

# 준정적 해석을 이용한 고속 열차의 순간 환경소음 시뮬레이션 Instantaneous Environmental Noise Simulation of High-speed Train by Quasi-stationary Analysis

조 대 승† · 김 진 형\* · 최 성 원\*\* · 정 홍 구\*\* · 성 혜 민\*\* ·  
장 승 호\*\*\* · 고 효 인\*\*\*

Dae-Seung Cho, Jin-Hyeong Kim, Sung-Won Choi, Hong-Gu Chung, Hye-Min Sung,  
Seungho Jang, Hyoin Koh

(Received September 5, 2012 ; Accepted September 27, 2012)

**Key Words** : High Speed Train(고속 열차), Instantaneous Environmental Noise Simulation(순간 환경소음모사), Quasi-stationary Analysis(준정적 해석), Source Identification(소음원 규명)

## ABSTRACT

An instantaneous environmental noise simulation method emitted by a moving high-speed train by quasi-stationary analysis is proposed in this study. In the method, the propagation attenuations from stationary point sources on segmented railways to a receiver are calculated using a general purpose environmental noise prediction program ENPro based on the ISO 9613-2 method. Then, the instantaneous environmental noise at a receiver due to a moving high-speed train considering convection effect is evaluated with the information on the propagation attenuations from the instantaneous train location to the receiver and the sound power levels and directivity of stationary point sources evaluated by German Schall 03 (2006). To demonstrate the validity of proposed method, simulated and measured time history of instantaneous noise for KTX-I and KTX-II on running are compared and the results show that the method can be utilized for the train noise source identification as well as the simulation of instantaneous environmental noise emitted by a high-speed train.

## 1. 서 론

정온 환경에 대한 높은 관심과 이에 따른 규제가 강화되고 있는 상황에서 저소음·친환경 고속철도를 경제적으로 설계·건설·운영하기 위해서는 고속 주행 열차로 인한 환경소음 시뮬레이션 기술이 요구된다.

그러나, 국내의 경우 고속철도 환경소음예측을 위한 부분적 연구는 수행<sup>(1-3)</sup>된 바 있으나 국내 운행 고속열차의 특성을 고려한 독자 환경소음예측모델이 없는 실정이다.

철도 환경소음은 열차 종류와 운행 방식, 철도 구조 등에 따라 달라진다. 이로 인해 CRN<sup>(4)</sup>, Nord2000<sup>(5)</sup>, Schall 03 2006<sup>(6)</sup> 등의 기존 외국 철도

† Corresponding Author ; Member, Dept. of Naval Architecture and Ocean Engi., Pusan National University  
E-mail : daecho@pusan.ac.kr  
Tel : +82-51-510-2482, Fax : +82-51-512-8836

\* Createch Co. Ltd.

\*\* Dept. of Naval Architecture and Ocean Engi., Pusan National University

\*\*\* Member, Korea Railroad Research Institute

# A part of this paper is presented at the KSNVE 2012 Annual Autumn Conference

‡ Recommended by Editor Jin Oh Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

환경소음예측모델은 자국 운행 열차 중심으로 소음원 자료를 제시하고 있다. 또한, EU에서 2003년 12월부터 2006년 12월까지 27개 기관이 공동 수행한 Imagine 프로젝트의 철도 관련 연구 결과<sup>(7)</sup>에서도 열차에 대한 상세 소음원 자료는 제한적으로 공개하고 있다. 따라서, 국내에서 운행 중인 KTX-I과 KTX-II는 물론 현재 개발 중인 400 km/h급 고속열차로 인한 환경소음 예측을 위해서 이들 열차에 대한 소음 발생메커니즘별 음향파워 산정과 모델링 방법에 대한 연구가 필요하다.

