한국소음진동공학회지 제 9 권 제 6 호, pp. 1106~1115, 1999.

〈논 문〉

고속열차(TGV) 주행시 연변에서의 소음예측 및 방음시설설계

Noise Prediction and Design of Soundproof Facilities for the High Speed Train

나 희 승* · J. P. Clairbois**
Hee Seung Na and J. P. Clairbois

(1999년 3월 15일 접수 ; 1999년 11월 5일 심사완료)

Key Words : Noise Barrier(방음벽), Noise Prediction(소음예측), Seoul-Pusan High Speed Train(경부고속열차), Ground Effect(지표효과), Diffraction(회절)

ABSTRACT

This paper sums up the study of the soundproof facilities (noise barriers) to be placed on the test track section within the Seoul-Pusan H.S.T. project. The objective of this study is to determine optimum design of soundproof including height, length, location, sound absorbing materials for test track(chonan-taejon). This paper shows the model to design the shape and materials of noise barrier for high speed trains(TGV, ICE, etc). The design of soundproof facilities is to be conducted by MITHRA for the prediction of noise impact of the TGV and for optimising noise barriers in order to reduce the noise generated by high speed trains. A number of computer simulations are carried out in order to determine the specification of noise barrier on test track.

1. 서 론

최근 국가경제규모가 급속히 늘어남에 따라 수송수요가 지속적으로 증가하게 되고 이에따라 재래선과 고속도로등 기존 시설들이 포화상태에 이르게 되었다. 정부는 이러한 문제점을 해결하기위해 경부고속철도 사업을 시행하게 되었고 1992년 6월 착공하여 현재 진행중이다. 경부고속철도가 완공되면 지역개발의 활성화, 유류비절감, 교통애로 개선, 대기오염물질의 감소등 사회전반에 미치는 파급효과가 막대할것으로 기대된다. 반면 속도 및 운행횟수의 증가로 소음진동에 의한 환경민원도 증가할 것이다.

소음 및 진동공해는 일상생활중에서 가장 빈번히 접하는 환경오염으로 도시인의 심리적, 정신적, 신체적 피로를 가중시키고 있다. 따라서 정온한 생활환경 유지는 시급히 해결해야 할 과제로 대두되고 있으며, 육상 교통수단에 의한 소음은 승객들의 쾌적한 생활환경욕구를 감안할경우 중요한 관심사로 등장할 것이다.

이 논문에서는 현재 건설중인 경부고속철도 시험선구간(천안~대전)의 방음시설 설계용역 현황에 대해 기술하고자한다. 이 연구에서는 먼저 고속철도연변에서의 소음원특성에 관하여 다양한 검토를 수행한후 국내 시험선에 대한 방음시설의 일반적인 방법론에 대해 기술하였다. 고속전철은 일반열차와는 다른 소음발생 메카니즘을 갖으며 다른각도에서의 접근방법이 마련되어야할 것이다. 다음은 이를 기초로 경부 고속철도 소음모델을 만들고 국내에서 수집된 설계관련 데이터를 분석하였다. 특히 고속철도소음원은 속도에따라 다양하게 분석, 검토되어야한다. 방음시설의 음향설계에서 필요한 자료는 환경소음기준, 국내 지형, 기후, 고속철도 소음원 데이터, 시험

* 정회원, 한국철도기술연구원
** Acoustical Technologies

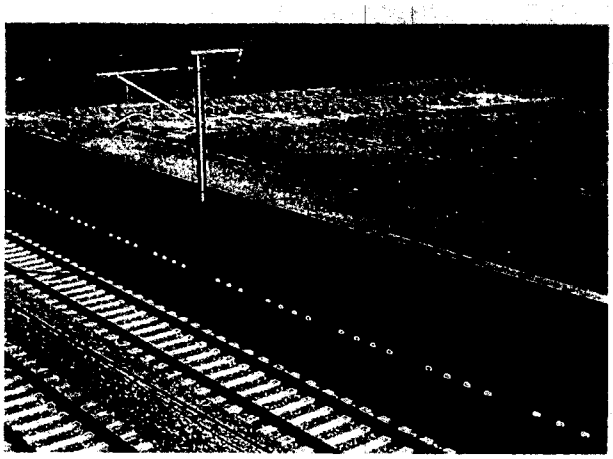

Fig. 1 Noise barrier of TGV-Nord

선구간의 특성(교량, 성토, 절토, 터널등), 국내방음자재특성등이 있다. 이 자료의 충분한 분석후 소음감쇠 목표에 따라 소음예측을 시뮬레이션하고, 이를 최적화하여 방음벽의 형태, 위치, 높이, 길이, 재료등을 결정한다. 이를 바탕으로 고속철도의 풍압과 시공성을 고려한 방음벽 구조설계가 수행된다[1,2]. 구조설계는 안정성, 유지보수, 미관등을 고려하여 설계하고, 최소비용으로 최대방음효과를 얻을수 있도록 디자인을 설정하여 설계최적화를 수행한다. 이를 기초로 표준도면을 작성하고 시공에 들어간다. Fig. 1은 TGV 북부선의 파리근교에 시공한 방음벽이다.

2. 고속철도건설시 환경소음저감 대책

고속철도의 소음대책에 관한 연구는 새로운 고속철도 노선 프로젝트 도출 및 설계과정에서 동시에 병행해서 이루어져야 가장 효율적이다[3]. 외국의 경우 고속철도의 소음대책은 다음과 같은 4단계로 수행된다.

