

1. 머리말

도로와 인접지역 사이에 장애물이 없으면, 소리는 소음원에서 수음영역으로 직접적으로 전달된다. 그러나 소음원과 수음영역 사이에 장애물이 있는 경우에는 소음원에서 발생한 소음은 장애물의 상단을 회절하여 수음영역으로 도달하는 회절경로와 장애물 자체를 통과하여 전달되는 투과경로, 장애물에 의한 반사경로 등 여러 전파 경로로 나뉘어 전달된다. 그러나 일반적인 방음벽은 벽 재료의 투과손실을 크게 하므로 회절감쇠 이외의 영향은 거의 없게 설계된다. 따라서 방음벽에 의한 소음감쇠량은 방음벽의 높이(회절음의 영향)에 의해 결정되는 회절감쇠가 대부분을 차지하게 된다.

실제 현장에 설치되고 있는 방음벽의 효과를 개략적으로 살펴보면, 소음원과 수음영역 사이에 시선을 차단할 정도의 높이로 설치된 방음벽의 감쇠 효과는 약 5dB(A)이며, 지표면의 감쇠효과에 의해 1~2dB(A)가 추가된다. 따라서 방음벽으로 얻을 수 있는 최대한의 소음저감효과는 아주 높은 구조물 및 투과손실이 높은 재료를 사용하고 틈이나 개구부를 거의 없게 함으로서 약 15 dB(A) 정도를 얻을 수 있는 것으로 알려져 있으며, 이러한 소음감쇠치와 음향에너지와의 상관관계는 표 1에

개략적으로 나타내었다.

일반적인 방음벽의 성능은 그림 1(a)와 같이 방음벽 설치 후 음이 전달되는 경로인 A+B와 방음벽이 없을 때 음이 직접 전달되는 경로인 d와의 거리차이(회절경로차(δ))에 의해 좌우되며 일반적인 방음벽의 성능은 아래와 같이 삽입손실(D)로 표현된다.

$$\text{일반방음벽의 성능 : } D(\text{삽입손실}) = \log(3 + (C_2/\lambda) C_3 * \delta * K_{met}) \text{ dB}$$

방음벽은 일반적으로 그림 1(b)와 같이 공간에 따라 그 효과 구간을 구별할 수 있다. 방음벽의 성능을 좌우하는 회절경로차는 그림 1(b)에 나타난 가시선 보다 낮은 수음영역(I)에서는 회절경로차에 의해 소음저감효과가 크고, 수음영역이 가시선에 근접하는 수음영역(II)로 접근하면 회절경로차가 작아지게 되어 방음벽의 감음성능 또한 떨어지게 된다. 그러나, 수음영역이 소음원과 방음벽 상단을 연결하는 가시선(line of sight) 보다 높은 수음영역(III)은 회절경로차가 없어지게 되어

표 1 방음벽을 통한 소음감쇠비교

방음벽 소음감쇠치	실현 가능 정도	음향에너지의 감쇠
5 dB	간단함	60 %
10 dB	주의필요	90 %
15 dB	거의 불가능	97 %

* E-mail : yckim82@hanmail.net

방음벽의 소음저감효과를 기대하기 어렵게 된다.

따라서 수음영역(Ⅰ)은 매우 효과가 좋아서 방음벽에 의한 감음효과를 충분히 기대할 수 있는 영역이고, 수음영역(Ⅱ)은 효과가 위치에 따라 크게 변화하며 방음벽의 효과를 제한적으로 얻을 수 있으며, 수음영역(Ⅲ)은 방음벽의 감음효과를 기대하기 어려운 영역으로 구분할 수 있다. 최근 대부분의 교통소음문제가 아파트나 고층빌딩 등 수음영역(Ⅲ)에서 발생하고 있어 단순히 방음벽 높이만을 증대시켜 모든 교통소음대책을 수립하는 것은 한계에 다다르게 되었다.

소음을 줄이기 위한 방법으로 지금까지 많은 방음벽이 설치되어 왔으나, 최근 교통량 및 차량의 속도증가에 따른 소음이 더욱 커져 이미 방음벽이 설치된 도로 및 선로 연변에 위치한 학교, 병원, 아파트 등에서도 민원이 크게 증가하고 있다.

