

능동제어를 통한 방음벽 상단 모서리의 음향임피던스의 효과

고효인, Michael Möser
한국철도기술연구원, 베를린 공대

Effects of actively controlled surface impedance of top edge of noise barriers

Koh Hyo In, Michael Möser
Korea Railroad Research Institute, hikoh@krii.re.kr
Technical University Berlin, m.moesser@tu-berlin.de

요약

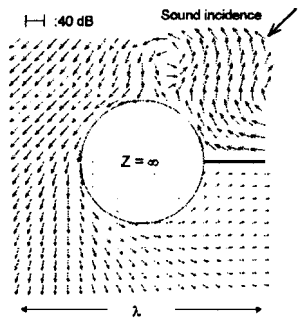
방음벽의 상단모서리는 방음벽의 차음효과를 저하시키는 또 다른 허상음원으로 작용하며 이 현상은 저주파수 영역일수록 두드러지게 나타난다. 이 논문에서는 능동소음제어장치를 통해서 상단 모서리 표면의 음장을 최소화함으로써 표면임피던스의 변화를 통한 상단모서리 주변의 소리에너지의 역학과 원거리 음장에서의 효과를 고찰한다. 능동제어장치를 함유하는 상단모서리를 수학적으로 모델화하여 음장의 분포와 소리의 세기, 능동제어 효과에 영향을 미치는 조건들을 검토하였다. 수치해석적 연구를 통하여서 효과적으로 방음벽의 차음효과를 높이는 최적의 조건을 제시하였다.

1. 서론

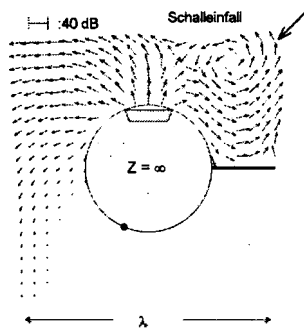
반무한평면의 모서리에서의 소리의 회절에 관한 연구를 통해서 음향학적으로 소프트 ($Z \rightarrow 0$) 한 모서리 영역이 소리의 에너지를 흡수하는 경우보다 높은 감쇄효과를 가져올 수 있다는 결론을 얻었다.[1] 이러한 소프트한 표면을 실현시키기에 적합한 방법은 한 예로 공간성 흡음장치를 모서리 상단에 부착하는

방법으로 공간주파수 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 공간기의 규모가 커지기 때문에 방음벽인 경우 높이를 높이는 것이 더 효율적일 수 있다. 이러한 이론적, 현실적 배경에서 저주파수 영역에 유리하게 이용되는 능동소음제어의 원리를 도입하여 가장 효율적으로 상단의 모서리의 음향임피던스를 최소화하여 소리 에너지의 전달을 차단하는 연구를 하였으며 방음벽에 도입된 능동소음제어에 관한 지금까지의 타 연구들 (예. [5][6]) 과 비교해서 특별한 점이라면 여러 가지 관련 파라미터에 대해서 해석적으로 음장의 역학을 예측하고 설명하기에 매우 용이하면서도 실제로 적용, 시공에 효율적인 수학적 모델을 확립하여 원리적이면서 실제적인 연구가 가능하다는 것이다. 그림 1)에 서로 다른

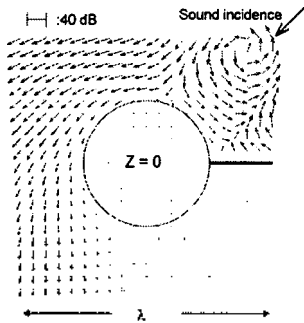
음향임피던스로 인한 원통주변의 소리 에너지의 흐름을



(a)



(b)



(c)

그림 1. 소리의 세기; 단단한 표면 (a), 능동제어 ($\varphi_m = 247.5^\circ$, $\varphi_M = 90^\circ$) (b), $Z=0$ (c)

을 나타내었다. 능동제어를 통해서 형성된 음장은 제 1 차음장과 합쳐지며 단단한 표면을 타고 넘어오는 소리의 흐름을 차단, 저감한다 (그림 2)(b)). 단 하나의 지점 (φ_m)의 임피던스를 최소화 시켰는데도 20 dB 에서 35 dB 에 가까운 감쇄율을 나타내는 것을 볼 수 있다.

