

한국형 고속철도의 소음 전파특성에 관한 연구

A Study on Propagation Characteristic of Noise Sources for Korea Train Express

김 재 철[†] · 유 충 준^{*}
Jae Chul Kim and Chung Jun You

(2003년 10월 24일 접수 : 2004년 2월 6일 심사완료)

Key Words : Propagation Characteristic(전파특성), Railway Noise(철도소음), Rolling Noise(전동음), Dipole Source(쌍극자 음원), Korea Train Express(한국형 고속철도)

ABSTRACT

In order to control the railway noise, the radiation characteristic of the noise when the train passes by should be analyzed. Generally, the major noise sources of the Korea Train Express are the rolling noise and power unit noise up to 300km/h. In this paper, a train model that is considered to be a row of point sources is introduced to analyze the radiation characteristic. The analysis results are compared with the measurement ones. It is shown that the propagation characteristic of the rolling noise is a dipole type and the noise generated by the power unit is radiated as a cosine type. With increasing of the train speed, the noise level at a receiving point is increased in the direction of motion and reduced in the direction opposite to the motion. The analysis results including the moving effect of the noise source at 300km/h show good agreement with the measurement results.

1. 서 론

유럽의 프랑스, 독일 및 일본과 같은 철도선진국은 철도의 수송력 증대를 위해서 300 km/h급 고속철도를 개발하여 운행 중에 있다. 국내에서도 프랑스 TGV를 도입하여 2004년 개통을 목표로 현재 한국형 고속철도(Korea Train Express: KTX)가 건설 중에 있으며 시험구간에서 최고속도 300 km/h로 주행하고 있다.

고속철도는 많은 승객을 짧은 시간에 수송할 수 있는 장점과 함께 고속으로 주행하기 때문에 기존철도

보다 소음 및 진동이 주변환경에 커다란 영향을 미친다.

이러한 철도소음은 점차 철도연변까지 주거지역이 확대되면서 사회적 문제로 발전되어 소음문제를 해결하기 위한 대책방안으로 방음벽이 많이 사용되고 있다. 그러나 차량을 모델링하여 전파되는 소음의 예측과 방음벽을 이용하여 소음에 대한 저감방안의 수립을 세우기 위해서는 기본적으로 철도 소음원의 전파특성이 요구된다.

철도차량의 소음원에 대한 전파특성의 연구는 많은 연구자^(1~4)들이 차륜과 레일의 접촉에 의해서 발생하는 전동음을 소음원으로 모델화하여 쌍극자 음원(dipole source)의 특성으로 전파된다는 것을 파악하였으며, 저자는 국내에서 주행중인 기존차량을 점음원으로 모델화하여 전동음은 쌍극자 음원, 동력소음은 코사인 음원(cosine source)의 전파특성을 나타내는 것을 확인하였다.⁽⁵⁾

