

지면에 고정된 선형 마이크로폰 어레이를 이용한 pass-by 소음의 가시화

°박순홍*, 김양한**

Visualization of pass-by noise by means of a line array of microphones affixed to the ground

°Soon-Hong Park and Yang-Hann Kim

ABSTRACT

This paper introduces the improved moving frame acoustic holography (MFAH) method and its application. MFAH allows us to visualize the noise generated by moving noise sources by employing a vertical line array of microphones affixed to the ground. The sound field generated by moving sources is different from that of stationary ones due to the movement of the sources. Therefore the measured sound pressure by the microphone on the ground has to be processed so that it cooperates the effect of the movement. This paper discusses the effect of moving noise sources on the obtained hologram by MFAH. This assures the applicability of MFAH to the visualization of moving sources. This paper also reviews the 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. 서론

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 물리량의 예측을 가능하게 하였다.

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 홀로그램을 측정 하여야 하는 문제가 있다. 실제 적용한 예⁽²⁾가 있으나, 측정 구

경 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^(3,9)이 소개된 바 있는데 이는 일종의 빔 형성 방법(*beam forming method*)으로 주로 고속 전철 등에 적용되었다. 이 방법은 가시화하고자 하는 평면에 가정된 음원들의 크기만을 표현하는 방법으로 실제 음원에서 방사하는 소음의 전파 현상을 표현할 수 없는 단점이 있다. 한편 최근 제안된 MFAH 방법^(10,11)은 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 홀로그램에서의 음압 및 위상 오차의 규명을 통하여 MFAH 방법의 이동

*한국과학기술원(KAIST) 기계공학과 대학원

**한국과학기술원(KAIST) 기계공학과

음원 가시화에 대한 적용성을 살펴본다. 또한 기존의 순음 성분(tonal component)⁽¹⁰⁾ 뿐만 아니라 대역 소음⁽¹¹⁾이나 가속 주행(pass-by) 소음⁽¹²⁾ 등의 실제적인 소음 성분에 대한 적용방법을 소개한다. 그리고, 이를 실험적으로 검증하고, 가속 주행 시험(pass-by) 소음에 대한 적용을 통하여 MFAH 방법의 이동 음원 가시화의 적용성을 예시한다.

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. 즉, 음원이 이동하는 경우는 정지한 소음원에 고정된 마이크로폰으로 측정된 홀로그램과는 달리 지면에 고정된 마이크로폰에 의한 측정 음압, 즉 홀로그램에 음원의 이동 속도에 의한 영향이 포함될 것임을 짐작할 수 있다.

일반적인 이동 음원에서 방사되는 음압은 일반화된 그린 공식(Generalized Green's formula)⁽¹³⁾ 또는 Ffowcs Williams 와 Hawkins의 방정식⁽¹⁴⁾에 의해 표현될 수 있음은 잘 알려져 있지만, 근접장 음향 홀로그래피에서는 홀로그램면의 음압 혹은 입자 속도 정보만 필요하므로 임의의 소음원에 의한 음장을 호이겐스 원리(Huygens' principle)에 기초한 파동 중첩의 방법(wave superposition method)⁽¹⁵⁻¹⁷⁾을 이용하여 무수히 많은 단극 음원의 중첩으로 표현할 수 있다. 이동 음원의 경우에도 파동 중첩의 방법의 적용이 가능하다⁽¹⁸⁾. 즉, 음원이 주파수 f_{n0} 의 음파를 방사하는 경우에는

$$p(X=0, Y, Z=z_H; t) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{q_n}{4\pi r_n(t) \sqrt{1-M^2 \sin^2 \theta_n(t)}} \cdot e^{-i2\pi f_{n0} t + i \frac{\omega_n(t)}{1-M^2} [M \cos \theta_n(t) + \sqrt{1-M^2 \sin^2 \theta_n(t)}]} \quad (1)$$

와 같이 일반적으로 표현할 수 있다(자세한 유도 과정은 참고문헌 18을 참조하기 바람). 여기서,

음원의 위치는 방사된 음파가 측정되는 시각 t 에서 동시에 관측되므로 측정 시각의 함수로 표현하였다. 이 식은 $\bar{X} = (X=0, Y, Z=z_H)$ 에 고정된 마이크로폰에서 측정된 $\bar{u}_h = (u, 0, 0)$ 의 속도(마하수 $M=u/c$)로 이동하는 음원의 방사 음압을 표현한다. 여기서, q_n 와 \bar{Y}_n 는 n 번째 이동 단극 음원의 크기 및 위치 벡터를, $k = 2\pi f_{n0}/c$, $r_n(t) = |\bar{X} - \bar{Y}_n(t)|$, $\theta_n(t)$ 는 속도 벡터 \bar{u}_h 와 $\bar{r}_n(t)$ 이 이루는 각을 표현한다(Fig. 1).

