

철도소음 저감 향상을 위한 방음벽 상단의 능동제어장치

Actively controlled sound field on the top edge of noise barriers for railway noise reduction

고효인*, 조준호**, 김재철***, 이찬우****, 한환수*****

Koh, Hyo-In Cho, Joon-Ho, Kim, Jae-Chul Lee, Chan-Woo, Han, Hwan-Su

ABSTRACT

In this study the sound field on the surface of the top edge of noise barriers is actively minimized to enhance the shielding effect without increasing the height of the barrier. First the results of a numerical study are shown; the sound field reduction in the far field due to a cylindrical active headpiece attached to a semi-infinite screen and the related control parameters are investigated. The results of a model experiment in an anechoic chamber and optimal control parameters for noise control on the railway side are shown and discussed.

1. 서 론

반무한평면의 모서리에서의 소리의 회절에 관한 연구를 통해서 음향학적으로 소프트 ($Z \rightarrow 0$)한 모서리 영역이 소리의 에너지를 흡수하는 경우보다 높은 감쇄효과를 가져올 수 있다는 연구 결과들이 발표되었다 (예.[1]). 이러한 소프트한 표면을 실현시키기에 적합한 방법은 한 예로 공진성 흡음장치를 모서리 상단에 부착하는 방법으로 공진주파수 영역에서 가장 효과가 있다 [2]. 옥타브 이상의 넓은 주파수 대역에 효과를 얻기 위해서는 관의 길이를 다르게 설계하거나 다양한 기하학적 변형을 주는 등 다소 복잡한 구조적인 변형들이 요구된다. 특히 저주파수 영역으로 갈수록 요구되는 공진기의 규모가 커지기 때문에 방음벽인 경우 높이를 높이는 것이 더 효율적일 수 있다. 이러한 이론적, 현실적 배경에서 비교적 저주파수 영역에 유리하게 이용되는 능동소음제어의 원리를 도입하여 가장 효율적으로 상단의 모서리의 음향임피던스를 최소화하여 소리 에너지의 전달을 차단하는 연구를 하였다.

* 한국철도기술연구원, 정회원
** 한국철도기술연구원, 정회원
*** 한국철도기술연구원, 정회원
**** 한국철도기술연구원, 정회원
***** 한국철도기술연구원, 비회원

본 논문에서는 방음벽 상단 주변의 음장을 해석적 혹은 수치해석적으로 계산, 연구하기에 용이하면서도 현실적으로 모델실험이나 설비가 가능하도록, 임의로 표면 음향임피던스를 설정할 수 있는 원통을 방음벽 상단에 부착한 모델을 선택하였다(그림 1). 원통의 한 부분을 통해서 방사되는 제 2음원을 이용하여 원통표면의 음압을 가장 효율적으로 최소화하기 위한 제어조건을 검토하고 그에 따른 결과들을 분석하였다.

2. 계산모델

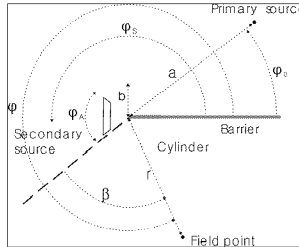


그림1. 반무한 평면 상단의 음장 능동제어에 관한 모델

- ϕ_0 : 소리의 입사각도
- a: 원통의 중심과음원 사이의 거리
- b: 원통의 반지름
- ϕ_s : 제 2음원의 중심과 평면의 사이각도
- ϕ_A : 제 2음원의 중심각도
- ϕ : 관찰점과 평면의 사이각도
- r: 원통의 중심과관찰점 사이의 거리
- β : 회절각도

