

# 차량 바람소리 측정용 마이크로폰 어레이 설계에 관한 연구

## Designing a microphone array for measurements on wind noise of vehicle in the wind tunnel

강준구† · 최종수\* · 이명한\*\* · 이광현\*\*\*

JunGoo Kang, Jong-Soo Choi, Myeong-han Lee and Kwanghyun Lee

### 1. 서 론

소음원의 위치를 추적하는 기술로 다수의 마이크로폰에서 측정된 신호를 바탕으로 음원의 위치를 추적하는 지연-합 빔형성 기법이 널리 사용되고 있다. 본 논문은 차량에서 발생하는 바람소리의 위치 추적에 적합한 마이크로폰 어레이를 설계하고 실차 시험이 가능한 풍동에서 차량의 바람소리 위치를 확인하고자 한다. 바람소리의 주파수 특성은 넓은 영역에서 높은 레벨이 발생하지만 차량 실내로 전달되어 탑승객에게 문제가 되는 휘슬 노이즈는 1~2k Hz 밴드 주파수 특성을 가지고 있다. 마이크로폰 어레이 설계 시 2k Hz 이하 주파수대역의 성능을 고려하였다. 마이크로폰 어레이 성능은 주엽의 3dB 밴드폭과 주엽과 최대 부엽의 레벨 차이를 가지고 평가 할 수 있다. 또한 차량의 전장과 전고의 비가 달라 관심영역의 가로세로비가 다르기 때문에 마이크로폰 어레이 설계 시 관심영역을 고려하여 설계하였다. 추가로 마이크로폰 어레이가 유동장 외부에 있어 소음을 유동 밖에서 측정하기 때문에 유동 내부와 외부 사이에 음파의 굴절이 발생하여 소음원이 이동하는 현상이 발생한다. 이러한 현상에 대한 보정기법을 적용하였다. 마이크로폰 어레이는 디지털 MEMS 마이크로폰 96 채널을 이용하여 구성하였다. 디지털 MEMS 마이크로폰은 기존 콘덴서 마이크로폰에 비해 크기가 작고 저렴하여 다채널 시스템 구성에 적합하다. 이를 풍동에서 실차 시험을 통하여 성능을 검증하는 시험을 수행하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 마이크로폰 어레이 디자인

(1) MEMS 마이크로폰 다채널 어레이 구성  
미세전자기계시스템(MEMS, Micro Electro Mechanical System)은 반도체 제조 공정을 응용해 마이크로미터 크기의 초미세 기계부품과 전자회로를 동시에 집적하는 기술이다. MEMS 공정으로 생산된 마이크로폰은 기존 전자콘덴서마이크 대비 크기 작고 비용이 저렴하여 다채널 시스템을 구성하기 적합하다. MEMS 센서 제조 기술의 발달로 센서의 신뢰성도 높아지고 있어 모바일 기기 그리고 스마트 TV, 차량 음성 인식에 많이 사용되고 있다.

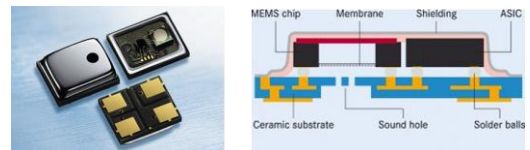


Figure 1 Composition of MEMS microphone

MEMS 마이크로폰은 그림에서와 같이 박막에 작용하는 압력에 의한 박막의 기계적 변형을 박막의 센서 바닥에 장착된 적극 사이의 정전용량의 변화로 측정하며 일반 콘덴서 마이크로폰과 동일한 동작원리를 가지고 있다. 또한 MEMS 마이크로폰은 아날로그 신호를 ADC를 이용하여 바로 디지털 PDM(Pulse Density Modulation)으로 측정하기 때문에 아날로그센서를 이용하여 측정 시 필요한 별도 고가의 ADC(측정장치)가 필요 없다는 장점을 가지고 있다<sup>(1)</sup>.

