

# 고속철도소음의 전파특성

김정태\*

(Noise Propagation Characteristics for Highspeed Train in Outdoors)

(Jeung-Tae Kim)

## 1. 서론

도시화, 공업화, 교통기관의 고속화와 운행횟수의 증가로 인해 소음공해는 최근 사회문제로 급속히 발전되고 있다. 특히 육상교통수단에 생활소음은 전국적인 문제로 확대되고 있으며 국민의 쾌적한 생활환경욕구는 날로 심화 될 것을 감안하면 향후, 더욱 사회적 관심사로 등장한 것으로 판단된다. 근래에 들어 육상교통소음은 환경소음의 주범 중에서 매년 1위를 차지해 오고있다.

육상교통으로 인해 발생하는 소음중 철도소음으로 피해를 받는 지역이 광범위하다. 이를위해 현실적인 방지대책으로 도로변에 방음벽을 설치하는 추세에 있으며 근래에 들어서는 매년 40여 km의 방음벽이 신설되고 있다. 따라서 환경소음 보호를 위해 투자되는 방음벽 설치 비용은 점차 증가되는 추세이며 앞으로 예상되는 피해지역 주민들의 요구가 조광권 확보와 자연경관을 볼 수 있는 시각적인 제약요소를 해결하는 방향으로 발전할 것으로 판단된다.

일반적으로 선진각국의 예를 보면 사회간접자본의 건설시 생활환경보호에 투자되는 비용은 건설비용의 5-20% 수준으로 알려져있다. 이중에서 소음방지시설을 위해서 전체공사 비용의 3-4% 정도를 할당해 주고 있다. 우리나라에서도 고속도로나 지방국도, 고속철도의 건설시 육상교통의 소음저감을 위해 대단위 사회간접자본재에 대한 비용부담이 예상되고 있다.

육상교통과 같이 이동하는 소음원에서 발생하는 음원의 종류는 크게, 점음원, 선음원, 면음원 등으로 구분될 수 있고 이와 같은 구분은 소음원 자체가 가지고 있는 크기에 비해 소음원과 측정자 위

치사이의 거리값과의 비에 의해서 결정된다. 특히, 철도차량의 소음원에서 발생하는 음향에너지는 완전자유공간의 경우와는 달리, 반무한한 공간에서 전파되며 전파과정에서 반사, 회절, 산란 등 물리적인 특성이 간여하게 된다.

이동하는 소음원 중에서 유한길이의 선음원 모델로 볼 수있는 대표적인 예가 철도소음이라 할 수 있다. 철도소음은 교통소음중에서 항공기소음과 도로교통에 이어 세번째로 많이 소음공해를 야기시키고 있어 환경소음 측면에서 이에 대한 대책과 분석이 요구되고 있다. 또한, 향후 고속철도 등 새로운 대량교통수단이 우리나라에서 운영될 것으로 보아 소음환경 측면에서 점차 중요시 되고 있는 분야이기도 하다.

본연구에서는 철도차량 소음원의 모델링을 하기 위해서 소음원의 특징을 분석하고 음원에서 방출되는 음향에너지의 전파현상을 검토하였다. 이와 함께, 향후 우리나라에서 설치운영이 예상되고 있는 고속철도의 음향방사특성을 해석하고 이의 소음원으로부터 인접거리에 떨어져 있는 곳에 대한 소음전파특성을 해석하여 예상되는 소음분포도를 작성하였다.

## 2. 철도소음원에 대한 모델링

유한한 길이 L인 비상관 소음발생원으로 구성된 철도차량이 있다고 보자. 그림 1 은 소음발생원인 철도차량의 길이와 미소요소에 의해서 발생하는 소음원, 그리고 수음자 위치에 대한 좌표를 보여주고 있다. 수음점에서 보았을때 철도의 앞쪽에 있는 곳의 각도와 끝점에 있는 각도를  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 로 각각 표현하고 철도차량의 중심점으로 부터의 수직거리를 h라 한다. 미소길이  $\Delta\xi$ 로부터 발생하는 소음 에너지는 측정된 거리  $R_0$ 에서  $p_0^2 \Delta\xi$  값을 가지게

