

< 논 문 >

평탄부 선로에서 철도소음의 전파예측에 관한 연구

A Study on the Prediction of Train Noise Propagation from a Level Railroad.

주진수* · 박병전**

Jin-Soo Joo and Byeong-Jeon Park

(1997년 10월 24일 접수 ; 1998년 1월 24일 심사완료)

Key Word : Train Noise (철도소음), Level Rail Road (평탄부 선로), Prediction Model (예측모델), Ground Reflection (지면반사), Barrier Deflection (장벽회절)

ABSTRACT

In order to predict the train noise propagation from a level railroad, this paper presents the model of train noise source and the prediction model based on the results by using the sound intensity method. The prediction model gives the effects of geometric attenuation, ground attenuation, and barrier attenuation of noise. There are several principal assumption in developing model : (a) the train noise is primarily rolling noise; (b) the rail head and wheels are in good condition; (c) the height of source is 10cm above track ; (d) the directivity pattern of train noise sources is a dipole source. Calculated results based on this model are compared with available field data and good agreement has been obtained.

1. 서 론

급격한 도시화의 진행과 함께 도시권으로의 통근, 통학 및 도시간 여객수송 수단으로의 철도 역할에 대한 사회적 요구가 점차 증대되고 있으며, 열차편수 증가와 편성길이 증대 및 고속열차의 신설 등이 계획되고 있다. 이러한 사회적 배경을 환경소음 측면에서 생각해 보면, 소음발생 요인이 증가하는 문제와 더불어 그에 대한 적절한 대책을 강구할 필요성이 있다.

철도소음 문제에 대한 대책으로는, 소음원인 열차나 선로구조 등에 대한 저음화 또는 선로주변에 방음벽 설치 등의 직접적인 소음방지대책과 소음전파 예측방법의 개발 등을 해결책의 한 방법이라 할 수 있다. 그러나, 예측방법의 개발 또는 소음방지대책을 계획할 때에는, 제일 먼저 소음발생원의 소음방

사특성을 기초로 하는 예측방법이나 방지대책이 검토 되어야 한다. 특히, 그러한 소음방지 대책법에 대한 효과의 검토는 예측방법에 의하여 사전에 검토가 이루어져야 보다 효과적인 대책수립이 가능하다.

따라서, 본 논문에서는 평탄부에서의 철도소음 전파예측을 목적으로 하여, 음향 인텐시티법에 의한 주행열차 소음방사특성의 검토결과⁽¹⁾를 바탕으로, 전동음(rolling noise)을 주음원으로 하는 음원 모델화와 지표면의 음향적 특성을 고려하는 소음전파 예측모델을 작성하였다. 예측모델은, bogie중심에 점음원을 갖는 유한 길이의 점음원열 모델을 가정하였다. 또한, 예측모델의 타당성을 검토하기 위하여, 평탄부 선로의 철도소음의 전파성상을 측정하여, 예측결과와 측정결과를 비교·검토 하였다.

2. 철도소음 전파예측 모델

소음의 전파과정에서, 공기온도와 습도 등에 크게

* 정회원, 전북대학교 공업기술연구소

** 전북대학교 공과대학 건축공학과

영향 받는 공기의 음향흡수는 매우 미소하므로⁽¹⁸⁾, 본 연구에서는 장벽에 의한 회절과 지표면에서의 흡음·반사에 주목하는 소음전파 예측모델을 작성하였다. 계산모델은 회절음장 등을 나타낼 때에 이용되는 속도 포텐셜에 의하여 표현되므로 약간 복잡하게 보인다. 그러나, 음원의 주파수특성, 지표면의 음향특성에 관하여 임의의 설정이 가능한 계산모델로, 다양한 입력조건에 대하여 응용이 가능하다. 철도소음의 소음방사특성은 지향성을 갖는 것으로 알려져, 초과감쇠(지표면, 회절) 계산에는 지향성 점음원에 대한 해석해가 필요하다. 그러나, 이에 적절한 해석해가 아직 없기 때문에, 본 연구에서는 계산의 간편화를 위하여 예측식에 지향성 함수를 도입하며, 무지향성 점음원에 대한 해석해를 응용하였다.

