

주행하는 자동차 외부 소음원 측정에 관한 실험적 연구

Experiments on the Noise Source Identification from a Moving Vehicle

홍석호* · 최종수**

Suk-Ho Hong and Jong-Soo Choi

Key Words : Doppler Effect(도플러효과), Microphone Array(마이크로폰 어레이), Beamforming Method(빔형성방법), Forward Propagation Method(발신시각추출법),

ABSTRACT

Recently, several experimental techniques for identifying the noise sources distributed over a moving vehicle are being developed and used in order to design a low noise vehicle. The beamforming method, which uses phase information between several microphones to localize the source position, is proved to be one of the promising techniques applicable even under complicated test environments. In this study a beamforming algorithm is developed and applied to measure the dominant noise sources on a passenger car moving at constant speed. Unlike the acoustic signals from a stationary noise source, the sound generated from a moving source is distorted due to the Doppler effects. The sound pressure are measured with an spiral array system composed of 26 microphones and a pair of photo sensors are used to measure the vehicle speed. The information about the speed and relative position of the vehicle are used to eliminate the Doppler effects from the measured pressure signal by using a de-Dopplerization algorithm. The noise generated from a moving vehicle can be grouped in many ways, however, tire noise and the noise generated from the engine are distinguishable at the speeds being tested.

1. 서 론

마이크로폰 어레이를 이용하여 소음원의 위치 및 특성을 파악하는 방법에는 빔형성방법(Beamforming method)과 음향 홀로그래피방법(Acoustic holography method)이 있다. 이러한 방법들은 이론의 근간이 다르고, 특성 또한 구별되어 지므로 각각의 방법이 적용될 수 있는 응용분야에도 차이가 있다.

빔형성 방법은 레이더의 작동 원리와 유사한 방법으로, 간단한 장비구성으로 소음원의 규모에 상관없이 다양한 소음원에 적용이 가능하며, 풍동실험에 적용시 모델 주위 유동장과 같은 주위 외란에 관계없이 음원의 위치를 정확하게 찾을 수 있는 장점이 있다. 하지만 소음원의 물리량을 모두 표현할 수 없는 단점이 있다.

반면, 음향 홀로그래피 방법은 홀로그램 평면에서 측정된 음압 정보를 기반으로 측정되지 않은 면의 음압을 추정함으로써 음원의 구체적인 시·공간적 형태를 알 수 있으며, 소음원의 다양한 음향학적 물리량을 제공한다. 하지만, 복잡한 장비 구성과 홀로그램 구경의 제한으로 측정 대상체의 크기에 제약이 따르며, 기준 마이크로폰과 측정용 마이크로폰에 동일 성분의 잡음이 포함될 경우, 분해능이 저해되어 잡음을 소음원으로 인식하게 된다. 이로 인해 풍동에서의 소음 측정 시 외란의 영향을 최소화하기 위해 근접 음향 홀로그래피(Nearfield acoustic holography)가 이용되고 있다.^{(1),(2)}

최근의 연구에서는 움직이는 자동차, 고속전철, 항공기의 이·착륙시 발생하는 소음과 관련되어 이들 기법을 적용하여 소음원의 위치를 측정하는 연구가 진행되고 있다. 고속전철과 항공기에 적용한 연구의 경우 빔형성방법을 적용한 연구가 이루어졌고^{(3)~(5)}, 자동차의 경우는 근접음향 홀로그래피(Nearfield Acoustic Holography)를 이용한 소음원 위치 판별에 대한 연구가 발표 되었다.^{(6),(7)}

이동하는 운송체에 대한 발생 소음 측정 시 음원의 위치 변화에 따라 관찰자는 실제 발생 주파수와 다른 왜곡된 신호를 받게 된다. 이를 도플러 효과라 하며 이것은 음원의 속

* 충남대학교 항공우주공학과 대학원
E-mail : hsh303@hotmail.com
Tel : (042) 821-7774, Fax : (042) 825-9225

