

고속철도 환경소음예측을 위한 계산 모델 제안

A Proposal on Calculation Model to Predict Environmental Noise Prediction Emitted by High Speed Trains

조대승† · 조준호* · 김진형** · 장강석*** · 윤제원***

Dae-Seung Cho, Jun-Ho Cho, Jin-Hyeong Kim, Kang-Seok Jang and Jae-Won Yoon

Key Words : Railway noise(철도 소음), Environmental noise prediction(환경소음예측), Calculation model(계산모델), High speed train(고속열차)

ABSTRACT

Planning and construction of railway for high speed trains up to 400 km/h are recently driven in Korea. High speed train is one of the environment-friendly fastest mass transportation means but its noise generated by rolling, traction and aerodynamic mechanism can cause public complaints of residents nearby railways. To cost-effectively prevent the troublesome noise in a railway planning stage, the rational railway noise prediction method considering the characteristics of trains as well as railway structures should be required but it is difficult to find authentic methods for Korean high speed trains such as KTX and KTX-II.

In this study, we propose a framework of our own railway noise prediction model emitted by Korean high speed trains over 250 km/h based on the recent research results carried out in EU countries. The model considers railway sound power level using several point sources distributed in heights as well as tracks, whose detail speed- and frequency-dependent emission characteristics of Korean high speed trains should be determined in near future by measurement or numerical analysis. The attenuation during propagation outdoors is calculated by the well-known ISO 9613-2 and auxiliary methods to consider undulated terrain and wind effect.

1. 서 론

최근 국내에서는 기존 300km/h급인 KDX-I과 KDX-II 보다 빠른 400 km/h 급 고속열차 개발 및 철도 인프라 건설 추진과 함께 관련 산업의 수출 산업화를 시도하고 있다. 한편, 정은 환경에 대한 높은 관심과 이에 따른 규제가 강화되고 있는 상황에서 고속열차 운행 시 발생하는 환경소음은 고속철도 인근 지역 주민들의 민원을 야기할 수 있다. 따라서,

저소음·친환경 고속철도를 운용하기 위해서는 고속 열차 개발 및 철도 설계 단계에서 고속 주행 열차로 인한 환경 소음 수준을 평가하고, 저비용·고효율 방음대책을 수립할 수 있는 환경소음 시뮬레이션 기술이 요구된다. 그러나, 국내의 경우 철도 환경소음예측을 위한 부분적 연구는 수행⁽¹⁾된 바 있으나 국내 운행 고속열차의 특성을 고려한 독자 철도 환경소음 예측모델이 없는 실정이다.

한편, 영국, 독일, 프랑스 등의 EU 국가들은 다양한 철도 환경소음 예측모델을 제안·적용하고 있으며, 이들 모델들에 관한 개요는 EU의 6차 프레임워크 프로젝트로 2003년 12월부터 2006년 12월까지 27개 기관이 공동 수행한 Imagine 프로젝트⁽²⁾ 보고서에 소개되어 있다⁽³⁾. 철도 환경소음은 열차의

† 교신저자; 정회원, 부산대학교 조선해양공학과
E-mail : daecho@pusan.ac.kr
Tel : (051) 510-2482, Fax : (051) 512-8836

* 한국철도기술연구원

** (주)크리에이티브

*** 유니스테크놀러지(주)

종류와 운행 방식, 철도 구조 등에 따라 달라진다. 이로 인해 영국의 CRN⁽⁴⁾, Nord2000⁽⁵⁾을 포함한 대부분의 기존 철도 환경소음예측모델은 자국 운행 열차 중심으로 소음원 자료를 제시하고 있어 300km/h 급 이상의 고속열차에 대한 소음원 자료는 제한적이다. 한편, 가장 최신의 철도환경소음모델에 해당하는 독일의 개정 Schall 03 2006⁽⁶⁾ 모델의 경우 철도 소음 발생메커니즘을 정밀하게 반영한 소음원 음향파워레벨 평가와 모델링 기법 및 ISO 9613-2⁽⁷⁾에 기반한 전달감쇠 평가 방법을 제시하고 있다. 또한, 영업속도 300km/h급인 Thalys PBKA 열차를 포함한 다양한 열차들에 대한 소음원 음향파워레벨 산정 자료를 제시하고 있다. 아울러, Imagine 프로젝트의 철도 관련 연구 결과⁽⁸⁾에서도 열차에 대한 상세 소음원 자료는 제한적으로 공개하고 있으나 철도 소음원 음향파워레벨 평가와 모델링 기법 등에 관한 최신의 연구결과를 소개하고 있다.

