한국소음진동공학회 1997년도 추계학술대회논문집, pp. 302~307.

# 성토 선로구조에서 철도소음의 전파예측

○ 주 진 수, 박병전, 橘 秀樹

*Prediction of train noise propagation from a embanked rail road.*

○ *J. S. Joo*, B. J. Park* and H. Tachibana***

## 1. 서 론

철도는 평탄부, 고가부 및 성토부·절토부 등의 다양한 지형구조에 걸쳐서 뻗어 있으며, 지금까지는 평탄부[1]와 고가부[2]를 대상으로 하여 철도소음의 전파예측에 대한 검토를 해왔다. 본 연구에서는, 유한 임피던스의 흡음성 Wedge 구조를 갖는 성토부 선로의 주행열차를 대상으로 소음전파 예측모델의 작성 및 소음전파 측정을 통하여 성토 선로구조에서의 철도소음 전파예측에 대하여 검토하였다.

## 2. 예측모델 및 계산조건

유한 임피던스를 갖는 흡음성 Wedge가 있는 성토부·절토부의 지형구조에서 있어서 소음전파는, 지표면에서의 반사음과 더불어 Wedge 에서의 회절과 성토부 경사면에서의 반사 영향을 고려할 필요가 있다[3].

필자 등은 주행열차 소음에 대한 점음원열 모델은 지향특성 $\cos^2\theta$ 의 점음원이 일직선으로 나열되어 있다고 가정하고 있으나[1,2], 지향성 음원에 대한 다중 Wedge 에서의 음전파에 관한 해석해는 아직까지 발표된 것이 없다. 따라서, 다중 Wedge 에서의 철도소음전파에 대한 기초적 검토를 위하여, 예측모델에 지향성 함수를 도입하며, 다중 Wedge 에서의 무지향성 점음원에 대한 해석해를 응용하는 예

