

< 논 문 >

음향 인텐시티법을 이용한 주행열차의 음향방사특성의 검토

Study on the Sound Radiation Characteristics of Trains by Sound Intensity Method

주진수* · 김재철**

Jin Soo Joo and Jae Chul Kim

(1997년 10월 24일 접수 : 1998년 7월 15일 심사완료)

Key Words : Train Noise Source (철도 소음원), Sound Intensity (음향 인텐시티), Sound Radiation Characteristics (음향방사특성), Rolling Noise (전동음), Motor Noise (모터음)

ABSTRACT

In order to obtain basic data for the prediction of railway noise propagation, the noise radiation characteristics (source position, radiation directivity, etc) of trains were measured by using the sound intensity method. The measurements were performed at a side of railway by setting an intensity-probe array. As the measurement results, it was found that rolling noise due to interaction between wheel and rail and motor noise radiation from the lower part of train are dominant. The location of main sound sources can be described as being at the height of 0.1 m in the center line of track, and the radiation directivity in the cross section of actually running trains are presented as a dipole source.

1. 서 론

철도소음의 전파예측에서 주행열차의 소음방사 특성이나 음원 위치는 예측의 정도를 좌우하는 중요한 요인이 된다. 지금까지의 연구결과에 의하면, 주행열차의 음원을 무지향성 또는 쌍극자 음원 등의 지향특성을 갖는 점음원에 의한 선음원 또는 점음원열 모델로 가정하고 있다. 또한 음원 위치를 궤도중심이나 선로중심, 또는 측정측 레일 윗면 등 서로 다르게 설정하고 있어⁽¹⁻⁶⁾ 음원점 위치 설정에 일반성이 없다. 따라서 철도의 소음방사 특성에 관한 충분한 기초 데이터를 바탕으로 하는 음원 위

치의 설정에 대하여 보다 상세한 검토가 요구되고 있다.

한편, 철도소음 저감 대책을 생각하는 경우에는 소음 발생원인 열차뿐만이 아니라 철도선로 환경측면에서의 대책도 필요하다. 선로 환경측면에서의 일반적인 대책으로는 선로·궤도구조의 변경이나 방음벽 등의 설치를 생각할 수 있으나, 이들 대책의 실질적 효과를 위해서는 철도 주행소음의 방사 특성과 음원 위치를 충분히 고려해야 한다.

이와 같이, 철도소음의 예측 또는 저감의 어느 문제를 생각하더라도 열차주행시의 소음방사 특성과 음원 위치가 매우 중요하다고 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 음향파위의 벡터에 의한 관측과 음장 가시화가 가능한 음향 인텐시티법을 이용하여, 전동열차 주행시의 음원의 위치, 형상, 지향성 및 방사 파워 등을 측정하고 분석하였다.

* 정회원, 한일신학대학교 건축학부

** 한국철도기술연구원 차량연구부

2. 인텐시티 측정 및 분석

2.1 측정방법

주행열차의 음향방사특성을 검토하기 위하여 바람이 거의 없는 매우 안정된 날씨 조건에서 평탄지 선로를 정상 주행하는 열차를 대상으로 음향 인텐시티 측정을 실시하였다. 선로 주위는 장애물이 없는 개활지이며, 암소음은 약 42 dB(A)로서 측정에는 영향이 없는 정도였다. 측정 열차는 일본에서 운행중인 115계 철제차량과 211계 스텐레스 차량의 전동열차를 대상으로 하였다. 측정구간에서의 열차 평균 주행속도는 90~110 km/h 범위이다. 철도에 있어서 열차주행 공력소음은 주행속도 200 km/h 이상에서 현저하게 발생하는 것으로¹¹⁾ 이에 대한 영향은 고려하지 않았다.