이 연구에서는 고속 주행하는 열차로 인한 수음점에서의 순간 환경소음을 분할된 철도에 분포한 점 소음원들과 이들로부터 수음점까지의 전달감쇠 및 음속과 열차속도 차이로 인한 대류(convection) 효과를 고려하여 계산하는 준정적 해석 방법을 제안한다. 또한, 제안된 방법의 타당성을 검토하기 위하여 Schall 03 2006에 제시된 ICE-3 열차 소음원 자료를 활용하여 KTX-I과 KTX-II의 음향파워레벨을 산정하고, 수음점의 순간 환경소음 시간이력을 제시된 방법으로 계산한 결과를 계측 결과와 비교·검토 하

였다. 이때, 분할 철도 상에 분포한 점 소음원들로부터 수음점까지의 전달감쇠는 ISO 9613-2<sup>(8)</sup> 및 이의 보완 방법<sup>(9,10)</sup>으로 계산하였다. 아울러, 차량 종류, 철도 구조 및 운행 방법 등에 따라 달라지는 열차 소음원 규명에 제안된 방법의 활용 방안을 검토하였다.

## 2. 준정적 방법에 의한 고속 열차의 순간 환경소음 해석 방법

### 2.1 고속열차 소음원 모델링과 음향파워평가

전동, 추진, 공력 메커니즘 등에 의해 발생하는 고속열차 소음은 차량 종류, 운행방법, 철도 구조 등에 따라 달라진다. 이를 고려하기 위하여 이 연구에서는 Table 1에 나타낸 독일의 Schall 03 2006에서 적용하는 부분 점 소음원들을 이용하여 고속열차 소음발생특성을 모델링하는 방법을 채택하였다.

Schall 03 2006에서는 특정 열차가 1대 주행할 경우에 부분 점 소음원의 단위 길이(1m) 및 단위 시간 당 음향파워레벨(PWL)  $L_{WA,f,h,m}$ 은 다음과 같이 산정한다.

$$L_{WA,f,h,m} = a_{A,h,m} + \Delta a_{f,h,m} + 10 \log \frac{n_Q}{n_{Q0}} + b_{f,h,m} \log \frac{v}{v_0} + \Sigma c_{f,h,m} + \Sigma K_f \quad (1)$$

여기서,

- $a_{A,h,m}$  : 기준속도  $v_0$ 에서의 A-가중치 총합 PWL
- $\Delta a_{f,h,m}$  : 63 Hz부터 8 kHz까지의 1/1-옥타브 밴드 중심주파수  $f$ 에서의 PWL 산정 계수
- $n_Q$  : 차축 개수
- $n_{Q0}$  : 기준 차축 개수
- $b_{f,h,m}$  : 속도 비례 개수
- $v$  : 열차 속도(km/h)
- $v_0$  : 기준 열차 속도(100 km/h)
- $\Sigma c_{f,h,m}$  : 운전형태(가감속 등), 레일 거칠기, 도상 등에 대한 보정치
- $\Sigma K_f$  : 교량 구조진동음 등 기타 소음 보정치

이고, 하첨자  $h, m$ 은 점 소음원 높이, 높이 별 부분 소음원의 ID(Table 1 참조)를 각각 나타낸다. 따라서, 레일 상면으로부터 높이 0m, 4m, 5m에 위치한

**Table 1** Part sources and their heights defined in Schall 03 2006<sup>(6)</sup>

Source type	Height $h_s$ (m)	Part source ID $m$	Noise cause of component
Rolling noise	0	1	Rail roughness
	0	2	Wheel roughness
	4	3	Radiation of the transmitted as structure-borne rolling noise due to the rail roughness by car bodies
	4	4	Radiation of the transmitted as structure-borne rolling noise due to the wheel roughness by car bodies
Aero-dynamic noise	5	5	Pantograph head
	4	6	Pantograph chamber, grid of refrigerators and air conditioners on the roof
	0	7	Flow around the bogies
Equipment noise	4	8	Fans of refrigerators and air conditioners, suction side of the roof area
	0	9	Fans of refrigerators and air conditioners, suction and pressure side in the sub-floor area
Propulsion noise	4	10	Exhaust system
	0	11	Engine, gearbox