모델로서는 단단한 ($Z=\infty$) 표면의 반무한 평면에 부착된 단단한 표면의 원통이 선택되었다. 제 2 음원은 중심각 ϕ_A 에 해당하는 원통 표면의 일부분의 진동에 의한 음원이며 진동 속도와 위치 ϕ_s 는 임의로결정할 수 있다. 제 1음원은 평면에 대해 ϕ_0 의 각도로 a 의 거리로부터 입사하는 무지향성의 선음원을 선택했고 계산에서는 원통으로부터의 거리 a 가 충분히 멀기 때문에 ($a \gg r$), ($a \gg b$) 평면파가 입사하는 것으로 간주한다. 따라서 전 계산은 이차원에서만 이루어졌다. β 는 회절각으로서 능동제어에 의한 그늘 영역의 음장 계산에 사용된다. 원통표면의 음향학적 특성은 음향임피던스

$$Z = -\frac{p(b)}{v(b)} \quad (1)$$

에 의해서 결정되며 계산 초기조건으로서는 임피던스가 원통의 둘레를 따라서 일정하다고 가정한다. 임의의 관찰점 (r, ϕ) 에서의 음압은 그 위치에서의 반평면 벽에 의해 야기되는 음압 p_{screen} 과 추가적으로 평면에 부착된, 임피던스 Z 가 무한대인 원통에 의해 야기되는 영향 $p_{cylinder}$, 제 2음장에 의해 형성되는 p_{sec} 의 영향을 모두 합산해서 계산한다:

$$p(r, \phi) = p_{screen}(r, \phi) + p_{cylinder}(r, \phi) + \sum_{j=1}^J p_{sec_j}(r, \phi) \cdot \alpha_j \quad (2)$$

α_j 는 각각의 제 2음원에 해당하는 진폭과 위상에 관한 정보를 포함한다. 제 2음장을 결정하는

제 2음원의 위상과 진폭 는 다음과 같이 원통 표면상의 특정한 지점에서의 음압절대값의 제곱의 합이 최소가 되도록 결정한다 :

$$\sum_{m=1}^M |p(b, \phi_m)|^2 = Min. \quad (3)$$

ϕ_m 은 음압을 최소화하는 원통표면의 각 지점 (에러센서의 위치)과 평면의 사이각이다. 평면 뒷면의 원거리음장을 가장 효과적으로 저감시키도록 원통표면의 음압을 최소화할 수 있는 조건을 찾아내는 것이 연구의 궁극적인 목적이다. 식 (2)의 각 항에 관한 유도과 자세한 기술은 [1][3][4] 에 제시되어 있다. 능동제어를 통한 음장의 역학적 변화는 원통표면상에서의 제 2음원의 위치 (ϕ_S) 와 방사출구의 크기 (ϕ_A), 최소화점의 위치 (ϕ_m) 그리고 $kb(= 2\pi b/\lambda)$, 즉, 원통의 크기와 파장의 비등 여러 가지 요소에 의해서 영향을 받는다.

3. 상단 모서리의 임피던스의 능동제어

그림 2에 서로 다른 음향임피던스로 인한 원통주변의 소리 에너지의 흐름을 을 나타내었다. 능동제어를 통해서 형성된 음장은 제 1차음장과 합쳐지며 단단한 표면을 타고 넘어오는 소리의 흐름을 차단, 저감한다 (그림 2(c)). 단 하나의 지점 (ϕ_m)의 임피던스를 최소화 시켰는데도 20 dB 에서 35 dB 에 가까운 감쇠율을 나타내는 것을 볼 수 있다.

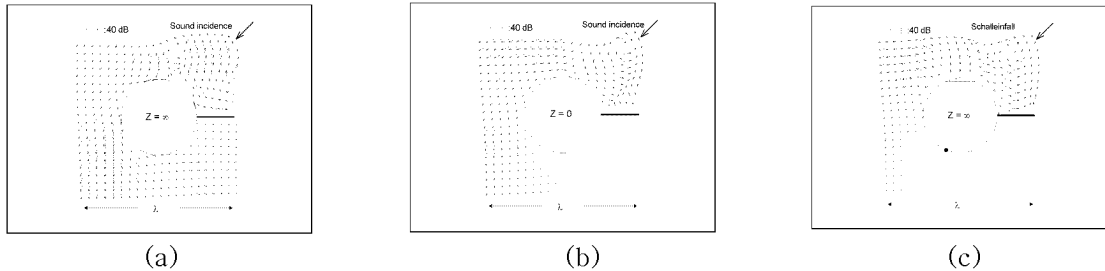


그림 2. 소리의 세기 단단한 표면 (a), $Z=0$ (b), 능동제어 ($\phi_m = 247.5$, $\phi_S = 90$) (c)

