

< 논 문 >

# 고가선로에서 철도소음 전파예측에 관한 연구

## A Study on the Prediction of Train Noise Propagation From an Elevated Railway

주진수

Jin-Soo Joo

(1997년 11월 26일 접수 ; 1998년 1월 23일 심사완료)

**Key Words** : Elevated Railway(고가철도), Sound Intensity Method(음향 인텐시티법), Elevated Structure Noise(고가구조물음), Rolling Noise(전동음), Prediction Model(예측모델)

### ABSTRACT

To predict the noise propagation from an elevated railway, sound radiation characteristics of elevated structure are measured by using the sound intensity method. In the base of the results, we propose the source model of elevated structure noise and the calculation model for elevated railway noise. Acoustic model of the former is modeled a row of single sources with directivity  $\cos\theta$  positioned in the center of a bogie and arranged in the lower side of slabs. Also prediction model is presented with rolling noise and elevated structure noise calculated by considering the power level of a source for one-third octave band, ground absorption and barrier deflection. Noise level unit patterns of a passing train is calculated based on this model and the results are compared with available field data.

### 1. 서론

열차운행의 안전과 고속화를 위하여 고가선로의 건설이 계속 되고 있으며, 이와 함께 철도운행과 관련된 소음·진동 문제는 교통소음과 같이 심각한 사회문제가 되고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해서는, 직접적 방법인 철도 소음발생의 저감과 간접적 방법인 전파방지에 대한 대책이 필요함은 물론이며, 소음전파 예측방법의 개발도 매우 중요하다. 그러나 철도소음 예측방법이나 저감 대책 모두 소음 발생원인 철도의 소음방사 특성을 기초로 하는 연구 및 검토가 필요하다.

열차주행에 따른 고가철도의 소음에는 Fig. 1에 나타내는 바와 같이 열차하부의 기계음과 차륜과 레일의 상호작용에 의한 전동음 및 레일진동이 일으키는 고가슬래브 가진에 의한 고가 구조체로부터의 방사음(고가구조물음)을 고려해야 한다.

전동음의 발생 메커니즘에 관해서는 상세히 연구되고 있으며, 고가선로에 대해서는 철골구조에 관한 연구가 중심을 이루고 있으나, 그 수는 매우 적은 실정이다. 또한, 고가구조물음의 소음레벨이나 주파수 특성은 궤도구조와 고가선로 구조에 의해 크게 다르며, 소음방사 특성을 정확하게 파악하는 것은 매우 어려워, 검토 대상으로 하는 고가구조에 대한 실측조사가 절대적으로 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 많이 건설되고 있는 콘크리트 구조 고가선로의 소음전파 예측을 위한 기초연

\* 정희원, 한일신학대학교 건축학부

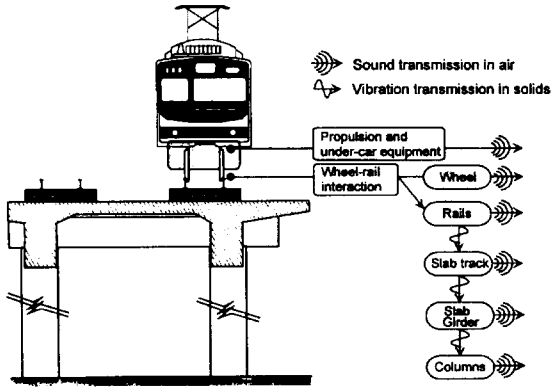


Fig. 1 Schematic representation of noise by train on elevated structure

구로, 음향 인텐시티법을 이용하여 고가구조물의 소음 방사특성에 대하여 검토하고, 그 결과를 바탕으로 고가구조물음의 음원모델 및 소음전파예측모델 작성에 대하여 연구하였다. 또한 예측모델은 실측결과와의 비교검토를 통하여 그 타당성을 검토하였다.

## 2. 인텐시티 및 음압 측정

측정은, 이음매가 없는 long 레일, 콘크리트 침목의 표준적인 궤도구조의 콘크리트 고가선로를 대상으로 하였으며, 선로주위에는 건물이나 빌딩 등의 반사물이 없는 선로구간을 선택하였다. 측정구간은, 열차가 정상속도로 주행하는 일직선 구간으로 역과 역의 중간 부근에 설정하였다.

