

〈論 文〉

고속철도의 소음특성과 전파현상

Highspeed Train : Sound Power and Noise Propagation Characteristics

김 정 태* · 은 희 준**

Jeung Tae Kim and Hee Joon Eun

Key Words : High-Speed Train(고속철도), Continuous Line Source(연속선음원), Outdoor noise propagation(옥외소음전파), Sound Power(음향파워), Equivalent Sound Pressure Level(등가소음도)

ABSTRACT

For a rail traffic noise, a typical source has a length of 200m~400m so that the noise pollution areas have been located in the transition regions where the sound level drops between 3dB/dd and 6dB/dd. Therefore, in this region, parameters such as a horizontal distance from the track, the geometry of the ground surface, the environmental effect, and the boundary impedance condition play import roles, especially in our nation's situation. In this study, modelling techniques for the finite length of noise source have been investigated in order to evaluate the rail traffic noise level. Then, noise correction value Δ SPL for various location in the track region is represented by the non-dimensionalized horizontal and parallel distance from the track. As an application, a high speed train is examined. Base on the noise data measured for a Eurostar in France, the sound power value per unit length Π_1 is calculated. It turns out that Π_1 is 109 dB. Overall sound power from the highspeed train to be serviced in our country is expected to 135 dBA.

1. 서 론

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

육상교통으로 인해 발생하는 소음중 철도소음으로 피해를 받는 지역이 광범위하다. 이를 위해 현실적인 방지대책으로 도로변에 방음벽을 설치하는 추세

에 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 생활 환경보호에 투자되는 비용은 건설비용의 5~20% 수준으로 알려져 있다. 이중에서 소음방지시설을 위해서 전체공사 비용의 3~4% 정도를 할당해 주고 있다. 우리나라에서도 고속도로나 지방국도, 고속철도의 건설시 육상교통의 소음저감을 위해 대단위 사회간접 자본재에 대한 비용부담이 예상되고 있다^(1,2).

육상교통과 같이 이동하는 소음원에서 발생하는 음원의 종류는 크게, 점음원, 선음원, 면음원 등으로 구분될 수 있고 이와 같은 구분은 소음원 자체가

*정희원, 홍익대학교 공과대학 기계공학과

**정희원, 한국표준과학연구원

가지고 있는 크기에 비해 소음원과 측정자 위치사이의 거리값과의 비에 의해서 결정된다. 특히, 철도차량의 소음원에서 발생하는 음향에너지는 완전자유공간의 경우와는 달리, 반무한한 공간에서 전파되며 전파과정에서 반사, 회절, 산란 등 물리적인 특성이 간여하게 된다⁽³⁾.

이동하는 소음원 중에서 유한길이의 선음원 모델로 볼 수 있는 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⁽⁴⁾.

본연구에서는 철도차량 소음원의 모델링을 하기 위해서 소음원의 특징을 분석하고 음원에서 방출되는 음향에너지의 전파현상을 검토하였다. 이와함께, 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 L 인 비상과관 소음발생원으로 구성된 철도차량이 있다고 보자. Fig. 1은 소음발생원인 철도차량의 길이와 미소요소에 의해서 발생하는 소음원, 그리고 수음자 위치에 대한 좌표를 보여주고 있다. 수음점에서 보았을 때 철도의 앞쪽에 있는 곳의 각도와 끝점에 있는 각도를 θ_1 과 θ_2 로 각각 표현하고 철도차량의 중심점으로부터의 수직거리를 h 라 한다. 미소길이 $\Delta\xi$ 로부터 발생하는 소음 에너지는 측정된 거리 R_0 에서 $p_0^2 \Delta\xi$ 값을 가지게 된다. 따라서, 임의의 거리 R 만큼 떨어져 있는 수음점에서의 음압은 식 (1)과 같이 표현된다^(5~7).

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

따라서, 음압은 (2)와 같이 정리된다.

