

철도차량에서 방사되는 음향파워 추정에 관한 연구

A Study to Estimate the Emitted Sound Power from the Rolling Stock

이영엽[†] · 김재철¹ · 이희성²

Young Yeob Lee · Jae Chul Kim · Hi Sung Lee

Abstract Generally, sound power is one of the most significant factors to predict and assess noise from sound sources. However, many researchers developed indirect methods to calculate the sound power with noise level because it is impossible to measure sound power directly while a train is running. In this paper, we propose a method to estimate sound power generated due to wheel/rail interaction and propulsive equipment from the measurement of noise emitted from rolling stocks and verify the estimation method by comparing with the other sound power estimation formula. We also analyze the sound power of rolling stocks which are operating in domestic lines such as EMU, Mukoonghwa, KTX using the method proposed in this paper.

Keywords : Railway noise, Sound power, Rolling noise

초 록 일반적으로 음향파워는 소음원으로부터 방사되는 소음의 예측 및 평가를 위한 가장 중요한 요소 중에 하나이다. 그러나 철도차량 주행 시 이 음향파워를 직접 측정하는 것은 불가능하기 때문에 많은 연구자가 소음 레벨을 이용해서 음향파워를 계산하는 간접적인 방법을 개발하였다. 본 연구에서는 철도차량에서 방사되는 음향파워를 전동소음과 동력소음으로 분리하여 추정하는 방법을 제안하였으며, 이 추정방법의 타당성을 검증하였다. 또한 본 연구에서 제안한 방법을 이용하여 현재 국내에서 운행되는 차량(전동차, 무궁화호, KTX)의 음향파워를 계산하여 분석하였다.

주요어 : 철도소음, 음향파워, 전동소음

1. 서 론

음향파워레벨은 음원으로부터 방사되는 음향파워를 나타내는 양으로 각종 음원의 성상을 나타내는 기본량이다. 또한 소리의 전파를 다루는 이론과 계산식 중에는 음원의 파워레벨로부터 출발하고 있는 것이 많이 있다. 음향파워레벨은 음원으로부터 방사하는 소음에너지의 시간 평균이므로 기기의 소음을 관리한다는 점에서 기본 중의 기본으로 최근 산업분야에서 널리 사용하고 있다. 그러나 철도차량에서 방사되는 음향파워를 측정하는 것은 현실적으로 매우 어렵다. 그 이유는 철도차량 및 관련 설비가 매우 커서 실험실 환경조건으로 측정할 수 없는 것이 가장 큰 이유라 할 수 있다. 이렇게 철도차량에서 방사되는 음향파워는 직접측정이 어렵기 때문에 측정된 소음레벨로부터 음향파워를 추정하는 간접적인 방법이 이용되고 있다. 이러한 간접적인 추정방법은 많은 연구자[1,2]에 의해서 연구되었지만 KTX 혹은 무궁화호와 같은 동력집중식에서 발생하는 동력소음과 전동소음을 구분하여 음향파워를 계산할 수 있는 방법은 아직 제안되어 있지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 철도차량에서 방사되는

음향파워를 각 소음원별로 추정하는 방법을 제시하고자 한다. 우선, 음향파워를 간접적으로 계산하기 위해서 철도차량을 소음원 별로 모델링하여, 차량에서 방사되는 소음레벨을 계산한 후, 그 결과를 이용하여 음향파워를 추정한다.

철도차량의 소음원 모델방법은 S.Peters[3]와 D.H.Cato[4] 등이 제안한 선음원 모델과, D.Hohenwater [5], E.J.Rathe[6] 및 김재철[7,8]등이 제안한 음원이 연속으로 나열된 점음원 모델로 크게 구분할 수 있다. 본 연구에서는 전동소음과 동력소음의 방사특성을 파악하기 위해서 김재철이 제안한 소음원 모델방법 및 수식을 이용하여 전동소음과 동력소음을 분리해서 음향파워를 추정하는 방법을 제안하였으며, 이 방법을 이용하여 현재 국내에서 운행 중인 철도차량에 대한 음향파워를 계산하고 특성을 파악하였다.

