

# 반무한 방음벽의 삽입손실의 이론과 BEM해석에 의한 결과치 비교

°김 문섭\*, 김 관주\*\*

(Comparison of the Insertion Loss Results of Semi-infinite Plane Screen by the Analytical Method and Boundary Element Method)

(Mun-Sub Kim, Kwan-Ju Kim)

## 1. 서론

근래에 들어 방음에 대한 관심이 높아지면서 교통 소음이나 기계소음 등의 소음원으로부터 소음전파를 차단하는 방법으로 방음벽의 이용이 증가해 왔다. 방음벽에 관련된 해석치를 수 많은 연구들이 이루어졌지만 아직도 실험에 의해 방음벽의 성능을 예측하는 많은 경우들이 있다. 따라서 방음벽의 성능에 영향을 끼치는 다양한 인자들이 더 잘 이해되어지고 방음벽의 형상이 최적화되어진다면 방음벽설치에 드는 많은 경비를 줄일 수 있을 것이다.

일반적으로, 실험에 의하지 않고 방음벽의 성능을 예측하는 세가지의 이론적 접근방법이 있다. 첫번째는 기하학적 음향학을 바탕으로 실험자료를 이용하는 반실험적인 방법으로 Maekawa(1968)에 의해 연구되어졌다. 두번째 접근은 기하음향학적 해석방법에 의해 회절효과를 계산하는 방법이다. 이러한 접근방법들은 Kurze(1974)의 논문에 잘 나타나 있다. 세번째는 컴퓨터 기술의 발달과 수치 해석 알고리즘이 개발됨에 따라 방음벽의 성능을 예측하는 방법으로서 BEM의 사용이 급증하고 있다. 이들 세가지 이론적 접근방법들 모두 대기상태의 효과를 고려할 수 없음에도 불구하고 BEM은 다른 두가지 방법에 비해서 탁월한 장점을 가지고 있다. BEM은 복잡한 형상의 방음벽에 대해서 뿐만 아니라 벽면의 음향학적 특성, 지면까지도 모델링이 가능하다.

본 연구는 방음벽의 성능예측을 위해 BEM의 접근방법을 시도하였으며 범용 음향 소프트웨어인 Sysnoise 5.2의 direct collocation bem을 사용하여

반무한 평면 방음벽에 대한 해석을 수행하였으며, 그 결과를 검증하기 위해 Maekawa에 의한 근사해와 해석적 접근해에 비교하였다. 또한, 수음점이 방음벽으로부터 떨어진 거리, 방음벽의 폭, 방음벽의 높이에 따른 삽입손실을 계산하였고, 방음벽에 흡음처리를 한 경우와 방음벽상단의 형상변화에 따른 삽입손실의 변화를 계산하였다.

## 2. 회절현상

소음원으로부터 방사된 소리가 방음벽뒤의 수음자 로까지 전달되는 것은 광학에서 말하는 회절현상으로 설명할 수 있다. 방음벽에 의한 소리의 전달을 이해하기 위해 간단한 경우에 대한 회절현상을 고려하기로 한다.

실내에 있는 라우드 스피커로부터 평면파가 열린 창문을 통과한다고 생각할 때 창문을 통과하는 음파는 직선적으로 나아가는 것이 아니라 벽면뒤의 음지에도 음이 퍼져 나가게 된다. 이러한 회절 현상은 어떤 순간에서의 하나의 파동이 새로운 파동들의 음원으로서 작용한다는 호이겐스의 원리를 적용시킴으로써 이해될 수 있다. 즉, 열린 창문의 평면에서의 파동들은 마치 같은 신호를 방사하는 미세한 라우드 스피커의 배열로 생각할 수 있고, 그것은 새로운 점음원으로서 작용하여 벽뒤의 음지까지 음을 전파하게 되는 것이다.