#### (2) 지연-합 빔형성 기법

빔형성 기법을 Figure 2를 통해 설명할 수 있다.  $y_i(t)$ 는  $i$ 번째 마이크로폰에서 측정된 신호이고,  $z(t)$ 는 빔출력이다.  $M$ 개의 마이크로폰에 측정된 각각의 신

† 강준구: 정회원, ㈜에스엠인스트루먼트

E-mail : jgkang@smins.co.kr

Tel : 042-861-7004, Fax : 042-861-7008

\* 충남대학교 항공우주공학과

\*\* 현대기아자동차(주) 남양연구소

\*\*\* ㈜에스엠인스트루먼트

호에서 가상 음원 방향으로의 시간지연을 주어 센서에 따라 가중치를 곱한 뒤 신호를 더하게 되면 빔출력을 얻을 수 있다. 실제 음원과 가상 음원과 방향이 일치하면 신호가 증폭된다. 이러한 방법으로 소음원의 위치를 추정할 수 있다<sup>(2)</sup>.

빔출력을 아래와 같이 수식으로 표현 할 수 있다.

$$b(t) = \sum_j p_m(t - \Delta t_j)$$

임의의 위치에 가상 소음원이 존재 할 경우 소음원의 크기를 아래와 같이 수식으로 표현 할 수 있다.

$$s(t) = \sum_j \frac{1}{r_j} e^{i[kr_j - \omega(t + \Delta t_j)]}$$

### (3) 마이크론 어레이 설계

마이크론 어레이 설계에서 성능에 영향을 미치는 주요 인자들은 마이크론의 개수, 어레이의 크기, 어레이의 형태와 마이크론간의 거리이다. 마이크론 어레이 성능은 소음원에 대한 공간 분해능과 신호 대비 노이즈 특성으로 평가할 수 있다. 공간 분해능은 소음원의 위치를 공간 상에서 구분해 낼 수 있는 정도를 말하며, 어레이 배열에 따라 정의되는 빔패턴에서 최대치를 기준으로 -3dB에 해당하는 곳까지의 길이로 정의할 수 있다. 최대부엽레벨은 공간상에 존재하는 하나의 점음원에 대한 측정 결과에서 공간상의 앨리어싱(Aliasing)에 의하여 존재하지 않는 소음에 대한 부엽이라 하며, 주엽과 부엽과의 크기의 차이를 최대부엽레벨로 정의할 수 있다.