2.1 지표면상에서의 음의 전파

본 연구에서는, 음파가 간섭성을 갖는 경우의 지표면상에서의 전파에 대하여, 경계면에서의 음향 임피던스가 경계면 전면에서 일정하다고 가정하는 locally reacting의 경계조건으로 충분하다고 생각하여, 川井의 근사식⁽¹⁹⁾을 이용하였다. 川井에 의하면, 공기와 유한 임피던스를 갖는 반무한의 매질 사이에 높이 h_S 의 점음원S와 높이 h_R 의 수음점 P를 가정하고, 지표면 반사를 고려하면, 수음점에서의 속도포텐셜 ϕ_g 는 시간항 $e^{-i\omega t}$ 을 생략하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_g = \frac{e^{ikr_a}}{r_a} + Q \frac{e^{ikr_b}}{r_b} = \frac{e^{ikr_a}}{r_a} \left\{ 1 + Q \frac{r_a}{r_b} e^{ik(r_b - r_a)} \right\} \quad (1)$$

여기서, r_a, r_b 는 음원 또는 허음원에서 수음점까지 직선거리

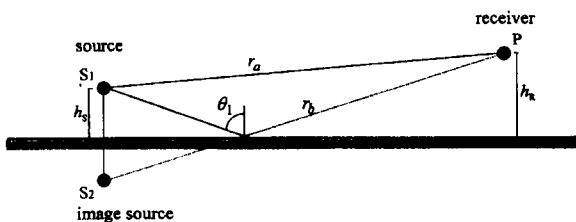


Fig. 1 Reflection of sound from flat ground with angle .

위식에서 Q는 구면파 반사계수를 나타내며, 川井은 다음식으로 유도하고 있다.

$$Q = V + (1-V) \left[\frac{2b(1+\beta \cos \theta_1)}{(\cos \theta_1 + \beta^2)} G(\sqrt{ikr_b} b) \right] - \frac{\pi}{4} < \arg(\sqrt{ikr_b} b) < \frac{3\pi}{4} \quad (2)$$

$$V = \frac{\cos \theta_1 - \beta}{\cos \theta_1 + \beta}$$

$$b = 1 + \beta \cos \theta_1 - \sqrt{1 - \beta^2} \sin \theta_1, \text{ real}(\sqrt{1 - \beta^2}) > 0$$

$$G(z) = 1 + \sqrt{\pi} z \omega(z)$$

$$= 1 + i\sqrt{\pi} z e^{-z^2} \text{erfc}(-iz)$$

$$\omega(z) = e^{-z^2} \text{erfc}(-iz)$$

여기서, x 는 파수, $\omega(z)$ 는 일종의 오차함수,

β 는 지표면 admittance

β 에 대해서는 주파수 f 와 단위 길이의 흐름저항 σ 를 변수로 하는 계산모델식이 제안되어 있으며, 본 연구에서는, Delany & Bazley⁽⁵⁾의 식 (3)을 이용하였다.

$$1/\beta = 1 + 9.08(f/\sigma)^{-0.75} - i1.9(f/\sigma)^{-0.73} \quad (3)$$

2.2 지표면상의 무한장 장벽에 의한 회절음장

지표면 위의 장벽에 의한 회절음장에서는, 음원과 수음점은 지표면에 대한 허상과 장벽에 의한 허상을 함께 고려해야 하기 때문에, 전파경로가 상당히 복잡하다. 또한, 지표면과 장벽은 완전반사체로 간주할 수 없으므로 각 반사면의 음향적 특성을 고려할 필요가 있다.

여기서는, 장벽에 의한 회절음장 ϕ_B 에 대하여, 장벽표면에서의 반사를 제외하고 지표면 반사만을 고려하여, 다음식과 같이 4개의 전파경로에 대하여 고려하였다⁽⁹⁾.

$$\phi_B = U_{11} + Q_S U_{21} + Q_P U_{12} + Q_S Q_P U_{22} \quad (4)$$

식 (4)에서, Q_S, Q_S', Q_P, Q_P' 는 각각 음원측과 수음측 지표면에서의 식 (3)에 의한 반사계수를 나타낸다. U_{ij} 는 음원 S_i 으로부터 수음점 P;로 회절음장으로, 식 (5)와 같이 Keller의 기하광학적 회절 원리에 의하여 기하광학적 음파 U_g 와 회절파 U_d 의 합으로 나타내어진다^(6,7). 회절파 U_d 에 대해서는 Bowman & Senior에 의한 회절 근사해⁽⁸⁾를

