

## 고속철도에서 교량상판의 소음저감효과

<sup>0</sup>김 준 엽 \*, 나 희 승\*

### Sound Reduction of the high-speed railroad noise by the deck plate of the Bridge

Kim Jun Yup, Hee Seung Na

#### ABSTRACT

Railroad noise is one of the main causes of environmental impact. Whenever a new railroad line is planned or a housing project near an existing railroad is proposed, an estimate of the relevant noise levels is usually required. For this, it is necessary to quantify those parameters that affect the railroad noise. This paper deals with an estimation of railroad noise by the barrier and deck plate of the bridge

#### 1. 서 론

도로 및 철도, 항공기등의 교통소음저감기술개발은 환경보존과 승객의 안락감 향상이라는 두가지 목적을 갖는다. 교통소음은 수음자위치에 따라 차실내소음과 차실외의 환경소음으로 나뉘 수 있으며 이것은 어디까지나 수음자위치에서의 구분일뿐 소음원은 결국 동일하다. 따라서 교통소음을 감소시키기 위해서는 결국 소음원을 없애거나 감소시키는 것이 가장 좋은 방법이나 도로 및 철로변과 같이 근본적으로 소음원을 차단시키지 못하는 경우 간접적인 방법, 즉 소음원과 경로를 차단하거나 분산시키는 방법을 사용하여야 한다. 경로차단에 의한 대표적인 소음대책수단으로는 방음벽, 방음터널을 들 수 있다. 고속철도의 경우에는 우리나라의 지형적 특성과 고속철도의 특성상 전체 구간 중 개활지 구간이 약20% 터널 구간이 약40% 교량구간이 40%를 차지하는 등 그 지리적인 환경은 여타의 나라에 비해 열악한 실정이다. 특히 개활지 및 교량 구간에서의 소음 피해에 대한 대책수단이 강구되어야 한다. 특히 이 구간에서의 조망권에 대한 사항은 늘어날 것으로 예상되는 고속철도 사용

인구의 욕구증대 차원에서 해결해야할 숙제로 남아있다. 따라서 본 연구의 목적은 이러한 교량구간에서 방음벽과 교량상판의 구조에 따른 교량부에서 방사되는 소음의 전파특성을 알아보는데 있다.

#### 2. 방음벽에 의한 소음저감 및 한계

일반적으로 방음벽에 의한 소음저감효과는 방음벽 상단과 측단을 통한 회절감쇠, 방음벽 자체를 통한 투과 감쇠, 지표면 영향에 의한 감쇠, 방음벽 이외의 구조물에 의한 감쇠등에 의해 결정된다.

방음벽의 효과를 개략적으로 살펴보면, 소음원과 수음점사이에 시선을 차단할 정도의 높이로 설치된 방음벽의 감쇠효과는 약 5dB(A)이며, 지표면의 감쇠효과에 의해 1~2dB(A)정도가 부가된다. 그리고 합리적인 높이와 길이를 갖는 방음벽 및 방음벽은 일반적으로 10dB(A)의 감쇠효과를 얻을 수 있으며, 15dB(A)의 감쇠효과를 달성하기 어려우나 보통 아주 높은 구조물 및 투과손실이 높은 재료를 사용하고 틈이나 개구부를 거의 없게 함으로써

\* 한국철도기술연구원

얻을 수 있다. 방음벽을 설치함으로써 최대 얻을 수 있는 감음량은 20dB(A)이나 거의 불가능하기 때문에 저감목표값이 20dB(A)를 초과한다면 다른 방안을 강구해야한다. 다음표는 5dB(A)단위로 방음벽 감쇠효과를 분류한 것으로서 소음레벨을 10dB(A)감소시키기 위해서는 음향에너지의 90%를 제거해야한다는것을 의미한다. 그리고 방음시설은 수음점에서 음원으로의 가시선을 직접 차단하지 않는 한 감음효과가 거의 없다.

표 1. 방음벽을 통한 소음감쇠 비교

방음벽 소음감쇠치	실현가능정도	음향에너지의 감쇠
5dB	간단함	60%
10dB	주의필요함	90%
15dB	대단히어려움	97%
20dB	거의불가능함	99%

최근 차량속도의 향상, 교통량의 증가, 차량의 대형화등으로 발생소음도가 증가하고 있으며, 환경기준강화에 따라 방음벽의 높이는 매년 증가하여 건설비의 상승, 일조권 침해 등 여러 가지 문제점을 갖고 있다.