인텐시티 측정 계통도와 단면도를 Fig. 1에 나타내었다. 인텐시티 프로브(Ono Sokki MI-6410, 마이크 간격 50 mm)는 선로 중심에서 3 m 위치에 수직 폴을 설치하여, 일정한 간격으로 지면에 대하여 수평방향(X)과 수직방향(Y)으로 향하게 설치하였다. 그리고 측정점 ②와 ⑦에는 열차 진행방향(Z)에도 프로브를 설치하여 3차원으로 하였다. 프로브 마이크로로부터 수음된 신호는 동기(同期)시켜서 DAT형 Sony PC-208의 8채널 녹음기 6대에 나누어 녹음하였다. 열차신호의 녹음시간은 측정점에서 열차가 시야에 들어와서 사라질 때까지 통과하는 동안으로 하였다. 측정시에는 측정점의 양측에 배치한 광전관의 신호와 선로 옆에 설치한 진동계의 신호도 동시에 녹음하여 주행속도의 측정과 신호 분석의 기준신호로 이용하였다.

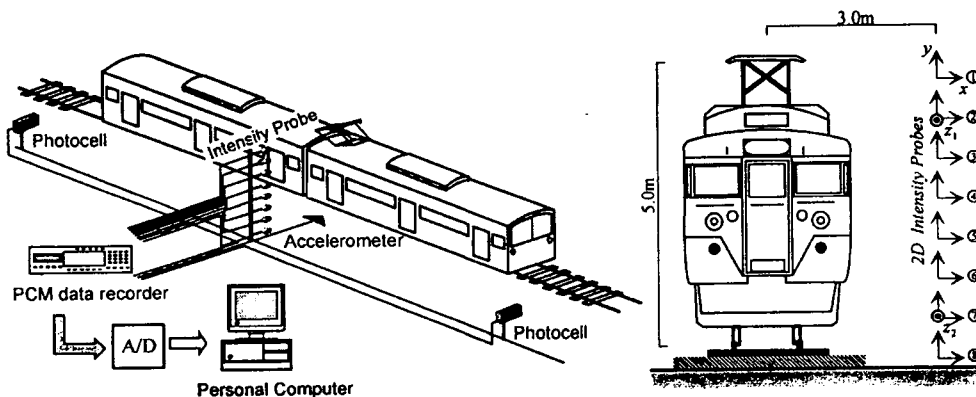


Fig. 1 Block diagram of measuring equipment and intensity probes array.

2.2 분석방법

인텐시티의 분석은 녹음한 신호를 재생하여 8채널 AD 변환기($f_s = 12$ kHz)를 통하여 개인용 컴퓨터에 입력하고, 크로스 스펙트럼법에 의한 단시간 스펙트럼 분석으로 각 프로브의 인텐시티 스펙트럼을 구하였다. 분석시간은 42 ms (500 words)의 음원신호에 하밍(hamming) 윈도우 처리를 하여 8192 점(0 부가)의 FFT 처리를 21 ms 마다 중첩하여 처리하였다. 크로스 스펙트럼 계산시에는 프로브의 마이크로폰 위상차에 대한 교정을 하였으며, $\Delta f = 1.46$ Hz 간격의 선스펙트럼을 합성하여, 1/3 옥타브밴드(100 Hz~2.5 kHz)의 인텐시티레벨의 시간변화를 구하였다(단, 측정에 이용한 인텐시티 프로브의 측정감도가 저하하는 1.6~2.5 kHz 대역의 데이터는 경향 파악에만 사용)

3. 열차의 음향방사특성

3.1 음압레벨과 인텐시티레벨의 시간변화

분석결과 중에서 800 Hz 주파수 밴드에 대한 음압레벨(Sound Pressure Level ; SPL)과 음향 인텐시티레벨(Sound Intensity Level ; SIL)의 시간변화를 Fig. 2에 나타내었다. SPL과 SIL의 시간파형에서 피크위치는 각 차량의 차륜 위치에 대응하는 결과를 나타냈다. 본 논문에는 실지 않았으나 200 Hz와 400 Hz 주파수 밴드에서는 시간파형의 변화가 매우 심하고, 특히 모터차량의 위치에서 심한 레벨상승을 보였다.

Fig. 2의 X, Y성분의 SIL을 이용한 열차 부위별에 대한 검토로서 1/48 sec 간격의 인텐시티 벡터 방향을 구하여 Fig. 3에 나타냈다. 벡터의 방향

및 각도의 시간변화는 크지 않은 결과를 나타냈다.

