

# 한국형 고속철도의 소음 방사특성에 관한 연구

## A Study on Radiation Characteristics of Noise Sources for Korean Train Express

°김 재 철\* · 구 동 회\*\* · 문 경 호\*\* · 이 재 응\*\*\*  
Jae Chul Kim, Dong Heo Koo, Kyeong Ho Moon and Jae Eung Lee

**Key Words :** Radiation Characteristic(방사특성), Railway Noise(철도소음), Rolling Noise(전동음), Dipole Source(쌍극자 음원), Korean Train Express(한국형 고속철도)

### ABSTRACT

In order to control the railway noise, the radiation characteristic of the noise during the train passage should be analyzed. Generally, the major noise sources for Korean Train Express are the rolling noise and power unit noise up to 300km/h. In this paper, we describe on a train model that is considered to be a row of point sources to calculate the radiation characteristic. The calculation results are compared with short distance measurement. It is shown that the radiation characteristic of the rolling noise is dipole type. The noise generated by the power unit is radiated as the cosine type. The noise level at an observer is increased in the direction of motion and reduced in the direction opposite to the motion with increasing of the train speed. The calculation results including the moving effect of the noise source at 300km/h show in good agreement.

### 1. 서 론

유럽의 프랑스, 독일 및 일본과 같은 철도선진국은 철도의 수송력 증대를 위해서 250km/h 이상의 철도를 개발하여 운행 중에 있다. 국내에서도 프랑스 TGV를 도입하여 2004년 개통을 목표로 현재 한국형 고속철도(Korean Train Express:KTX)가 건설 중에 있으며 일부구간에서는 최고속도 300km/h로 주행시험을 하고 있다.

고속철도는 많은 승객을 짧은 시간에 수송할 수 있는 장점과 함께 고속으로 주행하기 때문에 기존철도보다 소음 및 진동이 크게 발생한다.

이러한 철도소음은 점차 철도연변까지 주거지역이 확대되면서 사회적 문제로 발전되어 소음문제를 해결하기 위한 대책방안으로 방음벽이 많이 사용되고 있다. 그러나 방음벽을 이용해서 차량에서 방사되는 소음에 대한 저감방안의 수립과 차량을 모델링하여 소음을 예측하기 위해서는 기본적으로 철도 소음원의 방사특성 등과 같은 연구가

수행되어야만 한다.

철도 소음원에 대한 방사특성의 연구는 많은 연구자<sup>(1-4)</sup>들이 차륜과 레일의 접촉에 의해서 발생되는 전동음을 소음원으로 모델화하여 쌍극자 음원(dipole source)의 특성으로 방사된다는 것을 파악하였으며, 저자는 차량의 차륜과 동력장치를 점음원으로 모델화하여 국내에서 주행중인 철도차량의 소음 방사특성을 확인하였다.<sup>(5)</sup>

본 연구에서는 저자가 제시한 철도차량에 대한 소음원 모델을 기초로 하여 최대 300km/h의 속도로 주행하는 한국형 고속철도에 대한 소음방사특성을 파악하고, 속도증가 시 음원이동에 의한 영향을 고려하여 고속으로 주행하는 열차의 방사특성을 계산하여 측정결과와 비교하였다.

### 2. 고속철도 차량의 음원 모델

일반적으로 고속으로 주행하는 철도차량의 소음은 크게 차륜과 레일에 의한 전동음, 동력장치에 의한 소음, 공력소음으로 분류되며, 차량의 속도에 따라 전체소음에 대한 기여도가 다르게 나타나기 때문에 차량이 고속으로 주행하면 점차 공력소음의 영향이 크게 나타난다. 그러나 프랑스의 TGV-A는 300km/h의 속도까지 전동음의 영향이

\* 한국철도기술연구원 차량기계연구본부  
E-mail : jkim@krii.re.kr  
Tel : (031) 461-8531, Fax : (031) 461-8561  
.. 한국철도기술연구원 차량기계연구본부  
... 중앙대학교 기계공학부

크게 나타나는 것으로 알려져 있으며<sup>(6)</sup>, 프랑스의 TGV-A 와 동일한 한국형 고속철도(KTX) 역시 약 300km/h 까지 전동음의 영향이 큰 것으로 파악되었다.<sup>(7)</sup> 따라서, 현재 최고속도 300km/h 까지 시험 운행중인 한국형 고속철도의 주 소음원을 전동음

으로 설정하였다. 그리고 한국형 고속철도 차량은 Fig.1 과 같이 전두부와 후두부에 연결되어있는 동력차에 의해서 운행되는 Push-pull 방식이기때문에 동력장치를 탑재한 차량에 대해서는 동력장치에서 발생하는 소음을 추가하였다.

