

고속철도 차량의 소음 측정을 위한 마이크로폰 어레이 설계에 관한 연구

Designing a Microphone Array System for Noise Measurements on High-Speed Trains

노희민† · 최성훈* · 홍석윤**

Author name, Author name and Author name

Key Words : Noise source, Microphone array, Delay and sum Beamforming

ABSTRACT

In this paper, noise source localization of the Korean high speed train was conducted by using delay and sum beam-forming method of a microphone array. At first, the microphone array having irregular configuration was designed and the resolution of which was analyzed from parameters such as 3-dB bandwidth and maximum side-lobe level. After the demonstration, the microphone array was applied on the high speed train and noise localization of the high speed train driving at 300 km/h was performed successfully.

1. 서 론

고속철도차량의 소음을 저감하기 위해서는 주행 시 발생하는 소음원을 정확하게 도출하고, 그에 따른 방사특성을 명확하게 파악하는 것이 중요하다. 하지만 고속 철도차량이 주행하는 경우 전동 소음과 공력 소음 등 다양한 소음이 속도에 증가에 따라 발생하게 되며, 그 소음원의 위치 또한 산재되어 있어 그 측정과 분석이 복잡하다. 이러한 어려움을 해결하기 위해 국외 철도 연구기관에서는 다수의 마이크로폰이 부착된 마이크로폰 어레이를 이용하여 고속철도의 소음을 분석하고 시각화하는데 많은 노력을 기울이고 있다. 마이크로폰 어레이를 활용하여 고속철도의 소음원을 분리하고 분석하는 연구는 고속철도 차량의 소음을 연구하는 가장 효과적이며 유용한 연구로 간주되고 있으나 현재 국내에서는 이에 대한 연구가 미흡한 실정이다.

본 논문에서는 고속철도 차량의 소음원을 측정 및 분석하는데 사용하기 위한 마이크로폰 어레이를 설계 및 제작하여 그 활용성을 검증하는 연구를 수행하였다. 우선 다수의 마이크로폰에서 측정된 신호를 바탕으로 음원의 위치 및 방사 형태를 구현하는데 널리 사용되고 있는 지연-합 빔형성 방법이 고려되었으며, 빔 패턴에 대한 이론과 가상 음원에 대한 이론이 소개되었다. 또한 고속철도 음원을 도출하기 위한 요구사항에 만족하는 96 개 채널의 마이크로폰 어레이의 형상에 대한 검토를 통해 어레이 형상을 설계하였으며, 설계된 어레이에 대한 성능 검증을 실시하였다. 끝으로 실제 300 km/h 대로 주행하는 고속열차 차량에 적용하여 본 논문에서 구현한 마이크로폰 어레이의 활용가능성을 확인하였다.

2. 마이크로폰 어레이 설계

2.1 지연 합 빔형성 이론

본 연구에서는 음원의 위치 또는 음파의 입사 방향을 추정하기 위해 지연-합 빔-형성 방법을 적용하였다. 지연-합 빔형성 방법은 각 마이크로폰에서 측정된 음압 신호들 사이의 상

† 교신저자; 정희원, 한국철도기술연구원 고속철도연구본부
E-mail : hmnoh@krii.re.kr

Tel : 031-460-5564, Fax : 031-460-5649

* 한국철도기술연구원 고속철도연구본부

** 서울대학교 조선해양공학과

대적인 시간 지연을 적절히 보상한 후 더하는 방법으로, 기본적으로 각 마이크로폰에서 측정된 신호들 사이에 보강 간섭 및 상쇄 간섭을 이용한다.

하나의 음원에서 발생한 소리가 방사되어 각각의 위치가 다른 마이크로폰의 입력신호로 들어오는 경우를 그림1과 같이 고려해보자. 동일한 음원에서 방사된 소리를 위치가 다른 각 마이크로폰에서 측정하는 경우에 각 마이크로폰에서 측정되는 신호에는 그림2의 (1), (2), (3)과 같이 시간지연이 발생하게 된다. 이 때 측정된 신호의 시간 지연을 고려하지 않으면 그림2의 (4)와 같이 신호의 왜곡이 발생할 수 있다. 따라서, 소음원과 마이크로폰의 위치를 바탕으로 마이크로폰에서 입력된 각 신호에서의 시간 지연을 고려해야 그림2의 (5)와 같이 정확한 측정값을 얻을 수 있다. 또한 각 마이크로폰으로 입력되는 신호들($y_m(t)$)은 각 마이크로폰의 거리에 따른 전달속도(Δ_m) 및 가중치(w_m)를 고려하여 지연된 시간으로 더해지게 되며 출력 $Z(t)$ 를 구하게 된다.

