

고층 주거지역에서 터널형 철도 방음 시설의 소음 저감 예측

⁰김 준 업 *, 나 희 승*, 엄 기 영*,조 준 호*

Prediction of Reduction of Traffic(Railroad) Noise using Soundproof Tunnel in a high-rise apartment building

Kim Jun Yup, Hee Seung Na, Um Gi Young, Cho Jun Ho

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 using soundproof tunnel in a high-rise apartment building

1. 서 론

도로 및 철도, 항공기등의 교통소음저감기술개발은 환경보존과 승객의 안락감향상이라는 두가지 목적을 갖는다. 교통소음은 수음자위치에 따라 차질내소음과 차질외의 환경소음으로 나뉠 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 소음전파 경로를 차단하거나 분산시키는 방법을 사용하여야 한다. 경로차단에 의한 대표적인 소음대책수단으로는 방음벽, 방음터널을 들 수 있다. 환경기준은 선진국으로 갈수록 엄격해지고 있으며, 향후 국내 환경기준이 강화될 경우 소음감쇄 효과가 뛰어난 방음터널의 수요창출이 예상되며, 방음벽과 더불어 환경소음 저감시설로서 각광받으리라 예상된다.

방음벽은 소음의 이격거리 감쇄현상을 이용하여 소음을 저감하기 때문에 교량이나 성토구간에 우수한 방음시설이나 절토구간 또는 고층빌딩, 아파

트가 밀집되어 있는 도심구간은 높은 방음벽이 요구되는 문제점이 있다. 이처럼 수음점이 소음원보다 높은 경우 또는 소음원이 수음점보다 높은 경우 방음벽에 의한 소음저감효과는 심각한 한계를 갖는다. 국내의 도시집중화현상과 대부분의 교통수단이 이러한 인구밀집지역을 통과하는 것을 고려할때 많은 민원이 예상되며, 이에 대한 적절한대책이 필요하다. 본 연구의 목적은 방음벽설치가 용이하지 못한 고층빌딩, 아파트등의 도심구간에서 환경소음 저감을 위한 방음터널에 관한 연구이다. 방음터널은 방음벽에서 발생하는 회절음을 최소화하기 때문에 이러한 문제점을 해결하는 대표적인 방법이 될 수 있다. 이를 위해서 소음원의 분석후 소음감쇠 목표에 따른 소음예측이 필요하며, 이를 최적화하여 최소비용으로 최대방음효과를 얻을 수 있는 방음터널의 형태, 위치, 높이, 길이, 재료등을 결정해야한다. 현재 이에 대한 설계기술확보가 시급한 실정이다.

* 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단

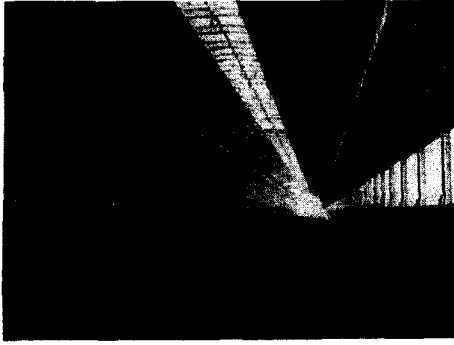


그림 1. 국내에서 시공한 방음터널사례

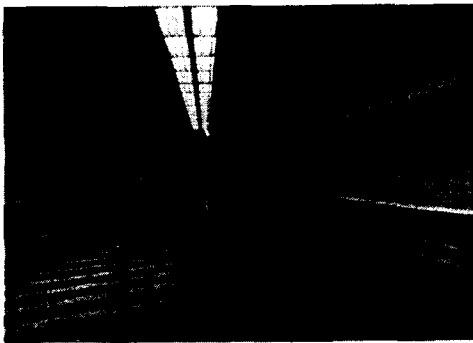


그림 2. 국외에서 시공한 방음터널사례

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 방음독은 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 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. 따라서 도로, 철도등에 인접한 고층건물의 경우 교통소음을 저감할 수 있는 범위는 아파트의 경우 5층이하, 기타건물의 경우 4층이하로 합이 타당하다. 이범위까지만 방음벽등의 방음시설로 소음을 저감하고 그이상의 고층에 대해서는 방음터널, 건축음향측면 및 교통정책측면에서 문제를 해결하는 것이 합리적이다.

