

무궁화 열차 환경소음 예측모델 개발에 관한 연구

A Study on the Prediction Model Development for Environmental Noise of Mugungwha Train

조준호* · 김재철** · 최성훈** · 이찬우** · 한환수**

Jun-Ho Cho, Jae-Chul Kim, Sung-Hoon Choi, Chan-Woo Lee, Hwan-Su Han

Key Words : Railway Environmental Noise(철도환경소음), 소음폭로레벨(Sound Exposure Level), 소음예측(Noise Prediction)

ABSTRACT

For the reduction and efficient management of railway noise, first of all prediction of railway noise is necessarily requested. At home and abroad many studies for prediction of railway nearby noise have been accomplished. But it is impossible to predict easily and exactly for the Korean Railway, because the acoustic powers for each rolling stock operated in Korea have not been built yet. So in this study, prediction model equation for environmental noise for Korean rolling stock Mugungwha was suggested using SEL of engine and rolling noise component separately. In this prediction model, the number of car, distance from the rail can be considered. Finally for the validation of prediction model equation, the predicted Leq was compared to the measured Leq.

1. 서론

최근 교통기술의 발달과 전국토의 효율적 활용을 목적으로 도시간 또는 도심내 철도건설 및 계획이 활발히 진행되고 있다. 건교부에서 발표한 국가기간 교통망 계획(2000-2019)에 의하면 그 구체적인 진행 계획이 포함되어 있음을 알 수 있다.

이와같은 철도교통은 그 대량수송 능력뿐만 아니라 정시성, 안전성 그리고 무엇보다도 환경친화성은 널리 알려진 사실이며, 이러한 장점으로 인해 그 기술 발전 및 수요는 더욱 가속화되리라 예상된다.

그러나 철도교통이 가지는 환경친화성은 소음측면에서는 상당히 취약하며, 일반 도로교통과 같이 일정한 소음도 분포를 가지기 보다, 열차 통과전후에 소음도 차이가 거리에 따라 차이를 보이지만 암소음 대비 30dB 이상 소음도 차이를 보이는 경우도 있다.

이와같은 소음은 노출된 사람에게 불쾌감을 줄 뿐 만아니라 심할 경우 혈압상승, 맥박증가, 말초혈관 수축, 호흡회수 증가, 위 수축운동 감퇴, 혈당도 상승의 신체적 변화 외에 대화 곤란 및 정서적 불안 등으로 인한 심한 스트레스를 유발한다. 또한 야간의 경우 철도소음 등에 의해 수면방해를 일으키며, 철도소음으로 인해 인근 부동산의 가치하락도 일으키게 된다.

이러한 철도 소음에 대하여 기하급수적으로 늘어나는 민원 및 국민의 요구에 의해 1990년대부터 국가 및 공공복지 차원에서 관심을 가지고 관련 연구 및 기술개발이 추진되어오고 있다.

철도소음 예측기술은 철도 선진국인 프랑스, 독일, 일본 등을 중심으로 발전되어 왔다. 이러한 예측기술은 고도의 이론적 배경과 많은 측정 경험을 바탕으로 개발될 수 있으며, 최근 고속철도 시스템과 같이 철도 시스템의 판매시 필요한 설계도로써 개발되거나, 도시 전체의 환경소음을 예측 분석하여 도시계획 및 설계를 위해서 사용되어 왔다.

철도소음 예측 관련하여 국립환경연구원에서 1993 - 1994년에 사업장 소음의 방지대책에 관한 연구(II, III)에서 새마을, 무궁화, 통일호 열차 및 전기여객열차와 전철에 대하여 주로 거리와 속도의 함수로 최대소음도 및 증가소음도를 예측하

* 한국철도기술연구원
E-mail : jhcho@krti.re.kr
Tel : (031) 400-5366, Fax : (031) 400-5279

** 한국철도기술연구원

는 모델을 제시한 바 있다. 그러나 이 예측 모델의 경우 국내 철도소음 예측을 위한 선구자적 연구이나 철도소음을 너무 단순화하여 모델을 구성하므로 그 실용성 및 정확도 측면에서 오차를 많이 내포하고 있다. 그 이후 이와같은 예측 모델을 구축한 사례가 국내에는 없고 현재까지도 이 모델을 이용하여 철도환경소음을 예측하는 경우가 많으나, 예측모델이 가지는 한계로 인하여 그 예측결과에 대한 신뢰성이 떨어지는 형편이다.

