

기술자료

철도소음 영향평가를 위한 예측기술 동향

조준호* · 박영민** · 선호성** · 홍웅기***

한국철도기술연구원*, 한국환경정책·평가연구원**, 서남대학교 환경공학과***

(2007년 1월 8일 접수, 2007년 1월 23일 승인)

A Tendency of Prediction Technique for the Assessment of Railway Noise

Jun-Ho Cho* · Young-Min Park** · Hyo-Sung Sun** · Woong-Gi Hong***

Korea Railroad Research Institute*

Korea Environment Institute**

Seonam Univ. Dept. of Environmental Eng.***

(Manuscript received 8 January 2007; accepted 23 January 2007)

Abstract

Since 1990s, the railway noise has been researched and developed in our nation. First of all, what's causing the noise and how to eliminate the cause of the noise must be found out. Secondly, cutting off the propagation path of the noise from the noise source to the receiving points. In this study the characteristics of prediction formula for the assessment of railway noise used in some nations including Korea were investigated. In order to develop the prediction formula of the railway noise, the noise radiated from railway vehicle, rails and sleepers, characteristics of noise barrier, velocity of train, ground effects, roughness should be analyzed and predicted. Especially, on the basis of acoustics, the characteristics of source are applied to acoustic power and directivity information.

Key words : railway noise, ground effects, roughness, acoustic power, directivity information

1. 서론

최근 교통기술의 발달과 전국토의 효율적 활용을 목적으로 도시간 또는 도심내 철도건설 및 계획이 활발히 진행되고 있다. 철도교통은 그 대량수송 능력뿐만 아니라 정시성, 안전성, 그리고 무엇보다 환경친화성은 널리 알려진 사실이며, 이로 인한 그 기

술 발전 및 수요는 더욱 가속화되리라 예상된다. 그러나 철도교통이 가지는 환경친화성은 일반 도로교통소음과 같이 일정한 소음도 분포를 나타내기 보다는 소음원 측면에서는 대단히 취약하다. 따라서 철도소음에 대하여 기하급수적으로 상승하는 민원의 제기 및 국민의 요구에 의해 1990년대부터 국가 및 공공복지 차원에서 관심을 가지고 관련 연구 및 기

술개발이 추진되어오고 있다.

철도소음의 예측에는 소음의 전파이론과 소음원의 특성을 데이터베이스로 구축한 지형의 특성을 디지털 정보로 변환하여 그 전파를 기하음향학으로 해석한 전용 해석 프로그램을 이용하는 방법이고, 다른 하나는 소음원의 특성과 전파이론 그리고 측정 데이터에 기초한 예측식을 개발하여 소음을 예측하는 방법이다. 주로 유럽에서는 고속철도와 관련하여 철도소음예측 프로그램을 개발하고 있으며, 일본 및 우리나라에서는 예측식에 기초한 보다 용이한 소음 예측을 수행하고 있다.

본 논문은 철도선진국이 보유하고 있는 예측식의 예측방법을 조사하였으며, 우리나라의 경우에는 철도소음영향평가를 위해 지금까지 활용되고 있는 예측식의 한계를 검토하고 이하에 그들의 내용을 기술한다.

II. 철도소음 예측기술 동향

철도소음 예측기술은 고도의 이론적 배경과 다수의 현장측정 경험을 바탕으로 개발되었으며, 최근 고속철도 시스템과 같이 철도 시스템의 판매시 필요한 설계도구로서 개발되거나, 도시 전체의 환경소음을 예측 분석하여 도시계획 및 설계를 위해서 사용되어 왔다. 유럽에서는 주로 철도를 포함한 도로 및 공장에서 발생한 소음의 전파해석을 위해 기하음향학에 기초한 음향해석 이론을 바탕으로 개발되었다. Fig. 1과 Fig. 2에는 Cadina/A를 사용하여 철도를 포함한 환경소음 예측을 위한 모델링 화면과 환경소음 해석에 의해 얻어진 소음도 분포 그래프의 예를 나타낸다.