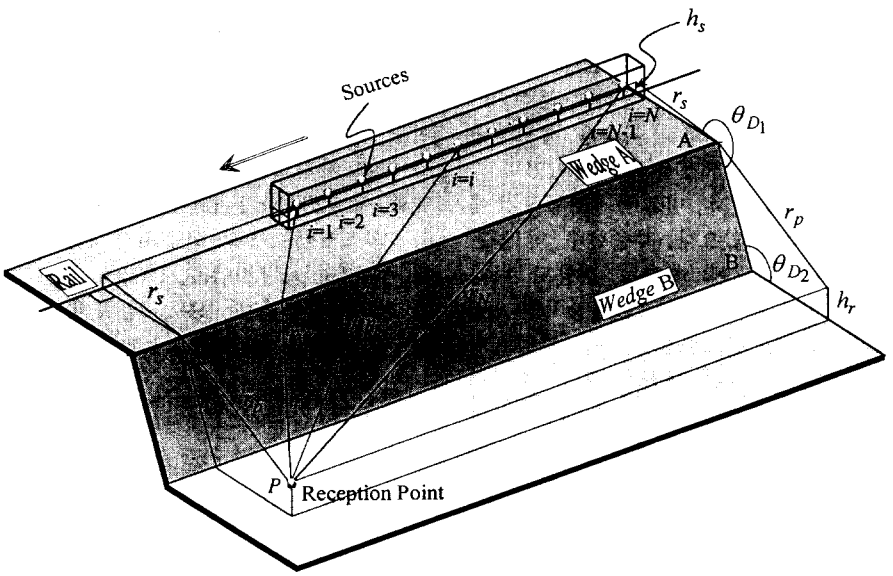



*Fig.1 Geometry of railway and reception point in embanked rail road.*

*Chonbuk university, ** I. I. S., University of Tokyo

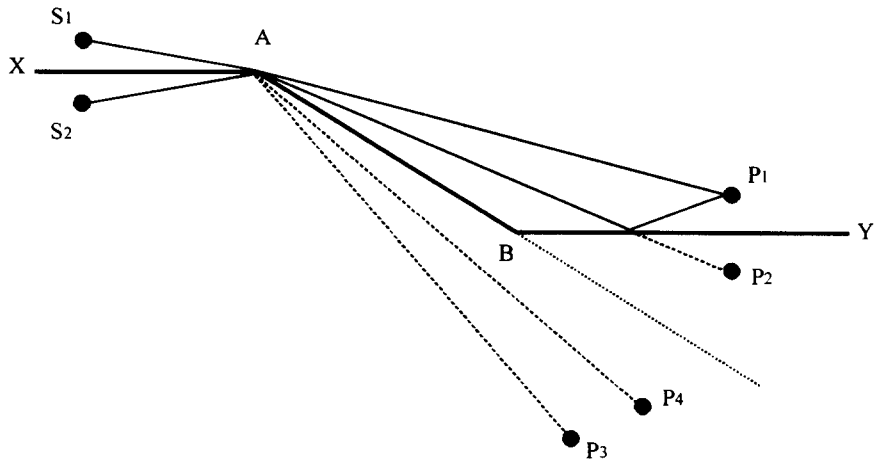



*Fig.2 Geometry a point source and reception point.*

측모델을 작성하였다.

본 연구에서는, 흡음성 Wedge 에서 음파의 전파 계산에는 松井 [3]에 의한 해석해를 응용하였다. 松井는, Wedge 에서의 회절과 경계면에서의 반사를 고려하기 위하여, Kouyoumjian[12]가 제안하고 있는 완전반사성 단일 Wedge 에서의 회절에 대한 해석해와 川井 [5]에 의한 지표면에서의 반사계수를 구하는 근사해를 이용하고 있다.

그림 1 에 나타내는 성토부 선로상의 점음원열에서, 점음원 $i$ 로부터 수음점에 기여하는 속도포텐셜 $\phi_w$ 은, 그림 2 와 같이 음원측 및 수음측 지표면과 경사면에 대한 허상을 고려하여 8 개 이상의 전파경로에 대하여 계산을 할 필요가 있다. 점음원열 모델에 대해서는, 열차 전체에 해당하는 점음원에 대하여 반복 계산하여 그 합을 취한다. 따라서, 성토부 열차에 대한 수음점에서의 소음레벨의 시간파형(unit pattern)을 구하기 위한 소음레벨 $L_p$ 는, 전동음을 음원(높이:침목위 10 cm)으로 가정한 점음원의 A-weighted 음향파워레벨을 이용하여, 다음 식과 같이 나타내었다.

### 3. 측정 및 분석

성토부에서 철도소음의 전파성상을 조사하기 위

$$L_p = 10\log\left[\sum_{f=1}^{21}\left\{10^{\frac{L_W}{10}}\cdot\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{4\pi r_i^{\,2}}\cos^2\theta_i\left|\frac{\phi_w}{\phi_f}\right|_i^2\right\}_f\right] \tag{1}$$

$$\begin{aligned}\phi_w = {} & U_{11} + Q_S U_{21} + Q_P U_{12} + Q_{S'}Q_{P'}U_{22} + Q_W U_{13} \\ & + Q_S Q_W U_{23} + Q_{W'}Q_{P'}U_{14} + Q_{S'}Q_{W'}Q_{P'}U_{24}\end{aligned} \tag{2}$$

$$U_{SP} = \frac{e^{ikR}}{R}\cdot D_{W_A}\left(\theta_{w1}, R_{wd1}, R_{wg1}, \theta_{D1}/\pi\right)\cdot D_{W_B}\left(\theta_{w2}, R_{wd2}, R_{wg2}, \theta_{D2}/\pi\right) \tag{3}$$

단, $L_W$ 전동음을 가정한 점음원의 1/3 oct. band 의 A-weighted 파워레벨, $f$ 는 1/3 oct. band 중심주파수, $Q_S$, $Q_{S'}$ 는 면AX, $Q_P$, $Q_{P'}$ 는 면BY, $Q_W$, $Q_{W'}$ 는 면AB에서 반사계수, $D_{W_A}$, $D_{W_B}$ 는 각 Wedge에서의 회절계수, $R_g$ 는 음원 $S$ 에서 수음점 $P$ 까지의 직선거리 (m), $R_d$ 는 Wedge 정점을 지나는 최단거리(m), $\theta_w$ 는 그 때의 전파경로간의 사이각, $R$ 은 전파 최단거리 (m), $\theta_D$ 는 Wedge 각