3.2 인텐시티 벡터에 의한 음원 탐색

주행열차의 소음방사 특성을 가시화 하기 위하여 주행속도 92 km/h, 편성 대수 7량의 115계 열차의 음향 인텐시티 측정결과를 벡터로 표시하여 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 4는, 열차가 통과하는 동안의 각 측정점에서의 순간 인텐시티(400

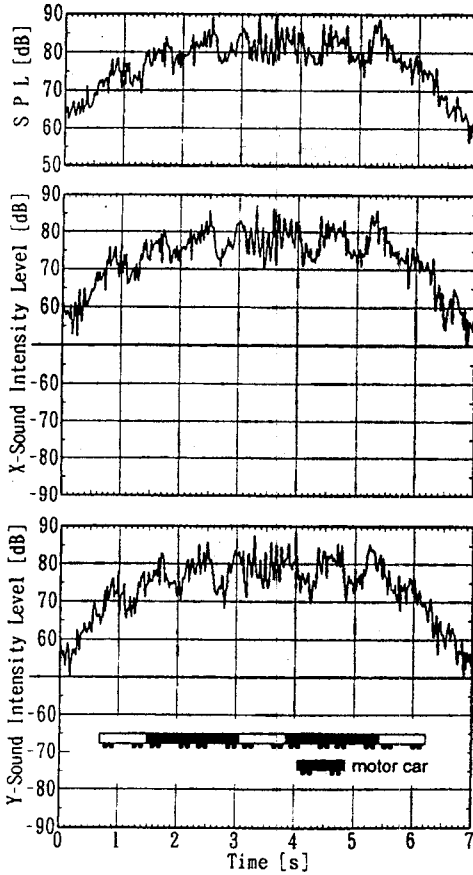


Fig. 2 The time recordings of sound pressure level and sound intensity level measured at point-4

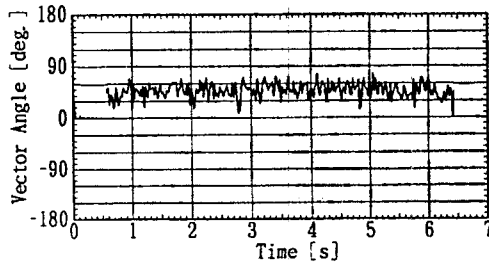


Fig. 3 Change of the intensity vector angle with time

Hz)를 X, Y 성분별로 열차통과 시간에 대하여 적분 평균하여 2차원 단면내의 인텐시티 벡터를 구한 결과이다. 그림중의 점선은 벡터의 연장선을 나타낸다. Fig. 4를 보면 레일 높이 부근의 인텐시티 벡터가 크게 나타나고 있으며, 점선으로 표시한 벡터 연장선은 거의 모두가 차륜과 레일의 접촉 또는 차체하부를 향하고 있음을 알 수 있다. 다른 주파수 대역에서도 비슷한 결과가 나타났다. Fig. 5는 측정점 ⑦에서의 X-Z 평면에 대한 400 Hz의 측정결과로 샘플링 간격마다의 열차위치와 측정점의 상대거리를 고려하여 작성한 결과이다. 이 결과에 의하면 약간 차이는 있으나 전 차량에서 인텐시티 벡터는 대차(bogie)를 중심으로 하는 방사 형태를 보이고 있음을 알 수 있다.

3.3 SIL에 의한 음원탐색

주행열차의 음원탐색을 위하여 SIL 측정결과에 의한 등압선도를 작성하여 소음원을 2차원 평면상에 표시하였다. SIL 등압선도는 각 측정점에서 1/48 sec간격으로 열차가 통과하는 동안의 X방향의 SIL을 구하여, 차체 표면에 나타낸 것이다. 그 중에서 1 Oct. band의 500 Hz에 대한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 보면 대차부근과 모터차량(②,③,⑤,⑥번 차량)의 동력장치 부근에서 SIL이 높은 사실로 미루어 이들이 주소음원인 것을 알 수 있다.