1단계 : 건설 사업 이전의 소음 레벨 측정은 건설후에 어느 정도 소음 레벨이 증가하였는가에 대한 판단이 되며, 건설후의 법적 대응에 대한 준비 자료가 된다. 측정은 주간과 야간, 평일과 주말에 걸쳐 같은 시간대에 측정하여야 한다. 측정방법은 short L_{eq}(적분시간 125 ms)를 이용한다. 방음 설비 설치 이후에도 측정하여, 방음 시설 설치 후의 소음 레벨의 증가와 방음 시설의 효과등을 분석한다. 암소음도측정은 매우 민감한 문제이며 민원의 소지가 있는 즉, 환경규제에 의해 규제대상이 될 수 있는 곳을 선택하여 측정한다. Fig. 2는 시험선구간의 암소음도를 측정한 결과이다.

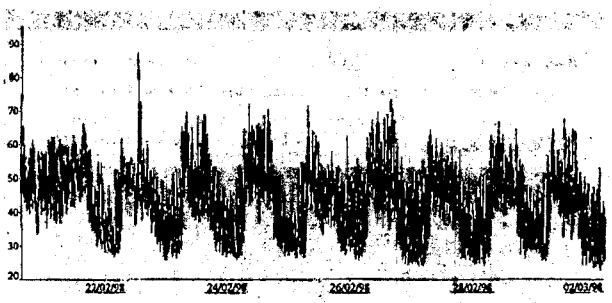

Fig. 2 Measurments of background noise

2단계 : Extensive study는 선택적으로 수행할 수 있으며, 이 과정에서는 소음에 의한 영향을 최소화하도록 선로를 결정하는 과정이다. 예를 들어 새로운 고속철도 노선을 건설할 경우 도시간 연결을 위한 가장 적절한 노선을 선정하는 것이다. 이때 여러가지 가능한 연결노선을 선정하여 분석하고, 이 노선이 환경에 미치는 영향을 평가하는 것이다. 이 연구는 음향적인 측면과 더불어 다른 동물군, 식물군, 지형, 역사적인 유적등 사회적, 환경적인 영향을 고려하고 프로젝트 수행시 시공성, 비용등을 포괄적으로 포함한다. Extensive study를 이용하여 철로 위치를 결정한 후에는 새로운 고속철도 노선에 대한 intensive study가 수행된다.

3단계 : Intensive study는 새로운 고속철도 노선에 대한 건설 후의 운행 소음에 의한 정확한 영향을 평가하고, 주어진 소음 기준을 초과하는 지역을 예측하여 소음 기준 초과 지역에 대하여 3차원 소음 전파 해석을 한다. 이를 기초로 흡음형, 반사형, 직립형, 경사형 방음벽등 일반적인 방음 대책을 결정한다. 앞으로 설명할 내용은 대부분 이러한 intensive study를 고려한 내용이다.

4단계 : 앞의 결과를 이용하여 소음 기준 초과 지역에 대하여 소음원의 특성 및 방향성 등을 고려하여, 시간에 따른 소음 레벨의 변화를 3차원 해석한다. 이 과정에서 소음 감소 필요량에 따른 방음벽의 형상, 흡음재 부착 여부등을 방음벽 건설비와 관련하여, 최적의 방음벽을 결정한다.

3. 시험선구간의 방음벽설계

3.1 고속철도의 소음특성

고속철도에서 발생되는 주요 소음원은 차륜과 레일사이에서 발생하는 전동소음(rolling noise)과 차체에서 발생되는 구동장치소음, 높은 운행속도로 인한 차체와 집전장치의 공력소음(aerodynamic noise) 및

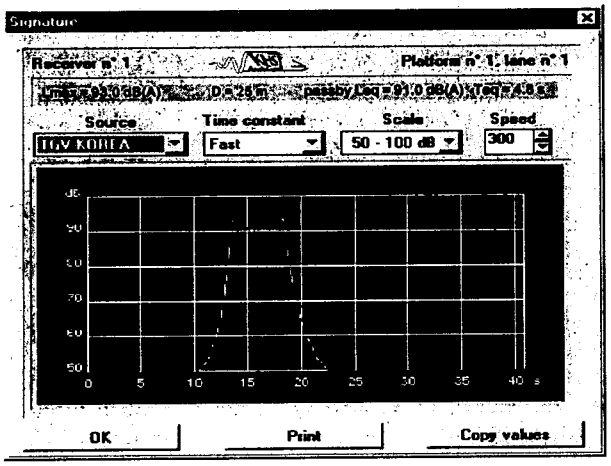

Fig. 3 Time history of the passby noise of the Korean HST model (velocity: 300 km/h)

구조물과 지반을 통하여 전달되는 저주파 소음등이 있다. 이밖에 판토그래프와 전차선사이의 집전소음이 있다[4].

차륜/레일의 소음(전동소음)은 열차의 속도가 증가할수록 높아져서 대개 80 km/h이상의 속도구간에서 지배적 소음이 된다고 알려져 있다. 그 크기는 속도의 3승에 비례하나 차륜/레일(wheel/rail) 작용면의 상태에 따라 변화할 수 있다. 차체 표면에서의 공력소음은 저속에서 문제가 되지 않지만 속도가 증가할수록 소음의 크기가 커져서 열차속도가 300 km/h를 넘게 되면 지배적 소음이 되고 그 크기는 속도의 6~8승에 비례한다. 추진장치(전동기, 추진축 등)와 각종 보조장치(냉각팬, 에어컨등)의 소음은 고속주행시에는 다른 소음에 비해 상대적으로 중요도가 떨어지지만 저속주행시에는 차륜/레일 소음에 버금가는 중요도를 갖는다. 그 크기는 속도에 비례한다.