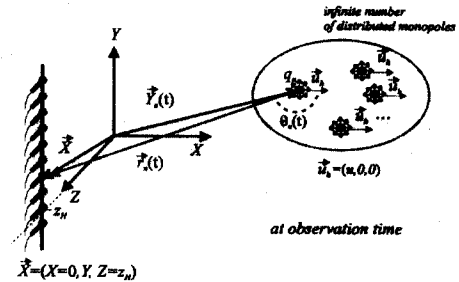


Fig. 1. Position vectors of distributed monopole sources and a line array of microphones in the reference coordinate at the observation time

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 측정 음압에 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 있을만큼 작다고 가정한다. 음원이 이동하고, 마이크로폰이 정지한 경우는 기준 좌표계 (X, Y, Z) 가 측정 좌표계와 항상 동일하므로 식(1)로 표현되는 기준 좌표계에서의 음압은 측정 좌표계에서의 음압 p_m 으로

$$p(X=0, Y, Z=z_H; t) = p_m(x_m=0, y_m, z_m=z_H; t) \quad (2)$$

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

$$x_h = S_{m/h}(t) + x_m, \quad y_h = y_m, \quad z_h = z_m$$

where, $S_{m/h}(t) = \int_0^t u_{m/h}(\tau) d\tau$ (3)

의 상대 좌표 변환을 이용하여,

$$p_m(0, y_m, z_H; t) = p_h(S_{m/h}(t), y_h, z_H; t) \quad (4)$$

와 같이 얻을 수 있다. MFAH의 이해를 위해 가장 간단한 경우인 평면파 음장을 생각해 보기로 한다. 임의의 평면 $z_h = z_H$ 에서

$$p_h(x_h, y_h, z_H; t) = P_0 e^{ik_x x_h} e^{-i2\pi f_0 t} \quad (5)$$

와 같이 x_h 방향으로 진행하는 평면파를 가정하자. 여기서 홀로그램은 $P_0 e^{ik_x x_h}$ 으로서 공간상의 음압 분포를 표현한다. 식(5)는 순음의 경우 음장은 공간상의 정보(홀로그램, $P_0 e^{ik_x x_h}$)와 시간상의 정보($e^{-i2\pi f_0 t}$)의 곱의 형태로 표현됨을 보여준다. 한편 마이크로폰이 x 방향으로 $u_m(t) = u_m(t)$ 의 속도를 가지고 이동하는 경우, 마이크로폰에서 측정된 시간 신호에도 이와 같은 정보를 포함하게 되며 이는 도플러 효과로서 표현된다. 부연하면 도플러 효과는 음장의 형태에 따라 다른 형태로 표현되므로 도플러 효과를 통해 음장을 역으로 유추할 수 있다. 식(4)와 (5)로부터 이동하는 마이크로폰에서 측정하는 시간 신호는 식(6)과 같이 표현할 수 있다.

$$p_m(0, y_m, z_H; t) = p_h(S_{m/h}(t), y_h, z_H; t), \quad (6)$$

$$= P_0 e^{ik_x \cos \theta_{n,1}(t)} e^{-i2\pi f_0 t}$$

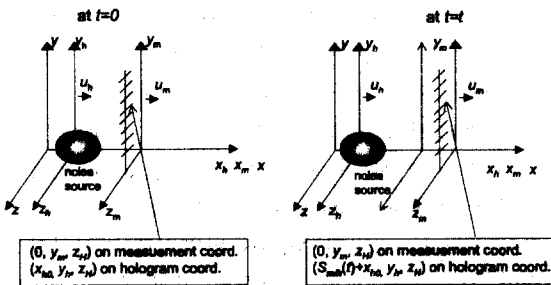


Fig. 2. Three coordinate systems employed in moving frame acoustic holography and the relative coordinate transformation

이 식으로부터 홀로그램은 주파수(f_{h0}) 및 상대 좌표 변환식($x_h = S_{m/h}(t)$)을 알면 식(6)의 양변에 $e^{i2\pi f_0 t}$ 을 곱하여 얻을 수 있으며, 이는 측정 신호의 복소 포락(complex envelope)으로 표현됨을 알 수 있다.(11) 한편, 임의의 음장은 평면파의 중첩으로 표현 가능하므로 이 결과는 임의의 단일 주파수 음장에 대해 확장 가능하다.