이러한 민원지역의 소음문제를 해결하기 위해서는, 기존방음벽의 높이를 높여 성능을 개선하는 방법이 있으나, 하부 기초공사나 지주재료 대부분이 기존 설치된 방음벽의 높이에 따른 작용하중을 고려하여 설계가 되어 있기 때문에 방음벽의 높이를 증가하여 문제를 해결하는 방안은 방음벽을 새로 설치해야 하는 것과 다를 바 없다.

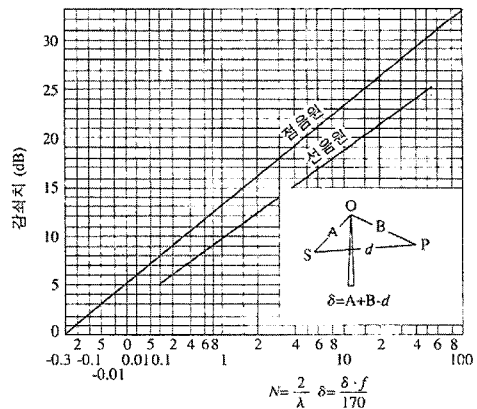
따라서 기존에 설치된 방음벽을 해체하지 않고서도 방음벽의 성능을 높일 수 있는 새로운 기술이 절실히 요구되고 있다.

최근 도심지역의 신규도로가 고가교량 형태로 많이 건설되고 있는 것을 감안할 때, 방음벽의 높이가 높아지면 방음벽의 자중에 따른 교량의 구조적 안전성에 치명적인 영향을 주게 된다. 또한 고가교량에 설치되는 방음벽에 작용하는 바람하중도 급격히 늘어나므로 방음벽을 높여 설계하는 데에는 많은 제약이 따르고, 태풍이나 차량사고에 의한 방음벽의 파손 등으로 인근주민에게 위험한 요소가 될 수 있다.

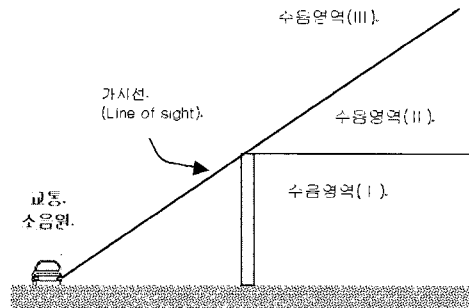
무엇보다도 방음벽이 높아지게 되면 방음벽이 설치되는 인근주민의 조망과 일조권이 침해받게

되며, 운전자에게도 과도한 위압감을 주게 되는 장애요인으로 작용할 수 있어 무작정 방음벽을 높이는 것은 불가능하다. 따라서 단순히 방음벽의 높이를 높이지 않고 가능한 낮은 방음벽으로 방음 성능을 개선할 수 있는 방안이 요구되고 있다.

교통소음을 효율적으로 줄이기 위해서는 소음원 및 방음시설물에 대한 현실적이고 체계적인 측정 및 분석이 이루어지고, 이를 이용해 방음시설의 설치효과를 정확하게 예측하는 기술이 요구된다. 이러한 요구조건을 충족시키기 위해서는 꾸준한 현장경험, 측정 및 분석자료, 그리고 음향설계 및 해석기술 등을 바탕으로 교통소음원의 특성 및 발생환경에 맞게 적용할 수 있는 소음저감방법의 개발이 필요하다.



(a) 방음벽 설치 전/후의 삽입손실



(b) 방음벽의 설치효과 구분

그림 1 일반방음벽의 성능 및 삽입손실

특집 I 방음벽 기술

이러한 노력과 더불어 기존 방음시설물이 주는 위화감을 극복하기 위한 노력, 다양한 설치여건에 따른 효과적인 대처방안, 그리고 주변환경과의 조화를 위한 외적인 미관도 고려되어야 할 것이다.

