

철도소음의 전파예측에 관하여\*  
(평탄지 선로를 주행하는 열차를 대상으로)

朱 鎮洙\*1 日高新人\*2 失野博夫\*3 橋 秀樹\*4  
東京大學大學院\*1, 東京大學生産技術研究所\*2,\*3,\*4

Prediction of train noise propagation from a level rail road\*

J.S. Joo\*1, Y. Hidaka\*2, H. Yano\*3 and H. Tachibana\*4  
Graduate school University of Tokyo\*1, IIS, University of Tokyo\*2,\*3,\*4

1.머릿말

근년, 대도시권에서의 지가상승과 주택부족 등의 문제는 도시 주변으로의 인구 분산화를 촉진하고, 철도로서는 도시권에서의 통근, 통학 그리고 도시간의 여객수송의 수단으로서의 역할이 점차 증대되고 있다. 이러한 사회적 요구에 따라 열차편수의 증가와 편성 길이의 증대 그리고 보다 빠른 열차가 등장하게 되고, 더불어 소음문제의 발생 요인도 많아지고 있다.

한편 소음문제에 대한 대책으로서는 소음 전파의 예측수법이나 소음방지대책을 강구하는 것도 해결책의 한 방법이라 할 수 있다. 그러나 예측수법 또는 방지대책을 세울 때에는 제일 먼저 소음발생원의 방사특성을 기초자료로 하는 예측수법이나 방지대책법이 검토되어야 한다. 그리고 그러한 대책수법에 대한 효과를 검토하는 것은 예측모델에 의하여 사전에 검토가 이루어져야 한다.

따라서 본 논문에서는, 철도소음문제에 대한 대책의 일환으로서 평탄지의 선로로부터

방사되는 철도소음의 전파예측계산을 목적으로 하여, 첫째로 예측모델 작성에 아주 중요한 열차소음원의 방사특성(음원위치, 음원높이, 방사음향인텐시티, 지향특성)에 대하여 음향인텐시티법을 이용하여 검토하였다.

그리고, 검토결과를 기초 데이터로 하여, 레일과 열차車輪의 접촉·마찰에 의한 轉動音과 모터소음을 철도소음의 주요음원으로 하는 전파예측모델을 작성하였다. 또한 예측모델을 이용한 전파예측계산을 실시하여 소음 측정치와의 대응성에 대하여 검토를 하였다.

2.측정 및 분석방법

2.1측정방법 인텐시티측정과 소음측정은 바람이 거의 없는 일기가 매우 안정된 날에, 그리고 선로 주위에는 열차로부터의 소음전파에 방해가 되는 장애물과 암소음원이 거의 없고, 열차가 정상속도로 주행하는 평탄한 선로를 선택하여 실시 하였다.