이렇게 표면에 근접해서 발생하는 역학적 현상과 에너지 흐름이 벽 뒷면의 원거리 음장 ($r \gg b, r \gg \lambda$) 에 어떤 영향을 미치는지를 그림 3이 나타낸다. b 는 원통의 반지름이고 각 값은

$$VM = 10 \lg \left(\frac{|P_{without_active}|^2}{|P_{with_active}|^2} \right) \quad (4)$$

으로서 단단한 표면의 음장을 능동제어한 경우와 능동제어를 하지 않은 경우에 있어서의 벽 후면의 원거리 음장레벨의 차이를 회절각 $\beta = 5^\circ \sim 85^\circ$ (10° 간격) 에서 계산하여 b/λ 에 대해서 나타낸 것이다. 전체적으로 대략 $b/\lambda = 0.9$ 까지 감쇠효과가 증가함을 볼 수 있으며 회절각이 45° 보다 큰 영역에서는 전 주파수 영역에 걸쳐 능동제어를 통한 감쇠효과 향상이 10 dB 이상임을 알 수 있다. 이 해석결과를 바탕으로 실제 철도연선에 설치되는 방음벽의 위치와 높이를 감안 (그림 4 참조) 하여 수음위치 1 에서의 높이에 따른 (R1~R7) 방음벽 상단모서리의 능동음장제어 효과와 수음위치 2 (R8)에서의 효과를 그림 5 에 나타내었다. 위의 공식 (4) 에서와 같이

이는 방음벽 위에 단단한 표면의 상단장치가 부착된 상태에서 단지 능동제어를 한 경우와 하지 않은 경우의 레벨차를 나타낸 것이다. 저감효과는 상단장치의 크기와 파장의 비, 다시 말해서 고정된 상단장치인 경우 주파수 영역에 따라서 차이가 있음을 알 수 있다. 그림 5(a)에서는 상단장치의 반지름과 같은 길이의 파장 (고주파수로 갈수록)까지 효과가 증가함을 알 수 있으며 실제 25~20kHz 의 철도소음원을 전제로 하여 계산한 저감효과는 3m 높이의 방음벽과 $b = 30\text{cm}$ 의 상단장치를 이용한 능동음장제어인 경우 약 4 kHz부터 오히려 음압이 수음위치에서 증가하여 역효과가 일어남을 알 수 있다. 서론에서 언급한 바와 같이 대체적으로 상단 모서리를 회절하기 때문에 방음벽 자체나 흡음재로 효과를 보기 어려운 주파수 영역은 주로 500 Hz 이하의 저주파수 영역이며 (고속)철도 연변소음에서도 이 영역이 부각되는 점으로 보아 이 기술은 이렇듯 기존의 수동적 제어 방법으로 저감효과를 보기 어려운 특정 주파수 밴드내로 제어 영역을 한정하는 것이 합리적일 것이다.

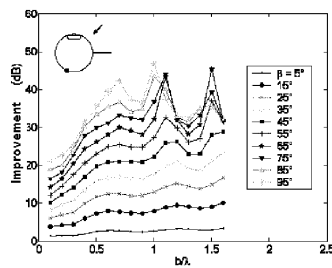


그림 3. 능동음압제어를 통한 원거리 음장에서의 음압레벨 감쇠효과
($\phi_m = 247.5$, $\phi_s = 90$, $\phi_0 = 45$)

