

한국철도 소음 예측을 위한 음향파워 산출 및 활용에 관한 연구

A Study on the Evaluation of Acoustic Power of Korean Railway for Noise Prediction and its Application

조준호¹ · 이덕희¹ · 최성훈¹ · 김재철¹

Jun-Ho Cho · Duck-Hee Lee · Sung-Hoon Choi · Jae-Chul Kim

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 exactly for the Korean Railway, because the acoustic powers for each rolling stock used in Korea have not been built yet. So in this study, acoustic powers for each Korean rolling stock such as Samaeul, Mugungwha were builded according to the speed and rail support systems. Predicted results using the acoustic powers suggested in this study are compared with measured results and it is known that these acoustic powers can be used for precise prediction of railway noise.

Keywords : 철도소음(Railway Noise), 소음예측(Noise Prediction), 소음측정(Noise Measurement), 음향파워(Acoustic Power), 역추적기법(Inverse Tracing Method)

1. 서론

건설교통부의 국가기간교통망 계획(2000-2019)에 따르면 효율적인 국가중합 교통체계를 구축하기 위해 고속철도와 일반철도의 건설 및 정비가 광범위하게 추진될 예정이다[1]. 철도운행시 발생하는 소음은 선로연변 뿐만 아니라 차량에 승차한 승객에게 직접적인 영향을 주는 주요한 사안이다. 따라서 철도건설사업은 계획단계에서부터 소음 영향 등을 고려하여 기본설계 및 실시설계에 착수해야만 비용 낭비 및 환경분쟁 등의 문제를 일으키지 않고 사업이 수행될 수 있다. 이와같이 철도에서 발생하는 소음을 사전에 정확하게 예측하여 저감방안 등을 수립하는 것이 절실히 필요하다. 철도소음을 정확하게 예측하기 위한 노력이 국내외적으로 이루어져 왔으며, 국내에서도 최근 환경소음을 예측하는 프로그램이 개발 출시단계에 있다.

국외에서는 오래전부터 많은 연구가 수행되어 왔다. 그 대표적인 연구로는 Makarewicz[2], 주진수[3] 등의 연구가 있으며 전자는 수식을 이용한 이론적 연구로 그방법을 한

국철도 각각에 적용하기에는 아직 한계가 있으며, 후자 또한 음향 인텐시티법 등을 이용한 일본 철도에 적용한 해석적 연구이다. 국내 철도 소음 예측에 관한 연구로는 국립환경연구원에서 수행한 연구로써 소음 측정 결과를 이용한 예측식의 제안이 있으며[4], 김정태 등에 의한 철도차량 음향특성에 관한 연구[5] 등이 있다. 또한 최근 조준호 등에 의해 철도 소음 예측기술의 활용 및 철도통과구조에 따른 철도 소음 예측기술에 대한 연구[6-7] 등이 수행된 바 있다.

그러나 이와 같은 연구나 국내외 예측 프로그램의 경우 국내 철도 소음원의 음향 파워가 차종별, 속도별, 궤도지지 구조별로 체계적으로 구성되어 있지 않아 철도 소음 예측에 한계가 있었다.

따라서 본 연구에서는 한국철도의 환경소음을 예측하기 위하여 소음측정결과와 상용 환경소음해석 소프트웨어[8]의 역추적 기법(Inverse Tracing Method)을 활용하여 국내 철도차량인 수도권 전기동차, 새마을, 무궁화 열차의 주요 속도 구간에 대해 음향파워를 산출하고 이를 활용하여 환경소음을 예측하는 방법에 대해 나타내고자 한다.

2. 철도소음 예측을 위한 광음향 해석

세계의 많은 나라들에서는 각각의 철도차량 특성 및 운행 특성 등에 따라 철도소음 예측모델을 만들고 있다. 그리고 이러한 예측모델을 철도소음에 대한 규정이나 법률을 제정하는데 활용하고 있다. 이러한 예측식 및 예측 프로그램들은 오랜 기간동안 축적되어온 소음측정 자료를 기반으로 만들어지고 보완되고 있다[9]. Fig. 1에는 이러한 각 예측식과 프로그램의 주요 차이점 하나인 음원 위치를 비교한 그림이다[10].

