

Research Paper

소음지도 작성 시의 Schall03에 의한 철도소음 예측결과 분석

고효인* · 장진원** · 장승호* · 홍지영*

한국철도기술연구원*, 과학기술연합대학원대학교**

Analysis of the railway noise prediction result using Schall03 in noise mapping

Hyoin Koh* · Jinwon Jang** · Seungho Jang* · Jiyoung Hong*

Korea Railroad Research Institute*, University of Science and Technology**

요약 : 철도소음지도는 환경부 고시 소음·진동관리법에 따라서 그 작성방법이 고시되어 있고, 소음지도 작성 시에 철도소음원 관련 영향인자에 대하여 적용 예측식 별 열차구분을 제시하고 있으며, 열차 특성 입력 시에 브레이크 흡음율을 “0”으로 설정할 것을 제시한다. 소음지도 작성방법이 고시된 이후 국내의 고속철도차량은 그 구조가 변경되어 가고 있고, 고시된 작성방법에서 제시되지 않은 신규 열차유형도 생겨나고 있다. 따라서 현재의 시점에서 국외의 철도소음 예측식을 활용하여 고시된 소음지도 작성방법에 의하여 철도소음을 예측하는 경우 열차의 유형과 관련된 입력인자에 따른 예측결과를 검토할 필요가 있다. 본 논문에서는 철도소음을 예측할 시에 국내에서 통상적으로 가장 빈번히 사용되는 Schall03을 활용하여 철도소음을 예측하였으며, 열차의 유형 선택, 열차의 특성 중 디스크브레이크 사용을 입력, 레일의 이음매 여부에 의한 예측결과에의 영향을 파악하고자 하였다. 2013년 이후 추가된 신규 국내의 열차에 대하여 대응하는 국외 열차의 유형을 검토하였고, 디스크브레이크사용을 설정은 실측값과 예측값의 차이에 적지 않은 비중을 차지함을 파악할 수 있었으며, 이뿐 아니라, 레일표면의 조도(roughness)레벨 수준도 함께 고찰하고자 하였다. 또한 레일의 이음매가 존재하는 구간에 대하여 예측 시에 이를 고려하지 않았을 경우 예의 실측값과의 차이에 대한 분석을 수행하였다.

주요어 : 철도소음, 소음예측, Schall03

Abstract : The guideline for railway noise mapping is notified in the administration law for noise/vibration which is announced by the ministry of environment, Korea. Here input parameters for the railway sound sources are proposed for each prediction models. In case of the application of

First Author, Corresponding Author : Hyoin Koh, Transportation Environmental Research Team, Green Transport & Logistics Institute, 16105, Korea, Tel:+82-31-460-5207, E-mail: hikoh@krii.re.kr

Co-Authors: Jinwon Jang, Railway System Engineering, University of Science and Technology, 34113, Korea, Tel:+82-31-460-5207, E-mail: rpdfffj@naver.com

Seungho Jang, Transportation Environmental Research Team, Green Transport & Logistics Institute, 16105, Korea, Tel:+82-31-460-5207, E-mail: shjang@krii.re.kr

Jiyoung Hong, Transportation Environmental Research Team, Green Transport & Logistics Institute, 16105, Korea, Tel:+82-31-460-5207, E-mail: hongjy@krii.re.kr

Received: 14 March, 2016. Revised: 27 May, 2016. Accepted: 7 June, 2016.

the vehicle characteristics it is suggested to choose “0(%)” for the disc brake parameter. However new trains have been in revenue service since the announcement of the guideline, an investigation of the effect of the input parameters of the foreign railway prediction models on the prediction results of Korean railway systems are needed. In this paper the sound prediction results are analyzed with a focus on the input parameters such as disc brake percentage, rail roughness, rail joints. Schall03 is used for the railway noise prediction which has been using most frequently in Korea. The results are shown and discussed.

Keywords : railway noise, noise prediction, Schall03

I. 서론

생활 가운데서 지속적으로 발생하는 환경소음으로 교통소음이 있으며, 교통소음은 도로소음과 철도소음으로 나눌 수 있다. 도로와 철도소음으로 인해 지속적으로 발생하는 소음원으로부터 피해를 줄이기 위해 방음벽이 설치되었으나, 소음원의 종류와 설치된 방음벽의 높이에 따라 아파트의 수음점 높이별로 영향이 다르다. 특히 철도 선로 인근에 위치한 고층 아파트의 경우 방음벽이 설치되어 있음에도 불구하고 6층 이상으로는 소음에 많이 노출되는 것으로 나타난다(Yoo 2012). 국외에는 다양한 종류의 소음지도 프로그램과 예측식이 개발되어 있으며, 이들 프로그램에서 다양한 국가의 예측식을 포함하고 있어 국가별로 권장하는 식을 선택하여 사용하여 각 나라의 실정에 맞는 소음지도 제작이 가능하도록 되어있다. 철도 소음지도 작성을 위해서 국내에서는 소음지도 작성 프로그램으로 SoundPLAN 또는 CadnaA를 주로 사용하고 있다. 철도소음 예측식으로는 독일의 Schall03 등 국외의 철도소음 예측모델이 주로 사용되고 있다. 스위스의 경우 2010년에 발표된 철도소음 예측모델 sonRAIL을 활용하고 있으며, 주행표면의 조도(roughness), 궤도감쇠율(Track Decay rate), 교통량, 운행속도를 주요 입력파라미터로 구성한다. 열차의 경우 제동시스템 유형에 연동된 차륜의 표면 조도, 차량관련 전달함수, 보조기기등에 의한 음원이 주요 설정 요소이며, 궤도의 경우 궤도유형, 레일의 조도스펙트럼, 속도, 분기기 등과 같이 특수구조에 의한 보정항등을 주요 구성요소로 한다(C.Czolbe et al, 2013). 독일 철도소음의 예측모델인 Schall03도

2012 버전에서는 더욱 세분화된 열차유형에 해당하는 음원 데이터와 레일의 음향조도, 다양한 영향요소를 속도설정에 감안하여 정의하는 등의 1990 버전과는 상이한 음원 및 계산 체계를 갖추었다.

그간 국내의 철도소음 예측모델에 대한 연구는 지속적으로 진행되어 왔고(Cho et al, 2007; Cho & Koh 2010), 한국철도시설공단의 용역과제로 한국철도기술연구원에서 개발된 국내 철도소음예측모델인 KR-Noise(Jang et al, 2013)(Korea Railway 2013)를 적용한 철도소음지도 모듈 개발이 2016년도에 완료될 예정으로 현재 검증 단계에 있다.

현재 소음 발생지역의 예측과 효과적인 방음대책 수립을 위해 국내에서도 소음지도의 작성이 이루어지고 있으며, 소음지도의 작성 시 환경부 고시 ‘소음지도의 작성방법’을 준용하여 작성되어지고 있다. ‘소음지도의 작성방법’에서 정하고 있는 대상소음원은 도로소음과 철도소음이며, 도로소음과 철도소음이 복합적으로 영향을 끼치는 지역에 대해서는 각각의 소음지도와 통합소음지도를 함께 작성하도록 되어있다(Ministry of Environment Notification 2013). 위와 같이 소음지도를 작성하기 위해 먼저 소음원에 따라 각각의 소음지도 작성이 필요하다. 도로소음에 관한 소음지도 작성은 국내외로 많은 연구가 이루어져 있으나, 이에 비하여 철도소음에 대한 소음지도 작성 연구는 그만큼 활발히 이루어지지 않았다. 소음지도를 활용하여 개발사업 지역에 대한 환경영향평가를 수행하고, 저감대책을 수립하는 데에 있어서 다수의 측정지점으로부터의 소음측정자료를 통한 정확성 검증이 필요하다(Sun et al, 2009). 고속전철 주변 지역의 공간 활용계획을 위한 소음지도 작성에 관

한 연구가 있으며(Lee & Choi 2011), 국외의 소음지도 프로그램 활용 시에 철도차량 분류기준에 따른 소음지도 결과를 비교(Lim et al. 2011) 및 입력변수의 영향을 분석한 연구가 있다(Lee et al. 2013).