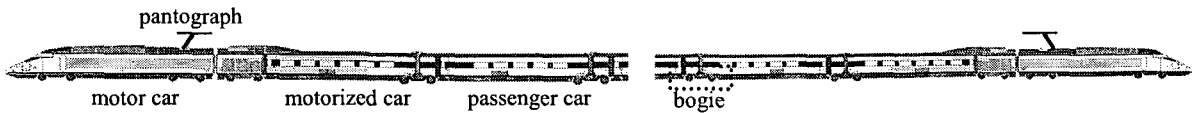


Fig.1 Model of Korean Train Express

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

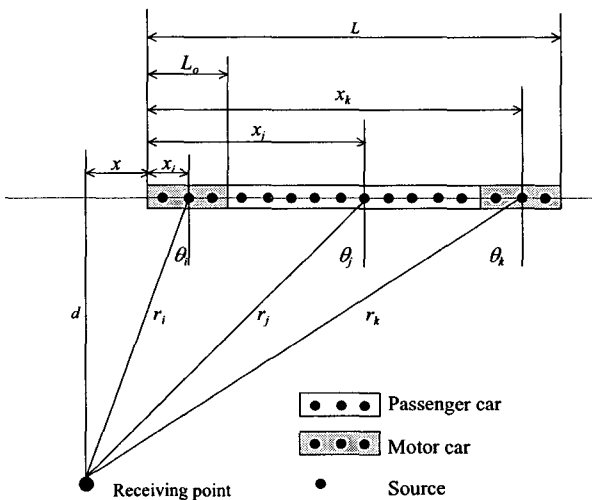


Fig. 2 Calculation model for noise sources of KTX

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

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

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

여기서,  $\rho c$  는 음향임피던스,  $W$  은 음원의 음향

파워,  $P$  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  $r$  과  $\theta$  는 Fig. 2 에서 음원과 수음점의 기하학적 관계를 이용하면 각 음원에 대해서 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$r_i = \sqrt{(h_r - h_c)^2 + d^2 + (x_i + x)^2}$$

$$\cos \theta_i = \frac{d}{\sqrt{(h_r - h_c)^2 + d^2 + (x_i + x)^2}} \quad (2)$$

여기서,  $h_r$  은 수음점의 높이,  $h_c$  는 음원의 높이,  $d$  는 음원과 수음점간의 수직거리,  $L$  은 첫번째 음원과 마지막 음원까지의 거리, 즉 차량의 길이를 나타내며,  $x_i$  는 첫번째 음원으로부터의 거리,  $x$  는 첫번째 음원과 수음점으로부터 수직한 점까지의 거리를 나타낸다.

식(2)를 식(1)에 대입한 후,  $x=vt$  로 치환하면 시간변화에 대한 수음점에서의 음압을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$P_s^2 = K_s \sum_{i=1}^m \left( \frac{1}{r_i} \right)^2 = K_s \sum_{i=1}^m \left( \frac{1}{(h_r - h_c)^2 + d^2 + (x_i + vt)^2} \right)$$

$$P_c^2 = K_c \sum_{i=1}^m \left( \frac{1}{r_i} \right)^2 \cos^2 \theta_i = K_c \sum_{i=1}^m \left( \frac{d}{((h_r - h_c)^2 + d^2 + (x_i + vt)^2)^{3/2}} \right)^2$$

$$P_d^2 = K_d \sum_{i=1}^m \left( \frac{1}{r_i} \right)^2 \cos^2 \theta_i = K_d \sum_{i=1}^m \left( \frac{d}{(h_r - h_c)^2 + d^2 + (x_i + vt)^2} \right)^2 \quad (3)$$

전두부와 후두부의 동력소음도 위와 동일한 방법으로 계산할 수 있으며 식(4)와 같이 각각의 소음원에 대한 음압을 계산해서 더하면 전체소음을

구할 수 있다.

$$P^2 = K_{L1} \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{r_i}\right)^2 \cos^2 \theta_i + K_C \sum_{j=1}^k \left(\frac{1}{r_j}\right)^2 \cos^2 \theta_j + K_{L2} \sum_{k=1}^m \left(\frac{1}{r_k}\right)^2 \cos^2 \theta_k \quad (4)$$

