

방음벽 개발 동향 및 음향 특성

정 성 수*

(한국표준과학연구원 음향진동 그룹)

1. 머리말

급속한 산업 성장의 부산물로 우리는 각종 편리함을 추구하고 있으며, 교통 수단 역시 큰 몫을 차지하고 있음은 아무도 부정하지 않을 것이다. 특히 자동차는 모두가 필수품이라고 생각할 만큼 보편화되었다. “환경소음”이라는 말이 1974년 ICA 회의에서 처음 공식적으로 사용되었을 만큼 그 전에는 편리함에 가려져 소음은 그리 문제 시 되지 않았다. 그러나 교육·문화적 수준이 전반적으로 높아짐에 따라 소음에 대한 인식이 새롭게 되었고, 이제는 연구개발 투자비에서 소음저감에 대한 투자비가 상당 부분을 차지하게 되었다. 교통 수단 중 특히 자동차와 기차 등 육상교통 수단에서 발생하는 소음은 그 대수와 운행 횟수의 증가로 인하여 인근 주민들의 민원 대상이 되며 매년 증가 추세에 있다.

소음저감 대책은 소음원 자체인 교통 수단물에 대한 1차적인 저감과 이들로부터 발생한 소음의 경로 차단이라는 2차적인 저감 대책으로 분류할 수 있다. 우선 차량 자체에 대한 소음저감은 연차적으로 줄여나가고 있지만 상당히 어려운 문제로 단시간에 급격히 줄일 수는 없다. 승용차의 경우,

주 소음원이 타이어와 도로면과의 접촉 시 발생하는 소음이며 저 소음 타이어 개발이 수반되어야만 한다. 한편, 2차적인 소음저감 수단으로 대표적인 것이 방음벽(차음벽으로 칭하기도 하지만 여기서는 방음벽으로 칭함)이다. 방음벽 개발은 단순 수직형 방음벽을 기본으로 두께, 높이, 형상변화 등 기본적인 연구로부터 현재는 비용 대 효율을 고려하여 상단부 형상변화 연구에 초점을 맞추고 있다. 이 글에서는 방음벽의 재질이나 기본적인 사양 등은 제외하고 그 동안 연구 개발된 기하학적 형태와 이들에 대한 음향학적 특성 원리에 대하여 간략히 설명하고자 한다.

2. 방음벽 개발 동향과 기본원리

방음벽에 대한 초창기 연구는 일본, 캐나다, 영국 등에서 수행되었는데, 특히 일본은 우리의 경우와 마찬가지로 국토가 좁은 관계로 많은 연구를 시도하였다. 방음벽은 방음판넬의 재질에 따라 크게 반사형과 흡음형으로 나눌 수 있다. 반사형이라 함은 콘크리트, 나무, 폴리카보네이트 등 단단한 재질을 사용한 것이고, 흡음형이라고 함은 알루미늄 다공판 뒤에 흡음재를 사용한 경우이다. 이들 두 종류의 방음벽에 대한 기본 특성(투과손실, 흡음률)이 만족되는 경우, 수음자에게 미치는 영향은 방음벽 상단부로의 회절음 효과이다. 방음

* E-mail : jss@kriss.re.kr

벽 설치 시 감음효과는 회절 이론을 적용할 수도 있지만 그 보다는 Maekawa의 실험 곡선이 범용적으로 사용되고 있다.

방음벽에 대한 연구는 옥외에 직접 다양한 형태를 설치하는 것이 어렵기 때문에 주로 무향실 혹은 반 무향실에서 축척모형 실험으로 검증한 후 도로에 적용하게 된다. 방음벽 설치효과에 대한 평가는 방음벽 설치 전·후의 음압레벨 차인 삽입손실(insertion loss)이 주로 사용된다. 즉, 삽입손실이 클수록 효과적인 방음벽이 된다.

방음벽의 형태와 기능에 대해서는 많은 연구 발표가 있었으며, 이들을 모두 언급하기에는 한계가 있으므로 여기서는 대표적인 형태에 국한하겠다. 방음벽에 대한 연구는 70년대부터 80년대에 걸쳐 간단한 형상변화와 이론적 해석이 시도되었고, 90년대에 들어와 복잡한 형상으로 진행되었다. 따라서 방음벽의 형상에 따라 대표적인 연구결과를 서술하겠으나 우리의 경우는 다양한 방음벽의 형상에 대한 연구가 극히 일부 이루어진 관계로 주로 외국의 발표 자료를 기본으로 하겠다.

2.1 간단한 형상을 가지는 방음벽

방음벽에 의한 효과는 Fresnel 수에 직접 연관이 있으며, 이것은 곧 큰 감음량을 얻기 위해서는 Fresnel 수가 증가하면 된다. 이런 조건을 만족하기 위해서는 방음벽의 높이의 증가, 방음벽 두께의 증가, 상단부 형상의 변화 등의 방법을 요구하게 되며, 따라서 초창기 연구는 주로 이러한 점이 고려되었다.

캐나다의 May 등(1980년)은 1/16 축척모형 실험으로 그림 1과 같이 간단한 방음벽 형상에 대한 연구를 하였다. 우선 반사형 방음벽의 두께를 변화시키면서 측정한 결과가 그림 1(a)에 있는데, 그림에서 보듯이 방음벽의 두께를 증가시키에 따라 삽입손실이 증가하고 있다.

