

선형 마이크로폰 어레이를 이용한 이동 차량의 음장 가시화

◦김시문*, 권휴상*, 박순홍*, 김양한**

Noise Visualization of Moving Vehicles Using Microphone Line Array

Seamoon Kim, Hyu-Sang Kwon, Soonhong Park, Yang-Hann Kim

ABSTRACT

To visualize sound field or to identify noise sources, we can use many methods such as intensity method, acoustic holographic method, source identification method using line array, etc. Conventionally all these methods are performed with the assumption of stationary condition in space and time. But for moving source, spatial characteristics and frequency components are changing, so we need another processing algorithm. This paper shows some experimental results - sound field by moving noise sources. In the experiment cross type microphone line array is used for sensing pressure and cars and a motorcycle are used as moving sources that are assumed to have constant speed. The processing methods are acoustic holographic method, spherical beamforming and spectrogram.

1. 서론

소음원을 추적하거나 소음원으로부터 발생하는 음장을 가시화하기 위한 방법으로 인텐시티 방법(intensity method) [1], 음향 홀로그래피(acoustic holography) 방법[2], 마이크로폰 선형 어레이를 이용한 소음원 추적 방법[3-6] 등이 있다. 이들 방법은 시간 및 공간상에서 정상 상태(stationary)라는 가정에 의해 음압 분포 등의 소음원에 대한 정보를 얻고 있으며 이들 방법에 의해서 음원을 추적하는 방법은 많이 연구되어 왔다. 또한 소음원

이 이동하고 있는 경우에 필연히 발생하는 도플러 효과(Doppler effect)를 고려하여 음장을 구성하는 시도도 계속되어 오고 있다[7-8]. 본 연구에서는 승용차 및 오토바이의 경우에 발생하는 음장 및 소음원을 음향 홀로그래피 방법, 구면파 가정을 바탕으로 한 빔형성 방법(spherical beamforming method), 스펙트로그램(spectrogram) 등 세가지 방법을 적용하여 구하였으며 각 방법의 결과를 비교하여 보았다.

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

** 한국과학기술원 기계공학과

2. 기본 이론

본 연구에서 음장 해석을 위해 사용되어진 세 가지 방법을 요약해 보면 다음과 같다.

2.1. 음향 홀로그래피 방법[9]

마이크로폰 어레이의 m 번째 마이크로폰에 수신되는 신호 $p_m(t)$ 는

$$p_m(t) = p(x = vt, y = y_m, z = z_m, t) \quad (1)$$

와 같이 얻어진다. 여기서 v 는 음원의 속도를 p 는 음원이 정지해 있는 경우 공간상의 임의의 위치에 서의 음압 신호를 나타내며

$$p(x, y, z, t) = \text{Re}\{s(x, y, z)e^{-j\omega t}\} \quad (2)$$

와 같이 표현될 수 있다. 여기서 s 는 음원에 의한 공간상의 음압 분포를 나타낸다. 마이크로폰 신호의 주파수 성분은 푸리에 변환(Fourier transform)에 의해

$$P_m(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} p_m(t)e^{j\omega t} dt \quad (3)$$

와 같이 구할 수 있으며 이를 식 (1) 및 (2)를 이용하여 정리하면

$$P_m(\omega) = \frac{1}{v} S\left(\frac{\omega_c - \omega}{v}\right) \quad (4)$$

와 같이 구할 수 있다. 여기서 S 는

$$S(k_x) = \int_{-\infty}^{\infty} s(x, y, z)e^{-jk_x x} dx \quad (5)$$

와 같이 음압의 공간상의 파수 성분을 나타낸다. 식 (4)와 식 (5)로부터 마이크로폰 신호와 공간상의 파수 성분과의 관계를 얻을 수 있으며 이로부터 홀로그래피 이론을 적용하여 음원면에서의 음압 및 인텐시티를 구할 수 있다[2].