인텐시티 측정 계통도와 단면도를 그림1에 나타낸다. 선로의 중심으로부터 3m의 위치에서

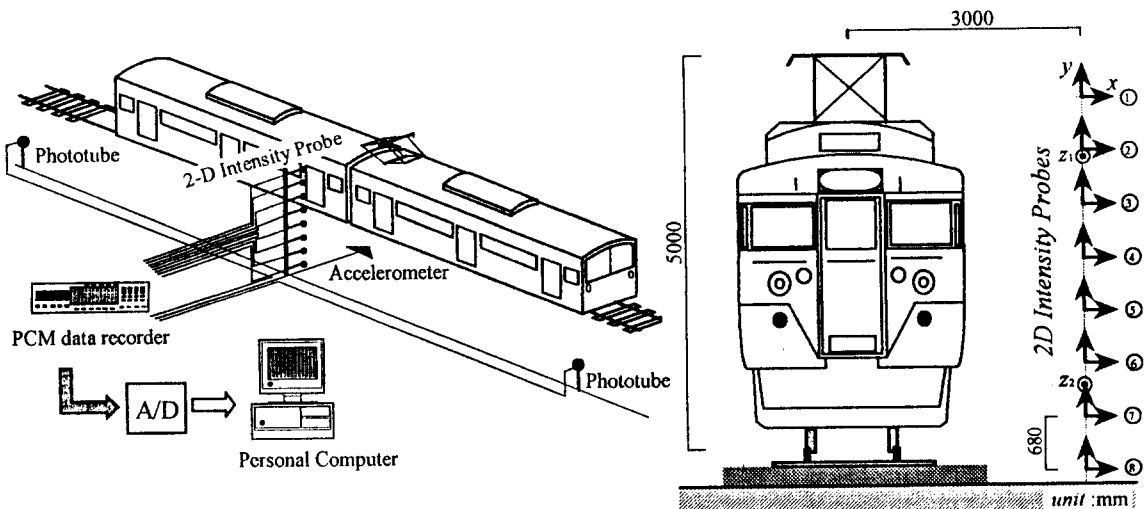


Fig.1 Block diagram of measuring equipments and intensity probes array in a cross section.

수직 폴을 설치하여, 등간격으로 8점의 위치에 인텐시티 프로브(ONO SOKKI MI-6410, 마이크 간격 50mm)를 지면에 수평방향(X)과 수직방향(Y)으로 향하게 하여 설치 하였다. 그리고 두 점에 대해서는 열차의 진행방향(Z)에도 프로브를 설치하여 3차원으로 하였다. 프로브 마이크로로부터 수음된 신호는 동기시켜서 DAT형 8-채널 데이터 레코더 6대에 나누어서 녹음하였다. 측정시에는 측정점의 양측에 배치한 Phototube로부터의 신호와 선로 옆에 설치한 진동계로부터의 신호도 동시에 수록하여 열차의 주행속도의 측정과 신호분석시의 Trigger신호로서 이용하였다.

또한 소음측정은 측정대상의 선로 중심을 측정 중심선으로 하고, 선로에 좌우대칭이 되도록 10점의 측정점을 설정하여 실시하였다. 소음계로부터 수음된 신호는 DAT형 8-채널 데이터 레코더에 녹음하였다.

**2.2. 분석방법** 인텐시티의 분석방법으로서는 수록한 신호를 재생하여, AD변환기를 통하여 AD변환( $f_s = 12\text{kHz}$ )을 한 후에 퍼스널 컴퓨터에 입력시켰다. 그리고 크로스 스펙트럴(cross spectral)법에 의한 단시간 스펙트럼 분석(short-time spectrum analysis)에 의하여 20ms 마다의 intensity spectra 를 구하였다. 그리고 각 시각의 line spectra ( $\Delta f = 1.46\text{Hz}$ )를 합성하여, 100Hz-1250Hz(1/3 oct. band)에서의 인텐시티의 시간변화를 구하였다.

소음분석은 녹음신호를 재생하여 실시간 주파수분석기에 입력하여 50Hz-5kHz의 1/3 옥타브 밴드마다 平滑化處理(時定數:1sec)한 후에 125ms 간격으로 샘플링을 하였다. 이 데이터를 퍼스널 컴퓨터에 입력하여 음압의 시간평균치를 구하였다. 그리고 각 열차마다 좌우 측정점에서의 소음레벨을 비교하여 검토 데이터로서의 채택 여부를 결정하였다.

한편 철도소음은 열차의 종류, 정비상황, 레일의 상태 등에 의하여 소음레벨의 변동이 크고, 그 패턴도 매우 다양하다. 그래서 본 논문에서의 소음평가량으로서는 열차 통과시의 소음레벨의 평균적 크기를 나타내는 것으로서, 소음레벨이 피크치보다 10dB(A) 적은 값을 초과하고 있는 시간에 대하여 등간격으로 읽은 소음레벨의 에너지 평균치( $L_A$ )를 이용하기로 했다.