이용하였다

$$U(\theta_0) = U_g(\theta_0) + U_d(\theta_0)$$

$$U_g(\theta_0) = \begin{cases} e^{ikR}/R & \text{for } \cos((\theta - \theta_0)/2) > 0 \\ 0 & \text{for } \cos((\theta - \theta_0)/2) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$U_d(\theta_0) = \pm i \sqrt{\frac{2}{\pi R_1 (R_1 + R)}} e^{i(kR + \frac{\pi}{4})} F(|\tau_R|)$$

$$\tau_R = \pm \sqrt{k(R_1 - R)} \quad \pm \text{for } \cos((\theta - \theta_0)/2) \geq 0$$

여기서, R 은 음원과 수음점과의 직선 거리, R_1 은 음원에서 장벽을 넘어 수음점에 도달하는 최단거리, $F(x)$ 는 Fresnel 적분, θ, θ_0 는 Fig. 2 참조.

2.3 전동음의 음원모델

철도소음에 대한 음원모델로는 점음원이 연속하여 나열되어 있는 유한길이 선음원모델과 점음원이 일정한 간격으로 나열되어 있는 점음원열 모델을 들 수 있다. 본 연구에서는, 음향 인텐시티법에 의한 주행열차의 음향방사특성 검토결과를 바탕으로⁽¹⁾, 레일과 wheel의 상호 마찰작용에 의한 전동음을 주음원으로 가정하고, Fig. 3과 같이 등파위를 갖는 점음원이 선로 중심선상에 나열되어 있는 점음원열 모델을 생각하였다.

음원의 축은 지표면에 수평이며, 음원점 위치는 bogie중심(1차량 2음원)으로 하며, 이들 음원이 한 열차 길이에 걸쳐서 레도면 위 10 cm에 일직선으로 배열되어 있는 점음원열 모델을 가정하였다. 음원모델에 대하여 $\cos^n \theta$ 의 지향성 점음원열 모델로 가정하면, 자유공간에서 점음원으로부터 거리 r 떨어진 수음점 R 에서의 음압은 다음식과 같이 각 점음원의 기여에 의한 음압의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\overline{p_{R1}}^2 = \sum_{i=1}^N \frac{\rho c W}{4\pi r_i^2} \cos^n \theta_i$$

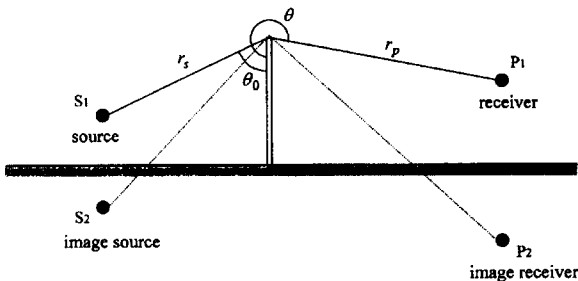


Fig. 2 Geometry a barrier, source, and receiver on the ground.

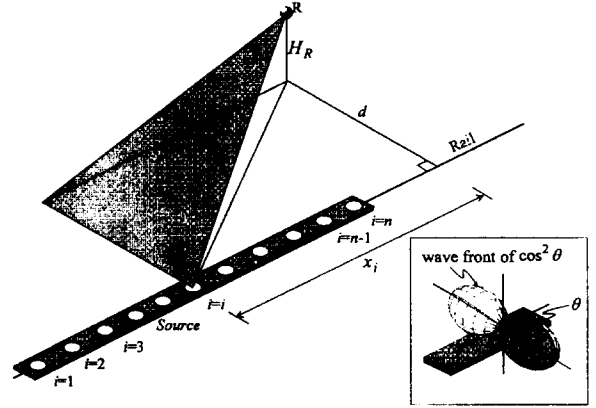


Fig. 3 Source and receiver geometry for train noise model in a level railroad.

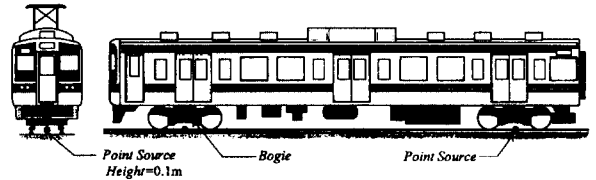


Fig. 4 Model of train noise source.

$$r_i = \sqrt{(d^2 + H_R^2) + x_i^2} \quad (6)$$

여기서, W 는 전동음을 가정한 점음원의 파워, H_R 은 수음점 높이, θ 는 Fig. 3에 나타냄, N 은 음원 개수, i 는 음원번호, c 는 음속, ρ 는 밀도, n 은 지향성을 나타내는 계수.