** 충남대학교 항공우주공학과

도와 관찰자와의 거리에 영향을 받게 된다. 즉, 움직이는 소음원은 시간에 따른 소음원의 위치변화로 인해 도플러 효과를 나타낸다. 도플러 효과로 인해 고정된 관찰자를 향해 다가오는 소음원의 주파수는 실제 주파수보다 높은 주파수로 감지되고, 멀어지는 소음원은 실제보다 더 낮은 주파수로 측정된다. 이러한 효과는 움직이는 자동차, 고속전철, 회전익 항공기의 블레이드 소음 측정 시 발생하며, 실제 발생 소음을 알기 위해서는 이 영향을 제거해야 할 필요가 있다.⁽⁸⁾

본 연구에서는 마이크로폰 어레이를 이용한 빔형성 방법을 통해 움직이는 자동차의 소음원의 위치를 판별하였다. 이를 위해 사용되는 도플러 효과 제거 알고리즘(발신시각추출법: Forward pROpagation Method, FROM)검증을 위해 무향실에서 움직이는 소음원 모사를 통해 알고리즘의 적용 여부를 검증하였고, 실제 움직이는 자동차를 대상으로 외부 발생소음을 측정하였다.

2. 빔형성 방법 및 신호재구성

빔형성 방법은 음원에 대해 다수의 센서로 구성된 어레이 측정 시 각 센서의 신호는 음원과 상대적 거리 차로 위상차를 갖게 된다. 이러한 위상차로부터 음원의 위치나 발생 방향을 파악 분포로 알 수 있는 것을 말한다. 각 센서에서 발생하는 위상차는 상호상관함수 행렬 G 의 형태로 표현할 수 있고 모델링된 음장은 가상음원의 위치와 센서 간의 거리에 의해 가중벡터 E 로 계산된다. 상호상관함수행렬로부터 발생된 위상차는 센서와 음원의 거리와 관심주파수의 파수로 보상되어 다음과 같은 파워 P 로 계산된다.

$$P = E^* G E \quad (1)$$

음원이 위치한 곳은 큰 파워를 갖게 되고 음원이 없는 곳은 상대적으로 낮은 파워를 갖게 된다.^{(9),(10)}

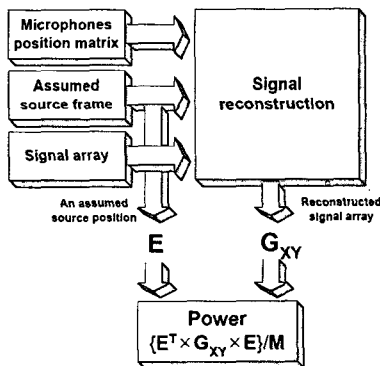


Fig. 1 Flow chart of beamforming method using FROM algorithm

Fig. 1은 도플러 효과 제거 알고리즘의 계략도를 보여준다. 입력되는 정보는 마이크로폰어레이에서 취득한 신호와 가상의 소음원 좌표수, 마이크로폰의 위치로 각 위치에서 측정된 신호는 도플러효과 제거 알고리즘을 통해 신호의 재구성성이 이루어지고 소음원에 대한 재구성된 신호는 상대적 음압을 갖게 된다. 이 과정은 가정된 소음원 좌표수와 마이크로폰의 개수만큼 반복 수행되어 최종적으로 파워의 분포로 소음원의 위치를 판별하게 된다.^{(11),(12)}

3. 움직이는 소음원 위치 판별을 위한 예비실험

3.1 실험장치 구성

도플러 효과 제거 알고리즘을 검증하기 위해 움직이는 소음원 장치를 이용하였다. 실험은 충남대학교 항공우주공학과에서 보유하고 있는 반무향실에서 수행하였고, 총 26개의 마이크로폰과 NI사의 PXI4472 장비를 이용하였다. 데이터 측정 및 알고리즘 구현을 위해 NI사의 LabVIEW7.0을 이용하였다. 마이크로폰 배열은 나선형 형태를 취하고 있다.

