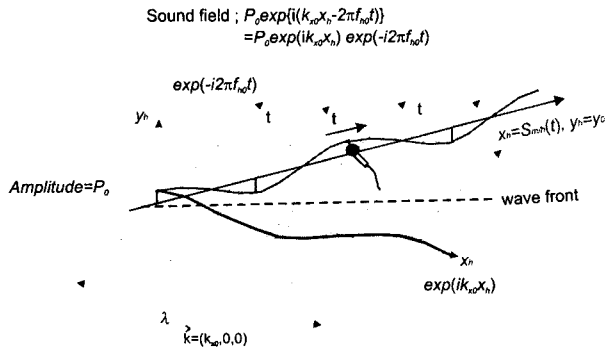


Fig. 3 Application of MFAH to a plane wave. The plane wave sound field whose magnitude is P_0 is drawn in space and time. Notice that a sound field can be expressed as the multiplication of space and time. The frequency and the wave vector of the plane wave are f_{h0} and $(k_{x0}, 0, 0)$. The hologram of this sound field is $P_0 e^{ik_{x0}x_n}$. This can be reconstructed from the measured signal (by a moving microphone).

와 같이 x 방향으로 진행하는 평면파를 가정하자(Fig. 3). 여기서 홀로그램은 $P_0 e^{ik_{x0}x_n}$ 으로써 공간상의 음압 분포를 표현한다. 식 (6)은 순음의 경우 음장은 공간상의 정보(홀로그램 $P_0 e^{ik_{x0}x_n}$)와 시간상의 정보 ($e^{-i2\pi f_{h0}t}$)의 곱의 형태로 표현됨을 보여준다. 한편 마이크로폰이 x 방향으로 $u_{m/h}(t) = u_m(t)$ 의 속도를 가지고 이동하는 경우(Fig. 3), 마이크로폰에서 측정된 시간 신호에도 이와 같은 정보를 포함하게 되며 이는 도플러 효과로써 표현된다. 부연하면 도플러 효과는 음장의 형태에 따라 다른 형태로 표현되므로 도플러 효과를 통해 음장을 역으로 유추할 수 있다. 식 (5)와 (6)으로부터 이동하는 마이크로폰에서 측정하는 시간 신호는 식 (7)과 표현할 수 있다.

$$p_m(0, y_m, z_H; t) = p_h(S_{m/h}(t), y_h, z_H; t) = P_0 e^{ik_{x0}S_{m/h}(t)} e^{-i2\pi f_{h0}t} \quad (7)$$

이 식으로부터 홀로그램은 주파수(f_{h0}) 및 상대 좌표 변환 식($x_h = S_{m/h}(t)$) 을 알면 식 (7)의 양변에 $e^{i2\pi f_{h0}t}$ 을 곱하여 얻을 수 있으며, 이는 측정 신호의 복소 포락(complex envelope)으로 표현됨을 알 수 있다.⁽²⁷⁾

한편, 임의의 음장은 평면파의 중첩으로 표현 가능하므로 이 결과는 임의의 단일 주파수 음장에 대해 확장가능하다. 즉, $p_h(x_h, y_h, z_H; t) = P_h(x_h, y_h, z_H; f_{h0}) \times e^{-i2\pi f_{h0}t}$ 와 같이 표현되는 단일 주파수 음장을 가정하면, 측정 음압은

$$p_h(S_{m/h}(t), y_h, z_H; t) = P_h(x_h = S_{m/h}(t), y_h, z_H; f_{h0}) \times e^{-i2\pi f_{h0}t} \quad (8)$$

과 같이 표현되고, 홀로그램은 식 (7)의 경우와 마찬가지로 측정 신호의 복소 포락으로 얻을 수 있음을 알 수 있다.

이제, 식 (3), (5) 및 (8)로부터 임의의 이동 음원에 의한 홀로그램은

$$P_h(x_h = S_{m/h}(t), y_h, z_H; f_{h0}) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{q_n}{4\pi r_n \sqrt{1 - M^2 \sin^2 \theta_n}} e^{ik_{rn} \frac{M \cos \theta_n + \sqrt{1 - M^2 \sin^2 \theta_n}}{1 - M^2}} \quad (9)$$

와 같이 얻을 수 있다. 여기서,

$r_n = [(x_h - x_{S,n})^2 + (y_h - y_{S,n})^2 + (z_H - z_{S,n})^2]^{1/2}$ 은 n 번째 단극음원의 위치 $(x_{S,n}, y_{S,n}, z_{S,n})$ 와 홀로그램의 임의의 위치 (x_h, y_h, z_H) 사이의 거리를 표현하며, θ_n 는 r_n 과 x_h 축이 이루는 각도를 표현한다. 식 (9)에는 음원의 속도에 의한 영향이 명확히 표현되어 있는데 $M \ll 1$ 인 경우

$$P_h(x_h, y_h, z_H; f_{h0}) \cong \sum_{n=0}^{\infty} \left(1 + \frac{1}{2} M^2 \sin^2 \theta_n\right) e^{ik_{rn} M \cos \theta_n} \times P_{h,n}^{true}(x_h, y_h, z_H; f_{h0}) \cong \sum_{n=0}^{\infty} e^{iMk_{rn}} e^{-iMk_{s,n}} P_{h,n}^{true}(x_h, y_h, z_H; f_{h0}) \quad (10)$$