### 3. 주행열차의 소음방사특성

**3.1. 시간특성** 철도소음을 줄이기 위한 대책으로 차량을 경량화 한 스테인레스 차체의 Model 211系 열차(편성:10량, 속도:98km/h)의 음압레벨과 인텐시티레벨의 측정결과(500Hz밴드)를 그림2에 나타낸다. 그림2는,

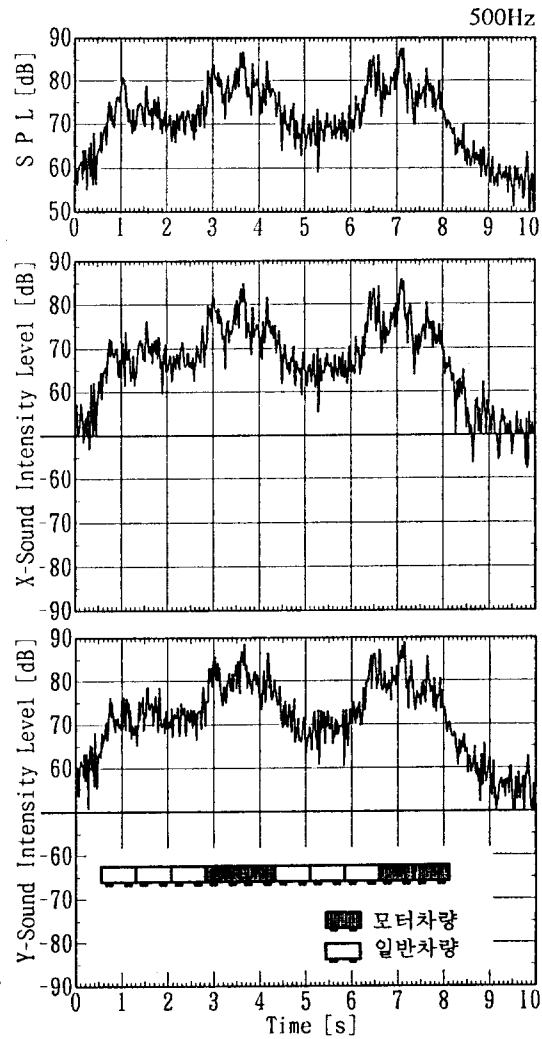


Fig.2 The time recordings of sound pressure level and sound intensity level measured at point -3

음압레벨과 인텐시티레벨 모두가 모터차량의 통과시에 일반차량의 통과시 보다 10dB 이상의 레벨상승을 보이고 있다. 이것은 차량의 경량화에 따른 일반차량에 의한 소음발생 기여는 크게 감소되었으나 모터차량으로부터의 기여는 여전히 큰 영향을 미치고 있음을 나타내고 있다고 여겨진다. 이 결과로부터, 열차車輪과 레일과의 상호작용에 의해 발생하는 轉動音과 더불어 모터소음도 철도소음의 주음원임을 알 수 있으며, 소음전파의 예측 계산모델 작성시에는 소음원으로서의 모델화가 필요하다고 생각된다.

**3.2. 방사인텐시티** 그림3은 Model 115系 열차로부터 방사되는 음향인텐시티의 측정결과로서, 400Hz밴드에서의 인텐시티벡터를 나타낸 것이다. 이들은 열차가 통과하는 동안의 순간인텐시티를 X,Y축별로 시간평균한 후에 벡