$$Z(t) = \sum_{m=0}^{M-1} w_m y_m(t - \Delta_m) \quad (1)$$

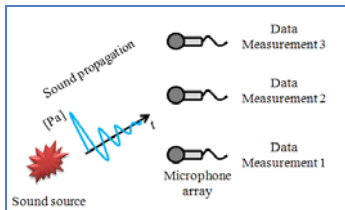


Figure1. Sound propagation measurement

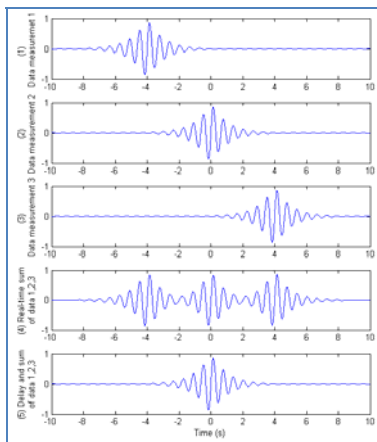


Figure2. Delay and sum of measured data

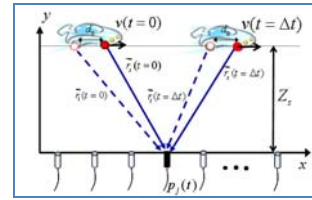


Figure3. A Moving Source

그림3과 같이 음원 $s(t)$ 이 정지된 상태가 아닌 일정한 속도로 이동하는 경우에는 앞에서 언급한 지연-합에 의한 신호의 측정 뿐만 아니라 도플러 효과와 음원의 이동에 따른 마이크로폰과의 거리 변화도 고려해주어야 한다.

음원이 일정한 거리에 수평으로 이동하는 경우에 마이크로폰 $P_j(t)$ 에 측정되는 신호를 그림4에서 단계적으로 검토하였다. 우선 그림4의 (1)과 같이 하나의 주파수를 가진 음원이 일정한 속도로 이동하게 되면 도플러 효과에서 의해서 그림4의 (2)와 같이 측정되는 위치를 기준으로 주파수의 변화가 발생하기 된다. 또한 음원과 측정 위치에 따라 방사되는 거리의 변화로 인해서 그림4의 (3)과 같이 신호의 저감이 생기게 되기 때문에 실제로 측정되는 신호는 그림4의 (4)와 같이 도플러효과와 신호가 저감된 신호를 측정하게 되는 것이다.

따라서 이동하는 소음원의 정확한 위치를 파악하기 위해서는 지연-합 빔형성 방법 적용과 함께 도플러 효과와 음원에 이동에 따른 거리 변화를 고려해야 한다.

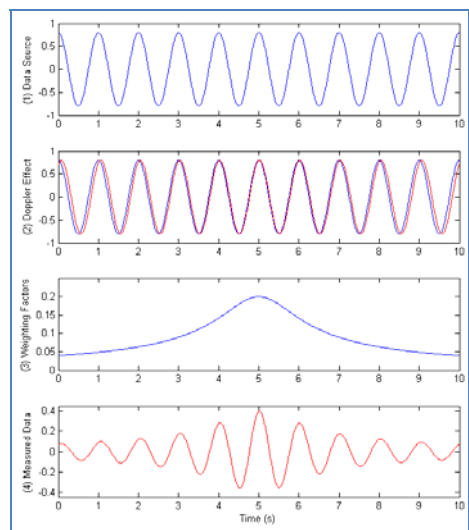


Figure4. Data source and measured data

도플러효과와 거리변화에 따른 신호저감을 고려하여 실제 소음원의 음원을 추정하는 식은 다음과 같다. 단극음원 신호 $s(t)$ 에 의해서 j 번째 마이크로폰에 측정되는 신호는 다음과 같다.

