

경계요소법을 이용한 간섭형 방음벽의 설계

Design of Interference Type Noise Barrier Using the BEM

이 상 권[†] · 이 승 영^{*}

Sang Kwon Lee and Seung Young Lee

(2003년 1월 9일 접수 : 2003년 7월 29일 심사완료)

Key Words : Noise Barrier (방음벽), Interference (간섭), Boundary Element Method (경계요소법), Insertion Loss (삽입손실)

ABSTRACT

This paper investigates the insertion loss of noise barrier with a interference device. The efficiency of the conventional interference-type noise barrier depends on specific frequency. Thus this study is performed to improve the efficiency of the noise barrier in the range of broadband frequency, by changing the shape of interference device and adding the channel with various depths. The boundary element method (BEM) is used to predict the insertion loss of noise barrier. Two-dimensional boundary element model is created to simulate the performance of long barrier with a line source.

1. 서론

우리의 주변에는 다양한 소음이 있으나 교통량의 증가와 주행속도의 상승에 따른 도로교통 소음의 증가로 인한 도로 주변 가옥의 소음환경을 보전하는 것이 중요한 환경 문제로써 대두되고 있는 실정이다. 이러한 교통소음을 줄이는 방법으로 소음 발생 원인의 제거, 완화 또는 소음의 전달 경로의 차단, 소음 에너지의 소거 등 다양한 대처 방안이 연구되고 있다. 이러한 다수의 능동적, 수동적 대처 방안 중 가장 경제적이고 효과적인 방안은 방음벽을 이용한 도로 소음의 차단이다.

방음벽의 높이를 증가시키면 방음벽 뒤쪽의 소음을 감소시킬 수 있다. 하지만 방음벽을 높이면 주변가옥에 대한 경관이 무시되고 일조권을 방해하는 등 새로운 문제를 야기시킬 수 있다. 따라서 최근에는 방음

벽의 상단부에 T-형상^(1, 2)이나 원통형의 간섭장치⁽³⁾를 설치하여 방음벽 상단부에서 회절음을 소멸간섭을 통해 줄임으로써 방음벽의 높이를 증가시키지 않고도 같은 높이의 다른 방음벽보다 높은 소음 저감 효과를 얻으려는 방법이 시도 되고 있다. 또 방음벽은 상단부의 형상에 따라 소음 저감 효과가 달라진다고 알려져 있다. 기존의 방음벽의 소음 저감 효과는 실험과 기하음향학 이론에 의해서 예측되어왔다. 하지만 최근의 구조해석 기법의 괄목할만한 발전과 강력한 계산능력을 가진 컴퓨터의 진화에 따라 경계요소법(BEM)을 이용한 방음벽의 성능예측이 활발하게 진행중이다.⁽⁴⁻⁶⁾

본 연구에서는 다양한 형상의 간섭장치를 설치한 방음벽을 이차원 경계요소법에 의해 음장계산을 실시하여 기존의 간섭형 방음벽을 검토하고 보다 효과적인 간섭장치를 설계하고자 한다. 이차원 경계요소법의 타당성을 검증하기 위해 모형실험을 통해 비교하였다.

[†] 책임저자, 정회원, 인하대학교 기계공학과
E-mail : sangkwon@inha.ac.kr
Tel : (032) 860-7305, Fax : (032) 868-1716

^{*} 인하대학교 대학원 기계공학과

2. BEM계산과 실험의 비교

2.1 경계요소법의 계산 모델

모형실험과 수치 계산의 비교를 목적으로 축적 모형과 같은 크기의 방음벽에 의한 소음 저감 효과에 대하여 경계요소법을 사용하여 음장계산을 실시하였다.

이 논문에서 경계요소법으로 방음벽의 성능을 예측하기 위한 계산모델이 Fig.1과 같이 설정되어 있다. 이차원 경계요소법의 사용을 위해 방음벽은 무한한 길이를 가지고 있고 단면 모양과 음향학적인 특성이 방음벽의 길이를 따라 변하지 않으며 교통소음은 방음벽과 지면에 평행한 선음원으로 가정하였다.