방음벽의 높이를 증가시키는 대신 그 효과를 유

발하기 위한 방법의 하나가 방음벽의 상단부 형상을 변화시키는 것이다. 방음벽 상단부를 반사형 재질을 사용하여 T형으로 구성한 경우, 상단부의 길이를 증가시키면서 실험한 결과가 그림 1(b)에 있다. 결과를 보면 T형 상단부의 길이를 증가시키에 따라 삽입손실 역시 증가함을 볼 수 있다. 그림 1(a)의 결과와 비교하기 위하여 방음벽 두께 2.44

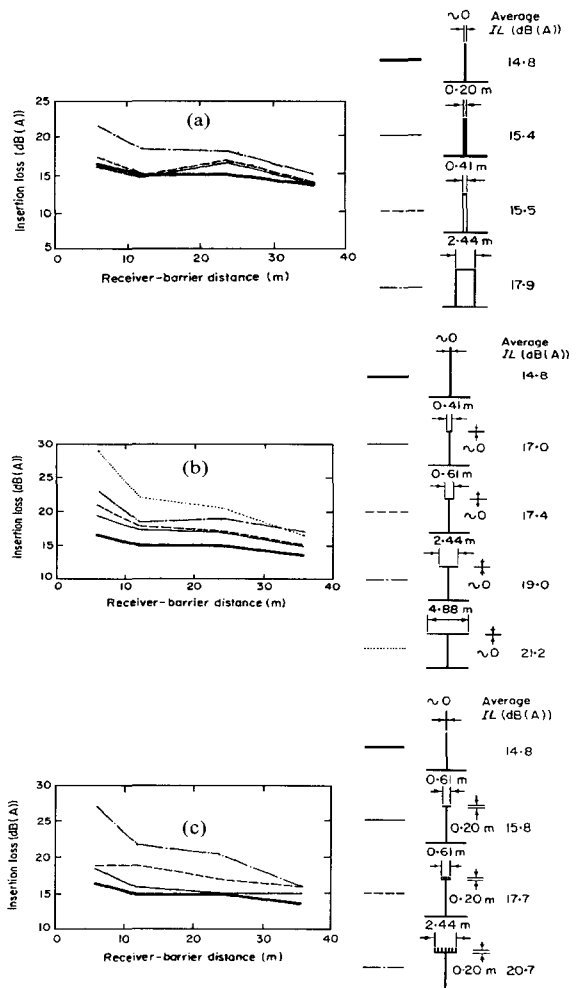


그림 1 방음벽의 형상 및 흡음재 사용에 따른 삽입손실 변화량 (a) 두께의 변화, (b) 상단부 길이 변화, (c) 상단부의 흡음처리 유무에 따른 변화

m인 경우(17.9 dB)와 상단부의 길이를 역시 2.44 m로 한 경우(19 dB)를 보면 상단부의 길이를 증가시킨 경우가 더 효과적임을 알 수 있다. T형 상단부에 흡음재를 사용한 경우에 대한 것은 그림 1(c)에 있는데 상단부 표면을 흡음 처리함으로써 반사형에 비해 1.9 dB 정도의 감음 효과를 추가적으로 얻고 있음을 볼 수 있다. 이것은 어떤 형상이던 공통적으로 나타나는 현상이다. 이것에 대해서는 이미 1970년대 Butler(1974년), Fusiwara(1976년), Rawlins(1976년) 등에 의해서 이론적인 해석이 있었다.

시야 확보를 고려한 연구도 진행되어 방음벽 상단부를 톱니 혹은 사각형으로 규칙적인 형상을 만든 Thnadner 방음벽이 구상되었다. 그림 2(a)와 2(b)의 형상에 대하여 May(1980년)는 축척 모형 실험을 그리고 Maekawa 등(1986년)은 이론적 해석과 실험을 하였으며, 그리고 최근에 미국 Texas 대학의 Ho 등(1997년)은 그림 2(c)처럼 상단부를 불규칙적으로 만들어 그 효과를 연구한 바 있다. 이 방음벽은 규칙 혹은 불규칙한 모양의 잘려진 부분 각각이 하나의 선 음원으로 작용한다는 이론적 근거를 두고 있다. 이들은 시야 확보 혹은 도로에서의 배기가스의 확산 등에 도움을 주지만 기준 방음벽에 비하여 감음 효과는 떨어지기 때문에 효과적이지는 못한 단점을 가지고 있다.

지금까지는 간단한 모양의 방음벽에 대한 May 등의 연구 결과를 중심으로 살펴보았다. 한편, 실제 도로에서의 실험한 결과 혹은 Hutchins 등(1984년)의 축척모형 실험으로 검증한 결과는 May의 결과와 잘 맞지 않는 경우도 있었다. 따라

서 영국의 Hothersall 등(1991년)은 경계요소법(BEM: boundary element method) 방법으로 좀더 정밀하게 방음벽 상단부에 형상이 있는 경우를 검토하게 되었다. Hothersall 등은 T, Y, ↑형의 상단부 형상을 가지는 방음벽에 대한 삽입손실의 수치 해석적으로 검토하였다. 우선 사용된 흡음재의 특성은 그림 3과 같다.