### 2.1 인텐시티 측정

고가선로 고가구조물음의 소음방사특성을 조사하

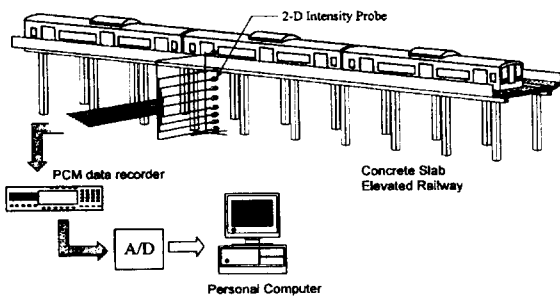


Fig. 2 Block diagram of intensity probe array and associated measuring and data retrieval equipment

기 위하여, 고가선로 방음벽 밑에 수직 폴을 세우고 수직 방향 8점에 인텐시티 프로브(ONO SOKI MI-6410, 마이크 간격 50 mm)를 지표면에 대하여 수평방향과 수직방향으로 조합하여 2차원으로 설치하였다. 그리고, 고가선로 내의 주행열차의 소음방사특성을 관측하기 위하여, 고가 방음벽 위에도 측정점을 설정하였다. 인텐시티 측정 및 분석 계통을 Fig. 2에, 인텐시티 프로브의 배치관계를 Fig. 3에 나타낸다.

인텐시티 프로브로부터 수음된 신호는 고가선로 안에 설치한 광전관의 신호에 동기 시켜서 DAT형 8채널 데이터 레코더 6대에 나누어 녹음 하였으며, 광전관 신호는 열차 차륜위치 및 주행속도 산출에 이용하였다.

인텐시티 분석은 녹음신호를 재생하여 AD 변환기를 통하여 퍼스널 컴퓨터에 입력, 소프트 웨어에 의하여 1/3 옥타브 밴드의 시간변화를 구하였다. 분석 주파수 범위는 50 Hz~2.5 kHz (1.6 kHz 이상 대역은 참고 관찰)로 하였다.

### 2.2 음압측정

고가철도의 소음전파 성상을 파악하기 위하여 인텐시티측정과 병행하여 음압측정을 실시하였다. 측정계통은 Fig. 4와 같이, 선로 중심으로부터 거리 13.6 m, 25 m, 50 m, 75 m, 100 m 지점에 수직 폴을 세우고, 지표면으로부터 높이 1.2 m, 4.5 m,

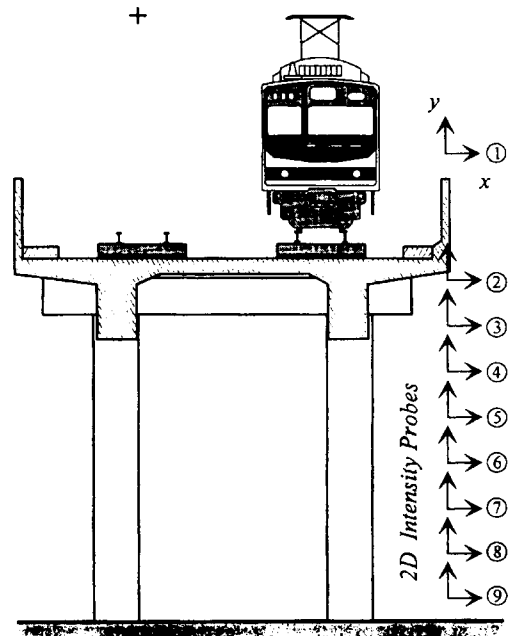


Fig. 3 Elevated structure and intensity probe

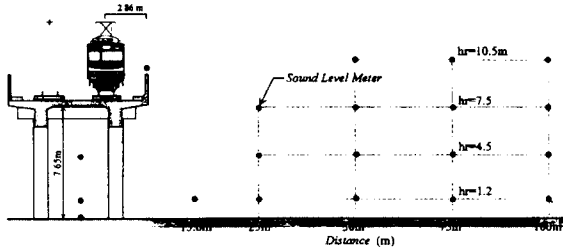


Fig. 4 Measurement geometry of sound pressure level

7.5 m, 10.5 m 에 소음계 마이크로폰을 설치하였다. 그리고, 슬래브 아래와 방음벽에도 측정점을 두어 합계 20 ch로 하였다. 수음된 신호는 DAT형 8 채널 데이터 레코더에 녹음하였다.

음압신호는 실시간 주파수 분석기(B & K 2133)를 이용하여 50 Hz~5 kHz의 1/3 옥타브 밴드 분석을 하였다. 소음 평가량은 소음레벨이 피크치 -10 dB(A)를 넘는 시간에 대하여 등가소음레벨 ( $L_{Aeq}$ )의 산출 기본량인 sound exposure level ( $L_{AE}$ )을 구하였다.