와 같이 간략화 할 수 있다. 여기서 $P_{h,n}^{true}(x_h, y_h, z_H, f_{h0}) = q_n e^{ik_{rn}} / 4\pi r_n$ 은 n 번째 단극 음원의 참홀로그램을 표현한다. 이 식은 홀로그램에서 음원의 이동에 의한 오차가 마하수에 비례함을 보여주고 있다. 또한 이 식은 홀로그램에 $e^{-iMk_{rn}}$ 를 곱하여 위상 오차를 줄이는 것이 가능하며, 가속 주행(pass-by) 소음 측정 경우와 같이 마하수가 매우 작은 경우에는 음원의 이동에 의한 영향을 무시하는 것이 가능함을 보여주고 있다.⁽²⁶⁾

2.2 대역 소음에 대한 적용 방법⁽²⁷⁾

소음원이 대역 소음을 발생시키는 경우 그 대역폭이 중심 주파수에 비해 10% 미만인 협대역 소음이라면 MFAH를 이용하여 대역 소음의 홀로그램을 구하는 것이 가능하다⁽²⁷⁾. 협대역 소음의 중심 주파수와 대역폭을 각각 f_{hc} 와 B 라 하면(Fig. 4), 음장은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$p_h(x_h, y_h, z_H; t) = \int_{f_{h-}}^{f_{h+}} P_h(x_h, y_h, z_H; f_h) \times e^{-i2\pi f_h t} df_h \quad (11)$$

여기서, $f_{h-} = f_{hc} - B/2$, $f_{h+} = f_{hc} + B/2$ 이며, 실제의 경

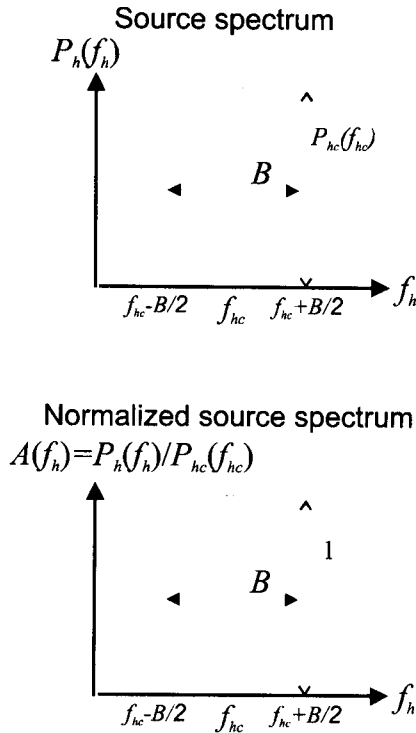


Fig. 4 Illustrations of source spectrum and normalized source spectrum.

우 위와 같은 관심 협대역 소음만의 신호를 얻기 위해서는 여파기(filter)를 적용한다. 만약 소음이 비독립 음원들(uncorrelated sources)에 의해 형성되었다면 음장은 다음과 같이 모델링 가능하다.

$$P_h(x_h, y_h, z_H; f_h) \equiv A(f_h)P_{hc}(x_h, y_h, z_H; f_{hc}) \quad (f_{h-} \leq f_h \leq f_{h+}), \quad (12)$$

여기서, $A(f_h)$ 는 정규화된 음원 스펙트럼을 표현한다(Fig. 4). 따라서 식 (12)는

$$p_h(x_h, y_h, z_H; t) \equiv P_{hc}(x_h, y_h, z_H; f_{hc}) \times \int_{f_{h-}}^{f_{h+}} A(f_h) e^{-i2\pi f_h t} df_h. \quad (13)$$

과 같이 쓸 수 있고, 정규화된 음원 스펙트럼은 음원에 고정된 기준 마이크로폰(reference microphone)으로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$A(f_h) = P_{ref}(\vec{x}_{ref}; f_h) / P_{ref,c}(\vec{x}_{ref}; f_{hc}) \quad (14)$$

여기서 $\vec{x}_{ref} = (x_{ref}, y_{ref}, z_{ref})$ 는 기준 마이크로폰의 위치를 나타내며, $P_{ref}(\vec{x}_{ref}; f_h)$ 와 $P_{ref,c}(\vec{x}_{ref}; f_{hc})$ 는 각각 주파수 f_h 와 중심 주파수 f_{hc} 에서의 스펙트럼을 표현한다. 따라서 식 (13)과 (14)로부터 협대역 소음의 음장은 다음과 같이

표현 가능하다.

$$\begin{aligned} p_h(x_h, y_h, z_H; t) &\cong P_{hc}(x_h, y_h, z_H; f_{hc}) \\ &\times \frac{\int_{f_{h-}}^{f_{h+}} P_{ref}(\vec{x}_{ref}; f_h) e^{-i2\pi f_h t} df_h}{P_{ref,c}(\vec{x}_{ref}; f_{hc})} \\ &= P_{hc}(x_h, y_h, z_H; f_{hc}) \\ &\times \frac{P_{ref}(\vec{x}_{ref}; t)}{P_{ref,c}(\vec{x}_{ref}; f_{hc})} \end{aligned} \quad (14)$$