2. 철도차량의 소음원 모델 및 음향파워 계산방법

2.1 철도차량의 소음원 모델

철도차량의 소음원 모델은 Fig. 1과 같이 김재철[7,8], 구동회[9]가 제안한 점음원 모델을 이용하였다. 철도차량에서 발생하는 주요 소음원을 차륜과 레일에 의한 전동소음과 추진장치에 의한 동력소음으로 설정하고, 객차에 대해서는 전동소음만 발생하고 동력차에 대해서는 전동소음과 동력소음

[†]교신저자 : 한국철도공사 연구원
E-mail : leeyy@korail.com

¹한국철도기술연구원 차륜계도연구실

²서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도차량시스템공학과 한국도시철도연구소

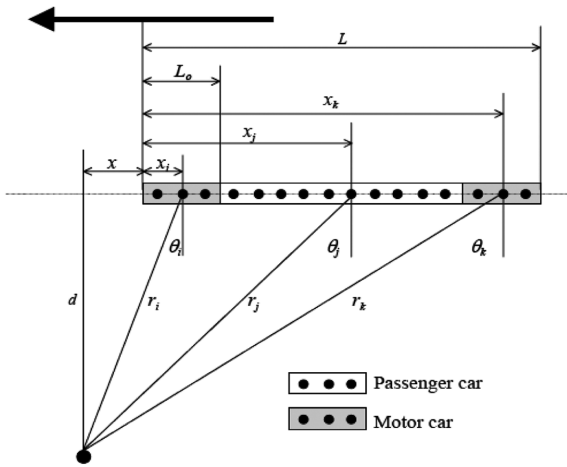


Fig. 1 Calculation model for noise source of rolling stock

이 발생되는 것으로 고려하였다.

전동차(EMU)와 같은 동력분산식 차량의 주소음원은 동력소음과 전동소음으로 구분되지만 일반적으로 차량의 주행속도가 60km/h 이상일 경우 동력소음의 기여도가 작고 전동소음의 영향이 크기 때문에 전동소음만을 고려하고, 방사특성은 쌍극자음원으로 규정하면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P^2 = \rho c \frac{W}{4\pi} \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{r_i}\right)^2 \cos^2 \theta_i = K \sum_{i=1}^m \left(\frac{d}{h_i^2 + d^2 + (x_i + vt)^2}\right)^2 \quad (1)$$

여기서, P 는 수음점에서의 음압, m 은 차량의 수, h_i 은 수음점에서 마이크로폰의 높이, v 는 차량의 속도, t 는 시간을 나타낸다. 또한 r_i 와 θ_i 는 수음점에서 i 번째 차량까지의 거리와 각도를 나타내고 x_i 는 차량 선두부에서 i 번째 차량까지의 수평거리를 나타낸다. 그리고 우측항에서 K 는 음원의 크기를 나타내는 인자로 $K = \rho c (W/4\pi)$ 로 정의되며, 나머지 항은 소음원의 지향성을 나타낸다.

동력집중식인 일반여객열차의 경우 디젤전기기관차의 동력소음과 객차의 전동소음을 더하면 식 (2)와 같이 전체소음을 계산할 수 있다. 동력소음의 방사특성은 코사인음원으로 규정하였다.

$$P^2 = K_L \sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{r_i}\right)^2 \cos \theta_i + K_C \sum_{j=1}^m \left(\frac{1}{r_j}\right)^2 \cos^2 \theta_j \quad (2)$$

여기서, k 는 동력장치의 수, m 은 차량의 수를 나타내며, K_L 은 동력소음의 크기, K_C 는 전동소음의 크기를 나타낸다.

KTX와 같은 동력집중식 열차는 전두부와 후두부를 동력소음으로 중간 객차부를 전동음으로 구분하여 각각의 소음원에 대한 음압을 계산하여 더하면 식 (3)과 같이 전체소음을 계산할 수 있다.

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

여기서, K_{L1} 과 K_{L2} 는 전두부와 후두부의 동력차에서 방사되

는 동력장치에 의한 소음의 크기, K_C 는 객차에서 방사되는 전동소음을 나타낸다.