따라서 본 연구에서는 국내 철도의 환경소음 예측모델을 개발하기 위한 첫 단계로써 기존선 열차중 가장 소음이 큰 무궁화열차를 대상으로 환경소음 예측 모델을 구성하였고, 예측 모델식을 이용한 결과와 실측 결과를 비교 평가하였다.

2. 철도소음 예측 이론

2.1 철도소음 예측 이론

(1) 철도소음 방사 특성

일반적으로 철도차량의 소음원에서 방사되는 소음은 코사인 음원, 쌍극자음원으로 나뉘어 질 수 있으며 이러한 소음이 음원으로부터 일정한 거리만큼 떨어진 지점에서의 음압은 다음 식에 의해 각각 계산될 수 있다.[5-8,17]

$$p_c^2 = \frac{\rho c W_c}{4\pi r^2} \cos \theta \quad (1)$$

$$p_d^2 = \frac{\rho c W_d}{4\pi r^2} \cos^2 \theta \quad (2)$$

여기에서 W는 각 음원에 대한 음향파워이고 p는 각 음원에 대한 수음점에서의 음압을 나타내며, 아래첨자에 의해서 각각 무지향성음원, 코사인음원, 쌍극자음원으로 구분된다.

먼저 전동음은 각 차륜을 소음원의 위치로 설정하여 점음원이 나열되어 있는 형태로 모델링하였으며 동력차에 의한 소음은 엔진 및 각종 기기류의 위치를 점음원으로 모델화하여 추가하였다. 이러한 음원들의 위치관계를 그림 1과 2에 나타내었다.

그림 1에서 각 음원으로부터 수음점까지의 거리 r_i 와 θ_i 는 다음 식 (3)에 나타내었다.

$$r_i = \sqrt{(h_r - h_c)^2 + d^2 + (x_i + x)^2} \quad (3)$$

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

여기에서 h_r 은 레일답면에서 수음점까지의 높이, h_c 는 레

일답면에서 음원까지의 높이, r_i 는 음원과 수음점 간의 거리, d 는 음원과 수음점간의 수직거리, L 은 첫 번째 음원과 마지막 음원까지의 거리, 즉 차량의 길이를 나타낸다. x_i 는 첫 번째 음원으로부터의 거리, x 는 첫 번째 음원과 수음점으로부터 수직한 점까지의 거리를 나타낸다.

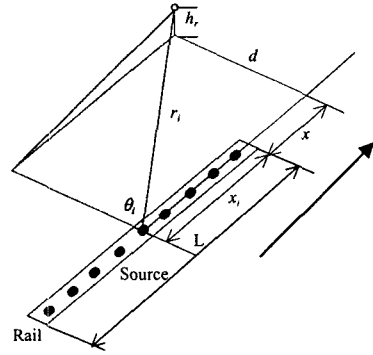


그림 1 전동음 계산 모델

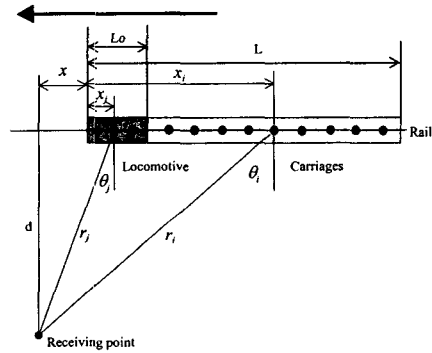


그림 2 엔진을 가진 차량소음의 계산 모델

(3)식에서 $x = vt$ 로 치환하여 식(1)과 (2)에 대입하고 $K = \rho c \frac{W}{4\pi}$ 로 치환하면, 다음과 같이 각 음원에 대한 수음점의 음압을 계산할 수 있다.

$$P_c^2 = K_c \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{r_i}\right)^2 \cos \theta_i$$

$$= K_c \sum_{i=1}^m \left(\frac{d}{((h_r - h_c)^2 + d^2 + (x_i + vt)^2)^{3/2}}\right) \quad (4)$$

$$P_d^2 = K_d \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{r_i}\right)^2 \cos^2 \theta_i$$

$$= K_d \sum_{i=1}^m \left(\frac{d^2}{((h_r - h_c)^2 + d^2 + (x_i + vt)^2)^2}\right) \quad (5)$$