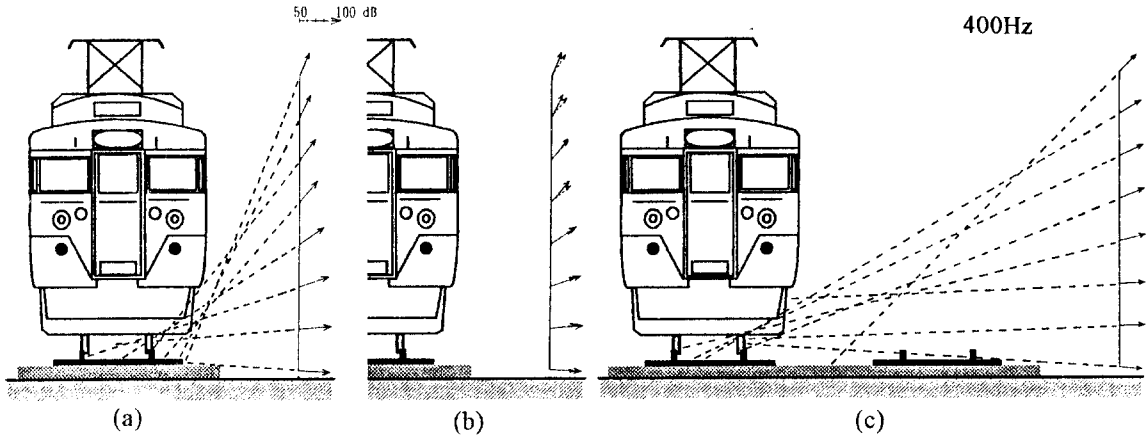


Fig.3 Sound intensity vector

터합성을 한 것이다. 측정된 벡터를 연장하여 보면, 점선으로 나타내고 있는 바와 같이 거의 모든 점선이 레일과 선로의 접점, 그리고 기계장치가 있는 열차의 하부 부근을 향하고 있다. 이러한 결과는 다른 주파수 밴드에서도 거의 같은 경향으로 나타나, 轉動音과 모터소음 모두가 열차의 주소음원이라는 것을 나타내고 있다.

### 3.3인텐시티벡터에 의한 음원높이의 검토

이상에서 검토한 바와 같이 轉動音은 레일과 車輪과의 접촉면으로부터, 그리고 모터소음은 열차차체와 궤도면과의 사이에서 방사되고 있어, 두 주요 소음원에 의한 발생소음은 모두 궤도면 위에서 방사되고 있다고 보여진다. 따라서 열차의 車臺중심점을 점음원으로 가정하고 검토를 하는 경우에는, 음원 위치를 궤도면상에 가깝게 설정하는 것이 매우 적절하다고 생각된다.

열차음원의 높이 설정에 대한 검토를 하기 위하여, 각 차량의 車臺중심을 Dipole 점음원으로 가정하고, 그 음원들이 선로 중심선 위 0-40cm의 사이에 위치하고 있다고 가정하여 인텐시티벡터를 계산하였다. 검토결과, 음원높이의 변화에 따른 차이는 그다지 크지 않았으나, 그림3(b)에 나타낸 바와 같이 10cm의 높이로 설정을 하는 경우가 실측치와는 가장 좋은 대응성을 나타냈다. 그림3(b)에서 실선의 벡터는 실측치이며, 점선의 벡터는 계산치를 나타내고 있다.

### 4. 계산모델 및 조건

철도소음의 음원모델은 이상에서 검토한 바와 같이, 轉動音과 모터소음을 주소음원으로 가정하여 그림4와 같이 점음원이 각 차량의 車臺 중심점에 직선상으로 위치하는 유한장 선음원 모델로서 생각할 수 있다. 이 음원들이  $\cos^n \theta$ 의 지향특성을 갖는 음원열이

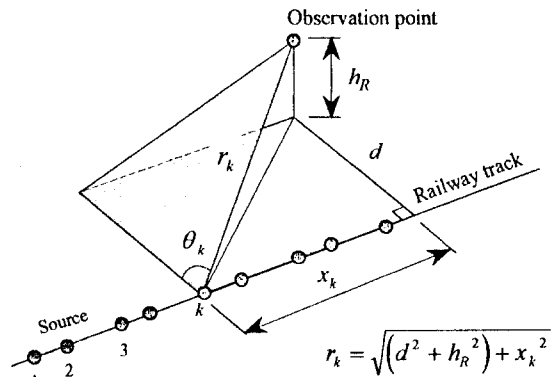


Fig.4 Calculation geometry

라면 자유공간에서의 거리  $r_k$  떨어진 수음점 R에서의 음압  $\overline{p^2}$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\overline{p^2} = \sum_k \frac{\rho c W_k}{4 \pi r_k^2} \cos^n \theta_k$$