2.2 음향파워의 계산 순서

위의 철도차량 소음원 모델을 이용하여 음향파워의 계산 순서는 Fig. 2와 같다. 우선 차량의 길이와 속도, 차량의 위치, 소음원과 수음점의 높이, 소음원과 수음점까지의 거리 등을 입력하면 식 (1)에서 소음원에 대한 지향성을 나타내는 항을 계산할 수 있다. 그러나 소음의 크기를 결정하는 K 값에 대한 계산이 필요하기 때문에 본 연구에서는 실제 주행하는 차량에서 측정된 소음의 등가소음레벨(L_{eq})을 식 (1)에 대입해서 K 값을 구하였다. 그리고 동력차로부터 발생하는 동력소음은 동력차부분에 대한 소음레벨 L_{eq} 값과 객차부분에 대한 소음레벨 L_{eq} 값의 차로부터 동력소음레벨을 구한 후, 위와 동일한 방법으로 K 값을 계산하여 식 (2), 식 (3)에 대입해서 시간에 따른 소음을 계산하고 측정결과와 비교하여 정도를 확인 한 후 음압폭포레벨 SEL(Sound Exposure Level) 계산하였다. 마지막으로 식 (4)로부터 음향파워를 계산한 후 식 (5)를 이용하여 음향파워레벨 L_W (Sound Power Level)을 계산하였다. SEL은 단발적으로 발생하는 소음에너지로 여기에서는 차량이 통과하는 동안 발생하는 소음에너지를 말한다.

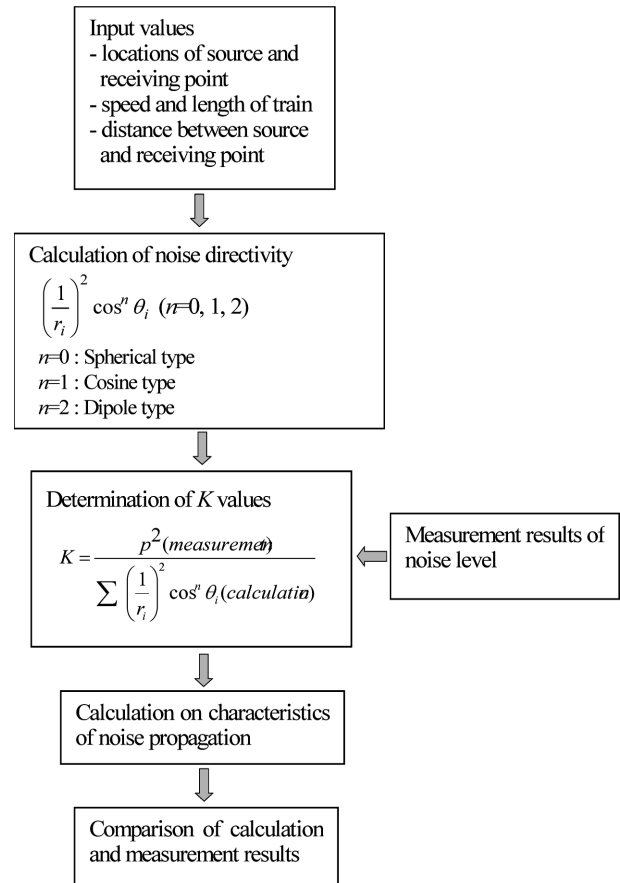


Fig. 2 Flow chart for calculation of noise radiation characteristics

$$W = \frac{SEL \times 4\pi}{\rho c \sum_{i=1}^l \left(\frac{1}{r_i}\right)^2 \cos^n \theta_i} \quad (4)$$

$$L_W = 10 \log_{10} \left(\frac{W}{W_{ref}} \right) \quad (5)$$

여기서, W_{ref} 는 기준음향파워 10^{-12} Watt를 나타낸다.

3. 소음 계산결과와 측정결과의 비교

3.1 소음 측정방법

철도차량에서 방사되는 소음을 측정하기 위해서 장애물 혹은 방음벽이 없는 직선구간이면서 평탄한 개활지를 측정장소로 채택하였다. 소음측정용 마이크로폰 및 녹음기 등은 Fig. 3과 같이 설치하였으며, 마이크로폰의 위치는 Table 1과 같다.