Fig. 3은 개활지에서 속도 300 km/h에서의 통과소음도를 측정하여 모델링한 결과이다. 한국형 고속전철은 400 m의 차량길이와 2량의 동력차를 갖고 있으며, 프랑스의 TGV-R(Reseau)과 유사한 특성을 갖는다. TGV의 소음은 객차보다 동력차에서 소음레벨이 높으며, 후두부보다 전두부에서 다소 높은 소음이 발생한다. 현재 경부고속철도 차량 계약서에 의하면 속도 300 km/h, 열차길이 388 m에서 차량에 대한 기준소음도는 이격거리 25 m에서 $L_{eqpassby}$ =91 dB(A)이고, 이 경우 L_{max}는 92.5 dB(A)이다. 이때 환경기준과 관련된 소음도는 1시간당 20.5대(K-TGV 328대/06~22시)를 운행할 경우 Leq = 77.80 dB(A)이다.

Table 1 Sound power level generated by TGV

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
TGV front motor car	122.4	120.6	120.8	122.8	123.8	119.6
TGV rear motor car	118.1	117.1	117.4	120.7	123.1	119.2
TGV passenger car	120	116.8	117.3	117	119.3	116.1

Table 2 Prediction of noise along distance

Distance (m)	L_{max} (measured)	L_{max} (predicted)	L_{eq} (1h) (20.5 train)
25	92.5	93.36	77.80
50	88.8	89.15	73.59
75	86.5	86.68	71.12
100	84.6	84.93	69.37
150	81.7	82.47	66.91
200	79.3	80.72	65.16
250	77.3	79.36	63.8

이 연구에서 사용한 열차소음의 주파수특성(noise spectrum)은 SNCF 데이터베이스에 있는 TGV-2000과 유사하며, 고속철도의 주파수대역 소음특성은 Table 1과 같다. 이러한 측정 및 분석을 통하여 TGV의 속도 및 이격거리에 따른 소음예측식(GEC Alsthom사 제공, 개활지조건)은 다음과 같다.

$$L_{max} = 80 + 28\log\frac{V}{100} - 14\log\frac{d}{25} \quad [\mathrm{dB(A)}] \quad (1)$$

여기서, L_{max}는 최고소음도, V는 열차속도, d는 노선중심에서 수음점까지의 거리이다. 철도소음에 사용되는 등가소음도의 계산식은 다음과 같다. 등가소음도는 최고소음도, 소음노출시간, 소음노출의 빈번도를 모두 고려한 종합적인 소음평가도이다.

$$L_{eq} = L_{max} + 10\log\left(\frac{n \cdot t}{T}\right) \quad (2)$$

여기서, L_{eq}는 등가소음도, t는 열차통과시 소음노출시간(sec), T는 자유음장에서 등가소음도 계산을 위해 주어진 시간(sec), n은 주어진 시간 T동안의 열차 통과횟수이다. Table 2는 열차속도가 300 km/h일 때 위 식을 이용한 최고 및 등가소음의 예측치이다.

3.2 소음전파 예측(Prediction of Noise Propagation)

소음저감설계는 소음원의 특성모델링 및 소음예측이 선행되어야 한다. 소음 예측 기술의 경우 소음전파 모델링에 대한 데이터 베이스가 구축되어 있어야 하는데 선진국의 경우 오래 전부터 이 분야에 대한 연구가 진행되어 왔다. 많은 국가들에서는 도로소음, 철도소음, 항공소음등 소음원 유형별로 환경여건을 고려하여 소음예측식을 제안하고 있다. 국내의 경우 환경부는 도로교통소음과 철도소음에 대한 소음예측 모델을 제시하고 있다. 이러한 소음예측 모델은 각국의 여건에 따라 다소 차이가 있으나 실제 소음레벨과 잘 맞는 것으로 알려져있다. 프랑스는 고속전철 소음 예측용 프로그램인 MITHRA를 이용한 방음벽 설계용역을 활발히 수행하고 있다[5]. 경부고속철도 시험선구간의 방음시설 설계용역은 한국고속철도건설공단의 요구에 따라 상용 소프트웨어인 MITHRA를 이용하여 소음예측 및 방음벽설계를 수행하였다. MITHRA는 프랑스의 건설기술연구소인 CSTB에 의해 개발되었으며, CSTB는 MITHRA소프트웨어의 신뢰성을 검증하기 위하여 여러 특정한 구역을 선정하였고, 실험과 시뮬레이션을 통하여 이 소프트웨어의 신뢰성을 검증하였다[5].

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. 기하음향학에 사용하는 알고리즘은 크게 두가지로 분류되며, 레이추적법(ray tracing method)과 거울면상음원법(mirror image source method)으로 나눌 수 있다. 이 연구에 사용된 MITHRA는 레이추적법을 채택하였으며, 이방법은 음원으로부터 모든 방향으로 생성된 음향레이를 각각 추적하는 방법으로 매질인 공기의 감쇠계수에 의해서 음향에너지가 감소하고, 반사시에 벽면의 특성에 따라 음향에너지와 전파방향이 바뀌게된다. 또한 수음점에 도달한 모든레이를 시간대별로 기록하여 충격응답(impulse response), 즉 에코그램(echogram)을 알아내는 방법이다.

소음예측은 소음원 특성, 소음전달경로사이의 지형조건, 지면조건, 바람, 온도차이등에 의해 복합적으로 결정되며, 이에 대한 많은 연구가 진행되어 상당히 정확한 예측을 할 수 있게 되었다. 임의의 소음원에 대한 소음전파 예측은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$L_p = L_w - K_1 - K_2 - K_3 - K_4 - K_5 \qquad (3)$$

여기서

L_p : 수음점의 소음 레벨

L_w : 음향 파워 레벨

K_1 : 거리 감쇠(geometric divergence)

K_2 : 대기 흡음에 의한 감쇠(atmospheric attenuation)

K_3 : 지면 효과(ground effect)에 의한 감쇠

K_4 : 방음벽의 회절(diffraction) 감쇠

K_5 : 소음원의 지향성(directivity)에 따른 보정값

(1) 거리감쇠(geometric divergence)

소음원으로부터 거리가 멀어짐에 따라 거리 감쇠가 일어나게 되며 거리 감쇠는 지표면의 조건과 수음점의 높이 등에 영향을 받게된다. 측정거리가 열차의 길이보다 훨씬 짧은 곳에서는 선음원으로 모델링되며 음압은 거리가 두 배로 늘어남에 따라 3 dB 씩 감소하게 된다. 측정거리가 열차의 길이보다 먼 곳에서는 점음원으로 모델링되며 소음 레벨은 거리가 두 배로 늘어남에 따라 6 dB 씩 감소하게 된다.