이와 같이 많은 주요 예측 모델은 자국의 측정 기술과 경험에 의한 보정치 산출을 택하므로 우리나라 철도소음 예측을 위해 적용하는 것에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 그 중에서도 가장 보편적으로 활용가능한 프랑스 CSTB 개발 소프트웨어인 Mithra를 국내 철도소음 예측에 활용하기 위한 방법을 제시하였다. 이하에서는 Mithra에서 채용한 광음향해석기법 이론에 대해 간략히 나타내었다[8].

2.1 계산의 원리

수음자로부터 나와 음원 선을 자르는 각 레이(음속)에 대하여 음향이 계산된다. 만약 각도 간격이 충분히 작다면, 레이에 의해 이루어진 원추내의 지형은 변화하지 않는다고 가정할 수 있다. 이러한 조건에서 문제는 점음원과 수음자사이의 잘려진 단면에서의 계산으로 된다. 이것을 위해 단면과 관련하여 음향파위의 정의, 기하학적 발산에 의한 감쇠, 공기에 의한 흡음, 회절, 지표 효과, 수직면에서 반사할 때의 흡음 등이 필요하다.

2.2 레이와 관련된 음향 파워

수음자로부터 방사된 각 레이(음속)는 평면내 원추(cone) 내부의 중심에 있다. 미소각 $d\theta$ 에 의해 잘려진 선음원의 길이 dx

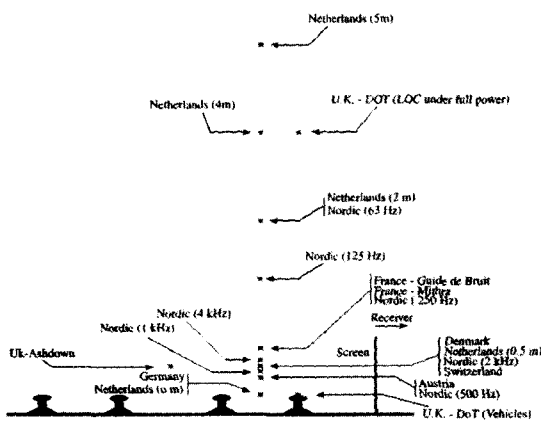


Fig. 1. Comparison of the source position[10]

는 다음과 같이 주어진다.

$$dx = \frac{rd\theta}{\cos \theta} \tag{1}$$

여기에서 r 은 소음원 선을 직접 또는 다중 회절이나 반사에 의해 자르는 (미소각과 관련된) 레이의 수평 이동거리, θ 는 선음원에 수직인 선과 레이 사이 각도이다.

선음원의 요소와 관련된 음원의 파워 dW 는 $dW = W^* dx$, 여기서 W^* 는 선음원의 단위길이당 파워이다. 철도의 경우 선 소음원은 레일 중앙의 0.8m 높이에 위치한다. 선 소음원의 단위길이당 음향 파워가 알려졌으면 그것을 직접적으로 이용하는 것이 가능하다. Mithra는 교통소음과 철도소음을 다룰 수 있지만 단위길이당 음향파위로 정의될 수 있는 소음원에 대해서도 적용 가능하다. 계산은 옥타브밴드에 대해 수행된다.

2.3 기하학적 발산(Geometric divergence)

선음원에 도달하는 음속은 파워 dW , 지향성 Dh 의 점음원과 연관되어 있다. 음원으로부터 d 떨어진 위치의 자유음장에서의 음압 및 소음도 각각 다음과 같다.

$$P = \frac{dW \times Dh}{4\pi d^2} \tag{2}$$

$$Lp = 10 \log(dW \times Dh) - 10 \log 4\pi d^2 \text{ [dB]} \tag{3}$$

2.4 지향성(directivity)

철도 소음의 경우 주 소음원이 차륜과 레일의 접촉에 의한 것으로 수평면에서 $\cos \theta$ 의 지향성을 갖는다. 여기에서 θ 는 선음원에 대해 수직인 선과 레이가 이루는 각이다(Fig. 2 참조).