그림 3의 특성을 가지는 흡음재들을 T형 상단부에 적용한 결과를 그림 4(a)에 보였는데, 4번 흡음재를 사용한 경우가 전 주파수에 걸쳐 가장 좋은 감음 효과를 보이고 있다. 즉, 흡음재의 유동비저항이 작을수록 효과적이라는 것을 알 수 있다. 그림 4(b)는 T, Y, ↑형에 대한 삽입손실 결과를 비교한 것으로 결과를 보면 T형이 주파수 500 Hz를 넘어서는 가장 높은 삽입손실 값을 나타내어 가장 효과적이고 다음은 Y, ↑형 순서임을 알 수 있다. 한편, Y, ↑형의 경우 날개 각도를 변화시켰을 때의 효과를 그림 4(c)에 나타냈는데 각도가 0인 T형을 기준으로 각도를 주는 것은 좋지 않음을 알 수 있다.

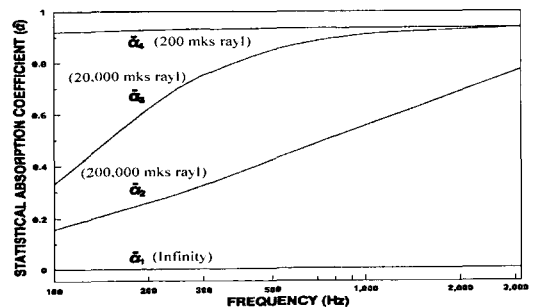


그림 3 주파수에 따른 흡음재(4 종류)의 흡음률 비교

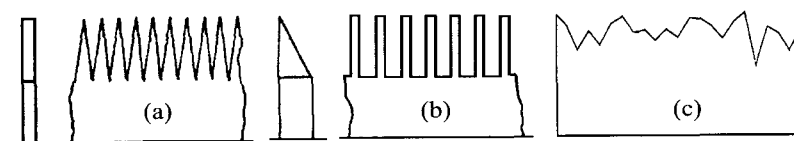


그림 2 Thnadner 방음벽의 모형도 (a) 톱니형 (b) 사각형 (c) 랜덤형

역시 BEM 방법을 이용하여 몇 가지 상단부 형상에 대한 Alfredson 등(1995년)의 결과는 그림 5에 나타났다. 그림 5에서 보면 그림 5(c)의 T형이 가장 좋은 결과를 보이고 있다. 그러나 그림 5(c)의 반사형 재질인 원통형 방음벽은 기준형인 수직형보다도 결과가 좋지 않으며, 또한 T형에 비해서도 성능이 많이 떨어지고 있다. 이 결과는 다소 의외성을 가지는데 수직형에 대해 삽입손실 증가

량을 비교한 정성수 등(1997년)의 1/10 축척모형 실험 결과인 그림 5(e)와도 상충되는 면이 있어 좀더 많은 실험적 결과로부터 검증할 필요가 있다.

현재까지의 연구결과들을 종합할 때 간단한 상단부 형상인 경우는 T형이 가장 좋은 것으로 나타나고 있음에는 공통적인 사항이다. 원통형의 경우는 T형 보다 성능이 조금 못하지만 미적 감각을 고려하여 개발되었으며 일본에서는 실제 설치

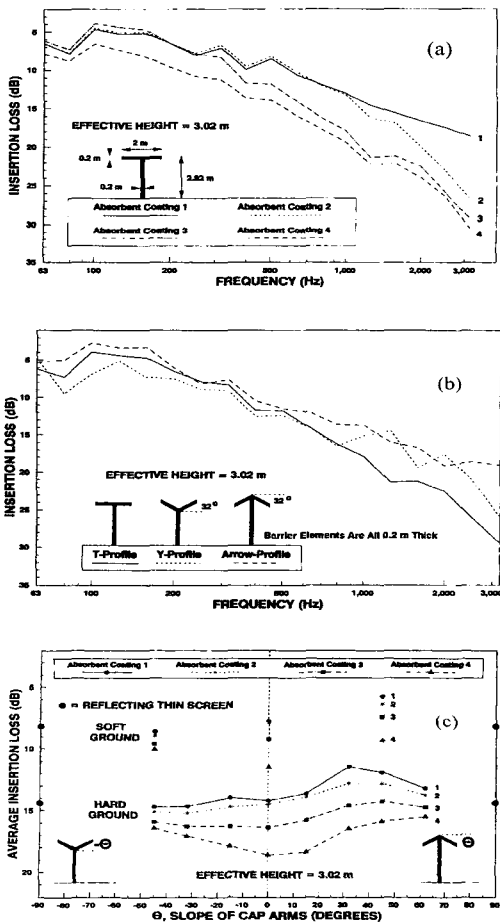
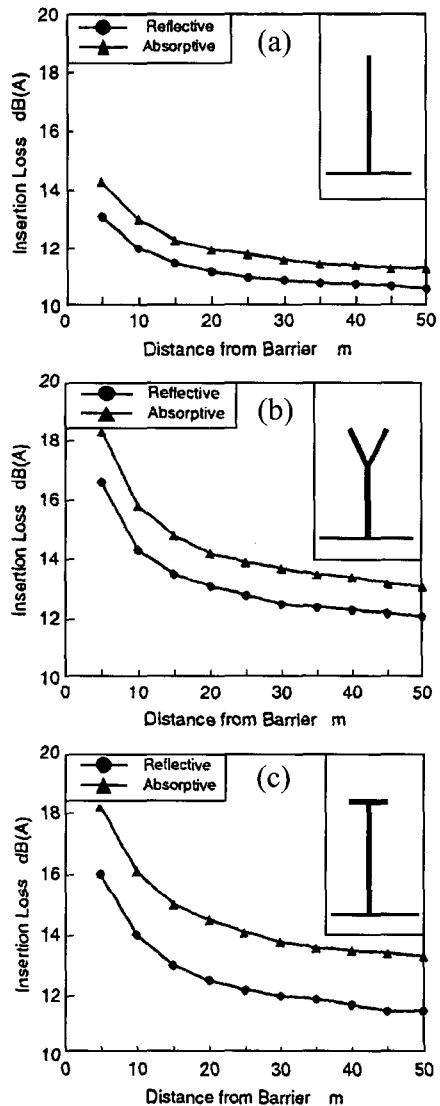