이 식으로부터 협대역 소음도 공간 정보를 표현하는 홀로그래피와 시간 정보를 표현하는 음원 스펙트럼의 곱의 형태로 표현될 수 있으므로 MFAH 방법으로 홀로그래피를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 즉 마이크로폰 어레이에서 얻은 측정 신호는 식 (5)와 (14)로부터

$$\begin{aligned} p_m(0, y_m, z_H; t) &= P_{hc}(x_j = S_{m/h}(t), y_k, z_H; f_{hc}) \\ &\times \frac{P_{ref}(\vec{x}_{ref}; t)}{P_{ref,c}(\vec{x}_{ref}; f_{hc})} \end{aligned} \quad (15)$$

와 같이 표현되므로 협대역 소음의 홀로그래피(P_{hc})은 목소 측정 신호(P_m)를 기준 마이크로폰 신호($P_{ref} / P_{ref,c}$)로 나누어 얻을 수 있다.

2.3 가속주행(Pass-by) 소음에 대한 적용 방법⁽²⁸⁾

MFAH 방법은 순차적 측정 방법처럼 홀로그래피가 시간에 대해 정상 상태를 유지하는 경우에 적용 가능하므로, 엄밀하게는 일반적인 시변 소음에 적용될 수 없다. ISO 362의 가속주행(pass-by) 소음 측정의 경우도 측정 구간에서 속도 변화가 발생하고, 타이어 및 엔진 등의 소음원에서 발생하는 소음의 주파수 성분도 시간에 따라 변화하게 된다. 그러나 이동 음원의 홀로그래피 구경 크기를 측정하기 위한 시간은 0.5초 미만이며, 이 구간에서 차량의 속도 변화 및 발생 소음의 주파수 변화가 매우 작아서 무시 가능하므로 pass-by 소음은 준정상 상태(quasi-stationary)라 가정할 수 있다. 따라서 pass-by 소음을 MFAH 방법으로 가시화하는 것이 가능하다. 한편 일반적인 시변 소음원이 다수의 준정상 상태 소음들로 분리 가능하다면 MFAH 방법의 적용이 가능한데, 자세한 내용은 참고문헌 (28)을 참조하기 바란다.

3. 이동 음원 및 Pass-by 소음의 가시화

3.1 실험 장치

MFAH방법의 이동 음원 및 pass-by 소음에의 적용성을 검증하기 위해 음장의 형태가 잘 알려져 있고, 원하는 소

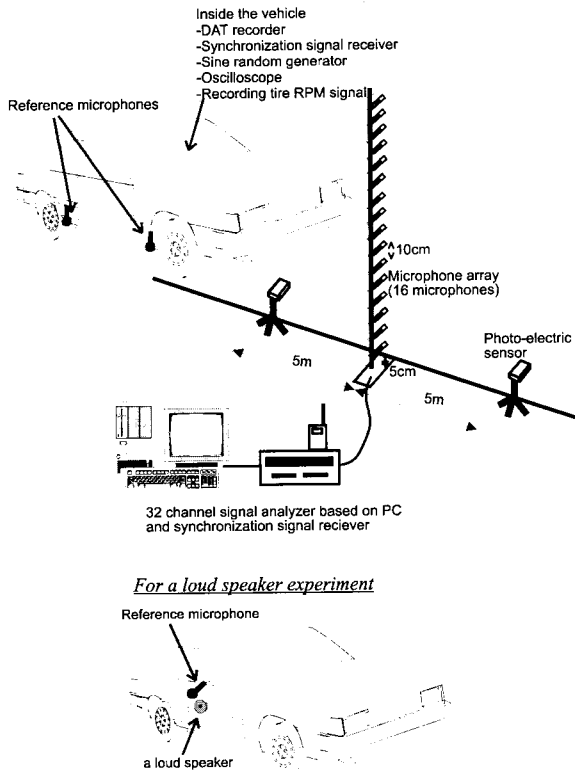


Fig. 5 Experimental setup

음을 발생시킬 수 있는 스피커 유닛을 이용한 실험을 수행하였다. 그리고 가속주행(pass-by) 소음 가시화도 동일한 실험 장치를 이용하여 수행하였다. 실험 장치 및 구성도는 Fig. 5에 도시하였다. 음압 신호를 측정하기 위해 16개의 마이크로폰으로 구성된 선형 마이크로폰 어레이를 지면에 고정하였고, 마이크로폰 사이의 간격은 0.1 m로서 1 kHz 미만의 소음 성분에 대하여 공간상의 에일리어싱없이 측정 가능하게 구성하였다. 스피커 실험에 이용된 차량은 4기통 1500 cc 배기량의 승용차로 엔진 소음 등이 최소화 될 수 있도록 특별히 설계되었다. 스피커 부근에 기준 신호를 측정 할 수 있도록 기준 마이크로폰을 1개 부착하였다. 한편, 가속 주행 소음 가시화에는 음압에 대한 가관측성(observability)을 고려하여 2개를 이용하였다. 그리고 타이어의 RPM 신호도 동시에 측정하였는데, 타이어 1회전당 이동 거리를 등속 실험을 통해 측정한 후 10 m 간격의 광센서(photo sensor)를 통해 차량 진입 및 탈출 시각을 측정함으로써 차량의 마이크로폰 어레이에 대한 상대 위치를 시간별로 측정할 수 있었다. 기준 마이크로폰 신호 및 타이어 RPM 신호는 DAT를 이용하여 측정하였으며, 마이크로폰 어레이 신호와 광센서의 신호들은 32채널을 동시 측정할 수 있는 다채널 신호 수집기(HP3566A)를 통해 측정하였다. 기준 마이크로폰 신호와 어레이 마이크로폰 신호