이제, 식(1),(2) 및 (4)로부터 임의의 이동 음원에 의한 홀로그램은 다음식과 같이 얻을 수 있다.

$$P_h(x_h = S_{m/h}(t), y_h, z_H; f_{h0}) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{q_n}{4\pi r_n \sqrt{1 - M^2 \sin^2 \theta_n}} \quad (7)$$

$$\times e^{ik_x \frac{M \cos \theta_n + \sqrt{1 - M^2 \sin^2 \theta_n}}{1 - M^2}}$$

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 위치와 홀로그램의 임의의 점과의 거리를 표현하며, θ_n 는 r_n 과 x_h 축이 이루는 각도를 표현한다. 식(7)에는 음원의 속도에 의한 영향이 명확히 표현되어 있는데 $M \ll 1$ 인 경우

$$P_h(x_h, y_h, z_H; f_{h0}) \cong \sum_{n=0}^{\infty} \left(1 + \frac{1}{2} M^2 \sin^2 \theta_n \right) e^{ik_x M \cos \theta_n} \quad (8)$$

$$\times P_{h,n}^{true}(x_h, y_h, z_H; f_{h0})$$

$$\cong \sum_{n=0}^{\infty} e^{iMk_x} e^{-iMk_x} \cdot P_{h,n}^{true}(x_h, y_h, z_H; f_{h0})$$

과 같이 간략화 할 수 있다. 여기서 $P_{h,n}^{true}(x_h, y_h, z_H; f_{h0}) = q_n e^{ik_x} / 4\pi r_n$ ($n = 0, 1, 2, \dots$)은 음원의 이동이 없는 경우 n 번째 단극 음원의 홀로그램을 표현한다. 이 식은 홀로그램에서 음원의 이동에 의한 오차가 마하수에 비례함을 보여주고 있으며, 특히 홀로그램의 크기($O(M^2)$)보다 위상에 더 큰 오차($O(M)$)가 야기됨을 나타낸다. 또한 이 식은 홀로그램에 e^{-iMk_x} 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 보여 주고 있다.(12)

2.2 대역 소음에 대한 적용 방법⁽¹¹⁾

소음원이 대역 소음을 발생시키는 경우 그 대역폭이 중심 주파수에 비해 10% 미만인 협대역 소음이라면 MFAH를 이용하여 대역 소음의 홀로그람을 구하는 것이 가능하다⁽¹¹⁾. 협대역 소음의 중심 주파수와 대역폭을 각각 f_{hc} 와 B 라 하면 (Fig. 3), 음장은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_h(x_h, y_h, z_H; t) = \int_{f_{h-}}^{f_{h+}} P_h(x_h, y_h, z_H; f_h) \times e^{-i2\pi f_h t} df_h \quad (9)$$

여기서, $f_{h-} = f_{hc} - B/2$, $f_{h+} = f_{hc} + B/2$ 이다. 만약 소음이 비독립 음원(uncorrelated sources)에 의해 형성되었다면 음장은 다음과 같이 모델링 가능하다.

$$P_h(x_h, y_h, z_H; f_h) \equiv A(f_h)P_{hc}(x_h, y_h, z_H; f_{hc}) \quad (10)$$

여기서, $A(f_h)$ 는 정규화된 음원 스펙트럼을 표현한다(Fig. 3).

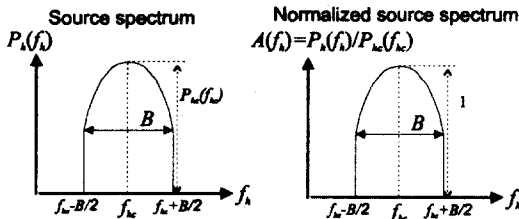


Fig. 3. Illustrations of source spectrum and normalized source spectrum.