국내에서 철도소음에 대한 연구는 주로 1990년 이후 국공립 연구 기관을 중심으로 수행되어 왔으며, 특히 국립환경과학원에서는 1993-1994년에 사업장 소음의 방지대책에 관한 연구(II, III)에서 새마을호, 무궁화호, 통일호 열차 및 전기여객열차와 전철에 대하여 주로 거리와 속도의 함수로 최대소음도 및 등가소음도를 예측하는 모델식을 제시한 바 있다 (예, 유선형 새마을, $L_{\max} = 21.76 \log v + 47.74$

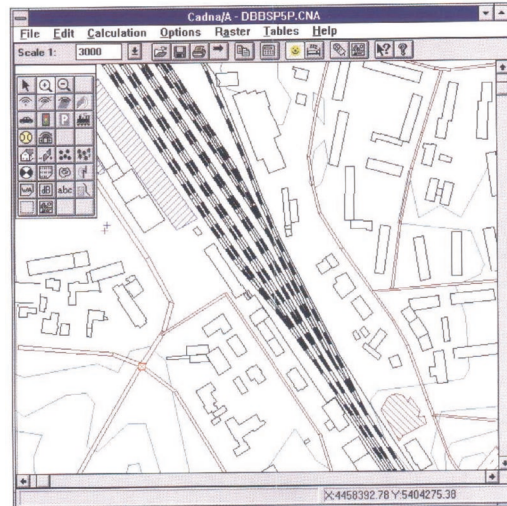


Fig. 1. Example of input display for noise analysis area on road and railway noise

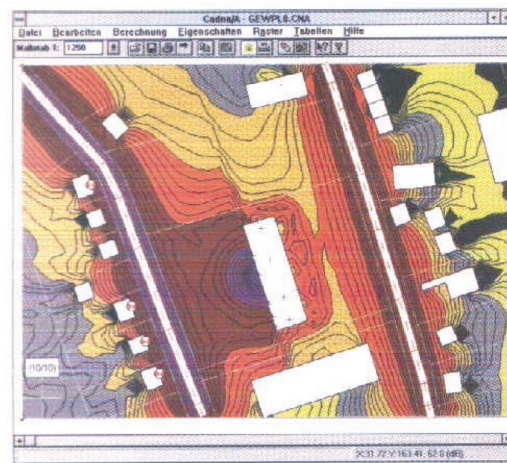


Fig. 2. Result of environmental noise analysis

$$dB(A) L_{eq} = \overline{L_{\max}} + 10 \log(2n/T) - 15 \log R_a dB(A).$$

그러나 이 예측 모델의 경우 국내 철도소음 예측을 위한 최초의 연구이지만, 철도소음을 너무 단순화하여 모델을 구성함으로써 그 실용성 및 정확도 측면에서 오차를 많이 내포하고 있다. 또한, 철도소음 예측 프로그램을 이용한 소음 예측분야에서는 덴마크 B&K사의 Enpro가 국내 대학에서 개발되기도 하였으나 아직 그 활용실적은 미미한 상태이다. 주요 국가별 예측방법¹⁾과 기타요인에 대한 보정치 산출방법을 중심으로 각국의 예측 방법을 비교 검토한다.

1. 일반

일본의 경우, 1980년에 石井, 子安 등에 의하여 제안된 재래선 고가철도로부터의 소음 예측기법²⁾을 이용하여 환경영향평가분야 등에서 광범위하게 사용되었으며, 森藤 등이 보고한 재래 철도소음의 예측 평가기법³⁾은 1995년 12월에 일본 환경청이 공표한 신설 및 대규모 개선시의 소음지침에 대응하는 것으로서 내용적으로는 石井등의 기법²⁾을 이용하여 새로운 음원의 도입이나 전동음, 고체음 등 주 음원의 파워레벨을 도출하였다. 그의 내용은 열차 주행시의 음원은 유한길이의 선음원으로 근사하며 선음원 요소로부터 방사되는 음향파위는 지향성을 가지는 것으로 가정한다. 그 방사 지향성은 인자 $\cos^n\phi$ 로서, ϕ 는 음의 방사방향과 음원요소를 포함하는 선음원 직교면이 이루는 각이다. 따라서 선음원 요소 단위 길이로부터 각도 ϕ 의 방향 단위 입체각으로 방사되는 음향 파워는 $J_o \cdot \cos^n\phi$ 이다. 여기에서, n 은 정수로서 지향성을 가지지 않는 경우, $n=0$ 를 적용하고 철도의 주행음에 대해서는 통상 $n=2$ 를 적용한다. 단위길이당 음원 요소로부터 방사되는 음의 세기는 음원요소로부터의 거리가 r , 방향 ϕ 의 점에 있어서