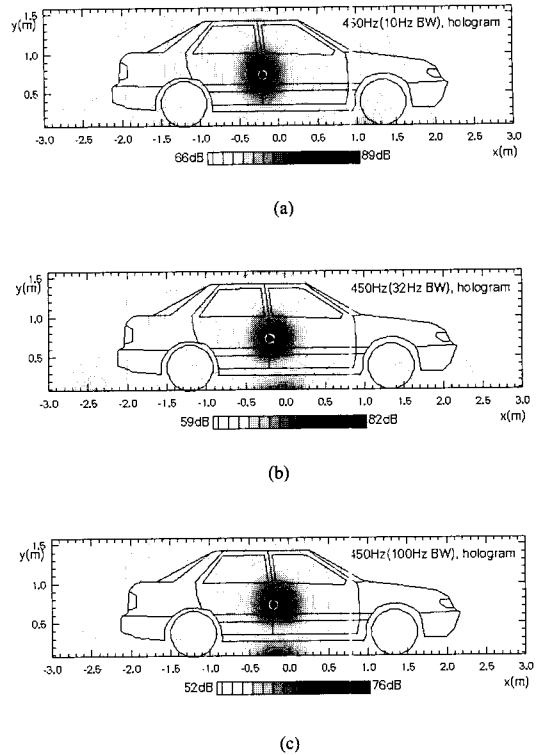
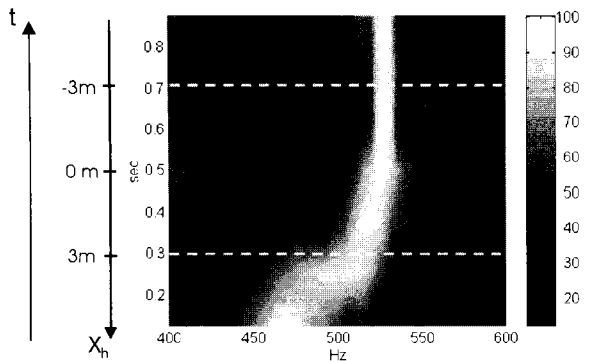


Fig. 6 The magnitude of the reconstructed hologram by using the proposed method. (a) A 450 Hz center frequency and 10 Hz bandwidth band-limited noise. The speed of the vehicle is 14.32 m/s (51.55 km/h) and the distance between the hologram and the source plane is 0.2m. (b) A narrow band noise of 450 Hz center frequency and 32 Hz. The speed of the vehicle is 13.94 m/s (50.18 km/h) and the distance between the hologram and the source plane is 0.26m. (c) A band-limited noise of 450 Hz center frequency and 100 Hz. The speed of the vehicle is 13.49 m/s (48.56 km/h) and the distance between the hologram and the source plane is 0.26m.

는 동시에 측정되어야 하는데, 이를 위해 동기화 신호 송신기 및 수신기를 제작하여 이용하였다. 한편 가속 주행 시험의 경우 협대역을 발생시키는 타이어를 제작하여 시험하였다.

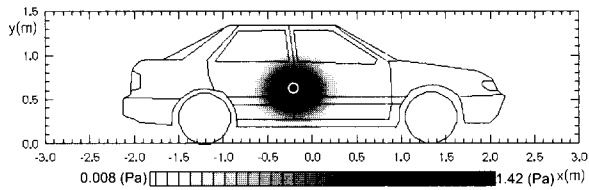
3.2 MFAH방법의 검증

대역 소음에 대한 적용성을 검증하기 위해 중심 주파수를 450 Hz로 고정시키고 대역폭을 10 Hz, 32 Hz, 100 Hz로 변화시켜가면서 홀로그램을 측정하고, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 이때 차량은 등속으로 이동하였다. 세 경우 홀로그램을 잘 구성할 수 있었으나, 대역폭이 10 Hz와 32 Hz의 결과에 비해 중심 주파수에 대하여 22 %의 대역폭을



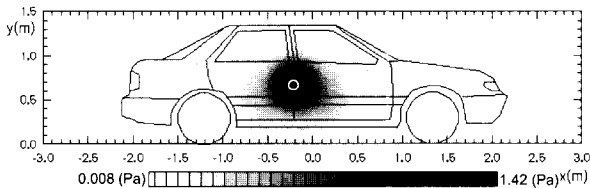
(a)

Running condition-according to ISO 362 pass-by test
Pure tone varying 520 Hz to 530 Hz