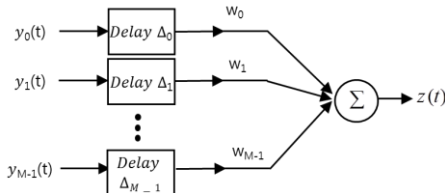


Figure 2 The beamformer's output  $z(t)$  consists of  $w_i$

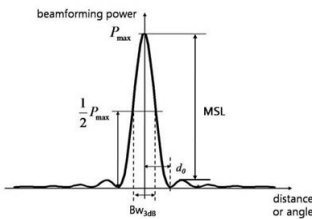


Figure 3 The Performance of beamforming

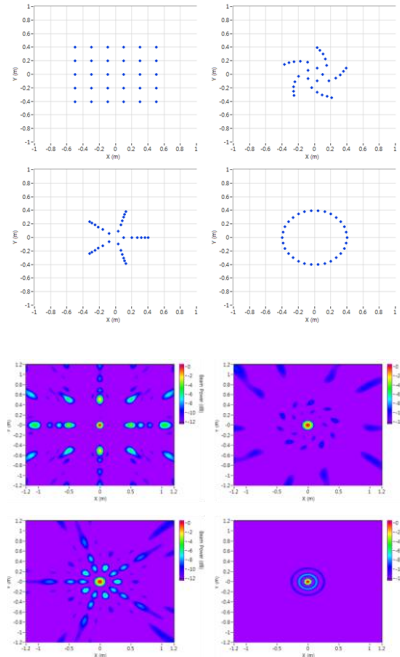


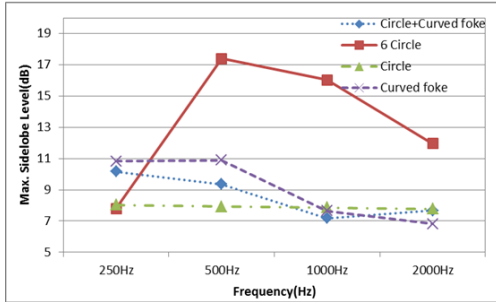
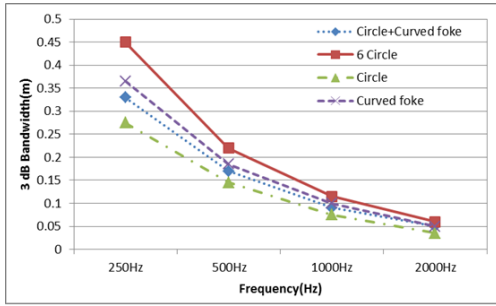
Figure 4 The performance of microphone basic pattern

마이크론 배열을 랜덤 하도록 배치 하면 성능이 가장 좋지만 기구 제작이나 구현에 어려움이 있다<sup>(3)</sup>. 본 논문에서는 기본 패턴의 조합을 통해 최종 어레이 패턴을 설계하였다.

직사각형 어레이의 경우 소음원이 어레이 마이크로폰 간격보다 작은 파장의 경우 공간 앨리어싱이 생길 수 있다. 나선형 어레이의 경우 각 형태가 불규칙한 형태로 공간 앨리어싱이 가장 적게 발생하였다. 원형의 경우 3dB밴드폭은 가장 좋은 성능을 보였다. 하지만 중심 원형으로 공간 앨리어싱이 생기게 된다. 공간 분해능 성능이 좋은 원형 어레이 패턴과 공간 앨리어싱 현상이 적게 발생하는 나선형 어레이 패턴의 조합을 통해 최종 패턴을 선정하였다. 또한 차량의 차고 전장의 길이비가 다르기 때문에 어레이의 가로 세로비를 변형하여 차량 소음 추적에 적합하도록 설계하였다. 최적의 가로 세로비를 시뮬레이션을 통해 4:3 비율을 선정하였다.

Table 1 The combination of basic array pattern

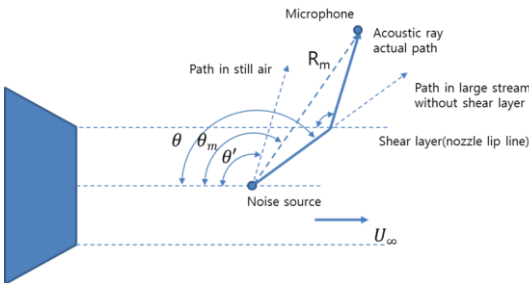
No.	Combination Array
1	Circle + Curved fork
2	6 Circle
3	1 Circle
4	Curved fork



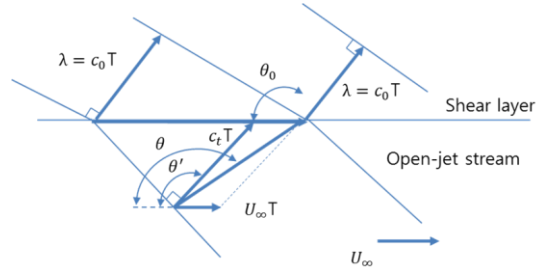
**Figure 5** The results of simulation for array pattern

(4) 개방형 풍동에서의 전단층 보정방법

개방형 풍동에서 소음특성을 측정하는 경우, 유동 내부와 외부 사이의 전단층은 음파를 굴절시키게 되는데, 이는 소음의 전파 방향을 변화시키게 된다. 따라서 유동 외부에서 마이크로폰을 이용하여 소음을 측정할 경우에는 유속뿐 아니라 음파의 굴절에 의한 전달 경로변화에 대해 측정 데이터를 보정해 주어야 할 필요가 있다<sup>(4)</sup>. Amiet 등은 전단층을 두께가 없는 경계면으로 가정하고 굴절 현상에 대한 보정 기법을 제시하였다<sup>(5)(6)</sup>.