환경부고시 ‘소음지도의 작성방법’에 따라 철도소음지도 작성 시 철도 소음원 관련 영향인자의 대부분은 국립환경과학원 연구 자료를 통해 알 수 있고(National Institute of Environmental Research 2008, 2009), 작성방법 중 브레이크흡음율(국외 원문에서는 ‘디스크브레이크 사용율’로 명시)을 “0”으로 설정하는 지침 내용과 적용 예측식 별 국외열차에 해당하는 국내의 열차유형을 대응시키는 사항 등은 그간의 국내의 철도차량 및 철도소음에 대한 연구진행 결과 사안을 고려하여 재검토하고 보다 더 개선된 대안을 모색할 필요가 있다.

본 논문에서는 철도소음지도를 작성하는 경우 통상적으로 활용되는 국외의 철도소음 예측모델인 Schall03을 이용하였고, 환경부 고시 ‘소음지도의 작성방법’에 제시되어 있지 않은 신규 운행열차 유형, 디스크브레이크 사용율 설정, 레일의 이음매에 따른 철도소음 예측 결과를 분석하였다.

II. 소음지도 작성개요

철도소음지도는 도심지 수도권 북복선의 일반철도 구간과 고속철도 노선에 대하여 소음지도를 작성하였다. 선로가 도시지를 통과하는 수도권 구간은 선로변에 근접하여 고층아파트가 위치해 있고 방음벽이 설치되어 있는 자갈도상궤도 구간이며, 아파트 지점에서의 측정값과 예측값을 이용하였다. 아파트 건물 외벽으로부터 약 1m 이격된 지점에서 측정된 소음레벨과 비교하였다. 고속선의 경우 콘크리트 슬라브도상 선로구간으로써 주변에 가옥이나 건물이 없는 개활지 구간에서 열차의 통과소음을 측정하였다. 고속선의 경우 ISO 3095(2005, 2013) 를 준용하여 선로의 중심으로부터 25m 이격되고, 레일의 상단으로부터 1.2m, 3.5m 의 높이에서 측정한 소음레벨이 예측값과의 비교에 활용되었고, 동일 지점에서의 소음레벨값을 예측하였다.

철도소음 예측을 위해서는 환경부에서 고시한 소음지도 작성방법(제2013-75호)에 포함된 철도소음 예측식 중 Schall03(1990) 예측식을 대상으로 하였다. 소음지도 작성 시 사용한 프로그램은 SoundPLAN社 의 SoundPLAN(ver.7.4)를 이용하였다. 소음지도 작성 시 측정 데이터와의 비교를 위해 측정조건에 준하여 소음지도를 작성하였다. 정확한 소음지도 작성을 위해 지형정보는 국토지리정보원에서 제공하는 1:1000 비율의 디지털 수치지도를 이용하였으며, 철도소음 인자의 경우 철도 레이어를 이용하여 운행선로에 맞게 선로별 입력인자들(교통량, 속도, 차종, 궤도 등)을 입력하였다. 방음벽의 경우 수치지도에 표현되어있지 않으므로 철도운영기관에서 제공받은 자료를 이용하여 작성하였으며, 적용된 방음벽은 모두 흡음형 방음벽으로 흡음형 방음판 73종의 평균 흡음률을 Table 1과 같이 1/3-옥타브 밴드 주파수 대역으로 입력하였다. 도심지선로의 경우 주요 지점인 선로인근 고층아파트와 측정지점에 영향을 줄 수 있는 건물에 대하여 실제와 동일한 높이로 입력하였으며, 그 이외의 건물에 대하여서는 ‘소음지도의 작성방법’을 준용하여 단독주택은 2.8m×층수, 공동주택은 2.7m×층수, 상가는 3.6m×층수로 하여 높이를 산정하였다.

철도 소음원을 제외한 주변 소음원의 영향을 적게 받으며, 철도소음으로 인한 피해가 예상되는 철도 선로의 좌우로 인접한 고층아파트 두 지점의 데이터를 활용하였다. 건물의 경우 건물의 높이와 층수를 아는

Table 1. Average absorption coefficient of sound absorbing noise barrier

Frequency(f)	Absorption rate	Frequency(f)	Absorption rate
63	0.01	630	0.91
80	0.01	800	0.84
100	0.23	1000	0.77
125	0.31	1250	0.69
160	0.51	1600	0.66
200	0.68	2000	0.63
250	0.86	2500	0.60
315	0.92	3150	0.56
400	0.99	4000	0.52
500	0.96	5000	0.47

경우 실제와 동일하게 입력해 주었고, 높이정보가 없는 건물에 대하여 ‘소음지도 작성방법’에 명시된 대로 입력해 주었다. 실측지와와의 정확한 비교를 위해 수음점의 위치는 실측지점과 동일한 위치에 생성하였다. 실측지와와의 정확한 비교를 위해 수음점의 위치는 실측지점과 동일한 위치에 생성하였다.

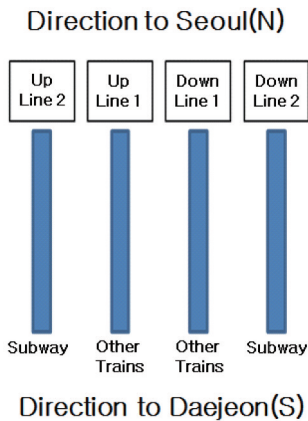


Figure 1. Track arrangement and related train types

복복선 구간은 서울방면이 북쪽 방향으로, 좌측 두 선로가 상선, 우측 두 선로가 하선으로 되어있고, 가운데 두 선로인 경부선은 KTX, KTX-산천, ITX-새마을, 누리로, 새마을, 무궁화, 화물열차 차량이 운행하는 선로이다. 건물에 대한 반사 영향을 고려하여 건물 외벽으로부터 약 1m 이격된 지점에서 측정되었으며, 선로와 측정지점에 대한 단면도는 Figure 2와 같다.