그림 4 간단한 상단부 형상에 따른 삽입손실 비교 (a) T형 상단부에 부착된 흡음재 종류에 따른 영향, (b) T, Y, ↑형 비교, (c) Y, ↑형의 날개 각도 변화



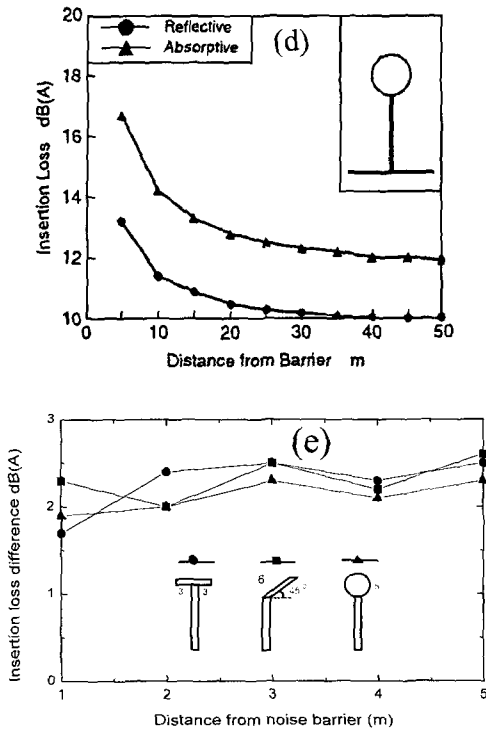


그림 5 간단한 상단부 형상을 가지는 방음벽의 삽입손실 비교 (a) 기준형(수직형), (b) Y형, (c) T형, (d) 원통형, (e) T형, 경사형, 원통형 비교

하여 그 성능을 시험한 바 있다. 원통형 상단부를 갖는 방음벽은 Fujiwara 등(1991년)이. 원통형을 변형시킨 버섯형은 Yamamoto 등(1995년)이 개발하였는데 그림 6에 실제 모형을 나타냈다. 버섯형의 경우는 좀더 미적 감각을 첨가하여 그림 6(c)처럼 작은 나무를 심는 방안도 강구 중에 있다.

그림 6의 원통형 혹은 버섯형 상단부 형상은 일본에서 높이 0.5 m의 크기로 제작하여 높이 3 m 인 방음벽 상단부에 장착하여 도로에서 설치하였으며, 그림 7에 보인 바와 같이 수직형 단순 방음벽(높이 3 m)에 비하여 2~3 dB의 삽입손실을 얻었다. 이것은 수직형 방음벽의 높이를 2 m 증

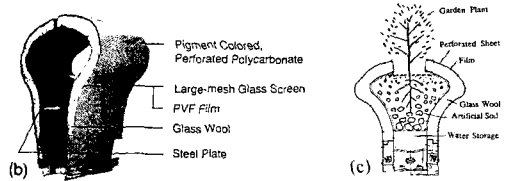
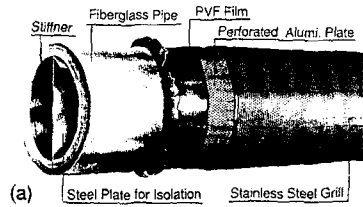


그림 6 몇 가지 상단부 형상들 (a) 원통형 (b) 버섯형 (c) 변형된 버섯형

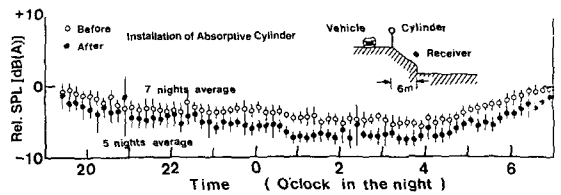


그림 7 원통형 상단부를 가지는 방음벽 설치효과

가시키는 효과에 해당된다.

지금까지 간단한 상단부 형상을 살펴보면서도 방음벽의 높이 증가에 따른 삽입손실 효과에 대해서는 언급하지 않았는데 다음은 높이 증가의 효과를 보겠다. Watts 등(1994년)은 실제 도로 조건에서 비교적 짧은 길이(20 m)의 방음벽을 설치하여 삽입손실 시험을 하였다. 그림 8은 높이 2 m의 단순 반사형 방음벽을 기준으로 하여 높이를 2.5 m, 3 m로 증가시킨 경우와 T형 방음벽에 대한 결과인데, 결과적으로 T형에 비하여 높이를 증가시키는 것이 더 효과적임을 보여주고 있다. 즉, 그림 8(c)처럼 높이를 1 m 증가시켰을 때의 삽입손실이 3.6 dB임에 반하여 상단부의 길이를 2 m로 한 그림 8(f)의 경우는 3.1 dB로 단순형보다 저하되고 있다. 이것은 원통형 혹은 버섯형 상단부의 효과가 방음벽 높이를 2 m 증가시키는 효과

에 해당된다는 그림 7의 결과와 비교할 때 이해하기 힘들다. 왜냐하면, 원통형보다 그 효과가 좋은 T형의 경우라면 방음벽 높이 변화보다 더 좋은 효과를 가지는 것이 합당할 것으로 기대되기 때문이다.