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

한편, 수음점에서 느끼는 음향에너지는 철도차량의 길이 L 에 의한 결과임으로 위식을 철도차량의 길이에 따라 적분하여야 한다. 그 결과, 수음점의 음

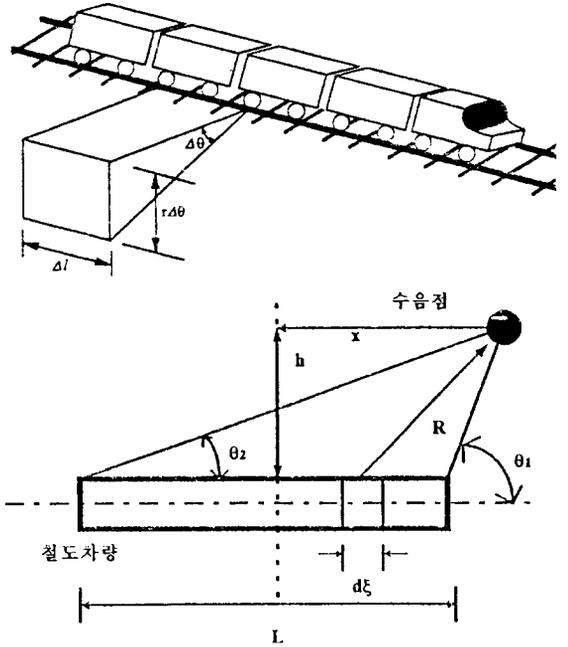


Fig. 1 Noise propagation of a train

압은

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

의 식으로 표현되어진다. 수음점에서 본 철도차량의 각도 θ_1 과 θ_2 는 기하학적인 조건으로부터 식 (4)와 식 (5)로 정리될 수 있으므로

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

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

앞의 압력을 나타내는 식에 θ_1 과 θ_2 를 식에 대입한 후, 음압의 크기를 계산하면

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

과 같게 된다. 여기서 p_{ref} 는 dB의 기준이 되는 20μ Pa이며 $\Delta\theta$ 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 선소음원

의 특징을 지배하는 물리량은 단위길이당 발생하는 음향파워 Π_l 이라 할 수 있다. 따라서, 앞에서 구한 음압으로부터 반무한 공간에 펼쳐지는 철도차량의 음향파워 Π_l 을 dB로 표현된 값을 음향파워레벨 PWL 이라 하면, PWL 은

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

값을 가지게 된다.

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

철도차량에서 발생하는 선음원의 단위길이당 음향출력 Π_l 의 크기 PWL 은 앞의 식에서 표시되어 있듯이,

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

의 관계를 가진다. ⁽⁸⁾ 여기서 SPL 은 음원으로부터 거리 R_0 떨어진 곳에서 측정된 소음도와 철도차량의 전구간에서 추가되는 소음도의 합으로 이루어 짐으로,

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

이 된다. 여기서 p_0 는 측정된 음압을, p_{ref} 는 $20\mu Pa$ 을 가르킨다. 한편, ΔSPL 은

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

이다.

실제, 측정을 통해 철도소음 데이터를 이용할 때에는 소음도 중의 최대치 L_{peak} (dB) 값이 의미가 있게 된다. 또한, 철도변으로부터 측정위치까지 수직거리만큼 떨어진 곳에서의 θ_1 과 θ_2 는 철도차량의 길이, 즉 차량수에 의해 결정된다.

3. 철도소음도 예측

앞에서 설명된 단위길이당 철도차량에서 발생하는 음향출력값을 사용하면 철도변에서 임의 거리만큼 떨어진 위치에서 소음도를 예측할 수 있다. 임의 위치라 함은 철도변으로부터의 수직거리 뿐만아니라 이동하는 철도차량의 중심점으로부터 떨어져 있는 수평거리도 포함한다.