환경부고시 ‘소음·진동 공정시험기준’을 준용하여 측정 및 분석한 소음데이터에서 Figure 3에서 볼 수 있듯이 같이 대상소음 측정 시 소음레벨과 배경소음과의 차이가 10dB 이상으로 나타났다. 열차의 소음은 아파트 지점에서 전일 측정하였고, 전일 측정 결과 중에 주간과 야간에 1시간 등가 소음도가 가장 높은 한시간 동안의 데이터를 분석하였다. 측정에 이용한 기기는 B&K 3655 시스템으로 시스템안에는 B&K 2250 및 2270 분석기가 탑재되어 있다. 열차

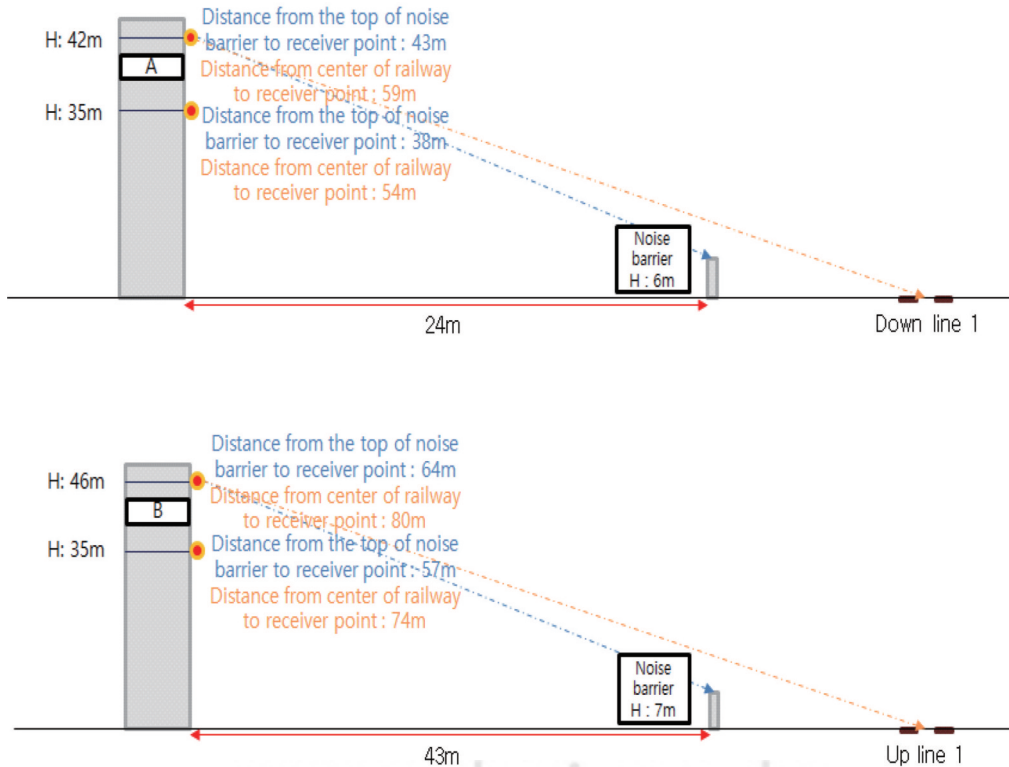


Figure 2. Sound measurement positions near a general railway line

의 속도는 캄코더를 설치하여 열차통과 현황을 녹화하여 사후 이를 근거로 속도를 산출하였다. A 구간의 경우 측정 및 분석한 주간시간대 1시간동안 70대의 열차가 통과하였고, 열차의 운행속도는 열차별로 상이하지만 45m/h에서 114km/h의 범위 내이다. B 구간의 경우 측정 및 분석 시간대에 30대의 열차가 통과하였고, 열차의 운행속도는 62km/h에서 138km/h의 범위이다. 철도 소음원 입력인자는 Table 2로 알 수 있으며, 궤도조건은 자갈도상, 콘크리트침목을 적용해 하였고, 방음벽의 경우 선로로부터의 이격거리와 높이를 모두 확인하여 측정상황과 동일하게 적용하였다.

Grid Noise Map의 경우 환경부고시 ‘소음지도의 작성방법’에 따라 격자의 크기 10×10m, 높이 1.5m를 적용하였으며, 측정데이터와의 정확한 비교를 위해 동일한 지점인 아파트 외벽에서 1m 이격하여 Single Point receivers를 생성하여 결과를 도출하였다.

소음지도 작성을 위하여 활용된 Schall03(1990)에서는 철도차량의 주간 또는 야간의 평균 소음레벨을 산출하여 철도차량의 종류, 대기의 음의 흡수, 음의 전파높이 등을 고려한 보정을 하여 철도소음을 예측한다.

$$L_{m,E} = 10 \log \left[\sum_i 10^{(0.1 \times (51 + D_{Fi} + D_D + D_i + D_V) + D_{Fb} + D_{Br} + D_{Bu} + D_{Ra})} \right] \quad \text{식(1)}$$

- $L_{m,E}$: 소음방출도
- D_{Fi} : 철도차량 종류에 대한 보정치
- D_D : 브레이크 종류에 대한 보정치
- D_i : 철도차량 길이에 대한 보정치
- D_V : 철도차량 속력에 대한 보정치
- D_{Fb} : 궤도에 대한 보정치
- D_{Br} : 교량에 대한 보정치
- D_{Bu} : 건널목에 대한 보정치
- D_{Ra} : 곡선반경에 대한 보정치

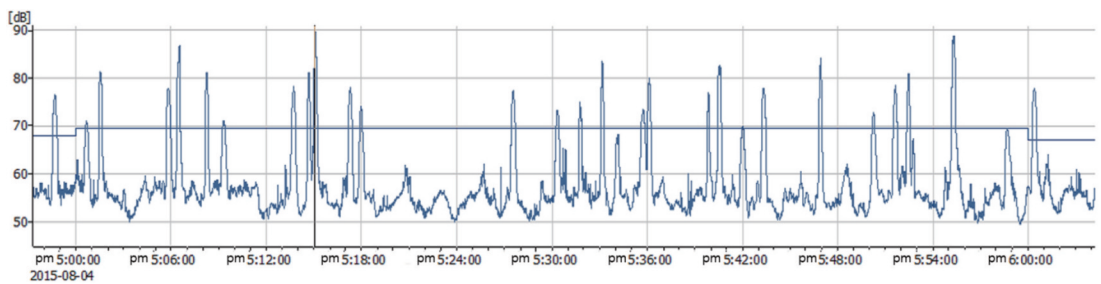
차량 종류에 대한 보정치 D_{Fi} 로는 Table 2와 같은 보정값이 적용된다. 또한 브레이크 유형에 대한 보정치 D_D 는

$$D_D = 10 \log(5 - 0.04 \cdot p) \quad \text{식(2)}$$

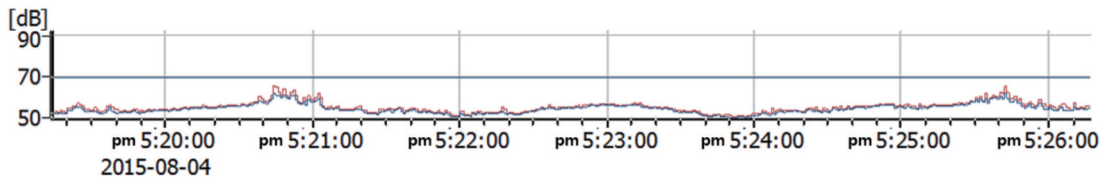
에 의하여 산출한다. 여기서 p 는 Table 3에서와 같이 차량 전체 길이에 대하여 디스크브레이크로 구성된 차량의 퍼센트(%)을 의미한다. 차량 길이에 대한 보정치 D_i 는

$$D_i = 10 \log(0.01 \times L) \quad \text{식(3)}$$

에 의하여 구하며, 여기서 L 은 철도차량의 길이(m)



(a) Train pass-by level



(b) Sound pressure level without train pass-by

Figure 3. Background sound level and Train pass-by sound level measured at the sound measurement position

Table 2. Effect of Type of vehicles(Schall03, 1990)

No.	Type of Vehicle	D_{Fz}
1	Vehicle with permissible speeds $v > 100\text{km/h}$ using wheel absorbers(Series 401)	-4
2	Vehicles with wheel disc brakes(Series 403, 420, 472)	-2
3	Subway	2
4	Street Railway	3
5	All remaining types of vehicles	0

Table 3. Guiding values for portions of cars using disk brakes(Schall03, 1990)

Type of train	Portion of cars using disk brake
Fast/Long distance express train	100%
Local/Short distance express train	30%
Freight train	0%
All remaining types of train	100%

이다.