### 3. 레이 추적법

건축물, 선박, 철도차량 그리고 항공기와 같이 규모가 크고 넓은 공간상의 구조물을 해석할 경우 내부 음향학적 특성등을 에너지의 흡수와 투과량 등으로 고려한 기하음향학의 개념이 도입되고 있다. 이에 대한 방법으로 수음자에서 소음원까지의 음원 반사경로를 추적하기 위해서 거울상 음원을 사용하는 거울상 음원법 (Mirror Image Source Method)과 음원에서 발생하는 음향 파워를 다수의 레이로 나누어 방사시키는 레이추적법(Ray Tracing Method)으로 나눌 수 있다. 그리고 두 방법의 장점을 채택한 콘형 빔법 (Conical Beam Method) 및 삼각형 빔법 (Triangular Beam Method)과 같은 혼성법(Hybrid Method)이 있다. 소리를 음선으로 고려하는 경우 음선은 일정 위상면에 대해서 수직인 선으로 정의되며, 음속은 공간

의 함수이며 소리를 파장으로 고려하는 것보다는 해석이 쉽다. 그러나 이는 파에 대한 엄밀한 표현이 아니고 근사적으로 유용하다.

다음은 파동방정식으로  $c=c(x,y,z)$  이다.

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1)$$

균일 매질 (homogeneous fluid)이나 비균일 매질 (inhomogeneous fluid)을 지나는 한정된 구경의 빔에서는 음파의 크기가 위치에 따라 달라지고 일정위상면도 공간의 복잡한 함수가 되므로 식(1)의 해를 식(2)로 가정하면

$$p(x, y, z, t) = A(x, y, z) e^{i\omega t - \Gamma(x, y, z) / c_0} \quad (2)$$

식(1)은 식(3)과 같다.

$$-\frac{\nabla^2 A}{A} - \left(\frac{\omega}{c_0}\right)^2 \nabla r \cdot \nabla r + \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - j\frac{\omega}{c_0} \left(2\frac{\nabla A}{A} \cdot \nabla r + \nabla^2 r\right) = 0 \quad (3)$$

여기서 A는 압력의 단위,  $\Gamma$ 는 길이 단위, 그리고  $c_0$ 는 위상속도에 대한 상수값이다. 만약

$$|A^{-1} \nabla^2 A| \ll \left(\frac{\omega}{c}\right)^2, \quad |\nabla^2 \Gamma| \ll \frac{\omega}{c}, \quad \text{그리고}$$

$|A^{-1} \nabla A \cdot \nabla \Gamma| \ll \frac{\omega}{c}$  가 되도록 A와  $\nabla \Gamma$ 가 천천히 변한다면 식(3)은 식(4)와 같이 될 수 있다.

$$\nabla \Gamma \cdot \nabla \Gamma = n^2 \quad (4)$$

여기서,  $n(x, y, z) = \frac{c_0}{c(x, y, z)}$  이다.

식(4)는 Eikonal 방정식으로 (a) 음파의 진폭이 파장에 비해 거리당 변화가 미소하고 (b) 음속도 파장에 비해 거리당 변화가 미소할 때 만족한다. 유체를 지나는 음향빔의 경우 첫 번째 조건으로부터 Eikonal 방정식은 음향 빔의 중심부에서 잘 적용될 수 있지만, 진폭이 급격히 감소하는 빔의 가장자리에서는 음의 회절(diffraction)현상으로 인하여 오류가 발생한다. 이를 보완하기 위하여 Kurze-Anderson은 다음식을 제안하였다.

$$\Delta L_B = 5 + 20 \log \frac{\sqrt{2\pi N}}{\tan \sqrt{2\pi N}} \quad (\text{dB}) \quad (5)$$

여기서  $\Delta L_B$  = 스크린 방해로 인한 저감량

$$N = \text{Frenel 수} = 2 \left( \frac{a+b-d}{\lambda} \right)$$

a = 회절 끝단(diffraction edge)에서 음원까지의 거리

b = 회절 끝단(diffraction edge)에서 수음자까지의 거리

d = 음원에서 수음자까지의 직선거리

$\lambda$  = 파장

두 번째 Eikonal식의 조건으로부터 음속은 공간을 따라 천천히 변해야하고 음파의 공간적 확산은 지나친 국부적 변화를 가져오지 않아야 한다. 이는 짧은 파장을 가지는 고주파에 한정된다. 고주파의 파장에 대한 정보를 보완하기 위하여 (Raynoise에서는) coherent source를 식(6)과 같이 정의하였으며, 이를 위상레이추적기법(Phase Ray Tracing)이라 한다.