이것은 또한 정성수 등의 1/10-축척 모형 실험 결과인 그림 9의 결과와도 상충되는데 그림 9는 높이 3 m의 반사형 수직방음벽을 기준으로 높이를 4 m 그리고 5 m로 한 경우 삽입손실과의 차이이다. 앞서 그림 5(e)에서 보았듯이 T형인 경우에 삽입손실이 2~2.5 dB 증가하므로 산술적으로도 그림 9와 같은 수직형 방음벽의 경우는 높이를 1.5 m 증가시키는 양에 해당된다. 즉, T형 상단부의 길이를 0.6 m로 한 경우 높이 4.5 m의 수직형

방음벽의 설치효과를 얻게 되는 것이다. 흡음처리를 한 경우는 반사형에 비해 약 0.5dB 정도의 감음효과를 더 유발하게 되므로 정성수 등의 실험결과는 앞서 그림 7의 일본에서 실제 실험한 결과와 비슷하다. 그러나 비록 Watts 등의 결과가 다른 실험자의 것과 다르다고 할지라도 측정된 값이므로 참고를 할 필요성은 있다.

2.2 간섭형 상단부 형상의 방음벽

1990년대에 들어와서는 단순한 형태의 상단부 형상변화에서 벗어나 좀더 적극적으로 감음효과를 높이는 방안으로 회절 경로의 연장뿐만 아니라 간섭효과를 최대한 활용할 수 있는 방향으로 연구가 발전되었다. 그림 10에 이들 중 대표적인 형상을 나타냈는데, 우선 그림 10(a)의 형태는 일본의 Shima 등(1996년)이 개발한 것으로 그림 10(c)에 보인 것처럼 일반적인 Y형에 비하여 높은 삽입손실 효과를 가짐을 알 수 있다. 그림 10(b) 역시 비슷한 결과를 준다.

그림 10(d)의 형태는 미즈노 등(1982년)이 음파제어로 개발하였는데 역시 각 채널을 통해 박스에 들어오는 음파에 위상적 지연을 주고 다시 박스 밖으로 나갈 때에 회절음파와 간섭시켜 벽 뒤에서의 소음 저감화를 꾀하는 것이다. 이것은 실제 신간선의 차음벽으로 다수 설치되었다. 영국의 Watt 등(1996년)도 이러한 간섭형 음파제어장치를 도로 교통 소음대책으로의 응용을 시도하고 옥외 시험장에서 스피커에 의한 full-scale 모델 실험을 정밀하게 하였다. 그 결과, 높이 2 m의 차음벽과 비교하여 1.9 dB의 삽입손실 효과를 얻었지만 미즈노처럼 6 dB의 높은 효과는 얻을 수 없었다. 이러한 간섭형 방음벽은 국내에서도 1986년 한국표준과학연구원 음향실에서 연구 개발하여 높은 삽입손실을 얻은 바 있다.

다음은 다중에지(multiple-edge)를 갖는 형태로 그림 8(a)의 기준형에 대한 Watts의 실험결과를

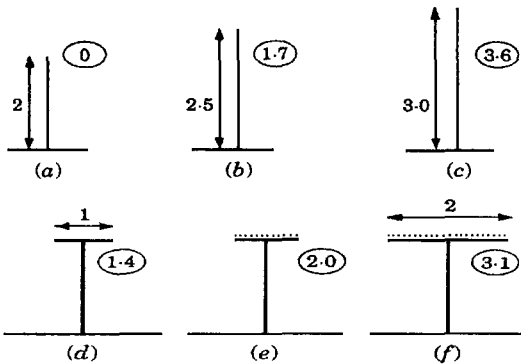


그림 8 기준형 방음벽의 높이 변화와 T형 방음벽의 길이 변화에 따른 삽입손실 비교

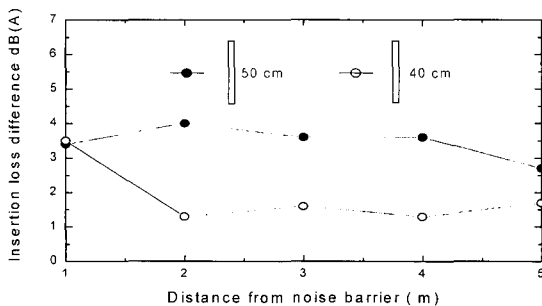


그림 9 방음벽의 높이 변화에 따른 삽입손실 변화

그림 11에 나타냈는데 높은 삽입손실 효과를 볼 수 있다. 이것은 방음벽 측면에 부착되는 날개와 수직 방음벽 사이에서 다중 반사와 회절을 이용하는 원리이나 방음벽 상단부의 옆에 설치되므로 도로의 공간이 좁아지는 단점이 있다.

지금까지의 연구동향을 보면 전반적으로 큰 흐름 자체는 방음벽의 상단부 형상을 변화시키는 방향이며 이것은 역시 방음벽의 높이를 증가시키는

것을 억제하기 위함과 비용 대 설치효과를 고려하고 있다. 방음벽의 상단부 형상 변화는 회절 경로를 크게 하기 위한 기본적인 원리에 간섭효과를 추가하는 단계로 개선되었으며, 최근에는 간섭효과를 좀더 적극적으로 활용하는 단계로 발전되었다.