수직거리에 대한 영향은 Fig. 2에 보여져 있다. 그

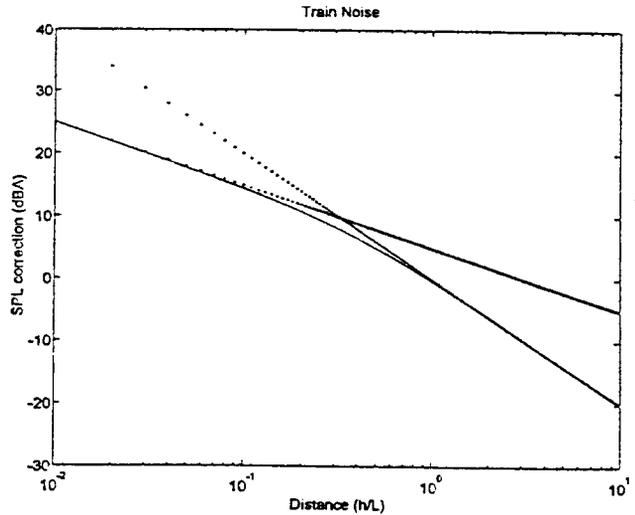


Fig. 2 Geometry spreading of train noise

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

한편, 환경소음측면에서 철도소음의 피해를 받는 곳은 무차원화된 거리가 0.1보다 크고 1.0보다 작은 철도변 지역이 된다. 이곳은 선음원의 3dB 저감특성 뿐만 아니라 점음원의 6dB 저감 특성에도 해당되지 않는 과도 현상이 나타나는 음향학적인 구간에 해당된다. 이러한 과도적 현상이 나타나는 구간을 거리로 혼산하면 철도의 길이가 200m로 가정할 경우, 철도변 300m가 된다. 고속철도의 경우는 400m의 길이를 가지고 있으므로 관심있는 소음피해지역은 원통파와 구면파의 특성이 과도적으로 변화하는 구간인 40m~400m에 해당하게 된다.

Fig. 3은 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 ΔSPL 을 보여주고 있다. 가령, x 축의 값이 0일때라 함은 이동하고 있는 철도차량의 중심점이 측정하는 지점을 지금 막 통과하고 있는 순간을

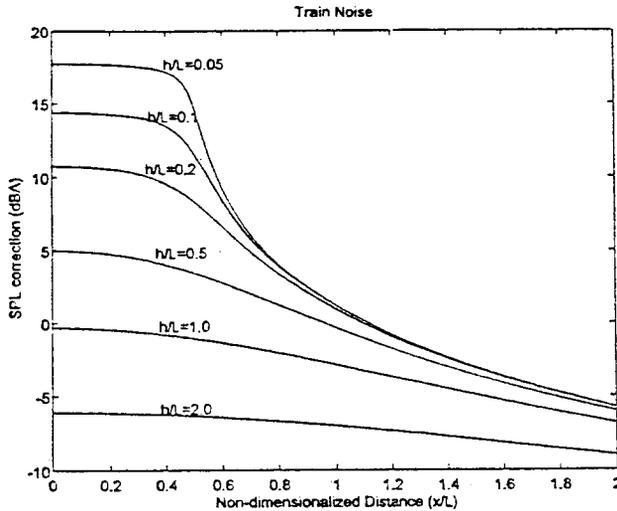


Fig. 3 Horizontal and vertical geometry effect of train noise

가르키며, x 축의 값이 2.0일때에는 시간이 경과하여 철도차량의 길이 2배만큼 충분히 멀리 지나간 뒤의 순간을 가르키게 된다. 그림에서 수직거리에 대한 무차원화 값 h/L 은 0.005부터 2.0까지 변화하는 6가지의 경우가 보여져 있다. 철도변에서 인접되어 있을수록, 차량이 지나가는 순간의 소음도 변화는 크게 나타나는데 비해, h/L 값이 1.0 또는 2.0이 되면 철도가 지나가는 순간과 철도가 먼 거리에 있을 때 간의 소음도 차이가 없게 된다. 또한, h/L 값이 0.2보다 작은 구간에서는 거리가 2배 증가함에 따라 약 3dB씩 저감되는데 비해서, h/L 값이 1.0보다 커지는 구간에서는 ΔSPL 값이 약 6dB씩 저감됨을 볼 수 있다. 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. 고속철도의 소음측정

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

본 연구에서는 고속철도의 운영시 철도변 소음을 예측하기 위하여 앞에서 설명된 철도변 소음을 예측하는 모델을 적용해 보았다. 모델대상 고속 철도의 소음은 프랑스 현지에서 측정하였으며 측정과정에서 소음도의 최대값을 기록하였다. 측정은 프랑스 파리 와 릴의 사이에서 수행되었으며 대상철도는 10량으