$$P_n = \sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^{N_i} A_{ik} e^{j\phi_{ik}} e^{-jk d_{ik}} \quad (6)$$

여기서  $n$  = 반사치수

$N_i$  =  $i$  번째 차수의 이미지 음원의 수

$P_n$  = 압력

$d_{ik}$  = 수음자와 이미지 음원  $ik$  사이의 거리

$\phi_{ik}$  = 벽면 반사에서의 위상 지연과 음원의 초기위상의 합

$k$  = 파수

$A_{ik}$  = 반사  $ik$ 의 크기

레이가 벽면에 부딪혔을 경우 일부는 반사되고 일부는 벽면을 투과하는데 내부와 외부사이의 투과 손실을 투과음원의 개념을 사용하여 모델링할 수 있다. 투과 음원은 다각형면의 면적중심에 위치하여 표면에 수직인 축에서 반구형으로 방사한다. 투과음원의 파워는 가진레벨의 크기와 벽면의 투과 손실값에 의하여 결정되며 식(7) 과 같다.

$$P = I \cdot S \cdot t \quad (7)$$

여기서  $P$  = 음향파워

$I$  = 가진면에서의 음향강도

$S$  = 투과면의 면적

$t$  = 투과손실 계수

#### 4. 교량부의 소음해석

교량부에서 회절효과 및 음선추적에 적절한 파라미터 연구를 수행하였고, 방음벽의 흡음효과에 다른 방사소음의 피해정도 및 손실계수에 따른 인근 가옥의 소음도 예측을 위한 음장 모델링 작업을 수행중이다. 기하음향학에 사용하는 알고리즘은 크게 두가지로 분류되며, 레이추적법(ray

tracing method)과 거울면상음원법(mirror image source method)으로 나눌 수 있다. 본 연구에 사용한 소프트웨어 RAYNOISE Revision 3.0은 Triangular Beam Method(Mixed Raytracing & Mirror Image Source Method)를 채택하여 두방법의 단점을 보완하여 보다 정확한 해석을 가능하게 한다. 교량부에서의 소음방사특성을 알기위해 AutoCad 2000을 이용하여 모델을 생성하였다. 이를 이용하여 RAYNOISE에서 시뮬레이션을 수행하였다. 교량 구간에 있어 적용 가능한 3가지 경우를 도출하여 그에 따른 상대적인 해석을 수행하였다. 여기서 사용한 음원은 dummy source를 사용하여 각 경우에 따른 상대적인 음압레벨의 차이를 비교하였고 방음벽의 흡음률은 CEN10을 적용하였다. 표2는 각 재료의 주파수별 흡음률을 나타낸다. 먼저 교량의 높이에 따른 소음 감소 특성을 살펴보면 표3 에서 알 수 있듯이 회절감쇠와 거리감쇠에 의해 교량의 높이가 증가할수록 작게 나타남을 알 수 있다. 교량에 근접해 있는 지면은 Sound Shadow효과에 의해 보다 정숙함을 알 수 있다. 표4는 상판 너비에 따른 거리별 음압레벨을 나타낸 것으로 상판의 폭을 0.5M, 1.0M, 1.5M, 2.0M, 3.0M로 증가시키면서 시뮬레이션을 수행한 결과 상판의 너비가 증가함에 따라 회절감쇠에 의한 감쇠량이 증가함을 알 수 있다. 표5는 전과 동일한 조건에서 상판 대신 방음벽을 적용하여 방음벽에 의한 소음감쇠 효과를 예측한 것으로 방음벽의 높이가 증가할수록 소음 감쇠량이 증가함을 알 수 있다. 또한 같은 조건에서 방음벽을 적용한 경우와 상판 너비를 넓게 한 경우를 비교하면, 1.2m 높이에서는 상판 너비를 넓게 한 경우가 방음벽을 적용한 경우보다 감쇠효과는 작지만 어느 정도의 감쇠효과는 확인 할 수 있다. 하지만 수음점의 높이가 높아질수록 감쇠효과가 작아지는데 그 이유는 회절현상에 의해 생성되는 Sound Shadow 영역이 축소되기 때문이다.

본 해석은 간단한 dummy source를 이용하여 시뮬레이션한 결과이다. 현재 경부고속철도 시험 선구간에 소음측정을 수행중이며, 이를 이용하여 음향파위를 계산하고 보다 정확한 시뮬레이션을 수행할 예정이다. 현재 측정결과 교량 및 교량상판에 의한 소음저감효과가 크기에 따라 5dB(A)이상 나타나고 있으며, 방음벽의 설계시 이러한 효과를 고려하여 방음시설 실시설계를 수행하여야 한다.