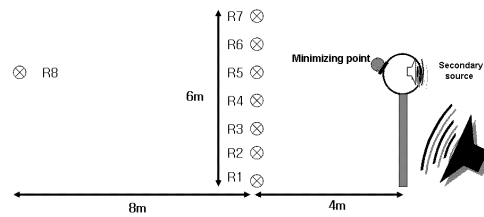


그림 4. 방음벽 상단의 능동음장제어 효과 계산을 위한 측면도

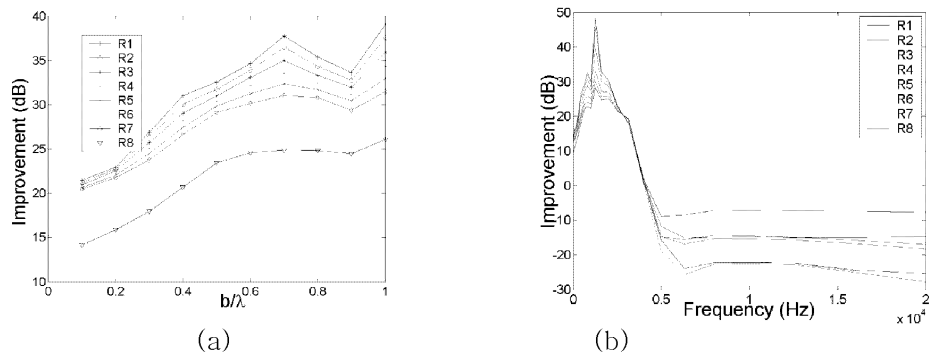


그림 5. 능동음압제어를 통한 음압레벨 감쇠효과; 상단장치의 크기와 파장의 비에 대해 계산
(a), 주파수에 대해서 계산 (b)

4. 모델실험 결과

그림 6은 무향실내의 실험모델을 나타낸다. 편의상 원통대신 직육면체의 관을 벽의 상단에 부착했다. 수치해석을 통해서 2장에서 언급한 주요요건이 최적화되고 효율적으로 소리에너지의 흐름을 차단할 수 있는 오차센서와 제 2 음원의 위치를 결정한다면 원거리음장 영역까지 감쇠효과가 향상되는 것을 확인하였다. 매 측정에서는 하나의 제 2음원(SS)과 하나의 오차센서(SS)가 사용되었고 직육면체의 세 면의 음압을 돌아가며 제어, 측정했기 때문에 총 9 가지의 측정경우가 존재한다. 입사하는 제 1 음원은 250 Hz 에서 2 kHz 사이의 sine 파를 사용하였고 신호의 능동 제어는 수동으로 이루어졌다. 그림 9 는 그림 8 의 에러센서 3 번과 제 2 음원 1 번이 사용된 경우의 수음위치 (mic1~mic5) 에서의 능동제어를 통한 음압레벨 감쇠효과를 나타낸 것이다. 그림 8 의 상단 그래프는 제 1음원이 LS1 인 경우 (그림 7 참조), 하단의 그래프는 LS2 인 경우이다.

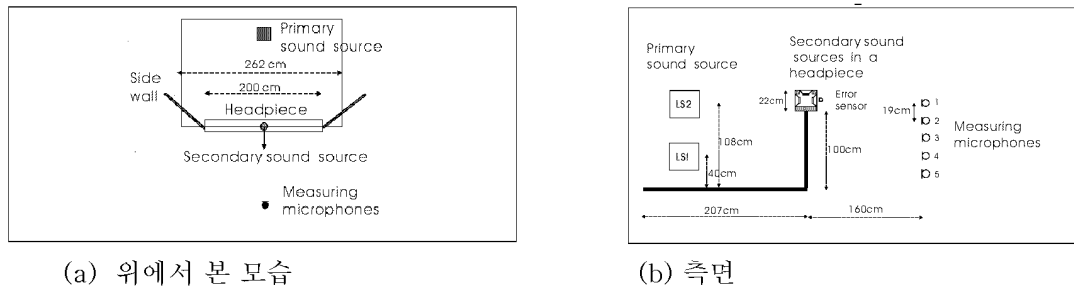


그림 6. 무향실 내에서의 모델실험 장치

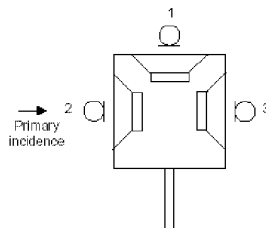


그림 7. 에러센서와 제 2음원의 위치

5. 결론

음원과 측정위치사이에 위치한 벽의 위 모서리 부분의 임피던스는 벽으로 인한 그늘 영역 형성에 핵심적인 역할을 한다는 사실을 다시 확인할 수 있었다.

