

고속철도 소음원 가시화를 위한 어레이 설계 및 주행시험 Array design & test for noise source localization of high-speed railroad

서대훈† · 김기원* · 김구환* · 김양한* · 김영기** · 최성훈***
Dae-Hoon Seo, Ki-Won Kim, Koo-Hwan Kim, Yang-Hann Kim, Young-Key Kim, Sung-Hoon Choi

1. 서 론

지연-합 빔형성(delay-and-sum beamforming) 방법은 소음원의 가시화에 적용이 가능하며, 이 때 측정을 위한 어레이의 형상은 가시화 성능과 직접적인 관련이 있다. 본 연구에서는 지연-합 빔형성 방법을 이용하여 약 300km/h의 속도로 주행 중인 고속철도의 소음원을 가시화하기 위한 마이크로폰 어레이의 설계 및 실험을 통한 성능 시험을 목적으로 한다.

이를 위해 크게 신호 측정 문제와 소음원 예측 문제로 구분한다. 먼저 측정 문제에서는 광대역 주파수 신호(80~4000Hz)에 대해 충분한 성능을 갖도록 설계하며, 3dB 빔폭(beamwidth)과 최대부엽레벨(MSL)을 통해 설계된 어레이의 성능을 시험한다. 예측 문제에서는 차량과 마이크로폰 사이의 상대운동에 의해 발생하는 문제점을 개선하기 위해 이동 프레임 빔형성 기법을 적용한다. 마지막으로 실제 주행시험 차량에 적용한 결과를 소개한다.

2. 이동 음원의 위치 추정

2.1 측정 문제

(1) 어레이 형상 설계

Fig. 1은 Nested (composite) array를 기본으로 한 144채널 어레이를 나타낸다. 저, 중, 고 주파수 대역을 모두 측정할 수 있도록 지름이 다른 3개의 선형 어레이 조합으로 구성되어 있으며 하나의 선형 어레이 중심으로부터 어레이센서 사이의 간격은 반지름에 비례하여 증가한다.

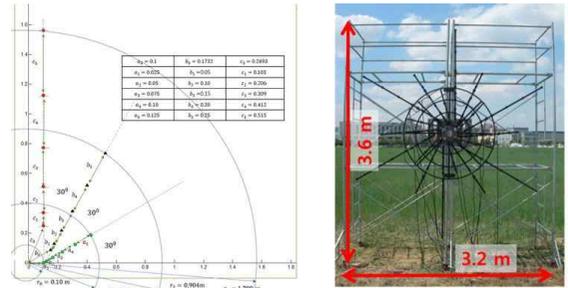


Fig.1 Nested array for measurement (144 ch.)

(2) 어레이 성능

어레이의 성능은 두 개의 음원을 구별하기 위한 3dB 빔폭(beamwidth)과 부엽(sidelobe)의 영향을 나타내기 위한 최대부엽레벨로 표현 가능하다. Fig. 2는 어레이 중심으로부터 5.8m 떨어진 거리에서 설계된 어레이의 성능을 모의실험(점선)과 실험(실선)을 통해 구한 것이다. 관심 주파수 대역(80~4000 Hz)에서 8dB 이상의 최대부엽레벨 성능을 가지며, 3dB 빔폭 또한 예측면의 크기인 30m보다 작아 소음원의 규명이 가능하다. 또한 주파수가 증가할수록 빔폭이 좁아져 근접한 음원의 구분이 가능하다.

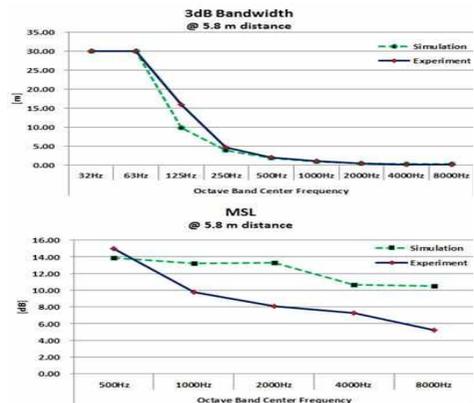


Fig.2 The performance of array (3dB beam width & maximum sidelobe level)