이러한 이차원 모델⁽⁷⁾의 수음점 r에서 음압을 구하기 위해서 음압 p(r, r₀)은 식 (1)의 경계적분방정식을 만족해야 한다.^(7,8)

$$\varepsilon(r)p(r, r_0) = G(r, r_0) + \int_S \left(\frac{\partial G(r_s, r)}{\partial n(r_s)} - ik\beta(r_s)G(r_s, r) \right) \times p(r_s, r) ds(r_s) \quad (1)$$

식 (1)에서 r₀=(x₀, y₀)는 음원의 위치, p(r, r₀)는 수음점 r=(x, y)에서의 음압을 β(r_s)는 방음벽 표면의 경계면(S)상의 r_s=(x_s, y_s)에서의 정상화된 표면 어드미턴스(admittance)를 나타내고 ds(r_s)는 방음벽 표면 S의 r_s에서 요소의 호의 길이, ∂/∂n(r_s)는 r_s에서 법선방향의 미분을 나타내고 k는 파수(wave number)를 의미한다. ε(r)는 수음점 r이 방음벽 경계면(S)에 위치했을 때는 1/2값을 갖고 경계면을 제외한 전파매질에 위치하였을 때는 1의 값을 갖는다.

자유음장 그린함수(Green's function) G(r, r₀)는 방에서의 음압으로 식 (2)과 같다.

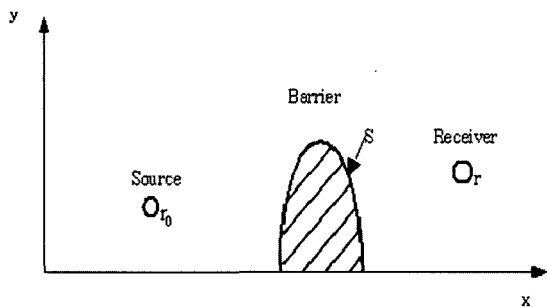


Fig. 1 Two dimensional model

$$G(r, r_0) = -\frac{i}{4} H_0^{(2)}(kR) \quad \text{for 2-D : } R = |r - r_0| \quad (2)$$

$$H_0^{(2)}(kR) \approx -\frac{2}{\pi} \ln kR + 1 - i\frac{2}{\pi}(\gamma - \ln 2) + \dots \quad (3)$$

여기서 H₀⁽²⁾는 0차수의 제 2종 Hankle함수를 의미하고 γ는 Euler 상수이다. 식 (1)의 경계적분방정식을 계산하기 위해 방음벽의 표면 S를 N개의 경계요소로 나누었으며 각 요소에서 음압 p(r, r₀)이 일정하고 p(r, r₀) ≈ p(r_n, r₀)이라고 가정하면 식 (1)은 식 (4)과 같이 표현 되어진다. r_n은 요소 S_n의 중심점이다.

$$\varepsilon(r)p(r, r_0) = G(r, r_0) + \sum_{n=1}^N p(r_n, r_0) \int_{S_n} \left(\frac{\partial G(r_s, r)}{\partial n(r_s)} - ik\beta(r_s)G(r_s, r) \right) ds(r_s) \quad (4)$$

경계요소법에 사용되는 방음벽을 단단한 강체(rigid)라고 가정하여 모델 경계요소의 어드미턴스를 0으로 하였으며 식 (4)는 다음의 식 (5)와 같이 간단해진다.

$$\varepsilon(r)p(r, r_0) = G(r, r_0) + \sum_{n=1}^N p(r_n, r_0) \int_{S_n} \left(\frac{\partial G(r_s, r)}{\partial n(r_s)} \right) ds(r_s) \quad (5)$$

식 (5)을 계산하면 요소의 중심점 r_n에서의 음압 p(r₁, r₀), p(r₂, r₀) .. p(r_n, r₀)을 구할 수 있고 이런 값들을 계산하면 매질내의 수음점이 r에 있을 때의 음압 p(r, r₀)을 계산하기 위한 공식으로써 식 (5)을 사용할 수 있다.