수음자 위치에서 음압을 구하기에 앞서 문제를 간단히 하기 위해서 창문의 높이가 대단히 크다고 가정하여 1차원의 수평회절만을 고려하기로 한다. 또한 창문의 폭(W)에 비해 음원에서부터 수음자까지의 거리(L)가 대단히 크다고 가정한다. 따라서 각 경로들의 길이 L은 거의 평행하게 된다.(프라

\* 홍익대학교 기계공학과 대학원

\*\* 홍익대학교 기계공학과

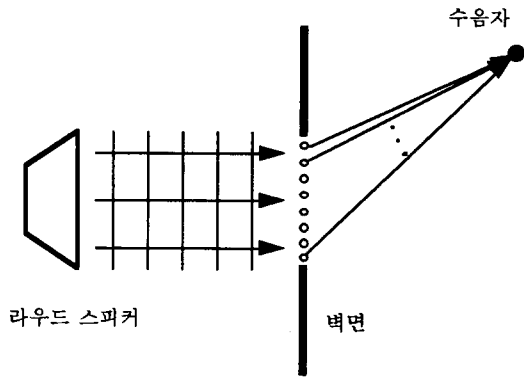


그림 1 실내의 음원으로부터 열려진 창문을 통해 수음자로부터 음이 전달되는 경로

운호퍼의 근사화) 이러한 가정하에서 그림 2의 창문선상에서의 파동들은 같은 크기의 진폭 C를 갖게 되고, 새로운 음원으로서 작용하여 수음자로부터 음을 전파하게 된다. 이때 수음자 위치에서의 음압은 각 파동들로부터 오는 압력들을 적분함으로써 구할 수 있다.

$$p(t) = \int_0^W C e^{j(\omega(t-L(x)/c) - \phi)} dx$$

$$= C e^{j(\omega(t-L(0)/c) - \phi)} \int_0^W e^{-j\omega[L(x)-L(0)]/c} dx \quad (1)$$

여기서, 경로간의 차는 각 경로들이 거의 평행하다는 가정에 의해  $L(x)-L(0) = x \sin \theta$  이 되며 따라서  $\theta$  방향에서 받아들여지는 압력의 크기는 다음과 같이 된다.

$$p(\theta) = \int_0^W e^{-j(\omega/c)x \sin \theta} C dx \quad (2)$$

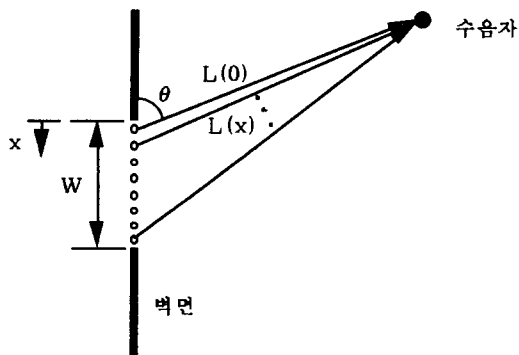


그림 2 수음자 위치에서의 압력

방음벽에서의 회절은 한쪽으로 무한대의 경계조건을 갖고 있으므로 더 이상 각 경로들이 평행하다는 프

라운호퍼의 근사화가 적용되지 않는다. 따라서 복잡한 계산을 통해서만이 정확한 해를 구할 수가 있다. 본 논문에선 방음벽에 의한 회절현상을 설명하는데 있어서 복잡한 경계조건을 고려하여 정확한 해를 구하기 보다는 단순화된 조건에 대해 고려하였다. 그림 3에서 보는바와 같이 음원으로부터 오는 평면파가 높이 H인 방음벽에 의해 회절되어지고, 수음자는 방음벽으로부터 D만큼 떨어져 지면에 위치해 있다. 이때 경로간의 차는 다음과 같이 나타내진다.

$$\Delta L(y) = \sqrt{D^2 + y^2} - \sqrt{D^2 + H^2} \quad (3)$$

이 식은 각 경로들간의 상대위상을 결정하고, 또한 높이 y로부터 오는 음압의 크기는 전달되어져 오는 거리,  $\sqrt{D^2 + y^2}$ 의 제곱근에 반비례 한다. 따라서 수음자에게 전달되어져 오는 음압의 진폭은 다음의 식을 통해 계산된다.

$$\int_H^{\infty} \frac{e^{-j(\omega/c)\Delta L(y)}}{\sqrt{D^2 + y^2}} C dy \quad (4)$$