본 연구에서는 저자가 제시한 철도차량에 대한 소

[†] 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원 차량기계연구본부

E-mail : jckim@krri.re.kr

Tel : (031) 461-8531, Fax : (031) 461-8561

^{*} 경기대학교 전자기계공학부

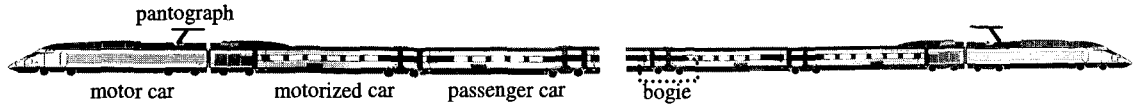


Fig.1 Model of Korean Train Express

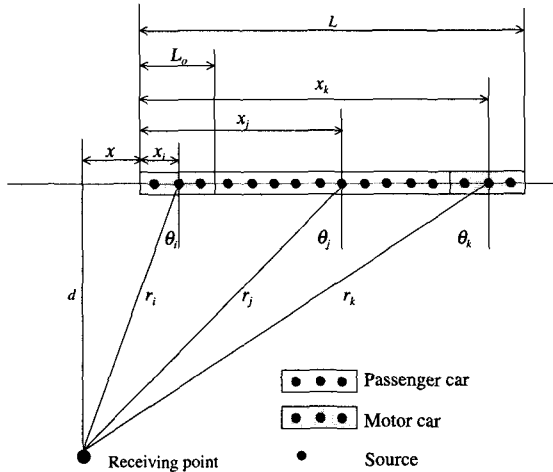


Fig. 2 Calculation model for noise sources of KTX

음원 모델을 이용하여 한국형 고속철도 차량의 소음원 모델을 확립하였으며, 300 km/h 주행 시 음원이동에 의한 영향을 고려한 해석결과와 측정결과를 비교 검토하여, 고속주행 시 음원의 이동효과를 검증하였다.

2. KTX 차량의 음원모델 및 계산순서

2.1 KTX 차량의 소음원

일반적으로 고속으로 주행하는 철도차량의 소음은 크게 차륜과 레일에 의한 전동음, 동력장치에 의한 소음, 공력소음으로 분류되며, 차량의 속도에 따라 각 소음원이 전체소음에 미치는 기여도는 다르게 나타난다. 일반적으로 고속영역에서는 공력소음이 전동음과 동력소음보다 크게 나타나는 것으로 알려져 있다. 그러나 프랑스의 TGV-A는 300 km/h의 속도까지 전동음의 영향이 크게 나타나는 것으로 알려져 있으며,⁽⁶⁾ 프랑스의 TGV-A와 동일한 한국형 고속철도(KTX) 역시 약 300 km/h까지 전동음의 영향이 큰 것으로 파악되었다.⁽⁷⁾ 따라서, 현재 최고속도 300 km/h까지 시험운행중인 한국형 고속철도의 주 소음

원을 전동음으로 설정하였다. 그리고 한국형 고속철도 차량은 Fig. 1과 같이 전두부와 후두부에 연결되어있는 동력차에 의해서 운행되는 동력집중방식으로 구성되어있기 때문에 동력장치를 탑재한 차량에 대해서는 동력장치에서 발생하는 소음을 추가하였다.

2.2 KTX 차량의 음원모델

한국형 고속철도의 소음원 모델은 Fig. 2와 같이 전동음에 대해서는 차륜위치를 소음원의 위치로 설정하여 점음원이 나열되어 있는 상태에 전두부와 후두부에 동력소음에 해당하는 점음원을 설정하여 모델링하였다.

일반적으로 음원으로부터 일정한 거리만큼 떨어진 곳에서의 음압은 식 (1)과 같이 쓸 수 있으며, $\rho c W / 4\pi r$ 를 K 로 치환하면, 각 음원과 수음점까지의 거리 r , 음원과 수음점사이의 각 θ 과 K 로 표현된다.

$$P^2 = \rho c \frac{W}{4\pi r^2} \cos^n \theta = \frac{K}{r^2} \cos^n \theta \quad (1)$$

여기서, ρc 는 음향임피던스, W 은 음원의 음향파워, P 는 수음점의 음압을 나타내며, $n=0$: 무지향성 음원(spherical source), $n=1$: 코사인 음원(cosine source), $n=2$: 쌍극자 음원(dipole source)을 나타낸다.

식 (1)에서 우측항 K 는 음원의 파워에 해당하기 때문에 소음의 크기를 결정하고, 두번째 항은 소음의 전파형태를 결정하는 지향성을 나타낸다.

식 (1)에서 r 과 θ 는 음원과 수음점의 기하학적 관계를 이용하여, 수음점의 높이 h_r , 음원의 높이 h_s , 음원과 수음점간의 수직거리 d 등으로 나타낼 수 있다. 이러한 관계식을 식 (1)에 대입한 후, $x=vt$ 로 치환하면 시간변화에 대한 수음점에서의 음압을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$P^2 = K \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{r_i} \right)^2 \cos^n \theta_i$$

$$= K \sum_{i=1}^m \left(\frac{d}{\left\{ (h_r - h_c)^2 + d^2 + (x_i + vt)^2 \right\}^{\frac{n+2}{2}}} \right) \quad (2)$$

여기서, m 은 음원의 수를 나타낸다.