$$P_j(t) = \frac{1}{R_{s,j}} s(t - \frac{R_{s,j}}{c}) \text{ where } R_{s,j} = |\vec{r}_s(t) - \vec{r}_j| \quad (2)$$

이를 바탕으로 빔출력(Beamforming output) 및 빔파워(Beamforming Power)를 구하고, 음원의 위치는 빔파워가 최대가 되는 지점으로 예측할 수 있다. 빔출력($z_i(t)$)과 빔파워(BP(\vec{r}_i))의 수식표현은 다음과 같다.

$$z_i(t) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M P_j(t + \frac{|\vec{r}_{i,j}(t)|}{c}) \text{ where}$$

$$|\vec{r}_{i,j}(t)| = \sqrt{(\int_0^t v(t) dt + x_i(0) - x_j)^2 + Z_s^2} \quad (3)$$

$$BP(\vec{r}_i) = \frac{1}{T} \int_0^T z_i^2(t) dt \quad (4)$$

2.2 빔 패턴 이론과 가상 음원

N 개의 마이크로폰이 일정한 간격(d)을 두고 일렬로 배열되어 있는 마이크로폰 어레이를 그림 6과 같이 가정하면 충분히 먼 거리에서 발생하는 음원에 의해 발생하는 j 번째 마이크로폰에서의 음압은 다음과 같다.

$$P_j = \frac{A}{r_j} e^{i(\omega t - kr_j)} \quad (4)$$

위 식에서는 j 번째 마이크로폰에서 음원까지의 거리를 의미한다.

측정되는 마이크로폰에 입력된 가중치가 동일하다고 가정할 때, 전체 마이크로폰에서 측정되는 음압은 다음과 같다.

$$p(r, \theta, t) = \sum_{j=0}^{N-1} \frac{A}{r_j} e^{i(\omega t - kr_j)} \quad (5)$$

측정되는 마이크로폰과 음원까지의 거리가 충분히 크다고 가정하면, r_j 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_j = r - \frac{N-1}{2} \Delta r + j \Delta r \quad (6)$$

위 식에서 r 은 음원과 어레이의 중심까지의 거리를 의미하며, 전체 마이크로폰에서 측정되는 음압은 다음과 같다.

$$p(r, \theta, t) = \frac{A}{r} e^{i(\omega t - kr)} \frac{\sin(\frac{N}{2} kd \sin \theta)}{\sin(\frac{1}{2} kd \sin \theta)} \quad (7)$$

지향성 함수(Directivity Function)은 다음과 같다.

$$D(\theta) = \frac{\sin(\frac{N}{2} kd \sin \theta)}{\sin(\frac{1}{2} kd \sin \theta)} \quad (8)$$

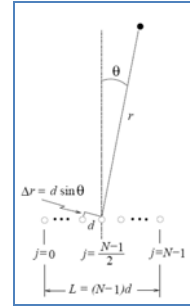


Figure6. Geometry used in deriving the far field beam pattern of a simple line array

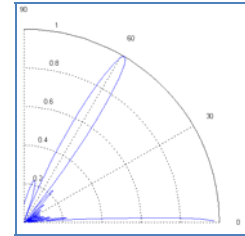


Figure7. Beam pattern for the line array

마이크로폰의 간격은 마이크로폰 어레이가 구분할 수 있는 음원의 주파수와 밀접하게 관련이 있다. 측정하고자 하는 음원의 주파수가 1000 Hz 가 되면 마이크로폰의 간격이 주파수의 파장보다 크게 되고($d=0.4 \text{ m} < 0.343 \text{ m}$) 이때의 지향성을 보면 그림 8 과 같이 약 59.1° 부근에 최대부엽(Maximum Side lobe)의 크기가 주엽(Main lobe)의 크기와 같게 나오게 되어 정확한 음원의 위치를 파악하는 것이 불가능하다. 실제 측정에서 이러한 현상이 나타나게 되면, 실제 음원이 존재하지 않음에도 불구하고 측정에서는 음원이 발생하는 가상 음원(Ghost Image)이 생기게 된다. 가상 음원의 발생을 피하기 위해서는 마이크로폰의 간격을 주파수의 파장보다 작게 해주어야 한다. 가상 음원을 피하기 위한 마이크로폰의 간격과 파장과의 관계는 다음과 같다.