(b)

Reference experiment for validation of the method
Running condition- constant speed / 452Hz pure tone

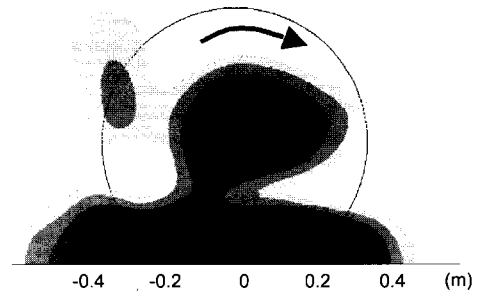


(c)

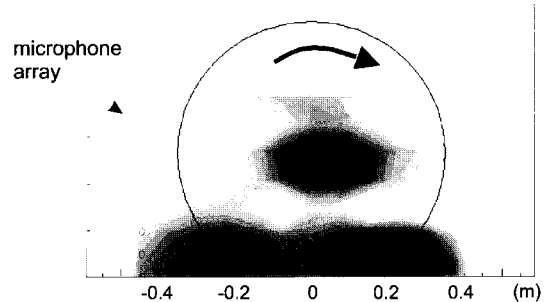
Fig. 7 Validation of MFAH for a pass-by noise. A loud speaker radiates a pure tone signal varying from 520 Hz to 530 Hz. (a) Spectrogram of reference microphone signal. Dashed lines denote the period of our interest. The period is about 0.4 second. (b) Predicted sound field on a source plane (c) Verified result for pure tone

가지는 100 Hz의 결과에서는 소음원의 중심이 대역폭의 영향으로 파장의 1/16배정도 벗어나 있음을 볼 수 있다.

가속 주행 소음에의 적용성을 검증하기 위해서 ISO 362에 규정된 조건을 따라 가속주행 상태에서 소음원의 주파수를 520 Hz에서 530 Hz로 임의로 변화시키면서 홀로그래프를 측정하였다. Fig. 7(a)에 기준 마이크로폰에서 측정된 소음의 스펙트로그램을 나타내었으며, Fig. 7(b)에 제안된 방법으로 얻은 홀로그래프를 나타내었다. 이 결과와 55 km/h



(a)



(b)

Fig. 8 Comparison between STSF and MFAH (a) Predicted sound field on a tire surface by STSF (b) Predicted sound field on a tire surface by MFAH ("O" denotes a microphone).

의 등속으로 이동하면서 452 Hz의 순음을 방사하는 경우에서 얻을 수 있는 홀로그래프 Fig. 7(c)을 비교해 보면 pass-by 소음 측정시 소음의 주파수 변화가 작은 경우에는 MFAH 방법이 잘 적용될 수 있음을 알 수 있다.

한편, 제작된 타이어 소음에의 적용성은 상용화된 STSF(spatial transformation of sound fields)시스템에서 얻은 결과와 비교하여 검증하였다. 협대역 소음을 발생시키는 제작 타이어를 반무향실(semi-anechoic chamber)의 다이나모미터(dynamometer)에 장착하고 50 km/h의 속도로 운전하였다. 이때 타이어는 460 Hz의 중심주파수와 10 Hz의 대역폭을 가지는 협대역 소음을 발생하였다. 먼저 STSF방법으로는 3개의 기준 마이크로폰과 6 cm간격으로 배열된 7개의 마이크로폰으로 구성된 마이크로폰 어레이를 이용하여 17×14 점에서 순차적 측정 방법으로 홀로그래프를 측정하였다. 그리고 1개의 기준 마이크로폰과 6 cm 간격으로 배열된 9개의 마이크로폰으로 구성된 어레이를 이동시켜 MFAH방법에 의한 홀로그래프를 측정하였다. Fig. 8은

