한국소음진동공학회 2004년도 추계학술대회논문집, pp. 482~485.

방음벽 상단 소음의 회절에 관한 능동제어

Actively controlled sound field of upper sections attached to noise barriers

고효인*·Michael Möser**
Hyoin Koh, Michael Möser

Key Words : Active noise control(능동소음제어), Noise barrier(방음벽)

ABSTRACT

On the basis of theoretical studies on the effect of the cylinders attached to semi-infinite screens, the tangential sound power-transport parallel to the surface of the attached cylinder is minimized by means of a secondary sound field, which is generated from a part of the attached cylinder. The numerical study shows the possibility of deflecting the incident sound by minimizing the acoustic surface impedance of the upper sections. The acoustical shadow region was more pronounced in both near- and far-field compared to the passive case with rigid surface, i.e. without active control. For a relatively wide frequency range it was possible to enhance shielding effects only with few secondary sources and error microphones. In this paper effects of some control parameters on the actively controlled sound field near the top edge of noise barriers are studied. Results of numerical study and model measurements are shown and discussed.

1. 서 론

방음벽에 능동제어기술을 도입하는 연구의 주요 대상은 소음원과 센서의 위치, 지면에 의한 효과, 능동제어 알고리즘등이다. 크게는 방음벽 상단의 음장을 집중적으로 제어하는 기술과 방음벽 전면이나 후면의 음장을 제어하는 기술에 관한 연구로 나눌 수 있다. 후자의 경우 오차센서가 위치해 있는 영역의 음장은 큰 감쇄효과를 보이나 그 이외의, 오차센서로부터 거리가 떨어진 영역에서는 오히려 소음레벨이 증가하는 것으로 발표되었고 실제로 철로나 도로변의 방음벽을 타고 넘어가는 소리의 파워를 제어하기 위해서 방음벽과 주거지역 사이 혹은 도로상에 제 2 음원을 설치하는 것은 현실적으로 어려운 일이기도 하다. 반면 전자의 경우에는 방음벽에서 거리가 떨어져 있는 지역의 음장은 방음벽 상단의 음압분포에 의해서 좌우된다는 결론들이 발표되었다. 이러한 맥락에서 방음벽의 상단 모서리 영역의 음압을 효과적으로 최소화하기 위한 제 2 음원의 위치와 센서간의 간격에 관한 연구들이 이루어졌다[1~3]. 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 2 음원을 이용하여 원통표면의 음압을 가장 효율적으로 최소화하기 위한 제어조건을 검토하고 그에 따른 결과들을 분석하였다.

* 한국철도기술연구원
E-mail : hikoh@krri.re.kr
Tel : (031) 460-5207, Fax : (031) 460-5279

** Institute of Technical Acoustics, Technical University Berlin,

2. 계산모델

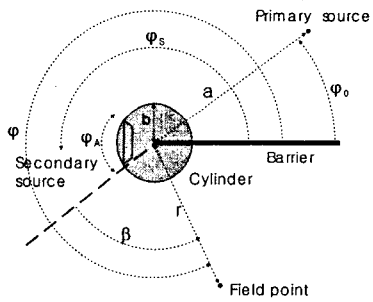


그림 1 반무한 평면 상단의 음장 능동제어에 관한 모델
φ_0: 소리의 입사각도
a : 원통의 중심과 음원 사이의 거리
b : 원통의 반지름
φ_S: 제 2 음원의 중심과 평면의 사이각도
φ_A: 제 2 음원의 중심각도
φ : 관찰점과 평면의 사이각도
r : 원통의 중심과 관찰점 사이의 거리
β : 회절각도

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

선 음원을 선택했고 계산에서는 원통으로부터의 거리 a 가 충분히 멀기 때문에 (a >> λ), (a >> r) 평면파가 입사하는 것으로 간주한다. 따라서 전 계산은 이차원에서만 이루어졌다. β 는 회절각으로서 능동제어에 의한 그늘 영역의 음장 계산에 사용된다.