모델의 크기는 축적 모형실험에서와 동일하게 하였으며 음원과 수음점도 같은 곳에 위치하게 하여 25 Hz 간격으로 20 kHz까지 계산하였다. 일반적으로 요소의 크기는 파장(λ)의 1/6보다 작을 때 가장 작은 오차가 발생되는 것으로 알려져 있다.

하지만 BEM 해석의 정확성을 높이기 위해 요소의 크기를 λ/8 정도로 하였다. 여기서 λ(wavelength)는 해석하고자 하는 가장 높은 주파수의 파장을 말한다.⁽²⁾ 따라서 축적 모형실험과 비교하기 위해 사용된 경계요소 모델의 요소크기는 2 cm로 하여 20 kHz까지 계산할 수 있게 하였다. 본 논문에서의 모든

BEM계산은 상용화된 프로그램인 SYSNOISE 5.4를 사용하였다.

2.2 1/10 축적 모형실험

축적 모형실험은 3.2m×3.2m×3.5m 크기의 무향실에서 실행되었으며, 반사지면을 만들기 위해 무향실 바닥에는 두께 11.5cm의 베니어 합판을 깔았다. 측정을 위해 사용된 음원으로는 무지향성의 점음원을 만들기 위해 직경이 2cm인 혼 드라이버 유닛(Horn driver unit)에 플라스틱 관을 접착하여 사용하였고⁽⁹⁾ 백색잡음을 스피커를 통해 출력하였다. 모형의 축적은 1/10으로 하였으며 축적 모델은 모델 1(높이 40cm, 길이 3m) 과 모델 2(높이 20cm, 길이 3m)의 두 모델을 만들어 축적 모형실험을 수행하였다.

축적 모델을 무향실 바닥에 사용되었던 두께 11.5cm의 베니어 합판을 사용해 만들었다.

본 연구에서 사용되어진 축적 모델실험의 방음벽 실험의 구성도가 Fig. 2 에 도시 되어져 있다. 음원은 바닥으로부터 높이 5.9cm에 방음벽으로부터 거리 0.5m에 위치시켰으며, 수음점은 음원과 반대측에서 방음벽으로부터 0.5m, 1m, 1.5m, 2m 떨어진 지면에 위치시켜 실험을 수행하였다.

2.3 축적 모형의 BEM계산결과와 실험의 비교

축적 모형실험과 경계요소법 계산결과를 삽입손실 IL(insertion loss)을 이용해 비교하였다. IL은 식 (6)와 같이 정의하여 사용한다.

$$IL = \text{SPL without barrier} - \text{SPL with barrier} \quad (6)$$

본 논문에서는 Fig. 3, Fig. 4 과 같이 결과를 분석하기 위해 삽입손실의 스펙트럼을 1/3 옥타브 밴드의 중심주파수로 나타내었다.

축적 모형실험 시 방음벽의 측면에서 회절하는 음

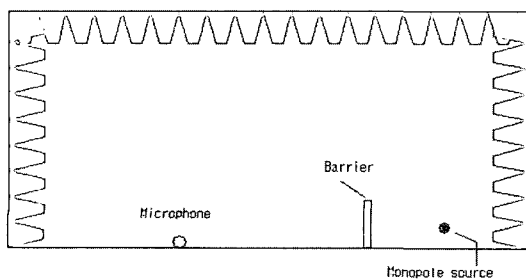


Fig. 2 Experimental set up of 1/10 scale model

의 영향을 알아보기 위해 두개의 모형을 만들었다. Fig. 3의 결과와 같이 높이 40cm인 모델 1은 방음벽의 높이에 비해 길이가 충분히 길지 않기 때문에 방음벽 측면에서 회절하는 음의 영향을 많이 받는다. 따라서 방음벽의 길이가 무한하다고 가정한 2차원 경계요소법의 결과와 많은 차이가 나타났다. 하지만 축적 모형을 모델 2와 같이 높이 20cm로 낮추면 방음벽의 상단을 통해 회절하는 음이 측면에서 회절하는 음보다 상대적으로 커져 Fig. 4의 결과처럼 축적 모형실험과 이차원 경계요소법으로 계산한 결과가 큰 오차가 발생하지 않음을 알 수 있다.