따라서 식(9)는

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

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

$$A(f_h) = P_{ref}(\bar{x}_{ref}; f_h) / P_{ref,c}(\bar{x}_{ref}; f_{hc}) \quad (12)$$

여기서 $\bar{x}_{ref} = (x_{ref}, y_{ref}, z_{ref})$ 는 기준 마이크로폰의 위치를 나타내며, $P_{ref}(\bar{x}_{ref}; f_h)$ 와 $P_{ref,c}(\bar{x}_{ref}; f_{hc})$ 는 각

각 주파수 f_h 와 중심 주파수 f_{hc} 에서의 스펙트럼을 표현한다. 따라서, 식(11)과 (12)로부터 협대역 소음의 음장은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$P_h(x_h, y_h, z_H; t) \equiv P_{hc}(x_h, y_h, z_H; f_{hc}) \times \frac{\int_{f_{h-}}^{f_{h+}} P_{ref}(\bar{x}_{ref}; f_h) e^{-i2\pi f_h t} df_h}{P_{ref,c}(\bar{x}_{ref}; f_{hc})} \quad (13)$$

$$= P_{hc}(x_h, y_h, z_H; f_{hc}) \times \frac{P_{ref}(\bar{x}_{ref}; t)}{P_{ref,c}(\bar{x}_{ref}; f_{hc})}$$

이 식으로부터 협대역 소음도 공간 정보를 표현하는 홀로그람과 시간 정보를 표현하는 음원 스펙트럼의 곱의 형태로 표현될 수 있으므로 MFAH 방법으로 홀로그람을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 즉, 마이크로폰 어레이에서 얻은 측정 신호는 식 (4)와 (13)으로부터

$$P_m(0, y_m, z_H; t) = P_{hc}(x_h = S_{m/h}(t), y_h, z_H; f_{hc}) \times \frac{P_{ref}(\bar{x}_{ref}; t)}{P_{ref,c}(\bar{x}_{ref}; f_{hc})} \quad (14)$$

과 같이 표현되므로 협대역 소음의 홀로그람(P_{hc})은 복소 측정 신호(p_m)를 기준 마이크로폰 신호($p_{ref} / P_{ref,c}$)로 나누어 얻을 수 있다.

2.3 Pass-by 소음에 대한 적용 방법⁽¹⁸⁾

MFAH 방법은 순차적 측정 방법처럼 홀로그람이 시간에 대해 정상 상태를 유지하는 경우에 적용 가능하므로, 엄밀하게는 일반적인 시변 소음에 적용될 수 없다. ISO 362의 가속 주행(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 홀로그람 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 18을 참조하기 바란다.

3. 이동 음원 및 pass-by 소음의 가시화

MFAH 방법의 이동 음원 및 pass-by 소음에의 적용성을 검증하기 위해 음장의 형태가 잘 알려져 있고, 원하는 소음을 발생시킬 수 있는 스피커 유닛을 이용한 실험을 수행하였으며, 가속 주행(pass-by) 소음 가시화도 동일한 실험 장치를 이용하여 수행하였다. 음압 신호를 측정하기 위해 16 개의 마이크로폰으로 구성된 선형 마이크로폰 어레이를 지면에 고정하였고, 마이크로폰 사이의 간격은 0.1 m로서 1 kHz 미만의 소음 성분에 대하여 공간상의 에일리어스없이 측정 가능하게 구성하였다. 스피커 부근에 기준 신호를 측정 할 수 있도록 기준 마이크로폰을 1 개 부착하였다. 한편, 가속 주행 소음 가시화에는 음압에 대한 가관측성(observability)을 고려하여 2 개를 이용하였다. 그리고, 타이어의 RPM 신호도 동시에 측정하였는데, 타이어 1 회전당 이동 거리를 등속 실험을 통해 추정한 후 10 m 간격의 광 센서(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 32 채널을 동시 측정할 수 있는 다채널 신호 수집기(HP3566A)를 통해 측정하였다. 기준 마이크로폰 신호와 어레이 마이크로폰 신호는 동시에 측정되어야 하는데, 이를 위해 동기화 신호 송신기 및 수신기를 제작하여 이용하였다. 한편 가속 주행 시험의 경우 협대역을 발생시키는 타이어를 제작하여 시험하였다.