Table 1 ISO-3095 for Railway noise measurement

주요 항목	내 용
(1) 측정환경	○ 주변 50m까지 자유음장조건을 만족할 수 있도록 반사물체가 없어야 함.
(2) 철도운행조건	○ 일반철도 : 시속 80km ○ 지하철도 : 시속 60km ○ 고속철도 : 시속 200km등 최대허용속도
(3) 측정조건	○ 철도레일의 중심으로부터 7.5m 거리에서 측정 ○ 고속철도의 경우 25m, 50m, 100m 거리에서 측정 ○ 마이크 높이는 레일의 평면으로부터 1.2m~1.5m 사이에 높음 ○ 2차 마이크는 3.5m에 설치가능 (고속철도의 경우 50m부터)
(4) 측정값	○ A 보상된 전대역 소음도 ○ 계측기는 빠른 동특성 상태 ○ 옥타브 및 1/3 옥타브 측정

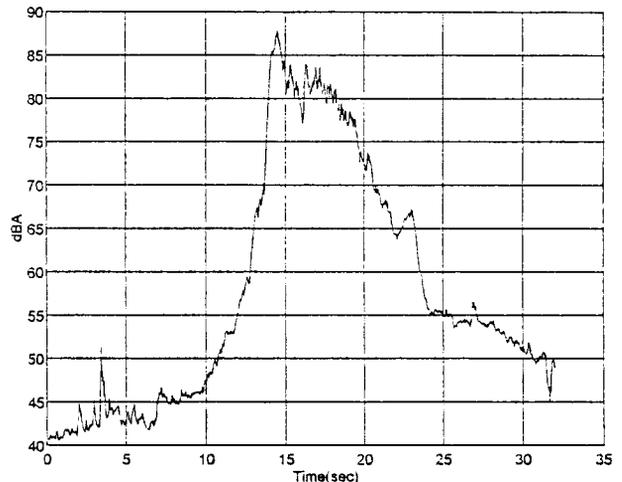


Fig. 4 A typical noise signal measured near on a railway

로 구성되어 있는 일반고속철도와 20량으로 구성된 Eurostar였다. Eurostar의 소음발생 특성은 향후, 국내에서 운영될 고속철도보다 개량된 차종이기 때문에 소음크기는 낮은 것으로 알려져 있으나, 철도 차량의 전체길이는 동일한 값을 가지고 있다.

철도에서 발생하는 소음의 측정기준과 절차는 ISO 3095-1975(E)에 언급되어 있다.⁽⁹⁾ 따라서, 측정과정에서 여건이 허용하는 한 해당기준이 제시하는 항목

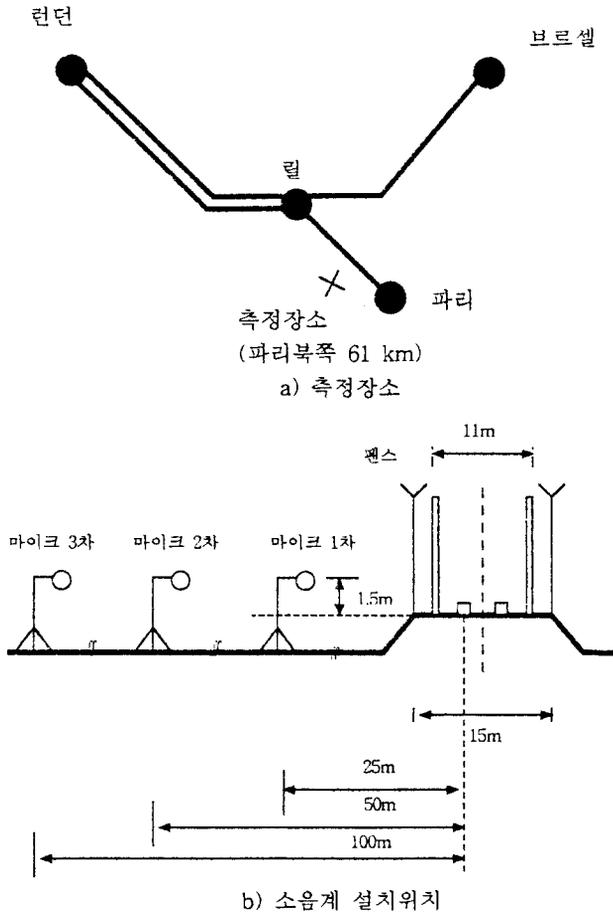


Fig. 5 Measurement set up

이 부합되도록 계측하였다. 측정시 고려되는 주요 항목에 대한 내용은 Table 1에 정리되어 있다.