2.2. Spherical beamforming 방법[5-6]

M 개의 마이크로폰에 수신되는 음압 신호의 열 벡터(column vector)를 \mathbf{P} 라 하면 상관행렬(correlation matrix) \mathbf{R} 은

$$\mathbf{R} = \mathbf{E}[\mathbf{P}\mathbf{P}^H] \quad (6)$$

와 같이 표현되며 이때 beamforming 파워는

$$\text{Power} = \mathbf{W}^H \mathbf{R} \mathbf{W} \quad (7)$$

와 같이 구해진다[5]. 여기서 가중벡터(weighting vector) \mathbf{W} 의 m 번째 원소 w_m 은 구면과 가정에 의해

$$w_m(t) = \frac{1}{\sqrt{M}} e^{-j2\pi f(t)r_m(t)/c} \quad (8)$$

와 같이 표현되며 f 는 주파수 r_m 은 음원과 마이크로폰 사이의 거리, c 는 음파 속도이다. 정지 음원의 경우와는 달리 이동 음원의 경우에는 w_m 이 시간에 따라 변하게 되어 시간의 함수로 표현하며 기존의 beamforming 방법을 적용하여 음원의 위치를 추적한다.

2.3. 스펙트로그램[10]

스펙트로그램은 공간상에 존재하는 주파수 성분의 크기 분포를 그린 것으로 마이크로폰에 수신되는 음압 신호를 일정시간 간격으로 푸리에 변환(Fourier transform)하여 구할 수 있다.

3. 실험 장치 및 방법

이동 음원으로는 승용차 및 오토바이를 사용하였다. 실험 장소로는 차량 이외의 음원의 영향을 받지 않고 충분히 정속 운행이 가능하도록 반사파가 적고 조용한 넓은 장소를 택했다. 마이크로폰

은 Fig. 1 과 같이 두 선형 어레이의 조합 형태인 +형태로 하였으며 세로 방향으로는 16 개, 가로 방향으로는 15 개가 되도록 하였다. 마이크로폰 사이의 간격은 1kHz 이하에서 엘리어싱 효과(aliasing effect)를 무시할 수 있어 음장을 충분히 해석 가능한 길이인 10cm 로 하였으며 이때 구경 크기는 세로 방향으로 1.5m 가 되어 충분히 차량 전체를 측정할 수 있도록 하였다. 이동중의 차량의 위치를 측정하기 위하여 2 개의 포토 센서(photoelectric sensor)를 6m 간격으로 설치하였다. 음원 이동 속도는 등속 운동 가정하에 구하였으며 포토 센서 하나는 신호 입력의 시작을 알리는 트리거(trigger) 신호로 사용되어졌다. 데이터 입력은 32 채널 신호분석기(HP3566A)를 통하여 받았으며 그 중 30 채널은 어레이 마이크로폰 신호, 하나의 채널은 포토 센서로부터 나오는 신호를 받았으며 나머지 한 채널은 파워 스펙트럼 측정용 마이크로폰 센서 입력으로 사용되었다.

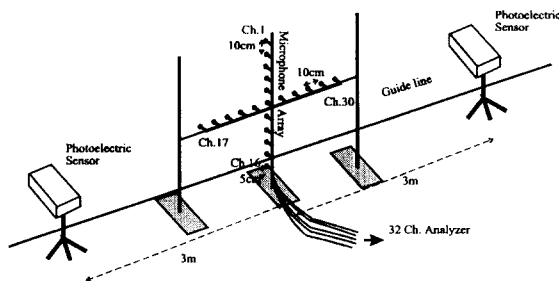


Fig. 1 Experimental setup - microphone line array and photoelectric sensors

3.1. 단일 주파수 음원 실험

차량 소음 측정에 앞서 본 연구에서 사용되어진 실험 및 신호처리 방법의 검증을 위해 단일 주파수로 구동되는 스피커(speaker) 음원을 이용하였다. 스피커를 승용차의 측면에 부착하고 승용차를 약 30km/h 의 속도로 마이크로폰 앞으로 지나가

게 하여 음압 신호를 받았다. 스피커의 구동은 신호생성기로 700Hz 의 단일 주파수를 내도록 하였으며 전기 파워는 차량 자체에 의하여 공급받았다.

3.2. 승용차 소음 측정 실험

승용차의 이동에 의하여 도플러 효과의 발생으로 마이크로폰에 측정되는 주파수가 변하게 된다. 따라서 도플러 효과의 현상이 나타나지 않는 보다 정확한 주파수 성분을 측정하기 위해 차실 내에서 마이크로폰과 DAT(Digital Audio Tape Recorder)를 이용하여 음압을 측정하여 주파수 성분을 구하였다. 승용차 A 및 B 의 두대를 측정 대상 차량으로 사용하였으며 승용차의 이동 속도는 앞의 실험과 마찬가지로 약 30km/h 가 되게 하였다.