각 점 소음원의 단위 길이 당 음향과위레벨  $L_{WA,f,h}$ 는 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$L_{WA,f,h} = 10 \log \left( \sum_m 10^{0.1 L_{WA,f,h,m}} \right) \text{ dBA} \quad (2)$$

여기서,  $m$ 은 소음 발생 원인과 높이에 따라 분류한 부분 소음원의 ID(Table 1 참조)로서, 식 (2)의 계산에 있어서 높이에 따라  $L_{WA,f,h=0m}$ 에 대해서는  $m=1, 2, 7, 9, 11$ ,  $L_{WA,f,h=4m}$ 에 대해서는  $m=3, 4, 6, 8, 10$ 이고,  $L_{WA,f,h=5m}$ 에 대해서는  $m=5$ 에 의한 소음 성분을 나타낸다.

한편, 고속열차가 길이  $l_k(m)$ 인 분할 선로를 주행할 경우 분할 선로의 중앙에 위치하는 높이 및 1/1-옥타브 밴드별 점 소음원의 음향과위레벨  $L_{WA,f,h,k}$ 은

$$L_{WA,f,h,k} = L_{WA,f,h} + 10 \log \frac{l_k}{l_0} \text{ dB} \quad (3)$$

와 같다. 여기서,  $l_0$ 는 1 m 이다. 또한, 철도소음의 지향성을 고려하기 위해 Schall 03 2006에서는 지향성 지수  $D_{Lk}$ 를 식 (4)와 같이 평가한다.

$$D_{Lk} = 10 \log(0.2 + 1.2 \sin^2 \delta_k) \text{ dB} \quad (4)$$

여기서, 3차원 각도  $\delta_k$ 의 정의는 Fig. 1에 나타내었다.

**2.2 전달감쇠 평가 방법**

열차가 고속 주행하면 도플러 효과(doppler effect)로 인해 수음점에서는 주파수 변동 현상이 발생한다. 그러나, 광대역 주파수밴드별 환경소음예측에서 이와 같은 효과를 엄밀하게 반영하기는 곤란하다. 이에 이 연구에서는 도플러 효과를 무시하고, 고속

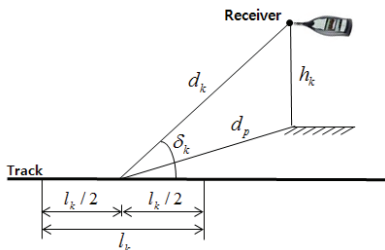


Fig. 1 Definition of 3-D angle to evaluate source directivity<sup>(6)</sup>

열차 소음원을 나타내는 특정 점 소음원 또는 이의 정상 소음원으로부터 수음점까지의 전달감쇠를 ISO 9613-2 방법<sup>(8)</sup> 및 이의 보완 방법<sup>(9,10)</sup>을 적용하여 63 Hz부터 8 kHz까지의 1-옥타브밴드별 A-가중치 등가 음압레벨  $L'_{AT,f,n}$ 을 다음과 같이 산정한다.

$$L'_{AT,f,n} = L_{WA,f,n} + D_{Lk} - A_d - A_a - A_g - A_b - A_m \quad (5)$$

여기서,

- $L_{WA,f,n}$  : 점 소음원 또는 정상 점 소음원의 1/1-옥타브 밴드 A-가중치 PWL
- $D_{Lk}$  : 소음원의 지향지수
- $A_d$  : 기하학적 확산 효과에 의한 감쇠
- $A_a$  : 공기 흡음에 의한 감쇠 효과
- $A_g$  : 지면에 의한 감쇠 효과
- $A_b$  : 구조물에 의한 회절 효과
- $A_m$  : 숲, 공장 및 건물밀집지대에서의 감쇠 효과