측정은 동북부선이 운행되고 있는 파리-릴 사이에서 이루어졌으며 고속철도가 정속 300km/h로 운행되는 파리 북쪽 61km 지점에서 실시되었다. 철로의 구배는 상행선은 내리막길을 하행선은 오르막이었으며 기차는 최하 280km/h를 유지하는 구간이다.⁽¹⁰⁾

Fig. 4는 측정된 고속철도소음의 기록을 보여주고 있다. 또한, 측정위치와 소음계 설치장소에 대한 설명은 Fig. 5에 보여져 있다. 소음계는 빠른 반응으로 측정토록 설치되었으며 측정은 상행선 철도트랙의 중심으로부터 25m, 50m 및 100m 떨어진 곳에서 수행되었다.

측정거리 25m에 있는 1차 소음계는 철도트랙의 수평으로부터 1.5m 높이가 유지되도록 하였으며 50m 및 100m 거리에 있는 2차 소음계는 ISO 규정상 수평면으로부터 3.5m 위에 놓여져 있어야 되나 주

Table 2 Measured noise data

단위 : 최대치 (dBA)

거리	20량	10량	비고
50m	92.3	91.0 86.5	일반철도 유로스타
100m	—	81.0	

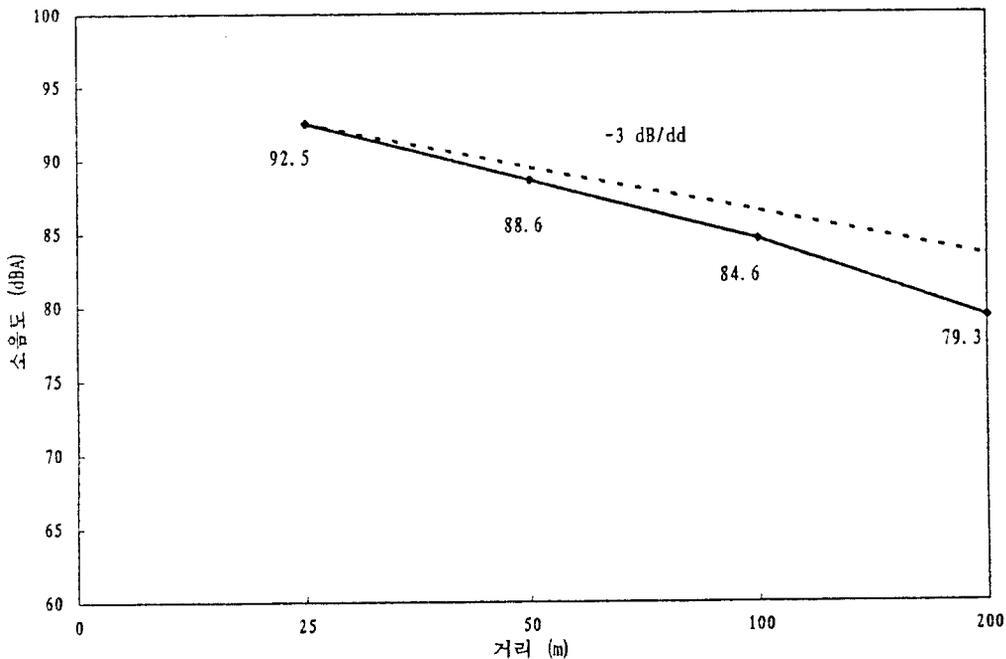


Fig. 6 Peak level of a train noise

변 여건의 어려움으로 인해 1차 소음계와 동일한 높이에서 측정되었다. Table. 2는 현지의 실측을 통해서 구해진 다양한 고속철도의 소음도를 정리한 결과이다. 유사한 고속철도차량간에도 소음도는 각각 상이하게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 한편, 프랑스 측에서는 내부자료로 Fig. 6과 같은 고속철도 소음도를 사용하고 있다.⁽¹¹⁾ 최대치 기준으로 400m 길이의 철도차량은 25m에서는 92.5dBA, 50m에서는 88.6 dBA라고 한다. 동일한 길이의 고속철도에 대한 현지에서 측정된 값과 비교하여 볼 때 50m 거리에서 3.7dBA 정도의 오차가 있으나, 측정조건과 위치의 직접적인 비교는 어려운 실정이다.