$$D_W\left(\theta, R_d, R_g, \nu\right)$$

$$= \begin{cases} -0 & \text{for } \theta \geq \pi + \nu\pi \\ \dfrac{e^{-i\pi/4}}{\sqrt{\nu\pi}} \sin\left(\dfrac{\pi-\theta}{2}\right) \cot\left(\dfrac{\pi-\theta}{2\nu}\right) F(\tau) & \text{for } \pi + \nu\pi > \theta \geq \pi \\ 1 - \dfrac{e^{-i\pi/4}}{\sqrt{\nu\pi}} \sin\left(\dfrac{\pi-\theta}{2}\right) \cot\left(\dfrac{\pi-\theta}{2\nu}\right) F(\tau) \dfrac{R_g}{R_d} e^{ik\left(R_d - R_g\right)} & \text{for } \pi > \theta \geq \pi - \nu\pi \\ -1 & \text{for } \pi - \nu\pi > \theta \end{cases} \quad (4)$$

$$\tau = k\left\{\left(R_d{}^2 - R_g{}^2\right)/2R_d\right\}$$

하여, 선로주위가 넓게 펼쳐진 (반사물과 암소음 영향이 거의 없는) 성토구조 선로(ballast 궤도, long rail)를 대상으로 소음전파 측정을 하였다. 선로는 상부 wedge 각도 약 212°, 하부 wedge 각도 약 147°의 단면 구조를 갖으며, 수음측 지표면은 부드러운 흙의 밭과 초지, 성토부 경사면은 초지로 되어 있다.

측정점은 그림 3 과 같이 선로 높이를 고려하여, 선로에 대한 연직 단면내에 세로방향 4 점(1.2, 3.0, 6.0, 9.0m) 과 가로방향 4 점(15, 25, 50, 100m)에 설치하였으며, 노견에도 2 점을 설치하였다(합계 18 점). 관측신호는, 노견에 설치한 광전관 신호와 함께 8ch DAT 녹음기 3 대에 수록하였다. 열차 통과속도는 광전관 신호를 이용하여 구하였다.

분석방법은, 녹음신호를 재생하여 실시간 주파수 분석기(B&K2133)에 입력하여, 50Hz ~ 5kHz 의 1/3oct.band 별로 125ms 의 샘플링을 하였다(시정수 1s). 그 결과를 퍼스널 컴퓨터에 입력하여 소음레벨을 구하였다. 소음레벨의 평가량으로는, 소음레벨이 피크값보다 10dB 낮은 레벨을 초과하는 범위에서의 Exposure level( $L_{AE}$ )를 구하였다.

## 4. 계산결과와 측정결과의 비교

### 4.1 소음레벨의 Unit Pattern

성토부 선로구조에 대한 소음전파 예측모델의 타당성을 조사하기 위하여, 실측결과와 예측모델에 의한 소음레벨의 시간파형을 구하여, 서로의 대응관계를 조사하였다. 계산은 철제열차(8 량, 94 ㎞/h)를 대상으로 하였으며, 음원측, 수음측 및 경사면의 흐름저항치는 300kPas/㎡으로 설정하였다. 그림 4 에 검토예를 나타낸다. 굵은 실선은 측정결과, 가는 실선은 계산결과에 암소음 53dB 보정을 한 결과로, 계산결과와 실측결과는 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