3.4 주행열차 소음원의 높이 검토

이상의 분석결과에 의하면 휠과 레일과의 상호작용에 의한 전동음 또는 차량 기기음(전동기의 냉동팬음, 모터팬음) 등 열차하부에서의 소음방사가 주요 소음원으로 파악되었다. 전동음은 휠과 레일, 차량 기기음은 차체와 궤도면 사이에서 방사되는 소음으로 모두가 궤도면상에서 방사되고 있다고 볼 수 있다. 따라서, 철도소음 예측계산의 음원모델을 작성하기 위하여 열차의 대차 중심점을 점음원으로 가정하여 해석하는 경우에는 음원 위치를 궤도면 부근에 설정하는 것이 타당한 것으로 여겨진다.

본 연구에서는 각 차량의 대차 중심을 쌍극자 점음원^(1,3-6)으로 설정하고, 이들 음원이 선로 중심선 위 0~40 cm 높이에 위치한다고 가정하여 10 cm 간격으로 인텐시티 벡터를 계산하고 음원 높이에 대하여 검토하였다. 인텐시티 벡터의 계산은 자유음장을 가정하고 음향출력 W 의 등파위를 갖는 점음원이 일직선상에 위치하는 것으로 하였기 때문에,

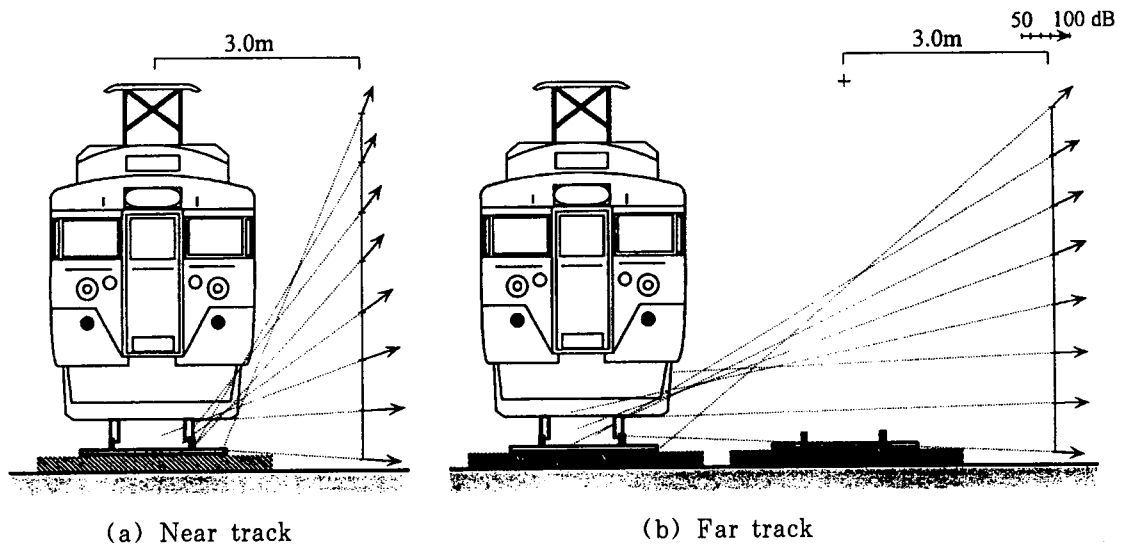


Fig. 4 Sound intensity vectors in 400 Hz $\frac{1}{3}$ octave band in X-Y plane

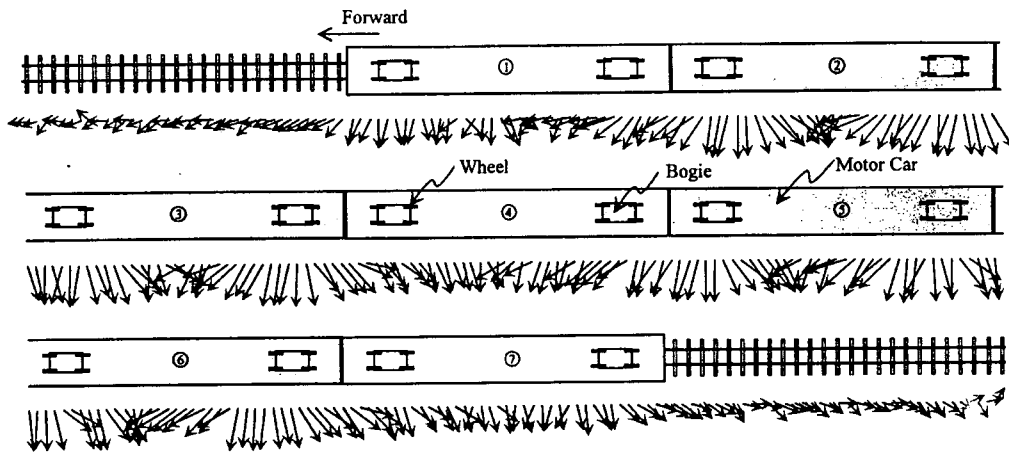


Fig. 5 Sound intensity vector (X-Z, 400 Hz) A car with motor is gray-hatched