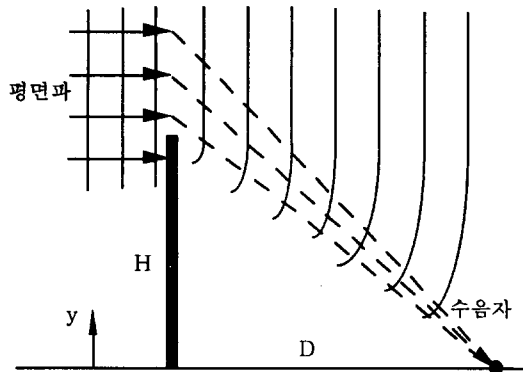


그림 3 방음벽에 의한 평면파의 회절

### 3. 반무한 평면 방음벽

회절이론은 광학에서조차 어려운 분야중의 하나로서 그것의 정확한 해는 주로 수학자들에 의해 이루어졌으며, 실제적으로 방음벽의 성능을 예측하기 위하여 가장 간단한 형상에 대한 이론적 결과를 도출하는 여러가지 근사해와 점근해가 제시되었다. Redfearn과 Maekawa는 방음벽의 후면에서 회절 음장을 계산하기 위해 방음벽을 반무한 평면으로 가정하고 키르히호프-프레즈넬의 근사방법을 사용하여 근사식을 도출하였다. 방음벽의 성능평가는 일반적으로 방음벽이 없을때의 직접음과 회절음장의

비율로서 나타내어지는 삽입손실에 의해 나타내진다. 즉, 삽입손실  $\Delta L$ 은  $L_0 - L_b$ 로 나타내지는데,  $L_0$ 는 방음벽이 없을때의 음압레벨,  $L_b$ 는 방음벽이 있을때 최절된 음압레벨이다. Maekawa에 의한 근사식은 음원으로부터 방음벽상단을 거쳐 수음점에 이르는 최절경로와 음원-수음점을 잇는 직선경로의 차  $\delta$ 와 반파장의 비인 프레즈넬 수를 이용하여 삽입손실을 계산하였다. 여기서 프레즈넬 수  $N$ 과 직선경로차  $\delta$ 는

$$N = \frac{2\delta}{\lambda}, \quad \delta = A + B - d \quad (5)$$

와 같이 정의되고,  $\lambda$ 는 파장,  $A, B, d$ 는 그림 4에서 보여진다. Maekawa의 반무한 평면 방음벽의 삽입손실 계산을 위한 근사식은 다음과 같다.

$$\Delta L = \Delta L(N1) - 10 \log_{10} \left\{ 1 + 10^{0.11 \Delta L(N1) - \Delta L(N2)} \right\} \quad (6)$$

여기서,  $N1$ 과  $N2$ 는 방음벽상단에서 직접 수음점으로 도달하는 경로와 지면에 반사되어져 오는 경로의 프레즈넬 수로서

$$N1 = 2(A + B - d) / \lambda, \quad N2 = 2(A + C - d) / \lambda \quad (7)$$

로 나타내진다. 또한, 각 경로에 대한 손실  $\Delta L(N1)$ 과  $\Delta L(N2)$ 는 Yamamoto와 Takagi에 의한 Maekawa 도표의 수식적 표현으로부터 구해진다. 그 식은 다음과 같다.

$$\Delta L(N) = \begin{cases} 10 \log N + 1 & \text{for } N > 1 \\ 5 + 8N |N|^{-0.55 - 0.143 |N|} & \text{for } -0.3 < N < 1 \\ 0 & \text{for } N < -0.3 \end{cases} \quad (8)$$

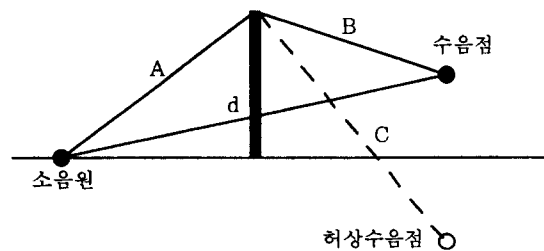


그림 4 Maekawa식 계산을 위한 소음원, 수음점의 위치 관계

60년대 초 Keller는 복잡한 최절문제에 대하여 점근해를 유도하였다. 그의 기하광학적 해석방법은 좀머펠트 형태의 해로서 키르히호프 근사해의 실용성을 유지하면서도 보다 정확성을 보인다. Keller의 점근식은 다음과 같다.

$$\Delta L_k = -20 \log \frac{d}{4\pi \sin \beta} \left[ \frac{\lambda}{AB(A+B)} \right]^{1/2} \left| \frac{1}{\cos(\theta_0 - \theta)/2} + \frac{1}{\cos(\theta_0 + \theta)/2} \right| \quad (9)$$