모서리 표면의 임피던스의 능동제어를 통해서 회절 현상으로 인해 원통의 표면에 접해서 타고 넘어오는 소리 에너지의 세기 (intensity) 는 전향, 차단, 저감된다.

단단한 표면의 모서리 영역의 임피던스를 능동제어함을 통해서 비교적 넓은 주파수 영역에 걸쳐서 감쇠효과를 높일 수 있었으며 모서리 혹은 벽에 근접한 영역 뿐 아니라 원거리 음장에서 도 이를 통한 높은 음장감쇠율을 확인할 수 있었다.

능동제어를 이용하여 모서리 영역 표면의 음압을 최소화할 경우 넓은 영역의 표면의 음압을 선택해야 하거나 여러 개의 음원을 사용하지 않아도 표면상에서 적합한 제어 위치와 그 밖의 요구되는 요소들을 맞추어 준다면 적은 규모의 간단한 control system 으로 passive 수단에 비해 효과적인 그늘 영역을 형성시킬 수 있으며 실제크기의 방음벽과 상단장치를 고려해 볼 때에 저주파수 영역에서도 높은 효과를 기대할 수 있다고 본다.

실제 방음벽의 1/2 축소모델을 통해 이상적인 조건하에서 계산한, 음장 레벨 감소에 중요한 요소들의 영향들이 실제로 측정을 통해서도 나타난다는 것을 확인했고, 모델실험 조건하에서 음장의 능동제어에 미치는 요소들을 확인할 수 있었다.

방음벽을 통한 수동적인 방법에 대한 이 능동제어 기술의 장점은 철도연변소음과 같이 음원의 높기와 특성이 비교적 복잡한 경우 음장을 감쇠하고자 하는 주파수 영역과 형성하고자 하는 그늘영역의 위치에 따라서 방음벽을 통한 음장감쇠효과를 조절할 수 있다는 것이다.

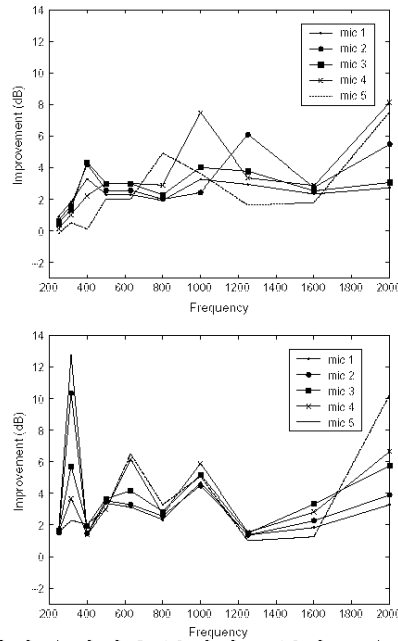


그림 8. 상단모서리의 음장의 능동제어를 통한 소음저감 효과의 향상 (모델실험)

참고문헌

1. Moeser, M., The Effect of Cylinders Attached to Acoustic Screens, *Acustica* 81, 565-586 (1995)
2. Moeser, M., Volz, R., Improvement of sound barriers using headpieces with finite acoustic impedance, *J.Acoust.Soc.Am.* 106(6), S.3049-3060 (1999)
3. Koh, H., 2004, Aktiv verbesserte Aufsätze für Schallschutzwände, PhD Thesis
4. Koh, H., Möser, M., 2004, Efficiency of Actively Controlled Surface Impedance of Headpieces Attached to Noise Barriers, 'Building Acoustics', Vol.11, Nr. 2, pp.115-131