수평면에서의 지향성은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$Dh = \cos \theta \times \frac{4}{\pi} \tag{4}$$

수직면에서 지향성은 다음 수식으로 주어진다.

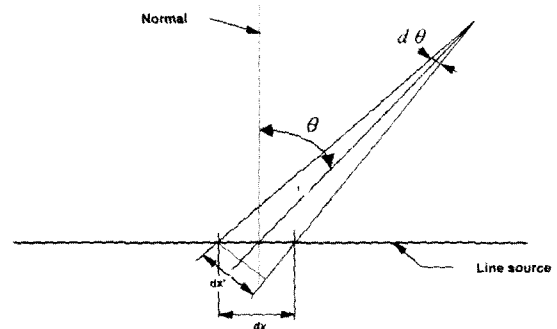


Fig. 2. Principle of the cone method used in Mithra

$$Dv = 40/3 [(2 \sin(2\phi))/3 - \sin \phi] \log [(f+600)/200] \quad (5)$$

여기에서 ϕ 는 음속을 수직면에 투영했을 때 만들어지는 수직면에서 음속과 수직 축이 이루는 각을 의미하며 f 는 옥타브 밴드의 중심주파수이다.

3. 소음 측정 및 결과

2장에서 언급한 Mithra를 이용하여 철도소음 예측 해석하는 흐름도를 Fig. 3에 나타내었다. 본 연구에서 산출한 음향파워는 Fig. 3의 철도 소음원의 지정(Identification of Source Acoustic Power)을 위한 입력라이브러리로 사용된다.

한국철도 음향파워를 산출하기 위해서 우선 대상구간에서 소음을 측정하고 그 측정결과를 Mithra의 소음원 규명(Source Identification) 모듈을 이용하여 소음원(Source)의 음향파워를 계산하는 과정을 거친다. 소음을 측정한 구간을 Table 1에 나타내었다.

Table 1에 나타낸 구간 중 대표적인 구간의 소음측정 결과를 나타내면 다음과 같다. 오산-송탄 구간에서 기존선 열차의 소음을 측정하기 위한 측정위치의 단면도를 Fig. 4에 나타내었으며, Fig. 5에는 당해지역에서 소음을 측정하는 장면을 나타내었다.

철도 소음측정은 다음의 조건에서 수행되었다.

- 측정위치 : 상행선 레일중심으로부터 7.5m 거리, 1.5m 높이 / 15m 거리, 3.0m 높이
- 측정장비 : 01dB Symphonie, LD 2900B(2CH Signal Analyzer), LD 824(SPL Recorder)
- 소음원 방향으로 마이크로폰 설치
- 바람의 영향을 고려하여 방풍망 부착
- 소음계의 동특성 : 빠름(Fast)
- 소음계의 청감보정회로 : A특성

Table 1. The sites of railway noise measurement

열차구분	궤도지지구분	측정구간
전동차	토공	화서-수원
	고가	반월-대야미
새마을 무궁화	토공	상록수-한대앞
		화서-수원
		오산-송탄
	고가	평택-성환
		성환-직산
		동운-순천

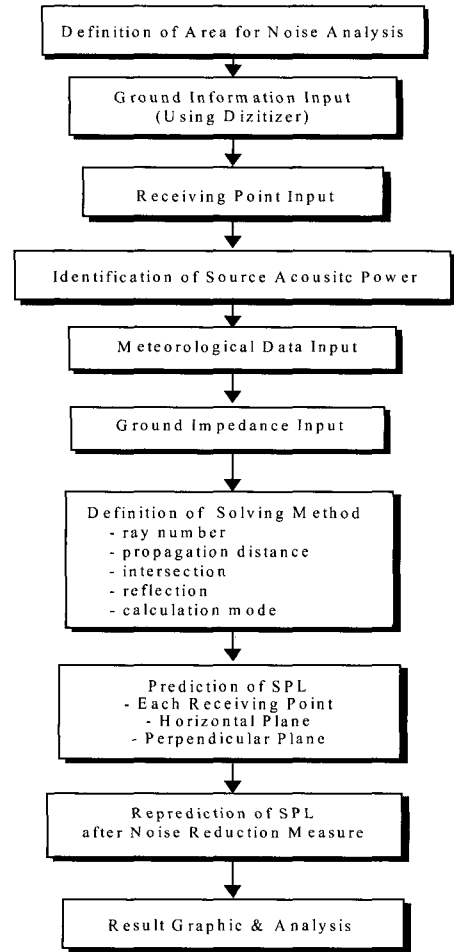


Fig. 3. Study flow for railway noise prediction.