$$d < \lambda \quad (9)$$

2.3 마이크로폰 어레이의 패턴 분석 및 설계

본 연구에서는 구현해야 할 마이크로폰의 성능 요구사항을 설정하였다. 우선 마이크로폰의 측정채널은 현재까지 국내외에서 고속철도 소음 측정을 위해 구현된 마이크로폰 어레이 중에서 가장 많은 96 채널로 결정하였다. 측정 주파수의 범위는 고속철도 차량의 주행 시 발생하는 소음의 주파수 영역을 고려하여 80 Hz

~ 4,000 Hz 으로 설정하였다. 마이크론의 성능을 나타내는데 중요한 지표인 분해능은 5m 이상에서 음원의 방사되고 있는 경우에 3dB 밴드폭을 기준으로 측정 주파수 범위 내에서 평균적으로 2m 이내가 되도록 설정하였다. 또한 3dB 밴드폭과 함께 마이크론 어레이의 주요한 성능 지표인 최대부엽레벨의 값은 측정 주파수 범위 중 4,000 Hz 를 기준으로 최소 10 dB 이하의 값을 갖도록 설정하였다.

마이크론으로 최적의 마이크론 어레이를 구현하기 위해서는 일정한 공간 안에서 각 마이크론을 적절하게 배치하는 것이 가장 중요하다. 마이크론 중에서 임의의 i 번째와 j 번째의 마이크론에서 측정되는 신호는 x_i 와 x_j 로 나타낼 수 있다. 이 때 두 측정 신호의 상관함수 (Correlation function)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{ij}(\tau) = w_i w_j^* R_f(\vec{x}_i - \vec{x}_j, \tau) \quad (10)$$

위 식으로부터 두 측정 신호의 상관성은 측정되는 위치의 차에 영향을 받음을 알 수 있다. 따라서 마이크론을 효과적으로 배치하기 위해서는 w_i 와 w_j 의 값의 중복성 (Redundancy)이 생기지 않도록 배열되어야 한다. 마이크론 어레이의 형상을 바탕으로 각 마이크론의 거리, $\vec{x}_i - \vec{x}_j$ 를 나타낸 형상을 Co-array 형상이라고 한다.

우선 48 채널로 구현된 마이크론 어레이의 형상과 Co-array 형상을 그림 8 과 같이 분석하였다. 직사각형 (Rectangular) 어레이의 경우 Co-array 형상 또한 직사각형의 모형을 나타냈으며, 일정한 간격으로 구현되어 있다. 일정한 간격의 Co-array 형상을 갖게 되는 경우에는 어레이의 간격보다 작은 파장의 음원의 경우에는 공간 앨리어싱 (Spatial Aliasing)에 의해서 주파수를 특정할 수 없는 경우가 생길 수 있다.

나선형 (Spiral) 어레이의 경우에는 각 형태가 불규칙한 형태로 되어 있어, Co-array 형상이 중심에 집중되어 있는 형태가 나타났다. 가장 이상적인 어레이 형상으로 알려진 랜덤 (Random) 어레이의 경우에는 Co-array 형상이 앞서 직사각형 어레이와 비슷한 형태로 나타났으며, 더욱 조밀한 간격을 가지고 있었다.

설계된 마이크론 어레이의 형상에 대한 분해능을 검증하기 위해서 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 방법은 그림 9 와 같이 음원이 위치하고 있는 경우에 특정 주파수로 음원을 방사하여 1.0m 떨어진 거리에서 마이크론 어레이로 측정하여 빔형성 패턴을 확인하였

다. 해석프로그램은 NI 사의 Microphone Array Startup 프로그램을 이용하였다.