무엇보다도 기존 장벽형태의 일반방음벽으로 효과를 기대하기 어려운 가시선 상부(그림 1(b) 수음영역(Ⅲ)) 민원지역의 교통소음문제를 해결하기 위한 새로운 기술이 절실히 요구되고 있다.

2. 국내의 기술 동향

일반방음벽의 성능을 보완하기 위해 그림 2와 같이 다양한 방음벽의 구조 및 흡음재료에 관한 연구가 이루어져 왔다. 그림 2(a)의 형태들은 80~90년대 초에 걸쳐 주로 연구되어온 것으로 간단히 상단부의 모양을 변화시켜 방음벽의 높이를 증가시키는 효과를 연구한 것이다. 이들 중 어떤 형태가 가장 좋은지에 대한 평가는 여러 연구자들의 결과들이 일치하지 않기 때문에 절대적으로 결론 지을 수 없는 실정이며, 무엇보다도 이러한 성능보완을 통해서는 최근 문제가 되고 있는 방음벽보다 높은 수음영역의 소음을 저감에는 원리상 효과를 기대하기가 힘들다. 그림 2(b)의 형태는 간섭효과를 얻기 위해 만들어 졌는데 하단이 뚫린

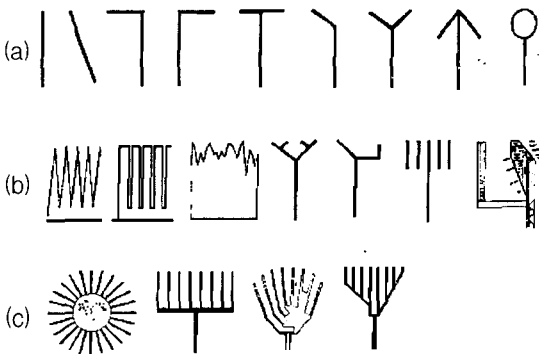


그림 2 국내의 방음벽상단 소음저감 기술의 개발 동향

경우는 공기 틈새로 음이 많이 전달되기 때문에 막힌 구조보다는 성능이 떨어지며, 그림 2(b)의 마지막 형태는 방음벽 길이방향으로 증공형으로 되어 있어 간섭효과의 유도가 정확히 이루어지지 않는다. 한편 그림 2(c)와 같은 형태는 90년대 이후 주로 연구되어 왔으며 방음벽 길이방향으로도 격자형 구조로 되어있어 간섭효과를 제대로 유도할 수 있는 장점이 있어 최근 다양한 형상에 따른 및 특정 주파수제어에 관심을 갖는 연구들이 심도 있게 진행되고 있다. 이러한 기술이 교통소음을 제어하는 기능을 갖기 위해서는 광범위한 주파수 제어기술 및 설계기술이 확보되어야만 주변환경에 따라 다른 특성을 갖는 교통소음 및 환경소음을 효과적인 제어가 가능하다.

3. 새로운 간섭원리를 갖는 소음저감장치

3.1 소음저감원리

그림 3(a)와 같이 입사음과 경로차에 의해 튜닝된 음이 서로 반대위상으로 만나면 음에너지 자체가 소실되는 상쇄간섭을 일으키게 된다. 기술의 원리는 그림 3(b)와 같이 내부격자구조 및 흡음재료를 이용한 소음저감기술을 방음벽 상단에 적용하면 소음원으로부터 전파되어 소음저감시설 입구에 도달한 음은 입구 ①을 통해 격자간섭장치 내부에 이미 설정된 격자통로를 지나면서 음파의 위상차가 변형된 몇가지 종류의 튜닝음으로 바뀌어 출구 ②을 통해 방사된다. 한편, 소음원로부터 격자간섭장치 위로 넘어오는 직접회절음은 소음원 본래의 음파 위상을 갖고 있어 관심소음제어 영역에서 위상차가 변형된 튜닝음과 중첩되어 상쇄간섭(extinction interference) 현상을 일으키고, 출구 ②의 위치에 따라 소음제어영역을 변경하는 것이 가능하다. 또한 내부격자의 길이, 폭, 위치 등을 조절하여 소음원 발생 환경에 따른 특정주파수의 교통소음을 제어하는 것이 가능하다.