$A, B, d$ 는 그림 5(a)에 보여진 길이들이고,  $\beta$ 는 직접 광선과 방음벽 상단 사이의 각도로서  $\sin \beta = r_0 / A = r / B$ 로 정의된다. 또한,  $r_0, r, \theta_0, \theta$ 는 그림 5(b)의  $z$ 방향 투시도에서 보여진다. 이러한 Keller의 식을 Maekawa해의 해석적 표현으로서 나타내면 프레즈넬 수  $N \geq 1$ 에 대해서

$$\Delta L(N) = \left\{ 10 \log(20N) - 20 \log \left( \frac{d}{A+B} \right) + 10 \log \left( 1 + \frac{d}{A+B} \right) - 20 \log \left[ 1 + \frac{\sin(\varphi/2)}{\sin(\theta + \varphi/2)} \right] \right\} \quad (10)$$

이 되고 프레즈넬 수  $N$ 이  $N < 1$  경우에 대해선 윗 식의 첫번째 항을 다음식으로 나타내게 된다.

$$20 \log_{10} \left[ \frac{2p\sqrt{N/2}}{\tanh(\pi\sqrt{N/2})} \right] \quad (11)$$

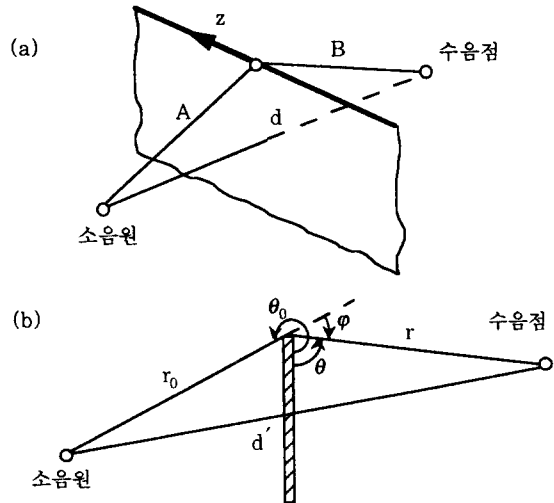


그림 5 (a) 방음벽의 원근적 형상 (b)  $z=c$ 면에서 본 투시도

#### 4. BEM에 의한 해석

방음벽의 모델링은 I-DEAS master series로 이루어졌고, 사용된 모델의 각 요소의 크기는 0.01m의 크기를 가지며 파장당 여섯개의 요소에 근거하여 5666 Hz의 상한주파수를 갖는다. 방음벽으로

인한 상대적인 방음효과의 계산을 위해서 2차원의 모델이 고려되었으며 음원은 선음원이고, 지면은 완전 반사면으로 가정하였다. 그림 6은 고려되어진 반무한 평면 방음벽의 형상을 보여준다. 외부문제에 대한 direct collocation BEM의 계산은 방음벽 내부의 공진 주파수에서 유일하지 않은 해를 나타낼 수 있다. 이러한 문제의 해결은 내부의 몇개의 점들에서 압력이 영인 경계조건을 줌으로써 해결할 수 있다. 이러한 점들을 과결정점(overdetermination point)이라 한다. 그림 7은  $H=3\text{m}$ ,  $w=0.2\text{m}$ 의 형상을 가지는 방음벽에 대해서  $r=14\text{m}$ 인 경우에 대해서 과결정점들을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우를 비교해 준다.

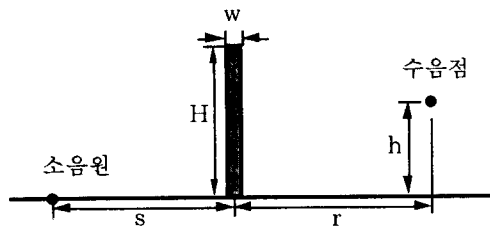


그림 6 고려된 반무한 평면 방음벽의 형상

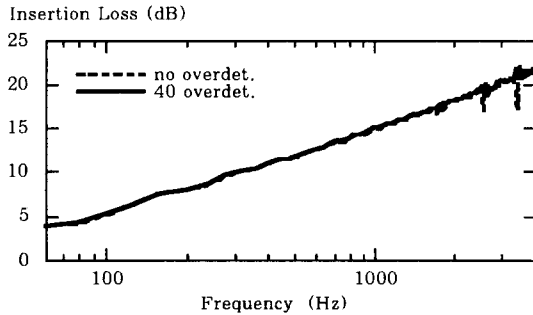


그림 7 방음벽의 삽입손실선도( $H=3\text{m}$ ,  $w=0.2\text{m}$ )