속도에 대한 보정치 D_V 는

$$D_V = 20 \log(0.01 \times V) \quad \text{식(4)}$$

이고, V 는 열차의 운행속도(km/h) 이다.

그 밖에 건물목에 대한 보정치로써 D_{Bu} 가 있고, 이는 5dB(A) 로 대입하여 적용한다. 교량 및 곡선반경 관련 보정치 D_{br} 및 D_{ra} 로는 각각 3dB, 곡선반경 300m ~500m 범위에 따라서 3dB~8dB 값을 대입한다.

II. 철도소음 예측 결과 분석

1. 신규 차량 유형 선정

소음지도 작성에 활용된 열차 입력정보는 Table 5에 나타내었다. 여기에서 운행속도는 이 구간을 통과하는 열차의 실제 운행속도를 기반으로 선정되었다.

‘소음지도 작성 방법’에 제시되어 있지 않은 ITX-새마을과 누리로 열차는 그 구성과 특징에 따라서 S-Bahn(Triebzug)을 대응하여 선정하였다. 복복선 도심지 구간 주변의 소음지도 결과를 Figure 4에 나타내었다. ‘소음지도 작성 방법’에서 제안된 바와 같이 디스크브레이크 퍼센테이지는 0으로 설정하였고, A, B 두 개의 고층아파트에서의 두 위치에 대한 예측값과 측정값 현황을 예로 Table 4에 나타내었다. 주간(6:00-22:00) 중 한 시간 등가소음도 $L_{Aeq,1h}$ 를 산출한 값으로 디스크브레이크 퍼센테이지를 0으로 설정하였을 경우 고층의 해당 위치에서 약 6dB(A)에서 7dB(A) 정도의 실측값과의 차이를 나타냄을 볼 수 있다. 대상구간은 주간에 비하여 야간시간 동안의 열차 통행량은 적지만, 빈번하게 열차가 운행하는 구간으로 작성된 소음지도의 현황을 볼 때에 한 시간 등가소음도는 큰 차이가 나지 않았고, 해당 거리 및 높이에서 주간, 야간 모두 소음한도인 70dB(A)의 수준이었고, 야간시간대의 소음한도는 60dB(A)이므로 야간소음한도는 초과하는 것을 볼 수 있다.

2. 디스크브레이크 구성 차량 퍼센트 설정에 의한 소음예측 결과 분석

환경부 고시 ‘소음지도의 작성 방법’에서는 디스크브레이크 구성 차량 퍼센트를 “0”으로 설정하도록 제

Table 4. Predicted and measured sound pressure levels along a general railway line(Result of daytime 1hour equivalent sound level $L_{Aeq,1h}$)

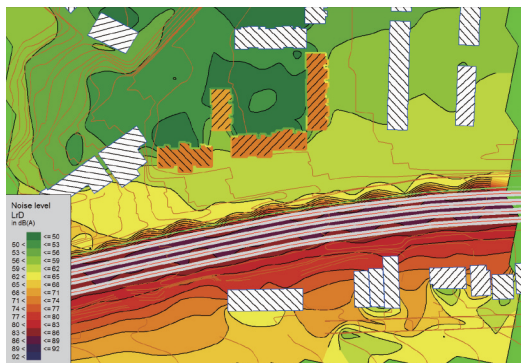
		Height(m)	Measured(dB(A))	Predicted(dB(A))	Predicted-Measured(dB(A))
Quadruple track in the downtown	Section A	35	70.3	76.4	6.1
		42	70.1	76.1	6.0
	Section B	35	69.5	76.0	6.6
		46	68.6	76.0	7.4

Table 5. Input parameters for train types

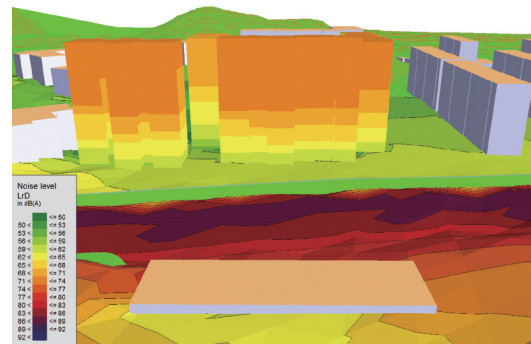
Track	Type of train in korea	Type of Train in Schall03-1990	Traffic(Day / Night)	Speed(km/h)	length(m)
Up line2	Subway	U-bahn	152/48	75	195
	KTX	ICE	8/8	120	188
Up line 1	Mugunghwa train	Nahverkehrszug(1988)	40/16	110	185
	Saemaul train	Nahverkehrszug(2000)	0/0	120	185
	ITX-Saemaul	S-Bahn(Triebzug)	8/8	120	120
	Freight train	Guterzug(Nahv)	0/8	70	357
	Nuriro tarin	S-Bahn(Triebzug)	8/0	80	94
Down line 1	KTX	ICE	8/0	120	388
	Mugunghwa train	Nahverkehrszug(1988)	56/24	110	185
	Saemaul train	Nahverkehrszug(2000)	24/0	120	185
	ITX-Saemaul	S-Bahn(Triebzug)	16/0	120	120
	Freight train	Guterzug(Nahv)	16/0	70	357
Down line 2	Subway	U-bahn	128/48	75	195

시되어 있다. '소음지도의 작성 방법'에는 '브레이크 흡음율'로 표기되어 있다. 본 절에서는 디스크브레이크 사용 차량구성의 설정에 따른 철도소음 예측값

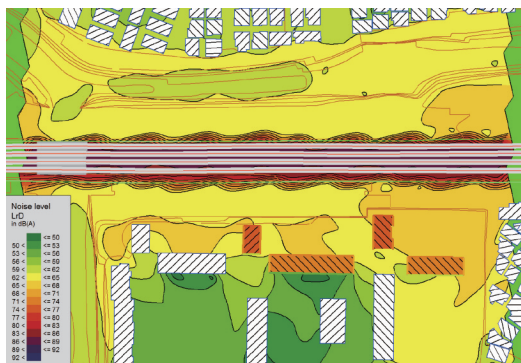
($L_{Aeq,1h}$)과 실측값의 차이를 분석하고자 하였다. 디스크브레이크 사용 차량구성 퍼센트를 "0"으로 설정하는 경우, Schall03에서 제시된, 국내 차량에 대응하



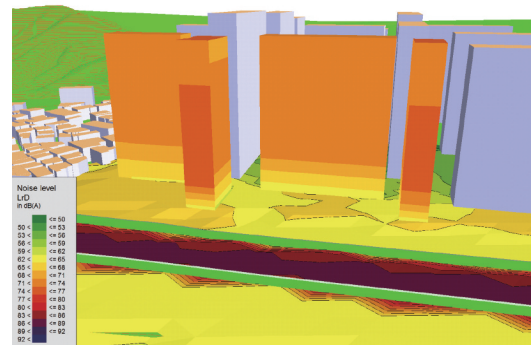
(a) A Area, General line Grid & Facade Noise Map day(2D)



(b) A Area, General line Grid & Facade Noise Map day(3D)

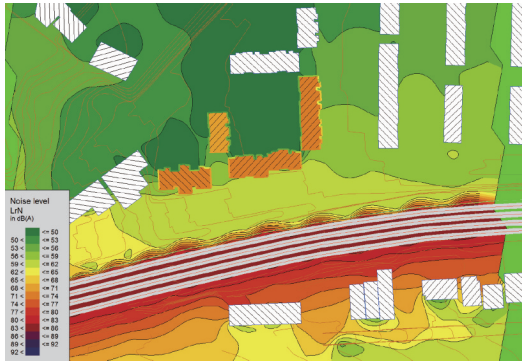


(c) B Area, General line Grid & Facade Noise Map day(2D)