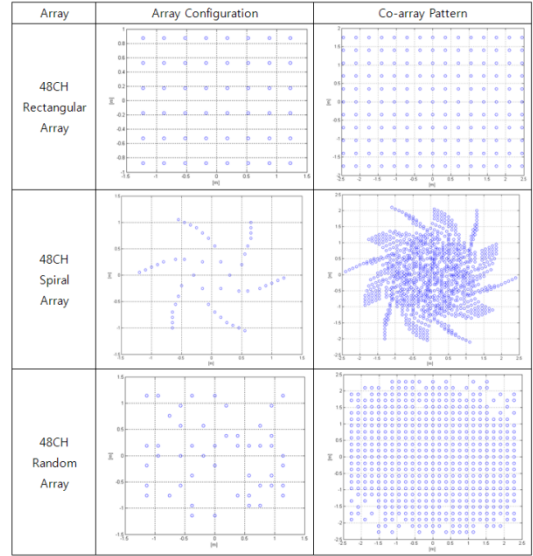


Figure 8. 48CH Microphone arrays and Co-array patterns

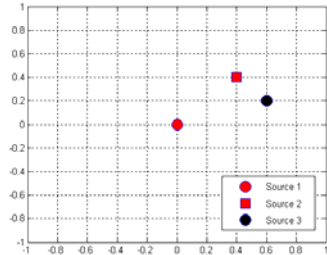


Figure 9. Source position

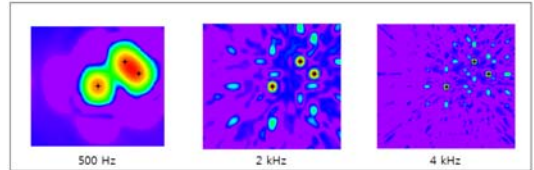


Figure 10. Resolution of the 48CH rectangular array

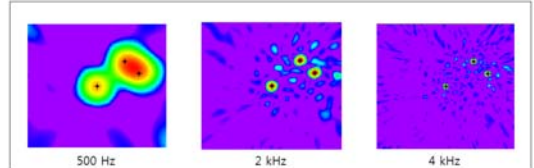


Figure 11. Resolution of the 48CH spiral array

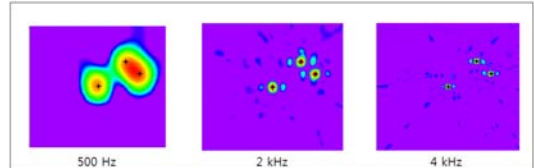


Figure 12. Resolution of the 48CH random array

48 채널 직사각형 어레이의 경우에는 그림 10과 같이 500 Hz 에서 음원 1과 2,3을 분리하였으며, 2000 Hz에서는 음원 1,2,3을 분리하였다. 하지만, 고주파수로 갈수록 실제 음원 위치 이외에 가상 음원이 발생함을 확인하였다.

그림 11의 결과를 보면 48 채널 나선형 어레이의 경우에도 2000 Hz에서 음원 1,2,3을 분리하는 결과를 나타냈다. 이를 통해 저주파영역에서 직사각형 어레이와 나선형 어레이의 분해능의 차이가 크지 않음을 확인할 수 있다. 하지만, 고주파로 갈수록 나선형 어레이는 직사각형 어레이보다 가상 음원의 위치가 현저하게 줄어들음을 확인할 수 있다. 나선형 어레이는 직사각형 어레이와는 다르게 불규칙한 패턴을 가지고 있으며 다양한 Co-array 값을 가지고 있어 공간 엘리어싱이 고주파로 갈수록 줄어드는 것으로 설명할 수 있다.

48 채널 랜덤(Random) 어레이의 경우의 시물레이션 결과는 그림 12와 같다. 랜덤 어레이는 불규칙한 패턴을 가지고 있어 가장 이상적인 어레이로 볼 수 있다. 시물레이션 결과에서도 고주파 영역에서 가상 음원이 현저히 줄어들었으며 직사각형이나 나선형 어레이보다는 가장 좋은 분해능을 가지고 있는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 랜덤 어레이 또한 1000 Hz부터 음원을 분리해내는 것을 통해 저주파 영역에서는 어레이의 형상이 분해능에 미치는 영향이 크지 않음을 확인할 수 있다.

저주파에서도 분해능을 높이기 위해서 채널 수를 증가한 96 채널 나선형 어레이를 그림 13과 같이 설계하고, Co-array 패턴을 검토하였다. 검토결과 중심부에 패턴이 밀도있게 배치하고 있음을 확인하였다. 그리고 어레이의 분해능을 그림 14와 같이 시물레이션을 통해서 확인하였다. 앞의 48 채널의 다양한 어레이 형상에 비해서 96 채널의 경우에는 저주파 영역에서의 분해능이 향상되지는 않았으나, 고주파 영역에서의 가상 음원이 현저하게 줄어들음을 확인하였다.