본 기술은 교통소음발생환경에 대해 오랫동안 축적된 측정 및 분석자료, 음향설계 및 예측기술 등을 이용, 교통소음 중 문제가 큰 주파수대역에서 상쇄간섭을 발생시켜 소음을 줄이고 보강간섭은 관심영역 밖에서 일어나도록 설계하여 교통소음을 이상적으로 제어할 수 있는 기술이다. 또한 가시선상부 소음제어에 적합한 적용장치의 형상을 수년간에 걸쳐 음향해석 및 시험을 통해 개발하였으며, 또한 음파조절설비 상단에 적절한 흡음재료를 설치하여 간섭원리로는 소음제어가 어려운 고주파수영역에서의 소음저감효과를 극대화하였다.

3.2 기존 국외 기술과의 차이점

일반방음벽의 성능을 보완하기 위한 국외기술로는 일본에서 개발된 흡음원리를 이용한 소음감소기와 상쇄간섭을 이용한 감존이 일부 상용화되어 있으나, 이러한 기존의 기술은 회절음만을 저감하기 위한 방안으로 직접음이 전달되는 가시선상부의 수음영역에서는 소음을 저감시키지는 못하며, 다중입구/단일출구 단을 갖음으로 인해 내부에서 간섭 상쇄효과가 발생해 원할한 음 유도를 못하는 것으로 평가된다. 또한 소음감소기의 경우는 방음벽 아래에서는 추가적인 소음저감효과를 볼 수 있

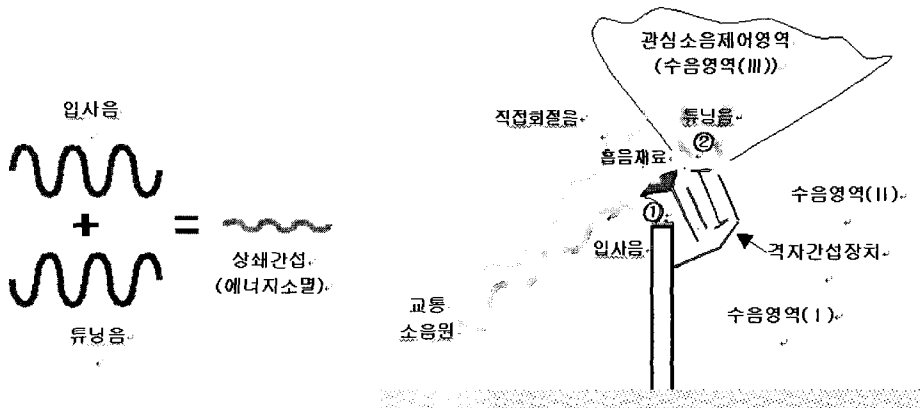
으나, 방음벽보다 높은 수음영역(가시선 아래)에서는 소음저감효과가 낮아지며 가시선상부 수음영역에서는 원리상 소음저감효과가 나타나지 않는다.

그러나, 새로운 국내 개발기술은 회절음 뿐만 아니라 직접음이 전달되는 가시선 상부에까지 소음저감효과를 얻을 수 있게 원할한 음 유도가 발생하도록 형상적으로 구현하였으며, BEM해석과 음향시험을 통해 교통소음에 적합하게 주파수 튜닝을 하여 방음벽상단에서 교통소음대역에서 상쇄간섭의 효과가 크도록 내부 격자배치가 구현되어 있다.

4. 음향해석을 이용한 주파수 튜닝

4.1 방음벽의 음향해석방법

방음벽의 성능 및 효과를 예측하기 위한 방법으로 지금까지 널리 사용되어 왔던 방법으로는 Maekawa의 실험식, Kurse-Anderson의 Fresnel 수에 따른 이론식 등과, 위와 같은 식에서 회절 경로차에 의한 간섭효과를 포함하는 간단하고 실용적인 Lam 모델 등이 있다. 그러나 위에서 제시한 방법으로는 가시선상부 소음을 저감하기 위해 적용하는 다양한 기하학적 형상구조에 대한 음향예측이 불가능해 1990년대 초까지 이러한 분