### 3. 고가슬래브 소음방사특성

#### 3.1 인텐시티 벡터

고가구조물음의 평균적인 소음방사 특성을 가시화

하기 위하여, 각 측정점의 수직방향·수평방향 인텐시티레벨을 열차통과시간에 대하여 적분·평균하여 2차원 단면내 인텐시티 벡터를 구하였다. 인텐시티는, 방음벽 위(측정점①)에서는 전동음이 주소음원으로 400 Hz 밴드 가 우세하며, 슬래브 밑에서는 구조물음이 주소음원으로 63 Hz 밴드 성분이 우세하게 나타났다. 열차형식 (103 : 철제차량, 205 : 스텔레스차량) 및 주행방향이 서로 다른 열차에 대한 결과를 Fig. 5에 나타낸다.

이 결과를 보면, 인텐시티 벡터의 절대값은 전 측정점에서 거의 비슷한 크기를 나타내고 있다. 먼저, 선로내의 소음방사특성을 관찰하기 위한 방음벽 위의 점점의 인텐시티 벡터 연장선은 두 열차 모두 열차하부를 향하는 결과를 보이고 있다. 이는 평탄지 선로에서 실시한 주행열차에 대한 음원탐색 결과와 일치하는 결과이다. 실제로는, 열차와 방음벽간의 다중반사 영향으로 벡터 연장선이 높게 위치하게 되어 외견상 음원점 위치는 보다 높게 나타나지만, 방음벽 높이가 비교적 낮아 선로와 레일의 점점을 향하는 결과를 나타냈다.

또한, 고가슬래브 아래에서는 지표면 부근의 측정점 ⑨를 제외하고 열차전체를 평균적으로 보면, 인텐시티 벡터는 열차형식과 주행방향이 서로 다르지만 거의 비슷한 기울기를 보이고 있다. 그러나 벡터 연장선은, 열차소음의 검토폰과 같이 어느 특정부위에 집중되는 경향은 볼 수 없다. 이것은 고가슬래브 아래의 음장이 상당히 복잡한 잔향성 음장임을 의미하고 있다.

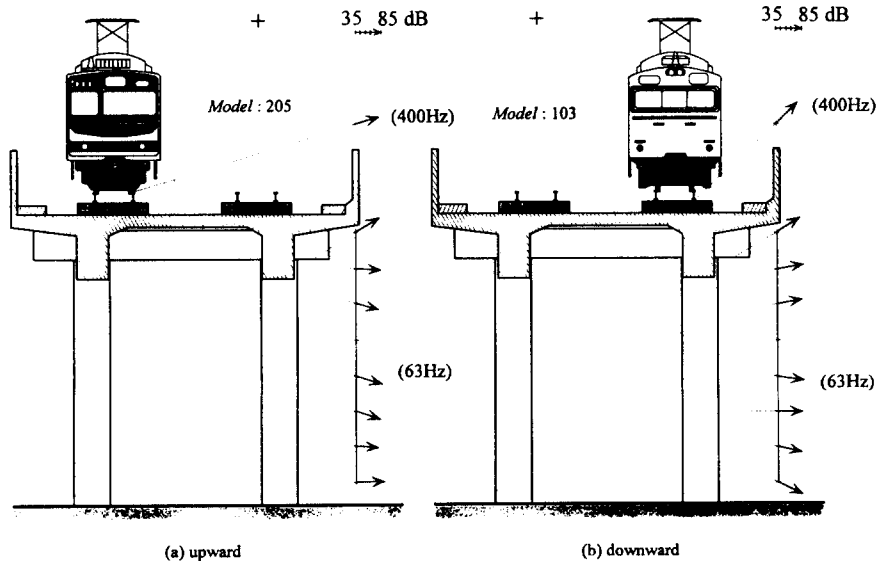


Fig. 5 Sound intensity vector (63 Hz, 400 Hz)

### 3.2 고가구조물음의 파워레벨

고가슬래브 아래의 측정면에 대하여 법선방향 성분의 인텐시티와 각 측정점의 대표면적(측정점 간격 × 열차길이)을 이용하여 단위길이의 고가구조물음의 파워레벨을 구하였다. 구조물 전체의 파워레벨을 측정하기 위해서는 구조물 아래측 전부를 둘러싸는 측정점을 설정하여야 하지만, 본 연구에서는 기초적 검토로 측정단면의 한 방향에 대하여 측정점을 설정하였다.

Fig. 6에 스텐레스 열차와 철제 열차의 상하행 열차에 대한 파워레벨의 비교결과를 나타낸다. 이 결과를 보면, 고가구조물음의 파워레벨은 열차형식과 주행방향이 서로 다름에도 불구하고 거의 비슷한 특성을 보이고 있음을 알 수 있다.