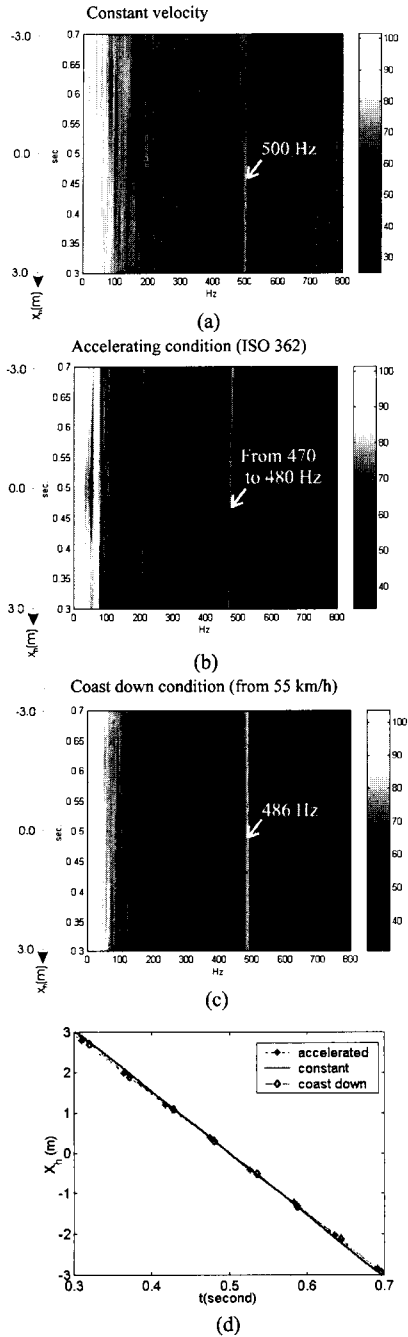


Fig. 9 Tire noise spectrogram for various running condition. The groove and belt angles of the tire are 17.87° and 20°. (a) Constant velocity (b) Accelerating condition (c) Coast down condition. Notice that very small frequency change occurs during the measurement period. (d) Relative position of the line array on the hologram coordinate with respect to time. Speed change is also negligible during measurement distance (6 m). The results assure that the pass-by noise during the period of our interest is quasi-stationary.

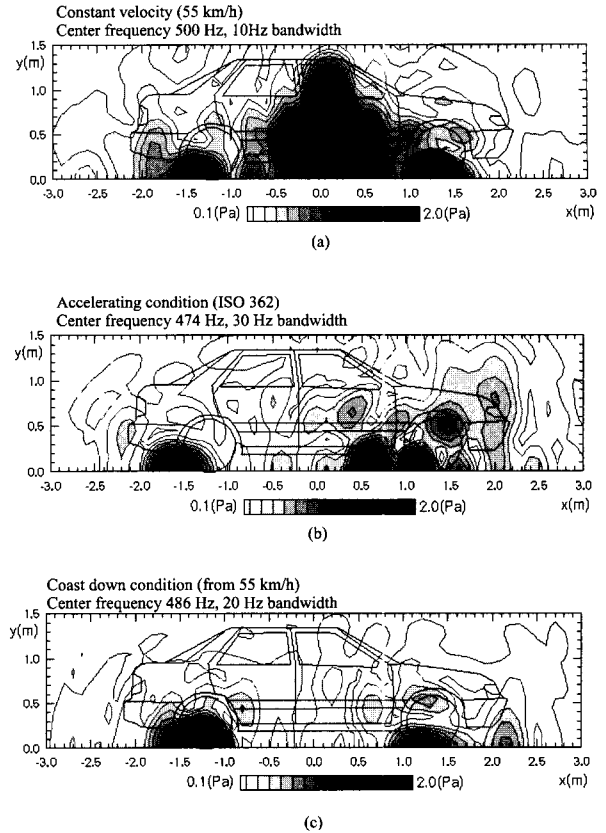


Fig. 10 Tire noise distribution (sound pressure magnitude) on a source plane (a surface of vehicle) according to running condition. (a) Constant velocity (b) Accelerating condition (c) Coast down condition

타이어 표면에서의 예측 음압을 보이고 있는데, 두 방법에 결과가 잘 일치하며, 이를 통해 제작 타이어에 대한 MFAH방법의 적용성을 검증할 수 있었다.

3.3 Pass-by 소음 가시화

협대역 소음을 발생하는 제작 타이어를 이용하여 운전 조건에 따른 방사음장을 가시화하였다. 2개의 제작 타이어를 차량의 우측 전륜 및 후륜에 장착하였고, 반대편은 트레드 패턴이 없는 타이어를 장착하였다. 운전 조건은 등속과 ISO 362에 따른 pass-by 시험 조건(가속 주행) 및 주행 중 엔진을 정지시키고 주행하는 타형 시험(coast down)의 세가지 경우로 하였다. Fig. 9는 각각의 경우에 대한 스펙트로그램 및 시간에 따른 어레이 마이크로폰의 홀로그래프 좌표계에서의 상대 위치를 나타낸다. 이 그림으로부터 가속 주행 및 감속 주행 조건의 경우 속도 변화가 무시할 정도로 작으며, 타이어 소음의 주파수 변화도 작아서 제안된 방법의 적용이 가능함을 알 수 있다.