$$(J_o \cdot \cos^2\phi) / r^2 \tag{1}$$

로 나타낼 수 있다. 반자유공간에서 방사하는 경우 선음원 단위 길이로부터 방사되는 음향 파워 W 와

$$W = \int J_o \cdot \cos^2\phi d\Omega = (4\pi / 3) J_o \tag{2}$$

의 관계가 있으며, 이와 같은 음원 요소로부터 방사되는 음은 음압 실효치로서 음의 세기와의 사이에 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$P_{rms}^2 = \rho c \times I \tag{3}$$

따라서 단위길이당 음원 요소로부터 방사하는 방사음의 음압의 실효치를 $P_{rms} dB(A)$ 라 하면

$$P_{rms}^2 = (\rho c J_o \cos^2\phi) / r^2 \tag{4}$$

이 얻어진다. 즉, 선음원의 길이 s 로부터 방사되는 음압실효치 P_{rms} 는 음원직선으로부터의 거리가 d 인 수음점에 있어서

$$P_{rms}^2 = \int (\rho c J_o \cos^2\phi) / r^2 dx \tag{5}$$

$$= \rho c J_o \int \frac{d^2}{(x^2 + d^2)^2} dx$$

로 주어진다. 단, 음원 직선상에서 오른쪽방향은 x 축, 수음점의 정면위치는 $x = 0$ 으로 한다. 적분의 하한과 상한 x_1, x_2 는 각각 선음원의 좌단, 우단의 위치를 나타내며, $x_2 - x_1 = s$ 는 선음원의 길이이다. 적분을 실행하고, 소음레벨로 표시하면 당해 수음점에 있어서 L_A 는 다음 식과 같이 계산된다.

$$L_A = 10 \log \left(\frac{P_{rms}^2}{P_0^2} \right) = PWL - 5 - 10 \log d + 10 \log [K(x_2 / d) - K(x_1 / d)] \tag{6}$$

$$PWL = 10 \log [\pi J_o / (p_0^2 / \rho c)] = 10 \log [(3 / 4) W / (p_0^2 / \rho c)] \tag{7}$$

선음원이 열차주행시의 속도 $v(m/s)$ 로 직선상을 운동한다고 가정하고, 선음원의 중앙이 수음점 중앙에 위치해있을 때의 시간을 $t = 0$ 이라 하면 시간 $t(sec)$ 에 있어서 선음원의 양단의 위치는

$$x_2 = vt + s/2, x_1 = vt - s/2 \tag{8}$$

로 주어지기 때문에 소음레벨 L_A 는 시간 t 의 함수 $L_A(t)$ 로 된다. 즉 소음레벨의 최대치 L_{Amax} 는

$$L_{Amax} = PWL - 5 - 10 \log d + 10 \log [(s / 2d) / (1 + (s / 2d)^2) + \arctan (s / 2d)] \tag{9}$$

단발소음폭로레벨 L_{AE} 는

$$L_{AE} = 10 \log \left[\int \frac{P_{rms}^2}{P_0^2} dt \right] \tag{10}$$

로 정의되기 때문에,

$$L_{AE} = PWL - 5 - 10 \log d + 10 \log (\pi s / 2v) = L_{Amax} + 10 \log (\pi s / 2v) - 10 \log [(s / 2d) / (1 + (s / 2d)^2) + \arctan (s / 2d)] \tag{11}$$

철도통과시의 소음도 측정값은 그 편차가 다양하므로 DB로 구축한 후 그 중앙값을 이용하여 음향파위를 계산하고, 위에서 얻어진 예측식을 활용하여 철도환경소음에 대한 등가소음도, 최대소음도, 단발소음폭로레벨 등을 산출하여야한다.