그림 12(a)는 물레방아형, 그리고 12(b)는 T형의 변형된 모양이고, 이들 두 모델을 각각 더 개선한 형태가 그림 12(c)와 (d)이다. 이들 두 종류의 방음벽을 개발한 이론적 근거는 모두 같은데 그림 12(a)처럼 개개의 날개에 입사파와 반사파가 중첩되어 날개 끝 표면 근처에 음향학적으로 임피던스가 0을 만족하는 소위 무른 표면(soft surface)을 만드는 것이다. 이것은 날개의 길이가 음파의 1/4-파장의 홀수배에서 발생되므로 이때는 삽입손실이 증가하지만 정수배에서는 오히려 역효과를 유발하게 된다. 따라서 광역의 주파수 대역에서 효과를 가지려면 기하학적인 변형을 기해야 되며 이에 따라 주파수 tuning을 할 수 있도록 개선한 형태가 그림 12(c)와 (d)이다. 전자는 Okubo 등(1996년)에 의해서 개발되었는데 시뮬레이션 결과 tuning 주파수에 대해서는 수직형에 비하여 약 10 dB, 그리고 Fusiwara와 김철환(1996년)에 의해 개발된 변형된 T형은 같은 크기의 반사형 T형에 비하여 10 dB 만큼 큰 삽입손실을 얻게 되었다. 이러한 형태는 앞으로도 계속 보완될 전망이다.

그 밖의 형태로는 그림 13처럼 몇 가지 방법들이 검토되었는데, 그림 13(a)는 경사진 형태로

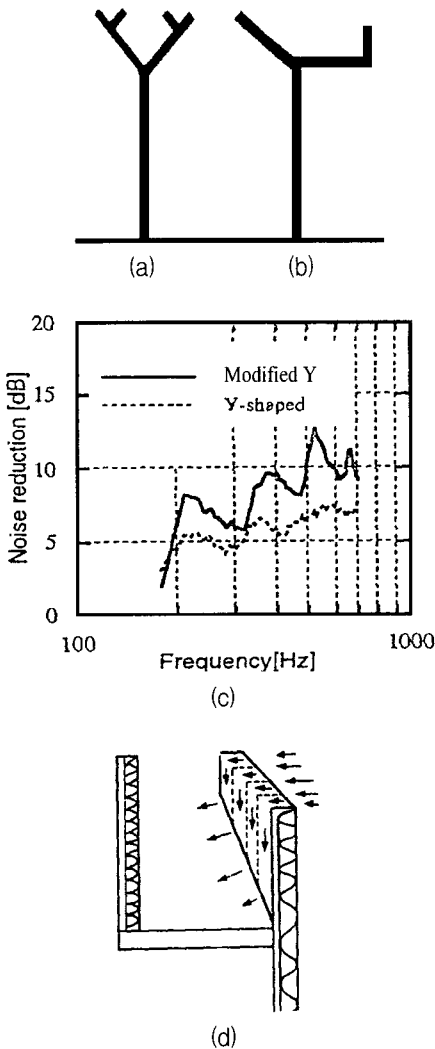


그림 10 간섭형 상단부 형상의 예

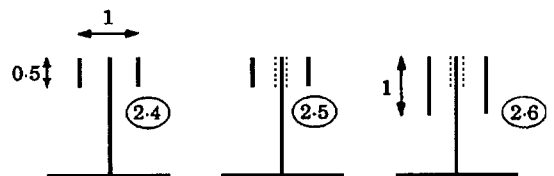


그림 11 다중예지 방음벽의 삽입손실

TGV 철로변 방음벽으로 Houtave(1997년) 등이 검토한 바 있으며, Anfosso-Ledee(1997년)는 방음벽을 지그재그 형태로 구성하는 방안을, 그리고 훗타(1997년) 등은 그림 13(c)와 같이 상단부에 원통형을 설치하는 방안도 연구한 바 있다.

앞서의 방음벽들은 기능면에서 볼 때 전기적인 장치를 사용하지 않고 방음벽 자체에 대한 기하학적인 구조 변경에 역점을 두었다. 반면에 전기적

장치를 사용하는 소위 말해서 능동소음제어(ANC : active noise control) 장치를 부착하는 방안도 검토되었다. 이세 등(1991년)은 2차 음원을 차음벽의 회절 에지부에 설치하고 수음점 위치에서 음압이 최소화되는 방법을 연구한 반면, 오모토 등(1991년)은 2차 음원을 음원측에 놓고, 차음벽의 회절 에지에서의 음압을 0으로 하는 방법으로 액티브 제어장치의 구상하고 축척모형 실험을 통해 확인하였다. 일반적으로 액티브 제어장치의 경우는 저주파수에서 효과적인데 전자의 경우 역시 특정한 저주파수에서는 효과적인 결과를 얻었지만 고주파수에서는 오히려 수음자 지역에서 음압이 상승하는 역효과도 발생하였다. 전자의 경우와 후자의 경우는 이론적 개념이 다른데, 전자는 실제 음원과 제 2 음원과의 간섭에 의하여 수음자 지역에서 최대한 음압레벨을 최소화시키는 반면, 후자는 제 2 음원을 이용하여 방음벽 상단부 부근을 음향학적으로 무르게 만들고 있다. 이는 앞서의 후지와라 등의 개념과 같다고 하겠다. 그들의 결과를 보면 어느 쪽이나 저주파수 영역에서 10 dB 초과하는 감음 효과를 보고하고 있지만, 현실에서는 음원인 자동차의 위치가 3차원적으로 움직이기 때문에 시스템의 최적화에는 많은 오차가 남겨지고 있다. 최근에는 여러 개의 확정기를 제 2 음원으로 설치하여 수음자 지역에 음압레벨을 저감시