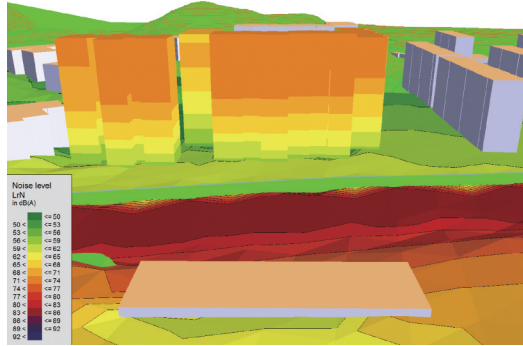


(d) B Area, General line Grid & Facade Noise Map day(3D)

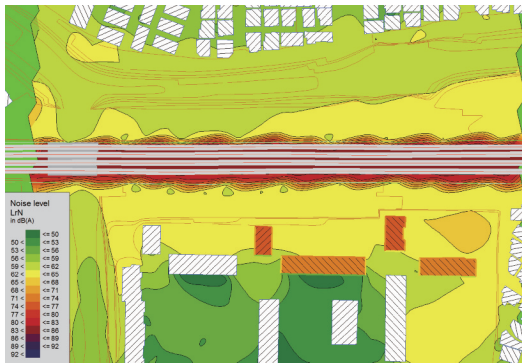
Figure 4. Railway noise map of two sample sections in a General railway line



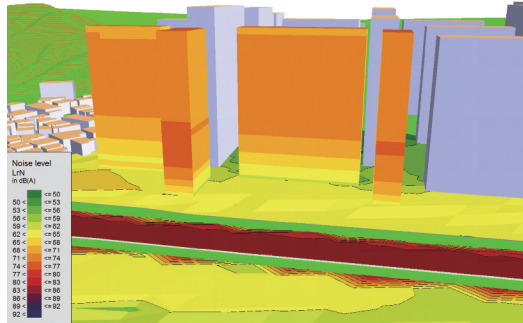
(e) A Area, General line Grid & Facade Noise Map night(2D)



(f) A Area, General line Grid & Facade Noise Map night(3D)



(g) B Area, General line Grid & Facade Noise Map night(2D)



(h) B Area, General line Grid & Facade Noise Map night(3D)

Figure 4. Continued

Table 6. Portion of cars using disc brakes(Schall03)

Type of Train	Portion of cars using disc brakes(%)
ICE	100
Nahverkehrszug(2000)	30
Nahverkehrszug(1988)	20
S-Bahn(Triebzug)	100
Güterzug(Nahv)	0
U-bahn	100

Table 7. Portion of cars using disc brakes in Korea trains

Type of Train	Portion of cars using disc brakes(%)
KTX	70
KTX-Sancheon	54
Saemaul train	87
Mugunghwa train	89
ITX-Saemaul	100
Nuriro tarin	100
Freight train	0
Subway	100

는 해외열차유형 별 디스크브레이크 사용 차량구성 퍼센트를 입력하는 경우(Table 6) 그리고 국내 차량 별 실제의 디스크브레이크 사용 차량구성 퍼센트를 입력하는 경우(Table 7)의 입력변수 설정방법에 따른 예측결과를 비교하였다. 입력인자는 Table 6, 7에 나타내었다.

통과하는 열차들의 디스크브레이크 사용 차량구성율의 입력설정에 따른 Table 4에서 제시한 각 측정 지점에서의 실측값과 Schall03을 이용한 예측값의 차이를 Figure 5, 6에 나타내었다. 일반노선의 경우 디스크브레이크 사용 차량 구성율을 모두 “0”으로 설정하는 경우 실제의 측정값보다 약 6dB~7dB 더 높게 예측됨을 볼 수 있다. 한편 국내의 각 해당열차의 실제의 디스크브레이크 사용 차량구성율을 입력한 경우에는 약 2dB미만의 오차를 보였으며, Schall03에서 제시하는 각 열차유형에 따른 값을 활용하여 소음레벨을 예측한 경우에는 해당위치에서의 측정값보

다 약 3dB~4dB 더 높게 예측되었다. 이 구간의 경우 실제 운행한 열차의 디스크브레이크 사용 차량의 구성율을 고려하여 입력하는 경우 좀 더 실측값과 예측값이 유사해짐을 볼 수 있었다.

고속선의 경우에도 국내 차량들에 대한 실제의 디스크브레이크 사용 차량 구성율을 입력하였을 경우에 2dB 미만으로 예측값과 실측값과의 오차가 가장 적었다. 다만 고속선의 경우 예측값이 실측값보다 더 낮게 산출되었다. 0%로 입력하는 경우 2dB~3dB 가량 실측값보다 더 높은 소음레벨이 예측되었으며, Schall03에서 제시하는 차량유형 별 디스크브레이크 사용 차량 구성율을 각각 적용한 경우에는 3dB~5dB의 범위로 실측값보다 더 낮은 예측값이 도출되었다.

1) 디스크브레이크 사용율 적용의 의미

앞의 식(2)에서 소개한 바 있듯이 독일의 철도소음 예측모델 Schall03(1990)에서는 차륜에 직접 마찰이 가해지는 답면제동이 아닌 윤축에 제동용 디스크들로 구성된 디스크브레이크를 사용하는 열차의 유형에 대하여 소음을 예측하는 경우에 별도로 보정치를 감하도록 제시되어 있다. 이는 제동방식으로 인하여 차륜의 표면 상태가 변화하여 음향주파수에 상응

되는 파장대역의 표면 조도(roughness) 생성으로 인하여 차륜 표면의 불균일성이 발생하기 때문이다. 이는 차륜이 레일의 표면과 접촉하며 주행할 시에 들리는 소음의 방사에 주요한 원인이 된다. 식(2)에 따르면 디스크브레이크 사용율이 0인 경우에 D_b 는 7dB가 되어 가산하게 되고, 100% 모두 디스크브레이크로 사용하는 경우에는 D_b 가 0이 되어 전혀 보정치를 가산하지 않는다. 이는 독일에서 한 때 많이 사용되었던 주철재료 답면 제동 사용 차량의 경우 차륜과 레일의 상대적 가진을 더 야기하는 것에 기인한다(Lewis & Olfsson 2009). 이는 차륜과 레일 사이의 접촉주행표면에서 더 높은 동적 접촉력을 야기하고, 더 높은 진동과 소음방사를 초래한다. 200Hz에서 2kHz 사이에서 답면제동 사용 차륜과 디스크브레이크 사용 차륜을 비교할 시에 차륜-레일 결합 조도(roughness)가 9dB 정도 차이가 났다.