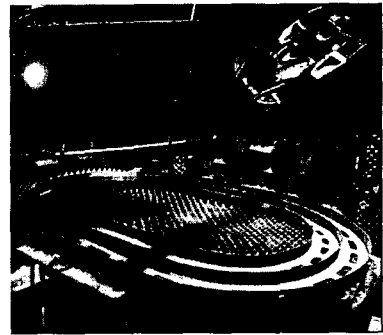


Fig. 2 Experiment Set-up

Fig. 2는 실험장치의 사진으로 움직이는 소음원을 모사하기 위해 트랙을 달리는 모형 자동차를 이용하였고, 모형자동차 앞쪽에 1.5kHz 성분의 소음원을 발생시키는 부저를 장착하였다. 모형자동차의 트리거(trigger)위치와 속도를 측정하기 위해 광센서 2개를 사용하였다. 마이크로폰어레이와 소음원의 거리는 1.3m, 측정된 소음원의 속도는 약 5.5m/s 이다.

3.2 실험결과

Fig. 3은 발신시각 추출법을 이용하여 도플러 효과를 제거하여 소음원의 위치를 판별한 것이다. (A)는 측정된 소음

원의 스펙트럼이고, (B)는 정지한 소음원에 대해 적용하는 빔형성 알고리즘을 움직이는 소음원에 적용한 것으로 마이크로폰에 도달한 음파는 트리거 신호 발생시점 이전에 발생된 것임을 보여주고 있다. (C), (D)는 움직이는 소음원의 도플러 효과 제거 알고리즘을 적용한 결과로 (C)는 부저를 켜 상태로 움직이는 소음원에서 발생하는 소음원의 위치를 정확히 판별함을 확인하였다. (D)는 부저를 끈 상태로 움직이는 소음원에서 발생하는 소음원의 위치를 나타낸 것으로 이때의 소음원은 모터에서 발생하는 3.5kHz의 모터 소음성분임을 알 수 있고 그 위치를 정확히 판별함을 알 수 있다.

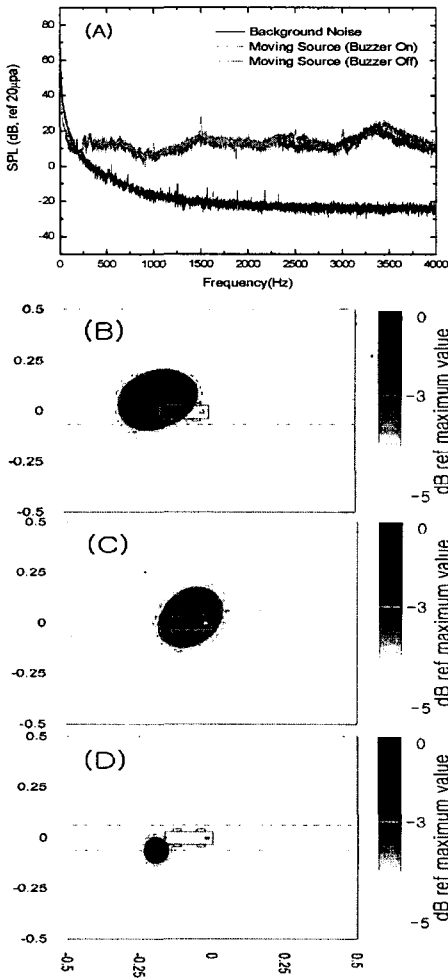


Fig. 3 Beamforming results of motor car test (A) Autospectrum of motor car (B) result of motor car noise [speaker 1.5kHz] located at (0.05m, 0.0m) using STASI, (C) using FROM, (D) motor car noise [motor noise 3.2kHz] located at (-0.20m, -0.05m) using FROM. Distance between array and source is 1.3m

또한, 추가적인 실험을 통하여 마이크로폰과 소음원의 거리를 줄이면 이보다 더 정확한 소음원의 위치를 판별함을 확인하였다. 이 결과를 통해 도플러 효과 제거 알고리즘의 신뢰성을 확보할 수 있었다.