(2) 대기의 흡음에 의한 감쇠(atmospheric attenuation)

소리전파시 대기의 에너지 흡수에 의하여 소음레벨은 감쇠하게 된다[5]. 공기의 흡음률은 습도와 온도의 함수이며, Table 3에서 알 수 있듯이 고주파수로 갈수록 급격히 커진다(습도 70 %, 온도 15°C). 대기는 항상 움직이고 물리적 특성이 균일하지 않으며, 이러한 기상조건은 대기중에서 소리의 전파에 영향을 준다. 온도가 높을 때 음속이 빠르게 되어 음선은 휘게된다. 이에 따라 주간에는 음원으로부터 거리가 멀어짐에 따라 거의 소리가 전달되지 않는 음영 영역(shadow zone)이 존재할 수 있으며, 반대로 야간에는 음원으로부터 거리가 멀어도 소리가 쉽게 전달될 수 있다. 또한 소리의 전달은 바람 속도와 음속의 벡타 합에 의하여 결정되며 음선은 휘게된다. 따라서 바람이 불어오는 방향으로는 음영 영역이 존재할 수 있으며 바람이 부는 방향으로 소리가 보다 잘 전달된다.

Table 3 Atmospheric attenuation (ISO 9613-1)

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Atmospheric attenuation in dB/km	0.38	1.13	2.36	4.08	8.75	26.4

(3) 지면효과(ground effects)에 의한 소음감쇠

지면 가까이에서 전달되는 소음의 감쇠 효과는 표면의 반사 특성에 의하여 결정된다. 예를 들어 Fig. 4와 같이 지표면이 균일한 단일 지표면인 경우, 지면 효과(ground effects)를 고려한 수음점에서의 음압은 아래와 같이 표현된다.

$$p(R)=\frac{\exp(jk\,d_1)}{d_1}+\mathcal{T}\frac{\exp(jk\,d_2)}{d_2} \qquad (4)$$

수음점에서의 음압은 Fig. 4처럼 경로 d_1을 따라 대기 중을 통해 직접 전달되는 직접파와 경로 d_2를 따라 지표면에 반사된 후 전달되는 반사파의 중첩으로 나타낼 수 있다. 여기서 $\mathcal{T}=R+(1-R)F$, $R=\frac{Z_s\cos\varphi-1}{Z_s\cos\varphi+1}$ 이다[6]. Z_s는 공기의 특성 임피던스(characteristic impedence)로 정규화(normalize)된 지표 임피던스(ground impedence)이며, 많이 이용되는 Delany와 Bazley의 이론식은 다음과 같다[7].

$$Z_s=\left[1+9.08\left(\frac{f\times1000}{\sigma}\right)^{-0.75}+j11.9\left(\frac{f\times1000}{\sigma}\right)^{-0.73}\right] \qquad (5)$$

여기서 σ는 유동저항(flow resistivity)이며, 지표형태에 따른 유동저항값은 Table 4와 같다[5]. 대부분의 지표면은 음향학적으로 무르다. 새로 갈아진 지면, 잔디, 숲의 표면, 눈이 덮인 지면등은 공기에 비하여 약 2~20배의 음향 임피던스를 갖으며, 아스팔트나 콘크리트 표면은 보다 큰 임피던스를 갖기 때문에 음향학적으로 단단한 표면으로 여겨진다. 시험선구간에서 가장 일반적인 유동저항값은 $\delta=600{,}000$이다.

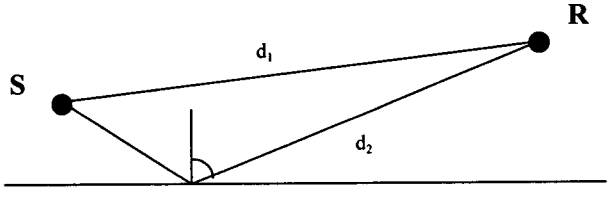

Fig. 4 Diagram of the geometry of the sound propagation on ground

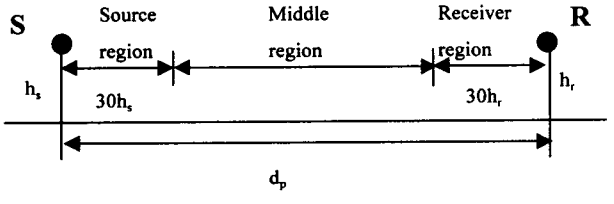

Fig. 5 Definition of source and receiver areas

Table 4 Flow resistivity for ground type

Type of ground	Flow resistivity
Highly reflective ground	$20{,}000 * 10^3$
Reflective ground	$2{,}000 * 10^3$
Compacted earth, lawn	$600 * 10^3$
Green fields	$300 * 10^3$
Highly absorptive ground	$150 * 10^3$

이밖에도 ISO 9613-2 규정을 이용하면 지표면에 의한 근사적 소음저감효과를 음원지역, 중간지역, 수음점지역등으로 구분하여 계산할 수 있다. 음원지역, 중간지역, 수음점지역의 정의는 Fig. 5와 같다. 지표면의 음향특성은 지표 계수 G로 구별할 수 있으며, 지표면을 다음과 같이 분류할 수 있다

* $G = 0$: 딱딱한 지표면(hard ground)으로 포장도로, 물, 얼음, 콘크리트, 기공성이 낮은 지표면들이 이에 해당한다.