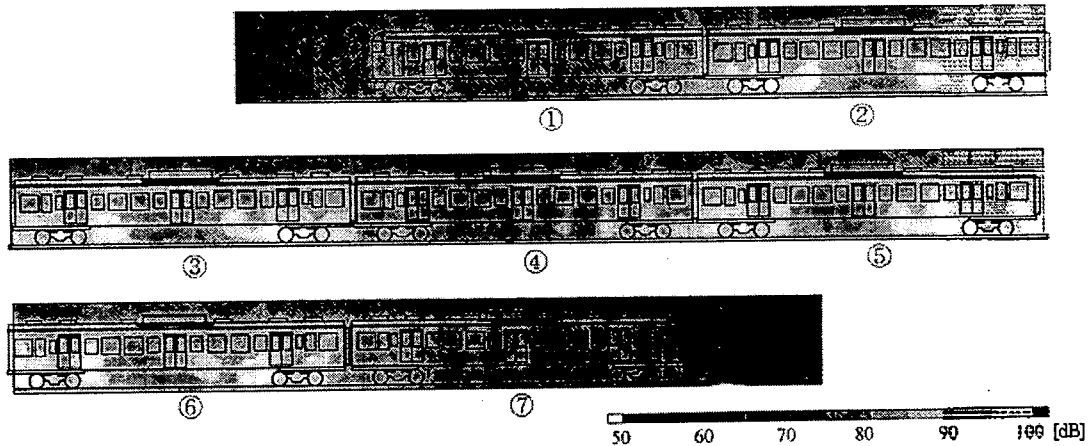


Fig. 6 Sound intensity contour map in 500 Hz octave band

측정점에서의 음향 인텐시티는 다음 식이 된다.

$$I = \sum_{i=1}^N \frac{W_i}{4\pi r_i^2} \cos^2 \theta_i \quad (1)$$

- 여기서, I : 음향 인텐시티 [W/m²]
- W_i : i 번째 점음원의 음향파워 [W]
- N : 음원의 수
- r : 점음원 i 에서 측정점까지의 거리 [m]
- θ_i : 음원점 i 를 지나는 선로에 대한 법선과 음원점과 측정점을 잇는 직선이 이루는 각도

계산에서는 벡터의 기울기에 대해서만 검토하기 위하여 음향출력 W 값으로는 임의의 값을 입력하였다. 실선의 계산결과와 점선의 측정결과와의 벡터 기울기를 비교한 결과, 높이에 따라 약간의 차이가 나타났으나, 그 중에서 서로 잘 일치하는 음원 높이를 10 cm로 가정한 경우의 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

3.5 열차소음의 수직 단면내에서의 지향특성

열차 주행소음의 지향특성을 알아보기 위하여 각 측정점에서 열차통과시의 SPL의 에너지 평균값을 구하고, 그 값은 음원 위치를 선로 중심선 위 10 cm로 가정하고 식 (2)를 이용하여 반경 6 m의 동일 원주상의 음압레벨로 환산하였다. 그 결과를