### 3.3 음압레벨의 주파수 특성

인텐시티 분석과 함께 열차 주행에 따른 고가슬래브 아래의 지표면과 높이 5 m 측정점의 음압레벨과 거리 13.6 m의 음압레벨을 비교하여 Fig. 7에 나타낸다. 이 결과를 보면, 63Hz 밴드에서 모두 피크를 나타내며, 고가슬래브 아래의 음압레벨은 주파수가 높아지면 음압레벨이 급격하게 저하하는 주파수 특성을 보이고 있다. 또한, 고가슬래브 아래 측정점과 13.6 m 측정점의 음압레벨 주파수 특성을 비교하여 보면, 400 Hz 밴드 이하에서는 고가슬래브

아래의 음압레벨이 높으며, 500 Hz 밴드 이상에서는 13.6 m 측정점의 음압레벨이 높게 나타났다. 이 결과로부터, 고가슬래브 아래 음장에는 방음벽을 회절하여 오는 전동음은 매우 적으며, 선로에서 어느 정도 떨어진 곳에는 고가구조물음의 영향은 거의 무시할 수 있는 것으로 여겨진다.

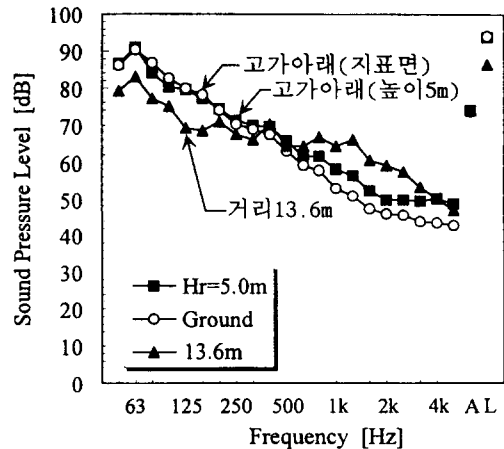


Fig. 7 Spectra of radiated noise measured under the slab and at 13.6m distance from the centerline of elevated structure

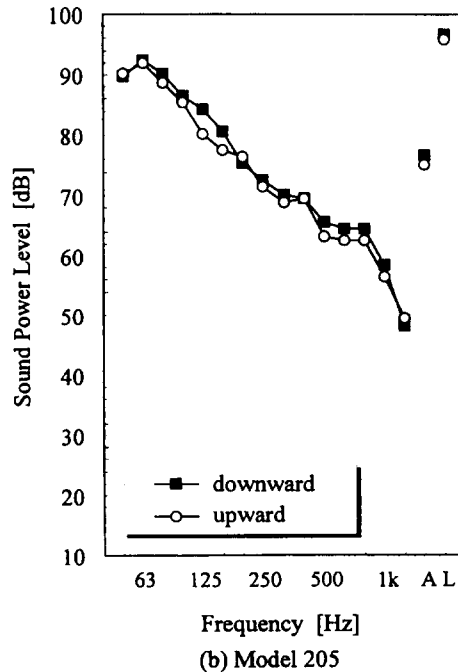
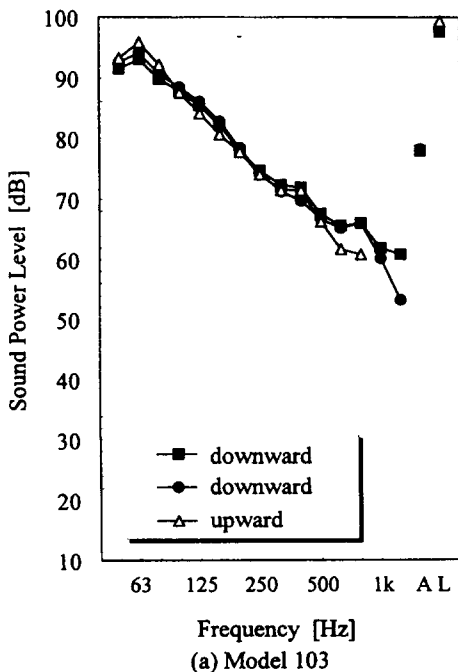


Fig. 6 Sound power level of elevated structure per unit length 1 m

### 4. 소음전파 예측모델

#### 4.1 고가구조물 음원모델

실제로 열차주행에 의하여 진동하는 고가슬래브는 슬래브 전면이 진동하기 때문에 슬래브의 진동모드를 고려하는 음원모델을 작성하는 것이 타당하다. 그러나 본 연구에서는, 콘크리트 고가교의 고가구조물음의 기여는 전동음에 비하여 매우 적은 것으로 여기고, 복잡한 면음원 보다는 전동음의 음원모델<sup>(1)</sup>과 같이 선음원 모델을 가정하는 음원모델화에 대하여 검토하였다.