2. 모델

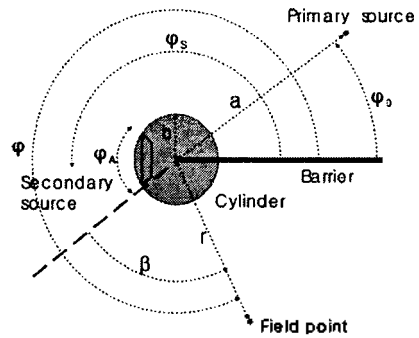


그림 2). 반무한 평면 상단의 음장 능동제어에 관한 모델

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

모델로서는 단단한 ($Z \rightarrow \infty$) 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 임의로 결정할 수 있다. 제 1 음원은 평면에 대해 φ_0 의 각도로 a 의 거리로부터 입사하는 무지향성의 선음원을 선택했고 계산에서는 원통으로부터의 거리 a 가 충분히 멀기 때문에 ($a \gg \lambda$), ($a \gg r$) 평면파가 입사하는 것으로 간주한다. 따라서 전 계산은 이차원에서만 이루어졌다. β 는 회절각으로서 능동제어에 의한 그늘 영역의 음장 계산에 사용된다. 원통표면의 음향학적 특성은 음향임피던스

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

에 의해서 결정되며 계산 초기 조건으로서는 임피던스가 원통의 둘레를 따라서 일정하다고 가정한다 ($\partial Z / \partial \varphi = 0$). 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 2 음장에 의해 형성되는 p_{sec} 의 영향을 모두 합산해서 계산한다:

$$p(r, \varphi)_{tot} = p_{screen}(r, \varphi) + p_{cylinder}(r, \varphi) + \sum_{j=1}^J p_{sec,j}(r, \varphi) \cdot \alpha_j \quad (2)$$

α 는 각각의 제 2 음원에 해당하는 진폭과 위상에 관한 정보를 포함한다. 제 2 음장을 결정하는 제 2 음원의 위상과 진폭 α 는 다음과 같이 원통 표면상의 특정한 지점에서의 음압절대값의 제곱의 합이 최소가 되도록 결정한다:

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

φ_m 은 음압을 최소화하는 원통표면의 각 지점과 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 2 음원의 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. 제 2 차음원과 센서의 위치

그림 3) 에서 보여주듯이 능동음압제어를 통해서 효과를 보기 위해서 선택할 수 있는 음원의 위치와 최소화점의 위치는 한정되어 있다. 소리의 입사각이 45° 도인 경우 음원의 중심이 벽과 이루는 각도가 180° 이하인 경우에 음압레벨의 감소가 이루어지며 이 음원이 점점 그늘 영역쪽으로 접근할 수록 선택할 수 있는 최소화점의 범위도 줄어드는 것을 볼 수 있다.

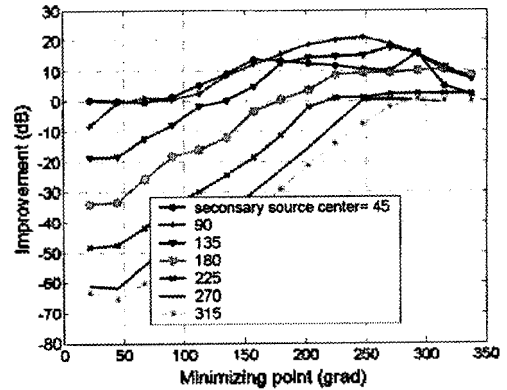


그림 3). 센서와 2 차음원의 위치에 따른 원거리 음장에서의 음압레벨감쇄효과 ($b/\lambda = 0.1 \sim 1.6$, $\beta = 10^\circ \sim 80^\circ$ 의 평균값, $\varphi_0 = 45^\circ$)

가장 음압레벨 감쇄율이 높은 결과를 초래하는 위치는 입사각에 따라서 조금씩 다르지만 위치에 따른 음압레벨 감쇄율에 관한 전체적인 경향은 소리의 입사각에 따라서 크게 변하지 않는다. 결론적으로 음원은 소리가 입사하는 방향으로 소리를 방사하도록 위치시켜야 하고, 반대편(벽의 후면) 지점의 음압을 0 으로 제어해야 이를 통해서 원통표면에 직접 접한 영역에 소리에너지가 전달되지 않을 뿐 아니라 총체적인 원통주변의 음장도 최소화된다. 그림 4)는 센서와 제 2 차음원의 위치가 그림 2)와 동일한 경우이며 다양한 $b/\lambda (= 0.1 \sim 1.6)$ 에 대한 원거리 음장에서의 능동제어를 통한 감쇄효과를 계산하였다.

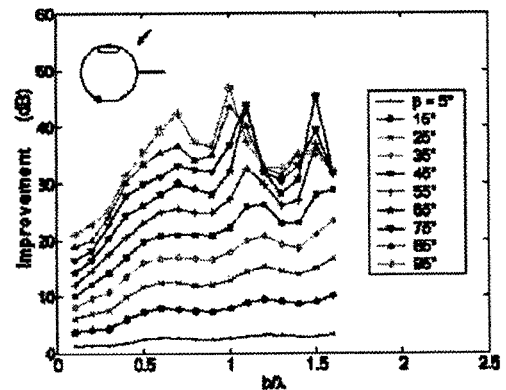


그림 4). 능동음압제어를 통한 원거리 음장에서의 음압

레벨 감쇄효과 ($\varphi_m = 247.5^\circ$, $\varphi_M = 90^\circ$, $\varphi_0 = 45^\circ$)

회절각 $\beta \geq 45^\circ$ 인 영역에서는 전 주파수 영역에서 10 dB 이상의 효과를 나타낼 수 있다.