4. 주행하는 자동차에 대한 빔형식 기법 적용

4.1 실험장치 구성

Fig. 4는 실제 도로에서 주행하는 자동차의 발생소음을 측정하기 위한 장치 구성과 실험 대상 자동차를 보이고 있다. 앞서 알고리즘 검증을 위한 실험과 동일한 총 26개의 마이크로폰을 사용하였고, 트리거 신호 위치와 차량의 속도를 측정하기 위해 광센서 2개를 사용하였다. 마이크로폰과 소음원과의 거리는 약 1.3m이고, 배경소음 측정과 아이들링(780rpm)시 발생하는 소음, 시속 40 ~ 80km/h 로 이동하는 자동차에서 발생하는 외부 소음을 측정하였다.

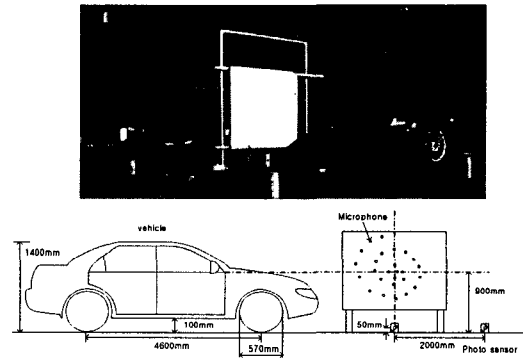


Fig. 4 Experiment Set-up

4.2 실험결과

Fig. 5는 정지상태에서 발생하는 소음(A)과 40km/h와 80km/h로 이동시 발생하는 소음(B)의 스펙트럼이다. 이동시 발생하는 소음원은 타이어소음과 배기음, 트랜스미션 소음, 엔진의 rpm 상승에 따른 엔진 내부소음 및 벨트류의 소리 등 다수의 소음원이 혼합되어 이로 인해 정지시보다 더 많은 종류의 소음원이 발생하고 또한 음압의 크기도 증가함을 알 수 있다.

Fig. 6, 7은 정지한 차량에서 발생하는 소음을 측정한 결과이다. 아이들링 상태(780rpm)와 2000rpm 구동시 800Hz와 1.5kHz 성분을 갖는 소음원의 위치를 비교하고 있다. 이때의 주요한 소음원은 엔진 내부에서 발생하는 소음으로 엔진의 폭발시 발생하는 폭발음과 흡기소음, 각종 벨트 등에서 발생하는 소음이 복합적으로 구성되는 것으로 예측된다. 엔진 내부에서 발생하는 소음은 엔진회전수에 무관하게 800Hz의 주파수 성분이 나타나며 엔진회전수 변화시 1kHz이상의 주파수 성분을 발생하는 소음원의 위치가 변화함을 예상할 수

있다. 또한, 이러한 발생소음은 차량의 사이드 판넬 이음부와 바닥을 통해 외부로 전달됨을 예측할 수 있다.

Fig. 8은 이동시 발생하는 800Hz 성분의 소음원의 위치를 판별한 그림이다. Fig. 6, 7의 결과와 비교하여 800Hz의 소음원은 엔진내부에서 발생하는 소음원으로 이동시 엔진내부 소음과 트랜스미션 소음의 혼합으로 차체 바닥을 통해 외부로 전달되는 것으로 예상할 수 있다.

Fig. 9는 이동시 발생하는 1.5kHz성분의 소음원의 위치를 판별한 것이다. 음압의 크기는 동일하지 않지만, 속도에 상관없이 약 1.5kHz 성분의 소음이 타이어 앞과 뒤쪽에서 발생함을 알 수 있다.