5. 고속철도의 음향파워

각각의 수직거리에서 본 고속철도의 각도 $\Delta\theta$ 는 다르게 나타나므로, 측정된 최대 소음도로 부터 단위길이당 발생하는 음향파워 I_1 을 계산하면 각각의 위치에서 본 소음값이 도출된다. 사용된 내부자료를 기준으로 하여 고속철도에서 발생하는 단위길이당 음향파워의 계산 결과는 Fig. 7에 보여져 있다. 또한 Table 3은 음향파워의 거리별 계산과정을 보여주고 있다. 이 값은 20개의 차량을 가진 고속철도를 차량당 20m로 가정하고 구한 값이다.

한편, 물리적으로 측정거리별 음향파워는 달라질 수는 없으나, 측정오차에 의해서 각각의 위치에서

Table 3 Procedure to calculate sound power

거리 (m)	Lpeak (dBA)	$\Delta\theta$	I_1 (dBA)	비고
25	92.5	166	109.8	○ 차량당 20m
50	88.6	152	109.3	
100	84.6	127	109.1	○ 20개 차량
200	79.3	90	108.3	
평균			109.1	

구한 음향파워는 조금씩 다르게 나타나고 있다. 따라서, 고속철도의 단위길이당 발생하는 음향파워의 값이 의미 있기 위해서는 4곳에서 계산된 음향파워의 평균값을 구하여야 되며, 산술 평균한 결과는 109.1dB이 된다. 참고로, 400m 길이를 가진 고속철도 전체에서 발생하는 음향파워 I 를 계산해보면 135dB가 된다.

앞에서 계산된 단위길이당 음향파워 109.1dB를 가지고 있는 고속철도가 운행할 때의 철도변 소음도를 예측한 결과는 Fig. 8에 보여져 있다. x 축은 철도의 중심점에서 수평으로 떨어진 거리 x 를 무차원한 값이며, y 축은 소음도를 dB로 나타내고 있다.

철도변 25m, 50m, 100m 및 200m에서 계산된 소음도 (L_{peak})를 비교해 볼 때, 고속철도변 200m 떨어진 거리에서도 80dB에 육박하고 있음을 볼 수 있다.