(a) 상쇄간섭의 원리

(b) 가시선 상부 수음영역의 소음저감원리

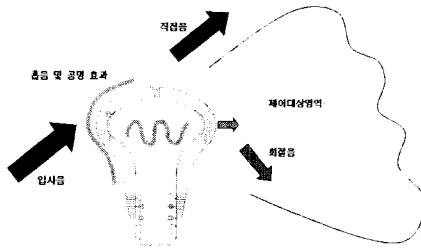
그림 3 기술의 소음저감원리

야에 대한 연구개발에 큰 진전이 이루어지지 않았다. 그러나 최근에는 컴퓨터의 고성능화 및 대중화가 이루어져 음의 파동이론에 기초하여 유도된 복잡한 수치해석을 풀 수 있는 여건이 갖추어지게 되었다. 본 기술은 음의 파동학적 특성에 대해 헬름홀쯔 방정식에 경계조건을 붙여 경계적분식으로 변환하고 수치해를 푸는 경계요소법(boundary element method)을 이용하여 분석하였으며 BEM 코드는 음향해석기법으로 널리 알려

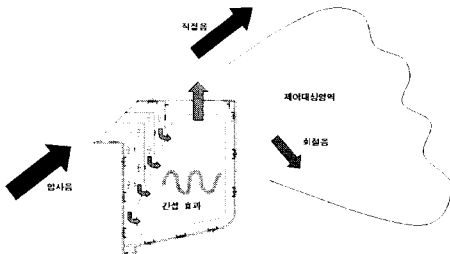
진 상용프로그램 SYSNOISE를 이용하였다.

4.2 대상주파수 및 소음저감영역 조절

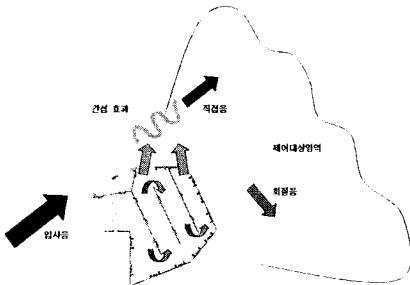
내부격자로 여러 경로차를 둘 경우 복합적인 간섭효과가 발생하고 외부형상에 의한 끝단 효과 등에 의해 단순한 예측방법으로는 기술의 효과를 예측하는 것이 불가능하다. 그러나 BEM 음향해석 기법을 이용하면 회절경로차에 의한 간섭효과 및 끝단효과가 고려된 음향예측을 할 수 있으며, 가시선상부 소음저감영역에 따른 다양한 음향해석학적인 접근이 가능하다. 교통소음문제 중 대부분은 300 Hz~2 kHz 주파수대역에서 소음문제를 야기하고 있으며, 이중 500 Hz 이하의 주파수대역은 일반방음벽을 이용해 소음을 줄이기가 어려운 주파수대역에 속한다. 기술은 소멸간섭효과를 이용한 초기주파수대역을 300 Hz~500 Hz로 설정하였고, 내부격자배치 및 격자길이에 따라 대상주파수 조절에 대한 기술개발을 수행하여 300 Hz~2 kHz 사이에서 소음저감효과가 가장 좋은 소음저감방법을 개발하였다.