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

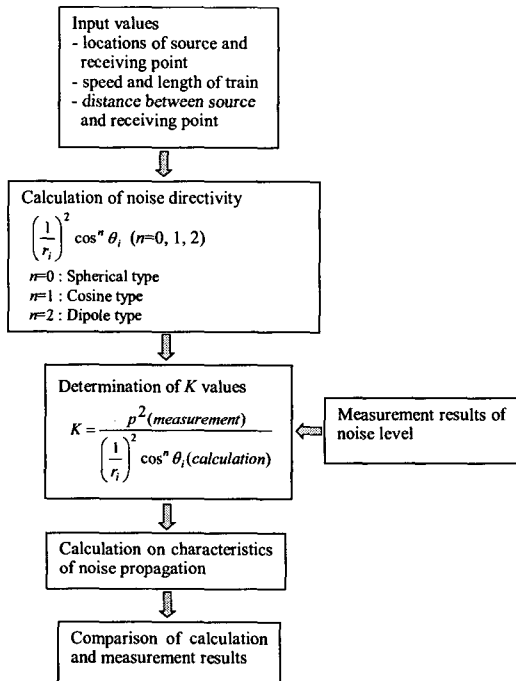


Fig. 3 Flow chart for calculation of noise radiation characteristics

식(3)과 식(4)를 이용한 소음의 방사특성에 대한 계산순서는 Fig.3 과 같이 차량의 길이와 속도, 차량의 위치, 소음원과 수음점의 높이, 소음원과 수음점까지의 거리 등을 입력하면 식(3)에서 소음원에 대한 지향성을 나타내는 항을 계산할 수 있다. 그러나 소음의 크기를 결정하는  $K$  값에 대한 계산이 필요하기 때문에 본 연구에서는 실제 차량 주행 시 측정된 소음의 실험값을 식(3)에 대입해서  $K$  값을 구하였다. 또한, 동력차로부터 발생하는 소음은 동력차부분에 대한 소음레벨의 실험값과 객차부분에 대한 소음레벨의 실험값의 차로부터 소음레벨을 구한 후, 위와 동일한 방법으로  $K$  값을

산출하였다. 이와 같이 구한  $K$  값을 다시 식(3)에 대입해서 시간에 따른 소음을 계산하여 측정결과와 비교하였다.

음원높이는 전동음의 경우 궤도중심에서 10cm로 설정하였으며, 동력장치에 의한 소음은 엔진 및 기기류의 높이를 고려하여 2m로 설정하여 계산하였다.<sup>(5)</sup>

### 3. 시험방법 및 결과분석

#### 3.1 시험방법

시험장소는 장애물 혹은 방음벽이 없는 직선구간을 선택하였으며, 마이크로폰은 Fig.4와 같이 궤도중심에서 15m와 25m 떨어진 지점에 지상으로부터 1.2m의 높이로 설치하여 차량 통과 시 소음을 측정하여 녹음기(SONY SIR-1000)에 기록한 후, 분석하였다.

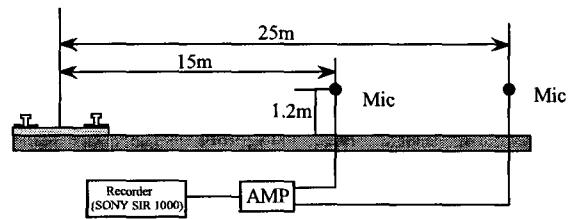


Fig. 4 Microphone locations

#### 3.2 측정결과와 계산결과의 비교

차량에서 발생된 소음의 방사특성의 차이는 시간축에서 선두부 및 후두부에서 소음증가의 기울기 차이로 나타나기 때문에 측정결과와 비교하여 방사특성을 파악할 수 있다.

본 연구에서 소음원의 방사특성은 전동음의 경우 쌍극자 음원( $n=2$ )으로 하고, 동력장치에 의한 소음은 코사인 음원( $n=1$ )으로 설정하여 계산하였다.<sup>(5)</sup>

Fig.5는 고속철도 차량 1편성(20량)통과시 측정값과 계산값의 비교결과이다. 약 120km/h와 180km/h의 속도에서는 측정결과와 계산결과가 잘 일치하고 있지만, 300km/h의 결과에서는 차량 진행방향의 앞부분에서 많은 차이를 나타나고 있다.

이러한 차이는 차량이 고속으로 주행하기 때문에 음원이동에 의한 영향으로 생각된다. 이러한

음원의 이동효과에 대해서 Peters<sup>(4)</sup>는 차량이 고속으로 주행할수록 진행방향의 앞부분에서는 소음레벨이 증가하고 뒷부분에서는 소음레벨이 감소한다고 하였다. 본 연구에서도 고속영역에서 음원이동의 효과를 고려하여 방사특성을 계산하여 측정결과와 비교하였다.