2.4 소음전파 예측모델

평탄부에서의 소음전파 예측모델은, 지표면과 장벽에 의한 초과감쇠를 고려하는 모델을 생각하였다. 따라서, 전동음 기여에 의한 수음점에서의 소음레벨의 unit pattern을 구축하는 음압 $\overline{p_{R2}}^2$ 과 소음레벨 L_{P2} 는, 전동음의 음원모델 식 (6)에 초과감쇠항을 고려하여 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$\overline{p_{R2}}^2 = \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{\rho c W}{4\pi r_i^2} \cos^n \theta_i \left| \frac{\phi_i}{\phi_f} \right|^2 \right\} \quad (7)$$

$$L_{P2} = 10 \log \left[\sum_{f=1}^{21} \left\{ 10^{\frac{L_w}{10}} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{1}{4\pi r_i^2} \cos^n \theta_i \left| \frac{\phi_i}{\phi_f} \right|^2 \right\} \right] \quad (8)$$

여기서, L_w 는 전동음을 가정한 점음원의 파워레

벨(1/3oct. band, A-weighted), f 는 주파수 (50~5000 Hz), ϕ_1 은 식 (1) 또는 식 (4)에 의한 속도 포텐셜, ϕ_f 는 자유공간에서 점음원으로 부터 거리 r_a 에서의 속도포텐셜(= e^{ikr_a}/r_a).

3. 소음전파측정

예측모델에 대한 타당성 검토와 철도소음의 전파 성상을 조사하기 위하여, 선로주위에 반사나 암소음의 영향이 거의 없다고 판단되는 평탄부 선로(ballast궤도, long rail)를 택하여 음압측정을 하였다. 측정은, Fig. 5에 나타내는 바와 같이 선로에 대하여 수직으로 측선을 설정하고, 측정점을 좌우대칭(합계 10점)이 되게 하여 실시하였다. 측정점은 궤도중심에서부터 좌우로 12.5 m, 25.0 m, 50.0 m, 100.0 m의 위치에 높이 1.2 m로 설정하였다. 소음계에서 받아 들인 신호는 PCM data recorder(8ch. SONY) 2대에 나누어 동시 녹음하였다. 또한, 바람에 의한 측정오차를 줄이기 위하여 풍속계와 풍향계를 설치하여, 풍향·풍속을 동시에 측정하였다.

분석방법은, 녹음신호를 재생, real-time frequency analyzer(B & K 2133)에 입력하여, 50 Hz~5 kHz의 1/3옥타브 밴드(시정수:1초, sampling 간격:1/8초)의 분석을 하였다. 그 결과를 퍼스널 컴

퓨터에 입력하여 소음레벨을 구하였다. 소음레벨 평가량으로는, 소음레벨의 SLOW peak값보다 10 dB 낮은 레벨을 넘는 범위에서의 적분치 Exposure level L_{AE} 를 구하였다. 측정일에는 거의 바람이 없는 상태이었으나, 분석시에 통과열차별로 좌우 측정점의 소음레벨을 비교하여 검토자료로서의 사용여부를 정하였다.

4. 계산결과와 측정결과의 대응

4.1 전동음 지향특성의 검토

음압측정 결과를 이용하여, 전동음의 지향특성을 나타내는 계수 n 에 대하여 검토하였다. 검토방법은 계수 n 에 해당하는 각각의 음원의 파워레벨을 구하고, 산출한 파워레벨과 예측모델을 이용한 계산결과를 측정결과와 비교하였다.

예측계산에서의 전동음 파워레벨 L_w 은, 거리 9.5 m에서 측정된 소음레벨의 시간평균값 $\overline{L_A}$ (peak값보다 10 dB 낮은 범위를 넘는 범위)를 이용하여, 식 (8)과 같은 형태의 다음식으로 산출하였다.

$$L_w = 10 \log \left[n \cdot 10^{\frac{\overline{L_A}}{10}} / \sum_{i=1}^n \left\{ \sum_{l=1}^N \frac{1}{4\pi r_l^2} \cos^2 \theta \left| \frac{\phi_s}{\phi_f} \right|_l^2 \right\} \right] \quad (9)$$