표2. 시뮬레이션에 사용된 흡음률

내 용	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
콘크리트	0.04	0.05	0.06	0.06	0.07	0.09
방음벽	0.5	0.8	0.9	0.95	0.9	0.7

표3. 교량 높이에 따른 거리별 음압 레벨(LmaxA)  
상관 1.5m

내 용	수음점 높이	15m	25m	50m	75m	100m
1. 교량(5m)	1.2m	56.2	57.8	56	57	57.2
	6.2m	72.3	66.4	62.2	59.3	57.5
2. 교량(10m)	1.2m	50.1	52	53.3	52.6	51.3
	6.2m	56.2	57.8	56	57.1	56.4
3. 교량(15m)	1.2m	46.8	48.4	50.3	50.7	50.3
	6.2m	50.1	52	53.3	52.6	51.3
4. 교량(20m)	1.2m	44.6	46	48	48.7	48.8
	6.2m	46.8	48.4	50.3	50.7	50.3

표4. 상관 너비에 따른 거리별 음압 레벨(LmaxA)  
(교량 높이 10m)

내 용	수음점 높이	15m	25m	50m	75m	100m
1.상관	1.2m	51.9	53.7	54.5	53.4	56.4
	6.2m	58.3	59.2	61	58.3	56.4
2.상관(0.5m)	1.2m	51.2	53.1	54.1	53	51.6
	6.2m	57.5	58.7	61	58.3	56.4
3.상관(1.0m)	1.2m	50.6	52.5	53.6	52.8	51.4
	6.2m	56.8	58.2	61	57.9	56.4
4.상관(1.5m)	1.2m	50.1	52	53.3	52.6	51.3
	6.2m	56.2	57.8	56	57.1	56.4
5.상관(2.0m)	1.2m	49.5	51.5	52.9	52.4	51.2
	6.2m	55.6	57.4	55.9	57	56.4
6.상관(3.0m)	1.2m	48.5	50.6	52.3	52	51
	6.2m	54.3	56.6	55.7	56.7	56.4

표 5. 방음벽 높이에 따른 거리별 음압레벨(LmaxA)

내 용	수음점 높이	15m	25m	50m	75m	100m
1.무방음벽	1.2m	51.9	53.7	54.5	53.4	56.4
	6.2m	58.3	59.2	61	58.3	56.4
2.방음벽(0.5m)	1.2m	50.6	51.7	51.7	50.8	49.8
	6.2m	55.9	56.2	54.4	52.5	50.9
3.방음벽(1.0m)	1.2m	49.4	49.9	49.3	48.1	47
	6.2m	53.9	53.7	51.6	49.8	48.3
4.방음벽(1.5m)	1.2m	48.3	48.4	47.2	45.9	44.6
	6.2m	52.3	51.6	49.2	47.3	45.7
5.방음벽(2.0m)	1.2m	46.4	46	44.1	42.4	41.0
	6.2m	49.8	48.5	45.6	43.5	41.8
6.방음벽(3.0m)	1.2m	45.6	45	42.9	41.1	39.6
	6.2m	48.7	47.3	44.2	42	40.3