2. 독일

독일의 경우 1990년에 제정된 교통소음방지법⁴⁾

에서 신설 또는 대규모 개량하는 도로 및 철도에 대하여 소음의 기준값을 정하고, 첨부문서로 여러 가지 소음의 예측방법을 나타내었다.

$$L_{eq} = L_m + D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + D_5 + D_6 + S \quad (12)$$

$$L_m \text{ (주간 또는 야간의 평균소음레벨)} \\ = 51 + 10 \log [n (5 - 0.04p)]$$

단, n 은 시간당 통과열차대수, p 는 통과열차대수 중 화물열차의 비율(%)

D_1 : 열차종별에 대응하는 보정치

Table 1. Weighting value on train type

차 량 형 식	보정치(dB)
디스크 브레이크를 가진 차량	-2
차륜 제진재를 가지는 고속차량	-4
도심 전차 등	3
지하철 차량 등	2
기타 차량	0

$$D_2 : 10 \log (L \cdot V^2) - 60, (L : \text{열차길이}(m), V : \text{속도}(km/h))$$

D_3 : 발라스트궤도, 목침목 이외의 궤도 구조에 대한 보정치

Table 2. Weighting value on sleeper type

궤 도 종 별	보정치(dB)
풀 등으로 덮어진 궤도	-2
발라스트 궤도, 목침목	0
발라스트 궤도, 콘크리트 침목	2
반사성 궤도	5

$$D_4 : 15.8 - 10 \log (d) - 0.0142d^{0.9} \text{ (소음의 전파거리 및 공기 흡음에 대한 보정치)}$$

여기에서, 우변의 제2항은 전파거리에 의한 감쇠량, 제3항은 공기흡음에 의한 초과감쇠량이다. Fig. 3에서는 2,000m 까지의 감쇠특성을 보여준다.

$$D_5 : -4.8 \exp \left[-\left(\frac{h}{d} \left(8.5 + \frac{100}{d} \right) \right)^{1.3} \right] \text{ (음의 전파경로와 높이에 대응하는 보정치)}$$

D_6 : 방음벽, 건물시설, 제방, 절토 등에 의해 음원이 차폐된 경우의 보정치

S : 철도소음으로부터 피해가 미미 한때는 계산 결과로부터 5dB 를 감함.

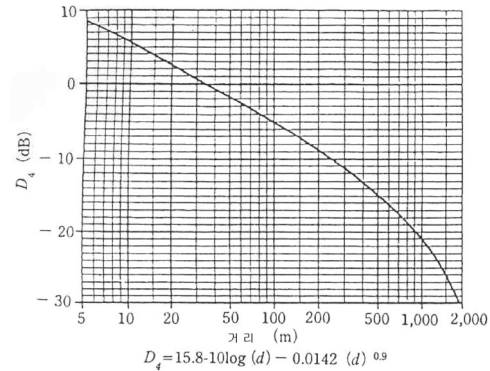


Fig. 3. Calculation chart of noise attenuation value by propagation distance and air absorption

3. 영국

영국에서도 신설 또는 대규모 개량 철도에 대한 소음 방지기준(Noise Insulation Regulations)이 1993년에 제정되었다. 영국 교통부에서는 그 기준을 적용하는 철도 소음의 계산방법⁵⁾을 발표하였다.

1) 구간분할

선로구조, 차폐의 정도, 열차속도, 정차역의 유·무 등에 소음의 크기가 장소에 따라 다른 경우 소음레벨의 차가 2dB 이내로 되도록 각 구간별 등가소음레벨의 계산이 수행되고, 최종적으로 합성소음도 예측치가 계산된다.

2) 표준적 단발소음폭로레벨(SEL)

발라스트 궤도, 콘크리트침목 및 목침목, 장대레일의 표준궤도구간을 표준적인 열차가 주행하는 경우의 궤도로부터 25m 이격된 위치에서의 단발소음폭로레벨(SEL)을 다음식으로 계산한다.

$$SEL = 31.2 + 20 \log (V) : \text{일반열차} \quad (13)$$

$$SEL = 112.6 - 10 \log (V) : \text{디젤 기관차} \quad (14)$$

여기에서, V 는 200km/h 로서 궤도나 레일의 상태가 표준적이지 않을때는 다음과 같이 몇가지를 고려하여 보정을 수행한다.