음원위치는 고가구조물음의 소음방사특성에 대한 검토결과를 바탕으로 고가슬래브 밑면의 중심선으로 하였다. 음원 축은 슬래브 면에 대하여 수직이며, 음원점 위치는 대차(bogie) 중심으로 하였다. 또한, 음원모델은 일본 동경도의 예측모델<sup>(4)</sup>을 참고하여  $\cos\theta$ 의 지향특성을 갖는 점음원이 편성열차 전체의 대차중심에 일직선으로 나열되는 점음원열 모델을 가정하였다. 따라서 자유공간에서 고가구조물음에 의한 수음점에서의 음압은 다음식이 된다.

$$\overline{p_c^2} = \sum_{j=1}^N \frac{\rho c W_c}{4\pi r_j^2} \cos^2 \theta_j \quad (1)$$

- 여기서,  $W_c$  : 고가구조물음을 가정한 점음원의 파워,
- $\theta$  : Fig. 8 참고
- $N$  : 음원 개수
- $j$  : 음원번호,
- $c$  : 음속
- $\rho$  : 밀도

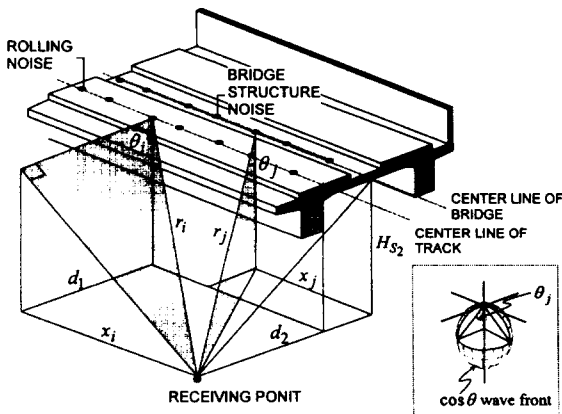


Fig. 8 Acoustic model for elevated railway noise

$\theta_j > \pi/2$ 의 경우에는  $\overline{p_c^2} = 0$

#### 4.2 소음전파 예측모델

고가선로의 주요 소음원은, 주행열차에 의하여 가진 되는 고가슬래브의 진동으로 발생하는 고가구조물음과 전동음으로 크게 구분된다. 전동음의 전파에 대해서는 고가슬래브면과 지표면 등의 경계면에서의 흡음·반사와 고가슬래브 양측의 방음벽 회절을 고려할 필요가 있으며, 고가구조물음의 전파에 대해서는 지표면의 흡음·반사를 고려하는 예측모델을 작성할 필요가 있다(Fig. 8).

전동음의 전파예측모델<sup>(1)</sup>은, 회절음장 계산을 위하여 J.J.Bowman & T.B.A.Senior<sup>(5)</sup>의 회절근사해와 川井<sup>(6)</sup>의 지표면 반사계수에 대한 근사해를 이용하여 4개의 전파경로를 고려하는 다음과 같은 모델로 하였다.

$$L_{p1} = 10 \log \left[ \sum_{f=1}^{21} \left\{ 10^{\frac{L_{wR}}{10}} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{1}{4\pi r_i^2} \cos^2 \theta_i \left| \frac{\phi_1}{\phi_f} \right|^2 \right\}_f \right] \quad (2)$$

여기서,

- $L_{wR}$  : 전동음을 가정한 점음원의 A특성 가중 파워레벨
- $f$  : 1/3 oct. band 중심 주파수(50~5000 Hz)
- $\phi_1$  : 장벽회절에 의한 속도 포텐셜
- $\phi_f$  : 자유공간에서 점음원에서 거리  $r_i$ 의 속도포텐셜 (=  $e^{ikr}/r_i$ )

한편, 고가구조물음의 전파예측모델은 식 (1)의 음원모델에 川井의 지표면 반사계수에 대한 근사해를 적용하여 식 (2)와 같이 된다.

$$L_{p2} = 10 \log \left[ \sum_{f=1}^{21} \left\{ 10^{\frac{L_{wC}}{10}} \cdot \sum_{j=1}^N \frac{1}{4\pi r_j^2} \cos^2 \theta_j \left| \frac{\phi_2}{\phi_f} \right|^2 \right\}_f \right] \quad (3)$$