3.3. 오토바이 소음 측정 실험

실험 방법은 앞의 실험과 동일하게 하였다. 단 오토바이의 경우 승용차의 경우와는 달리 주파수 성분 측정을 위해서 마이크로폰 및 DAT 사용이 불가능하여 차량이 진행하는 방향의 정면에 마이크로폰을 고정된 후 음압을 측정하였고 도플러 효과에 의한 주파수 변화식을 이용하여 실제로 방사하고 있는 주파수 성분을 계산하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

전술한 바와 같이 음향 홀로그래피 방법, 구면파 가정에 의한 beamforming 방법, 스펙트로그램 등 세가지 방법을 이용하여 차량에서 방사되는 음압 분포와 소음원을 추정하여 보았다. 음향 홀로그래피 및 스펙트로그램 방법 적용시에는 수직으로 세워져 있는 16 개의 마이크로폰 음압 신호를 이용하였으며 빔형성 방법 적용시에는 30 개의 음

압 신호 모두를 사용하였다.

4.1. 단일 주파수 음원 실험

Fig. 2는 700Hz 단일 주파수 성분을 가진 스피커 음원이 8.024m/s의 속도로 이동하고 있을 때 세 방법을 적용하여 얻은 결과이다. (a) 및 (b)는 음향 홀로그래피 방법을 적용하여 가정한 음원면에서의 음압 분포 및 인텐시티를 나타낸 그림인데 음원의 위치를 정확히 찾아 주고 있다. (c)는 구면파 음원을 가정하여 빔형성 방법을 적용했을 시의 beamforming 파워를 나타낸 그림인데 음원이 위치하여 있는 곳에서 가장 큰 값을 나타내고 있다. (d)는 스펙트로그램을 나타내고 있으며 스피커에 근접해 있는 마이크로폰에서 더 큰 신호 파워를 가질 것이므로 음원의 위치를 유추할 수 있다. (d)의 결과에서는 소음원의 실제 위치와 측정된 음압 분포와 정확히 일치하지 않는데 이는 (a)~(c)의 결과는 스피커가 위치한 음원면에서의 결과를 나타내지만 (d)는 마이크로폰 위치에서의 음압 분포로서 음파가 전파되면서 음장 특성이 변하기 때문이다. 실제로 스피커는 차량에 부착되어 이동되었으므로 스피커 음뿐만 아니라 차량에 의한 소음도 있으며 그중 700Hz 성분만을 선택하여 데이터 처리를 하였고 또한 스피커 음의 파워를 충분히 크게 하였기 때문에 소음원의 위치를 정확히 찾을 수 있었다. 본 실험의 결과로부터 다른 주파수 성분에 대하여 신호 처리를 하는 경우에 있어서도 음원의 위치를 찾을 수 있음을 알 수 있다.

4.2. 승용차 소음 측정 실험

도플러 효과가 나타나지 않도록 차량과 같은 속도로 이동하는 마이크로폰을 차실 내에 설치하

여 파워 스펙트럼을 구하였다. 승용차 A 및 승용차 B의 두개의 모델을 가지고 실험을 행하였는데 Fig. 3은 승용차 A의 경우 132Hz 성분에 대해서 세 방법에 의해 얻은 결과이다. 이때 차량의 속도는 8.181m/s였다. 결과를 보면 알 수 있듯이 차량의 아래 부분에 음압이 존재하는 것으로 나타났다.