가속 주행 소음에의 적용성을 검증하기 위해서는 ISO 362 에 규정된 조건을 따라 가속주행 상태에서 소음원의 주파수를 520 Hz 에서 530 Hz 로 임의로 변화시키면서 홀로그람을 측정하였다. Figure 4(a)에 기준 마이크로폰에서 측정된 소음의 스펙트로그램을 나타내었으며, Fig. 4(b)에 제안된 방법으로 얻은 홀로그람을 나타내었다. 이 결과와 55 km/h 의 등속으로 이동하면서 452 Hz 의 순음을 방사하는 경우에 얻을 수 있는 홀로그람(Fig. 4(c))을 비교해 보면 pass-by 소음 측정시 소음의 주파수 변화가 작은 경우에는 MFAH 방법이 잘 적용될

수 있음을 알 수 있다.

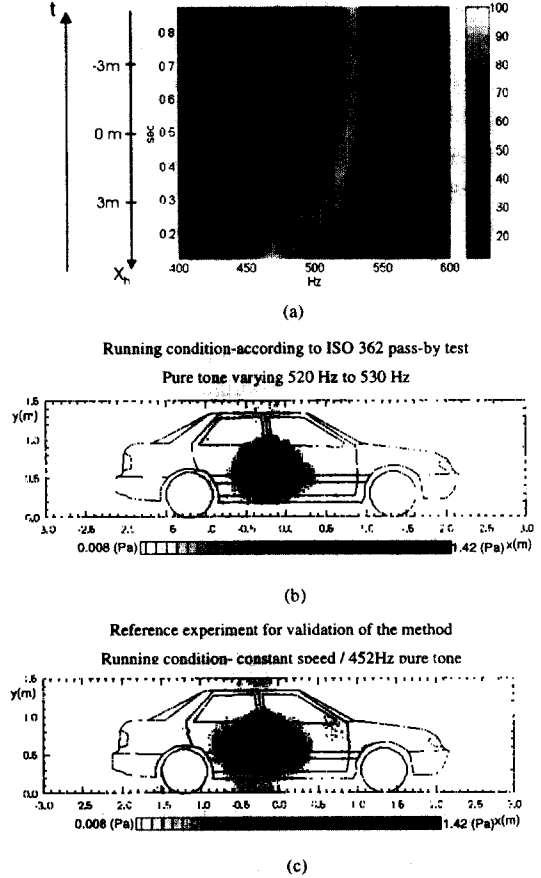


Fig. 4 Validation of MFAH for a pass-by noise.

(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.

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 다이내모(dynamometer)에 장착하고 50 km/h 의 속도로 운전하였다. 이때 타이어는 460 Hz 의 중심주파수와 10 Hz 의 대역폭을 가지는 협대역 소음을 발생하였다. 먼저 STSF 방법으로는 3 개의 기준 마이크로폰과 6 cm 간격으로 배열된 7 개의 마이크로폰으로 구성된 마이크로폰

어레이를 이용하여 17x14 점에서 순차적 측정 방법으로 홀로그람을 측정하였다. 그리고, 1개의 기준 마이크로폰과 6 cm 간격으로 배열된 9개의 마이크로폰으로 구성된 어레이를 이동시켜 MFAH 방법에 의한 홀로그람을 측정하였다. Figure 5는 타이어 표면에서의 예측 음압을 보이고 있는데, 두 방법에 결과가 잘 일치하며, 이를 통해 제작 타이어에 대한 MFAH 방법의 적용성을 검증할 수 있었다.

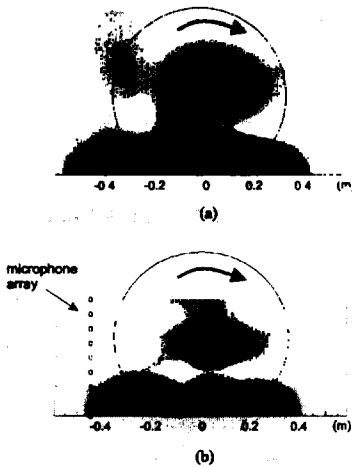


Fig. 5 Comparison between STSF and MFAH (a) Predicted sound field on a tire surface by STSF (b) Predicted sound field on a tire surface by MFAH ("O" denotes a microphone).