EN 15610:2009에 의하면 400Hz와 2000Hz의 영역에서는 차륜의 표면조도레벨이 레일의 표면조도레벨보다 더 높더라도 레일진동으로 인한 소음의 기여도가 소음방사에 있어서 더 높음을 제시하고 있다. 이렇듯, 제동역학에 기인하는 차륜의 표면 조도는 차륜의 소음 방사 뿐만 아니라, 레일로 인한 소음방사

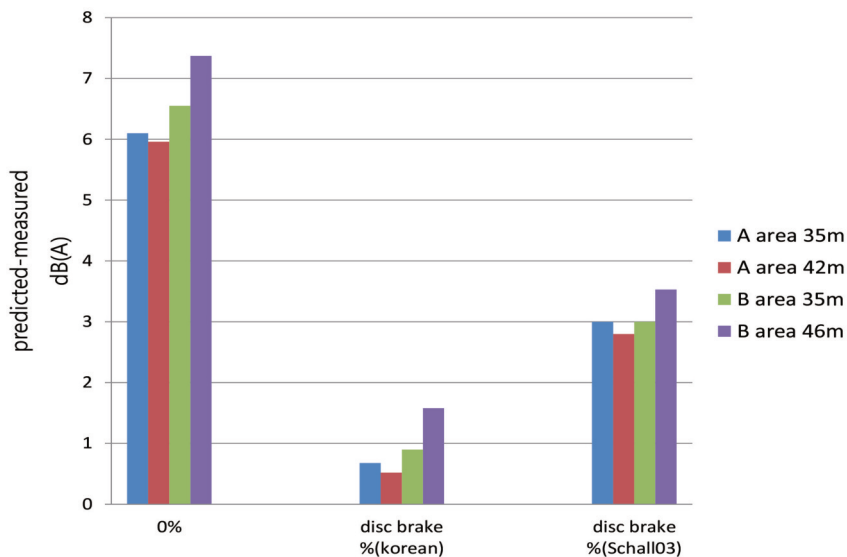


Figure 5. Differences between measured and predicted sound level values($L_{Aeq,1h}$) at four locations according to the percentage of vehicles using disc brakes, General railway line

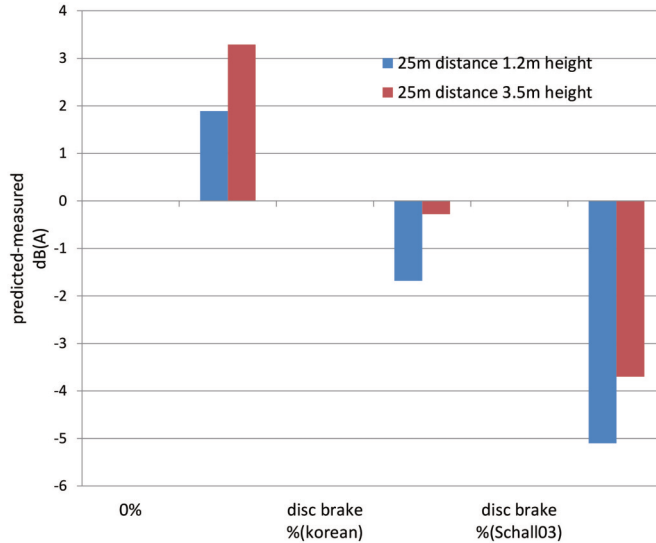


Figure 6. Differences between measured and predicted sound level values(L_{Aeq,1h}) at two positions according to the percentage of vehicles using disc brakes, high-speed line

에도 영향을 미치고, 차륜과 레일이 결국 접촉하여 주행하는 것이므로, 열차가 지나가는 레일의 표면조도 레벨 역시 소음방사에 그에 못지 않은 원인이 된다. 따라서 유사한 차륜상태의 혹은 동일한 열차가 유사한 속도로 통과하더라도 그 지점의 레일의 표면조도에 따라서도 방사되는 소음레벨의 차이가 나타날 수 있다.

2) 차륜-레일 주행 표면의 조도(roughness)

철도차량이 레일 위를 주행하는 경우 방사되는 전동소음(rolling noise)은 차륜과 레일의 표면 거칠기(surface roughness)에 의해 발생하는 가진력으로 차륜과 레일이 진동하면서 발생된다. 여기에서 소음 발생과 관련한 파장 범위의 조도를 음향 조도(acoustic roughness)라고 한다. 레일의 음향조도는 EN 15610:2009에 의하여 그 측정절차가 제시되어 있고, 범위에 설치된 가속도계로 레일 면 요철을 접촉 방식으로 스캔하여 가속도 신호를 두 번 적분하여 레일의 조도 변위를 구하며, 그 결과는 1/3 -옥타브 밴드 파장별 조도 스펙트럼으로 표기한다.

$$L_r = 10 \times \log_{10} \frac{r^2 RMS}{r_0^2} \quad \text{식(5)}$$

여기서 L_r: 음향 조도 레벨(단위: dB),

r_{RMS}: 조도 크기에 대한 제곱의 평균에 대한 제곱근 (root mean square roughness)(단위: μm),
r₀: 기준 조도 크기(reference roughness)로서 r₀ = 1μm, 이다.

음향 조도 스펙트럼 $\tilde{r}(\lambda)$ 은 파장 λ의 함수로 표현한 음향 조도의 크기를 의미한다. 전동소음이 주요한 주파수 대역은 일반적으로 500Hz ~ 4kHz이다. 열차의 속도가 증가할수록 주요한 음향조도의 파장도 길어진다. Figure 8은 일반철도 복복선궤도 및 고속선 궤도의 레일에 대하여 조도를 측정할 결과의 예이다. 아래 Figure 8의 측정결과에 붉은색 박스표기는 해당 열차 운행속도에서 전동소음에 주요한 음향조도의 파장 대역을 표시한다. 또한 측정값 이외의 두 실선은 각각 ISO 3095:2005 및 유럽의 TSI(Technical specifications for interoperability)의 기준선(또는 ISO 3095:2013)에서 제시하는 대한 기준한도 값을 의미한다. 일반선 복복선 구간의 경우(Figure 8(a)), 소음방사 관련 관심대상 파장영역에서 음향조도 레벨은 국제적인 기준값 이하로 한도값을 만족하거나, 상회하는 대역이 존재한다. 무궁화 열차 등 일반객차 철도 운행 궤도는 양호한 상태를 나타내었고, 전철이 주로 빈번하게 운행하는 궤도의 경우 비교적 속도가



Figure 7. Rail roughness measurement system

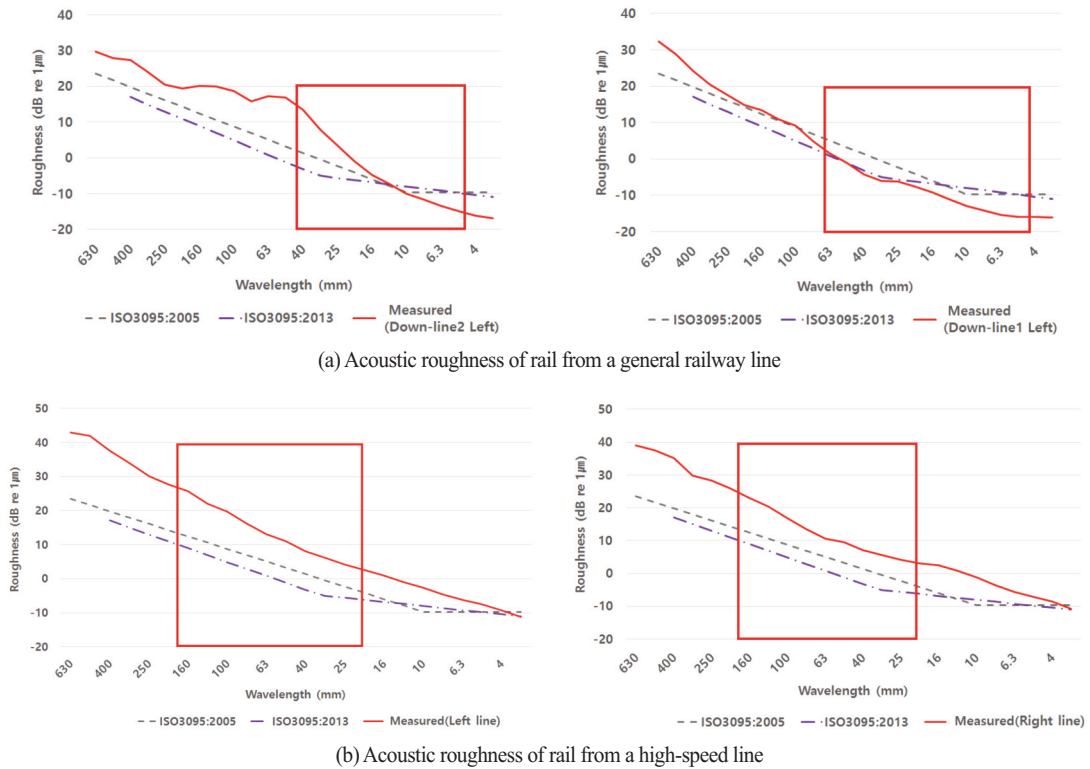


Figure 8. Measured rail roughness level(dB)(Koh HI et al. 2013)