여기에서 v 는 차량속도, m 은 전동소음원의 총 수이다. 위 식들에서 열차의 선두부 즉 첫 번째 음원이 수음점을 통과할 때 $x = 0$ 가 된다. 식의 우측에서 K 값은 음원의 파워에 해당하며 소음의 크기를 결정하고, 괄호에 해당하는 부분은 소음의 방사특성을 결정하는 지향성을 나타낸다. 동력장치인 엔진소음원도 위와 동일하게 계산식을 유도할 수 있으며, 전동음에 대한 계산식에 다음 식과 같이 동력소음을 더하면 전체소음을 계산할 수 있다.

$$P^2 = K_C \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{r_i}\right)^2 \cos^2 \theta_i + K_L \sum_{j=1}^k \left(\frac{1}{r_j}\right)^2 \cos^2 \theta_j \quad (6)$$

(2) 철도소음의 기술

철도소음을 기술하는 척도는 여러 가지가 있는데 지금까지 사용한 등가음압레벨 이외에도 많이 사용하는 것이 열차가 한 번 지나가는 시간만을 고려하는 소음폭로레벨(sound exposure level, SEL) 이다. SEL은 다음과 같이 정의한다.

$$SEL = 10 \log \left(\frac{1}{T_0} \int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right) dB \quad (7)$$

여기서 $T_0 = 1s$ 이고 T 는 측정시간이다. SEL과 등가음압레벨은 다음과 같은 관계를 가진다.

$$L_{eq, T} = SEL - 10 \log (T/T_0) + 10 \log n \quad (8)$$

이 식에서 n 는 시간 T 사이에 통과한 열차의 수이다.

3. 철도소음 측정 및 분석

무궁화 열차의 환경소음 예측 모델을 구성하기 위한 소음측정을 수행하였다. 소음은 거리별로 평지에서 수행되었다. 측정 위치는 15m, 25m, 50m, 100m에서 동시에 소음을 레코더에 녹음하여 실험실에서 그 소음도를 분석하였다. 그림 3에는 소음도 측정을 위한 현장 개념도를 나타낸다.

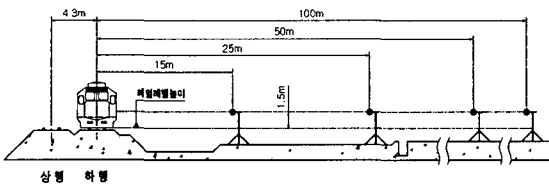


그림 3. 소음측정 현장 개념도

가. 측정 및 분석 장비

- 신호 컨디셔너(Larson Davis Model 2210)
- 2 채널 실시간 분석 시스템(Larson Davis 2900B)
- 16 채널 DAT 기록기(Sony SIR1000)
- 마이크로폰(Larson Davis LD2541)
- 마이크로폰 프리앰프(Larson Davis PRM 901)
- 표준음 발생기, Wind Screen
- Agilent VXI frontend
- LMS Cada-x

나. 데이터 분석 방법

데이터는 열차가 측정하는 마이크로폰에 접근하기 전부터 빠져나가는 충분한 시간동안 레코더에 저장하였으며, 저장된 데이터는 실험실에서 시간에 따른 소음도(Sound Pressure Level)변화를 분석하였다. 이때 측정 열차의 최고소음도(Lmax)와 열차통과하는 동안의 소음폭로레벨(Sound Exposure Level)을 분석하였다.

다. 측정 환경 및 측정 지역의 지형

- 온도 : 14 ~ 16. C
- 상대습도 : 18 ~ 20 %
- 풍속 : 2 ~ 3 m/s
- 날씨 : 맑음
- 지형조건 : 논밭지역

라. 측정위치 및 선로조건

- 팽택-성환구간, 81k785 지점
- 용접레일, 직선 구간
- 구배 : 상선 수평(level), 하선 + 2.5 %

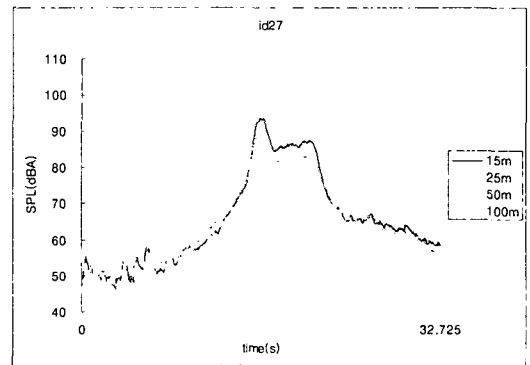


그림 4. 전형적인 소음측정 결과(ID 27)

4. 철도 환경소음 예측 모델 및 평가

(1) 예측모델 구성의 개요

무궁화 열차 소음 예측을 위한 모델 즉 예측식을 제시함에 있어서 표준 조건을 다음과 같이 구성하였다.