(  $k$ :점음원의 번호,  $n$ :방사 지향성을 나타내는 계수(=0,1,2),  $W_k$ :점음원  $k$ 의 파워 )

윗식에 지면에 의한 흡음감쇠항을 추가하여 레벨표시 하면 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$L_A(i) = 10 \log_{10} \left( \sum_{j=1}^{21} \sum_{k=1}^N 10^{\frac{L_{W_{j,k}} - L_{ge,j,k} - L_{gr,j,k}}{10}} \right)$$

(  $j$ :1/3 oct. band 번호,  $N$ :점음원의 갯수,  $L_{W_{j,k}}$ :점음원  $k$ 의 1/3 oct. band의  $j$ 번째 파워,  $L_{ge,j,k}$ :기하학적 감쇠량,  $L_{gr,j,k}$ :지면에 의한 흡음감쇠량)

계산조건의 설정에 있어서는, 열차는 일정한 속도로 주행하며, 각 점음원은 등파위를 나타내며, 음원위치는 열차의 車臺중심에 그리고 음원높이는 선로면에서 10cm로 가정하여 계산하였다. 그리고 지면흡음감쇠(5)의 계산에는 소음측정 장소의 지표면이 부드러운 지면이었으므로 흐름 저항치를 300cgs units(6)으로 하는 추정치를 사용하였다.

### 5. 소음의 예측계산 및 고찰

위의 계산식과 계산조건에 의하여 각 측정점에서의 소음레벨을 계산하는데, 예측계산시에는 소음원의 파워를 먼저 정하지 않으면 안된다. 본 논문에서는 측정점 12.5m를 기준점으로 하여, 측정된 소음레벨의 에너지 평균치로부터 윗식에 의하여 각 방사지향성계수( $n$ )마다의 파워레벨을 산출하는 방법을 취하고 있다.

**5.1 방사지향성계수** 주행열차의 파워레벨은 음원의 지향성을 어느 정도로 정하는가에 따라 크게 달라지고, 소음레벨의 분포도 측정거리가 음원으로부터 멀어짐에 따라 그 차이가 크게 된다. 따라서 열차소음원의 방사지향성계수를 어느 정도로 고려하면 타당한가에 대하여 검토하였다.

그림5에 열차소음원의 지향성을 검토하기 위하여 산출된 방사지향성계수( $n$ ) 별의 파워레벨에 의한 각 측정점의 소음레벨 계산치와 실측치를 비교하여 나타내고 있다. 비교결과,  $n=0$ 인 무지향성 점음원 모델로부터  $n=1$ 의 코사인 모델,  $n=2$ 의 Dipole 점음원 모델의 순서로 실측치와 계산치의 최적상관선인 45도 직선에의 수축성이 좋아지고 있음을 알 수 있다.

**5.2 음원높이** 음원의 높이에 대해서는 인텐시티법에 의하여 검토를 하였는데 여기서는 앞의 계산모델을 이용하여 음원높이 설정에 관한 타당성을 검토하였다. 그림6은 음원높이를 10cm, 30cm 그리고 70cm로 설정한 경우의 각 측정점에서의 소음레벨 계산치를 실측치와 비교하여 나타내고 있다. 검토결과, 음원높이가 높아짐에 따라, 그리고 거리가 증가함에 따라 계산치와 실측치와의 레벨차이가 더욱 커지는 경향을 보이고 있으며, 인텐시티팩터에 의한 검토결과와 마찬가지로 10cm로 설정하는 경우가 실측치와 잘 일치하는 결과가 나타났다.