모델 2의 이차원 경계요소법을 이용한 계산과 축적 모형실험의 결과는 고주파수에서 크기는 4.6dB까지의 음압레벨의 차이가 나타나고 있지만 주파수가 6kHz 아래에서의 오차는 2dB 미만이므로 실험과 계산치

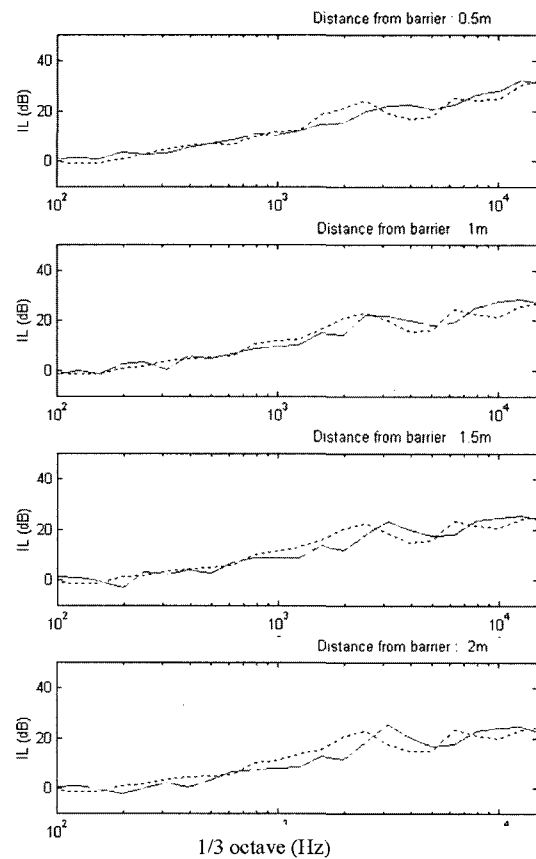


Fig. 3 Insertion loss of scale model 1(height : 0.4 m)
Dotted line : Experimental measurement
Solid line : BEM calculation

비교적 잘 일치한다. 따라서 이차원 경계요소법을 사용한 간섭형 방음벽을 설계하여 소음 저감 효과를 예측하는 것은 신뢰할 수 있다고 보여진다.

3. BEM계산을 통한 소음 저감효과 예측

앞 절에서 모형실험과 경계요소법 계산의 삽입손실을 비교한 결과 방음벽의 소음 저감 효과를 예측할 때 경계요소법이 유용하다는 것을 알았다.

특히, 간섭형 방음벽과 같이 형상이 복잡한 경우 해석적인 방법으로는 결과를 예측하기 힘들고, 실험을 통해 결과를 예측하는 것은 방음벽의 설계에 있어서 비경제적이고 대기의 상태에 따라 결과가 바뀔 수 있어서 방음벽 설계시 성능을 평가하기에는 적합하지 않다.^(7, 10) 따라서 본 연구에서는 경계요소법을 이용

하여 간섭형 방음벽을 설계하였다

간섭형 방음벽을 설계하기 위한 이차원 경계요소 모델을 만들었다. 다양한 형상의 간섭장치를 설치한 방음벽의 높이를 4m로 모두 똑같이 하였으며, T-형상의 간섭장치는 폭이 1.07m이고 원통형의 경우는 직경이 0.64m이다. 방음벽의 두께는 3cm로 하여 경계요소법에서 발생할 수 있는 수학적 곤란을 피하고자 하였다.⁽³⁾

수음점과 음원은 지면에 두어 지면에서 반사되는 음의 영향을 받지 않게 하였다. 음원은 방음벽으로부터 5m에 위치하고 수음점은 방음벽에서 음원 반대 방향으로 20m에 두었다.