- 기준속도 : 주요 영업속도인 115-130km/h
- 기준위치 : 25m
- 대상범위 : 7.5 - 100m
- 선로 : 직선/수평/장대레일/발라스트레드/콘크리트 침목
- 레일 및 차륜 조건 : 레일과 차륜의 작정 상태 양호

예측모델은 (6)식의 소음방사 모델을 활용하여 전동음은 쌍극자특성을 가지는 점음원의 배열로 모델링하고 기관차의 엔진 등에 의한 기관소음은 점음원이 코사인방사 특성을 가지는 모델을 활용하였다. 이와같은 음원위치와 방사특성에 대해 철도소음 측정데이터를 근거로 하여 기준위치에서의 소음폭로레벨 또는 폭로소음레벨(Sound Exposure Level)을 기관소음과 전동소음으로 각각 분리하여 구성하였다.

다음 그림 5에는 측정구간중 전형적인 무궁화열차 소음방사 특성을 나타내는 평택-성환구간에서 측정한 ID 27(8량, 속도 119km/h)에 대하여 측정한 값과 방사모델 (6)식에 의해 계산한 결과를 비교하여 나타내었으며, 표 1에는 그 값을 측정과 예측의 경우로 비교하여 나타내었다. 대체로 0.5dB 이내에서 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

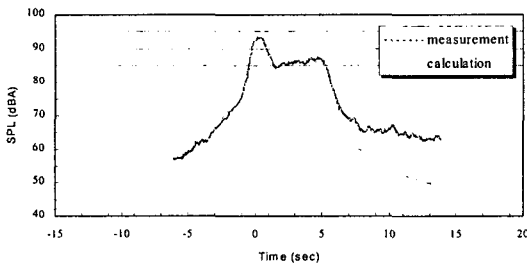


그림 5. 측정 및 예측 소음도 비교(ID 27, 15m 위치)

표 1 측정과 예측 SEL의 비교(평택-성환구간, ID 27)

구분	측정값	예측값	차이
15m	96.2	96.4	-0.2
25m	92.9	93.4	0.5
50m	88.5	88.6	-0.1
100m	84.8	85.1	-0.3

이와같은 예측모델을 이용하면 기관에 의한 동력음(power noise) 또는 기관음(engine noise)과 열차바퀴(wheel)와 레일(rail)사이의 작용에 의한 전동음(rolling noise)을 나누는 것이 가능하며, 그 대표적인 예를 그림 6에 나타내었다.

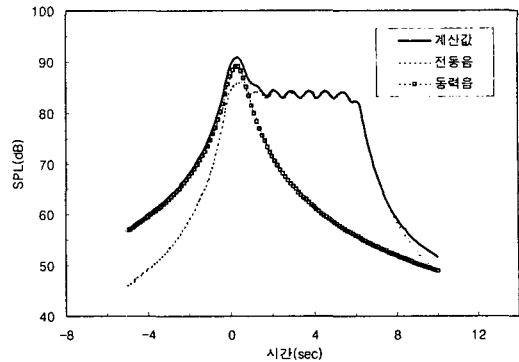


그림 6 성분 소음레벨과 합성에 의한 총 소음레벨

이와같이 기준속도범위로 통과하는 열차의 소음도로부터 계산된 단위 차량수에 대한 기관음과 전동음의 소음폭로레벨 (SEL)을 평택-성환을 통과하는 6대의 열차에 대하여 평균하여 표 2에 나타내었다.

표 2 단위 차량에 대한 평균 SEL(평균속도 : 121km/h)

구분	기관음	전동음	비고
15m	93.9	83.2	
25m	91.2	79.4	
50m	87.1	74.9	
100m	83.1	69.5	

표 2에서 알 수 있는 바와 같이 단위 차량에 의한 기관음과 전동음은 기관음이 매우 우세함을 알 수 있다. 그러나 무궁화 열차 편성열량수가 10량이라면 전동음은 10dB 상승하므로 전동음의 SEL은 기관음의 SEL에 근접한 값을 가지나 여전히 기관음의 SEL이 높음을 알 수 있다.

그림 6과 7에는 단위 기관차의 SEL과 단위 차량의 전동음을 거리에 따라 구하는 실험식을 나타내었다.