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.

본 연구의 목적은 위에서 설명된 방음벽의 한계를 극복하기 위한 것이다. 흡음률과 투과손실이 큰 방음재를 사용할 경우 방음벽 자체를 통한 투과 소음은 작을 것으로 예상되며, 결국 소음은 터널입출구에 의한 회절감쇠, 지표면 영향에 의한 감쇠등에 의해 결정된다. 방음시설은 수음점에서 음원으로의 가시선을 직접 차단하지 않는 한 감음효과가 거의 없다. 방음터널은 가시선을 직접 차단하기때문에 20dB(A)까지 소음저감을 달성할 수 있으며, 저감효과는 방음터널의 길이, 크기, 위치, 자재등에 의해 결정된다.

3. 방음터널의 소음저감효과

자동차 및 철도차량은 대중교통수단으로 널리 각광을 받아왔으나 최근 경량화 및 고속화로 인하여 소음, 진동과 같은 민원성 환경 문제들이 발생하고 있다. 환경 소음 문제는 해석 공간이 크고, 기하학적 형상이 복잡하여 이론적인 해석이 어렵다.

음향학에서 음장을 해석하는 방법은 파동음향학, 기하음향학, 통계음향학으로 나눌 수 있다. 환경소음과 같이 음파의 파장이 대상공간에 비해 상대적으로 작은 경우, 소리의 파동성 보다는 기하학적인 고찰에 의해서 해석하는 것이 보다 효율적이다.

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

다음은 파동방정식으로 $c=c(x,y,z)$ 이다.

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

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

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

식(1)은 식(3)과 같다.

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

여기서 A는 압력의 단위, Γ 는 길이 단위, 그리고 c_0 는 위상속도에 대한 상수값이다. 만약

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

$$|A^{-1} \nabla A \cdot \nabla \Gamma| \ll \frac{\omega}{c} \quad \text{가 되도록 A와 } \nabla \Gamma \text{가 천천히}$$

변한다면 식(3)은 식(4)와 같이 될 수 있다.

$$\nabla \Gamma \cdot \nabla \Gamma = n^2 \quad (\text{Eq. 4})$$

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 ΔL_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

λ = 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.

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

여기서 n = 반사치수

- N_i = i 번째 차수의 이미지 음원의 수
- P_n = 압력
- d_{ik} = 수음자와 이미지 음원 ik 사이의 거리
- ϕ_{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 (Eq. 7) 과 같다.

$$P = I \cdot S \cdot t \text{ (Eq. 7)}$$

여기서 P = 음향파워

I = 가진면에서의 음향강도

S = 투과면의 면적

t = 투과손실 계수

3.2 방음터널의 소음해석



그림 3. 터널의 형태



그림 4. 교량형 방음시설의 예

- 연구 현황

터널 소음예측에서의 회절효과 및 음선추적에 적절한 파라미터 연구를 수행하였고, 방음터널의 흡음효과에 따른 방사소음의 피해정도 및 손실계수에 따른 인근 가옥(아파트)의 소음도 예측을 위한 음장 모델링 작업을 수행중이다.

- 연구 수행 내용 및 실적

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.

터널에 의한 소음방사특성을 알기위해 AutoCad 2000을 이용하여 터널 표면 모델을 생성하였다. 이를 이용하여 RAYNOISE에서 시뮬레이션을 수행하였다. 교량 구간에 있어 적용가능한 3가지 경우를 도출하여 그에 따른 상대적인 해석을 수행하였다. 여기서 터널형상은 아치형으로 선정하였는데 이것은 선행연구에서 터널형상(아치형, 경사지붕형, 사각형)에 따른 소음저감효과 해석에서 그 결과가 비슷하였기 때문에 대표적인 경우로 아치형을 선정하였다. 또한 한쪽 측면을 개방한 개구형의 경우는 개구부에 의한 터널반대편의 회절의 영향을 파악하기 위하여 선정하였다. 터널의 내벽은 일반적인 Material의 Sabine 흡음 계수를 설정하였으며, 향후 다양한 흡음계수를 적용할 예정이다.