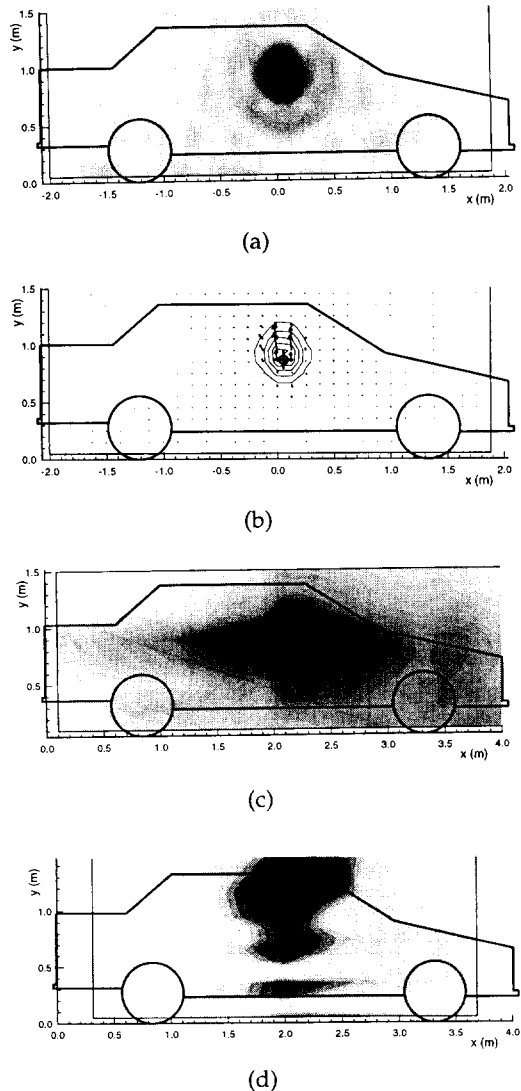


Fig. 2 Experimental results for moving car with pure tone noise with frequency of 700 Hz (a) Sound pressure (b) Sound intensity (c) Beamforming power (d) Spectrogram

Fig. 4는 승용차 B의 경우 608Hz 성분에 대해서 얻은 결과로서 승용차 A의 경우와 같이 차량 아래 부분에 소음원이 집중되어 있는 것을 알 수 있으며 특히 바퀴 근방에서 가장 큰 음원이 있다고 할 수 있다.

4.3. 오토바이 소음 측정 실험

Fig. 5 및 Fig. 6은 오토바이의 경우 각각 186Hz와 806Hz에서의 결과를 나타내고 있다. 결과를 보면 알 수 있듯이 186Hz에서는 소음기의 끝단에서 806Hz에서는 오토바이의 중앙 부분에 소음원이 있는 것을 알 수 있으며 이는 엔진에 해당하는

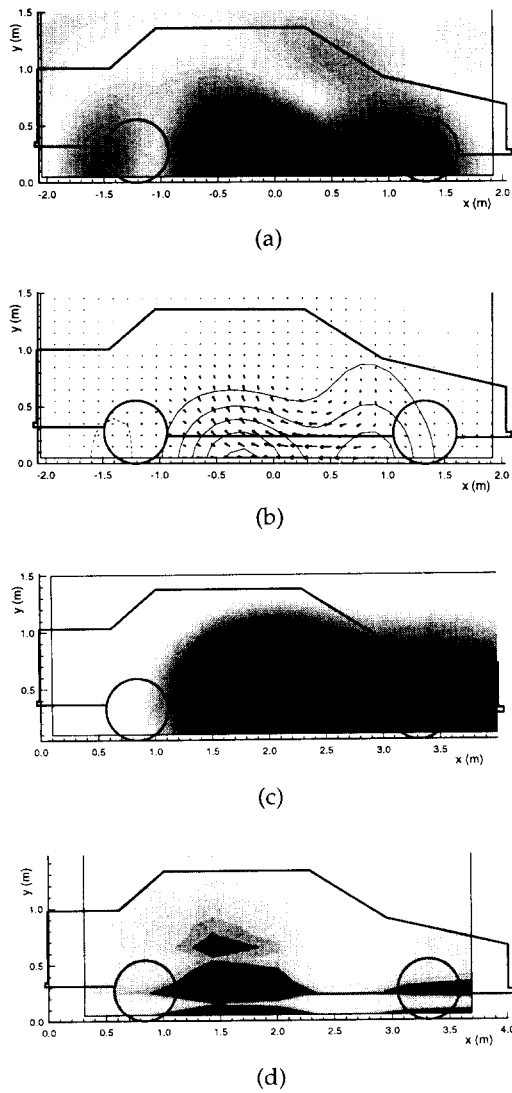


Fig. 3 Experimental results for moving car A at frequency of 132 Hz (a) Sound pressure (b) Sound intensity (c) Beamforming power (d) Spectrogram