본 연구에서는 국내에서 운행 중인 300km/h급 KDX-I과 KDX-II는 물론 현재 개발 중인 400km/h 급 고속열차 HEMU400X를 대상으로 한 고속철도 환경소음예측모델을 정립하기 위해 EU 국가 등에서 수행한 최신 연구 결과를 토대로 국내 고속철도에 대한 환경소음예측 계산 모델을 제안한다. 제안된 모델은 철로를 주행하는 고속열차를 높이 및 길이 방향으로 분포된 점 소음원으로 모델링하며, 전달감쇠 계산은 ISO 9613-2 및 이의 보완 방법^(9,10)을 채택하였다. 아울러, 제안 모델의 실용화를 위한 향후 연구 항목을 소개한다.

2. Schall 03 2006과 Imagine 모델 개요

독일의 Schall 03 2006과 Imagine 모델은 열차 소음을 높이 및 길이 방향으로 분포한 점 소음원들을 이용하여 모델링하며, 주파수 대역 별 소음 발생 및 전파 특성을 고려한다. 이들 모델은 열차 소음을 전동, 추진, 공력, 브레이크 및 스킵 소음 등으로 분류하고, 각각의 발생메커니즘을 고려하여 높이별 소음원의 음향파워레벨을 산정한다. 그러나, 개별 점 소음원의 음향파워레벨 평가 방법은 Schall 03 2006이 직접적인 자료 제시로 용이하게 적용할 수 있는 반면에 Imagine 모델은 전동소음 평가에 측정 및 해석 결과 등을 이용한 연산을 전제로 하는 방법

을 적용하고 있어 Schall 03 2006 대비 적용이 용이하지 않다. 또한, 세부 파라미터에 대한 평가 및 고려 방법도 일부 상이하다. Table 1에는 상기 두 가지 모델의 주요 내용을 나타내었다. 또한, Fig. 1에는 Imagine 모델에서 적용하고 있는 점 소음원의 위치⁽⁸⁾를 나타내었다.

Table 1 Comparison of Schall 03 2006 and Imagine model

Item	Schall 03 2006	Imagine model
Source modelling in heights	·3 point sources ·0m, 4m, 5m	·5 point sources ·0, 0.5, 2, 3, 4m
Emission mechanism	·Rolling, traction, aerodynamic, braking, squeal	·Rolling, traction, aerodynamic, braking, squeal
Evaluation quantity	·Source: PWL/m ·Receiver: SPL	·Source: PWL/m ·Receiver: SPL
Frequency band	·1/1-octave band from 63Hz to 8kHz	·1/3-octave band from 25Hz to 10kHz
Considered parameters	·Vehicle/track type, ·Speed & traffic vol. ·Operation mode ·Rail/wheel roughness ·Rail discontinuity ·Track/bridge type ·Equipment ·Curved track	·Vehicle/track type, ·Speed & traffic vol. ·Operation mode ·Rail/wheel roughness ·Rail discontinuity ·Track/bridge type ·Equipment ·Curved track
Directivity	3-D solid angle	Horizontal angle
Calculation method of attenuation	·Basically ISO 9613-2 ·Evaluation of ground effect in overall freq.	·Harmonoise method ⁽¹¹⁾

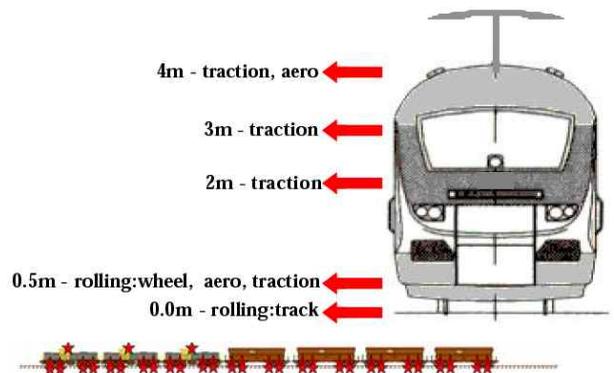


Fig.1 Source modelling in Imagine method⁽⁸⁾

3. 고속철도 환경소음예측 계산모델 제안

3.1 국내 고속열차 주요 제원

국내에서 운행 중인 300km/h 급 KDX-I, KDX-II와 현재 개발 중인 400km/h 급 HEMU400X 고속열차의 편성 정보와 동력 방식 등의 주요 제원을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Particulars of Korean high speed trains