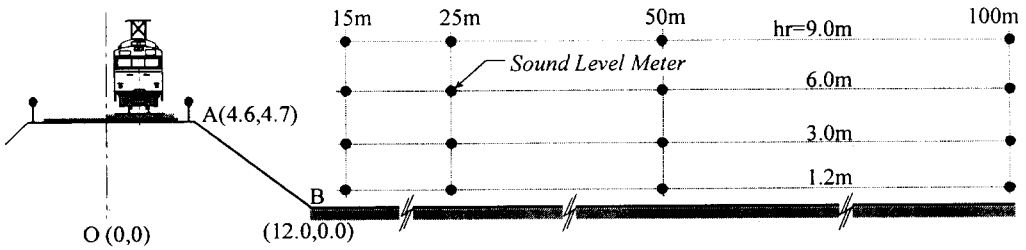



*Fig.3 Measurement of sound pressure level.*

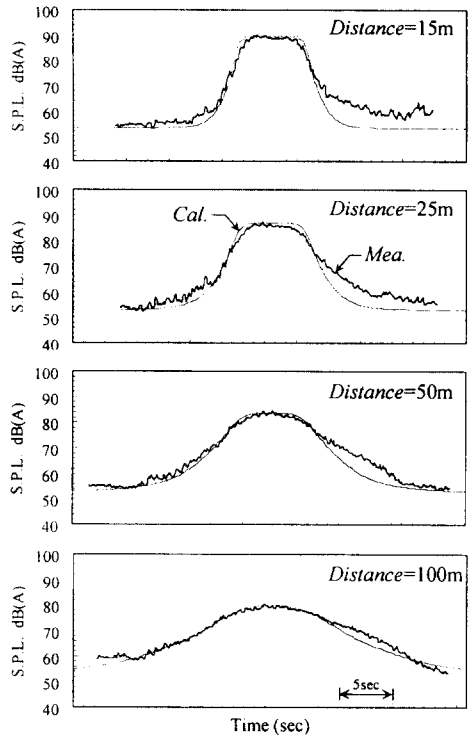



*Fig.4 Comparison between measured and calculated train noise patterns (H : 6m).*

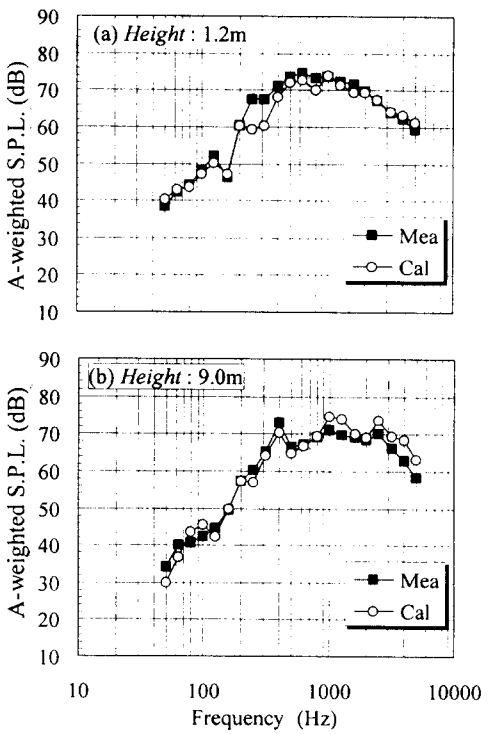



*Fig.5 Comparison between measured and calculated sound pressure level ; (a): near train, (b): far train.*

4.2 소음레벨의 주파수특성 비교

예측모델에 의한 계산결과와 실측결과를 이용하여, 음압레벨의 주파수특성(A 특성, 1/3oct. band)을 구하여 서로의 대응성을 검토하였다. 측정측 선로의 열차(8 량, 94 ㎞/h)와 반대쪽 선로의 열차(8 량, 84 ㎞/h)를 대상으로, 거리 25m 에서 각각 높이 1.2m 와 9.0m 의 측정점에 대한 비교 결과를 그림 5 에 나타낸다.

그림 5 에서 ■은 측정결과, ○은 계산결과를 나타낸다. 계산치와 실측치와의 사이에는 주파수밴드에 따라 약간의 차이는 보이지만, 모든 측정점에서 두 열차에 대한 계산치와 실측치는 비교적 좋은 대응관계를 나타냈다.

4.3 반사 경계면의 음향특성에 의한 영향

성토부에서는, 앞에서 서술한 바와 같이 음원측, 수음측에 더불어 경사면에 대한 지표면의 음향특성을 고려해야 한다. 이에 대하여, 여기서는 실측치와의 비교는 할 수 없으나, 지표면의 음향특성이 소음전파에 미치는 영향에 대하여 예측모델을 이용하여 검토하였다.

계산에서는, 측선상의 전측정점을 포함하는 가상의 단면(높이:13m, 거리:14~100m)을 설정하고, 가로 1m×세로 2m 간격으로 열차 통과간의 Exposure Level 을 구하였다. 검토대상의 열차는, 앞에서 검토한 측정측 선로를 통과하는 열차(8 량, 94 ㎞/h)로 하였으며, 각 반사 경계면의 음향특성은 흡음성의 300kPas/㎡ 과 반사성의 20000kPas/㎡로 가정하여 검토하였다.

검토결과를 그림 6 에 나타낸다. (a)는 측정현장 지표면의 음향적 성질을 고려한 예측모델에 의한 소음레벨의 등압선도에 측정결과를 함께 나타낸 그림

이다. (b)는 반사성 지표면(20000kPas/㎡)을 가정한 계산결과이다. (a)에서 실측결과와 계산결과를 비교하면, 복잡한 음압분포를 보이는 하부 wedge 부근에서 약간의 차이가 나타나지만, 다른 부분에서는 서로 거의 일치하는 결과를 보였다.