전두부와 후두부의 동력소음도 위와 동일한 방법으로 계산할 수 있으며 식 (3)과 같이 각각의 소음원에 대한 음압을 계산해서 더하면 전체소음을 구할 수 있다.

$$P^2 = K_{L1} \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{r_i} \right)^2 \cos^2 \theta_i + K_C \sum_{j=1}^k \left(\frac{1}{r_j} \right)^2 \cos^2 \theta_j + K_{L2} \sum_{k=1}^m \left(\frac{1}{r_k} \right)^2 \cos^2 \theta_k \quad (3)$$

여기서, K_{L1} 과 K_{L2} 은 전두부와 후두부의 동력차에서 방사되는 동력장치에 의한 소음의 음향파워, K_C 는 객차에서 방사되는 전동음의 음향파워에 해당하는 값이다.

2.3 소음 전파특성 계산순서⁽⁵⁾

KTX 차량의 소음 전파특성은 식 (3)으로부터 계산할 수 있다. 우선, 차량의 길이와 속도, 차륜의 위치, 소음원과 수음점의 높이, 소음원과 수음점까지의 거리 등을 입력하면 식 (2)에서 소음원에 대한 지향성을 나타내는 항을 계산할 수 있다. 그러나 소음의 크기를 결정하는 K 값에 대한 계산이 필요하기 때문에 본 연구에서는 실제 차량주행 시 객차부분에 해당하는 소음레벨의 실험값 $L_{eq(A)}$ 을 식 (2)에 대입해서 K 값을 구하였다. 또한, 동력차로부터 발생하는 엔진 소음은 동력차부분에 대한 소음레벨 $L_{eq(A)}$ 과 객차부분에 대한 소음레벨 $L_{eq(A)}$ 의 차로부터 음압을 구한 후, 위와 동일한 방법으로 K 값을 산출하였다. 위에서 계산한 K 값을 다시 식 (3)에 대입해서 시간에 따른 소음을 계산하여 측정결과와 비교하였다.

본 논문에서 각 음원높이는 전동음의 경우 궤도담면에서부터 10 cm로 설정하였으며, 동력장치에 의한 소음은 엔진 및 기기류의 높이를 고려하여 2 m로 설정하여 계산하였다.

3. 시험방법 및 결과분석

3.1 시험방법

시험장소는 장애물 혹은 방음벽이 없는 직선구간을 선택하였으며, 마이크로폰은 Fig. 3과 같이 궤도중심에서 15 m와 25 m 떨어진 지점에 지상으로부터 1.2 m의 높이로 설치하여 차량 통과 시 소음을 측정하여 녹음기(SONY SIR-1000)에 기록한 후, 분석하였다.

3.2 측정결과와 계산결과의 비교

차량에서 발생된 소음의 전파특성은 시간축에서 음압의 기울기 차이로 나타나기 때문에 측정결과와 비교하여 전파특성을 파악할 수 있다.

본 연구에서 소음원의 전파특성은 전동음의 경우 쌍극자 음원($n=2$)으로 하고, 동력장치에 의한 소음은 코사인 음원($n=1$)으로 설정하여 계산하였다.

Fig. 4는 KTX 차량1편성(20량) 통과 시 15 m지점에서 측정한 결과와 계산결과를 비교하였다. 약 120 km/h와 180 km/h의 속도에서는 측정결과와 계산결과가 잘 일치하고 있지만, 300 km/h의 결과에서는 차량 전두부에서 많은 차이를 나타나고 있다. 이러한 차이는 KTX차량이 고속으로 주행하기 때문에 발생하는 음원이동의 영향으로 생각된다.