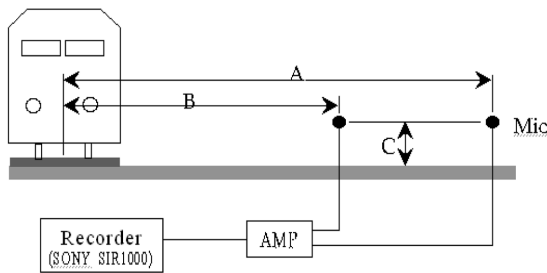


Fig. 3 Microphone locations

Table 1 Microphone locations of train type

Distance	EMU	Mukoonghwa	KTX	Remark
A	10.7 m	20 m	25 m	
B	5.7 m	10.8 m	15 m	
C	0.87 m	1.2 m	1.2 m	

3.2 차량별 소음 계산결과와 측정결과의 비교

Fig. 4는 전기동차가 75km/h의 속도로 주행 시 측정한 결과와 쌍극자 음원으로 계산한 결과의 비교이다. 이 결과로부터 전기동차에서 방사되는 소음은 근거리에서 차륜과 레일에 의한 전동소음의 피크가 확연히 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 동력차가 전두부에서 견인하는 무궁화호 8량이 135km/h의 속도로 주행 시 결과이며 Fig. 6은 KTX 20량이 300km/h의 속도로 주행시의 측정값과 계산값의 비교결과이다. 전체적으로 계산결과와 측정결과 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다.

4. 각 차량에서 방사되는 음향파워의 추정결과

Fig. 7은 속도에 따른 차량의 음향파워레벨에 대한 계산 결과이다. 이 결과로부터 동일한 속도로 주행한다면 무궁화,

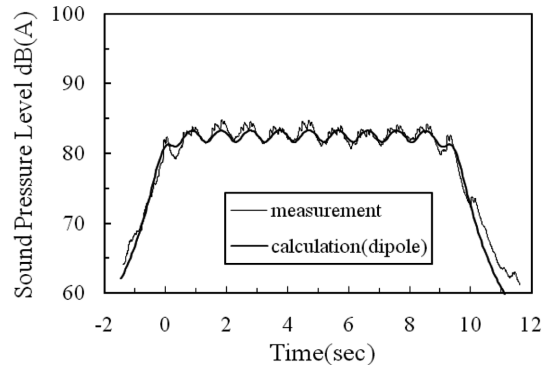


Fig. 4 Comparison between calculated and measured results (type train : EMU, speed : 75km/h, distance : 10.7m)

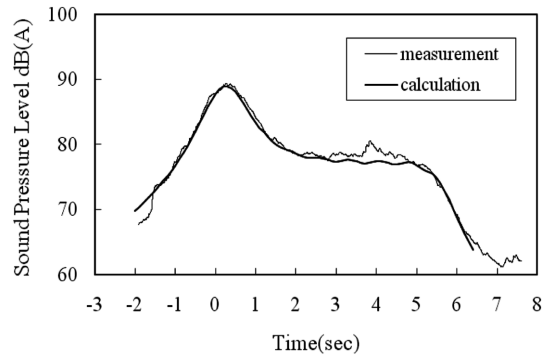


Fig. 5 Comparison between calculated and measured results (type train : Mukoonghwa, speed : 135km/h, distance : 20m)

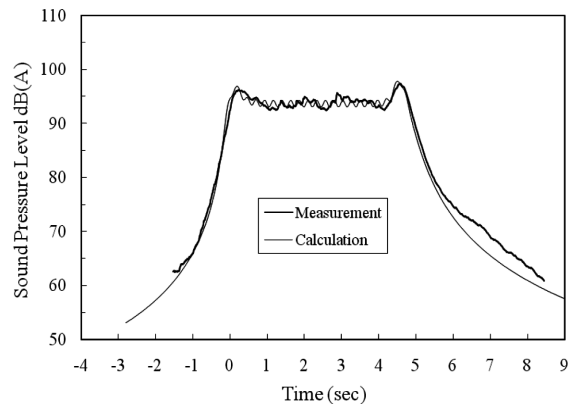


Fig. 6 Comparison between calculated and measured results (type train : KTX, speed : 300km/h, distance 15m)

전동차, KTX순으로 음향파워가 작은 것을 알 수 있다. 특히 차량의 속도증가에 따라 전동차와 무궁화호에 대한 음향파워의 증가형태가 KTX차량보다 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 8과 Fig. 9는 무궁화호열차와 KTX열차에 대한 동력소음과 전동소음의 음향파워를 분리하여 계산한 결과이다. 무궁화호열차는 전동소음에 비해서 동력소음의 음향파워가 크지만, KTX열차의 경우 동력소음에 비해서 전동소음의 음