* $G = 1$: 다공성 지표면(porous ground)으로 잔디, 나무, 기타 식물등으로 덮인 지표면과 논이나 식물의 성장에 적당한 지표면등이 이에 해당한다. 유동저항이 $\sigma \le 300$인 경우이다.

* $0 < G < 1$: 혼합 지표면(mixed ground)으로 딱딱한 지표와 다공성 지표로 혼합되어 있다. 유동저항이 $\sigma > 300$인 경우 $G=\left(\frac{300}{\sigma}\right)^{0.57}$으로 계산할 수 있다[5].

해당 옥타브 대역에 대한 총 지표소음저감량은 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$K_3=A_S+A_R+A_M \qquad (6)$$

여기서

A_S : 음원지역에서 지표에 의한 소음저감량

A_R : 수음점지역에서 지표에 의한 소음저감량

A_M : 중간지역에서 지표에 의한 소음저감량

옥타브 대역에 대한 각각의 지표소음저감을 계산하기 위해서는 Table 5를 이용하여 근사적으로 구할 수 있다.

(4) 방음벽에 의한 회절(diffraction)감쇠

소음원과 수음점 사이의 소음 차단을 위한 효과적인 방법은 방음벽의 설치이다. 음압 레벨 계산은 회절 이론과 광범위한 실험을 바탕으로한 소음 감소쇠량 계산도(design chart)를 이용할 수 있다. 소음 감

Table 5 Formulas for ground effect calculation (ISO 9613-2)

Octave frequency(Hz)	A_S or A_R (dB)	A_M (dB)
125	-1.5+G $a'(z)$	
250	-1.5+G $b'(z)$	
500	-1.5+G $c'(z)$	-3 q(1-G)
1,000	-1.5+G $d'(z)$	
2,000	-1.5(1-G)	
4,000	-1.5(1-G)	

$$a'(z) = 1.5+3.0\,e^{-0.12(z-5)^2}\left(1-e^{-\frac{d_p}{50}}\right) + 5.7\,e^{-0.09z^2}\left(1-e^{-2.810^{-6}d_p^2}\right)$$

$$b'(z) = 1.5+8.6\,e^{-0.09z^2}\left(1-e^{-\frac{d_p}{50}}\right)$$

$$c'(z) = 1.5+14.0\,e^{-0.46z^2}\left(1-e^{-\frac{d_p}{50}}\right)$$

$$b'(z) = 1.5+5.0\,e^{-0.9z^2}\left(1-e^{-\frac{d_p}{50}}\right)$$

$q = 0$ for $dp \le 30(h_s+h_r)$

$q = 1-\dfrac{30(h_s+h_r)}{d_p}$ for $dp > 30(h_s+h_r)$

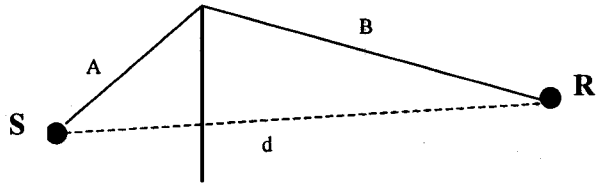

Fig. 6 Geometry of sound propagation path over a barrier wall

쇠치는 방음벽이 있을 때와 없을 때의 차이값이며, Fresnel 수 N의 함수이다. Fig. 6에서 Fresnel 수 N은 전달 경로차와 파장에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$N=\frac{2(A+B-d)}{\lambda} \tag{7}$$

Fresnel 수에 따른 소음 감쇠치는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다[8].

$$K_4=20\log\frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh\sqrt{2\pi N}}+5 \tag{8}$$

이밖에도 ISO 9613-2 규정을 이용하여 방음벽에 의한 회절감쇠를 근사적으로 계산할 수 있다.

(5) 소음원의 지향성(directivity)에 따른 보정

철도소음의 경우 지면과의 각도가 30도 이상일 때 차체의 차음 효과에 의하여 부가적인 소음 감쇠가 일어나며 다음과 같이 나타낼 수 있다[2].

$$K_5 = 0, \quad \alpha \le 30^\circ \tag{9}$$
$$K_5 = 0.15\,\alpha-4.5, \quad \alpha > 30^\circ$$

여기서 α는 지면과의 각도이다.

3.3 방음벽의 형태 및 재질

환경소음기준은 어느지역에 어느정도의 방음대책을 세워야하는지를 결정하는 기준이 된다. 그러나 현재 고속철도의 환경소음기준이 결정되지 않아 환경소음대책에 많은 어려움을 갖고 있다. 이 연구에서는 고속철도 보유국의 환경기준과 한국소음진동공학회에서 수행한 고속철도 환경소음기준안을 검토하여 L_{eq}=65 dB(A)를 소음의 감쇠목표로 설정하였다. 이는 앞으로의 기준이 용역에 사용하는 Leq=65 dB(A)를 중심으로 ±5 dB 범위내에서 채택되는 한 그에 따른 방음대책의 변화가 그다지 크지 않다는 많은 소음전문가들의 판단에 따른 것이다[9]. 참고로 국내의 철도소음기준은 1994년 11월 21일 총리령 제 473호로 공포되어 2000년 1월 1일부터 시행되고 주거지역(주간) L_{eq} = 70 dB(A)를 적용하는 것으로 되어 있다. 많은 고속철도를 운행하고 있는 유럽은 L_{eq}를 채택하고 있으며, 주간 60~66 dB(A) 야간 50~61 dB(A)이 사용되고 있다. L_{max}를 유일하게 사용하고 있는 일본은 주간과 야간을 동일한 70 dB(A)로 채택하고 있다.