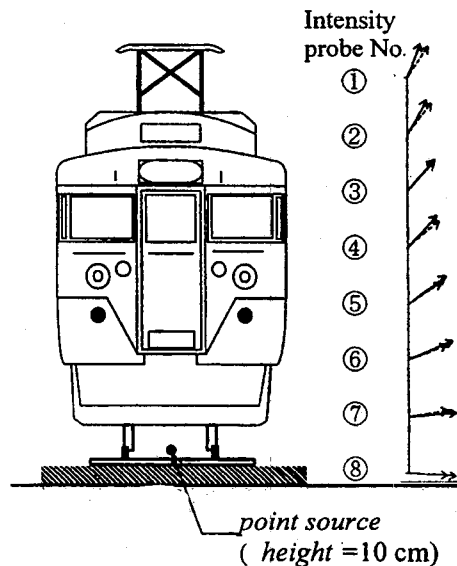


Fig. 7 The source height calculated with sound intensity
Dotted line, calculated : solid line, measured

Fig. 8에 나타내었다. 그림을 보면 수직 단면내에서의 열차 주행소음은 수평방향으로 약간 강한 지향특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

$$L_p = L_{p_0} - 10 \log \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \quad (2)$$

- 여기서, L_p : 추정하는 원주상의 음압레벨 [dB]
- L_{p_0} : 측정점의 음압레벨 [dB]
- r : 원주의 반경 (=6 m)
- r_0 : 음원에서 측정점까지의 거리 [m]

한편, 식 (2)에서 산출한 동일 원주상의 SPL의 오버를 값을 이용하여 수직 단면내에서 열차 주행소음의 지향성을 나타내는 계수 n 에 대하여 검토하였다. 지향성을 나타내는 계수는 파워 W 의 무지향성 음원에서 거리 r 떨어진 점과 파워 W 의 음원에서 거리 r 과 각도 θ 를 갖는 점과의 음압 레벨차로서 나타낼 수 있으며^(1,10), 측정점 ⑦의 SPL

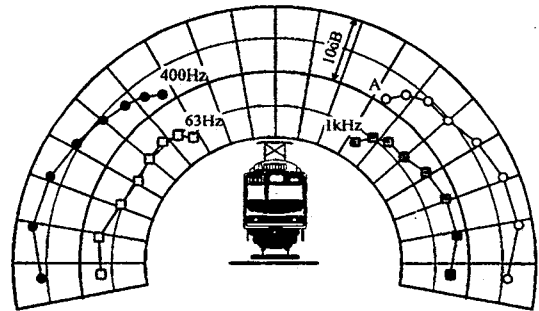


Fig. 8 Directional characteristics in X-Y plane obtained from sound pressure measurement

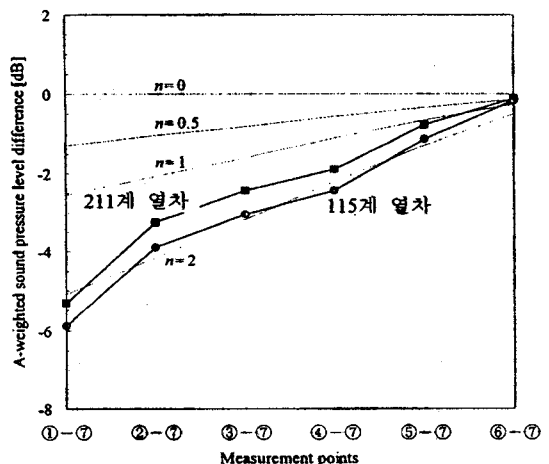


Fig. 9 Investigation of the directional characteristic in A-weighted sound pressure level

을 기준으로 하면 계산식은 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta L = 10 \log \left(\frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_1} \right)^n \quad (3)$$

- 여기서, ΔL : 음압레벨차
 θ_i : 측정점 i 와 음원점을 잇는 직선과 선로에 대한 법선이 이루는 각도
 θ_1 : 측정점 ①과 음원점을 잇는 직선과 선로에 대한 법선이 이루는 각도
 n : 지향성을 나타내는 계수 (= 0, 0.5, 1, 2)

115계와 211계 열차의 측정결과에 의한 음압레벨차와 식 (3)에 의한 계산결과를 Fig. 9에 함께 나타내었다. 이 결과에 의하면 측정결과와 음압레벨차는 계수를 $n=2$ 로 가정한 계산결과에 가깝게 분포하여 쌍극자 음원의 소음방사 특성을 나타내는 것으로 파악되었다.