**2.3 이동 소음원의 대류 효과 산정**

이동 중인 점 소음원에서 방사된 소음은 방사 시점과 계측 시점의 소음원 위치가 다르므로, 음속과 열차 속도에 의해 결정되는 대류(convection) 효과<sup>(11)</sup>를 가진다. 이 연구에서는 대류 효과를 고려하기 위한 거리  $d_c$ 를

$$d_c = \frac{d_k}{1 - v \cos \delta_k / c_s} \quad (6)$$

로 계산하였다. 여기서,  $c_s$ 는 음속(km/h)이고,  $d_k$  및  $\delta_k$ 의 정의는 Fig. 1에 나타나 있으며, 열차 속도  $v$ 는 수음점 기준으로 열차가 근접할 때 양의 값, 멀어질 때 음의 값을 가진다. 또한, 대류 효과로 인한 거리 감쇠 보정치  $\Delta A_d$ 은

$$\Delta A_d = 20 \log(d_c / d_k) \quad (7)$$

와 같이 산정하였다. 따라서, 대류 효과를 고려한 1-옥타브밴드별 A-가중치 등가 음압레벨  $L_{AT,f,n}$ 은 다음과 같이 산정된다.

$$L_{AT,f,n} = L'_{AT,f,n} - \Delta A_d \quad (8)$$

상기 대류 효과를 고려하면 수음점을 기준으로 이동 점 소음원이 가까워 질 때 전달감쇠가 증가하고, 멀어질 때엔 감소한다.

**2.4 수음점의 순간 음압레벨 산정**

이동 중인 고속열차 소음원을 나타내기 위한  $n$  번째 점 소음원으로 인한 수음점에서의 1-옥타브밴드 별 등가 음압레벨  $L_{AT,f,n}$  을 전술한 방법으로 산정하면, 시각  $t$ 에서 해당 점 소음원으로 인한 수음점의 순간 음압레벨  $L_{A,f,n,t}$  는 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$L_{A,f,n,t} \approx L_{AT,f,n} - 10\log(\Delta t_n / T_0) \tag{9}$$

여기서,  $T_0$ 는 1초,  $\Delta t_n$ 은 해당 점 소음원이 철로 분할 구간  $l_k$ 를 통과하는데 소요되는 시간(초)이다. 따라서, 고속열차 주행 시 시각  $t$ 에서 수음점의 1-옥타브 밴드별 순간 음압레벨  $L_{A,f,t}$ 은

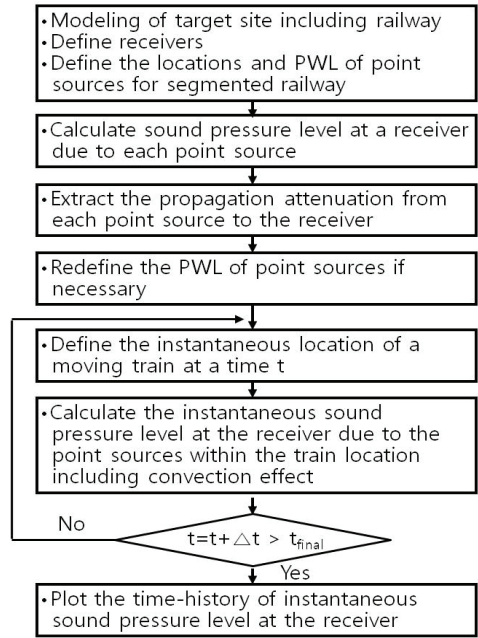
$$L_{A,f,t} = 10\log\left(\sum_{n=1}^N 10^{0.1L_{A,f,n,t}}\right) \tag{10}$$

와 같이 산정할 수 있다. 여기서,  $N$ 은 시각  $t$ 에서 고속열차가 위치한 선로 상에 모델링된 점 소음원의 전체 개수를 나타낸다. 또한, 시각  $t$ 에서의 A-가중치 순간 총합 음압레벨  $L_{A,t}$ 는 각 주파수밴드별  $L_{A,f,t}$ 의 대수 합으로 계산할 수 있다.