철도의 소음저감기술개발은 환경보전과 승객의 안락감향상이라는 두가지 목적을 갖는다. 철도소음은 수음자위치에 따라 차내소음과 선로연변 소음으로 나뉠 수 있으며, 이것은 어디까지나 수음자위치에서의 구분일뿐 소음원은 결국 동일하다. 따라서 철도소음을 감소시키기 위해서는 결국 소음원을 없애거나 저감시키는 것이 가장 좋은 방법이나 선로변과 같이 근본적으로 소음원을 차단시키지 못하는 경우 간접적인 방법, 즉 소음전파 경로를 차단하거나 분산시키는 방법을 사용하여야 한다. 경로차단에 의한 대표적인 소음대책수단으로는 방음벽을 들 수 있다. Fig. 7은 8가지 형태의 방음벽과 흡음재 부착정도(반사형, 부분흡음형, 흡음형)를 나타내고 있으며,

이 과정에서 다양한 검토가 수행되었다[10,11]. Fig. 8은 흡음형과 반사형 방음벽의 소음저감 효과의 차를 나타내며, Fig. 9는 흡음형 방음벽 형태 1, 5의 소음저감 효과의 차를 예측한 결과이다. 각각의 그림은 선로로부터 10~150 m의 거리, 상하 -15~45 m범위에 대해 등가소음레벨을 보여주고 있다. 흡음형 방음벽은 반사형보다 지상에서 3~8 dB(A) 저감효과를 갖으며, 반사형에 비해 내구성이 떨어지나 국내와 같은 인구 밀집지역에 최대 소음저감효과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 특히 흡음형 방음벽은 방음효과면에서 가장 효과적이며, 방음벽의 높이와 길이를 최소화하는 장점을 갖고 있다. 따라서 시험선구간에서는 흡음형을 기준으로 설계되었다. 형태 1과 형태 5를 비교 했을 때 같은 높이에서 형태 5가 소음저감 효과면에서 우수한 결과를 나타냈으나 고속철도의 경우 안전성과 보수유지가 어렵다. 따라서 이 연구에서는 방음성능이 우수하고, 시공성, 안전성, 경제성, 보수유지등이 종합적으로 고려된 직립흡음형 방음벽을 선택하였다. Table 6은 흡음형 방음벽의 형태와 높이에 따른 소음예측값을 비교한 것이다. 동일한 소음저감을 위하여 형태 1이 형태 5보다 30 cm정도 높게 시공되어야함을 알 수 있다.

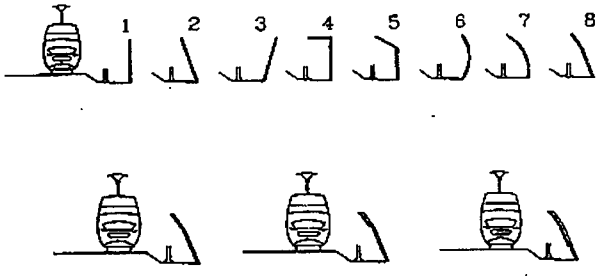

Fig. 7 The 8 different TGV noise barrier forms and the 3 types of absorption distribution (totally reflective, partially absorptive, totally absorptive)

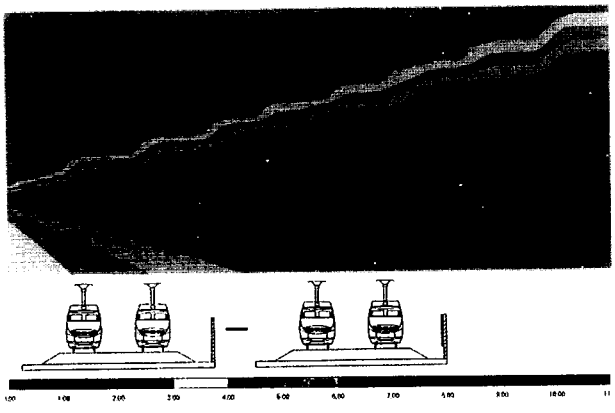

Fig. 8 Difference of noise reduction effect between reflective and absorptive

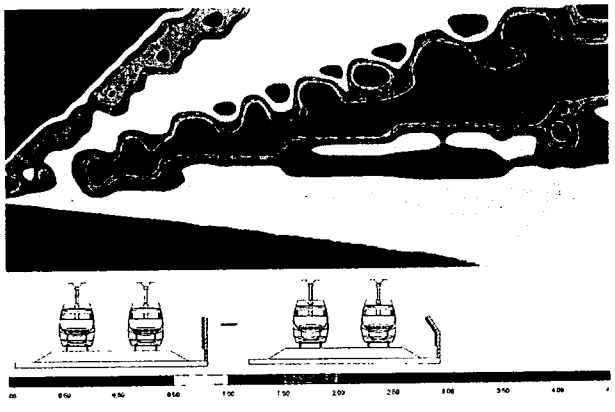

Fig. 9 Difference of noise reduction effect between type 1 and type 5

참고로 흡음재는 250 Hz, 500 Hz주파수대를 중심으로 흡음성능이 우수한 재질 및 두께, 밀도를 설정하고 최소의 면적으로 최대의 효과를 거둘 수 있도록 적정한 크기, 각도 및 위치등을 선정하여야한다. 본 용역에서는 Table 7과 같은 흡음율 CEN 10을 사용하였다. 방음벽은 방음벽체를 통한 공기전달음을 완전히 차단하고 있다고 가정하였다. 방음벽의 성능이 우수할 경우 방음벽체를 투과하는 음향에너