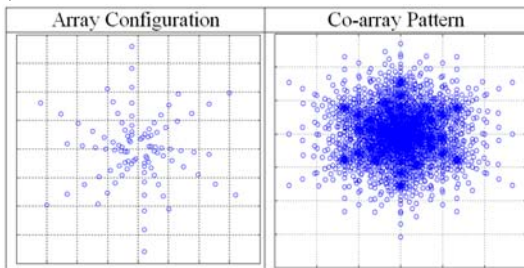


Figure13. 96CH Spiral microphone array pattern

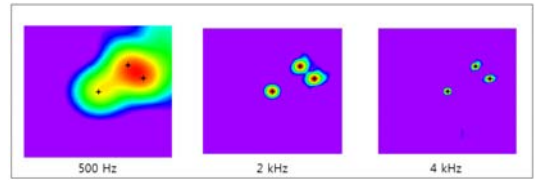


Figure14. Resolution of the 96CH spiral array

2.4 마이크론 어레이의 성능검증시험

설계된 마이크론 어레이 형상을 바탕으로 마이크론 어레이를 제작하였으며, 제작된 마이크론 어레이에 대한 분해능에 대한 성능 검증 시험을 실시하였다. 성능 검증 시험은 일정한 거리에서 음원이 방사되는 경우에 주파수를 변경하면서 실제로 마이크론에서 측정되는 신호를 바탕으로 빔파워를 분석하였다. 우선 신호생성기(AFG-320)에서 생성된 신호를 파워앰프(ANAM, AA-40)를 거쳐 스피커(JBL, Control Xtreme)를 통해 음향이 방사되도록 음향 출력부를 구성하였으며, 설계된 96 채널의 마이크론(BSWA, 1/4")에서 신호를 측정하고, 신호수집장치(NI PXI DAQ)를 이용하여 측정된 신호를 수집하였다. 측정된 신호를 바탕으로 빔패턴 형상을 구현하였다. 이 때 어레이 중심에서 음원까지 거리는 5.8 m였으며, 샘플링 주파수는 25.6 kHz, 예측면의 크기는 어레이의 직경을 고려하여 30 X 30 m²로 설정하였다. 측정 주파수는 31.5 Hz에서 8,000 Hz까지이며 그 결과를 그림에 정리하였다.

측정된 결과를 바탕으로 마이크론 어레이의 분해능을 검토해 봤을 때 125 Hz 이상에서 높은 분해능을 가짐을 확인하였다.

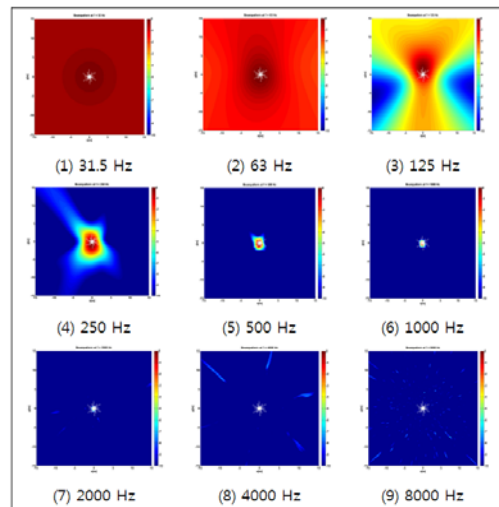


Figure15. Performance Test

3. 고속철도차량의 소음 측정 시험

어레이는 선로로부터 5m 떨어진 곳에서 설치 되었으며, 높이는 KTX 차량의 동력차 (4.1m), 동력객차 (3.484m) 및 가선 높이(5.08m)를 고려하여 선로로부터 마이크론 중양의 위치가 2.3m 가 되도록 설치하였다. 그림 16 은 실제 측정 시 마이크론 어레이의 설치 모습을 보여주고 있다.