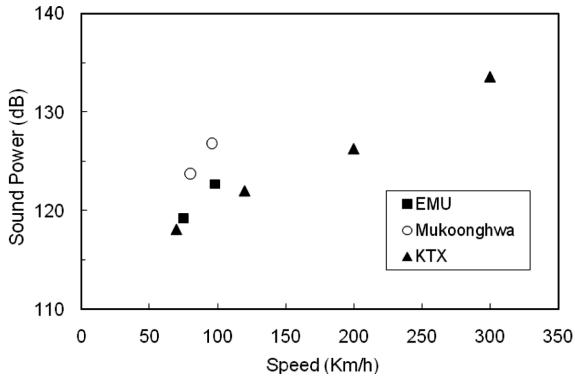


Fig. 7 Calculation results of sound power for each type of train

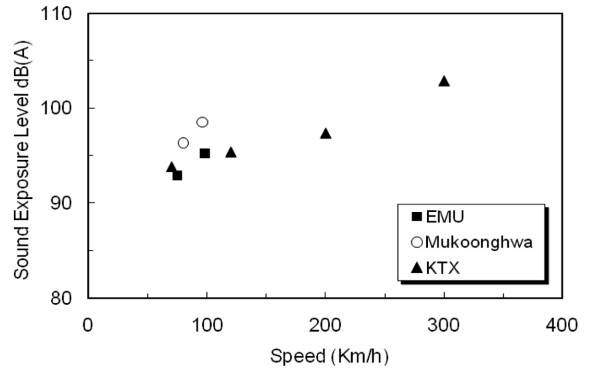


Fig. 10 Calculation results of sound exposure level for each type of train

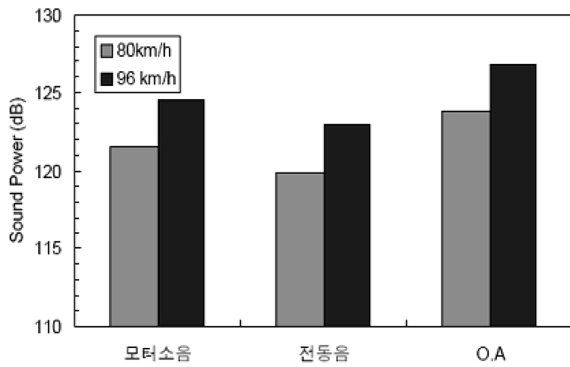


Fig. 8 Calculation results of sound power for Mukoonghwa train

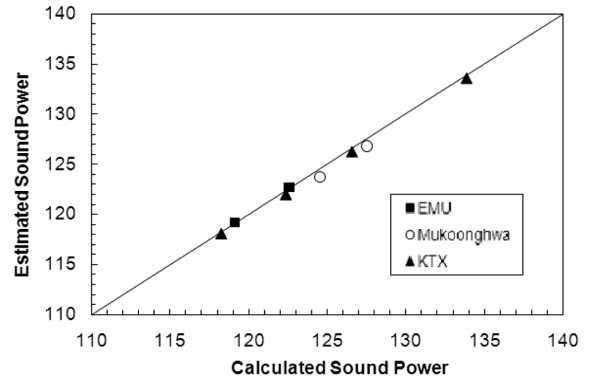


Fig. 11 Comparison on calculated results of sound power levels

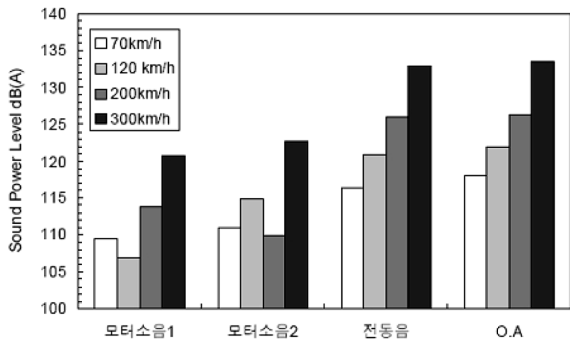


Fig. 9 Calculation results of sound power for KTX train

향파위가 크게 나타나고 있다. 그 이유는 전동소음의 갯수가 많기 때문인 것으로 해석 되었다.

5. 음향파워 계산결과의 타당성 검토

앞절에서 소음원 모델로부터 계산한 음향파워레벨 계산결과의 타당성을 검토하기 위해서 국외의 음향파워 계산방법을 조사하여, 그 결과와 비교 검증하였다.