#### 4.1 해석해들과의 비교

BEM계산에서 얻어진 결과는 앞에서 언급한 Maekawa의 근사해와 Keller에 의한 점근해에 비교되어졌다. 비교는  $H=1.8\text{m}$ ,  $w=0.2\text{m}$ 의 형상을 가진 방음벽에 대해서  $r=14\text{m}$ 와  $r=50\text{m}$ 의 경우에 대해서 60Hz에서 4000Hz까지 이루어졌다. 수음점 위치가  $r=14\text{m}$ ,  $h=1\text{m}$ 의 경우인 그림 8에서 볼 수 있듯이 BEM에 의한 삽입손실선도는 Keller의 삽입손실선도와 상당히 일치하고 있으나 수음점 위치에서의 직접파와 반사파 간의 간섭효과를 고려하지 않는 Maekawa의 삽입손실선도와는 차이를 보이고 있다. 그림 9는 수음자의 위치가  $r=50\text{m}$ ,  $h=1\text{m}$ 인 경우로 BEM과 Keller의 해석해 간의 좋은 일치를 보여주고 있다.

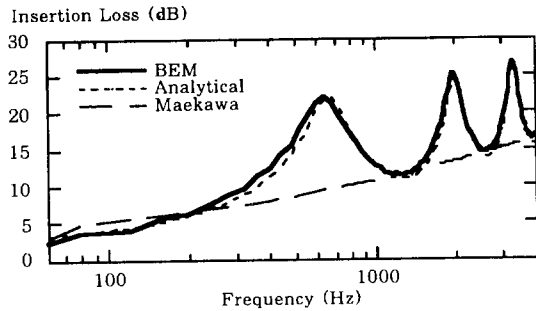


그림 8 방음벽의 삽입손실선도( $H=1.8\text{m}$ ,  $w=0.2\text{m}$ ,  $S=14\text{m}$ ,  $r=14\text{m}$ ,  $h=1\text{m}$ )

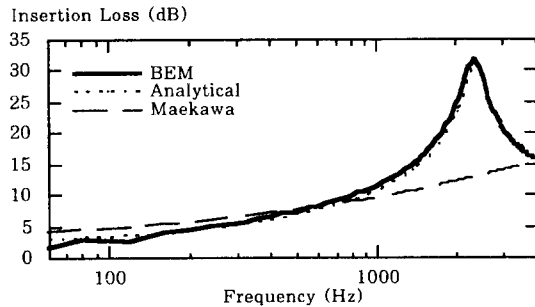


그림 9 방음벽의 삽입손실선도( $H=1.8\text{m}$ ,  $w=0.2\text{m}$ ,  $S=14\text{m}$ ,  $r=50\text{m}$ ,  $h=1\text{m}$ )

#### 4.2 수음점의 거리에 따른 영향

그림 10은 주파수에 따라 삽입손실이 증가해 가며 방음벽으로부터 떨어진 수음점의 거리( $r$ )가 멀어질수록 삽입손실이 낮아지는 경향을 나타낸다. 그러나 4000Hz에서의 삽입손실의 감소는 2dB에 불과하다.

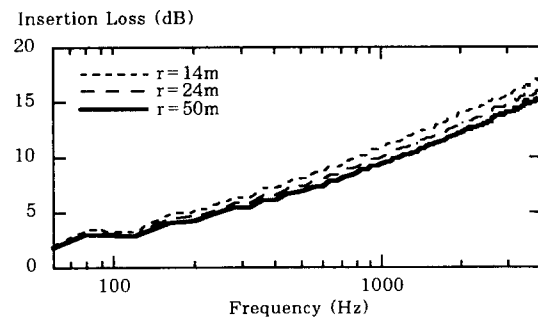


그림 10 방음벽으로부터 떨어진 거리( $r$ )에 따른 삽입손실( $H=1.8\text{m}$ ,  $w=0.2\text{m}$ ,  $S=14\text{m}$ ,  $h=0\text{m}$ )