(1) 차량형식

주로 브레이크 기구가 다른것과 비교하여 차량형식별 보정치가 정해진다. 디스크형보다도 답면형 브

레이크에 대하여 보정치가 높다. 실례로서 4축의 담면브레이크를 가지는 화물열차는 최고인 15.0 dB의 보정치가 제시되었다.

(2) 차량수

1편의 열차 중에 동일열차의 수를 n 이라고 하면, 에너지량에 대응된 보정량 $10\log n$ 을 SEL의 계산값에 합한다.

(3) 선로 및 궤도종별

선로구조나 궤도구조의 다름에 대응하는 것은 Table 3의 보정치를 합한다.

Table 3. Weighting value on railway and sleeper type

선로 및 궤도 종류	보정치(dB)
정척레일	2.5
슬라브 궤도	2
난간있는 콘크리트 고가교	1
난간있는 강교량	4
Box Girder 강교량	9

3) 소음의 전파

(1) 거리보정 : C_d

표준점 (25m) 이외의 수음점에 대하여는 (15) 식에 나타난 선음원으로부터의 감쇠에 대응한 보정을 행한다. 즉 d' (m)는 음원으로부터 수음점까지의 직접 도달거리로서 d' 가 10m 이상의 범위에 대하여 적용된다.

$$C_d = 10 \log (d'/25) \tag{15}$$

(2) 공기흡음 : C_a

수음점으로부터 궤도까지의 수평면내에서의 최단거리를 d (m)라 하면, 공기흡음에 대한 보정치는 다음 식으로 산출된다. 단, 정지상태의 공회전중인 디젤기관차에 대하여는 적용되지 않는다.

$$C_a = -0.008d + 0.2 \tag{16}$$

(3) 지표면 흡음 : C_g

지표면이 초지와 같은 흡음성인 경우, 지표면 흡수에 대한 보정치는 음원 및 수음점의 지표면에서의 평균적인 높이 H (m)를 변수로 하여 다음 식으로 산출된다. 아스팔트와 같은 반사성 표면의 경우에는 보정을 행하지 않는다.

$$\begin{aligned} C_g &= -0.6 \cdot I(6-H) \log (d/25) : 1.0 < H < 6.0\text{m} \\ &= -3 \cdot I \log (d/25) : H \leq 1.0\text{m} \tag{17} \\ &= 0 : H \geq 6.0\text{m} \end{aligned}$$

평균높이 H 는 지형이 평탄한 경우 수음점 높이의 1/2로 하고, 지형이 평탄하지 않는 경우에는 음원과 수음점을 연결하는 선과 지표면과의 사이의 평균적인 높이로 한다.

(4) 차폐효과 : C_b

방음벽이나 건물 등 음원이 차폐되는 것에 의한 소음의 감쇠량은 경로차를 δ (m)라 하면 다음 (18), (19), (20) 식 또는 Fig. 5에 의하여 산출한다.

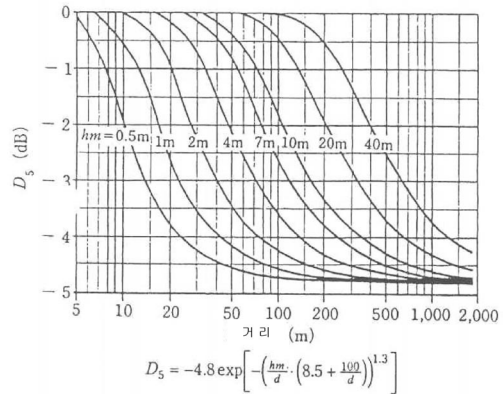


Fig. 4. Calculation chart of noise attenuation value by ground absorption

• 음원이 보이는 경우

$$\begin{aligned} C_b &= 0 : \delta \leq -0.5\text{m} \\ &= -0.55 - 1.85 \log(10^{-3} - \delta) : -0.5 < \delta \leq -0\text{m} \tag{18} \end{aligned}$$

• 음원이 가려지는 경우

- 반사성방음벽

$$\begin{aligned} C_b &= -15.4 : \delta \geq 2.5\text{m} \\ &= -5 \log(10 + 470 \delta) : 0 \leq \delta < 2.5\text{m} \tag{19} \end{aligned}$$