여기서,

- $L_{wC}$  : 고가구조물음을 가정한 점음원의 A 특성 가중 파워레벨
- $\phi_2$  : 고가구조물음의 지면반사에 의한 속도 포텐셜 [참고문헌 (1)의 식 (1)]
- $\theta_j > \pi/2$  경우에는  $L_{p2} = 0$  dB

따라서, 고가철도에서 수음점의 소음레벨의 시간파형(unit pattern)을 구축하는 소음레벨은 식 (2)와 식 (3)으로부터 다음식이 된다.

$$L_{P_3} = 10 \log(10^{L_{P_1}/10} + 10^{L_{P_2}/10}) \quad (4)$$

### 5. 예측계산

예측모델의 타당성을 검증하기 위하여 실측결과와 계산결과를 비교·검토하였다. 측정된 열차의 전동음과 고가구조물음의 파워레벨을 구하고, 식(4)를 이용하여 수음점 소음레벨의 시간파형을 계산하였으며, 시간파형으로부터  $L_{AE}$ 를 구하였다. 계산에서 수음측 지표면의 음향특성은 흐름저항계수 300  $kPa \cdot s/m^2$ 로 하였다.

소음레벨의 측정결과(10량, 84km/h)와 예측모델에 의한 계산결과를 높이별로 비교하여 Fig. 9에 나타낸다. 양자를 비교하면, 전체적으로는 예측모델에 의한 계산값이 실측값보다 약간 작은 값을 보이지만 비교적 잘 일치하는 결과를 보이고 있다.

한편, 고가철도소음 방지대책을 생각할 경우,

전동음과 고가구조물음의 기여량을 정확히 파악한 후에 각 음원에 대한 대책을 강구할 필요가 있다. 그러나 음원별 기여량을 분리하여 관측하는 것은 매우 어려운 실정이다. 본 연구에서는, 식(4)에서 설명한 바와 같이 전동음과 고가구조물음을 분리 계산 하므로써 열차주행에 따른 수음점 소음레벨에 각 음원의 기여량을 검토할 수 있다. 측정높이 1.2m 측정점에 대한 검토결과를 Fig. 10에 나타낸다. 앞에서 검토한 바와 같이 선로에서 어느 정도 떨어진 곳에서는 고가구조물음의 영향은 거의 무시할 수 있는 결과를 보이고 있다.

또한, 측선상의 전 측정점을 포함하는 가상단면(높이 15 m×거리 12~100 m)을 설정하고, 식(4)를 이용하여 가로 2 m×세로 1 m 간격으로 열차 통과간의  $L_{AE}$ 를 계산하여 소음레벨분포를 구하였다(지표면 흐름저항계수 : 300  $kPa \cdot s/m^2$ ). 소음레벨분포의 계산결과를 음원별로 Fig. 11에 나타낸다. 이 결과에서도 선로에서 거리가 멀어지면 고가구조물음의 영향은 거의 없는 결과를 나타냈다.

예측모델은 지표면 음향특성을 고려할 수 있는 모델로, 수음측의 지표면 음향특성의 차이에 따른 소음전파성상의 변화에 대하여도 검토하였다. 흡음성 지표면(300  $kPa \cdot s/m^2$ )에 대한 계산결과를 Fig. 11(a)이며, 반사성 지표면(20000  $kPa \cdot s/m^2$ )에 대한 계산결과를 Fig. 12에 나타낸다. 흡음성 지표면과 반사성 지표면에 대한 계산결과를 비교하여 보면, 고가구조물음 보다 파워레벨이 큰 전동음이 방음벽에 의하여 차폐되기 때문에 소음전파성상의 큰 변화는 보이지 않으나, 지표면 반사 영향으로 소음레벨이 높아지는 결과를 나타냈다.