**5.3 모터차량의 소음발생에 대한 기여** 위의 계산은 등파위의 지향성 점음원이라는 가정에 의한 것이지만, 실제 열차 소음레벨의 시간파형을 보면 그림2와 같이 모터차량의 통과시에 소음레벨의 큰 변화를 볼 수가 있다. 따라서 여기서는 모터차량이 소음발생에 미

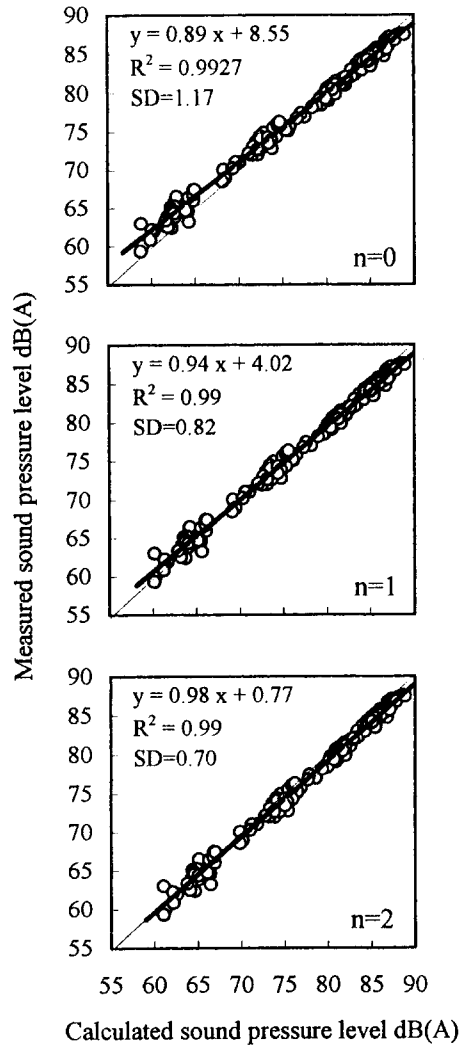


Fig.5 Comparison between measured and calculated  $L_A$  for each radiation coefficient.

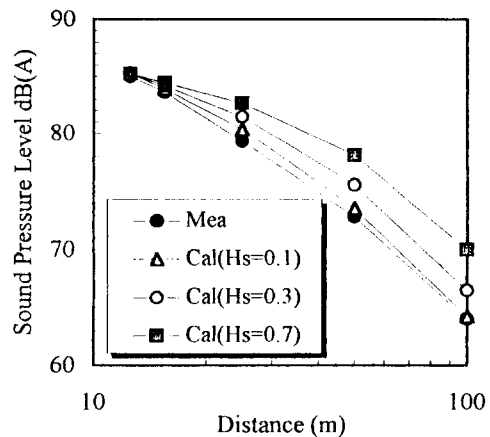


Fig.6 Comparison between measured noise level and that of calculated using the height varied of source.