이러한 음원이동의 효과는 차량 주위의 소음분포를 예측할 경우 소음레벨에 영향을 미치기 때문에 Peters⁽⁴⁾는 차량이 고속으로 주행할 경우 음원이동의 효과가 크다는 것을 나타내었으며, 고속영역에서 전두부에서는 소음레벨이 증가하고 후두부에서는 소음레벨이 감소한다는 계산결과를 나타내었다.

3.3 음원이동의 효과

본 항에서는 고속영역(300 km/h)에서 음원이동의 효과를 고려하여 계산한 결과와 측정결과를 비교 검

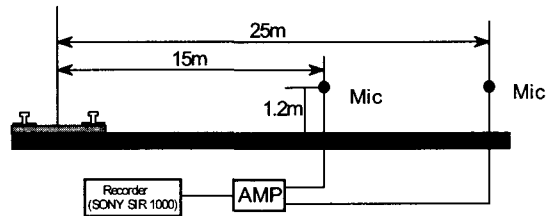
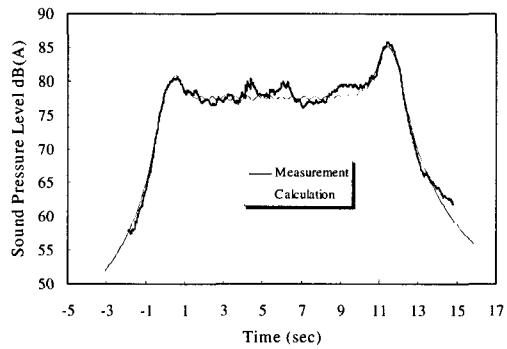


Fig. 3 Microphone locations

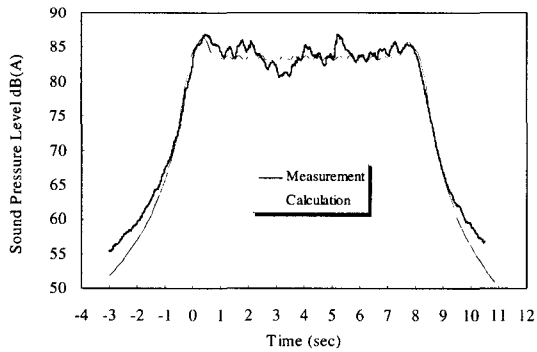
도하였다.

일반적으로 열차통과 시 일정한 거리만큼 떨어진 수음점의 음압은 각 소음원으로부터 방사되는 음압의 합으로 나타나며, 음압의 크기는 음압이 방사되는 순간 음원의 강도와 음원과 수음점까지의 거리에 따라 변한다.

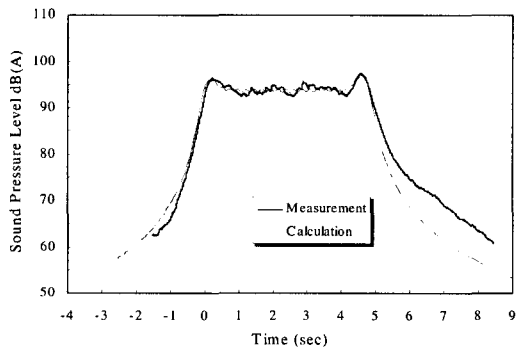
앞절의 소음원 모델에서는 각 음원으로부터 방사되



(a) Speed : 120 km/h



(b) Speed : 180 km/h



(c) Speed 300 km/h

Fig. 4 Calculation results of noise propagation characteristic at distance 15 m

는 소음이 수음점에 도달할 때 음원과 수음점까지의 거리가 변하지 않는 것으로 가정하여 계산하였다. 그러나, 실제 음원이 고속으로 주행할 경우에는 Fig. 5와 같이 소음이 음원에서 출발하여 수음점에 도달할 때 음원이동에 의해서 음원과 수음점까지의 거리가 변하게 된다.

여기서, r_0 는 소음이 전파될 때 음원과 수음점까지의 거리, r 은 소음이 수음점에 도달할 때 음원과 수음점까지의 거리, θ 는 수음점과 음원 사이의 각도, v 는 음원의 속도를 나타낸다.