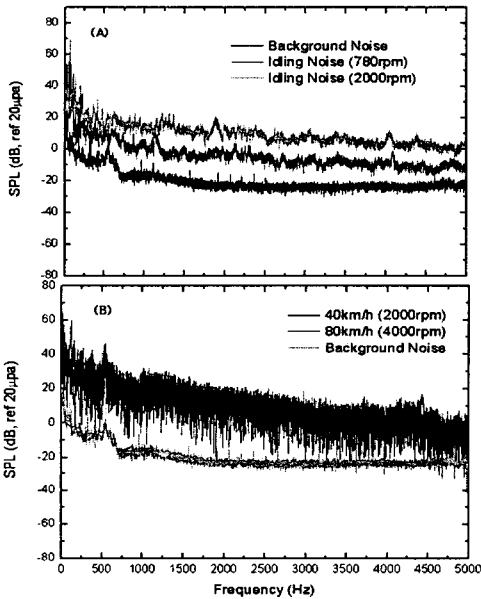


Fig. 5 Autospectrum of (A) stationary vehicle noise and (B) moving vehicle noise

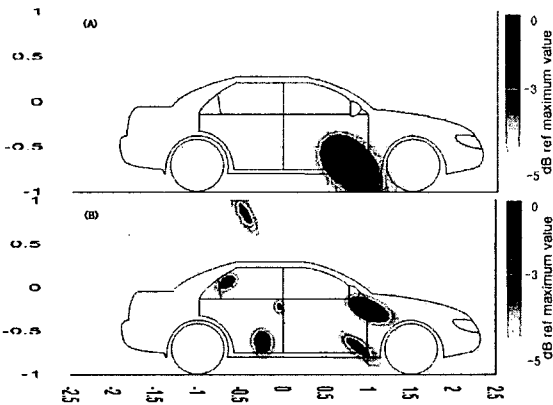


Fig. 6 Beamforming results for a stationary vehicle in idling condition (780rpm) (A)800Hz, (B) 1.5kHz

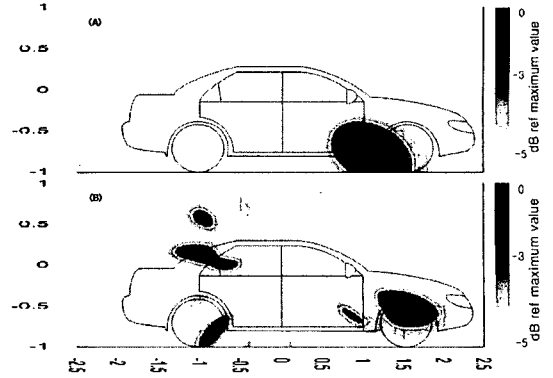


Fig. 7 Beamforming results for a stationary vehicle noise in 2000rpm (A)800Hz, (B) 1.5kHz

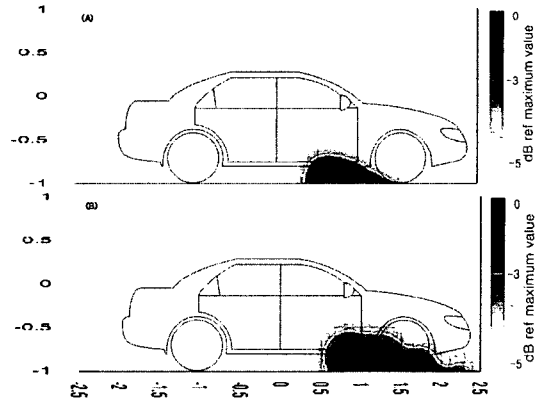


Fig. 8 Beamforming results at 800Hz for a moving vehicle (A) 50km/h, (B) 70km/h

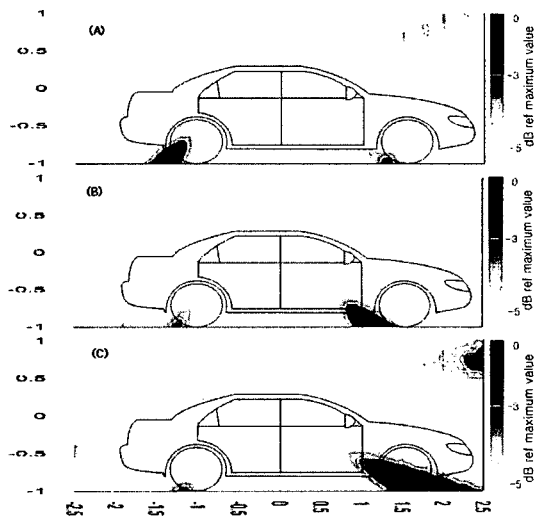


Fig. 9 Beamforming results at 1.5kHz for a moving vehicle (A) 40km/h, (B) 50km/h, (C) 80km/h