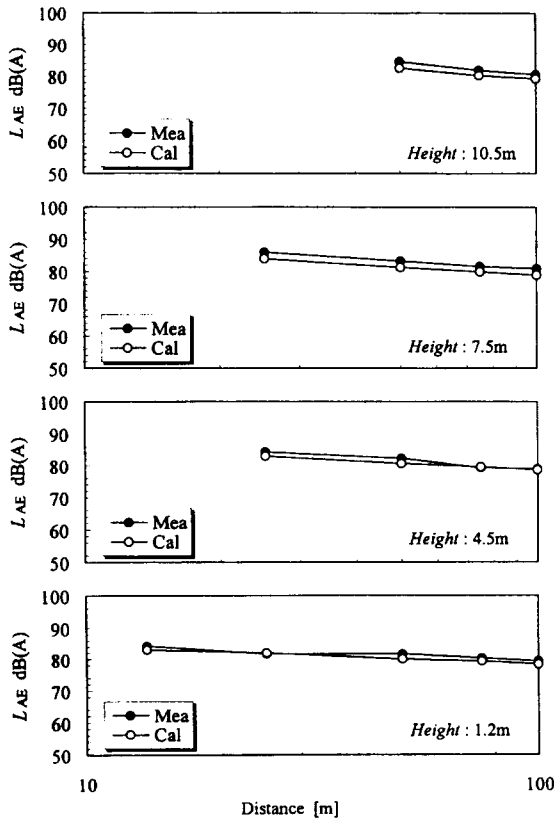


Fig. 9 Comparison between measured and calculated sound exposure levels during the passby of a 10 car train at 84 km/h

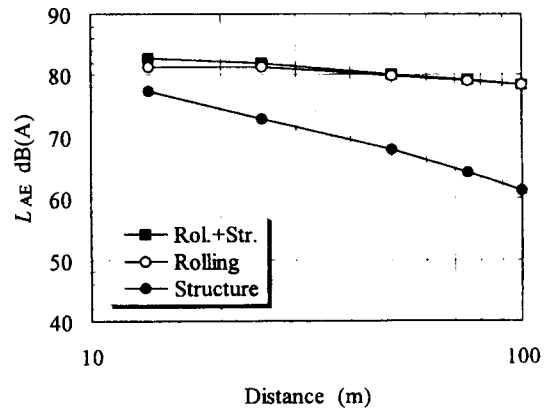


Fig. 10 Calculation of radiated noise level from wheel-rail and elevated structure at receiving point

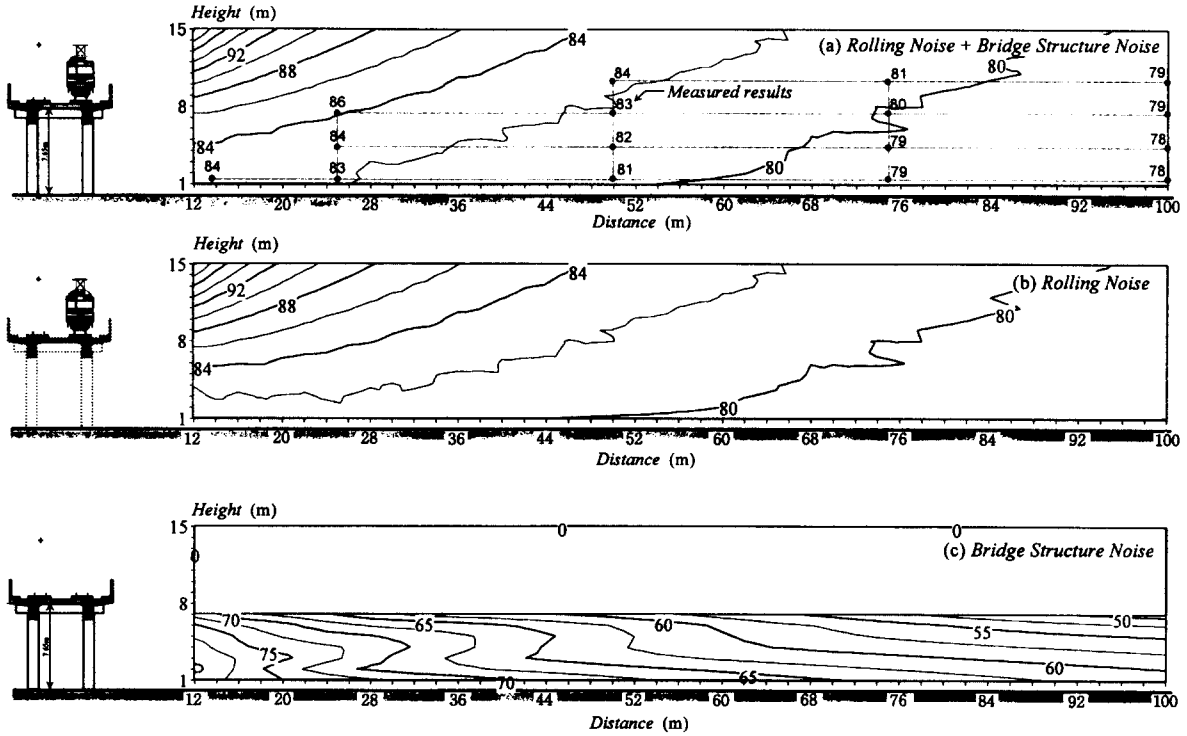


Fig. 11 Calculated sound exposure level contour for rolling noise and elevated structure noise