이러한 음원이동에 의한 거리변화는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있으며^(4,8) 이식을 식 (2)에 대입하면 앞절의 음원모델에서 음원의 이동효과를 고려할 수 있다.

$$r_0 = \frac{r}{\left(1 - \frac{v}{c} \cos \phi\right)} \quad (4)$$

Fig. 6은 식 (4)를 식 (2)에 대입해서 속도증가에

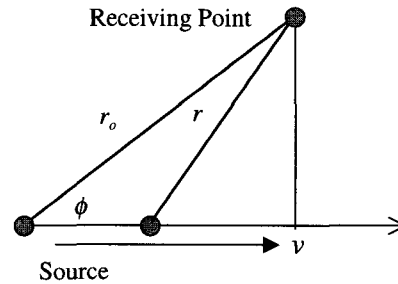


Fig. 5 The change of distance between source and receiving point due to the moving source

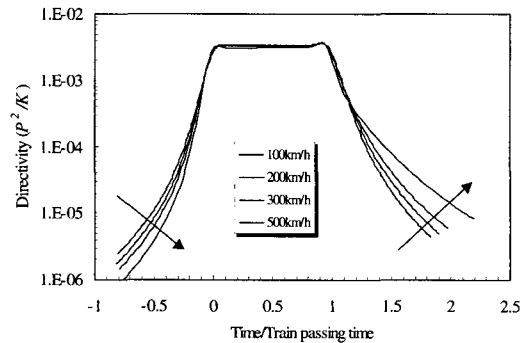


Fig. 6 Calculation results of directivity(P^2/K) (source type : dipole, distance : 50 m)

따른 쌍극자 음원에 대한 계산결과이다. 차량의 속도가 증가함에 따라 차량의 진행방향에 대해서 앞부분은 소음이 증가하고 뒷부분은 감소하는 것을 알 수

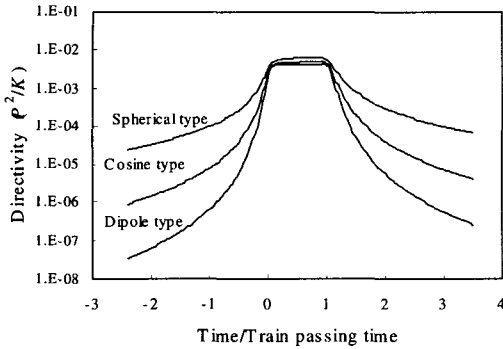
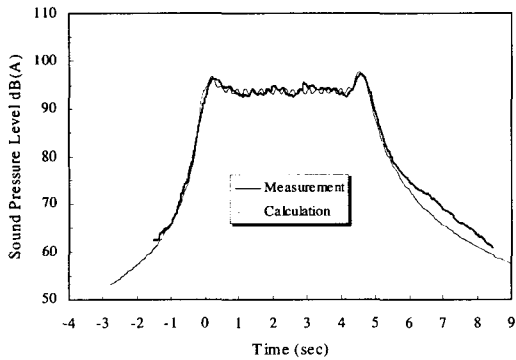
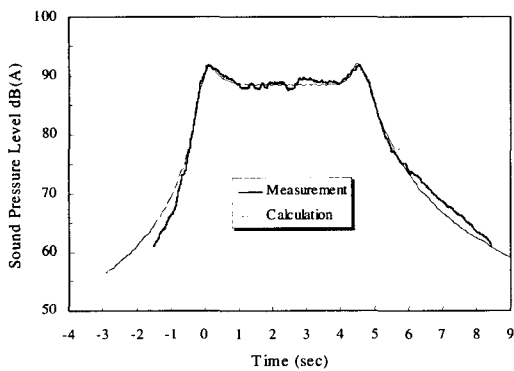


Fig. 7 Calculation results of the directivity for propagation characteristics (speed : 500 km/h, distance : 50 m)



(a) Distance : 15 m



(b) Distance : 25 m

Fig. 8 Calculation results of noise propagation characteristic including moving effect of the noise source

있다.