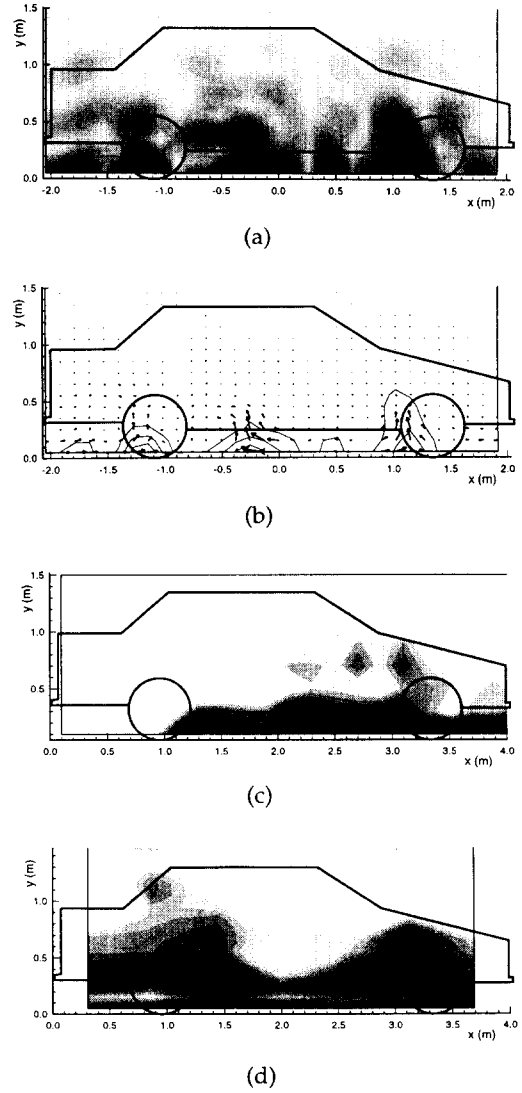


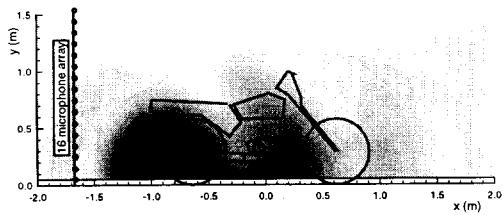
Fig. 4 Experimental results for moving car B at frequency of 608 Hz (a) Sound pressure (b) Sound intensity (c) Beamforming power (d) Spectrogram

부분으로서 806Hz 성분이 엔진에서 나오고 있음을 알 수 있다.

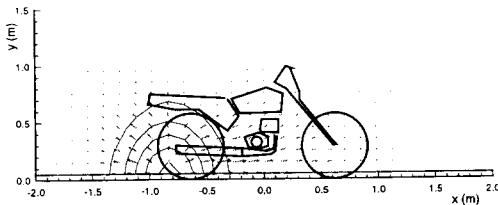
5. 결론

+형 마이크로폰 선형 어레이가 고정되어 있고 차량이 그 앞을 통과할 때, 마이크로폰에서 입력

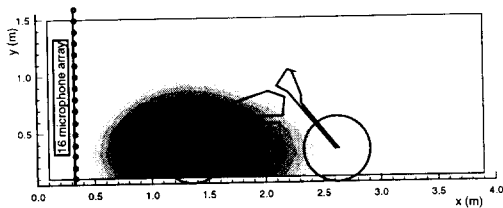
되는 음압 신호로부터 음향 홀로그래피, beamforming 방법, 스펙트로그램 등의 방법을 통해 주파수별 공간상의 음압 및 인텐시티 분포, 소음원의 위치 등을 구할 수 있었다. 각각의 방법에 의한 결과는 서로 일치되는 결과를 얻었으며 빔형성 방법으로는 음원의 위치만 추적만 가능하나 홀



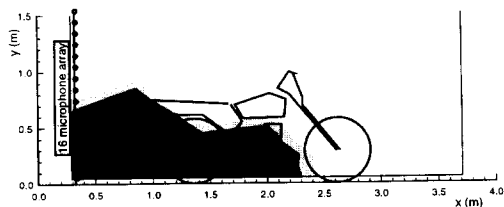
(a)