#### 4.3 방음벽의 두께에 따른 영향

그림 11과 12에서 볼 수 있듯이  $r=14\text{m}$ 일 때 보다  $r=50\text{m}$ 일 때 두께에 따른 삽입손실의 영향이 더 작게 나타난다. 또한 주파수가 증가함에 따라 두께에 따른 삽입손실의 영향이 증가함을 알 수

있다. 그림 13(a)-(c)는 각각  $w=0.2\text{m}$ ,  $0.7\text{m}$ ,  $3\text{m}$ 의 방음벽에 대해  $520\text{Hz}$ 에서의 음압영역을 보여준다.

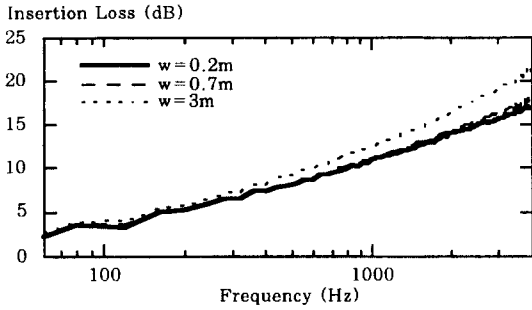


그림 11 방음벽의 두께에 따른 삽입손실( $H=1.8\text{m}$ ,  $S=14\text{m}$ ,  $h=0\text{m}$ ,  $r=14\text{m}$ )

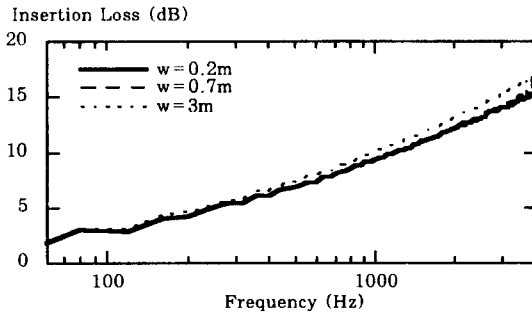


그림 12 방음벽의 두께에 따른 삽입손실( $H=1.8\text{m}$ ,  $S=14\text{m}$ ,  $h=0\text{m}$ ,  $r=50\text{m}$ )

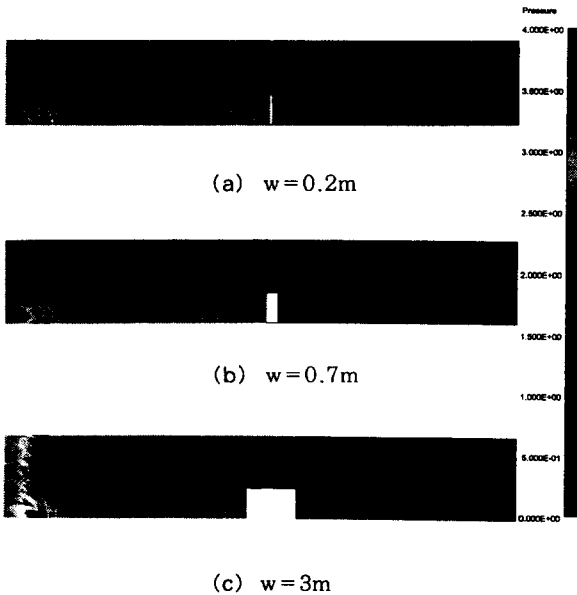


그림 13  $520\text{Hz}$ 에서 두께( $w$ )에 따른 음압영역 ( $H=1.8\text{m}$ )

#### 4.4 방음벽의 높이(H)에 따른 영향

그림 14(a)-(c)는 각각  $H=1.8\text{m}$ ,  $3\text{m}$ ,  $4\text{m}$ 의 방음벽에 대해  $520\text{Hz}$ 에서의 음압영역을 나타낸다. 높이에 따른 변화와는 다르게 방음벽의 높이에 따라 방음벽면 뒤의 음압영역에 상당한 변화를 보여준다. 그림 15은 방음벽의 높이가 높아짐에 따라 삽입손실이 비교적 큰폭으로 커지고 있음을 나타낸다.