Fig. 7은 차량이 500 km/h의 속도로 주행하는 경우 음원의 이동효과를 고려한 각 전파형태의 계산결과이다. 음원의 지향성이 강할수록 음원의 이동 효과에 의한 소음의 변화형태가 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 4(c)의 계산결과에 음원의 이동효과를 고려하여 계산한 결과이다. 음원의 이동효과에 의해서 차량 진행방향의 앞부분의 소음이 증가하면서 측정결과와 계산결과가 상당히 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서, 위의 결과로부터 KTX 차량이 120 km/h와 180 km/h로 주행시에는 음원이동에 의한 영향이 무시할 정도로 작지만, 300 km/h로 주행시에는 음원이동의 효과가 큰 것을 알았다.

4. 결론

본 연구에서는 향후 2004년 운행예정인 한국형 고속철도 차량을 모델화하여 300 km/급 고속차량에 대한 모델을 확립하고, 차량이 고속으로 주행시 음원의 이동효과를 계산과 실험결과를 통해서 검증하였다.

(1) 300 km/h까지 한국형 고속철도 차량의 주 소음원을 전동음과 동력소음으로 나누어서 고려하였다. 전동음에 대한 음원은 각 차륜의 위치를 소음원으로 설정하고, 동력소음은 동력장치 및 각종 기기류를 소음원으로 설정하여 점음원이 나열된 형태로 모델화하여 한국형 고속철도의 소음원에 대한 모델을 확립하였다.

(2) 한국형 고속철도 차량의 소음전파특성에 대한 계산치와 측정치를 비교한 결과, 차량 속도가 약 300 km/h까지 전동음과 동력소음을 주 소음원으로 고려하여 모델화하여도 소음전파특성 계산 시 충분한 결과를 얻었다. 그러나 약 300 km/h의 속도로 주행하는 경우에는 음원의 이동효과에 의해 차량의 전두부에서는 소음레벨이 증가하고 후두부에서는 감소하는 것을 알았으며, 음원의 지향성이 강할수록 음원의 이동효과에 의해서 소음의 변화가 큰 것을 알았다.

(3) 향후, 고속철도 차량의 속도가 향상될 경우에는 차량의 전두부 혹은 판토타그래프 등에서 방사되는 공력소음의 영향이 커지기 때문에 차량의 소음원을 모델화할 경우 공력소음에 대한 영향을 고려해야 할 것으로 생각된다.

후 기

본 시험은 한국고속철도공단의 협조로 수행되었으며 관계자에게 감사합니다.

참 고 문 헌

- (1) Cato, D. H., 1976, "The prediction of environmental noise from fast electric trains," *Journal of sound and vibration*, Vol. 46, No. 4, pp. 483~500.
- (2) Hohenwarter, D., 1990, "Railway noise propagation models," *Journal of sound and vibration*, Vol. 141, No. 3, pp. 17~41.
- (3) Rathe, E. J., 1977, "Railway noise propagation", *Journal of sound and vibration*, Vol. 51, No. 3, pp. 371~388.
- (4) Peters, S., 1974, "The prediction of railway noise profiles," *Journal of sound and vibration*, Vol. 32, pp. 87~99.
- (5) 김재철, 문경호, 2003, "철도소음의 방사특성에 관한 연구," *대한기계학회논문집A*, 제 27 권, 제 4 호, pp. 531~536.
- (6) Mauclair, M. B., 1990, "Noise generated by high speed trains," *Inter-Noise 90*, pp. 371~374.
- (7) 김재철 외 2명, 2002, "한국형 고속철도에서 방사되는 소음분석," *한국소음진동공학회논문집*, 제 12 권, 제 9 호, pp. 668~673.
- (8) Morse, P. M. and Ingard, K. U. 1968, "Theoretical Acoustics," New York: McGraw-Hill Book Company, Inc.