**Figure 6** Open-jet layer refraction as modeled by a vortex sheet at the nozzle lip line



**Figure 7** Wave refraction at the shear layer

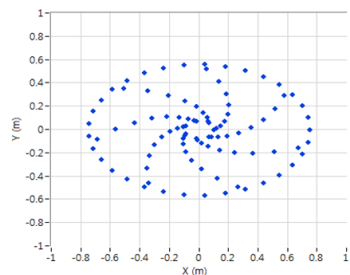
Figure 6은 풍동에서부터의 유동과 전단층, 그리고 소음원과 측정 마이크로폰과의 상관도이다. 실선은 마이크로폰에 도달하는 소음의 경로를 나타내고 있다. 그림에서 도시된 바에 의하면 마이크로폰에 소리가 도달하기까지의 경로는  $R_m$ 보다 길어지지만 유속 내에서의 유속의 영향으로 도달 시간은 변화하게 된다.

Figure 7은 유동 내 외부 사이의 음파의 전달 과정을 도시하고 있다. 그림으로부터 알 수 있듯이 유동 내에서는 유동의 속도에 의해 음파의 속도가 달라진다. 이로 인해 음파의 경로는 소음과 마이크로폰 사이의 직선거리보다 증가하지만 도달 시간은 유속의 영향으로 더 줄어들게 된다. 실제 마이크로폰으로 측정하는 신호를 보정하기 위해서는 소음의 이동 경로를 알아야 한다.

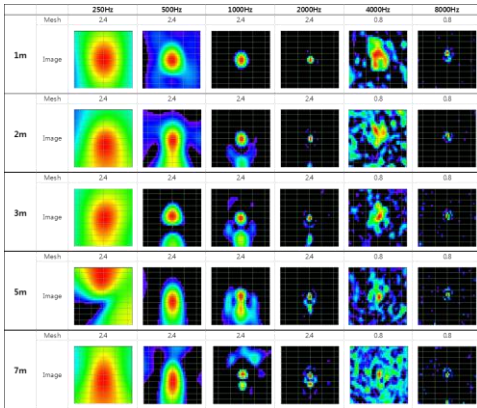
**3. 검증 시험 및 결론**

(1) 검증 시험 수행

어레이는 유동장에 영향을 받지 않도록 소음원에서 5m 떨어진 위치에서 설치하였다. 디지털 MEMS 마이크로폰 96채널을 사용하여 Figure 8과 같이 최종 패턴으로 구성하였다. 빔형성 기법을 빠르게 연산하기 위해 FPGA 기술을 적용 하였으며 측정 및 분석에는 National Instruments 사의 PXI(NI PXIe-7965R, FlexRIO) 시스템을 사용하였다.



**Figure 8** Result of designing array pattern



**Figure 9** Measured beam power map for various source frequency

## (2) 결론

본 논문에서는 96채널 디지털 MEMS 마이크로폰을 이용하여 마이크로폰 어레이를 구성하였다. 검증 시험을 통해 주파수별 빔파워 성능 확인하였으며, 유동 속도에 따라 소음원 이동하는 현상을 확인하였다. 차량에서 소음 전파 경로의 의한 보정 기법을 적용하여 소음원 위치 추정 오차를 줄일 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- (1) <http://www.wolfsonmicro.com/>
- (2) Don H. Johnson and Dan E. Dudgeon, 1993, "Array Signal Processing Concepts and Techniques", Prentice Hall, P114.
- (3) Bruel&Kjear, Technical Review No.1, 2004, Beamforming
- (4) Mueller, T. J(Ed.), 2002, "Aeroacoustic Measurements, Springer-Verlag", Berlin.
- (5) Amiet, R. K., 1978, "Refraction of Sound by a Shear Layer", Journal of Sound and Vibration, Vol 58, No. 4, pp. 467~482.
- (6) 김위준, 이욱, 최중수, 2008, "풍동 조건의 마이크로폰 어레이 측정에서 전단층 보정에 관한 연구", 한국소음진동공학회논문집 제18권 제6호, pp.612~618