Model	KTX-I	KTX-II	HEMU400X (test vehicle)
Power	Concentrated	Concentrated	Distributed
Composition	20 vehicles (PC+M+16T+M+PC)	10 vehicles (PC+ET+6T+ET+PC)	6 vehicles (TC+4M+TC)
Commercial operat. speed	300km/h	300km/h	370km/h
Bogie type (upper height)	Tilting (990mm)	Tilting (990mm)	Independent (945mm)
Wheel dia.	920mm	920mm	860mm
Height of pantograph	5,080mm	5,080mm	5,100mm
Cent. heig. of prop. motor, reduct. gear	460mm	460mm	430mm
Position of transformer, inverter	Within power car	Within power car	Lower part of vehicle outside
Remark: PC (Power car), M (Motor car with cabin), T (Trailer), ET (End trailer), TC (Traction car with operation room)			

3.2 고속열차 소음원 모델링

고속열차 운행 시 발생하는 소음은 Fig. 2에 KDX-I의 소음원 위치 규명을 위해 96채널 마이크로폰 어레이로 측정된 음압분포에서도 확인할 수 있듯이 차량 종류와 속도에 따라 전동, 추진, 공력 등의 발생기구별로 소음 발생량과 위치가 다르다. 또한, 도상, 교량 등의 철도 구조에 따라서도 소음발생량이 달라진다.

이에 본 연구에서는 고속철도 소음원을 발생 메커니즘과 높이를 고려한 10개의 부분 점 소음원들을 길이 및 높이 방향으로 분포시키는 방법을 제안한다. Table 3에는 제안된 모델의 부분 소음원 별 높이 방향 소음원 배치안을 나타내었다. 또한, Fig. 3에는 KDX-I의 길이 및 높이 방향 점 소음원 배치

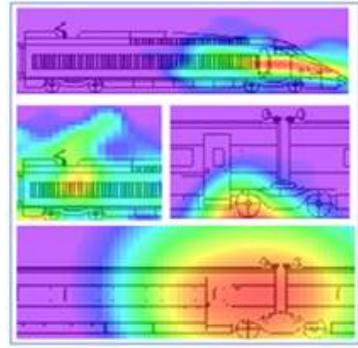


Fig. 2 Measured sound pressure level of KDX-I using microphone array with 96 channels

Table 3 Proposed heights of part point source for Korean high speed trains

Height (m)	Position	Part source (ID no.)
0	Top surface of rail	Rolling(1), squeal(2), braking(3)
0.46 (0.43 [*])	Center of bogies	Traction(4), aerodynamic(5)
0.65	Auxiliary equipment	Traction(6)
2.5 (2.0 [*])	Center of inverter, transformer, fore & aft body of train	Traction for propulsion system(7), aerodynamic for train body(8)
4.1 or 3.5 (3.75 [*])	Roof (power car 4.1m, trailer 3.5m)	Aerodynamic(9)
5.1	Pantograph	Aerodynamic(10)

*: Source heights for HEMU400X

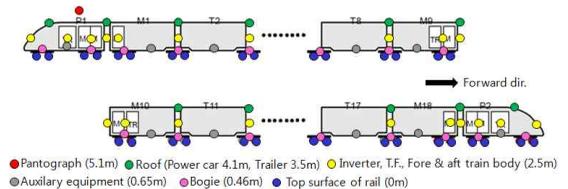


Fig. 3 Positions of point sources to model KDX-I

안을 제시하였다.

3.3 소음원 음향파워평가 및 철도 모델링

고속열차 운용 시 단위 시간 당 높이 별 점 소음원의 음향파워 평가 및 철도 모델링 절차는 Fig. 4에 나타내었다. 상기 절차의 적용에 있어서 특정 열차가 1대 주행할 경우의 각각의 부분 소음원의 단위 길이(1m) 당 음향파워레벨(PWL) $L_{W,A,f,h,m,Ez}$ 은 다음과 같이 산정한다.