**2.5 수음점 순간 음압레벨 계산 절차**

통상적 환경소음예측 절차에 있어서 수음점의 음압레벨은 소음원의 위치와 음향파위레벨을 정의한 후 소음 전달경로로 인한 전달감쇠를 계산하여 평가한다. 상기 방법을 고속 주행 열차로 인한 수음점의 순간 음압레벨 계산에 적용할 경우, 고속열차의 순간 위치 별 소음원 모델링과 전달감쇠 평가가 매 시각별로 요구될 뿐만 아니라 고속열차의 종류 및 운행 조건 변경으로 인한 소음원의 음향파위레벨 변경 시 기존 계산 결과의 활용이 곤란하다.

이에 이 연구에서는 고속 주행 열차로 인한 수음점에서의 순간 음압레벨을 효율적으로 계산하고자 주저자가 기 개발한 환경소음예측 프로그램인 ENPro<sup>(12)</sup>를 활용하여 모든 분할 철로 상에 높이 별 점 소음원을 일괄 모델링하고, 각각의 점 소음원으로부터



**Fig. 2** Flowchart to evaluate the instantaneous sound pressure level due to a moving train at a receiver

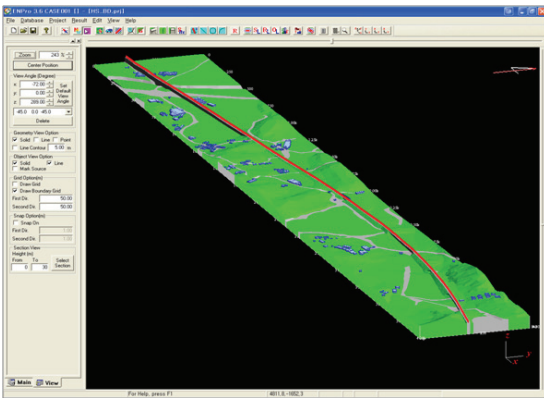
수음점까지의 전달감쇠값을 산정하였다. 또한, 수음점에서의 순간 음압레벨은 해당 시각에서의 고속열차 위치에 모델링된 점 소음원들만에 의한 기여분을 기 계산된 전달감쇠값과 대류 효과를 고려하여 산정하였다. 이 연구에서 적용한 수음점의 순간 음압레벨 계산절차는 Fig. 2에 나타내었다.

**3. 수치 해석 및 고찰**

이 연구에서 제시한 방법의 타당성을 검토하기 위하여 경기도 화성시 봉담읍 상리의 경부고속철도 하행 43.27 km 지점에 대해 KTX-I 및 KTX-II 주행 시의 수음점 순간음압레벨에 대한 시물레이션을 수행하고, 예측 결과와 비교·검토하였다.

**3.1 수치해석 모델링**

분할 철로 상에 위치한 점 소음원으로부터 수음점까지의 전달감쇠량 산정을 위하여 ENPro를 이용하여 예측 지점을 기준으로 철도 상하행 방향으로 각 2,000 m, 폭 방향으로 462 m의 영역을 모델링한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 이때, 지형·지물



**Fig. 3** Model to estimate propagation attenuation from the stationary point sources to a receiver: Bongdam region

**Table 2** A-weighted sound power level of point sources (dBA/m): Train speed=300 km/h

Train type	Source height	1-octave band center frequency (Hz)							
		63	125	250	500	1,000	2,000	4,000	8,000
ICE3 (half)	0 m	52.9	59.9	64.1	74.7	84.1	88.5	83.3	65.5
	4 m	42.9	48.9	57.9	62.0	64.9	64.9	58.9	50.9
	5 m	34.9	43.9	51.9	55.9	58.9	60.9	55.9	47.9
KTX -I	0 m	52.9	60.0	64.3	76.1	85.7	90.1	84.9	67.1
	4 m	42.9	48.9	57.9	62.0	64.9	64.9	58.9	50.9
	5 m	34.9	43.9	51.9	55.9	58.9	60.9	55.9	47.9
KTX -II	0 m	52.9	59.9	63.9	73.9	83.2	87.6	82.4	64.7
	4 m	42.9	48.9	57.9	62.0	64.9	64.9	58.9	50.9
	5 m	34.9	43.9	51.9	55.9	58.9	60.9	55.9	47.9

모델링은 국립지리정보원의 디지털 수치지도 등을 활용하여 전달감쇠에 영향을 미치는 인자를 정밀하게 고려할 수 있도록 하였다.