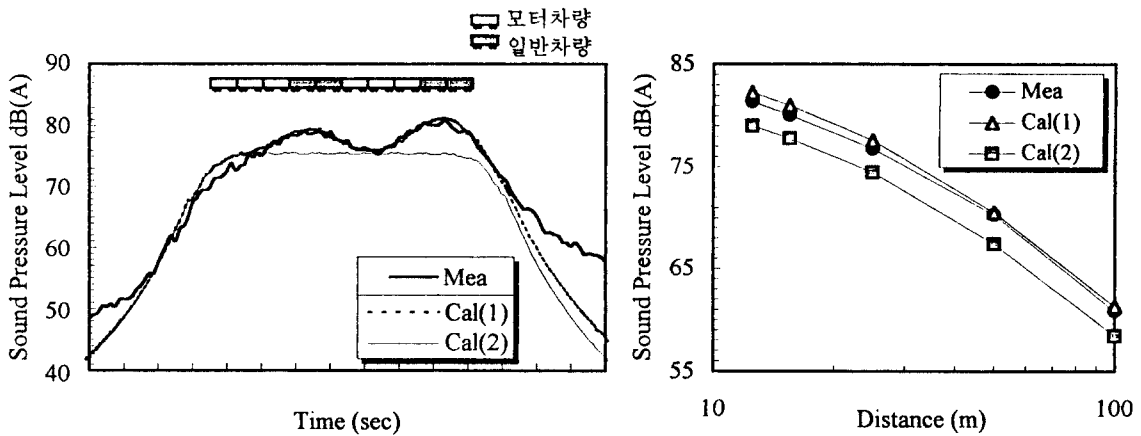


Fig.7 Comparison between measured and calculated train noise patterns and  $\overline{L_A}$  for a 10-car train.

치는 영향에 대하여, 모터차량에 대한 음원 모델화(Cal(1), Cal(2)) 방법을 통하여 검토를 한다.

모델화 방법에 있어서, Cal(1)은 먼저 차량을 일반차량과 모터차량으로 분류하고, 앞에서 설명한 방법과 동일하게 각 점음원의 파워레벨을 구한다. 그리고 소음레벨의 시간과형에서 일반차량부와 모터차량부 사이의 레벨차이와 각 차량의 편성 댓수에 의하여 각 차량의 점음원의 파워레벨을 에너지 합성법에 의하여 다시 산출한다. 이와 같은 방법에 의하여 구한 파워레벨을 예측계산모델에 적용하여 산출한 소음레벨의 시간과형과 실측의 시간과형을 비교하여 그림7에 나타내고 있다. 그림7에서, 열차가 측정점을 통과하기 전후의 시각에서 모터차량의 지향특성과 편성위치가 주원인으로서 여겨지는 영향에 의하여 계산치와 측정치와는 약간 레벨차이가 보이지만, 전체적인 경향은 매우 양호하게 일치하고 있으며, 모터차량에 의한 소음레벨의 피크도 어느 정도는 잘 예측되어 있다.

한편 Cal(2)는 Cal(1)의 방법에 의하여 구해진 일반차량과 모터차량의 각 파워레벨에서, 모터차량의 파워레벨을 일반차량의 파워레벨과 같은 크기의 모델로서 가정하여 계산한 결과이다. 계산결과, 그림7에 나타난 바와 같이 열차의 모터파워를 소음레벨의 계산에 고려하지 않는 경우의 소음레벨의 시간과형은 예측되는 결과이지만 피크 부분이 나타

나지 않아 전체적인 레벨저하가 보이며, 각 측정점에서의 거리감쇠특성곡선은 약 3dB(A) 정도의 감쇠효과를 나타내고 있다.

## 6. 맺음말

철도소음의 전파예측을 위한 예측모델의 작성에 매우 중요한 요소가 되는 주행열차로부터의 소음방사특성에 대하여 음향인텐시티법을 이용하여 검토하였다.

그리고 검토결과를 근거로 하여 평탄지 선로를 주행하는 열차를 유한길이의 지향성 점음원열로 가정하고, 지향성계수별( $n$ )로 소음레벨을 구하여 실측치와의 대응성에 대하여 검토하였다. 또한 모터차량에 대한 음원 모델화에 의하여 모터차량이 소음발생에 미치는 영향에 대해서도 검토하였다.

## [참고문헌]

- 1) E.J. Rathe *J.S.V.*, 51, 371-388(1977)
- 2) D. Hohenwater, *J.S.V.*, 141, 14-41(1990)
- 3) Terakuta Endo, *J.A.S.J.*, 32, 328-334(1976)
- 4) 橋 秀樹 他 日本騒音研究會資料 N-89-52
- 5) 川井孝雄 日本音響學會誌, 39, 374-379(1983)
- 6) M.E. Delany 他 *Appl. Acoust.* 3, 105-116(1970)
- 7) Y. Hidaka 他 *Proc. of Inter noise 95*, (1995)
- 8) 朱 鎮洙 他 日本建築學會講演梗概集 1995.8
- 9) 朱 鎮洙 他 日本音響學會講演論文集 1995.9