\* 홍익대학교 기계공학과

된다. 따라서, 임의의 거리 R 만큼 떨어져 있는 수음점에서의 음압은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\Delta p^2 = p_0^2 \cdot \left(\frac{R_0}{R}\right)^2 \Delta \xi \quad \dots \quad (1)$$

따라서, 음압은 (2)식과 같이 정리된다.

$$\Delta p^2 = \frac{p_0^2 R_0^2 \Delta \xi}{(x-\xi)^2 + h^2} \quad \dots \quad (2)$$

한편, 수음점에서 느끼는 음향에너지는 철도차량의 길이 L에 의한 결과임으로 위식을 철도차량의 길이에 따라 적분하여야 한다. 그 결과, 수음점의 음압은

$$p^2 = \frac{p_0^2 R_0^2}{h} (\theta_1 - \theta_2) \quad \dots \quad (3)$$

의 식으로 표현되어진다. 수음점에서 본 철도차량의 각도  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 는 기하학적인 조건으로부터 식(4)와 식(5)로 정리될 수 있으므로

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left[ \frac{\frac{1}{2} - \frac{x}{L}}{h/L} \right] \quad \dots \quad (4)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left[ \frac{\frac{1}{2} + \frac{x}{L}}{h/L} \right] \quad \dots \quad (5)$$

앞의 압력을 나타내는 식에  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 를 식에 대입한 후, 음압의 크기를 계산하면

$$L_p = 10 \log \left[ \frac{p_0^2 R_0^2 / L}{p_{ref}^2} \right] + 10 \log \left[ \frac{\Delta \theta}{h/L} \right] \quad \dots \quad (6)$$

과 같게 된다. 여기서  $p_{ref}$ 는 dB의 기준이 되는  $20 \mu Pa$ 이며  $\Delta \theta$ 는  $\theta_1 - \theta_2$ 를 가르킨다.

이 식에서 첫번째 항은 음원인 철도차량의 정보에 의해서 결정되는 값이고, 두번째 항은 철도차량으로부터 수직거리 h 만큼 떨어져 있는 수음점의 위치변동에 따른 영향을 나타내는 값이 된다.

한편, 철도차량과 같이 유한길이를 가진 선소음원의 특징을 지배하는 물리량은 단위길이당 발생하는 음향파워  $\Pi_1$ 이라 할 수 있다. 따라서, 앞에서 구한 음압으로부터 반무한 공간에 펼쳐지는 철도차량의 음향파워  $\Pi_1$ 을 dB로 표현된 값을 음향파워레벨 PWL 이라 하면, PWL은

$$PWL = L_p + 10 \log(h) - 10 \log \left( \frac{\Delta \theta}{2\pi} \right) \quad \dots \quad (7)$$

값을 가지게 된다.

따라서, 특정한 철도차량에 의해 나타나는 소음도를 예측하기 위해서는 식(7)을 이용하여 계산된 해당차량의 단위길이당 음향파워를 사전에 알고 있어야 한다.

철도차량에서 발생하는 선음원의 단위길이당 음향출력  $\Pi_1$ 의 크기 PWL은 앞의 식에서 표시되어 있듯이,

$$PWL = SPL + 10 \log(h) - 10 \log \left( \frac{\Delta \theta}{2\pi} \right) \quad \dots \quad (8)$$

의 관계를 가진다. 여기서 SPL은 음원으로부터 거리  $R_0$  떨어진 곳에서 측정된 소음도와 철도차량의 전구간에서 추가되는 소음도의 합으로 이루어짐으로,

$$SPL = 10 \log \left[ \frac{p_0^2 R_0^2 L}{p_{ref}^2} \right] + \Delta SPL, \quad \dots \quad (9)$$

한편,  $\Delta SPL$ 은

$$\Delta SPL = 10 \log \left( \frac{\theta_1 - \theta_2}{h/L} \right) \quad \dots \quad (10)$$

이다.

실제, 측정을 통해 철도소음 데이터를 이용할 때에는 소음도 중의 최대치  $L_{max}$  (dB) 값이 의미가 있게 된다. 또한, 철도변으로부터 측정위치까지 수직거리 만큼 떨어진 곳에서의  $\theta_1$  과  $\theta_2$  는 철도차량의 길이, 즉 차량수에 의해 결정된다.