- 흡음성방음벽

$$\begin{aligned} C_b &= -19.8 : \delta \geq 2.5\text{m} \\ &= -2.17 + 0.868 \delta - 9.4 \log(2 + 50 \delta) : 0 \leq \delta < 2.5\text{m} \tag{20} \end{aligned}$$

선로가 차폐물에 의하여 몇 개로 분할되는 경우에는 음원을 통과하는 구간과 음원이 차폐되는 구간으로 분할하여 소음레벨을 계산한다. Fig. 6에서 가상방음벽의 높이는 이등분선이 건물의 모서리와 교

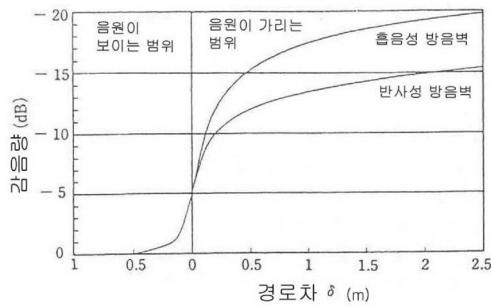


Fig. 5. Calculation chart of attenuation value by diffraction

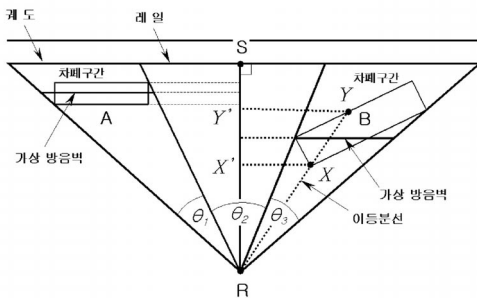


Fig. 6. Calculation method of sound level in case of part masking

차하는 2 점으로부터 구한다.

(5) 대하는 면으로부터의 반사 : C_m

반사성 방음벽이 평행하게 설치된 경우에는 원거리 측의 반사면으로부터의 반사음의 영향에 의하여 차폐효과가 저하된다. 즉, 원거리 측의 반사면의 높이가 근거리 측의 레일 높이보다 1.5m 이상인 경우에는 높이가 1m 마다 0.5 dB 정도 차폐효과가 감소된다. 이 보정은 반사면의 높이가 1.5m 미만인 때 혹은 15° 이상 외측으로 경사된 경우에는 적용하지 않는다.

4) 반사음 보정

영국에서의 소음방지기준에 의한 소음레벨의 계산방법⁵⁾은 건물전면으로부터 1m의 이격거리에서 수행하도록 되어있다. 건물로부터의 반사음에 대한 보정은 계산치에 일률적으로 1.5 dB를 합하여 계산한다. 선로의 반사측에 건물 등의 반사물이 존재하는 경우에는 수음점으로부터 반사물을 정면으로 하여 각도의 총합을 θ 라 하면 보정치는 $+1.5 (\theta / \theta)$ dB로 주어진다. 여기서 θ 는 음원 전체를 향한 각도이다.

5) L_{eq} 의 산출

차량형식별의 열차 통과횟수로부터 분할된 각 구간마다 등가소음레벨 L_{eq} 를 산출하고, 최종적으로 대상지점에서의 합성소음도를 예측치로 한다.

4. 노르웨이

1984년에 철도소음의 예측기법을 발표하였던 노르웨이에서는 새로운 데이터의 수집을 포함하여 예측 방법을 개정하였다⁶⁾. 내용적으로는 위에 서술한 독일, 영국의 수법과 공통된 점이 다수이지만 여기에서는 특징적인 몇가지를 서술한다.

1) 예측량

최종적인 예측량은 L_{eq} (19)과 L_{Amax} 이지만 옥타브밴드 음압레벨도 포함하여 산출한다.

2) 음원 모델

음원을 몇 개의 요소 (궤도로부터 수음점까지의 거리를 1/2 이하)로 분할하고 각 요소의 중심에 점음원을 가상하여 계산을 행한다. 점음원의 높이는 전동음이나 디젤 엔진음 등의 음원의 종류나 대상 주파수에 따라서 결정한다.