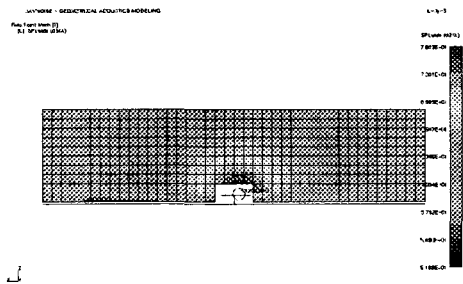


그림1. 교량높이 5m일 때 소음전파형상

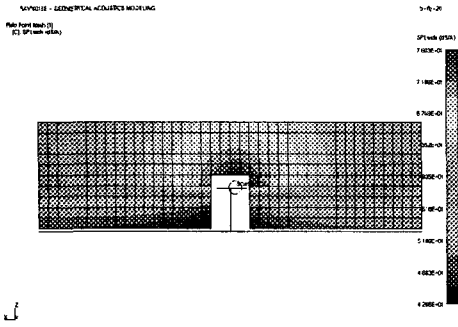


그림2. 교량 높이 20m일 때 소음전파형상

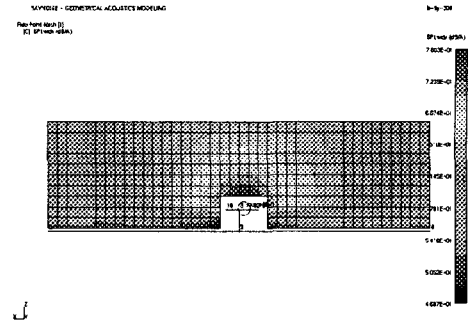


그림5 교량+상판 3.0m일 때 소음전파형상

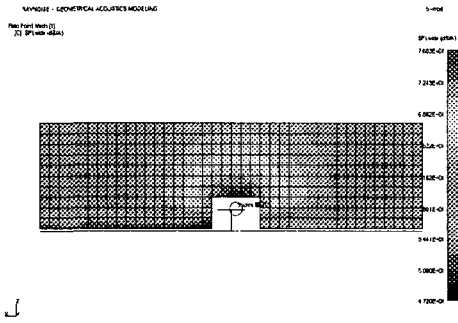


그림3. 교량 높이 10m

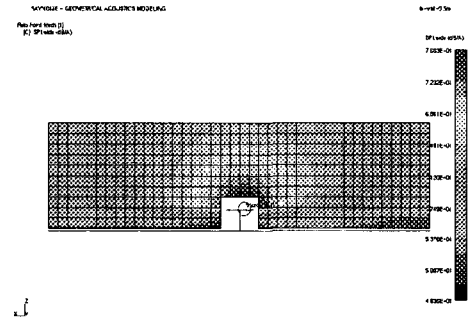


그림6 교량+방음벽 0.5m일 때 소음전파형상

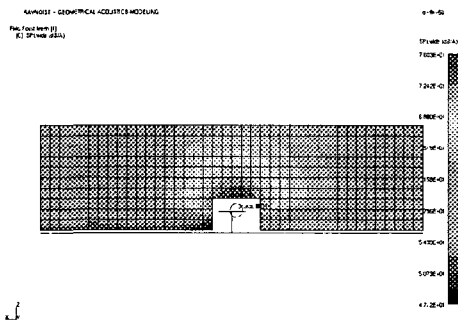


그림4. 교량+상판 0.5m일 때 소음전파형상

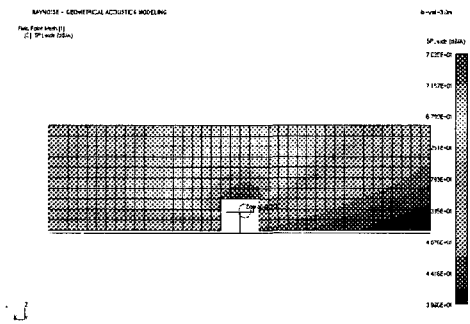


그림7 교량+방음벽 3.0m일 때 소음전파형상

#### 4. 결 론

1. 교량의 높이가 증가할수록 이에 따라 생성되는 Sound Shadow의 영향으로 음원에 가까울수록 감소효과가 크다.
2. 교량상판의 너비를 넓게 할수록 감소효과가 크게 나타났는데, 그 이유로는 상판의 너비가 넓어짐에 따라 Sound Shadow의 영역이 확대되었기 때문으로 사료된다.

본 해석은 간단한 dummy source를 이용하여 시뮬레이션한 결과이다. 현재 경부고속철도 시험선 구간에 소음측정을 수행중이며, 이를 이용하여 음향파위를 계산하고 보다 정확한 시뮬레이션을 수행할 예정이다. 현재 측정결과 교량 및 교량상판에 의한 소음저감효과가 크기에 따라 5dB(A)이상 나타나고 있으며, 방음벽의 설계시 이러한 효과를 고려하여 방음시설 실시설계를 수행하여야 한다. 교량구간 가까이에 위치하는 지형적 특성과 조망권 확보에 대한 요구를 감안한다면 이러한 효과는 환경경과 조망권을 확보하는데 긍정적인 안이 될 것이다.

#### 참고 문헌

- (1) Hugh J. Saurenman, James T. Nelson, George P. Wilson, Handbook of Urban Rail Noise and Vibration Control, Wilson, Ihrig & Associates, Inc., 1982.
- (2) User's Manual, LMS International, Raynoise Rev. 3.0, 1998.
- (3) Kinsler, Frey, Coppens, Sanders., Fundamentals of Acoustics, Wiley International, Inc. 1980.
- (4) 소음진동편람, 한국소음진동공학회, 1995