협대역 소음을 발생하는 제작 타이어를 이용하여 운전 조건에 따른 방사음장을 가시화하였다. 2개의 제작 타이어를 차량의 우측 전륜 및 후륜에 장착하였고, 반대면은 트레드 패턴이 없는 타이어를 장착하였다. 운전 조건은 등속과 ISO 362에 따른 pass-by 시험 조건(가속 주행) 및 주행중 엔진을 정지시키고 주행하는 타행 시험(coast down)의 세가지 경우로 하였다. Figure 6은 각각의 경우에 대한 스펙트로그램 및 시간에 따른 어레이 마이크로폰의 홀로그람 좌표계에서의 상대 위치를 나타낸다. 이 그림으로부터 가속 주행 및 감속 주행 조건의 경우 속도 변화가 무시할 정도로 작으며, 타이어 소음의 주파수 변화도 작아서 (Fig. 6(d)) 제안된 방법의 적용이 가능함을 알 수 있다.

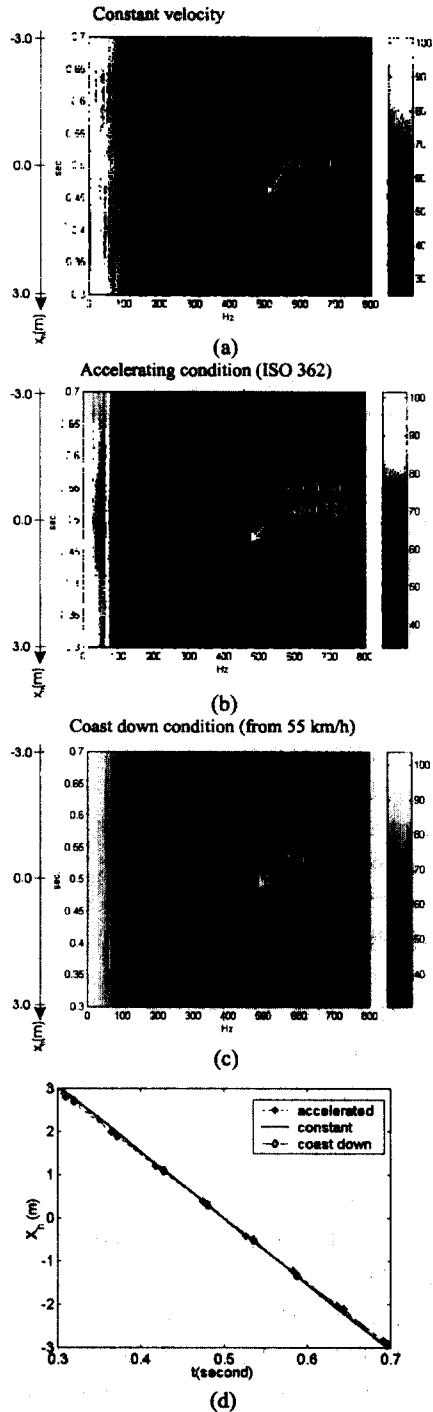


Fig. 6 Tire noise spectrogram for various running condition. The groove and belt angles of the tire are 17.87° and 20° .

Figure 7은 제안된 방법을 이용하여 음원면에서 음압 분포를 가시화한 결과이다. 먼저 55.25 km/h의 등속으로 주행한 경우(Fig. 7(a))에는 전륜과 후륜에서 방사된 소음이 차량 중앙에서 보강 간섭을 일으키고 있음을 알 수 있다. 한편, ISO 362에 따른 pass-by 시험 조건(Fig. 7(b))에서는 전륜이 후륜보다 큰 소음을 발생시키고 있으며, 방사된 소음이 차량의 전방으로 전파하고 있다. 그러나, 타행 시험(Fig. 7(c))의 경우는 후륜이 전륜보다 큰 소음을 발생시키는 것을 볼 수 있다.