3. 원통표면 음장의 능동제어

3.1 음장계산

원통표면의 음향학적 특성은 임피던스 Z

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

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 $p_{cylinder}$ 그리고 제 2 음장에 의해 형성되는 p_{sec} 의 영향을 모두 합산해서 계산한다: α 는 각각의

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

제 2 음원에 해당하는 진폭과 위상에 관한 정보를 포함한다. 식 (2)의 각 항의 유도는 Möser[1] 와 저자의 논문 [5]에 상세히 기술되어 있다.

3.2 표면임피던스의 최소화

제 2 음장을 결정하는 제 2 음원의 위상과 진폭 (α) 은 다음과 같이 원통 표면상의 특정한 지점에서의 (전체)음압 절대값의 제곱의 합이 최소가 되도록 결정한다:

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

φ_m 은 음압을 최소화하는 원통의 표면의 각 지점과 평면의 사이각이다.

3.3 효과적인 표면임피던스 최소화의 요건

이 논문의 능동제어를 통한 방음벽 상단의 음압의 최소화의 목적은 상단 모서리의 표면에 접해서 방음벽 후면으로 타고 넘어가는 소리 파워의 차단을 통한 원거리 음장의 감소이다, 식 (2)와 (3)을 통해서 효율적인 원거리 음장의 감소를 위한 주요 요소들의 조건을 찾아낼 수 있다. 제 2 음원의 크기, 제 2 음원의 위치와 음압을 최소화하는 지점, 즉 오차센서의 위치, 원통의 크기와 소리의 파장의 비, b/λ, 등이 음장의 변화를 좌우하는 요소들이다.

3.4 능동제어를 통한 표면음압의 최소화 효과

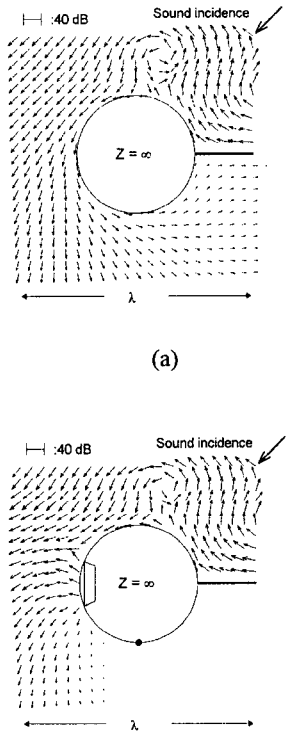


그림 2 모서리 영역의 소리의 세기; 단단한 표면 (a), 능동제어 ($\varphi_m = 270°$, $\varphi_M = 180°$)(b)

그림 2 는 음향임피던스 (Z) 가 무한대인 단단한 표면의 모서리 영역과 능동제어를 통해서 표면상의 한 점에서의 임피던스를 최소화 (Z = 0) 한 영역에서의 소리 에너지 흐름을 관찰함으로써 Z = 0 인 표면의 효과를 보여준다. 이렇게 형성된 제 2 음장은 제 1 음장과 합쳐지며 단단한 표면 ($Z \rightarrow \infty$) 을 타고 넘어오는 소리의 세기의 흐름 (그림 2(a))을 전향해서 그늘 영역으로 넘어오지 못하게 하는 역할을 한다. 단 하나의 지점의 임피던스를 최소화 시켰는데도 20 dB 이상의 감쇄 효과를 볼 수 있다. 이렇게 표면에 근접해서 발생하는 역학적 현상과 에너지 흐름이 벽 뒷면의 먼거리 음장 (r >>

b, r >> λ) 에 어떤 영향을 미치는지를 그림 3 이 나타낸다. b 는 원통의 반지름이고 각 값은

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

으로서 단단한 표면의 음장을 능동제어한 경우와 능동제어를 하지 않은 경우에 있어서의 벽 후면의 먼거리 음장레벨의 차이를 회절각 β = 5° ~ 85° (10° 간격) 에서 계산하여 b/λ 에 대해서 나타낸 것이다.