높은 경우에 해당하는 파장의 경우 국제 기준선을 상회한다. Figure 8(b)에서 나타내는 고속선에서 측정된 레일의 음향조도 레벨의 경우, 해당 운행속도 관련 소음을 유발하는 음향조도의 전 파장 대역에서 음향조도의 레벨이 국제 기준선을 초과하는 것을 볼 수 있다. 레일의 표면상태가 좋지 않음을 나타내며, 이

로 인한 레일의 진동기인 소음의 기여도가 클 수 있음을 추정할 수 있다.

Figure 5의 경우 레일 표면의 음향조도 레벨이 국제 기준값보다 높은 상태이고, 이는 차륜과 레일 접촉에 의한 전동소음을 유발하는 데에 더 기여를 한다는 의미이다. 이 경우에는 디스크브레이크 구성 차량

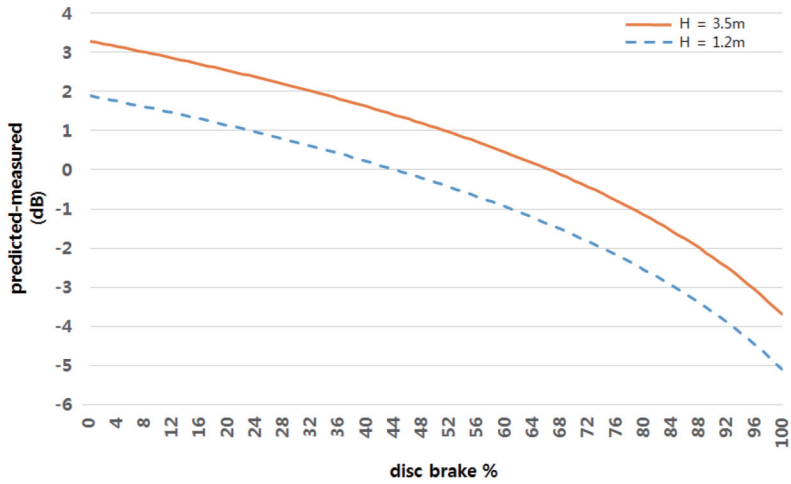


Figure 9. Change in predicted sound levels according to the brake coefficient p(%)(Measuring height=1.2m above head of the rail ;dashed line, Measuring height=3.5m above head of the rail;solid line)

비율을 0%로 입력한 경우에만 예측값이 실측값보다 더 높게 나타났고, 실제 국내 열차에 해당하는 비율을 적용하거나, Schall03에서 제시하는 값을 적용한 경우에는 예측값이 실측값보다 낮게 산출되었다.

디스크브레이크로 구성된 차량의 비율이 높아서 차륜의 표면조도 상태가 양호한 차륜이 많을수록, 또한 레일의 표면조도 상태가 양호하면 전동소음 방사는 긍정적인 영향을 미친다. 반면 디스크브레이크로 구성된 차량의 비율이 낮을수록, 또한 레일의 표면조도 레벨이 높을수록 전동소음 방사는 증가하여 소음레벨이 증가한다. 레일의 음향조도레벨이 국제 기준치보다 높게 나타난 고속선에 해당하는 Figure 6의 경우, 한 예로 Schall03 에서 제시하는 디스크브레이크 사용율에 따른 보정치(식(2) 참조)를 조정하여 예측값을 산출 해 보았다. 이를 통해 Figure 9 과 같은 예측결과를 얻는다. 보정치 p를 44로 적용하는 경우 레일상단 위 1.2m 높이에서 예측값과 실측값과의 오차가 0이 되고, 레일상단 위 3.5m 높이에서는 p의 값이 65로 입력되는 경우 예측값과 실측값이 동일해진다.

3. 레일이음부 구간의 소음예측

Figure 10에는 레일의 이음부가 존재하는 구간에 대한 소음예측 및 실측값의 차이를 나타내었다.

레일에 이음매가 존재하는 경우 이에 대한 보정치를 적용하지 않으면 디스크브레이크 사용 차량 구성 비율을 “0”으로 설정하든 실제 국내의 디스크브레이크 구성비율을 적용하든 모두 실측값보다 낮게 예측

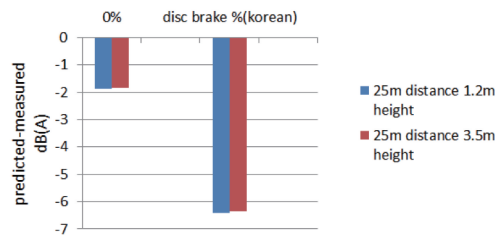


Figure 10. Differences between measured and predicted sound level values(L_{Aeq,1h}) at two positions according to the percentage of vehicles using disc brakes, a high speed line section including rail joints

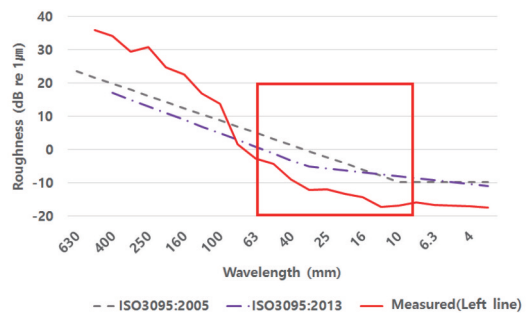


Figure 11. Measured rail roughness, a high speed line section including joints

이 되었다. Schall03(1990)의 경우 건널목에 대한 보정치 $D_{Bu} = 5dB(A)$ 는 제시를 하고 있고, CRN의 경우 레일 이음 부에서 2.5dB의 보정치를 적용하도록 되어 있다. Figure 10, 11의 고속선 선로의 경우 레일의 음향조도는 국제 기준보다 낮은 상당히 양호한 수준으로 측정되었고, 실제 운행하는 열차들의 디스크브레이크 사용 차량 구성율을 그대로 적용하고, 별도로 레일의 이음부 영향에 따른 보정치를 적용하지 않으면 6dB 이상 더 낮은 값이 예측됨을 볼 수 있다.

III. 요약

환경부 고시 소음지도 작성 방법(제2013-75호)에 의하여 철도소음을 Schall03(1990) 예측모델로 예측할 시에 브레이크흡음률을 “0”으로 설정하는 경우, 본 논문에서 예시로 검토한 측정위치들에서의 측정값보다 예측값이 모두 더 높게 산출되었고, 2dB 이상, 크게는 7dB 이상까지 차이를 보였다.