### 3. 철도차량에 의한 옥외소음도 예측

앞에서 설명된 단위길이당 철도차량에서 발생하는 음향출력값을 사용하면 철도변에서 임의의 거리만큼 떨어진 위치에서 소음도를 예측할 수 있다. 임의의 위치라 함은 철도변으로 부터의 수직거리 뿐만 아니라 이동하는 철도차량의 중심점으로부터 떨어져 있는 수평거리도 포함한다.

수직거리에 대한 영향은 그림 2 에 보여져 있다. 그림에서 x축은 수직거리 h 를 철도차량의 길이 L 로 무차원화 시킨 값이다. 무차원화 한 값이 0.1 미만인 철로변 인접에서는 원통파와 같이 소음에너지가 전파하므로 선음원 특성인 거리 2 배증가에 따라 3 dB 저감 효과가 나타난다. 이에 반해, 철로변으로부터 떨어진 거리가 증가하여 무차원화한 거리값이 0.1 이상이 되면 구면파와 같이 에너지가 확산되므로 점음원 특성을 보이게 되어 거리의 2배증가당 6 dB저감 특성이 나타나게 된다. 그림에서 점선으로 표시된 두 개의 선은 각각 3 dB/dd 및 6 dB/dd 를 보여주고 있다.

한편, 환경소음측면에서 철도소음의 피해를 받는 곳은 무차원화된 거리가 0.1 보다크고 1.0 보다 작은 철도변 지역이 된다. 이곳은 선음원의 3 dB 저감특성 뿐만 아니라 점음원의 6 dB 저감 특성에도 해당되지 않는 과도 현상이 나타나는 음향학적인 구간에 해당된다. 이러한 과도적 현상이 나타나는 구간을 거리로 환산하면 철도의 길이가 200 m 로 가정할 경우, 철도변 300 m 가 된다.

고속철도의 경우는 400 m 의 길이를 가지고 있으므로 관심있는 소음피해지역은 원통파와 구면파의 특성이 과도적으로 변화하는 구간인 40 m ~ 400 m 에 해당하게 된다.

그림 3 은 철도차량의 중심점으로부터 수평거리 x 만큼 떨어진 곳에서의 소음 보상값을 보여주는 특성곡선을 보여주고 있다. 그림의 x 축은 수평거리 x 를 철도차량의 길이 L 로 무차원화한 값을,

y 축은 소음도 보상값  $\Delta$ SPL 을 보여주고 있다. 가령, x 축의 값이 0 일때라 함은 이동하고있는 철도차량의 중심점이 측정하는 지점을 지금 막 통과하고 있는 순간을 가르키며, x 축의 값이 2.0 일때에는 시간이 경과하여 철도차량의 길이 2 배만큼 충분히 멀리 지나간 뒤의 순간을 가르키게 된다. 그림에서 수직거리에 대한 무차원화 값 h/L 은 0.005 부터 2.0 까지 변화하는 6 가지의 경우가 보여져 있다. 철도변에서 인접되어 있을수록, 차량이 지나가는 순간의 소음도 변화는 크게 나타나는데 비해, h/L 값이 1.0 또는 2.0 이 되면 철도가 지나가는 순간과 철도가 먼 거리에 있을때 간의 소음도 차이가 없게 된다. 또한, h/L 값이 0.2 보다 작은 구간에서는 거리가 2 배 증가함에 따라 약 3 dB씩 저감되는데 비해서, h/L 값이 1.0 보다 커지는 구간에서는  $\Delta$ SPL 값이 약 6 dB씩 저감됨을 볼 수있다. 그림과 같은 소음보상특성은 x 값이 음이 되어도 x 값이 양의 경우와 동일한 현상이 나타나므로 그림의 x=0 인 축에 대해 대칭으로 나타나는 우함수 특징을 보여주게 된다.

### 4. 고속철도 주행시 예상되는 옥외소음도

국내에서 향후, 도입 운영될 고속철도는 시속 300 Km, 차량 20 개로 구성되는 고속의 장대열차에 해당된다. 따라서 고속철도 전체의 길이는 400 m가 된다.