Fig. 10은 제안된 방법을 이용하여 음원면에서 음압 분포

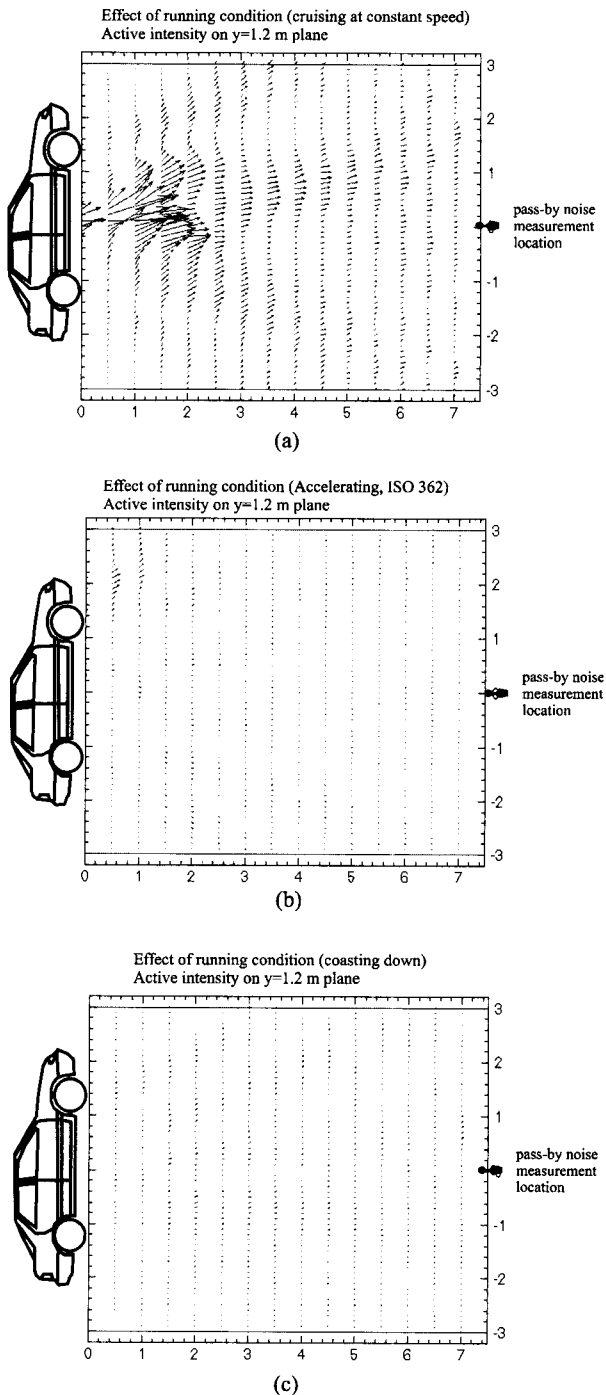


Fig. 11 Propagation of active intensity of tire noise on $y=1.2$ m plane. (a) Constant velocity (b) Accelerating condition (c) Coast down condition

를 가시화한 결과이다. 먼저 55.25 km/h의 등속으로 주행한 경우[Fig. 10(a)]에는 전륜과 후륜에서 방사된 소음이 차량 중앙에서 보강 간섭을 일으키고 있음을 알 수 있다. 한편, ISO 362에 따른 pass-by시험 조건[Fig. 10(b)]에서는

전륜이 후륜보다 큰 소음을 발생시키고 있으며, 방사된 소음이 차량의 전방으로 전파하고 있다. 그러나, 타행 시험[Fig. 10(c)]의 경우는 후륜이 전륜보다 큰 소음을 발생시키는 것을 볼 수 있다. Fig. 11은 가속 주행 소음 측정 위치까지 인텐시티의 전파를 보여주고있다. 비록 방사 음장은 운전 조건에 따라 달라지지만, 7.5 m 떨어진 가속 주행 소음 측정 위치에서는 방사 인텐시티의 분포의 차이가 없음을 알 수 있다.

4. 결 론

개선된 이동 프레임 음향 홀로그래피 방법을 이용하여 이동 음원 및 pass-by 소음의 가시화를 수행하였다. 음원에 이동이 홀로그래피에 미치는 영향은 마하수에 비례하는 홀로그래피에서의 위상 오차를 유발시키는데, 이는 보정을 통하여 감소될 수 있었다. 따라서 음원의 속도가 음속에 비해 매우 작은 경우에는 음원의 이동에 의한 영향을 무시할 수 있으므로, MFAH를 이용한 이동 차량의 소음원의 가시화가 가능하다. 한편 단일 주파수 소음원뿐만 아니라 협대역 소음원 및 pass-by소음 가시화에도 적용 가능하도록 MFAH방법을 개선하였다. 엄밀하게는 MFAH방법은 일반적인 시변 소음에는 적용할 수 없으나, Pass-by소음의 경우는 홀로그래피 구경에 해당하는 측정 구간에서 속도 및 주파수 변화가 작아서 준정상상태 소음으로 가정할 수 있다. 제안된 방법은 스피커 실험 및 STSF 시스템과의 비교를 통해 검증되었으며, 협대역 소음을 발생시키는 타이어를 제작하여 차량의 운전 상태에 따른 소음 분포를 가시화할 수 있었다.

후 기

STSF 시스템에 의한 가시화와 타이어 제작 및 실험을 지원해 주신 한국타이어의 이상주 박사, 김형중, 이승규씨에게 감사드립니다. 본 연구는 한국과학재단(KOSEF), 한국타이어, 과학기술부의 국가지정연구소(NRL)사업에 의해 지원되었으며, 지원에 깊이 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) Maynard, J. D., Williams, E. G., and Lee, Y. 1985., Near Field Acoustic Holography: I. Theory of Generalized Holography and The Development of NAH, J. Acoust. Soc. Am Vol. 78, pp. 1395~1413.
- (2) Williams E. G., and Maynard, J. D., 1982, "Numerical Evaluation of the Rayleigh Integral for Planar Radiators Using the FFT", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 72, pp. 2020~2030.