또한, 반사성 지표면으로 가정하였을 경우의 계산결과를 보면, 지표면의 반사영향에 의하여 소음레벨의 등압선이 흡음성의 지표면보다 멀리 뒤로 뻗어나가고 있음을 알 수 있다. 한편, 그림에서 알 수 있듯이, 성토구조에서의 소음레벨의 거리감쇠 특성은 열차가 높은 곳에 위치하는 관계로 상당히 완만한 감쇠특성을 나타냈다.

4.4 방음벽의 회절효과에 관한 검토

이상으로 장벽이 없는 2 중 wedge 에서의 소음전파에 관하여 검토를 하였으나, 여기서는 소음방지 대책으로 많이 사용되는 방음벽이 있을 경우에 대한 소음전파에 대하여 검토하였다. 회절계산에 있어서는, 식(4)에서 wedge 각 $\nu\pi$ 에 대하여 두께를 무시할 수 있는 $2\pi$ 의 장벽에 대한 松井 [4]의 근사해를 이용하였다.

계산결과를 그림 7 에 나타낸다. 계산조건은 장벽효과를 검토하기 위하여 장벽이 없는 그림 6(a)와 동일하게 가정하였다. 장벽의 높이는 1.5m 로 설정하였다. 그림 6(a)와 비교해 보면, 방음벽에 의한 회절효과는 약 6~16dB 정도의 감쇠효과를 나타내고 있으나, 실제로 발생되는 열차와 방음벽과의 다중반사를 고려하면 회절효과는 약간 감쇠될 것이 예상된다.

## 5. 결 론

평탄부 선로를 주행하는 열차와 같이 음원높이 10 ㎝, 지향특성 $\cos^2\theta$ 의 점음원열 음원모델과 다중 wedge 에서의 음파의 전파에 관한 해석해를 이용하여 성토구조 선로에서 철도소음의 전파예측에 대하여 검토하였다. 열차소음의 특성을 나타내는 음압레벨의 주파수특성, 소음레벨의 시간파형 및 거리감쇠 특성 등에 대한 측정결과와 예측모델에 의한 계산결과는 매우 잘 일치하는 결과를 나타냈다. 또한, 예측모델을 이용하여 지표면의 음향특성에 의한 영향과 방음벽에 의한 차음효과의 예측에 대한 가능성을 찾았다.

## [ 참 고 문 헌 ]


1) 주진수 외, "철도소음의 전파예측에 관하여 (평탄지 선로를 주행하는 열차를 대상으로)," 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, November, P.111 (1995)

2) 주진수 외, "철도소음의 전파예측에 관하여(II) (고가철도를 대상으로)," 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, November, P.408 (1996)

3) 松井利仁他, "吸音性ウェッジ上での音波の伝搬," 日本音響学会誌, 43 巻 28 号, P. 581-587 (1988)

4) 松井利仁他, "障壁のある地表面上での音波の伝搬," 日本音響学会誌, 46 巻, P. 245-250 (1988)

5) 川井孝雄, "Locally reacting な境界面上の音の伝搬に関する考察," 日本音響学会誌、39 巻、P374-379 (1983)

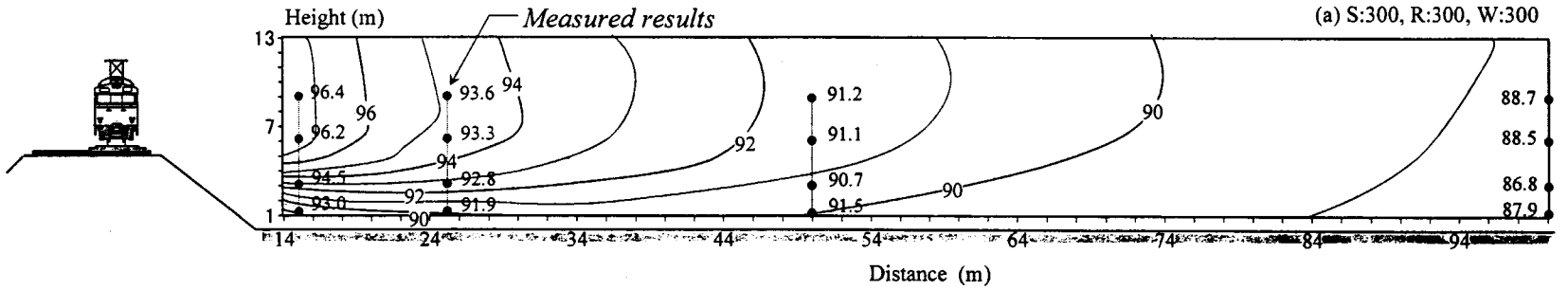
6) U. Ingard, "On the reflection of a spherical sound wave from an infinite plane", *J. A. S. A*, 23(3), 329-335 (1951)