한편, 수음점은 하행 선로 중앙으로부터 수평으로 25 m 이격되고, 철로 설치면으로부터 높이 1.2 m인 계측 위치로 설정하였다. 또한, 고속열차 소음원을 나타내기 위한 점 소음원들은 철로를 1 m 간격으로 분할하고, 각 분할 철로의 길이 중앙에 레일 상면 (높이 0.172 m)으로부터 높이 0 m, 4 m, 5 m 위치에 점 소음원을 분포하였다. 또한, 상기 점 소음원의 음향파위레벨은 Schall 03 2006에 제시된 열차 유형 3에 해당하는 ICE 3(half train, 차축 개수 32, two-system version)을 적용하여 표준 도상에 대해 산정하였으며, 운전 모드, 레일 거칠기, 교량부 등에

대한 소음 보정치는 고려하지 않았다. 상기 방법으로 300 km/h 주행 시의 KTX-I(길이 388 m, 20량 1편성, 차축 개수 46) 및 KTX-II(길이 201 m, 10량 1편성, 차축 개수 26)의 단위 길이당 음향파위레벨을 산정한 결과는 Table 2에 ICE 3에 대한 결과와 함께 나타내었다. 참고로 ICE 3에 대한 자료는 300 km/h까지 적용할 수 있다.

### 3.2 수치해석 결과 및 고찰

고속열차가 하행 방향으로 주행 시 분할 선로 상에 위치한 높이 별 점 소음원으로부터 수음점까지의 전달감쇠를 계산한 결과는 Fig. 4에 나타내었다. 또한, KTX-I이 296 km/h, KTX-II가 282 km/h로 주행 시 수음점에서의 순간 환경소음 시간이력을 0.02초 간격으로 계산한 결과는 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 이에선 수음점에서의 음압레벨을 1초 간격으로 계측한 결과도 함께 나타내었다.

상기의 결과로부터 준정적 해석 방법을 이용한 총합 순간 소음도 해석 결과는 계측 결과와 비교하여 소음도 상승 및 하강 경향이 유사하며, 열차가 수음점 통과 시의 소음도는 KTX-I의 경우 최대 6.3 dB, KTX-II의 경우 최대 2.9 dB의 차이를 나타내었다. 또한, 고속 열차의 전두부 및 후두부 통과 시의 순간 소음도는 부합성이 다소 떨어짐을 확인할 수 있다. 또한, 상대적으로 길이가 짧은 KTX-II의 계측 결과에서 전두부 및 후두부 통과 시점의 소음도가 열차 중앙부 통과 시와 차이가 적은 것은 소음계측 시의 시간 분해능(1초)이 길었기 때문인 것으로 판단한다.

Table 3에는 KTX-I이 수음점 통과 시의 1-옥타브 밴드별 순간 소음도 계측 및 시뮬레이션 결과의 차이값을 1초 간격으로 나타내었다. 이에선 시간에 따른 차이값의 평균값과 표준편차도 함께 나타내었다. 이로부터 주파수 밴드별 계산 결과는 250 Hz 이하의 저주파 대역과 8,000 Hz의 고주파 대역에서는 계측 결과보다 평균값 기준 9 dB 이상 낮게 평가되고, 그 외의 주파수 대역에서는 계측 결과와의 부합성이 상대적으로 높음을 확인할 수 있다. 또한, 계측 및 계산 결과 차이값의 변동은 열차의 음향파위레벨이 가장 높게 평가된 1,000 Hz 및 2,000 Hz 대역에서 가장 심함을 확인할 수 있다.