Table 6 Comparison of noise prediction for shape and height of noise barrier

Type of barrier (height)	Type 1 (3.0 m)	Type 5 (2.4 m)	Type 5 (2.7 m)	Type 5 (3.0 m)
Predicted value	61.0 dB(A)	61.5 dB(A)	60.9 dB(A)	60.4 dB(A)

Table 7 Absorption coefficients (CEN standard)

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	CEN (dB)
Old recommendation	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	0.8	4
Light	0.1	0.3	0.6	0.7	0.6	0.4	4
Good	0.1	0.3	0.7	0.9	0.9	0.9	7
Low frequency	0.4	0.7	0.9	0.9	0.7	0.4	7
Very good	0.4	0.6	0.9	0.9	0.8	0.6	8
High performance	0.5	0.8	0.9	0.95	0.9	0.7	10

지는 방음벽의 회절효과에 의해 전달되는 음향에너지보다 훨씬 작기때문에 무시할 수 있다. 이를 위해서 투과손실은 26 dB보다 높아야한다. 재질은 난연성, 자기소화성은 물론 연소에 따른 유독가스발생이 적어야하고, 열차풍압과 분진의 발생 및 비산이 없어야하며 습기, 시공성, 유지관리, 경제성등을 종합검토하여야 한다.

3.4 방음벽의 시방결정을 위한 시험선구간의 소음예측 시뮬레이션

이 연구에서 소음예측에 필요한 입력데이터는 지형데이터 및 열차데이터등이다. 지형데이터는 시험선구간의 평면지도, 국립지리원의 지형 데이터, 풍향, 신축 건물의 위치, 건물의 높이, 사용용도 등이며, 열차데이터는 한국형 고속철도의 차량 특성, 시험선구간에서 열차의 속도선도, 통과소음도, 기차운행 계획표등이다. 시험선구간(천안역~대전역)의 기차운행 계획표는 Table 8과 같다. 차량운행수는 상행과 하행을 포함하여 1시간당 20.5대(328대/06~22시)이다.

다음은 입력데이터를 기초로 시험선 특정교량구간에 대해 소음예측 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 10은 시험선구간에서 일부구간인 site 97지형에 대해 선로, 가옥, 지형등을 모델링한 결과이다. Fig. 11에서 처럼 선로변의 대부분가옥들이 65~70 dB(A)의 소음영역에 위치하고 있으며, 적절한 방음대책이 필요함을 알 수 있다. Fig. 12는 400 m길이를 갖는 직립흡음형 방음벽을 설치한 후 소음예측을 시뮬레이션한 결과이다. 대부분 선로변 가옥들의 소음도는 60 dB(A)이하로 매우 정온한 환경을 유지하고 있음을 알 수 있다. Table 9는 소음피해가 예상되는 가옥들에 대해 단일수음점으로 지정하여 계산한 결과이다. 교량에 인접한 가옥 13, 14, 15의 경우, 소음원이 수음점보다 높아 소음도가 낮게 나타남을 알 수 있다. 또한 가옥 21은 1층보다 2층이 소음원에 가깝기 때문에 소음도가 상대적으로 높다. 고층건물

Table 8 Trains operational table for test track

		Seoul-Pusan (6~22:00)	Pusan-Seoul (6~22:00)
Chonan station	Stop	17	17
	Pass	147	147
	Total	164	164
Taejon station	Stop	164	164
	Pass	0	0
	Total	164	164

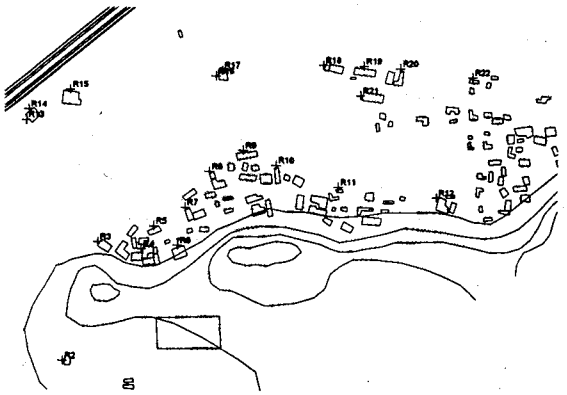

Fig. 10 The 3 dimensional model of test track (site 97) for noise barrier design

Fig. 11 Predicted sound pressure level without noise barrier

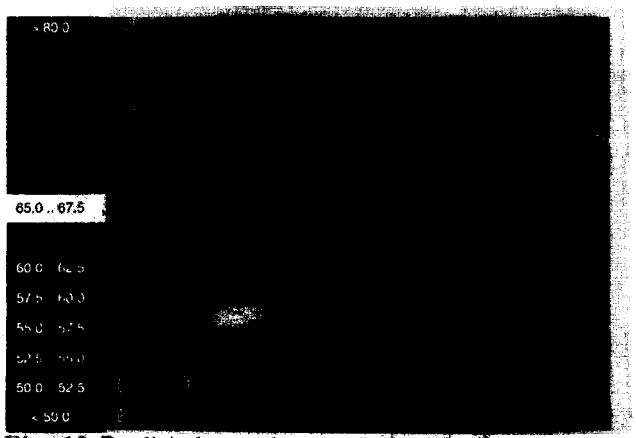

Fig. 12 Predicted sound pressure level with noise barrier

Table 9 Comparison of $L_{eq(1h)}$ predicted in nearly receivers

Receiver no.	Floor	L_{eq} dB(A) level (without noise barrier)	L_{eq} dB(A) level (with noise barrier)
13	First	66.4	55.7
14	First	64.7	54.1
15	First	69.5	55.9
16	First	69.2	58.9
17	First	69.7	60.5
18	First	68.0	61.6
21	First second	64.9 66.9	58.3 61.7