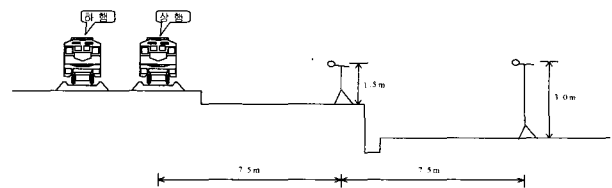


Fig. 4. Measurement position for railway noise(Osan ~ Songtan).



Fig. 5. The scene of railway noise measurement.

Table 2. Measured railway noise spectrum(Osan~Songtan, up-direction, Samaeul, Unit:dBA)

속도 및 위치 중심주파수(Hz)	130-140km/h	
	7.5m (1.5m)	15m (3.0m)
31.5	48.0	45.2
63	58.2	53.9
125	68.9	64.6
250	75.8	73.4
500	84.3	77.1
1k	85.3	78.2
2k	83.4	78.1
4k	79.1	73.7
8k	70.0	64.1
16k	58.3	51.0
OA	89.9	83.7

- 압소음 : 43~48dBA

Table 3. Measured railway noise spectrum(Osan~Songtan, up-direction, Mugungwha, Unit:dBA)

속도 중심주파수 (Hz)	100-110km/h		110-120km/h		120-130km/h	
	7.5m (1.5m)	15m (3.0m)	7.5m (1.5m)	15m (3.0m)	7.5m (1.5m)	15m (3.0m)
	31.5	47.6	45.3	47.4	45.1	49.8
63	65.0	63.1	67.9	66.6	61.7	59.7
125	66.4	64.9	70.1	68.9	66.1	62.7
250	71.8	69.3	73.5	70.9	73.3	71.6
500	85.2	77.5	85.5	78.5	85.7	78.2
1k	84.7	77.6	86.2	79.5	87.9	80.4
2k	83.6	78.1	85.5	80.1	86.4	80.5
4k	79.0	73.6	80.2	75.1	81.2	75.5
8k	69.7	64.1	71.3	66.1	71.8	65.6
16k	58.7	51.0	58.9	51.8	60.5	52.1
OA	89.9	83.4	91.1	85.3	92.1	85.4

- 압소음 : 43~48dBA

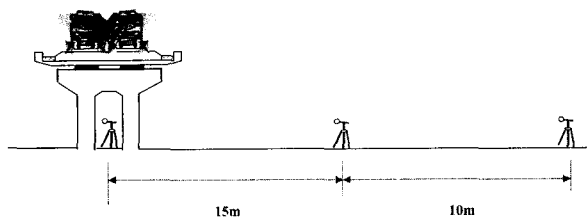


Fig. 7. Measurement position for railway noise(Sangroksu~Handaeap)

이와같은 조건에서 측정을 통하여 얻어진 소음도값을 측정열차에 대하여 속도별로 평균하여 Table 2와 Table 3에 나타내었다. 무궁화 열차의 경우 속도가 10km/h 증가함에 따라 대략 1dB의 소음도 증가를 나타내고 있음을 알 수 있다.

또한 토공구간과 달리 고가구조의 겨우 구조물 진동에 의한 구조물 전달소음 성분을 동시에 고려해야한다[7]. 본 연구에서는 고가 중앙에 선소음원을 모델링하여 음향파위를 산출하였다. 고가구조물로부터 방사되는 소음의 음향 파워를 구축하기 위해서 측정된 구간중 대표적으로 상록수-대야미 구간의 측정 위치도를 Fig. 7에 나타내었으며 소음 측정 결과를 Table 4에 나타내었다.