4. 제 2차 음원의 크기

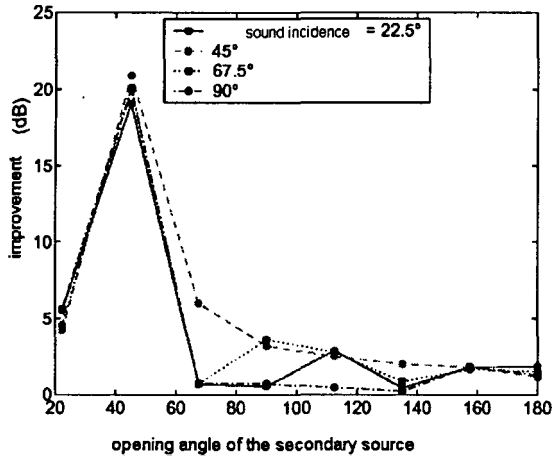


그림 5). 제 2차음원의 크기 (φ_A) 에 따른 원거리음장에서 음압레벨감쇄효과 ($b/\lambda = 0.1 \sim 1.6$, $\beta = 10^\circ \sim 80^\circ$ 의 평균값)

2장에서 언급했듯이 φ_A 의 크기에 따른 제 2차음원으로 인한 원통표면에서의 음압의 분포형태가 달라지므로 원통표면의 일부를 통해서 방사되는 제 2차음원의 방사출구의 크기 φ_A 도 능동음압제어의 효과에 영향을 준다. 제 2 차음원은 무한평면과 원통에 의해서 원통표면상의 특정위치에 야기되는 음압을 최소화해야 한다. 그림 5)에서도 볼 수 있듯이 소리의 입사각에 무관하게 $\varphi_A = 45^\circ$ 인 제 2음원을 통해서 능동음압제어 효과가 가장 크게 나타날 수 있음을 확인할 수 있다. 그림 5)에서의 각각의 소리 입사각에 대한 음압레벨감쇄효과 (Improvement) 는 각각의 오차센서와 제 2음원의 최적의 위치를 선택한 조건하에서 계산한 값들이다.

결론

벽의 상단모서리의 임피던스는 벽으로 인한 그늘 영역 형성에 핵심적인 역할을 한다. 단단한 표면의 모서리 영역의 임피던스를 능동제어함을 통해서 넓은 주파수

영역에 걸쳐서 벽의 근처 뿐 아니라 원거리 음장에서도 이를 통한 높은 음장감쇄율을 확인할 수 있었다.

표면 임피던스의 능동제어를 통해서 회절 현상으로 인해 원통의 표면에 접해서 타고 넘어오는 소리 에너지의 세기 (intensity) 는 전향, 저감된다. 능동제어를 이용하여 모서리 영역 표면의 음압을 최소화할 경우 표면상에서 적합한 제어 위치와 그 밖의 요구되는 요소들이 충족된다면 적은 규모의 간단한 제어시스템으로 passive 수단에 비해 효과적인 그늘 영역 형성이 가능하며 저주파수에서도 효과가 높다. 이 논문에 소개된 수치해석적 연구는 무향실내의 모델실험을 통해서도 이루어졌으며 그에 의한 결과는 [3][4] 에 수록되어 있다.

참고문헌

1. Möser, M., The Effect of Cylinders Attached to Acoustic Screens, *Acustica* 81, 565-586 (1995)
2. Möser, M., Volz, R., Improvement of sound barriers using headpieces with finite acoustic impedance, *J.Acoust.Soc.Am.* 106(6), S.3049-3060 (1999)
3. H.Koh, Aktiv verbesserte Aufsätze für Schallschutzwände, PhD Thesis (2004)
4. H.Koh, Möser, M., Efficiency of Actively Controlled Surface Impedance of Headpieces Attached to Noise Barriers, *Building Acoustics*, Vol.11, Nr.2, 115-131 (2004)
5. Guo, J., Pan, J., Increasing the insertion loss of noise barrier using an active-control system, *J.Acoust.Soc.Am.* 104(6), 3408-3416 (1998)
6. Ohnishi, K., Nishimura, M., Uesaka, K., Ohnishi, H., Development of the Noise Barrier using Active Controlled Acoustic Soft Edge-Part 2:Coexist with Active and Passive Performance-, *Proc. of the 1000 Spring Meeting of the Acoustical Society of Japan*, 693-694 (1993)