3.1 T-형상의 간섭형 방음벽의 검토

2개 이상의 음파가 동시에 존재할 때 두 음파의 상호작용, 즉 두 음파의 마루와 마루가 겹쳐 보강되거나 마루와 골이 겹쳐 소멸되는 현상을 간섭(interference)이라 하며, 이에 의해 새로운 합성음파가 생성된다. 즉, 음압은 보강간섭에 의해 증가되고 소멸간섭에 의해 저감되는데 간섭형 방음벽의 경우 방음벽 상단에 설치된 간섭장치의 채널의 깊이가 $\lambda/4$, $3\lambda/4$ 일 때 파장(λ)에 해당하는 주파수($f=c/\lambda$)에서 소멸간섭이 발생하여 회절음을 줄일 수 있지만 채널이 깊이가 $\lambda/2$, λ 일 때 파장(λ)에 해당하는 주파수에서는 보강간섭으로 인해 음압레벨이 증가한다.

Fig. 5에서는 T-형상의 방음벽에 500 Hz와 1000 Hz에서 소멸간섭이 일어날 수 있도록 17cm와 8.5cm의 깊이를 가진 채널을 방음벽 상부에 만들어 계산하였으며 일반적인 수직 방음벽과 간섭장치를 가진 방음벽의 삽입손실을 1/3 옥타브 밴드의 중심주파수로 비교하였다.

위의 결과에서 일부 저주파 구간을 제외하고 전 주파수 대역에서 간섭장치를 설치한 방음벽의 소음 저감 효과가 뛰어난 것을 보여준다. 그리고 8.5cm의 채널을 설치한 간섭형 방음벽(Type 1)에서는 1kHz에서 가장 큰 삽입손실 값을 얻었으며, 17cm의 채널을 가진 경우(Type 2)에는 소멸간섭의 영향으로 500 Hz ~ 800 Hz 부근에서는 큰 소음 저감 효과를 얻었지만 보강간섭의 영향으로 1kHz 주변에서는 다소 음압레벨이 작아짐을 볼 수 있다.

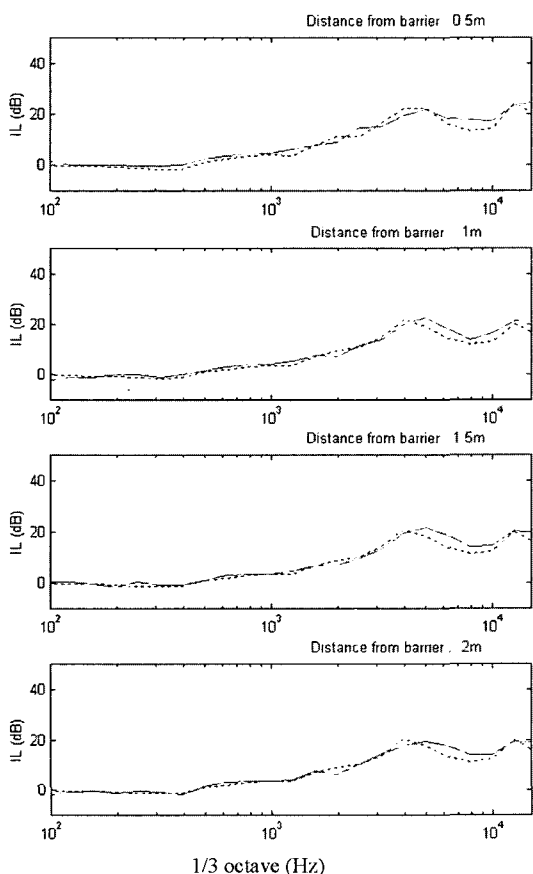


Fig. 4 Insertion loss of scale model 2(height : 0.2 m)