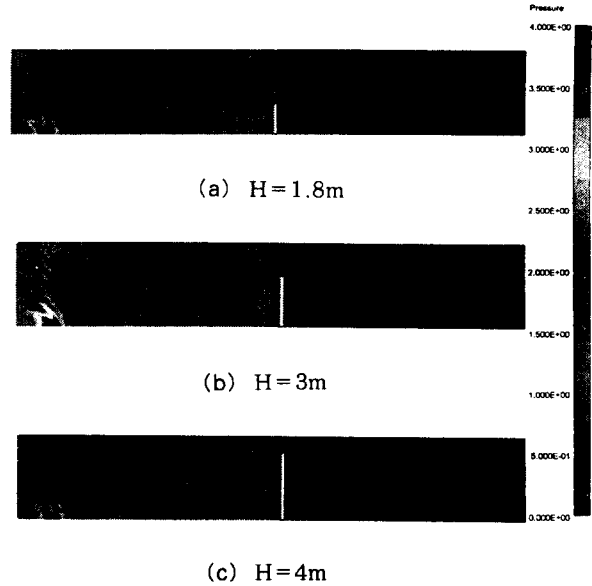


그림 14  $520\text{Hz}$ 에서 높이(H)에 따른 음압영역 ( $w=0.2\text{m}$ )

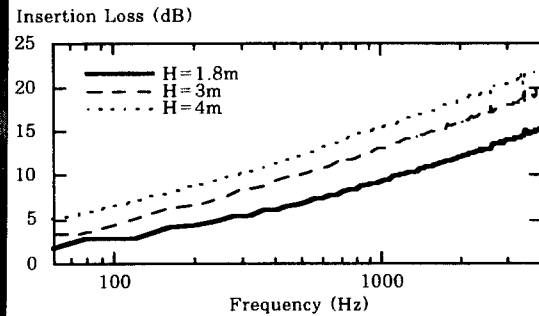


그림 15 방음벽의 높이에 따른 삽입손실( $w=0.2$ ,  $S=14\text{m}$ ,  $r=50\text{m}$ ,  $h=0\text{m}$ )

#### 4.5 방음벽의 흡음처리에 따른 영향

소음원쪽의 벽면과 상단면에 흡음처리를 함으로써 삽입손실이 증대되는 것을 그림 16에서 볼 수 있다. 벽면과 상단면에 흡음효과를 주기위해 경계조건으로서 공기의 임피던스(공기밀도 $\times$ 음속)를 사용하였고, 그 결과 방음벽의 두께가  $3\text{m}$ 일때의 삽입손실효과를 나타냈다.

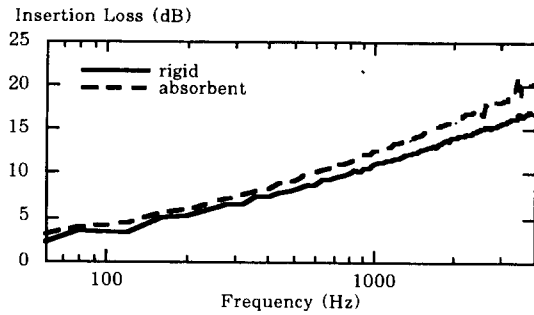


그림 16 방음벽의 흡음처리에 따른 삽입손실선도  
( $H=1.8m, w=0.2m, s=14m, r=14m, h=0m$ )

#### 4.6 방음벽상단의 형상에 따른 영향

방음벽상단의 변화에 따른 삽입손실의 영향을 계산하기 위해 그림 17에 보이는 방음벽의 형상에 대해서 bem 해석을 수행하였다. 그림 18은 그러한 형상변화에 따른 삽입손실선도를 나타내었다. 그 중에서 (e)의 방음벽형상이 가장 높은 삽입손실을 나타내며, 그 다음으로 (c)형이 높은 손실을 보였다. 반면에 (d)형은 (a)의 평면 방음벽 보다도 낮은 삽입손실을 보이며, (b)형의 경우엔 뚜렷한 변화가 보이지 않는다.

그림 19는 그림 17(d)의 방음벽의 형상에 대해서 실린더형의 상단면에 흡음처리를 한 경우의 삽입손실선도와 그림 17(a)의 평면 방음벽의 경우에 대한 삽입손실선도를 나타낸다. 실린더형 상단의 흡음처리를 하지 않았을때와는 다르게 높은 방음효과를 나타내며, 4000Hz에선 약 7.8dB의 방음효과를 나타낸다.