4. 한국철도 음향파위 산출

3장에서 나타낸 바와 같이 측정된 주파수 스펙트럼과 당해 지역 지형을 모델링한 후 Mithra 프로그램의 Source Identifica-

Table 4. Measured railway noise spectrum(Sangroksu-Handaeap, up-direction, Subway, Unit:dBA)

속도(km/h) 중심주파수	50-60	60-70	70-80
31.5	45.9	45.8	46.0
63	55.5	56.8	60.5
125	63.5	64.5	64.6
250	63.5	65.9	67.7
500	61.4	63.6	66.3
1k	58.6	61.0	64.6
2k	52.9	54.1	57.0
4k	48.0	48.5	51.4
8k	46.1	46.0	46.7
16k	45.8	45.7	45.7
OA	68.5	70.5	72.5

- 측정위치 : 고가하부 지면위 1.5m
- 압소음 : 57 ~ 59 dBA

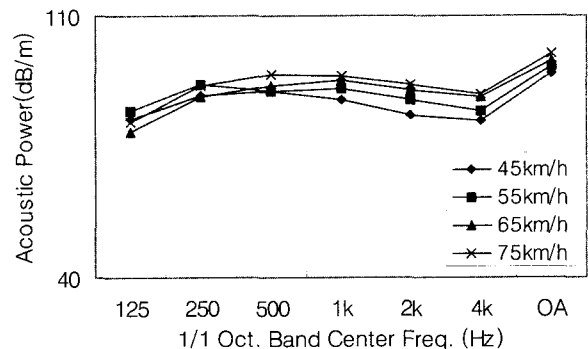


Fig. 8. Acoustic power for subway

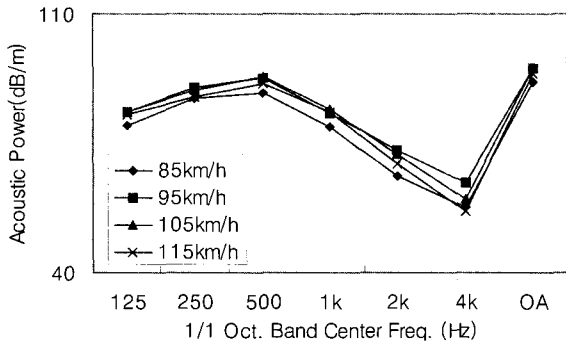


Fig. 9. Acoustic power for structure-borne noise of Samaeul passing above elevated bridge

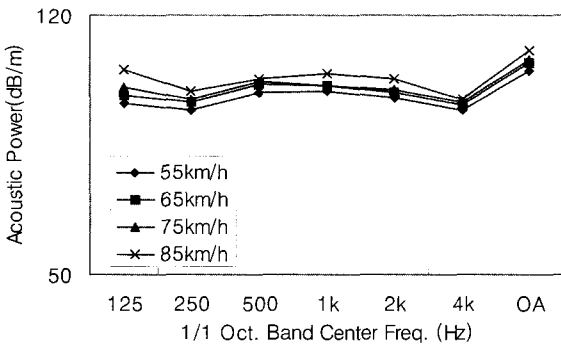


Fig. 10. Acoustic power for accelerating Mugungwha

tion 모듈을 이용하여 열차종류별(수도권 전기동차, 새마을, 무궁화) 주요 속도구간별(전기동차: 40-80km/h, 기존선 50-140km/h), 지형별(토공구간, 고가구간)에 대하여 음향 파워를 산출하였으며 그 일부를 Fig. 8~10에 나타내었다. Fig. 9는 특히 고가교를 새마을 열차가 통과하는 경우 고가하부로 방사되는 음향파워로써 일반 철도소음에 비해 열차가 고가를 가진하여 발생하는 구조물 전달소음에 대한 음향파워로써 500Hz이하의 저주파 성분이 주요한 성분임을 알 수 있다.

5. 철도소음 예측 결과 검증

본 장에서는 앞에서 얻어진 한국철도의 음향파워를 이용하여 철도소음을 예측한 결과와 측정결과의 비교 평가를 수행한 사례를 통하여 그 타당성을 검증하였다. 비교평가는 전기동차와 기존선이 동시에 운행되는 평지구간과 기존선만 운행되는 고가구간에 대해 수행하였다.