Dotted line : Experimental measurement

Solid line : BEM calculation

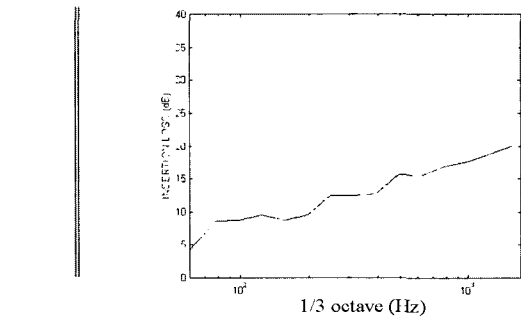
3.2 원통형 간섭형 방음벽의 검토

Fig. 6는 원통형 간섭장치를 가진 방음벽과 수직 방음벽의 삽입손실을 비교한 그림이다. 원통형 간섭 장치의 채널의 깊이는 17cm로 하였다. 원통형 간섭 장치의 경우는 일본의 Fujiwara에 의해 개발되었고 많은 연구가 이루어졌다.⁽³⁻⁴⁾ 위의 결과에서 알 수 있듯이 간섭장치의 형상에 따라 음압레벨의 차이는 있으나 채널의 깊이로 인해 간섭의 효과는 500 Hz 부터 발생한다.

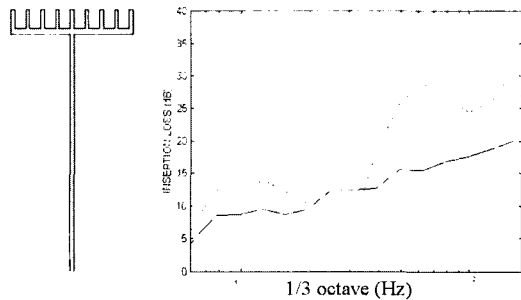
Fujiwara는 Type 3과 같은 원통형 간섭장치를 가진 방음벽을 개발한 후, 연구를 통해 다양한 채널을 추가하였고 간섭장치의 크기를 줄여서 Fig. 7의 결과와 같이 광대역에서 소음을 저감 시킬 수 있는 간섭 장치를 가진 방음벽을 만들었다.⁽³⁾

3.3 새로운 형상의 간섭형 방음벽

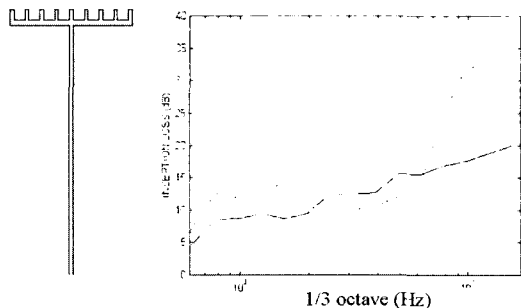
다양한 깊이의 채널을 추가하기에 편리한 T 형상



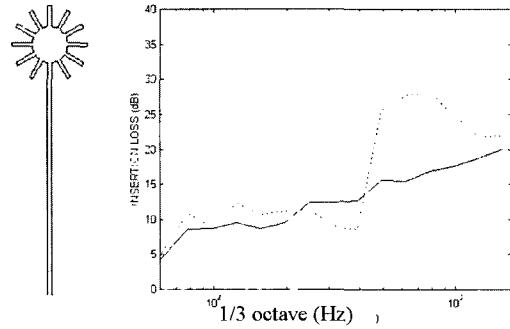
(a) Straight barrier



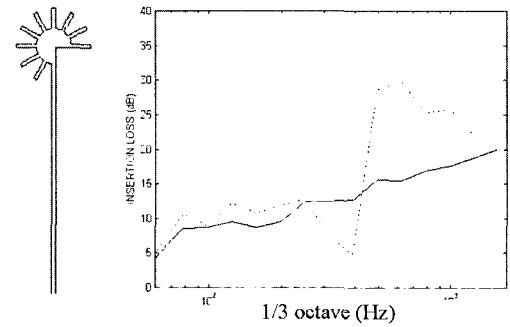
(b) Type 1



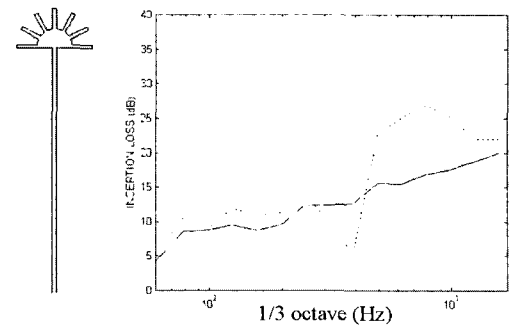
(c) Type 2



(a) Type 3



(b) Type 4



(c) Type 5

Fig. 5 Insertion loss of barrier with T-shaped interference device.
Dotted line : With interference device
Solid line : Without interference device