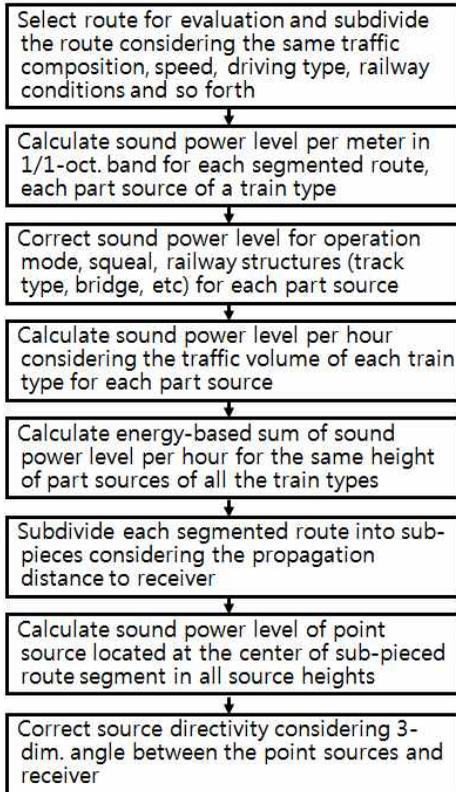


Fig. 4 Procedure to evaluate and model sound source power of railways

$$L_{WA,f,h,m,Fz} = a_{A,h,m,Fz} + \Delta a_{f,h,m,Fz} + 10 \log \frac{n_Q}{n_{Q,0}} \quad (1)$$

$$+ b_{f,h,m,Fz} \log \frac{v_{Fz}}{v_0} + \Sigma c_{f,h,m} + \Sigma K_f$$

여기서,

$a_{A,h,m,Fz}$: 기준속도 v_0 에서의 A-가중치 총합 PWL

$\Delta a_{f,h,m,Fz}$: 63Hz부터 8kHz까지의 1/1-옥타브 밴드 중심주파수 f 에서의 PWL 추정 계수

n_Q : 차축 개수

$n_{Q,0}$: 기준 차축 개수

$b_{f,h,m,Fz}$: 속도 비례 계수

v_{Fz} : 열차 속도 (km/h)

v_0 : 기준 열차 속도 (km/h)

$\Sigma c_{f,h,m}$: 운전형태(가감속 등), 레일 거칠기, 도상 등에 대한 보정치

ΣK_f : 교량 구조진동음 등 기타 소음 보정치

이다. 또한, 하첨자 h , m , Fz 은 점 소음원 높이, 높이 별 부분 소음원 (Table 3 참조), 열차 유형을

각각 나타낸다. 따라서, 단위 시간 당 열차 유형 (Fz)별 운행 대수(n_{Fz})를 파악하면 Table 3에 나타낸 높이 별 점 소음원의 단위 길이당 음향파위레벨 $L_{WA,f,h}$ 는 다음과 같이 산정된다.

$$L_{WA,f,h} = 10 \log \left(\sum_{m,Fz} n_{Fz} 10^{0.1 L_{WA,f,h,m,Fz}} \right) \text{ dB} \quad (2)$$

여기서, m 은 동일 높이에 위치한 부분 점 소음원에 대한 대수 합을 나타낸다. 한편, Fig. 5에 나타낸 길이 l_{k_s} 로 분할된 철도 트랙의 길이 중앙에 위치하는 높이 및 1/1-옥타브 밴드별 점 소음원의 1/1-음향파위레벨 L_{WA,f,h,k_s} 는

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

와 같이 평가된다. 여기서, l_0 는 단위 길이(1m)이다. 이때, 철도 분할 길이 l_{k_s} 는 점 소음원으로부터 수음점까지의 길이 d_{k_s} 의 1/2 이하가 되어야 0.1 dB 이내의 정확도를 보장할 수 있다⁽⁶⁾. 철도 소음의 지향성을 평가하기 위한 3차원 각도 δ_{k_s} 는 Fig. 6에 보인 바와 같이 평가하며, Schall 03 2006에서는 지향성 지수 D_{L,k_s} 를 식 (4)와 같이 평가한다.

$$D_{L,k_s} = 10 \log (0.2 + 1.2 \sin^2 \delta_{k_s}) \text{ dB} \quad (4)$$

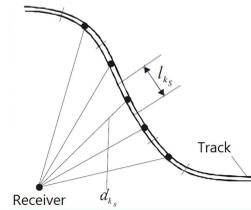


Fig. 5 Position of point source for sub-pieced track⁽⁶⁾

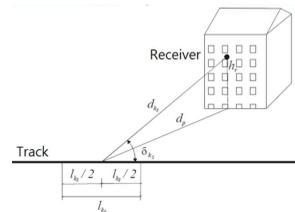


Fig. 6 Definition of 3-D angle to evaluate source directivity⁽⁶⁾

3.4 전달감쇠 평가 방법

고속철도 소음 발생 메커니즘의 주파수 특성을 고려하는 제안 모델에서는 공기 흡음, 지면, 회절, 반사 효과 등이 주파수 대역 별로 다른 특성을 고려