여기서, $t = 1, 2, 3, \dots, n$: 샘플링 간격 Δt 마다의 적분범위 시간

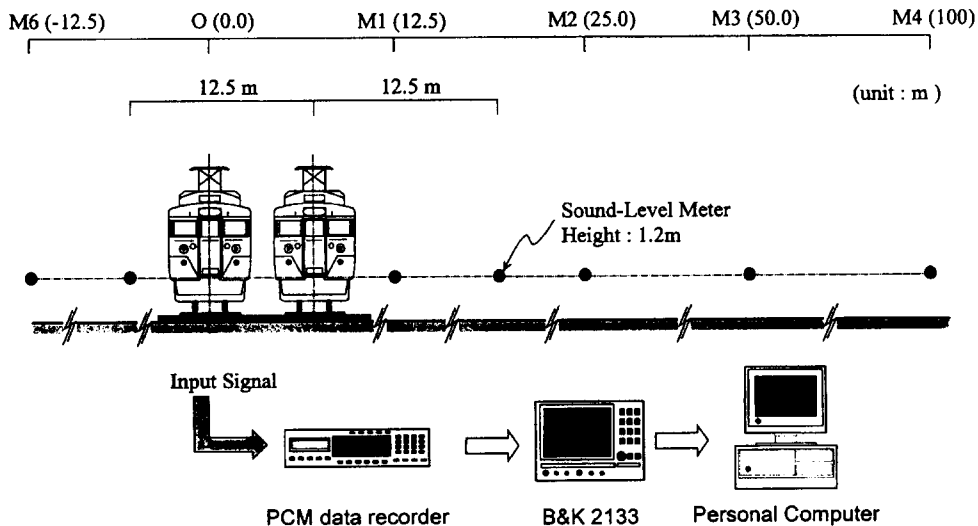


Fig. 5 Measurement and analysis of sound pressure level

측정한 모든 열차에 대하여, 지향성 계수별 음향 파워레벨을 산출하고, 각 측정점에서 계수 n 에 대하여 구한 소음레벨의 시간과형으로부터 L_{AE} 를 계

산하여 실측치와 비교·검토 하였다. 지향성 계수별 검토결과를 Fig. 6에 나타낸다. 예측계산에서, 지표면의 음향특성 값으로는 측정현장 지표면(밭)을 고려하여 300 kPa·s/m'로 설정하였다. 비교결과를 보면, 전동음의 지향성을 나타내는 계수 $n=0$ (무지향성의 점음원열), $n=1$ (지향특성 $\cos\theta$ 의 점음원열) 및 $n=2$ (지향특성 $\cos^2\theta$ 의 점음원열)의 어느 것에 대해서도 계산결과와 실측결과와의 상관계수는 0.99 이상으로 상당히 높은 대응성을 보이며, 표준편차도 작게 나타났다. 그러나, 전체적으로는 $n=0$, $n=1$ 그리고 $n=2$ 의 점음원열 모델 순으로 계산치와 실측치와의 대응관계가 좋아지는 경향을 보이고 있다. 특히, $n=2$ 의 점음원열 모델의 경우, 표준편차는 1.22 dB, 45° 직선상에서의 계산치와 실측치와의 대응을 나타내는 RMS값은 1.26 dB로 아주 좋은 결과가 얻어졌다.

이 결과에 의하면, 음향 인텐시티법에 의한 검토결과와 마찬가지로 전동음의 음원모델은, 계수 $n=2$ 의 $\cos^2\theta$ 지향성을 갖는 점음원열 모델로 설정하는 것이 타당한 것으로 판단되었다.

4.2 전동음원 높이의 검토

음향 인텐시티법에 의한 검토결과를 바탕으로 설정한 전동음의 음원높이를 검토하기 위하여, 소음레벨의 거리감쇠 특성에 대하여 계산치와 실측치와의 대응성을 조사하였다. 계산은 음원높이를 10 cm, 30 cm, 50 cm, 100 cm로 가정하고, 식 (8)에 의하여 각 높이별로 열차의 파워레벨(지향특성 $\cos^2\theta$)을 산출하여 예측점의 소음레벨 L_{AE} 를 구하였다. 계산치와 실측치와의 비교결과를 Fig. 7에 나타낸다(편성길이: 11 대, 속도: 100 km/h).

이 결과에 의하면, 인텐시티 벡터에 의한 검토결과와 같이 전동음의 음원높이를 10 cm로 가정한 경우의 계산치와 실측치와의 사이에 아주 좋은 대응관계에 있음을 알 수 있다. 한편, 음원높이를 높게 설정하는 경우, 선로에서 거리가 멀어짐에 따라 계산결과와 실측결과와의 사이에는 상당히 큰 오차가 발생하는 것을 알 수 있다.