출구에서의 Diffract 되는 Effect를 고려하기 위하여 출구 부분 전체에 Diffraction Edge를 설정하였다. Ray수는 2000개이며, Reflection Order는 10이다. 이러한 파라미터선정에 따라 다음과 같이 터널출구에서의 음압분포를 알 수 있었으며, 방음터널은 회절음을 최소화하고 있음을 알 수 있다. 다양한 시뮬레이션을 수행하여 터널출구 및 터널근방의 소음도를 분석하고, 이를 바탕으로 향후 방음벽에 의한 소음저감효과와 비교, 검토할 예정이다.

표 2. 건물 높이에 따른 dB(A) A동

	교량	방음벽	방음터널 (개구형)	방음터널 (밀폐형)
1층(1.2 m)	77.5	64.2	38.4	22.4
3층(6.2 m)	78.9	65.2	41	24.5
5층(16.2 m)	78.9	73.7	43.3	24.1
10층(26.2m)	78.1	77	45.7	26.1
15층(41.2m)	78.6	76.8	48.9	26.9
20층(52 m)	77.5	76.1	52.6	28.5

표 3. 건물 높이에 따른 dB(A) B동

	교량	방음벽	방음터널 (개구형)	방음터널 (밀폐형)
1층(1.2 m)	79.6	66.0	36.8	21.5
3층(6.2 m)	79.9	66.9	35.1	29.2
5층(16.2 m)	79.9	75.0	38.4	23.1
10층(26.2m)	78.9	78.4	43.8	23.6
15층(41.2m)	79.3	78.0	50.1	21.8

표 4. 열차에서 방사하는 음향파워(dB/m)

구 분	125	250	500	1000	2000	4000
상행선	86.8	81.1	84.3	85.9	84.2	78.9
하행선	68.2	73.2	81.5	81.2	80.3	75.4

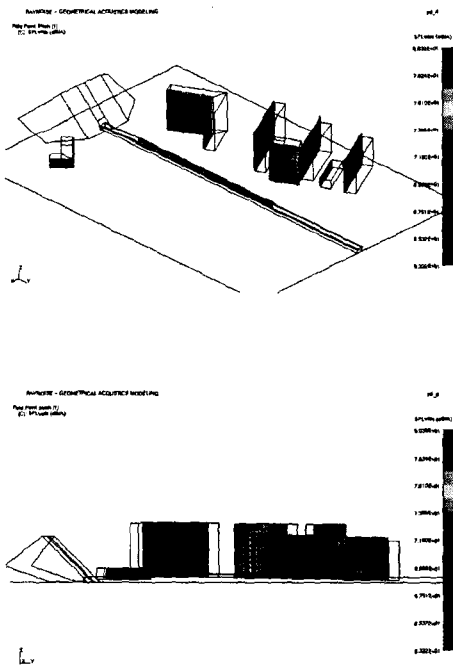


그림 5. 교량에서의 음압분포

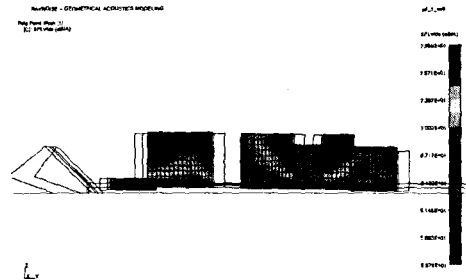
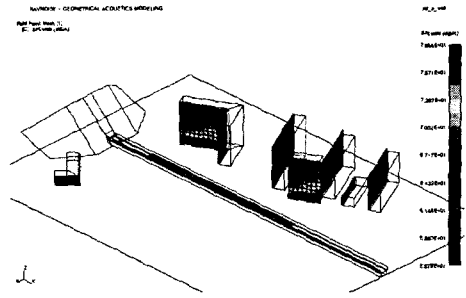


그림 6. 방음벽설치후 음압분포

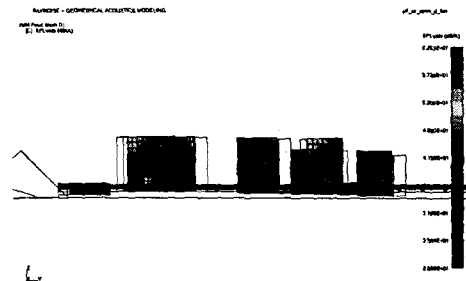
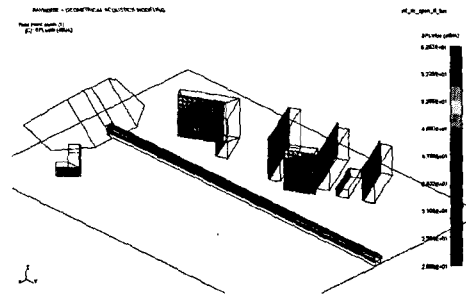