† 교신저자; 한국과학기술원

E-mail : ihuny@kaist.ac.kr

Tel : 042-350-3065, Fax : 042-350-8220

** (주) 에스엠인스트루먼트

*** 한국철도기술연구원

2.2 예측 문제

(1) 이동 프레임 지연-합 빔형성

음원이 이동하는 경우 센서와 음원 사이의 상대속도에 의해 도플러 효과(Doppler's effect)가 발생하며, 이는 Fig. 3과 같이 이동 프레임 지연-합 빔형성 방법을 적용하여 제거할 수 있다. 즉, 시간에 따른 음원의 속도(또는 위치)를 측정함으로써 음원과 센서 사이의 상대운동을 보정할 수 있다. 음원이 x 축 방향으로 이동하는 경우 j 번째 마이크로폰에 측정되는 신호는

$$p_j(t) = \frac{1}{c} s\left(t - \frac{|r_{sj}(t)|}{c}\right) \quad (1)$$

와 같으며, 임의의 i 번째 후보음원 위치에서의 빔 출력은

$$z_i(t) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M p_j\left(t + \frac{|r_{ij}(t)|}{c}\right) \quad (2)$$

와 같이 표현된다. 이때 음원이 $v(t) = u_0$ 인 등속운동을 하는 경우에는

$$|r_{ij}(t)| = \sqrt{(u_0 t + x_i(0) - x_j)^2 + r_0^2} \quad (3)$$

와 같이 표현되며, u_0 를 측정하여 상대 속도에 의한 도플러 효과가 보상된 빔 출력을 얻을 수가 있다.

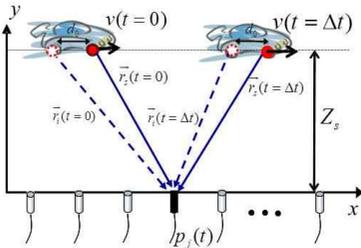


Fig.3 Coordinate for moving frame beamforming

2.3 이동 음원 위치 추정 실험

(1) 주행 예비 실험

2.1에서 설계된 마이크로폰 어레이와 2.2절의 이동프레임 지연-합 빔형성 알고리즘을 검증하기 위한 예비실험을 수행하였다. Fig. 4와 같이 주파수 대역이 다른 두 개의 혼(horn)을 장착한 SUV차량이 40Km/h로 직선 주행할 때, 두 혼의 위치를 가시화한 결과이다.

(2) 고속 철도 주행 실험

Fig.5는 이동프레임 지연-합 빔형성 방법을 적용한 고속철도 주행소음 가시화 결과이다. 주행속도는 약 300km/h 이며 차량의 전장은 약 200m이다.

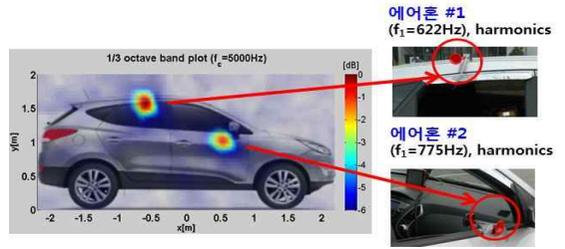


Fig.4 Feasibility test (moving vehicle: 40km/h)

동력차(part 1)를 포함한 3개의 객차에서 발생하는 소음원을 가시화한 결과이며 2kHz~3kHz 주파수 대역에서 주로 휠에 의한 소음이 지배적이다.

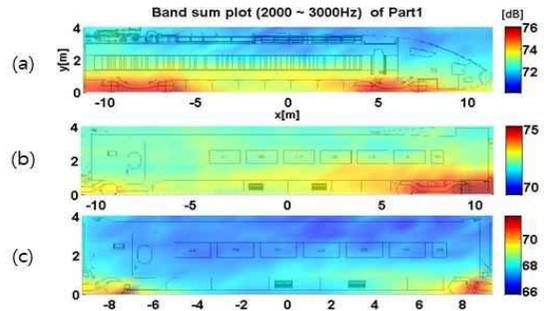


Fig.5 Visualization result of the high speed railroad

3. 결론

고속철도의 주행 중 소음원 가시화를 위해 144개의 마이크로폰을 이용한 어레이를 설계하였다. 80~4000Hz 대역에서 설계된 어레이의 3dB빔폭과 최대부엽레벨 성능을 시험하였으며, 그 결과 고속철도에서 발생하는 소음원의 가시화에 적합하였다. 또한 이동 프레임 지연-합 빔형성 방법을 적용하여 도플러 효과를 보정하였으며, 두 개의 혼을 장착한 SUV차량의 주행 중 소음원 가시화 시험을 통해 설계된 어레이와 적용된 알고리즘의 타당성을 검증하였다. 끝으로 주행 중인 고속철도에 적용하여 소음원을 가시화하였다.

후 기

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업 “분산형 고속철도 시스템엔지니어링 기술개발(07 차세대고속철도A01)” 과제 및 국방과학연구소 기초연구 과제(ADD-07-07-01), 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 휴먼인식환경사업본부-신기술융합형 성장동력사업(2011K000665)으로부터 지원을 받았으며 이에 감사 드립니다.