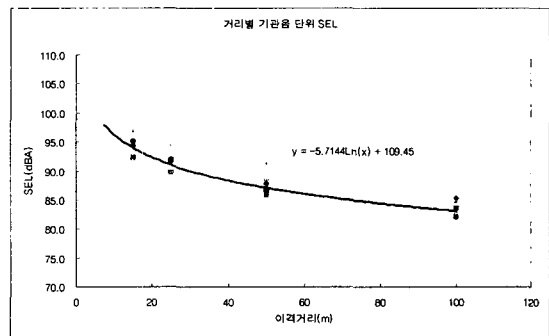


그림 6 단위차량 기관음의 SEL 실험식

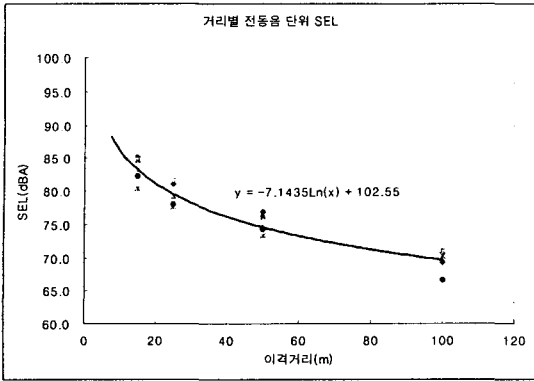


그림 7 단위차량 전동열차의 SEL 실험식

그림 6과 7에서 나타난 단위차량 기관음 (SEL_e)과 전동음 (SEL_r)의 SEL 실험식을 이격거리 $d(m)$ 의 함수로 정리하면 다음과 같다.

$$SEL_e = -5.7144 \ln(d) + 109.45 \quad (dBA) \quad (9)$$

$$SEL_r = -7.1435 \ln(d) + 102.55 \quad (dBA) \quad (10)$$

단 여기에서 이격거리 d 는 7.5 - 100m 범위를 갖는다.

무궁화 열차 n 대가 T 시간(단위 s)동안 통과할 때의 이격거리(d)에서의 등가소음도 Leq 는 (8)식을 개별열차 특성을 고려할 수 있는 다음 모델식으로 주어진다.

$$Leq, T = SEL_t + 10 \cdot \log(T) + C \quad (11)$$

여기에서 총 소음폭로레벨(SEL_t)과 총 보정치(C)는 다음과 같은 보정 성분들에 의해 주어진다.

$$SEL_t = 10 \log \left[\sum_{i=1}^n (10^{0.1SEL_{Ei}} + 10^{0.1SEL_{Ri}}) \right] \quad (12)$$

$$SEL_{Ei} = SEL_e + 10 \log n_e + C_o, \quad \text{where } n_e: \text{ no. of power car of } i\text{-th train} \quad (13)$$

$$SEL_{Ri} = SEL_r + 10 \log n_r + C_c, \quad \text{where } n_r: \text{ total car number of } i\text{-th train} \quad (14)$$

$$C = C_a + C_g \quad (15)$$

(2) 예측모델의 적용 및 평가

본 절에서는 장대레일 직선구간에 다음과 같은 정보를 가지는 열차가 통과했을 때 하선기준(상하선 중심간 간격 4.3m)

으로 30m 이격된 위치에서의 등가소음도를 예측하여보고 실제 측정된 결과와 비교하였다.

표 3 예측 모델 타당성 평가를 위한 소음 측정 열차 특성

열차 구분	기관 차수	통과 시간	총열량수	상하 구분	비고
1	1	5.99	9	상	<ul style="list-style-type: none"> · 장대구간 · 직선구간 · 수평구간 · 속도평균 : 118km/h · 계측시간 : 192.5 s
2	1	6.78	10	하	
3	1	5.20	8	하	
4	1	5.24	8	하	
5	1	5.90	9	하	
6	1	6.05	9	상	

그림 8에는 당해지역에서 소음 측정된 결과를 그래프로 나타내었다.

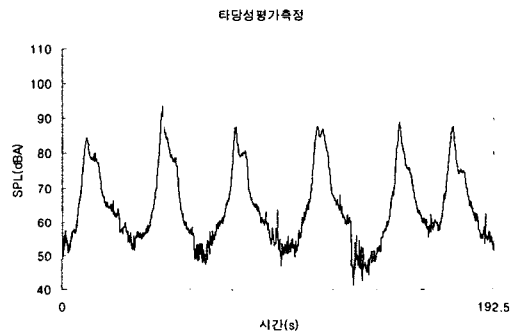


그림 8 예측식 타당성 평가를 위한 측정결과

앞에서 나타난 식 (11)-(14)을 이용하여 당해지역에 총 6대의 열차가 상하행선을 통과할 때의 등가소음도를 측정된 결과와 계산한 결과를 표 4에 나타내었다.