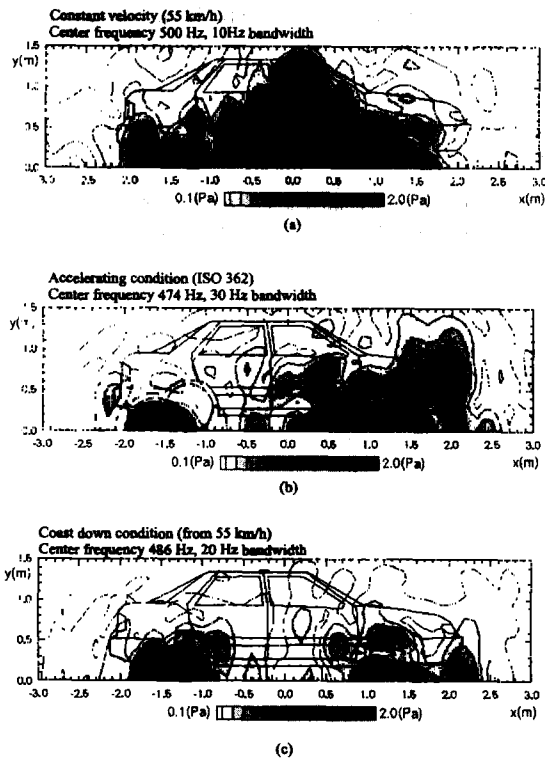


Fig. 7. Tire noise distribution (sound pressure magnitude) on a source plane (a surface of vehicle) according to running condition. (a) Constant velocity (b) Accelerating condition (c) Coast down condition

4. 결론

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-by 소음 가시화에도 적용 가능하도록 MFAH 방법을 개선하였다. 엄밀하게는 MFAH 방법은 일반적인 시변 소음에는 적용할 수 없으나, Pass-by 소음의 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 가시화 할 수 있었다.

후기

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

참고 문헌

- (1) J. D. Maynard, E. G. Williams, and Y. Lee, 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) P. Rasmussen, S. Gade and B. Ginn, 1996, "Tyre noise measurement on a moving vehicle," Proceedings of Fourth international congress on sound and vibration, pp.599-602.
- (3) W. F. King III and D. Bechert, 1979, "On the sources of wayside noise generated by high-speed trains," J. Sound Vib., Vol. 66, pp.311-332.
- (4) B. Barsikow, W. F. King III, and E. Pfizenmaier, 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.

- (5) B. Barsikow and W. F. King, III, 1988, "On removing the Doppler frequency shift from array measurements of railway noise," *J. Sound Vib.*, Vol. 120, pp.190~196.
- (6) Y. Takano, K. Terada, E. Aizawa, A. Iida, and H. Fujita, 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.
- (7) S. Brühl and K. -P. Schmitz, 1993, "Noise source localization on highspeed trains using different array types," *Proceedings of Inter Noise 93*, pp. 1311~1314.
- (8) S.-M. Kim, H.-S. Kwon, S.-H. Park, and Y.-H. Kim, 1996, "Experimental comparisons of sound visualization methods for moving noise sources," *Proceedings of Inter Noise 96*, pp. 377~380.
- (9) F. Poisson, J. C. Valiere and P. Herzog, 1998, "High speed sound sources localization using bilinear time-frequency transformation," *Applied Acoustics*, Vol. 53, pp. 1~13.
- (10) H.-S. Kwon and Y.-H. Kim, 1998, "Moving frame technique for planar acoustic holograph," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.103, pp.1734~1742.
- (11) S. -H. Park and Y. -H. Kim, 1998, "An improved moving frame acoustic holography for coherent band-limited noise," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol 104, pp. 3179~3189.
- (12) S. -H. Park and Y. -H. Kim, 2000, "Visualization of pass-by noise by means of moving frame acoustic holography," Submitted to *J. Acoust. Soc. Am.*
- (13) M. E. Goldstein, 1976, *Aeroacoustics*, McGraw Hill, New York, Chap 1, pp. 28~37.
- (14) A. P. Dowling and J. E. Ffowcs Williams, 1983, *Sound and Sources of Sound*, Horwood Limited, London, Chap. 9, pp. 199~204.
- (15) G. H. Koopmann, L. Song, and J. B. Fahline, 1989, "A method for computing acoustic fields based on the principle of wave superposition," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 86, pp.2433~2438.
- (16) R. Jeans and I. C. Mathews, 1992, "The wave superposition method as a robust technique for computing acoustic fields," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 92, pp. 1156~1166.
- (17) M. E. Johnson, S. J. Elliott, K-H. Baek, and J. Garcia-Bonito, 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.
- (18) S. -H. Park and Y. -H. Kim, 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.*