하는 전달감쇠 평가 방법을 검토하였다. 기존 제시된 옥의 전파 공기 소음에 대해 1/n-옥타브밴드 별 전달감쇠를 산정하는 방법으로는 ISO 9613-2⁽⁷⁾ (n=1), Harmonoise 방법⁽¹¹⁾(n=3) 일본음향학회의 ASJ 2008 모델⁽¹²⁾ (n=1 또는 3) 등이 있다. 이들 중 1/3-옥타브밴드 별 전달감쇠를 계산하는 방법은 파동음향학에 기초한 이론적 해석 방법이 다수 도입되어 임의 지형, 구조물 등의 잉여 감쇠 산정의 전산화, 자동화가 용이하지 않다. 이에 전달감쇠는 Schall 03 2006에서 채택하고 있고, 국제적 공신력이 인정되는 ISO 9613-2의 방법을 적용하여 63Hz 부터 8kHz까지의 1-옥타브밴드 A-가중치 음압레벨 $L_{A,fT}$ 을 다음과 같이 산정하고자 한다.

$$L_{fT} = L_{WA} + D_I - A_{div} - A_{atm} - A_{gr} - A_{bar} - A_{misc} \quad (5)$$

여기서,

- L_{WA} : 점 소음원 또는 경상 점 소음원의 1/1-옥타브 밴드 A-가중치 PWL
- D_I : 소음원의 지향지수
- A_{div} : 기하학적 확산 효과에 의한 감쇠
- A_{atm} : 공기 흡음에 의한 감쇠 효과
- A_{gr} : 지면에 의한 감쇠 효과
- A_{bar} : 구조물에 의한 회절 효과
- A_{misc} : 숲, 공장지대 및 건물밀집지대에서의 감쇠효과

3.3절에 기술한 분할 철도 요소의 중앙에 위치한 높이 별 점 소음원 및 이의 경상 소음원 모두에 대해 식 (5)를 적용하면 수음점에서의 총합 A-가중치 등가 음압레벨 L_{AT} 는 다음과 같이 산정한다.

$$L_{AT} = 10 \log \left[\sum_{i=1}^{N_p} \sum_{j=1}^8 10^{0.1(L_{fTij})} \right] \quad (6)$$

여기서, N_p 는 경상 소음원을 포함한 해당 철도 소음원으로부터 수음점으로 전달되는 음의 전파 경로 개수이다.

한편, ISO 9613에서는 지면이 평탄한 경우에는 1/1-옥타브밴드 별 지면 감쇠 효과 평가방법이 제시되어 있으나, 총합 음압레벨 기준으로만 산정하는 방법을 제시하고 있다. 이로 인해 Schall 03 2006에서도 지면감쇠 효과는 옥타브밴드별 계산방법을 제시하지 않고 있다. 이에 제안 모델에서는 절토부, 성토부 등과 같이 평탄하지 않은 지형에 대한 지면 감쇠효과를 옥타브 밴드별로 정밀하게 산정하기 위

하여 프랑스 NMPB⁽¹³⁾에서 적용하는 등가 평탄지형을 이용한 옥타브밴드별 계산방법 적용을 제안한다. 즉, Fig. 7에 보인 바와 같이 등가 소음원의 높이 $(h_s)_{eq}$ 와 등가 수음점의 높이 $(h_r)_{eq}$ 를

$$(h_s)_{eq} = h_s \cos \theta + \frac{S_l - S_u}{d_p} \quad (7a)$$

$$(h_r)_{eq} = h_r \cos \theta + \frac{S_l - S_u}{d_p} \quad (7b)$$

와 같이 산정한 후 평탄 지형과 마찬가지로 지면감쇠 효과를 산정한다. 여기서, h_s , h_r 은 각각 실제 소음원과 수음점의 높이, d_p 는 지면에 투영된 소음원과 수음점의 거리, S_l 과 S_u 는 각각 소음원과 수음점이 위치한 지면을 잇는 기준 면(reference plane)과 실제 지형으로 둘러싸이는 기준면 하부 면적과 상부 면적을 나타낸다.