본 연구에서는 고속철도의 운영시 철도변 소음을 예측하기 위하여 앞에서 설명된 철도변 소음을 예측하는 모델을 적용해 보았다. 모델대상 고속 철도의 소음은 프랑스 현지에서 측정하였으며 측정 과정에서 소음도의 최고치인  $L_{max}$  값을 기록하였다. 측정은 프랑스 파리와 Lille의 사이에서 수행되었으며 대상철도는 Eurostar였다. Euro -star의 소음발생 특성은 향후, 국내에서 운영될 고속철도 보다 개량된 차종이기 때문에 소음크기는 낮은 것으로 알려져 있으나, 철도차량의 전체길이는 동일한 값을 가지고 있으므로 이 기종을측정대상으로 삼았다.

측정은 철도변 4 군데 (25 m, 50 m, 100 m, 200 m)에서 수행되었고, 측정된 소음의 최대치는  $L_{max}$  기준으로 25m에서는 92.5 dB, 50 m에서는 88.6 dB, 100 m에서는 84.6 dB, 200 m에서는 79.3 dB

가 되었다.

한편, 각각의 수직거리에서 본 고속철도의 각도  $\Delta\theta$ 는 다르게 나타나므로, 측정된 최대 소음도로부터 단위길이당 발생하는 음향파워  $\Pi_1$  을 계산하면 각각의 위치에서 본 소음값이 도출된다. 고속철도에서 발생하는 단위길이당 음향파워의 계산 결과는 표 1 에 보여져 있다. 이 값은 20 개의 차량을 가진 고속철도를 차량당 20m 로 가정하고 구한 값이다.

한편, 물리적으로, 측정거리별 음향파워는 달라질 수는 없으나, 측정오차에 의해서 각각의 위치에서 구한 음향파워는 조금씩 다르게 나타나고 있다. 따라서, 고속철도의 단위길이당 발생하는 음향파워의 값이 의미 있기 위해서는 4 곳에서 계산된 음향파워의 평균값을 구하여야 하며, 산술 평균한 결과는 109.1 dB이 된다.

참고로, 400 m 길이를 가진 고속철도 전체에서 발생하는 음향파워를 계산해보면 135 dB가 된다.

앞에서 계산된 단위길이당 음향파워 109.1 dB를 가지고 있는 고속철도가 운행 할 때의 철도변 소음도를 예측한 결과는 그림 4 에 보여져 있다. x 축은 철노의 중심점에서 수평으로 떨어진 거리 x 를 무차원화한 값이며, y 축은 소음도를 dB로 나타내고 있다.

철도변 25 m, 50 m, 100 m 및 200 m 에서 계산된 소음도(  $L_{max}$  )를 비교해 볼 때, 고속철도변 200m 떨어진 거리에서도 80 dB에 육박하고 있음을 볼 수 있다. 이와같은 최대소음도  $L_{max}$  로부터, 하루에 통과하는 고속철도의 빈도수를 알면 등가소음도  $L_{eq}$  를 계산할 수 있게 된다. 고속철도에서 발생하는 단위길이당 음향파워는 국내에서 이미 운영되고 있는 일반철도의 그 값에 비해 크게 높은 값을 가지고 있지는 않으나, 고속철도는 1,000 여명의 대량 승객운송을 위한 교통수단이기 때문에 철도의 길이가 400 여m 가 되는 관계로 주변에 미치는 소음도가 환경 기준으로 권고되고 있는 허용치를 크게 증가 하고있다. 해석결과, 철도변 250 m 거리이내는 환경소음의 권장값인 65 dBA를 초과하고 있는 것으로 나타나고 있다. 향후, 고속철도의 운영시 이와같은 소음피해를 사전에 예방하기 위해서는, 건설초기에서 부터 단계적으로 계획적인 소음방지대책이 필수적으로 요구되고 있다.

## 5. 결론

우리나라와 같이 철도의 운행위치와 소음 피해를 받는 수음자 간의 거리가 인접되어 있는 경우, 소음의 전파특성은 과도형상을 나타내는 구간에 속하게 되어 전파중에 나타나는 지표면의 다양한 물리적, 현상과 경계면 등의 임피던스 값 등이 많은 영향을 끼치게 된다.