(a) 소음감소기 - 회절음만 저감



(b) 칸존 - 회절음만 저감

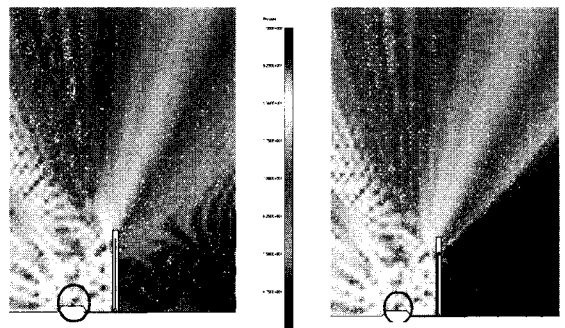


(c) 기술 - 직접음 및 회절음 저감

그림 4 기존 국외기술과의 차이점

4.3 경계요소법(BEM) 음향해석을 이용한 음향 예측

방음벽 뒤편 가시선상부 수음영역의 교통소음을 저감하기 위해 다양한 조건에서 음향해석을 수행



<설치 전> <설치 후>
그림 5 실증 시험결과를 활용한 음향해석결과

하였으며, 일반방음벽으로 제어가 힘든 낮은 주파수대역의 소음저감에 적합하게 외부구조형상을 개발하였다. 한편 내부격자의 배치 및 길이조절, 끝단효과, 흡음재료에 따른 주파수조절기법 등을 이용, 교통소음에 적합한 격자구조 및 흡음재료의 설치위치 등에 대한 가변적 적용기술을 확보하였다. 최종 선정된 모델에 대해 실증시험 조건에 맞추어 음향해석을 수행하였다. 또한 실증시험결과를 다양한 교통소음 발생현장에 대한 음향예측에 접목시켜 소음예측의 신뢰성을 더욱 향상시켰다. (그림 5 참조)

5. 무향실을 이용한 성능시험

5.1 개요

시험시설 및 전경은 그림 6에 나타내었고, 시험모델 및 사양은 아래와 같다.

■ 상단소음저감장치 시험모델

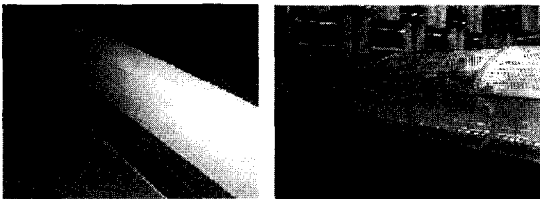
크기 : 전체 높이 0.65 m, 방음벽 상부로 도출된 높이 0.32 m, 너비 0.5 m

재질 : 형상 및 격자(8t 아크릴), 음 집중부 설치 흡음재료(saeslon)

■ 시험실 사양

실명 : 반무향실 (한국표준과학연구원)

크기 : 4.5 m(가로) × 7.5 m(길이) × 4.5 m(높이)



<일반 방음벽>

<소음저감기술이 적용된 방음벽>

그림 6 실증시험 및 성능평가(한국표준과학연구원)

■ 측정위치

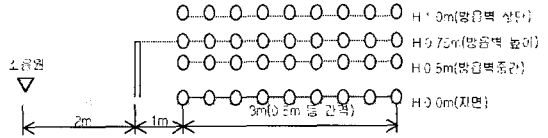


그림 7 성능평가를 위한 소음측정위치

5.2 평가방법

본 시험을 위한 대상소음(교통소음 재현)은 주파수 분석기(B&K 3550)에서 인위적으로 발생시킨 백색잡음(white noise)을 신호 증폭기(B&K 2706)를 통해 증폭시키고 이 음을 실험실 내부에 있는 직경 3cm의 확산기를 통해 방음벽 전면 지면에서 출력시킨 음원을 사용하였다. 한편 비교평가를 위해 소음저감기술이 적용된 방음벽과 같은 높이를 갖는 단순한 일반 방음벽에 대한 시험도 병행하여 수행하였으며, 측정위치는 그림 7과 같이 지면, 방음벽 중간 높이, 방음벽 높이, 그리고 방음벽상단 수음영역에서 거리 및 높이 별로 측정하였다.

5.3 평가결과

일반 단순방음벽과 소음저감기술이 시공된 방음시설물의 성능평가를 위해서 1/3 옥타브밴드 별로 수음영역의 높이에 따라 가시선상부 지역까지 비교평가 하였으며, 전 주파수 대역에서의 음압레벨(overall sound pressure level)도 산출하였다. 한편 주파수영역 별 소음특성 및 흡음재료가 미치는 영향에 대한 측정 및 분석도 수행하였다.