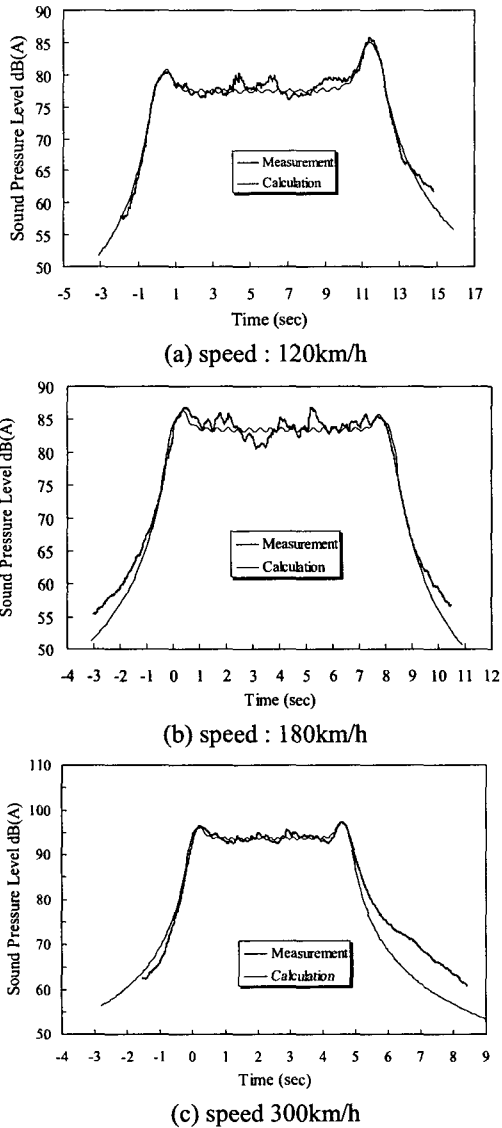


Fig. 5 Calculation results of noise radiation characteristic at distance 15m

### 3.3 음원의 이동효과

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

라 변한다.

전질의 소음원 모델은 각 음원으로부터 방사되는 소음이 수음점에 도달할 때 음원과 수음점까지의 거리가 변하지 않는 것으로 가정하여 계산하였다. 그러나, 실제 음원이 고속으로 주행할 경우에는 Fig. 6 과 같이 소음이 음원에서 출발하여 수음점에 도달할 때 음원이동에 의해서 음원과 수음점까지의 거리가 변한다. 따라서, 본 연구에서도 음원이동의 효과를 전질의 음원모델에 고려하기 위해서 식(5)를 식(3)에 대입하였다.<sup>(4,8)</sup>

$$r_o = \frac{r}{(1 - \frac{v}{c} \cos \phi)} \quad (5)$$

여기서,  $r_o$ 는 소음을 방사될 때 음원과 수음점까지의 거리,  $r$ 은 소음이 수음점에 도달할 때의 음원과 관측점까지의 거리를 나타내고,  $\phi$ 는 수음점과 음원 사이의 각도를 나타낸다.

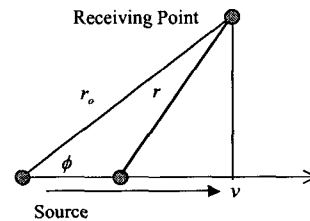


Fig. 6 The change of distance between source and receiving point due to moving of source

Fig. 7은 식(5)를 식(3)에 대입해서 쌍극자 음원에 대한 계산결과이다. 차량의 속도가 증가함에 따라 차량의 진행방향에 대해서 앞부분은 소음이 증가하고 뒷부분은 감소하는 것을 알 수 있다.

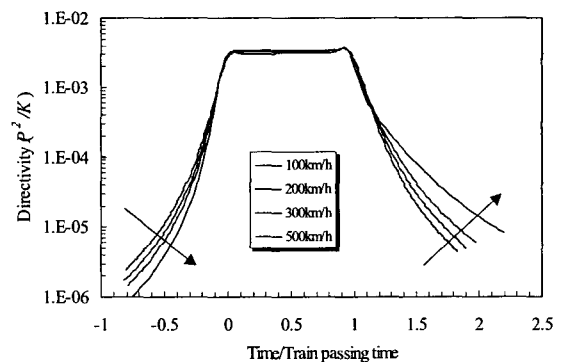


Fig.7 Calculation results of directivity( $P^2/K$ ) (source type:dipole , distance : 50m)

Fig. 8 은 차량이 500km/h 의 속도로 주행하는 경우에 대한 각 방사형태의 계산결과이다. 음원의 지향성이 강할수록 음원의 이동효과에 의한 소음의 변화형태가 큰 것을 알 수 있다.