7) C. F. Chien and W. W. Soroka, " A note on the calculation of sound propagation along an impeadance surface," *J. S. V*, 69, P. 340-343 (1980).

8) M. E. Delany and E. N. Bazley, "Acoustical properties of fibrous absorbent materials", *Appl. Acoust.* 3, P105-116 (1970)

9) C. I. Chessell, "Propagation of noise along a finite impedance boundary" , *J. A. S. A,* 62, 825-834 (1977).

10) R. G. Kouyoumjian and P. H. Pathak, " A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface," Proc. IEEE 62, 1448-1461 (1974)



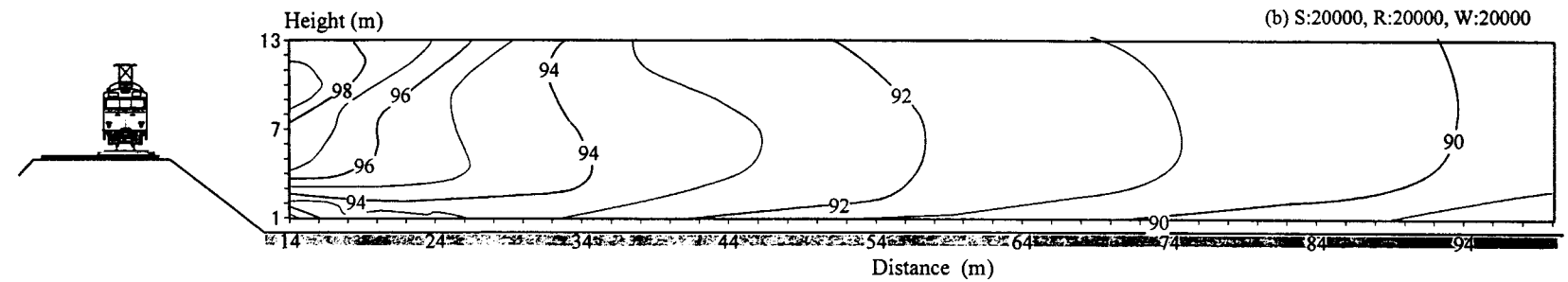




그림6. 지표면의 음향특성에 의한 영향 (a0흡음성, (b)반사성

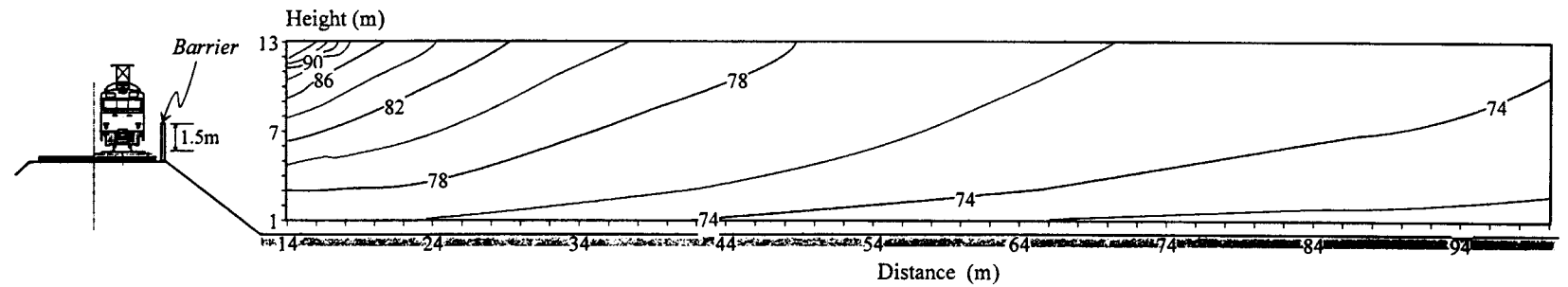



그림7. 방음벽에 의한 회절영향