그림 7. 방음터널(개구형)설치후 음압분포

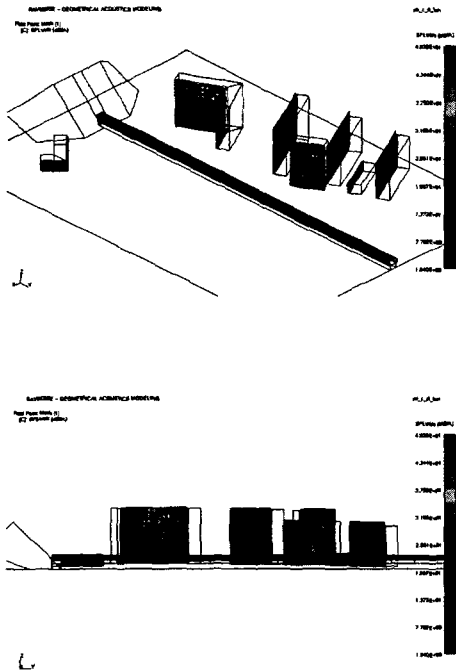


그림 8. 방음터널(밀폐형)설치후 음압분포

4. 결론

본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 방음벽은 높이 20~30m 이상에서 소음저감효과가 급격히 떨어지고 있다. 따라서 고층건물, 아파트가 산재하고 있는 인구 밀집지역에는 방음벽에 의한 소음저감효과를 기대하기 힘들다.
2. 방음터널은 20dB(A)이상의 소음저감효과를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 고층에서도 동일한 소음저감 효과를 기대할 수 있다. 따라서 방음터널은 고층에 대한 대표적인 방음시설로 이용될 수 있다.
3. 방음터널(개구형)의 개구부는 터널 반대편에서 높이가 증가할수록 회절에 의한 영향이 크므로 이의 현장 적용시에는 주변 상황에 대한 면밀한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

향후과제

방음터널을 상용화하기 위해서는 실험을 통한 소음저감 효과 검증, 환경기준과 시공하려는 지형을

고려한 설계, 이를 최적화하여 최소비용으로 최대 방음효과를 얻을 수 있는 방음터널의 형태, 위치, 높이, 길이, 재료 등을 결정해야하고, 체계적이고 종합적인 방음터널의 설계기반기술에 대한 연구가 필요하며, 이에 따른 연구결과는 관련 기술의 향상에 크게 기여할 것이다.

참고 문헌

- [2] 고속철도환경소음기준 및 진동기준에 대한 연구, 한국고속철도 건설공단, 1995
- [3] 시험선구간 방음벽설계용역, 한국고속철도 건설공단, 1998
- [4] 제39편 환경 제2장 환경보전 소음진동규제법 시행규칙 교통소음진동의 한도(37조관련) 1997.10.22.
- [5] 일본 공해대책기본법 제9조 신간선 철도소음에 관한 환경기준 1975.7.29.
- [6] 신간선 철도소음에 관한 75dB(A) 대책의 달성 상황 및 향후대책, 일본 환경청 대기보존국 기획과 교통공해대책실 1992.3.19.
- [7] Arrete relatif au bruit des infrastructures ferroviaires (프랑스 TGV의 소음기준(안))
- [8] 나 회승, J.P.Claibois, " 고속열차(TGV) 주행시 연변에서의 소음예측 및 방음시설 설계," 한국소음진동공학회, 1999.
- [9] 소음진동편람, 한국소음진동공학회, 1995
- [10] C.E.T.U.R., Guide du bruit des transports terrestres/Prevision des niveaux sonores (Minist. Fr. Environ. & Cadre de Vie, rev. 1990).

6. 참고 자료

- (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) 박석태 외, 철도차량 실내의 음향특성 연구, 1998년 고등기술연구원 위탁과제 중간보고회, 1998.