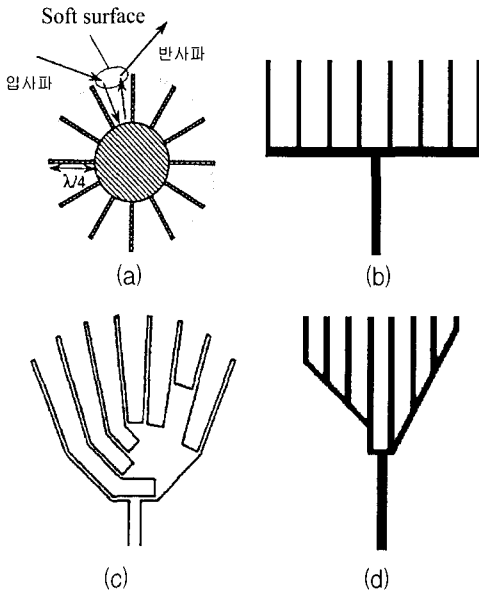


그림 12 무른표면을 갖는 상단부 형상들

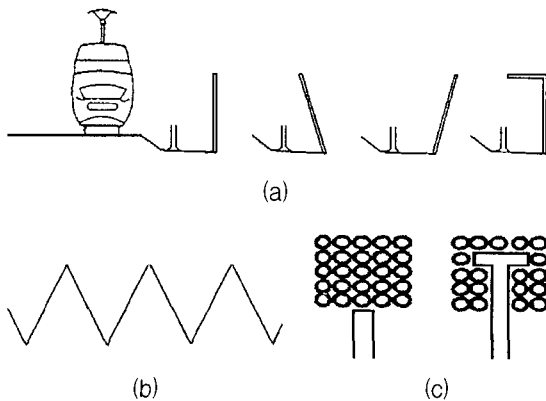


그림 13 다양한 방음벽의 형태들

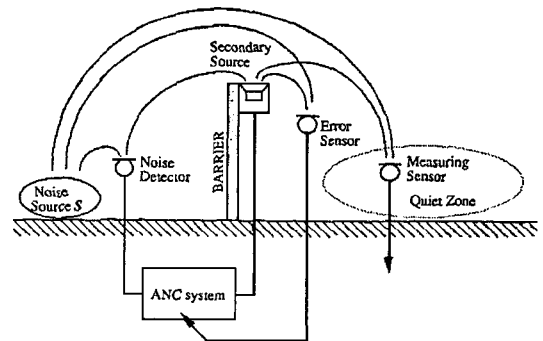


그림 14 능동소음제어 장치를 이용한 방음벽의 모형도

키려는 노력이 시도되고 있다.

3. 맺음말

이 글은 지금까지 연구되어온 방음벽의 일반적인 동향으로, 방음벽의 재질은 이미 방음벽의 조건을 만족한다고 가정하고 회절음을 억제하려는 연구에만 초점을 두었다. 그 동안 다양한 방음벽의 개발이 이루어졌음에도 불구하고 여기서는 제한된 모델만을 소개한 것이 다소 아쉬움 점이 있으나 대표적인 형태는 어느 정도 다루어졌다고 본다. 비록 문제를 회절음 저감에 초점을 두었지만 김홍식(1996년)처럼 방음벽의 종류에 따른 연구 또한 중요하다.

현재도 많은 연구자들이 다양한 방법으로 방음벽에 대한 이론적 해석 및 실험을 해오고 있지만 한가지 아쉬운 점은 어떤 방법이던 공통된 기준이 없다는 것이다. 즉, 각 연구자들이 서로 다르게 방음벽의 높이, 길이, 음원과 수음점의 높이를 설정했기 때문에 어떤 모델이 가장 효과적인지를 구분하기 어렵게 된다. 이러한 것은 역시 본문 곳곳에서도 볼 수 있었듯이 서로 다른 결과를 주게 된다. 일본의 경우 이러한 문제점을 해결하기 위하여 소음 진동 연구위원회(1998년)에서 같은 조건 하에서 방음벽의 삽입손실을 구하도록 많은 연구자들의 참가를 요구한 바 있다. 비록 많은 연구자들이 참석하지 않았지만 김철환 등의 모델은 효과적임은 인정받았다. 우리의 경우도 앞으로 개발할 방음벽에 있어서 그 효과를 정확히 비교 가능하도록 기준 방음벽의 재원 그리고 음원, 수음점 등의 기하학적 량을 결정하는 것이 우선적으로 필요한 사안이라고 사료된다.

방음벽의 재질 연구도 중요한데, 현재의 흡음재(유리섬, 암면 등)를 대체할 수 있는 환경친화적 물질, 재활용 가능 물질 등에 대한 연구도 필요하다. 이것은 우리 자신이 소음 발생원의 원인 제공

자이자 피해자이기 때문이다. 또한 건물이 점점 고층화되는 점을 감안하면 방음벽의 높이도 어느 정도 증가시켜야 되므로 디자인 연구도 필요할 것이며, 우리 기후에 잘 견딜 수 있는 식물을 심어 방음벽 주위를 감싸주어 주위 환경과의 조화를 이루는 방안도 강구하는 것이 바람직하다고 본다.