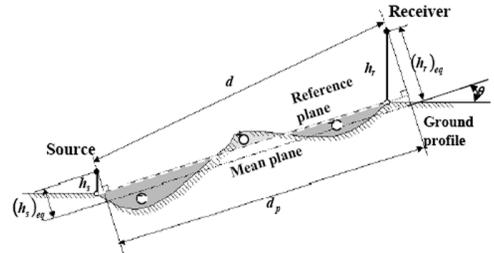


Fig. 9 Evaluation of mean ground profile^(9,13)

4. 제안 소음예측 모델의 구현 방안

이 연구에서 제안한 소음원 음향과위 평가 및 모델링 방법은 개념 상 Schall 03 2006 및 Imagine 철도 모델과 유사한 방법을 적용하고 있다. 그러나, 열차 유형과 운용 환경이 다르므로 주어진 연구환경이 허락하는 한 음향과위 평가를 위한 다수의 세부 자료를 독자적 노력으로 확보해야 한다. Table 4에는 고속철도 소음원 음향과위 평가에 필요한 기술자료 확보 방안을 나타내었다. 한편, 전달감쇠 산정은 저자들이 기 확보하고 있는 전산화 기술을 활용하면 비교적 용이하게 개발될 수 있다고 사료한다.

5. 결 론

이 논문에서는 국내 운행 및 개발 중인 고속열차 환경소음예측을 위한 계산 모델을 제안하였다. 제안

Table 4 Research methods to realize the proposed calculation model for Korean high speed trains

Items	Research method
Identification of source height, speed- and frequency-dependent noise emission and its directivity per train type	Measure. using microphone array and ISO 3095 ⁽¹⁴⁾ method
Correction factors for track and bridge types	Measurement by ISO 3095 and use of existing data in references ^(6,8)
Braking, squeal, rail & wheel roughness, tunnel opening, rail discontinuity	Use of existing data in references ^(5,6,8)
Validation of calculation accuracy	Comparison of measurement and simulation results

된 모델은 고속열차의 다양한 소음 발생메커니즘을 기존 Schall 03 2006, Imagine 모델, Nord2000 등에서 적용하고 있는 열차 높이 방향으로 분포된 다수의 점 소음원으로 고려하며, 전달감쇠 산정은 ISO 9613-2 방법을 채택하였다.

제시된 모델의 실용화와 정확도 검증을 위해서는 향후 국내 고속열차 및 철도 구조 유형 별로 소음 발생에 영향을 미치는 다양한 인자들에 대한 측정 및 해석 연구가 요구된다. 고속철도 환경소음저감 핵심기술 개발 연구의 일환으로 수행 중인 환경소음 예측 기술 개발 관련 연구에 대해 유관 기관 및 전문가들의 적극적 협조를 기대한다.

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. and et al, 2005, Identification of Source Characteristics and Development of Prediction Model for Railway Environmental Noise, KRRI.
 (2) Website, www.imagine-project.org.
 (3) M. Beuving and Paul de Vos, 2004, Improved methods for the assessment of the generic impact of noise in the environment - State of the art,

IMA10TR-040423-AEATNL32, AEA Technology Rail BV, pp.30-33.

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

(5) Hans G. Jonasson and Svein Storeheier, 2001, Nord2000. New Nordic prediction method for rail traffic noise, SP Report 2001:11, SP Swedish National Testing and Research Institute.

(6) Deutsche Bundesbahn, 2006, Schall 03 2006 - Guidelines on the calculation of noise emissions of railways and tramways, München, Germany.

(7) ISO 9613-2, 1996, Acoustics - Attenuation of Sound During Propagation Outdoors - Part 2: General Method of Calculation, ISO.

(8) M.G. Dittrich, 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.

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

(10) Cho, D.S. and 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) R. Nota, R. Barelds, D.V. Maercke, 2005, "Harmonoise WP3 Engineering Method for Road Traffic and Railway Noise after Validation and Fine-Tuning", HAR32TR-040922-DGMR20, DGMR.

(12) K. Yamamoto, 2010, Road Traffic noise prediction method "ASJ RTN-Model 2008": Report of the Research Committee on Road Traffic Noise, Acoustic Society of Japan, Vol. 31, No.1, pp. 2~55.

(13) NMPB-96, 1997, Road Traffic Noise - New French Calculation Method Including Meteorological Effects, CERTU.

(14) ISO 3095, 2005, Railway Applications - Acoustics - Measurement of noise emitted by railbound vehicles, ISO.