5.1 평지구간(전기동차와 기존선 운행구간)

당해지역의 철도소음 예측을 위해 지형특성은 디지털타이저를 이용하여 Fig. 11 같이 모델화하였다.

당해지역에서의 1시간 동안 실측한 소음레벨과 구축된 열

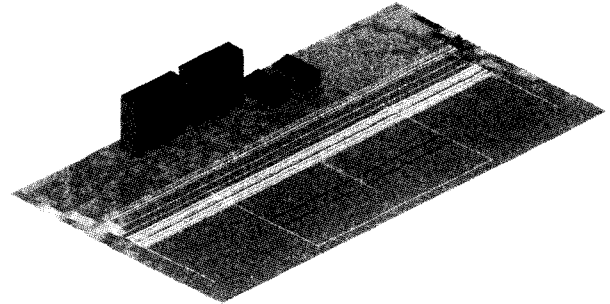


Fig. 11. Railway noise prediction model(Whaseo~Suwon)

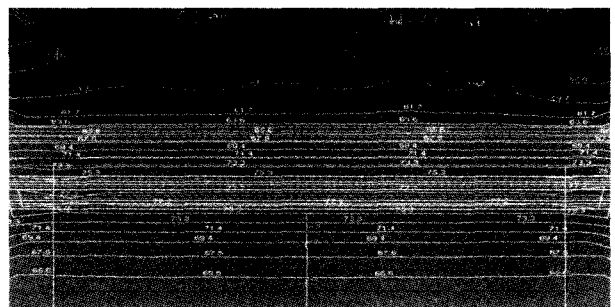


Fig. 12. Iso-Leq(1H) map for horizontal plane from 1.5m high from ground(Whaseo~Suwon)

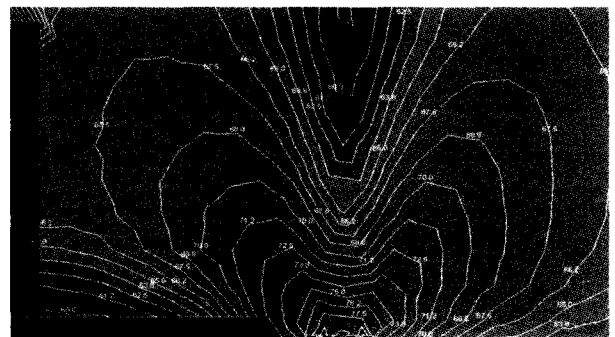


Fig. 13. Iso-Leq(1H) map for perpendicular plane to rail(Whaseo~Suwon)

Table 5. Comparison of measured and predicted Leq(1H) (Whaseo-Suwon, unit : dB(A))

측정위치 레일로부터거리 (지면위 높이)	예측값 (Leq)	측정값 (Leq)	열차 통과수 (1시간)
7.5m (1.5m)	73.8	-	· 새마을 상행 1 하행 2 · 무궁화 상행 6 하행 6 · 전동차 상행 6 하행 6
15m (1.5m)	71.3	-	
25m (1.5m)	68.7	69.6	
50m (1.5m)	65.0	65.9	

차의 음향파위를 입력하여 예측한 값을 비교하였다. 예측결과와 실측결과를 Table 5에 비교하였으며, 수평면과 수직면에서 소음 등고선도를 Fig. 12~13에 나타내었다. 위치에 따라 차이가 있으나 대체로 1dB 이내의 적은 오차 안에서 예측할 수 있었다.

5.2 고가구간(기존선구간)

고가 구조물을 통과하는 철도소음 예측을 위해 순천 용당 고가 지역의 지형데이터를 디지털라이저를 이용하여 Fig. 14와 같이 입력하였다.