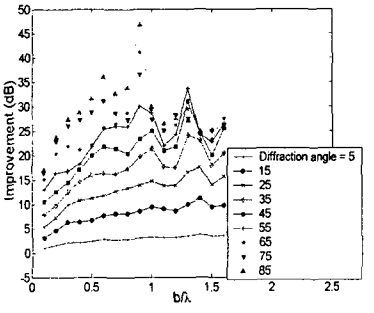


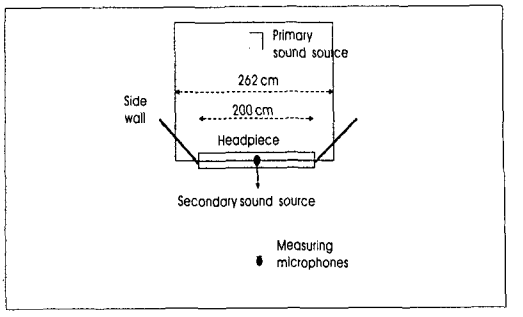
그림 3 원거리 음장에서의 능동제어를 통한 음압레벨의 감쇄효과
($\varphi_m = 270°$, $\varphi_M = 90°$, $\varphi_0 = 90°$, $\varphi_A = 45°$)

이 경우 전체적으로 대략 b/ λ = 0.9 까지 감쇄효과가 증가함을 볼 수 있으며 회절각이 45° 보다 큰 영역에서는 전 주파수 영역에 걸쳐 감쇄효과가 10 dB 이상임을 알 수 있다.

4 장 모델실험

4.1 측정장치

그림 4 는 무향실내의 실험모델을 나타낸다. 편의상 원통대신 직육면체의 관을 벽의 상단에 부착했다. (정상파 음장이 형성되는 것을 방지하기 위해) 내부에는 흡음재를 부착했다. 그림에서 보이는 바와 같이 세 면의 내부에 제 2 음원들이 삽입되어있다.



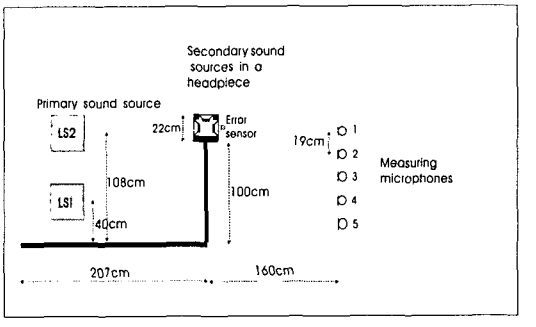
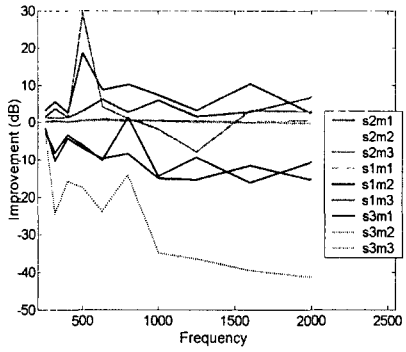


그림 4 무향실내의 모델실험장치

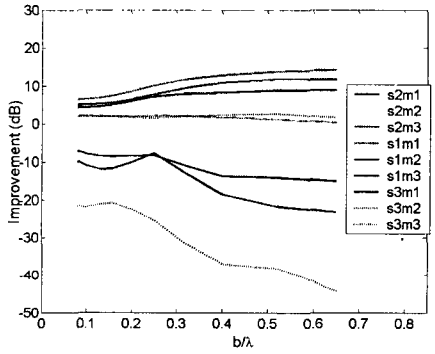
무향실 내부의 망 위에 측정장치가 설치되어서 바닥을 통해서 넘어오는 소리의 영향을 막기 위해 음원 쪽에는 chip board 판을 깔았다. 2 차원의 모델을 이용해서 계산했으므로 측정도 음원이 있는 직선상에서만 이루어졌다. 매 측정에서는 하나의 SS (제 2 음원) 과 하나의 ES (오차센서) 가 사용되었고 직육면체의 세 면의 음압을 돌아가며 제어, 측정했기 때문에 총 9 가지의 측정경우가 존재한다.