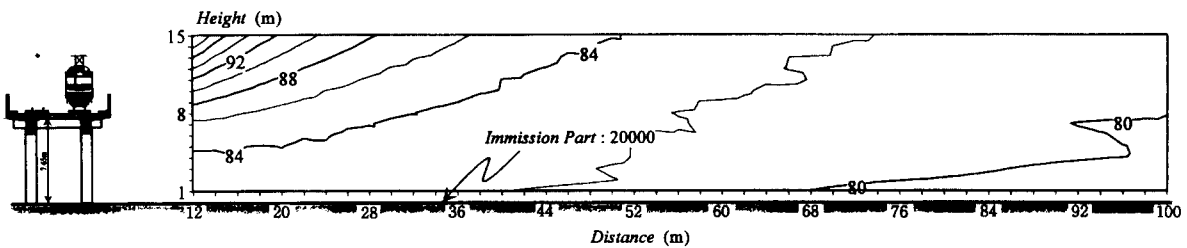


Fig. 12 Calculated sound exposure level distribution. Specific flow resistivity of immission and source part is 20000 kPa · s/m'

## 6. 결 론

콘크리트 고가선로에서의 철도소음 전파예측위하여, 음향 인텐시티법을 이용하여 고가구조물음의 소음방사특성에 대하여 실험적 검토를 하였다. 고가구조물음의 소음방사특성은 열차형식 또는 주행방향에는 관계없이 거의 비슷한 특성을 보였으며, 고가슬래브 아래는 인텐시티 변화가 심한 잔향성 음장을 나타내 음원탐색을 할 수 없었다. 고가슬래브의 평균적 소음방사특성에 대한 검토결과로부터, 음원위치는 고가슬래브 밑면의 중심선상으로 하며, 지향특

성을  $\cos \theta$  를 갖는 점음원열 모델을 가정하고 지표면의 반사를 고려하는 고가구조물음의 계산모델을 작성하였다. 그리고 고가선로의 소음전파 예측모델은 방음벽 회절을 고려하는 전동음 계산모델과 고가구조물음의 계산모델로 구성하였다. 예측모델의 계산결과와 소음측정 결과를 비교 검토한 결과 서로 잘 일치하는 결과를 나타냈으며, 수음측 소음레벨에 대한 각 음원별 기여량을 계산적으로 검토한 결과 고가구조물음은 선로에서 거리가 멀어지면 거의 무시 가능한 결과를 나타냈다. 또한, 수음측 지표면의 음향특성에 대한 검토를 통하여 소음레벨분포의 변화를 검토하였다.

후 기

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

참 고 문 헌

(1) 주진수, 1998, "평탄부 선로에서 철도소음 전파예측에 관한 연구," 한국소음진동공학회지, Vol. 8, No. 1, pp. 187~194.

(2) 주진수, "음향 인텐시티법을 이용한 주행열차의 음향방사특성의 검토," 한국소음진동공학회투고중.

(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) 石井聖光, 子安 勝 他, 1980, "在來線高架鐵道からの騒音豫測手法案について," 騒音制御, Vol.4, No.2.

(5) J. J. Bowman, T. B. A. Senior, and P. L. E. Uslenghi, 1969, "Electromagnetic and Acoustic Scattering by Simple Shape" (North-holland, Amsterdam, 1969), pp. 308~345.

(6) 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, 第 39 卷, pp. 374~379.

(7) 橋 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.

(8) M. E. Delany and E. N. Bazley, 1970, "Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials," *Appl. Acoust.* 3, pp.105~116.

(9) P. M. Nelson, 1987, *Transportation Noise Reference Book*, Butterworth.

(10) Y. Zenda, K. Nagakura, Y. Moritoh, Y. Shimizu, Y. Kushida, T. Kitagawa, 1995, "Noise Control of High-Speed Shinkansen," *The Fifth International Workshop Railway and Tracked Transit System Noise*, 5. IWRN.

(11) 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.

(12) L. G. Kurzweil, 1977, "Prediction and Control of Noise from Railway Bridge and Tracked Transit Elevated Structures," *Journal of Sound and Vibration*, 51(3), pp. 419~440.

(13) L. E. Witting, 1983, "Railway Elevated Structure Noise---A Review," *Journal of Sound and Vibration*, 87(2), pp. 249~271.

(14) C. E. Hanson, 1983, "Noise Control for Rapid Transit Cars on Elevated Structures," *Journal of Sound and Vibration*, 87(2), pp. 285~294.