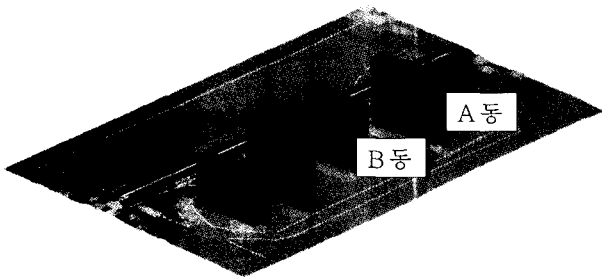


Fig. 14. Railway noise prediction model(Suncheon~Dongwoon)

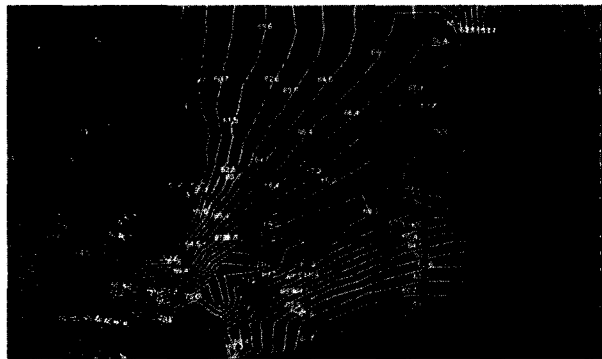


Fig. 15. Iso-Leq(1H) map for perpendicular plane to rail(Suncheon-Dongwoon)

Table 6. Comparison of measured and predicted Leq(Suncheon-Dongwoon, unit : dB(A))

구분	예측값 (Leq)	측정값 (Leq)	열차통과수 (1시간)
고가상부	82.4	-	· 새마을상행 1 하행 1 · 무궁화상행 1 하행 1 · 화물상행 1 하행 1
레일중심에서 25m	59.3	-	
A동 13층	69.3	69.2	
A동 옥상	66.1	66.8	
B동 13층	68.6	-	
B동 옥상	65.7	66.7	

고가지역에 대한 소음예측의 정확도를 위하여 구조물전달 소음을 선소음원으로 모델링하여 입력하고, 당해지역의 소음 실측값과 비교하여 Fig. 15 및 Table 6에 나타내었다. 고가하부 및 인근의 소음 예측치는 구조물 소음을 고려해야 실측값에 근접함을 확인하였다.

6. 결론

본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 한국철도 소음의 정확한 예측을 위해 측정데이터를 이용하여 차종별(수도권 전기동차, 새마을, 무궁화), 주요 속도별(전기동차: 40-80km/h, 기존선 50-140km/h), 운행구간별(토공구간, 고가구간) 음향파위를 산출 제시하였다.
- (2) 구축된 음향파위를 토공구간과 고가구간에서 사용하여 예측한 값과 당해구간에서 측정된 값이 잘 일치함을 알았다. 향후 국내 기존선 철도 소음의 정확한 예측을 위한 음향 파위로 유용하게 활용할 수 있으리라 판단된다.

후 기

본 연구는 환경부 차세대핵심연구개발사업에 의해 수행된 연구로 관계자에게 감사드립니다.

참고 문헌

1. 국가 기간 교통망 계획(2000~2019), 건설교통부, 1999.
2. R. Makarewicz, M. Yoshida, "Railroad noise in an open space", Applied Science, Vol.49, No.4, 291-306, 1996.
3. 朱鎮洙, 在來鐵道の騒音傳播豫測に關する研究, 東京大博士學位論文, 1997.
4. 사업장 소음의 방지대책에 관한 연구(II), 국립환경연구원, 1993
5. 김정태, 조성호, "국내 철도차량의 음향발생 특성에 대한 비교연구", 한국철도학회지, Vol.2, No.1, 28-37, 1999.
6. 조준호, 이덕희, 정우성, 김용기, 박덕신, 정병철, "철도소음 예측기술의 활용에 관한 연구", 대한환경공학회 2000년 춘계학술연구발표회 논문집(II), 서울, pp.121-122. 2000.
7. 조준호, 이덕희, 정우성, 신민호, "철도통과구조에 따른 철도연변 소음 예측에 관한 연구", 한국소음진동공학회 창립 10주년 기념 소음진동학술대회 논문집, 부산, pp.1367-1372, 2000.
8. Mithra V3.1 Technical Manual, 01dB, 1997.
9. 철도소음원 특성 규명 및 환경소음 예측 모델 개발, 차세대핵심환경기술개발사업진도보고서, 한국철도기술연구원, pp.18-22, 2003.
10. H. J. A Leeuwen, "Railway noise prediction models : A comparison", Journal of Sound and Vibration, Vol.231, No.3, pp.975-987, 2000.