Table 10 Specification of noise barrier design

Site	Barrier no.	Start point	Teminal point	Location (L/R)	Length (m)	Height (m)
95	#1	94.100	94.300	Right	200	3.6
	#2	95.510	95.590	Left	80	2.4
	#3	95.725	96.150	Left	425	2.4
	#4	95.895	95.985	Right	90	2.4
	#5	96.170	96.340	Right	170	2.4
97	#1	97.110	97.510	Right	400	2.4
	#2	97.490	97.570	Left	80	2.4
99	#1	98.740	99.230	Right	490	2.4
	#2	99.400	99.665	Right	265	2.4

의 경우 각층에 따라 소음도가 다르기 때문에 각층에 대한 소음도 분석이 필수적이다. Table 9와 같이 방음벽을 설치한 후에 대략 5~10 dB의 소음저감효과가 있는 것을 알 수 있다. 이와 같은 시뮬레이션 과정을 거쳐 최적화된 방음벽의 높이, 길이, 위치, 재료, 형태등을 결정한다. Table 10은 설계 최적화과정을 수행하여 시험선 일부구간인 site 95~99(휴대터널~풍세교)의 방음벽 특별사양을 결정한 예이다.

참고로 소음예측에서 열차가 교량구조물을 통과할 때 방사되는 고체전달음은 미소하다고 가정하였다. 시험선구간의 모든 교량은 콘크리트로 건설중이며, 이는 열차에 의한 소음, 진동을 저감하는데 효과적이다. 만일 일부구간이 강제구조물로 구성되어 있다면, 특별한 주의가 요구된다. 강제구조물은 소음진동측면에서 많은 소음, 진동을 유발할 수 있으며, 이로부터 연변의 환경소음피해는 증가할 것이다. 만일 경부고속철도에 콘크리트구조물을 사용할 수 없다면, 소음진동측면에서 강제와 콘크리트을 사용한 혼합 구조물이 검토되어져야할 것이다.

위와 같은 결과를 바탕으로 고속철도의 풍압과 시공성을 고려한 방음벽의 구조설계가 수행된다. 방음벽은 방음성능이외에도 다음의 사항들을 고려해야한다.

(1) 방음벽은 안전시방조건을 만족하고 고속운행시 열차에 의해 발생되는 풍압을 고려해야 한다. 이 효과는 열차속도의 제곱, 열차의 공기역학적 형상, 구조물의 형상, 선로와 구조물간의 거리에 따라 결정되어진다. 또한 차량의 앞뒤에 거의 동일한 부하가 작용한다.

(2) 시험선 선로가 건설되어 있기 때문에 방음벽의 기초는 연속기초방식보다는 선로의 손상을 최소화하는 말뚝기초방식를 사용한다. 근접시설의 손상을 방지하기위해 항타파일보다 드릴파일공법을 사용한다.

(3) 일반 도로방음벽과는 달리 고속전철 시스템은 가선과 판타그래프에 의해 스파크가 발생하고, 이는 오존을 유발하여 방음판의 부식을 초래한다. 따라서 방음판은 부식에 강한 알루미늄으로 선택한다. 또한 방음판에 접지선을 설치한다.

이밖에도 방음벽의 시공완료후 열차가 운행시, 방음시설의 시험평가가 수행되어야 한다.

4. 결 론

이 논문에서는 경부고속철도 시험선구간에 대한 고속철도의 소음예측 및 방음시설 설계에 대해 연구를 수행하였다. 고속철도 소음예측은 지형 및 차량 데이터가 필요하며, 보다 정확한 소음예측을 위하여 소음발생의 원인 및 특성을 면밀히 분석해야만 한다. 이를 기초로 소음저감대책에 필요한 방음벽의 형태 및 재질를 선택하고, 소음예측을 통하여 방음벽의 높이, 길이, 위치등을 최적화 하였다. 이를 바탕으로 고속철도의 풍압과 시공성을 고려한 방음벽의 구조설계가 수행되었다.

향후 체계적이고 종합적인 소음저감 기술에 대한 연구가 필요하며, 이에 따른 연구결과는 관련 기술의 향상에 크게 기여할 것이다.

참 고 문 헌

(1) 한국소음진동공학회, 1995, 소음진동편람.

(2) Minist. Fr. Environ. & Cadre de Vie, rev, 1980, Guide du Bruit des Transports Terrestres/ Prevision des Niveaux Sonores, C.E.T.U.R..

(3) 한국고속철도건설공단, 1998, 시험선구간 방음벽설계용역.

(4) Saurenman, H. J. et al., 1982, Handbook of Urban Rail Noise and Vibration Control, U.S. Department of Transportation, Report No. DOT-TSC-UMTA-81-72, Washington D.C. .

(5) 01dB, 1996, MITHRA V3.0 매뉴얼.

(6) Chien, C.F. and Soroka, W.W., 1980, "A Note on the Calculation of Sound Propagation along an Impedence Surface", J. Sound Vib. Vol. 69, pp. 340~343.

(7) Delany and Bazley, E.N., 1970, "Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials", Applied Acoustics (3), pp. 105~116.

(8) Kurze, U. J. and Anderson, G.S., 1971, "Sound Attenuation by Barriers", Applied Acoustics (4), pp. 35~53.

(9) 한국고속철도건설공단, 1995, 고속철도환경소음기준 및 진동기준에 대한 연구.

(10) Houtave, P. and Clairbois, J. P., 1997, "Specific Designs of Noise Barriers for Tains", WESTPRAC VI 97, Vol. I, Hong Kong, pp. 45~50.

(11) 나희승, Clairbois, J. P., 1998, "시험선구간(천안-대전)에서 방음시설에 의한 고속철도 소음저감예측", 한국소음진동공학회 추계학술대회, pp. 211~216.