본 연구에서는 철도소음의 소음원 자체에 대한 모델링 기법과, 자유공간을 전파할 때 나타나는 거리감쇠 효과 등을 고려한 음향학적인 특성을 근사, 분석 하였다. 음원모델로 유한길이의 연속선음원 및 유한 불연속 선음원 등에 대한 검토가 이루어졌고, 특히, 소음원의 크기에 비교하여 수음자의 위치에 따라 저감되는 음향전파특성을 설명하였다.

또한, 유한한 길이를 가지고 있는 철도차량의 소음원 모델을 이용하여 향후 국내에서 운행되리라 예상되는 고속철도의 음향파워를 산출하였다. 산출된 음향파워로부터 철도변의 소음분포를 도출하였으며 고속철도의 경우 운행시 소음피해가 어느 정도인지를 예상하였다.

## 후기

이 연구는 정부에서 시행한 선도기술개발사업(주관기관 : 국립환경연구원)의 지원으로 이루어 졌음을 밝힌다.

## 참고문헌

1. Highway Research Board, High way Noise : A field evaluation of traffic noise reduction measures, 1973.
2. Wong, J.Y. , Theory of Vehicles, John Wiley and Sons, Inc, 1993.
3. Pierce Allan, Acoustics, McGraw-Hill Book, 1981.
4. 정일복등, "도로교통 소음저감을 위한 종합대책에 관한 연구(Ⅲ)", 국립환경연구원, 1989.
5. Federal Highway Administration, Update of TSC highway traffic noise prediction code, 1977.

6. Federal Highway Administration, users Manual : TSC highway traffic noise prediction code, 1977.
7. 은희준, 김정태등, “고속철도의 환경 기준 및 진동기준에 관한 연구”, 한국고속철도공단, 1995.
8. 김정태, “육상교통 소음전파특성 규명 연구”, 제 1차년도 보고서, 환경부, 1995.
9. 황철호 등, “철도소음의 예측기술개발”, KRISS 제 1차년도 보고서, 과학기술처, 1995.