참고 문헌

- (1) Maekawa, Z., 1968, "Noise Reduction by Screens," Applied Acoustics, Vol. 1, pp. 157~173.
- (2) Kurze, U. J. and Anderson, G. A., 1971, "Sound Attenuation by Barriers," Applied Acoustics, Vol. 4 pp. 35~53.
- (3) May, D. N. and Osman, M. M., 1980, "Highway Noise Barriers: New Shapes," J. Sound Vib., Vol. 71, No. 1, pp. 73~101.
- (4) Hutchins, D. A., Jones, H. W. and Russell, L. T., 1984, "Model Studies of Barrier Performance in the Presence of Ground Surfaces. Part II-Different Shapes," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 76, No. 6, pp. 1817~1826.
- (5) Maekawa, Z. and Osaki, S., 1986, "Application of the Line-integral Method for Designing a Shaped Noise Barrier," Inter-Noise 86, pp. 489~494.
- (6) Ise, S., Yano, H. and Tachibana, H., 1991, "Basic Study on Active Noise Barrier," J. Acoust. Soc. Jpn. (E) Vol. 12, No. 6, pp. 299~306.
- (7) Omoto, A. and Fujiwara, K., 1991, "Active Canceling of Edge Potential of Noise Barrier," 일분음향학회지, 제 47 권 제 11 호, pp. 801~808.
- (8) Fujiwara, K. and Furuta, N., 1991, "Sound Shielding Efficiency of a Barrier with a Cylinder at the Dege," Noise Control Engineering Journal, Vol. 37, No. 1, pp. 5~11.
- (9) Hothersall, D. C., Crombie, D. H. and

Chandler-Wilde, S. N., 1991, "The Performance of T-profile and Associated Noise Barriers," *Applied Acoustics*, Vol. 32, pp. 269~298.

(10) Watts, G. R., Crombie, D. H. and Hothersall, 1994, "Acoustic Performance of New Designs of Traffic Noise Barriers: Full Scale Tests," *J. Sound Vib.*, Vol. 177, No. 3, pp. 289~305.

(11) Yamamoto, K., Shono, Y., Ochiai, H. and Hirao, Y., 1995, "Measurements of Noise Reduction by Absorptive Devices Mounted at the Top of Highway Noise Barriers," *Inter-Noise 95*, pp. 389~392.

(12) Crombie, D. H., Hothersall, D. C. and Chandler-Wilde, S. N., 1995, "Multiple-edge Noise Barriers," *Applied Acoustics*, Vol. 44, pp. 353~367.

(13) Alfredson R. J. and Du, X., 1995, "Special Shapes and Treatment for Noise Barriers," *Inter-Noise 95*, pp. 381~384.

(14) Watts, G. R. and Morgan, P. A., 1996, "Acoustic Performance of an Interference Type Noise Barrier Profile," *Applied Acoustics*, Vol. 49, No. 1, pp. 1~16.

(15) 김홍식, 1996, "방음벽 종류별 반사음 저감 효과 및 회절효과에 관한 실험적 연구," *한국소음진동공학회논문집*, 제 6 권 제 2 호, pp. 245~250.

(16) Okubo, T. and Fujiwara, K., 1996, "Efficiency of a Noise Barrier with an Acoustically Soft Cylindrical Edge," *일본음향학회지*, 제 52 권 제 12 호, pp. 957~966.

(17) Shima, H., Watanabe, T., Mizuno, K.,

Iida, K., Matsumoto, K. and Nakasaki, K., 1996, "Noise Reduction of a Multiple Edge Noise Barrier," *Inter-Noise 96*, pp. 791~794.

(18) Anfosso-Ledee, F., 1997, "Sound Absorption of Non Flat Road Noise Barriers," *Inter-Noise 97*, pp. 441~444.

(19) Houtave, P. and Clairbois, J.-P., 1997, "Specific Designs of Noise Barriers for Trains: Part I: Theoretical Study of Forms and Materials" *Inter-Noise 97*, pp. 421~424.

(20) Maekawa, Z., 1997, "Environmental Acoustics Update," *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)* Vol. 18, No. 3, pp. 97~107.

(21) Ho, S. S. T., Busch-Vishniac, I. J. and Blackstock, D. T., 1997, "Noise Reduction by a Barrier Having a Random Edge Profile," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 101, No. 5, pp. 2669~2676.

(22) Fujiwara, K., Hothersall, D. C. and Kim, C.-H., 1997, "Noise Barriers with Reactive Surfaces," *Applied Acoustics*, Vol. 53, No. 4, pp. 255~272.

(23) 김철환, K. Fujiwara, 1998, "상단에 음향관을 배열한 T형 방음벽의 차음 성능(I)/(II)," *한국소음진동공학회 추계학술대회논문집*, pp. 86~91/92~97.

(24) Yamamoto, K., 1998, "Highway Noise Barriers in Various Types," *일본음향학회지*, 제 54 권 제 4 호, pp. 327~332.

(25) 소음진동연구위원회, 1998, "Determination of Acoustic Property for Improved Noise Barriers," *일본음향학회지*, 제 54 권 제 4 호, pp. 333~338.