4. 결 론

음향 인텐시티 측정법은 음향 인텐시티의 벡터 표시에 의하여 음장의 시각적 표시가 가능하여 복잡한 음장의 해석이나 각종 음원의 방사파워 측정, 건축음향의 차음측정 분야에도 응용범위가 넓어지고 있다. 이러한 특징을 활용한 음향 인텐시티 측정법의 응용으로서 철도소음의 효과적인 예측을 위한 주행열차의 소음방사 특성에 대하여 실험적 검토를 하였다. 주행열차의 소음방사 특성을 벡터로 나타낸 결과, X-Y평면의 벡터 연장선은 거의 모두가 차륜과 레일의 접점 또는 차체하부를 향하는 결과를 나타냈으며, X-Z평면의 인텐시티 벡터는 대차를 중심으로 하는 방사 형태를 나타냈다. 또한, X방향의 음향 인텐시티 레벨의 등압선도를 차체 표면에 나타냈다. 이와 같은 검토방법에 의하여 주행열차의 소음방사특성을 가시화 할 수 있었으며 그 결과 전동음과 차량 기기음이 주요 소음원으로 파악되었다.

또한, 인텐시티 벡터를 이용하여 주행열차의 음원 위치를 검토한 결과, 음원 위치를 궤도 중심선상의 높이 10 cm에 설정한 계산모델에 의한 계산결과와 측정결과가 서로 유사한 결과를 나타냈다. 주행열차의 수직단면 내에서의 소음방사 특성은 수평 방향으로 약간 강한 방향성을 나타냈으며 소음방사

특성을 $\cos^2 \theta$ 로 모델화 할 수 있음을 알았다.

후 기

본 논문의 작성에는 日本 東京大學 生産技術研究所 橋 秀樹(H. Tachibana)교수로 부터 많은 도움이 있었음을 첨언한다.

참 고 문 헌

- (1) D. Hohenwater, 1990, "Railway Noise Propagation Models," Journal of Sound and Vibration, Vol. 141, pp. 17~41.
- (2) L. G. Kurzweil, W. N. Cobb and R. P. Kendig, 1979, "Propagation of Noise from Rail Lines," Journal of Sound and Vibration, Vol. 66, pp. 389~405.
- (3) J. Lang, 1969, "A Model to Calculate Railway Noise," Internoise 89, pp. 1243~1248.
- (4) E. J. Rathe, 1977, "Railway Noise Propagation," Journal of Sound and Vibration, Vol. 51, pp. 371~388.
- (5) D. H. Cato, 1976, "Prediction of Environmental Noise from Fast Electric Trains," Journal of Sound and Vibration, Vol. 46, pp. 483~500.
- (6) S. Peters, 1974, "The Prediction of Railway Noise Profiles," Journal of Sound and Vibration, Vol. 32, pp. 87~99.
- (7) S. Peters, 1973, "Prediction of Rail-Wheel Noise from High Speed Trains," Acustica, Vol. 28, pp. 318~321.
- (8) P. J. Remington, 1985, "Prediction of the Effectiveness of Noise Control Treatments on Urban Rail Elevated Structures," Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 78, pp. 2017~2033.
- (9) P. M. Nelson, 1987, Transportation Noise Reference Book, Butterworth.
- (10) Leo L. Beranek, Istvan L. Ver, 1992, Noise and Vibration Control Engineering, JHON WILEY & SONS, INC.
- (11) 東京工業大學 精密工學研究所, 1995, 靜肅工學, 開發社, pp. 263~323.