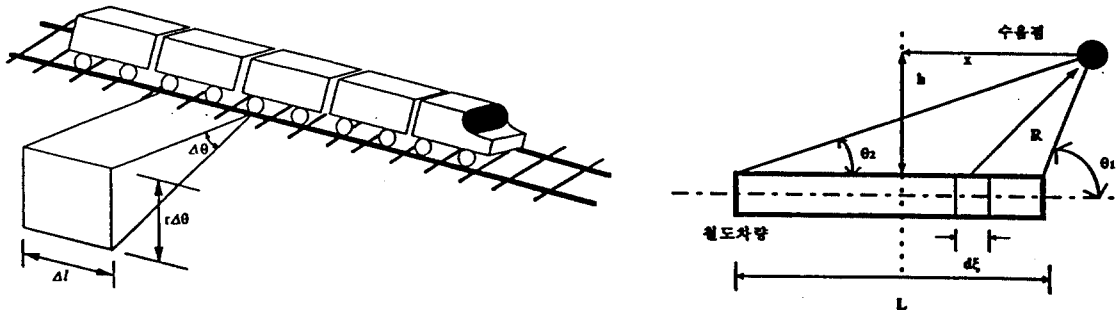


그림 1 철도차량의 소음전파

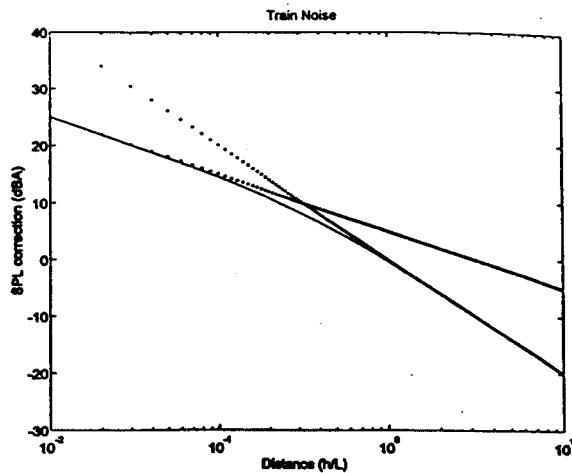


그림 2 철도소음의 거리감쇠 특성

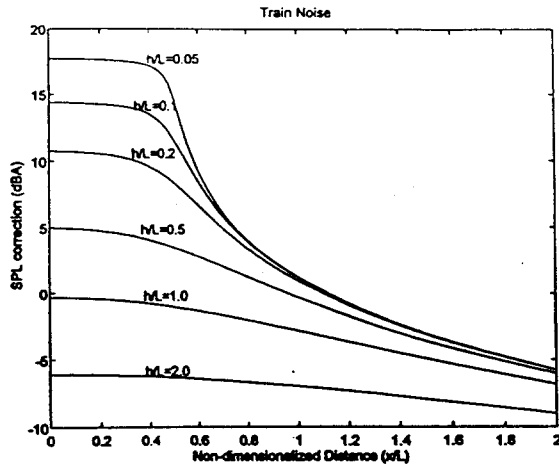


그림 3 수평 및 철도소음의 수직거리감쇠특성

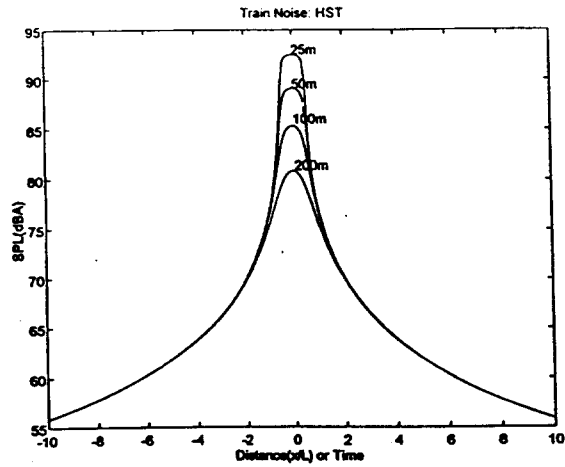


그림 4 고속철도 TGV 소음의 거리감쇠

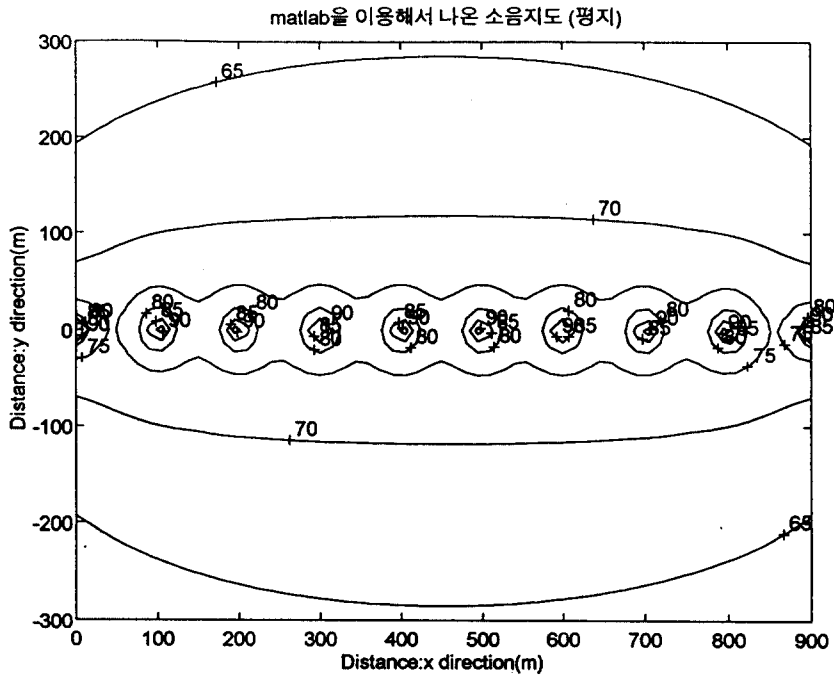


그림 5 평지에 대한 고속철도변 옥외소음 분포도

표 1 고속철도 TGV의 소음 특성

거리(m)	$L_{max}$ (dBA)	$\Delta \theta$	$\Pi_t$	비고
25	92.5	166	109.8	차량당 20 m, 20 개 차 량
50	88.6	152	109.3	
100	84.6	127	109.1	
200	79.3	90	108.3	
평 균			109.1	