표 4 측정 등가소음도와 예측 등가소음도 비교

구분	실측값	예측값	오차
등가소음도 (dBA)	76.9	74.9	2.0

예측결과와 실측결과는 약 2.0dB의 오차를 보이고 있으나, 이 결과는 그림 8에서 보이는 바와 같이 당해지역을 통과하는 개별 열차마다 가지는 소음특성 편차에 기인한 오차로 판단된다. 이런 오차는 특히 디젤전기기관차의 피크소음의

큰 편차에 기인한 결과로써, 예측식의 프레임은 적절하게 구성되었다고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 무궁화열차 환경소음 예측모델을 구성하기 위하여 무궁화 열차에 대한 실제 측정 및 분석을 선로중심으로부터 이격 거리별로 수행하였다. 대상 차종인 무궁화 열차의 경우 기관음의 SEL이 전동음에 비해 매우 큰 것을 알 수 있었다.

철도소음 음원위치와 음원의 음향파위 및 방사특성을 측정 데이터에 기초한 기관소음 및 전동소음의 소음폭로레벨(Sound Exposure Level)로 규명하였으며, 기관차의 수, 객차의 수 그리고 이격거리, 열차 통과 회수를 고려하여 소음 예측을 할 수 있는 예측 모델식을 제안되었다.

예측 모델식의 타당성 평가를 위해 측정결과와 비교하였으며 약 2.0dBA의 오차를 보이고 있음을 확인하였다. 그러나 현장에 운행되는 실제 개별열차의 소음발생 특성의 편차가 매우 큰 것을 고려할 때 예측 모델식의 프레임은 적절하게 작성되었다고 판단되었으며 소음측정 DB를 확대할 경우 이러한 오차를 줄여 나갈 수 있으리라 판단된다.

후 기

본 연구는 환경부 차세대핵심연구개발사업에 의해 수행되었으며, 관계자에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) ISO 9613-1, 1993, Acoustics - Attenuation of Sound During Propagation Outdoors - Part I: Calculation of Absorption of Sound by Atmosphere, ISO, Geneva
 (2) ISO 9613-2, 1996, Attenuation of Sound During Propagation Outdoors - Part 2: General Method of Calculation, ISO, Geneva

(3) 조대승, ISO 9613 방법에 기초한 옥외 환경소음 예측
 (4) H. J. A. Van Leeuwen, 2000, Railway noise prediction models: A comparison, Journal of Sound and Vibration 231, pp. 975~987
 (5) S. Peters, 1976, The predictions of railway noise profiles, Journal of Sound and Vibration 32, pp. 97~99
 (6) D. H. Cato, 1976, Predictions of environmental noise from fast electric trains, Journal of Sound and Vibration 32, pp. 483~500
 (7) E. J. Rathe, 1977, Railway noise propagation, Journal of Sound and Vibration 51, pp. 371~388
 (8) D. Hohenwarter, 1990, Railway noise propagation models, Journal of Sound and Vibration 141, pp. 17~41
 (9) J. D. Van Der Toorn, Hendriks, and R. C. Van Der Dool, 1996, Measuring TGV source strength with SYNTACAN, Journal of Sound and Vibration 193, pp. 131~121
 (10) 加來治郎, 1996, 鐵道騒音の豫測手法の現況, 騒音制御, Vol 20, No 3, pp11-16
 (11) 石井聖光, 子安 勝 ほか, 1980, 在來線高架鐵道からの騒音豫測手法安について, 騒音制御, Vol 4, No 2
 (12) 森藤良夫 ほか, 1996, 在來鐵道騒音の豫測評價手法安について, 騒音制御, Vol 20, No 3
 (13) Verkehrs-lormschutzverordnung -16, BImSchV 1990
 (14) Calculation of railway noise(Draft for public comment), The Department of Transport, UK
 (15) M. Ringheim : The Revised Nordic Prediction Method for Railway Noise. - Some important acoustical aspects - : Proceedings of 5th International Workshop on Railway & Tracked System Noise.
 (16) C. J. M Van Ruiten, 1998, Dutch Railway Noise Prediction Schemes, Journal of Sound and Vibration, Vol. 120, No. 2
 (17) 김재철, 문경호, 2003, 철도소음의 방사특성에 관한 연구, 대한기계학회논문집 A 권, 제27권, 제4호, pp 531-536