5. 지표면 음향특성과 방음벽에 의한 영향 예측

5.1 지표면 음향특성의 영향 예측

소음전파 예측모델은, 지표면에서의 복소 반사계수 Q 를 각각의 반사경로 음파에 곱함에 따라 지표

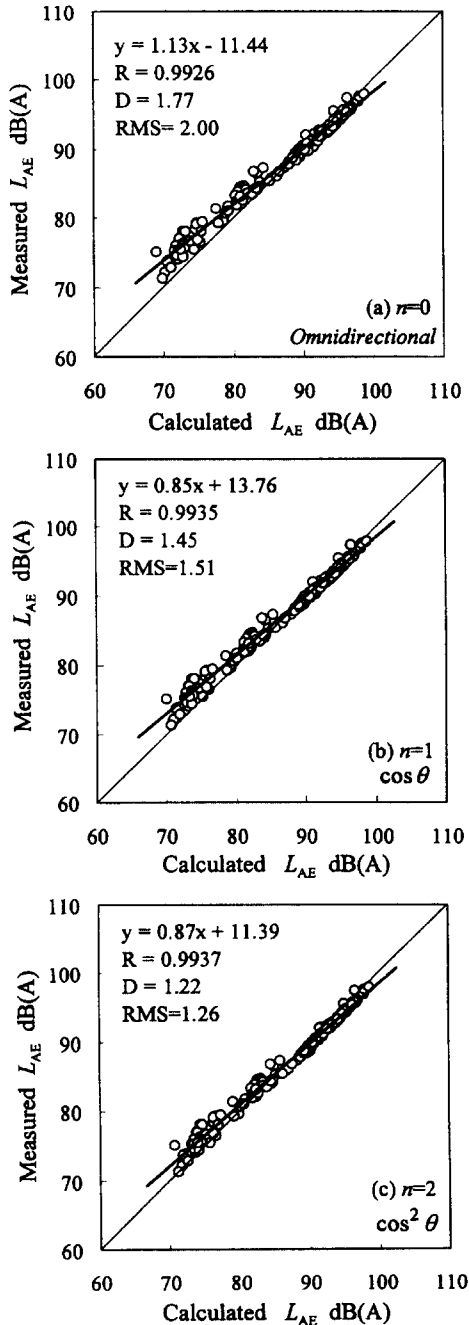


Fig. 6 Comparison between calculated and measured results for each radiation coefficient (R: correlation coefficient, D: standard deviation).

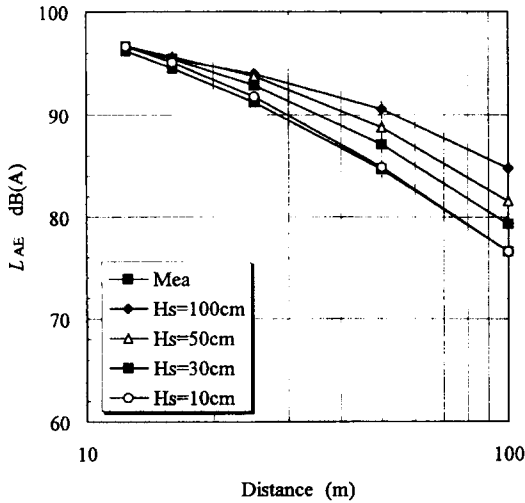


Fig. 7 Comparison between measured and that of calculated using the height varied of source

면의 음향특성을 계산에 고려하고 있다. 복소 반사 계수는 주파수, 지표면에서의 반사각, 전파거리 및 지표면의 흐름저항값 등에 의하여 계산되며, 주파수의존성을 갖는다. 여기서는, 예측모델을 이용하여 지표면 음향특성의 차이에 의한 열차소음 전파특성의 변화에 대하여 검토하였다. 계산은, 측선상에 가상의 단면(높이 13 m×거리 10~100 m)을 설정하여, 가로 2 m×세로 1 m 간격으로 열차 통과간의 소음레벨 L_{AE} 을 구하였다. 지표면의 음향특성은, 흡음성의 $300 \text{ kPa} \cdot \text{s/m}^2$ 과 반사성의 $20000 \text{ kPa} \cdot \text{s/m}^2$ (아스팔트에 해당 함)으로 설정하였다. 열차는 4.2에서 검토한 열차와 동일하다.