● 주파수 영역별 특성비교

가시선상부 교통소음의 낮은 주파수 대역의 소음을 줄이기 위해 초기 소멸 주파수 대역을 350 Hz로 설정하고 성능시험을 수행한 결과, 그림 8에서 보는 바와 같이 일반 방음벽으로는 저감이 어려운 350 Hz 주파수 대역(초기 소멸 간섭 주파수)

에서 15 dB의 큰 소음저감 효과를 확인할 수 있었다. 한편 또 다른 소멸 주파수 대역인 800 Hz 근처에서도 소음이 크게 감소하는 것을 확인하였으며, 보강간섭에 의한 소음증가효과는 상대적으로 작게 나타나 본 기술의 효용성을 입증할 수 있었다.

● Overall음압레벨(sound pressure level) 비교
1/3옥타브밴드 별로 125 Hz~4 kHz의 주파수대역에서 측정/분석한 결과를 전 주파수대역의

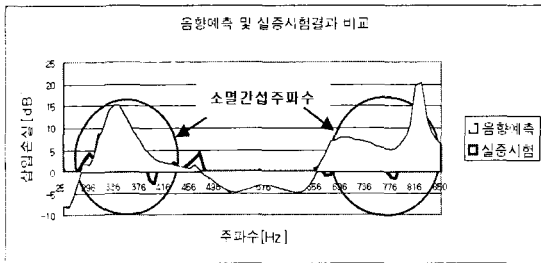


그림 8 실증시험과 음향해석결과와의 비교평가

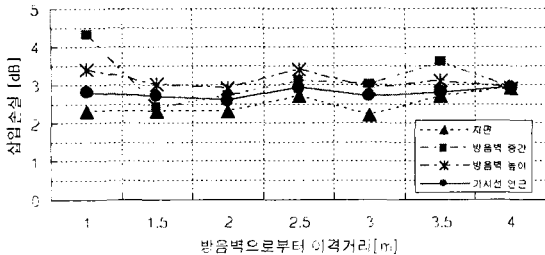


그림 9 소음저감기술 적용 전/후의 삽입손실비교

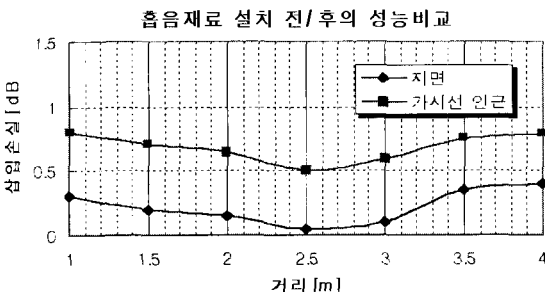


그림 10 흡음재료 적용 유/무에 따른 성능변화비교

overall 값으로 산정하여 가시선상부 소음저감기술 시공 전/후의 삽입손실을 산출하여 그림 9에 나타내었다. 시험결과를 살펴보면 방음벽 뒤편 수음영역의 높이 및 방음벽으로부터의 거리에 따라 2.5~4.0 dB의 삽입손실을 보임을 알 수 있다. 특히 방음벽보다 높은 수음영역에서도 동일한 성능을 나타내, 본 기술이 적용되면 충분히 방음벽의 높이를 낮추어 설계를 할 수 있음이 입증되었다.

● 흡음재료 설치 전/후의 특성비교

흡음재료 설치 전/후의 성능을 평가한 결과, 그림 10과 같이 지면에서는 흡음재료 설치 효과가 0.1~0.4 dB로 다소 낮았으나, 방음벽보다 높은 지점에서는 0.5~0.8 dB로 흡음재료 설치효과가 다소 크게 나타났다.

6. 고속도로 현장적용 성능평가

6.1 개요

- 평가기간 : 2001년 10월~2002년 1월
- 측정장소 : 서울외곽순환도로 산본 IC 인근(판교기점 15.2 km)
- 주관기관 : 한국도로공사
- 목 적 : 새로운 소음저감기술을 적용하여 기존의 단순한 기술로는 저감이 어려운 고층아파트의 높은 수음영역에서 소음을 효율적으로 저감하고 그 성능을 평가하는데 목적이 있다.