Fig. 6 Insertion loss of barrier with cylindrical interference device.
Dotted line : With interference device.
Solid line : Without interference device

의 간섭형 방음벽에 8.5 cm 채널과 17 cm 채널을 모두 설치하였다. 앞에서 Type 1이 Type 2에 비해 좋은 결과를 얻었으나 보강간섭의 영향으로 1 kHz에서 소음 저감 효과가 다소 적어졌다. 따라서 8.5 cm의 채널을 추가함으로써 1 kHz에서의 소음 저감 효과를 높이고자 하였다. Fig. 8의 결과는 1 kHz에서 Type 6와 Type 7의 간섭형 방음벽 모두 삽입손실이 5 dB

정도 Type 1보다 효과가 있음을 보여준다. 하지만 여전히 300 Hz 부근의 저주파 대역에서는 소음 저감 효과가 수직 방음벽보다 떨어짐을 알 수 있다.

소멸간섭을 이용하여 300 Hz에서의 삽입손실의 값을 높이기 위해 28.3 cm 길이의 채널을 채널을 추가하기 쉬운 형상을 가진 Type 6에 추가하였다. Fig. 9의 결과는 새로운 형상을 가진 간섭형 방음벽이 삽입손실의 값은 다른 간섭형 방음벽보다 작은 값을 가지

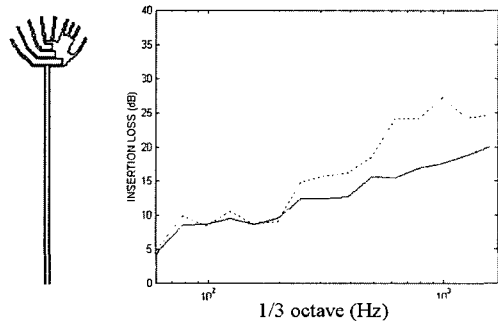


Fig. 7 Insertion loss of interference type barrier developed by Fujiwara.
Dotted line : With interference device
Solid line : Without interference device

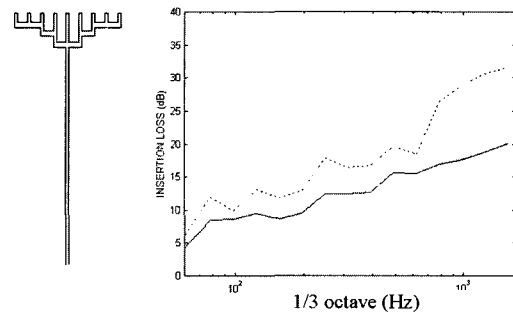
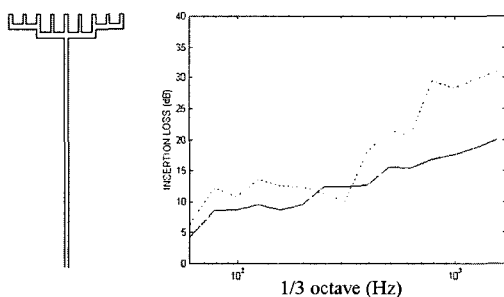
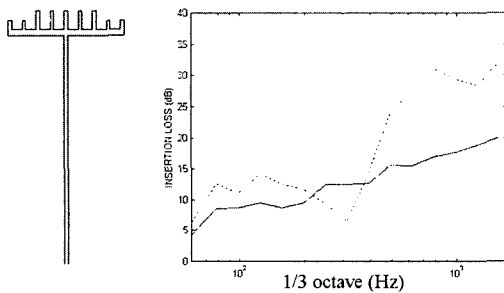


Fig. 9 Insertion loss of interference type barrier with several channel (length 8.5 cm, 17 cm, 28.3 cm)
Dotted line : With interference device
Solid line : Without interference device



(a) Type 6



(b) Type 7

Fig. 8 Insertion loss of interference type barrier with several channel (length 8.5 cm, 17 cm)
Dotted line : With interference device
Solid line : Without interference device