철도차량에서 방사되는 음향파워 계산방법은 기본적으로 차량에서 방사되는 음향폭로레벨을 계산한 후, 이 값을 이용하여 음향파워레벨을 계산한다. 일본의 Hideki Tachibana[10]는 철도차량의 음향파워레벨을 간단히 계산하는 경험식을 식(6)과 같이 제안하였다.

$$L_W = L_E + 10 \log d + 10 \log v + 3 \quad (6)$$

여기서, L_W 는 음향파워[dB], L_E 는 음향폭로레벨[dB], d 는 관측자와 음원사이의 거리[m], v 는 차량속도[m/s]를 나타낸다.

Fig. 10은 제3절에서 계산한 결과를 이용하여 음향폭로레벨을 나타낸 것이며 Fig. 11은 음향폭로레벨을 식(6)에 대입해서 계산한 음향파워레벨과, 식(4)와 식(5)로 계산한 음향파워레벨 추정결과를 비교한 것으로 약간의 오차는 있지만 전체적으로 거의 동일한 것을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 철도차량의 소음원별로 음향파워를 추정할 수 있는 방법을 제안하였으며, 현재 국내에서 운행 중인 철도차량에 대한 음향파워를 소음원 별로 계산하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 철도차량을 음원이 연속적으로 나열되어 있는 점음원 형태로 모델링하여 전동소음과 추진장치에 의한 동력소음을 분리하여 각각의 소음원에 대한 음향파워를 추정하는 방법을 제시하였다.

(2) 본 연구에서 제시한 음향파워 추정방법을 이용하여 국내차량(전동차, 무궁화호, KTX)에 대한 음향파워를 계산한 결과 동일한 속도영역에서는 무궁화, 전동차, KTX순으로 음

향파워가 작은 것을 알 수 있었다. 또한, 무궁화호 열차는 전동소음에 비해서 동력소음의 음향파워가 크지만, KTX열차의 경우 동력소음에 비해서 전동소음의 소음원 갯수가 많기 때문에 동력소음보다 전동소음의 음향파워가 크게 나타나고 있는 것을 알았다.

(3) 국내차량의 소음 측정결과를 이용하여 본 연구에서 제시한 음향파워의 추정방법과 국외의 음향파워 계산방법을 비교 검토한 결과 거의 동일한 결과를 나타내어 본 음향파워 추정방법의 타당성을 검증하였다.

참고문헌

- [1] Hideki Tachibana, Hiroo Tanino (2004) Measurement of environmental noise and building acoustics, Acoustical Society of Japan, Acoustics Technology Series 8, Corona Co. pp. 41-50.
- [2] J.H. Cho, J.S. Joo, H.I. Koh, H.S. Han (2005) A Study on the Identification of Acoustic Power and Directivity Patten of Railway Noise Source, *Transactions for Autumn Conference of the Korean Society of Environmental Engineering*, pp. 596-602.
- [3] S. Peters (1974) The prediction of railway noise profiles, *Journal of sound and vibration*, 141(3), pp. 17-41.
- [4] D.H. Cato (1976) The prediction of environmental noise from fast electric trains, *Journal of Sound and Vibration*, 46(4), pp. 483-500.
- [5] D. Hohenwater (1990) Railway noise propagation models, *Journal of Sound and Vibration*, 141(3), pp. 17-41.
- [6] E.J. Rathe (1977) Railway noise propagation, *Journal of Sound and Vibration*, 51(3), pp. 371-388.
- [7] J.C. Kim, K.H. Moon (2003) A Study on Radiation Characteristic for Railway Noise, *Transactions on the Korean Society Mechanical Engineers A*, 27(4) pp. 531-536.
- [8] J.C. Kim, C.J. You (2004) A Study on Propagation of Noise Sources for Korea Train Express, *Transactions on the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 14(3), pp. 224-229.
- [9] D.H. Koo, J.C. Kim, T.W. Park (2002) A Study on Characteristics of Noise Propagation for Railway, *Journal of the Korean Society for Railway*, 5(1), pp. 63-68.
- [10] H. Tachibana, T. Kobayashi, S. Yokoyama, H. Yano (2007) Sound source models for conventional railway noise, *Proceedings of INTER-NOISE 2007*, CD-ROOM.

접수일(2011년 3월 8일), 수정일(2011년 4월 9일),
게재확정일(2011년 4월 14일)