6.2 평가방법

- 발생소음도 및 소음특성평가
- 가시선상부 소음저감기술의 음향시뮬레이션
- 시공 전/후의 현장측정
- 분석 및 평가

- 물리학적 현상을 이용한 간섭장치는 방음시설물의 높이를 훨씬 낮추어도 기존과 같은 성능을 얻을 수 있으며, 기존 방음시설물에 더하여 사용된다.
 - 보강간섭에 의한 음향에너지 증가보다는 상쇄간섭에 의한 음향에너지 감소효과가 전반적으로 더 크게 나타났다.
 - 상쇄간섭 주파수영역에서는 음 지연에 의한 의한 음향에너지 자체의 상쇄로 인해 수음지점에 관계없이 일정한 소음저감 성능을 나타냈다.
 - 고주파영역에서는 보강간섭과 상쇄간섭의 중복 영역이 많아지며 전반적으로 단순 방음시설물보다 음향에너지가 감소하는 경향을 보였다.
 - 간섭장치 내부 split의 위치 및 형상을 변경하여, 기존 간섭주파수 영역과 정반대 되는 간섭주파수 영역도 만들어 낼 수 있었으며, 다양한 소음 환경에 따라 응용이 가능함이 입증되었다.
- 본 연구과정에서 축적된 음향해석기법 및 주파수 튜닝기법은 다른 분야에도 활용이 가능할 것으로 판단된다.

참고 문헌

(1) Fujiwara, K. and Furuta, N., 1991, "Sound Shielding Efficiency of a Barrier with a Cylinder at the Edge", Noise Control Engineering Journal, Vol. 37.

(2) Fujiwara, K., Hothersall, D. C. and Kim, C. H., 1998, Noise Barriers with Reactive Surfaces, Applied Acoustics, Vol. 53, No. 4.

(3) Okubo, T. and Fujiwara, K., 1998, "Efficiency of a Noise Barrier on the Ground with an Acoustically Soft Cylindrical Edge", Journal of Sound and Vibration, Article No. sv981720.

(4) RAYNOISE Users Manual, Diffraction Equation, Ch. 3.3.1.2.

(5) Lam, Y. W. and Roberts, S. C., 1993, "A Simple Method for Accurate Prediction of Finite

Barrier Insertion Loss", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 93, No. 3, March.

(6) Maekawa, Z., 1968, Noise Reduction by Screens, Appl. Acoust. Vol. 1, pp. 157~173.

(7) SYSNOISE Rev. 5.3 LMS/NIT, Belgium, 1996.

(8) 장강석 외 2명, "철도소음 저감을 위한 간섭장치개발", 한국철도학회 2000년도 춘계학술대회논문집, pp. 537~542.

(9) 장강석 외 2명, 2000, "교통소음제어를 위한 간섭형 방음장치 형상개발에 관한 연구", 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, p. 1778.

(10) 윤제원 외 4명, 2001, "방음벽의 성능평가를 위한 시험방법의 검토", 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 449~455.

(11) 김두훈 외 2명, "교통소음 제거를 위한 간섭형 방음장치 개발연구", 대한전문건설협회, 2000. 9. 철물공사 기술자료집, pp. 108~121.

(12) 장강석 외 3명, 2001, "철도전파소음저감을 위한 간섭장치의 성능평가", 한국철도학회 추계학술대회논문집, pp. 192~197.

(13) 장강석 외 3명, 2001, "방음벽상단 간섭장치 성능평가에 관한 연구", 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp. 844~848.

(14) 장강석 외 3명, 2002, "도로교통소음저감을 위한 간섭장치 주파수특성에 관한 연구", 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집.

(15) 심상덕 외 3명, 2002, "철도소음저감을 위한 방음벽상단 간섭효과에 관한 연구", 한국철도학회 춘계학술대회논문집

(16) "수원시(세류동) 철도소음 저감을 위한 방음대책/시공 및 성능평가", (주)유신-유니슨기연 01-9 연구보고서.

(17) "철도소음 저감용 방음벽 상단간섭장치의 성능평가연구", 한국철도기술연구원, 01-9 연구보고서.

(18) "산본 IC 인근의 교통소음저감을 위한 방음대책/시공 및 성능평가", (주)유신-유니슨기연 02-1 연구보고서.