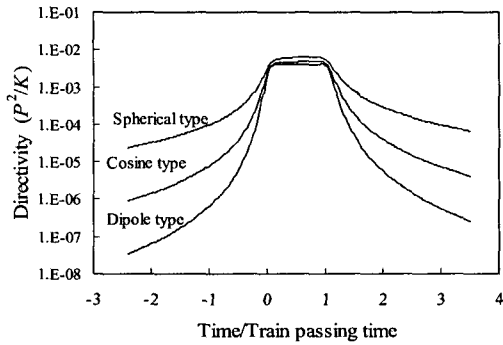
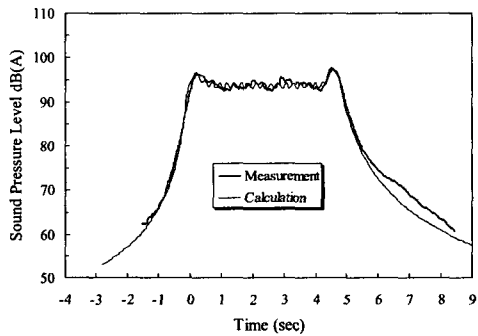
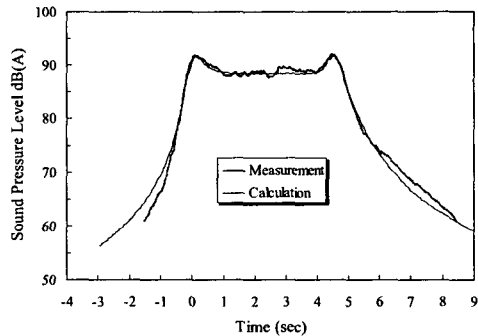


Fig. 8 Calculation results of directivity for radiation characteristics (speed : 500km/h, distance : 50m)



(a) distance : 15m



(b) distance : 25m

Fig.9 Calculation result of noise radiation characteristic including moving effect of noise source

Fig. 9 는 Fig.5(c)의 300km/h 에 대한 결과에 음원의 이동효과를 고려하여 계산한 결과이다. 음원의 이동효과에 의해서 차량 진행방향의 앞부분의 소음이 증가하면서 측정결과와 계산결과가 상당히 일치하는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 향후 2004년 운행예정인 한국형 고속철도(KTX) 차량을 모델화하여 소음의 방사특성을 파악하였다.

고속철도 차량의 주 소음원을 전동음과 동력소음으로 고려하여 전동음에 대한 음원은 각 차륜의 위치를 소음원으로 설정하고, 동력소음은 동력차의 모터 및 각종 기기류를 소음원으로 설정하여 점음원이 나열된 형태로 모델화하여 계산결과와 측정결과를 비교하였다.

고속철도 차량에 대한 계산결과 차량 속도가 약 300km/h 까지 주 소음원으로 전동음과 동력장치에 의한 소음만을 고려하여 모델화하여도 소음방사특성 계산 시 충분한 결과를 얻었다. 그러나 약 300km/h 이상의 속도로 주행하는 경우에는 음원의 이동효과에 의해 차량 진행방향의 앞부분에서는 소음레벨이 증가하고 뒷부분에서는 감소하는 것을 알았으며, 음원의 지향성이 강할수록 음원의 이동효과에 의해서 소음의 변화가 큰 것을 알았다.

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

#### 참고문헌

- [1] D.H.CATO, 1976, "The prediction of environmental noise from fast electric trains", Journal of sound and vibration, Vol 46(4), pp483~500.
- [2] D.Hohenwarter, 1990, "Railway noise propagation models", Journal of sound and vibration, Vol 141(3), pp17~41.
- [3] E.J. Rathe, 1977, "Railway noise propagation", Journal of sound and vibration, Vol 51(3), pp371~388.
- [4] S. Peters, 1974, "The prediction of railway noise profiles", Journal of sound and vibration, Vol 32, pp 87~99.
- [5] 김재철 외 2명, 2002, "철도소음의 방사특성 분석," 2002 LMS Korea User's Conference, pp. 105~112.
- [6] M.B. Mauclair, 1990, "Noise generated by high speed trains," Inter-noise '90, pp. 371~374.
- [7] 김재철 외 2명, 2001, "한국형 고속철도의 소음/진동 특성에 관한 연구," 한국소음진동공학회, 춘계학술대회논문집, pp. 829~835.
- [8] P.M.Morse and K.U.Ingard, 1968, "Theoretical Acoustics," New York : McGraw-Hill Book Company. Inc.