계산결과를 Fig. 8에 나타낸다. 흡음성 지표면(a)과 반사성 지표면(b)의 계산결과를 비교하여 보면, 소음레벨의 전파특성이 크게 다른 등압선도를 나타내고 있다. 열차소음의 전파특성은 전파경로상의 지표면 음향특성에 의하여 크게 변하여, 반사성 지표면에서 전체적으로 소음레벨이 증가하며, 특히 지표면 부근에서의 증가가 현저하게 나타났다.

5.2 방음벽에 의한 영향 예측

철도소음의 전파방지 대책으로 방음벽이 많이 사

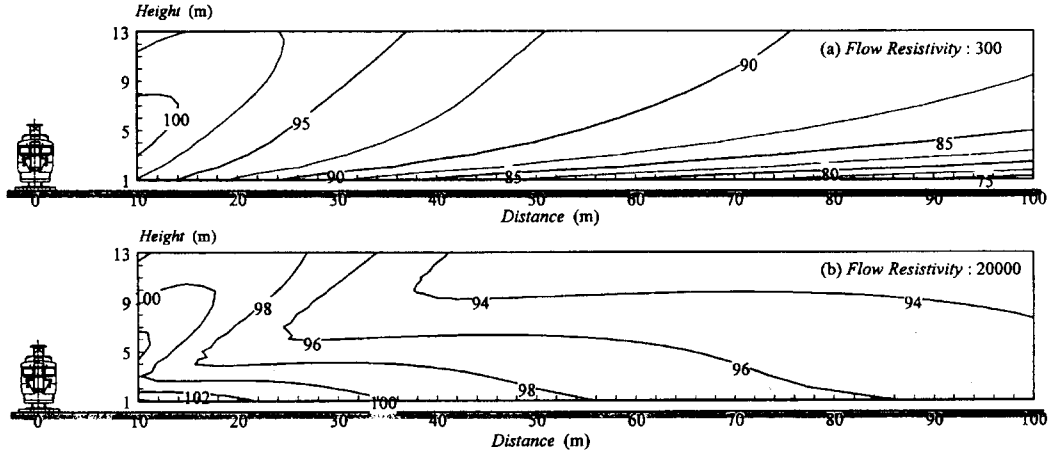


Fig. 8 Calculated sound exposure level distribution. Specific flow resistivity is parameter.

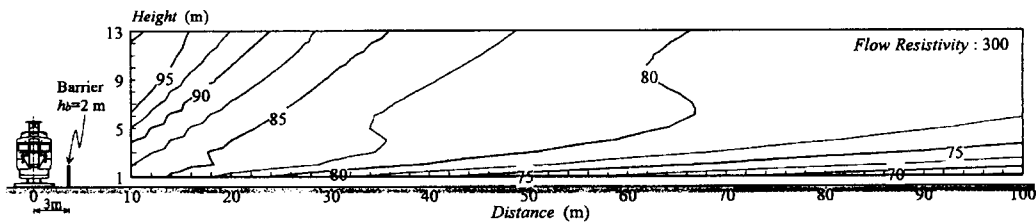


Fig. 9 Calculated sound exposure level distribution with semi infinite noise barrier along the track

용되고 있어, 측정현장의 선로를 따라 방음벽이 설치되는 경우를 가정하여, 예측모델을 이용한 계산적 검토를 하였다. 상기와 동일한 열차를 대상으로 가상단면내의 소음레벨 분포를 구하였다. 방음벽은 선로중심에서 거리 3 m, 높이 2 m의 장벽을 가정하고, 지표면의 음향특성은 $300 \text{ kPa} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 으로 하였다.

회절음장에 관한 식 (4)를 이용한 계산결과를 Fig. 9에 나타낸다. 방음벽이 없는 상태의 Fig. 8(a)와 비교하여 보면, 방음벽 설치에 따라 소음레벨 분포가 크게 변화하고 있으며, 약 10 dB~20dB 정도의 회절 감쇠량을 보이는 계산결과가 얻어졌다. 실제로 열차와 장벽과의 다중반사에 의한 영향을 고려하면, 회절 감쇠량은 약간 감소할 것으로 여겨진다.