4.2 센서와 제 2 음원의 위치에 따른 능동제어의 효과

여러가지 파라메터 중 SS 와 ES 의 위치에 따른 음장감쇄효과를 그림 5 에 나타내었으며 그림 1 의 계산모델을 이용하여 실험조건에 상응하는 위치와 주파수영역을 선택하여 계산, 측정결과와 비교하여 놓았다. (a)는 능동제어 없이 측정마이크 4 에서 측정한 음압레벨과 능동제어를 한 상태에서 측정한 음압레벨의 차이다. 제 1 음원은 직각으로 입사하는 LS2 이고(그림 4 참조) (b)는 원거리 음장에서 mic 4 에 해당하는 회절각과 같은 입사각을 대입해서 계산한 감쇄효과이다.



(a)



(b)

그림 5 SS 와 ES 의 위치에 따른 모델실험 결과 (a) 와 계산결과 (b)

일단 음원이 벽의 앞쪽으로 향하고 에러 마이크가 벽 뒷면 즉 그늘영역 방면에 위치한 경우에는 20 dB 에 이르는 양의 감쇄효과를 볼 수 있고 그 경향은 양 그래프 모두에서 알아볼 수 있다. 모델실험에서는 벽 앞면의 바닥에 판이 깔려 있었고 양쪽 측벽이 존재했던 관계로 반사로 인해 생긴 음장의 변화로 각 주파수에서의 값이 계산값과 다르고 다른 추가적인 측정으로 인해 밝혀진 것이지만 에러 마이크의 설치 방향에 따라서도 결과가 좌우된다, 특별히 특정 주파수에서는 SS 와 ES 사이의 거리가 비교적 떨어져 있는 경우 측정위치에서는 효과적인 음파의 간섭이 일어나지 않고 오히려 음압이 증가한 경우도 관찰할 수 있었다. SS 상에서의 음압을 최소화하는 경우는 효과가 미세하고 주파수가 높아짐에 따라서 효과가 적어지는 경향이 있고, 이것은 계산값과 경향이 같다. 반대로 음원들이 그늘영역 방면으로 방사하거나 소리가 입사하는 방향의 음압을 최소화 했을 경우에는 계산에서 예상했던 것처럼 음압레벨이 오히려 증가하는 것을 실험에서도 확인할 수 있었다

5 장 결론

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

2. 단단한 표면의 모서리 영역의 임피던스를 능동제어함을 통해서 넓은 주파수 영역에 걸쳐서 감쇄효과를 높일 수 있었으며 벽의 근처 영역 뿐 아니라 원거리 음장에서도 이를 통한 높은 음장감쇄율을 확인할 수 있었다.

3. 표면 임피던스의 능동제어를 통해서 회절 현상으로 인해 원통의 표면에 접해서 타고 넘어오는 소리 에너지의 세기 (intensity) 는 전향, 차단된다.

4. 능동제어를 이용하여 모서리 영역 표면의 음압을 최소화할 경우 많은 부분의 영역의 음압을 선택해야 하거나 여러 개의 음원을 사용할 필요가 없으며 표면상에서 적합한 제어 위치와 그 밖의 요구되는 요소들을 맞춰준다면 적은 규모의 간단한 control system 으로 passive 수단에 비해 효과적인 그늘 영역을 형성시킬 수 있으며 효과있는 주파수 대역이 넓고, 저주파수에서도 효과가 높다.

5. 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.

참고문헌

(1) Möser, M., 1995, The Effect of Cylinders Attached to Acoustic Screens, Acustica 81, 565-586

(2) Omoto, A., Fujiwara, K., 1993, A study of an actively controlled noise barrier, J.Acoust.Soc.Am 94(4), 2173-2180

(3) Guo, J., Pan, J., 1998, Increasing the insertion loss of noise barrier using an active-controlsystem, J.Acoust.Soc.Am. 104(6), 3408-3416

(4) Ohnishi, K., Nishimura, M., Uesaka, K., Ohnishi, H., 1993, 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

(5) H.Koh, 2004, Aktiv verbesserte Aufsätze für Schallschutzwände, PhD Thesis