- (3) Veronesi W. A., and Maynard, J. D., 1987, "Near Field Acoustic Holography (NAH): 2. Holographic Reconstruction Algorithms and Computer Implementation," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 81, pp. 1307~1322.
- (4) 김시문, 권휴상, 김양한, 1995, "원통면 음향 홀로그래피를 이용한 음장 예측의 오차해석 및 적용 방법," *한국소음진동공학회지*, 제 5권, 제 1호, pp. 37~48.
- (5) Kwon H. -S., and Kim, Y. -H., 1995, "Minimization of Bias Error Due to Windows in Planar Acoustic Holography Using a Minimum Error Window," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 98, pp. 2104~2111.
- (6) Nam K.-U., and Kim, Y.-H., 1999, "Errors Due to Sensor and Position Mismatch in Planar Acoustic Holography", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 106, pp. 1655~1665.
- (7) Williams, E. G., Maynard, J. D., and Skudrzyk, E. J., 1980, "Sound Source Reconstruction Using a Microphone Array," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 68, pp. 340~348.
- (8) Hold, J., 1989, "STSF-a Unique Technique for Scan-Based Near-field Acoustic Holography without restrictions on coherence," *Br*
- (9) Hallman D. and J. S. Bolton, 1992, "Multi-Reference Nearfield Acoustical holography," *Proceedings of Inter Noise 92*, pp. 1165~1170.
- (10) Nam K.-U., and Kim, Y.-H., 2000, "Visualization of Multiple Incoherent Sources by the Backward Prediction of Near-Field Acoustic Holography," Submitted to *J. Acoust. Soc. Am.*
- (11) Loyau, T., Pascal J.-C., and P. Gaillard, 1988, "Broadband Acoustic Holography Reconstruction from Acoustic Intensity Measurements. I: Principle of the Method," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 84, pp. 1744~1750.
- (12) Kwon H.-S., and Kim, Y.-H., 1998, "Moving Frame Technique for Planar Acoustic Holography", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 103, pp. 1734~1742.
- (13) Rasmussen, P., Gade S., and Ginn, B., 1996, "Tyre Noise Measurement on a Moving Vehicle," *Proceedings of Fourth International Congress on Sound and Vibration*, pp. 599~602.
- (14) King W. F., III and Bechert, D. 1979, "On the Sources of Wayside Noise Generated by High-Speed Trains," *J. Sound Vib.*, Vol. 66, pp. 311~332.
- (15) Barsikow, B., King W. F., III, and Pfizenmaier, E., 1987, "Wheel/rail Noise Generated by a High-Speed Train Investigated with a Line Array of Microphones", *J. Sound Vib.*, Vol. 118, pp. 99~122.
- (16) Barsikow B., and King, W. F., III, 1988, "On Removing the Doppler Frequency Shift from Array Measurements of Railway Noise," *J. Sound Vib.*, Vol. 120, pp. 190~196.
- (17) Takano, Y., Terada, K., Aizawa, E., Iida, A., and Fujita, H., 1992, "Development of a 2-Dimensional Microphone Array Measurement System for Noise Sources of fast moving vehicles," *Proceedings of Inter Noise 92*, pp. 1175~1178.
- (18) Bühl S., and -P. K., Schmitz, 1993, "Noise source localization on Highspeed Trains Using Different Array Types", *Proceedings of Inter Noise 93*, pp. 1311~1314. *Br*
- (19) Kim, S.-M., Kwon, H.-S., Park, S.-H., and Kim, Y.-H., 1996, "Experimental Comparisons of Sound Visualization Methods for Moving Noise Sources", *Proceedings of Inter Noise 96*, pp. 377~380.
- (20) Poisson, F., Valiere J. C., and Herzog, P., 1998, "High Speed Sound Sources Localization Using Bilinear Time-Frequency Transformation", *Applied Acoustics*, Vol. 53, pp. 1~13.
- (21) Goldstein, M. E., 1976, *Aeroacoustics*, McGraw Hill, New York, Chap 1, pp. 28~37.
- (22) Dowling A. P., and Ffowcs Williams, J. E., 1983, *Sound and Sources of Sound*, Horwood Limited, London, Chap. 9, pp. 199~204.
- (23) Koopmann, G. H., Song, L., and Fahline, J. B., 1989, "A Method for Computing Acoustic Fields Based on the Principle of Wave Superposition", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 86, pp. 2433~2438.
- (24) Jeans R., and Mathews, I. C., 1992, "The Wave Superposition Method as a Robust Technique for Computing Acoustic Fields", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 92, pp. 1156~1166.
- (25) Johnson, M. E., Elliott, S. J., Baek, K-H., and Garcia-Bonito, J., 1998, "An Equivalent Source Technique for Calculating the Sound Field Inside an Enclosure Containing Scattering Objects", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 104, pp. 1221~1231.
- (26) Park S. -H., and Kim, Y. -H., 2000, "Effects of the Speed of Moving Noise Sources on the Sound Visualization by Means of Moving Frame Acoustic Holography (MFAH)", In review, *J. Acoust. Soc. Am.*
- (27) Park S. -H., and Kim, Y. -H., 1998, "An Improved Moving Frame Acoustic Holography for Coherent Band-Limited noise", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 104, pp. 3179~3189.
- (28) Park S. -H., and Kim, Y. -H., 2000, "Visualization of Pass-by Noise by Means of Moving Frame Acoustic Holography," Submitted to *J. Acoust. Soc. Am.*