(b)

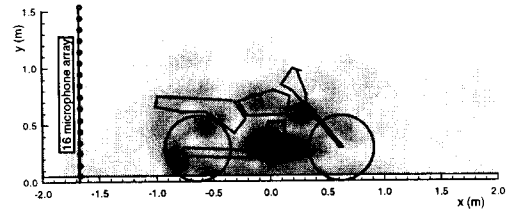


(c)

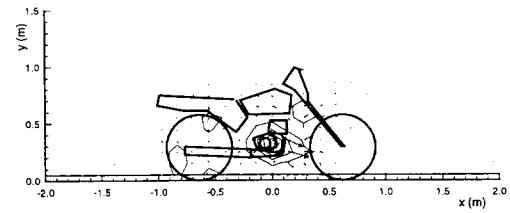


(d)

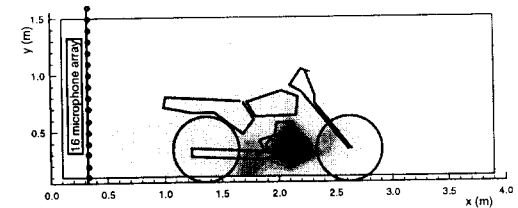
Fig. 5 Experimental results for moving motorcycle at frequency of 186 Hz (a) Sound pressure (b) Sound intensity (c) Beamforming power (d) Spectrogram



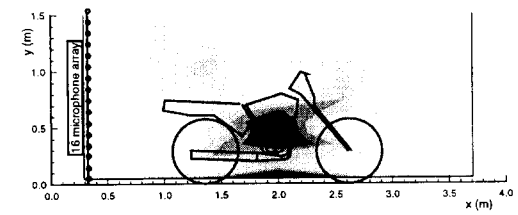
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 6 Experimental results for moving motorcycle at frequency of 807 Hz (a) Sound pressure (b) Sound intensity (c) Beamforming power (d) Spectrogram

로그래피를 이용하는 경우에는 음원면의 음압 분포 및 인텐시티를 구할 수 있다.

참고 문헌

1. F.J. Fahy, *Sound Intensity*, 1989, Elsevier Applied Science, New York.
2. D. Maynard, E.G. Williams and Y. Lee, 1985, "Nearfield acoustic holography : I. Theory of generalized holography and development of NAH," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 78, pp. 1395-1413.
3. Shan and T. Kailath, 1985, "Adaptive Beamforming for Coherent Signals and Interference," IEEE Trans. on ASSP, Vol. ASSP-33, No. 3, pp. 527-530.
4. R.O. Schmidt, 1986, "Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation," IEEE Trans. on AP, Vol. AP-34, No. 3, pp. 276-280.
5. J.-W. Choi and Y.-H. Kim, 1995, "Spherical Beamforming and MUSIC Method for the Estimation of Location and Strength of Spherical Sound Source," MSSP, Vol. 9, No. 5, pp. 569-588.
6. J.-W. Choi and Y.-H. Kim, 1995, "Estimation of location and strengths of broadband planar and spherical noise sources using coherent signal subspace," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 94, No. 4, pp. 2082-2093.
7. Y. Takano, K. Terada, E. Aizawa, A. Iida, and H. Fujita, "Development of a 2-dimensional Microphone Array Measurement System for Noise Sources of Fast Moving Vehicles," InterNoise 92, Toronto, Ontario, Canada, July 20-22, 1992.
8. G. Holzl, P. Fodiman, K.-P. Schmitz, M.A. Pallas, B. Barsikow, "Deufrako-2 : Localized Sound Sources on the High-speed Vehicles ICE, TGV-A, and TR07," InterNoise94, Yokohama, Japan, August 29-31, 1992.
9. Hyu-Sang Kwon and Yang-Hann Kim, "Planar acoustic holographic reconstruction by using moving array," Acoustical Society of America 131st meeting, Indianapolis, Indiana, 13-17 May, 1996 (to be published).
10. T.A.C.M. Claasen and W.F.G. Mecklenbauer, "The Wigner distribution - a tool for time-frequency signal analysis," 1980, Philips J. Res. Vol. 35, pp. 372-389.