7. 결론

도플러 효과 제거 알고리즘을 적용하여 이동하는 자동차에서 발생하는 외부 발생 소음을 측정하였다. 자동차 외부에서 발생하는 소음은 크게 엔진 소음과 타이어 소음, 배기음, 차체외부에서 발생하는 소음으로 나눌 수 있다. 자동차에서 발생하는 소음원은 여러 성분의 복합체로 본 연구에서 이러한 소음원을 분리하는 것은 한계가 있으므로, 엔진내부에서 발생하는 각종 소음원을 하나의 소음원으로 가정하였다. 또한, 차량 외부소음의 주파수 대역이 너무 넓고 제한된 마이크로폰의 사용으로 모든 소음원을 판별하기 어려웠다. 이를 해결하기 위해서는 다양한 크기의 어레이 사이즈와 다수의 마이크로폰이 추가되어야 할 것이다. 실험결과 이동하는 자동차에서 발생하는 소음 중 약 800Hz의 주파수 성분을 갖는 엔진발생 소음과 타이어에서 발생하는 소음으로 예상되는 약 1.5kHz 성분을 확인할 수 있었다.

약 100km/h 이상의 속도에서 주요한 소음원으로 대두되는 차체 외부 발생하는 소음은 측정 환경의 제약으로 본 실험에서는 확인할 수 없었으며, 배기음은 저주파성분이 강해 정확한 위치를 판별할 수 없었다.

후 기

이 연구(논문)는 과학기술부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 연구사업(스마트무인기기술개발)의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 김양한, 1996, "소음원 규명 방법론(특성과 응용을 중심으로)", 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp. 43~49.
- (2) 김천덕, 1998, "복소진폭 음향 홀로그래픽법을 사용한 사각형 마이크로폰 어레이의 음원위치 동정에 관한 연구", 한국과학재단 연구보고서.
- (3) Barsikow, B., King III, W. F., 1988, On Removing the Doppler Frequency Shift from Array Measurements of Railway Noise, Journal of Sound and Vibration, Vol. 120, No.1, pp 190-196.
- (4) Barsikow, B., 1996, 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.
- (5) Jeffrey, J., Kelly and Mark, R., Wilson, 1995, De-Dopplerization of Aircraft Acoustic Signals, AIAA Vol.32. No.5.
- (6) Takata, H., Nishi, T., Kook, H., Moebis, G., Davies, P., and Bolton, J. S., 2000, Visualization techniques to identify and quantify sources and paths of exterior noise radiated from stationary and nonstationary vehicles, Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress.
- (7) Kook, H., Moebis, G. B., Davies, P., and Bolton, J. S., An Efficient Procedure for Visualizing the Sound Field Radiated by Vehicles During Standardized Passby Tests, accepted for publication in the Journal of Sound and Vibration.
- (8) Howeel, A. J., Bradley, M. A., McCormick, M. A., and Brown, J. D., 1986, De-Dopplerization and Acoustic Imaging of Aircraft Flyover Noise Measurements, Journal of Sound and Vibration, Vol. 105, No.1, pp. 15 1~167.
- (9) Johnson, D. H., Dudgeon, D. E., 1993, Array Signal Processing: Concepts and Techniques, Prentice-Hall.
- (10) Thomas J. M., Aeroacoustic Measurements. pp. 10 4~113.
- (11) 이재형, 홍석호, 최중수, 2004, "빔형성방법을 이용한 회전하는 음원의 위치 판별에 관한 연구", 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, pp 837~842.
- (12) 홍석호, 이재형, 최중수, 2004, "팁제트 로터에서의 소음원 측정에 대한 실험적 연구", 한국항공우주공학회 춘계학술대회 논문집, pp 167~175.