상기의 계측 및 해석 결과 차이는 전달감쇠 산정



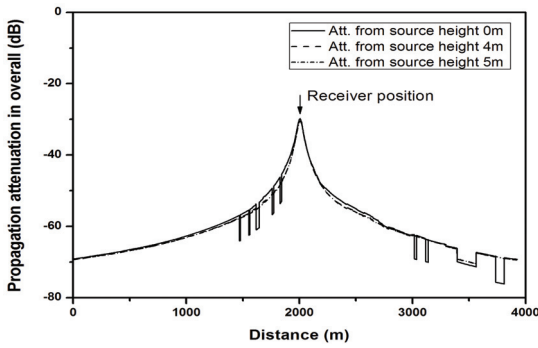


Fig. 4 Propagation attenuation in overall from point sources to a receiver

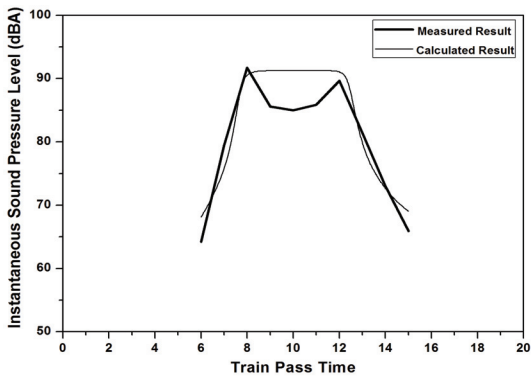


Fig. 5 Calculated and measured noise profile in overall at the receiver: KTX-I, 296 km/h

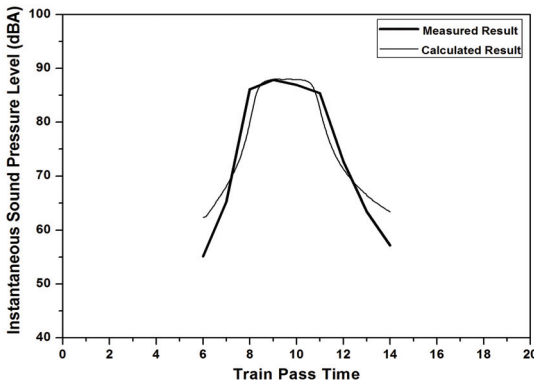


Fig. 6 Calculated and measured noise profile in overall at the receiver: KTX-II, 282 km/h

상의 오차와 함께 ICE 3 열차 대비 KTX-I 및 KTX-II 열차의 소음발생특성의 차이 및 열차 위치별 소음발생특성을 정밀하게 반영하지 못하였기 때문인 것으로 판단한다.

Table 3 Measured sound pressure level minus calculated one: KTX-I, 296 km/h

Time (sec)	1-octave band center frequency(Hz)								Over all
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
7	14.6	12.5	14.5	10.2	5.2	1.8	0.9	15.5	3.5
8	12.1	10.0	13.5	5.6	2.8	-2.2	4.0	13.5	1.2
9	11.0	8.6	13.1	1.1	-6.2	-9.7	-2.6	9.4	-5.7
10	11.3	8.2	14.6	0.7	-8.2	-11.3	-3.0	9.7	-6.3
11	12.2	9.7	15.3	1.6	-7.9	-9.7	-2.0	9.4	-5.4
12	10.6	8.2	16.1	3.2	-1.3	-4.3	1.5	13.2	-1.4
13	12.6	8.8	18.6	6.2	0.0	-0.5	5.6	21.8	1.5
Mean	12.1	9.4	15.1	4.1	-2.2	-5.1	0.6	13.2	-1.8
s.d.	1.2	1.4	1.7	3.2	4.9	4.8	3.1	4.1	3.7

한편, 고속 주행 열차의 순간 소음도에 대한 계측 및 해석 결과의 차이는 고속열차 소음원의 모델링 방법과 음향과위평가 결과에 따라 달라진다. 따라서, 이 연구에서 제시한 순간 소음도 시뮬레이션 방법은 계측결과와의 비교에 의해 열차 종류, 운행 방법 및 철도 구조에 따라 달라지는 열차 소음원의 위치별 소음발생특성을 규명하기 위한 역문제(inverse problem) 해법 적용에 유용하게 활용될 수 있다고 판단한다.