3) 음원 파워 레벨

단위거리당의 음원 파워레벨은 다음 식으로 주어진다.

$$PWL = a \log (V/100) + 10 \log (T) + b \quad (21)$$

여기에서, V : 열차속도(km/h), T : 열차길이(m), a , b : 주파수와 열차종류에 따라 결정되는 정수

4) 소음전파

소음의 전파에 있어서는 거리감쇠, 공기흡음, 지표면이나 초목에 의한 감쇠, 건물로부터의 반사등의 요인을 국제규격 ISO 9613⁷⁾의 내용을 고려하여 준용한다.

5) 기타

반사음 영향에 의한 차폐효과 감쇠($\Delta L'$)는 다음 식에 의해 보정한다.

$$\Delta L' = \Delta L \{1 - 5 / (3d)\} \quad (22)$$

여기에서,

ΔL : 반사음의 영향이 없는 경우의 감쇠량, d : 음 원으로부터 수음점까지의 수평거리 (m)

5. 네덜란드

1984년에 개발된 철도소음의 예측기법⁸⁾은 네덜란드의 소음방지법 중 철도소음레벨을 도출하기 위하여 옥타브 밴드마다 계산을 수행하는 방법, 소음레벨만을 계산하는 간단한 방법, 대상지역에서의 현장측정을 수행하는 방법의 3종류가 제시되고 있다. 단, 경비, 재현성, 검토의 난이성 때문에 현장 측정은 그다지 추천되지 않고 있다.

III. 결론 및 향후과제

본 논문에서는 우리나라에서 철도소음의 영향평가를 위해 사용되어 오고 있는 기존 예측식의 한계를 조사하였고, 철도선진국이 보유하고 있는 예측식의 예측방법을 국가별로 비교검토하였다. 우리나라의 철도소음 예측식을 보다 정확하고 실제적으로 개발하기 위해서는 차량종류를 포함한 차량편성(기관차, 객차, 편성열량 수), 레일특성, 방음벽 설치 유·무, 열차의 속도, 이격거리 및 지표특성 등을 고려한 예측식의 개발이 요구된다. 또한, 향후 예측식의 개발과 더불어 기하음향학에 기초를 둔 예측프로그램을 개발하기 위하여 열차의 음향파위 및 지향성정보를 포함한 소음원특성규명, 즉 위에서 언급된 각종변수를 고려한 철도소음의 주파수 특성 및 분석, 주파수대역의 범위, 철도진동의 영향을 고려하기 위한 각종구조체의 고유주파수분석등도 요구되며, 이러한 원천기술의 확보를 통하여 철도소음의 저감을 위한 체계적인 시도가 가능하리라 예상된다.

사 사

본 논문의 일부는 환경부 환경기술개발사업의 사업비지원에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자에게 감사드립니다.

부호설명

L_{max} : 개별열차 통과시의 평균 최대소음도 $dB(A)$, T : 관심 대상소음의 전달지속시간(sec), R_a : 기준거리에 대한 비, ρ : 정지대기의 밀도(g/cm^3), C : 음속 (m/s), J_o : 단위길이당 파워의 차원을 갖는 양, Ω : 적분변수, Pa : Pascal (N/m^2), PWL : 음향 power level, SEL : 25m 이격된 위치에서의 표준적 단발소음폭로레벨(Sound Exposure Level, $dB(A)$), I : 흡음성지표비율(대상지역흡음성지표면적 / 전체면적)

참고문헌

- 1) 加來治郎, 1996, 鐵道騒音の豫測手法の現況, 騒音制御, 20(3), 11-16.
- 2) 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, 4(2).
- 3) 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, 20(3).
- 4) Verkehrslrmschutzverordnung -16, BImSchV 1990.
- 5) Calculation of railway noise(Draft for public comment), The Department of Transport, UK
- 6) M. Ringheim : The Revised Nordic Prediction Method for Railway Noise. - Some important acoustical aspects - : Proceedings of 5th International Workshop on Railway & Tracked System Noise.
- 7) ISO 9613-2, "Acoustics - Attenuation of Sound During Propagation Outdoors - Part II: General Method of Calculation", ISO Geneva, 1996
- 8) C. J. M Van Ruiten, 1988, Dutch Railway Noise Prediction Schemes, Journal of Sound and Vibration, 120(2).