본 측정에서는 어레이는 사각 프로파일을 이용하여 방사형으로 제작하였으며 마이크론 홀더를 이용하여 마이크론을 배치하였다. 마이크론은 BSWA 사의 1/4 인치(MPA 416)를 이용하였다. 고속 열차의 속도 측정은 포토 센서를 이용하여 수행하였다. 측정 및 분석은 National Instruments 사의 PXI(DAQ 보드: PXIe-1065, 제어기 : PXIe-8133, 데이터 스트리밍: NI 8260)를 이용하였고 샘플링 주파수는 6.4kHz 와 주파수 분해능 (Frequency Resolution)은 5.00Hz 로 측정하였다. 프로그램은 (주)에스엠인스트루먼트사의 측정 및 후처리용 프로그램(SeeSV230)를 이용하였으며, 실시간으로 96 개의 마이크론 신호와 2 개의 포토센서의 신호를 저장하였다.

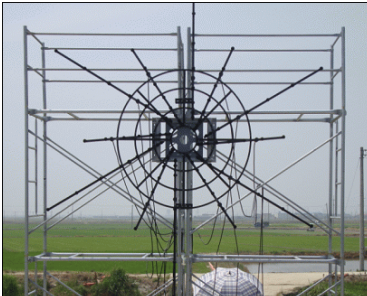


Figure16. 96CH Spiral microphone array

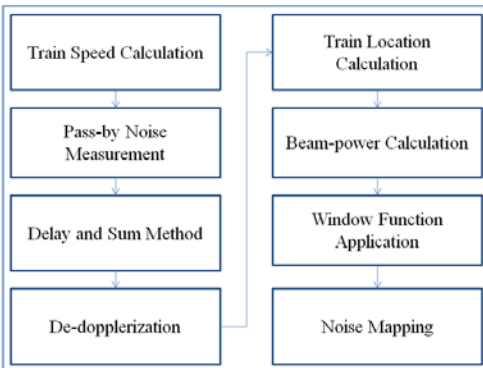


Figure17. Workflow of Noise Mapping

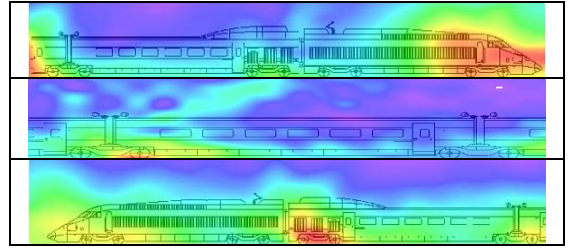


Figure18. Noise map of a high-speed train

그림 17 에서 표현된 프로세스를 바탕으로 실제 고속으로 주행하는 고속 열차의 소음을 측정하고 빔형성 기법으로 적용하여 빔과위를 구한 후에 고속 열차 차량의 소음도(Noise Map)를 구하였다.

그림 18 에서는 속도 306.6 km/h 의 속도로 주행하는 KTX 차량의 열차위치에 따른 200 Hz ~ 3000 Hz 범위의 빔과위값을 보여주고 있다. 본 그림을 통해서 열차가 고속으로 주행 시 공력 저항으로 인해 전두부에서 높은 소음이 발생하는 모습과 대차(Bogie)부분에서 휠과 레일의 접촉에 의한 전동소음이 발생함을 확인할 수 있다. 위의 결과를 통해서 본 연구에서 구현된 마이크론 어레이가 효과적으로 열차의 소음원을 분리한다는 사실을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 빔 형성 기법을 적용하여 96채널 방사형 마이크론 어레이를 설계 및 제작하였으며, 실제 소음 측정 시험을 통해서 고속열차의 소음원 도출이 가능함을 보였다.

참 고 문 헌

[1] C.Mellet, F.Letourneaux, F.Possion, C.Talotte (2006), High speed train noise emission: Lasted Investigation of the aerodynamic/rolling noise contribution, Journal of Sound and Vibration, pp 535-546
 [2] Don H.Johnson and Dan E.Dungeon, Array Signal processing(1993),pp113~118
 [3] David Thompson, Railway Noise and Vibration (2009)
 [4] Bruel & Kjar, Technical Review No.1 (2004), Beamforming
 [5] Sound View Instruments (2010), Designing a Microphone Array System for Noise Measurements on High-Speed Trains