#### 4. 결 론

이 연구에서는 고속열차 주행 시의 순간 환경소음을 철도에 분포한 점 소음원들로부터 수음점까지의 전달감쇠 및 음속과 열차속도 차이로 인한 대류효과를 고려하여 계산하는 준정적 해석 방법을 제안하였다. 또한, ICE 3 열차 자료를 이용하여 KTX-I, 및 KTX-II 열차 주행 시의 순간 소음도의 시간이력 해석 결과를 계측 결과와 비교한 결과 제안된 방법은 고속 주행 열차의 순간 소음도 시뮬레이션에 유용하게 활용될 수 있음을 확인하였다.

한편, 이 연구에서 제시한 방법은 차량 종류 별 소음원 위치와 소음발생특성을 달리 정의하여 적용할 수 있다. 따라서, 순간 소음도 해석에 적용된 점 소음원의 위치와 음향과위레벨을 계측 결과와의 비교에 의해 보정하면 열차 종류, 운행 방법, 철도 구조 등에 따라 달라지는 고속열차의 소음발생특성 규명과 모델링 방법 정립에 유용하게 활용될 수 있다고 판단한다.

## 후 기

이 연구는 한국건설기술평가원 지원 미래철도기술개발사업의 “400km/h급 고속철도 인프라 시범적용 기술개발”의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

(1) Cho, J. H., et al, 2005, Identification of Source Characteristics and Development of Prediction Model for Railway Environmental Noise, KRRI.

(2) Kim, J. C., Koo, D. H. and Moon, K. H., 2001, A Study on Characteristics of Noise and Vibration for KTX, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 829~835.

(3) Noh, H. M., et al, 2012, Noise Sources Localization on High-speed Trains by Using a Microphone Array, Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 15, No. 1, pp. 23~28.

(4) Department of Transport and the Welsh Office, 1995, Calculation of Railway Noise, HMSO, London.

(5) Jonasson, H. G. and Storeheier, S., 2001, Nord2000, New Nordic Prediction Method for Rail Traffic Noise, SP Report 2001:11, SP Swedish National Testing and Research Institute.

(6) Bundesbahn, D., 2006, Schall 03 2006 - Guidelines on the Calculation of Noise Emissions of Railways and Tramways, München, Germany.

(7) Dittrich, M. G., 2005, Improved Methods for the Assessment of the Generic Impact of Noise in the Environment - Railway Noise Source Model, Default Source Data and Measurement Protocol, IMA6TR-050912-TNO01, TNO.

(8) ISO 9613-2, 1996, Acoustics - Attenuation of

Sound During Propagation Outdoors - Part 2: General Method of Calculation, ISO.

(9) Cho, D. S., et al, 2002, Prediction of Highway Traffic Noise - Calculation of Sound Attenuation during Propagation, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 12, No. 8, pp. 581~588.

(10) Cho, D. S., et al, 2004, Highway Traffic Noise Prediction Using Method Fully Compliant with ISO 9613: Comparison with Measurement, Applied Acoustics, Vol. 65, No. 9, pp. 883~892.

(11) Peters, S. 1974, The Prediction of Railway Noise Profiles, J. of Sound and Vibration, Vol. 32, No.1, pp. 87~99.

(12) Cho, D. S., 2011, ENPro 3.5, Createch.

(13) Cho, D. S., et al, 2011, A Proposal on Calculation Model to Predict Environment Noise Prediction Emitted by High Speed Train, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 843~848.



**Dae-Seung Cho** is a professor in the Department of Naval Architecture and Ocean Engineering at Pusan National University. He received his Ph.D. from the Department of Naval Architecture at Seoul National University in 1991 and

then worked in Hyundai Heavy Industries Co. as a ship noise and vibration researcher for six years. His research and teaching interests include low-noise and -vibration design and control of ship and offshore structures, environmental noise, radar cross section, blind source separation. He is the developer of environmental noise simulation program ENPro.