6. 결 론

평탄부 선로에서 철도소음의 전파예측을 목적으로, 음원 모델화를 통하여 열차를 유한길이의 지향성 점음원열 모델로 가정한 예측모델을 작성하였다. 예측모델은 음원의 주파수 특성, 지표면의 음향특성에 관하여 임의의 설정이 가능하며, 수음점에서 열차 통과간의 소음레벨의 시간파형을 구할 수 있다. 작성된 예측모델의 타당성을 조사하기 위하여, 현장 측정을 실시하였으며, 지향성 계수별 및 음원 높이별로 소음레벨의 예측치와 실측치와의 대응성을 검토하였다. 예측계산은 잘 정비된 레일(long rail)과 wheel 그리고 전동음을 주음원으로 가정하고 있으나, 음원높이는 궤도면 위 10 cm, 지향특성은 $\cos^2\theta$ 로 설정하였을 경우의 예측치와 현장측정한 측정치와의 사이에 매우 좋은 대응관계를 나타냈다. 이것은 음향인텐시티법을 이용한 검토결과와 동일한 결과로서, 본 연구에서 제안한 음원모델 및 예측모델을 이용하여, 평탄부 선로에서의 철도소음에 대한 전파예측이 가능하다는 것을 확인하였다. 특히, 지표면의 음향특성과 방음벽에 의한 영향을 고려하는 예측계산이 이루어지기 때문에 철도소음에 대한 적절한 차음대책의 검토에도 활용할 수 있으리라 생각된다.

후 기

본 논문의 작성에는 日本 東京大學 生産技術研究所 橘 秀樹(H. Tachibana)교수로부터 많은 도움이 있었음을 첨언한다.

참 고 문 헌

- (1) 주진수, "음향 인텐시티법을 이용한 주행열차의 음향방사특성의 검토," 한국소음진동공학회지.
- (2) 주진수, 日高新人 외, 1995, "철도소음의 전파예측에 관하여," 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, p. 111.
- (3) 日高新人, 朱鎮洙 他, 1995, "音響インテンシティによる鐵道車輛の音響放射特性の検討," 日本音響學會 騒音・振動研究會資料, 番號 N-95-56.
- (4) 橘 秀樹, 日高新人 他, 1996, "音響インテンシティによる新幹線車輛の音響放射特性の検討," 生産研究, Vol. 49, No. 2.
- (5) M. E. Delany and E. N. Bazley, 1970, "Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials," *Appl. Acoust.* 3, pp.105~116.
- (6) J. B. Keller, 1915, "Geometrical Theory of Diffraction," *J. Oct. Soc. Am.* 52, pp. 116~130.
- (7) H. M. Macdonald, 1915, "A Class of Diffraction Problems," *Proc. London Math. Soc.* 14, pp. 410~427.
- (8) J. J. Bowman, T. B. A. Senior, and P. L. E. Uslenghi, *Electromagnetic and Acoustic Scattering by Simple Shape* (North-Holland, Amsterdam, 1969), pp. 308~345.
- (9) H. G. Jonasson, 1972, "Sound Reduction by Barriers on the Ground," *Journal of Sound and Vibration*, 22, pp. 113~126.
- (10) L. G. Kurzweil, W. N. Cobb and R. P. Kendig, 1979, "Propagation of Noise from Rail Lines," *Journal of Sound and Vibration*, 66(3), pp.389~405.
- (11) J. Lang, 1989, "A Model to Calculate Railway Noise," *INTERNOISE 89*, pp. 1243~1248.
- (12) E. J. Rathe, 1977, "Railway Noise Propagation," *Journal of Sound and Vibration*, 51(3), pp. 371~388.
- (13) D. H. Cato, 1976, "Prediction of Environmental Noise from Fast Electric Trains," *Journal of Sound and Vibration*, 46(4), pp. 483~500.
- (14) S. Peters, 1974, "The Prediction of Railway Noise Profiles," *Journal of Sound*

- and Vibration*, 32(1), pp. 87~99.
- (15) P. J. Remington, 1985, "Prediction of the Effectiveness of Noise Control treatments on Urban Rail Elevated Structures," *Journal of the Acoustical Society of America*, 78, pp. 2017~2033.
- (16) P. M. Nelson, 1987, *Transportation Noise Reference Book*, Butterworth.
- (17) Leo L. Beranek, Istvan L. Ver, 1992, *Noise and Vibration Control Engineering* (JHON WILEY & SONS, INC).
- (18) 新建築學大系 10, 第5章, 音・振動, pp. 229~312
- (19) 川井孝雄, Locally reactingな境界面上の音の傳播に関する研究, 日本音響學會誌, 39卷, pp. 374~379