Table 1 Number of boundary elements and nodes associated with several of barrier wall types

Barrier types	Element	Node
Straight barrier wall (Fig. 5)	806	806
Interference barrier wall Type 1 (Fig. 5)	1286	1286
Interference barrier wall Type 2 (Fig. 5)	1160	1160
Interference barrier wall Type 3 (Fig. 6)	1184	1184
Interference barrier wall Type 4 (Fig. 6)	1121	1121
Interference barrier wall Type 5 (Fig. 6)	1058	1058
Fujiwara's Interference barrier wall (Fig. 7)	1211	1211
Interference barrier wall Type 6 (Fig. 8)	1224	1224
Interference barrier wall Type 7 (Fig. 8)	1222	1222
New interference barrier wall (Fig. 9)	1274	1274

는 주파수 대역이 있지만 전 주파수 범위에 걸쳐서 간섭형 방음벽이 수직 방음벽보다 좋은 효과가 있음을 보여준다.

끝으로 다음의 Table 1은 Table 1 방음벽형태에 따른 경계요소수 및 노드수를 나타낸다.

4. 결론

본 논문은 소음 저감 효과가 뛰어난 간섭형 방음벽을 설계하는데 있다. 간섭형 방음벽의 삽입손실을 예측하기 위해 이차원 경계요소법(BEM)을 사용하였으며 실험을 통해 경계요소법의 타당성을 검증했다.

간섭형 방음벽을 설계하기 위해 기존에 연구되었던 T-형상, 원통형의 간섭형 방음벽을 검토하였다. 일정한 깊이를 가진 간섭형 방음벽은 주파수 의존도가 매우 크다. 이는 방음벽 상단부에서 간섭현상이 발생할 때 채널의 깊이에 따라 특정 주파수 대역에서 보강간섭과 소멸간섭이 발생하기 때문이다. 따라서 광대역 주파수에 대한 소음 저감 효과를 높이기 위해 다양한 채널을 추가로 설치하여 새로운 간섭형 방음벽을 설계하였다.

Fig. 7 과 Fig. 9 의 결과를 비교했을 때 이 새로운 간섭형 방음벽이 다른 간섭형 방음벽보다 효과적인 소음 저감 효과가 있음을 알 수 있다.

참고 문헌

(1) 이우섭, 정성수, 서상준, 전오성, 2000, "간섭형 방음벽의 음향특성," 한국소음진동공학학회논문집, 제 10 권, 제 3 호, pp. 517~522.
 (2) 황철호 2003, "방음벽의 설계인자와 성능,"

한국소음진동공학학회논문집, 제 12 권, 제 6 호, pp. 395~403.

(3) Okubo, T. and Fujiwara, K., 1999, "Efficiency of a Noise Barrier with an Acoustically Soft Cylindrical Edge for Practical Use", J. Acoust. Soc. Am, 105, pp. 3326~3335.

(4) Okubo, T. and Fujiwara, K., 1998, "Efficiency of a Noise on the Ground with an Acoustically Soft Cylindrical Edge," J. Sound Vib, 216, pp. 771~790.

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

(6) Li, K. M. and Wang, Q., 1998, "A Bem Approach to Assess the Acoustic Performance of Noise Barrier in a Refracting Atmosphere," J. Sound Vib, 211, pp. 663~681.

(7) Hothersall, D. C., Chandler-Wilde, S. N. and Hajmirzae M. N., 1991, "Efficiency of Single Noise Barrier," J. Sound Vib, 146, pp. 303~322.

(8) Seznec, R., 1980, "Diffraction of Sound Around Barriers : Use of the Boundary Elements Technique" J. Sound Vib, 73, pp. 195~209.

(9) Suh, J. S. and Nelson, P. A., 1999, "Measurement of Transient Response of Rooms and Comparison With Geometrical Acoustic Models," J. Acoust. Soc. Am, 105, pp. 2304~2317.

(10) Watts, G. R., Crombie, D. H. and D. C., Hothersall, 1994, "Acoustic Performance of New Designs of Traffic Noise Barriers : Full Scale Tests," J. Sound Vib, 177, pp. 289~305.