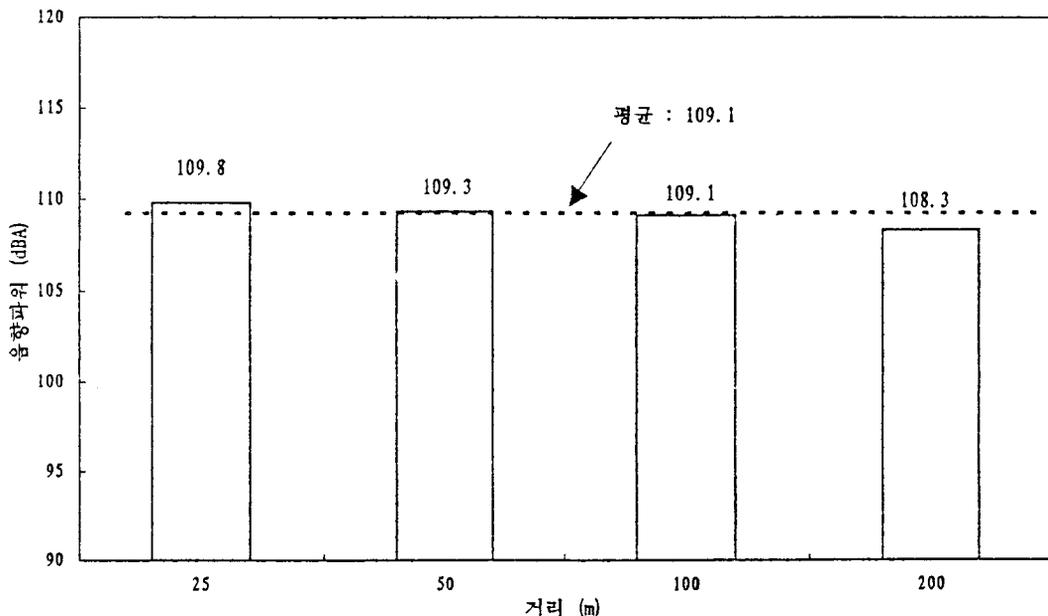


Fig. 7 Sound power characteristics of train noise

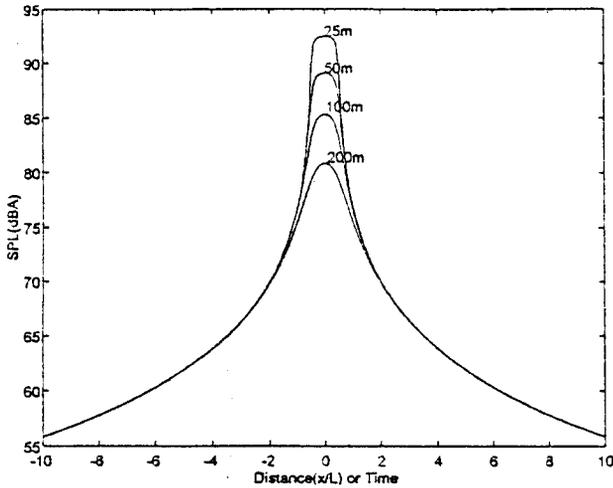


Fig. 8 Geometric spreading of high speed train

6. 결 론

우리나라와 같이 철로와 소음 피해를 받는 수음자가 인접되어 있는 경우, 소음의 전파특성은 과도현상을 나타내는 구간에서 속하게 되어 전파중에 나타나는 지표면의 다양한 물리적 현상과 경계면 등의 임피던스 값 등이 영향을 끼치게 된다.

본 연구에서는 철도소음의 모델링 기법과, 자유공간을 전파할 때 나타나는 거리감쇠 효과 등을 고려한 음향학적인 특성을 조사, 분석하였다. 음원모델로 유한길이의 연속선음원에 대한 검토가 이루어졌고 특히, 소음원의 크기에 비교하여 수음자의 위치에 따라 저감되는 음향전파특성을 설명하였다.

또한, 유한한 길이를 가지고 있는 철도차량의 소

음원 모델을 이용하여 향후 국내에서 운행되리라 예상되는 고속철도의 음향파워를 산출하였다. 해석결과, 고속철도의 단위길이당 음향파워는 109dB로 밝혀졌으며, 향후 국내에서 운용될 고속철도의 총음향출력은 135dB이 될 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- (1) 환경부, 환경백서, 1994, 1995.
- (2) 정일록 등, 1989, "도로교통 소음저감을 위한 종합대책에 관한 연구(Ⅲ)", 국립환경연구원.
- (3) Pierce Allan, 1981, Acoustics, McGraw-Hill Book.
- (4) G. B. R. Feiden, 1995, "Passenger Transport After 2000 AD", EFNSpon.
- (5) Federal Highway Administration, Update of TSC Highway Traffic Noise Prediction Code, 1977.
- (6) R. H. Lyon, "Transportation Noise", Grozer Publishing
- (7) E. J. Rathe, 1977, Railway Noise Propagation, JSV, Vol 51(3), pp. 371~388.
- (8) 김정태, 1995, "육상교통 소음저파특성 규명 연구", 제 1차년도 보고서, 환경부.
- (9) International Standard Organization, Acoustics -Measurement of Noise Emitted by Railbound vehicles, ISO 3095-1975(E).
- (10) 손충렬 등, 95년 2월, "고속철도 소음출장보고서", 소음진동공학회.
- (11) 교통안전연구원 자료, 1995년 2월.