반면, 검토한 위치에서는 해당구간을 운행하는 열차들의 실제 디스크브레이크 사용 차량 구성비율을 적용하면 실측값과 예측값의 차이가 2dB 이내로 감소하였다. 이는 레일의 이음부가 없는 구간에서의 결과이다. Schall03(1990) 예측모델에서의 디스크브레이크 사용율은 담면계동형식의 열차에 비하여 해당 차량의 표면상태의 양호함의 정도를 의미하고, 따라서 소음방사량도 그만큼 적음을 또한 의미한다.

차륜의 표면상태로 인한 음향조도만큼 철도열차의 주행소음에 큰 영향을 미치는 것은 해당구간 레일의 표면 음향조도레벨이다. 본 논문에서 검토한 위치의 경우 레일의 표면 음향조도가 국제적으로 제시하는 수준보다 높아서 상태가 좋지 않은 경우에는 이로 인해 소음방사레벨이 더 높아짐으로 실제로 국내의 열차에 해당하는 디스크브레이크 사용 구성율을 적용할 시에 예측값이 실측값보다 더 낮게 산출되었다.

Schall03(1990)에서 철도소음을 예측하는 경우 차륜과 레일의 접촉 주행표면 음향조도 상태에 따른 소음에의 영향을 고려하는 요소가 디스크브레이크 사용 구성율이므로 이에 따른 보정치를 변화시키며 고속선을 대상으로 실측값과 예측값의 차이의 변화를

검토하였다.

한편 레일의 이음매가 존재하여 이에 의한 충격음이 발생하는 궤도의 경우 이에 대한 별도의 보정치를 적용하지 않으면 6dB 이상 실측값보다 더 낮게 예측이 되었고, 통과하는 각 열차의 디스크브레이크 구성율을 모두 0으로 설정한 경우에도 이음부가 존재하는 구간을 통과할 시에 예측값은 약 2dB 더 낮게 산출되었다.

철도열차가 운행할 시에 방사소음레벨에 주도적으로 기여하는 요인은 열차의 속도, 차륜의 표면조도, 레일 체결부 패드의 강성으로 보고 있다(ISO 3095:2005, ANNEX D). 그러한 의미에서 차륜표면의 상태를 반영하는 디스크브레이크 흡음율의 개념은 소음 예측 시 중요한 요소이므로, 본 논문에서 검토하고자 하였고, 실제적으로 철도소음의 측정값과 소음 예측모델을 활용한 예측값의 차이를 유발하는 요인은 현장의 상황이나 열차의 운행여건에 따라서 더 존재할 수 있을 것이므로 오차에 대한 분석에 있어서 다각적인 검토가 반드시 필요할 것이다.

예측의 오차는 소음저감시설, 방음시설의 건설비와 직결되는 사항이며, 매번 소음을 예측하고 소음지도를 작성할 때마다 현장측정을 광범위하게 수행하는 노고와 비용도 보다 신뢰성 있게 소음이 예측된다면 절감될 수 있을 것이다.

이후 KTX-산천, 누리로나 ITX-새마을 등 소음지도 작성 방법에 명시되어 있지 않은 신규열차도 고려해야 하는 것과 Schall03-2012 등과 같은 최신 개선된 예측모델이 발표된 점을 고려하여 볼 때에 국내에서도 최신 철도소음을 예측하기 위한 소음지도 작성 방법 제시와 연구가 필요하겠다. ‘열차관련 인자’, ‘레일의 음향조도’, ‘레일의 이음매’ 등과 같이 예측결과와 정확도에 주요한 영향을 미치는 요소에 대한 국내상황에의 면밀한 검토 연구가 요구된다.

또한 국외열차시스템이 아닌, 국내에서 운행하는 모든 열차유형 관련 인자와 음향조도, 인프라 특성반영이 가능한 한국형 철도소음예측모델 KR-Noise (Jang et al, 2013)도 개발되었으므로 이를 활용하는 경우에 있어서의 예측 용이성과 예측 결과의 정확도에 대한 비교 검토도 향후 다각적으로 이루어져서 국

내환경에서의 철도소음 예측을 위한 최적의 대안을 수립하여야 할 것으로 여겨진다.

후 기

본 연구는 국토교통과학기술진흥원이 발주하는 국토교통부 철도기술연구사업 ‘철도 선로변 지속가능 저소음화 기술 개발(16RTRP-B072484-04)’의 일환으로 수행되었으며, 현장 선로 측정 수행을 위해 관련 지자체 및 한국철도공사에서 협조해 주셨습니다. 모든 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- Yu JS. 2012. Modeling of noise reduction effects on roadside and railways with barriers using Cadna-A Model. Master's dissertation. Hanbat University, Daejeon [Korean Literature]
- Czolbe C, Wunderli JM, Fischer F. 2013. sonRAIL Web tool-A New Application of the Swiss Method on Railway Noise Calculation Released in 2013.
- Jo DS, Kim JH, Choi TM. 2013. “ENPro - Environmental noise prediction program for in- and outside sound propagation”. J Sound and Vibration. 23(2): 45-49. [Korean Literature]
- Cho JH, Park YM, Sun HS, Hong WG. 2007. A Tendency of Prediction Technique for the Assessment of Railway Noise. J Environ Impact Assess. 16(1): 99-105. [Korean Literature]
- Cho JH, Koh HI. 2010. A Study on the Performance Evaluation of Noise Reduction for Railway Noise Barrier using Prediction Equation. J Environ Impact Assess. 19(6): 553-561. [Korean Literature]
- Jang SH, Jang EH, Park BJ, Choi WI. 2013. A study on the improvement of the environmental noise prediction model. J Environ Impact Assess. 2013. 107-108. [Korean Literature]
- Korea Railway. 2013. Study on the prediction of the environmental effects for planning the railway noise and vibration measures.
- Ministry of Environment Notification 2013-75(2013.6.28.) Noise mapping method.
- Sun HS, Park YM, Lee MJ. 2009. Present Status of Environmental Noise Impact Assessment and Application Plan of Noise Map. Korean Society for Noise and Vibration Engineering. 19(4): 747-748. [Korean Literature]
- Lee BC, Choi SG. 2011. Planning of Space in Surrounding Area of High Speed Railway Using Noise Map. Korean Society for Noise and Vibration Engineering. 21(10): 511-512. [Korean Literature]
- Lewis R, Olfsson U. 2009. Wheel-Rail Interface Handbook, Woodhead publishing.
- Lim HJ, Park JS, Ham JH, Park SG. 2011. Comparison of the noise map using Nord2000 according to the criteria for railway vehicle classification. Korean Society for Noise and Vibration Engineering. 21(4): 618-626. [Korean Literature]
- Lee JW, Gu JH, Lee WS, Seo CY. 2013. The Study for the Assessment of the Noise Map for the Railway Noise Prediction Considering the Input Variables, Journal of Korean Society for Noise and Vibration Engineering. 23(4): 295-300. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research. 2008. “Research on noise mapping(II)”. National Institute of Environmental Research.

2009. “Research on noise mapping(III)”.
- EN 15610:2009 Railway applications - Noise emission - Rail roughness measurement related to rolling noise generation.
- German federal railroad-central Office Munich, Schall03, Guideline for the Calculation of sound Immisions of Railroad Tracks. Edition 1990.
- ISO 3095. Railway applications-Acoustics-Measurement of noise emitted by railbound vehicles. 2005
- Koh HI, Anders N. 2013. Development of 400km/h railway noise source prediction model and identification technology. Korea Railroad Research Institute. 7(4): 109-116. [Korean Literature]