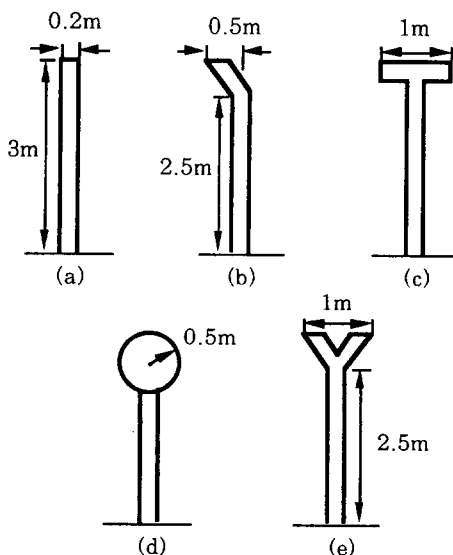


그림 17 변화된 방음벽상단의 형상들

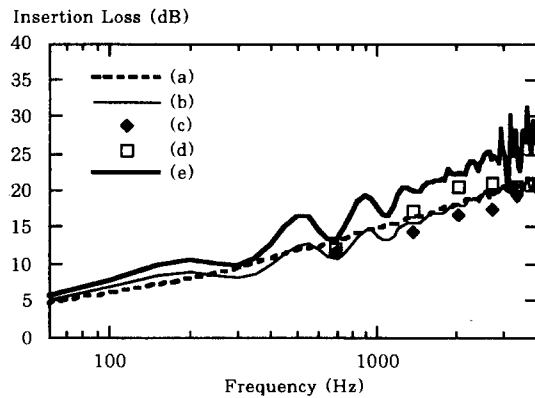


그림 18 방음벽상단의 형상에 따른 삽입손실선도  
( $r=14m$ )

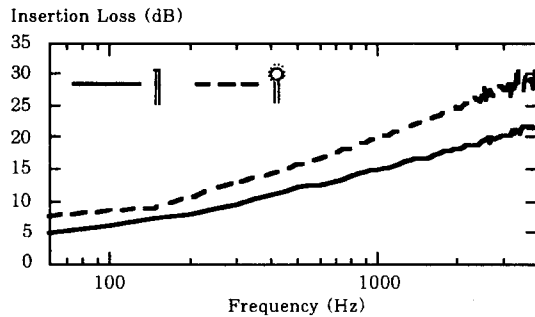


그림 19 흡음처리된 실린더형의 상단면을 가진 방음벽의 삽입손실 효과

## 5. 결론

본 연구는 BEM을 이용하여 반무한 평면 방음벽의 삽입손실을 계산하였으며 관련된 해석해들을 통하여 검증하였다. 그 결과 기하광학적 접근해와 거의 일치함을 보였고, 수음점의 거리, 방음벽의 두께, 높이, 그리고 벽면에 흡음처리를 한 경우와 상단면의 형상변화에 대해서 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 방음벽으로부터 떨어진 거리가 멀어짐에 따라 삽입손실이 작아지나 그 변화의 폭은 크지않다.
- (2) 방음벽의 두께에 따른 방음효과는 오히려 작았다.
- (3) 방음벽의 높이가 증가함에 따라 삽입손실은 상당한 폭으로 증가되었다.
- (4) 소음원쪽의 벽면과 상단면에 흡음처리를 함으로써 삽입손실의 증대를 가져왔다.
- (5) 방음벽상단의 형상이 Y형일때 가장높은 삽입손실을 나타냈고, 실린더형의 상단면에 흡음처리를 함으로써 높은 방음효과를 나타냈다.

## 참고문헌

1. Donald E. Hall, Basic Acoustics. chap. 4.
2. Kurze, U.J.(1974) Noise reduction by barriers. J. Acoust. Soc. Am., 55(3), 504-518.
3. Maekawa, Z.(1968) Noise reduction by screens. Appl. Acoust., 1, 157-173.
4. Yamamoto, K.(1992) Expressions of Maekawa's chart for computation. Appl. Acoust. 37, 75-82.
5. Joseph C.S. Lai, Application of the boundary element method to assessment of road traffic barriers. Proceedings 2nd SYSNOISE users meeting(1995)
6. R.J. Alfredson and X. Du, Special shapes and treatment for noise barriers. Proceedings of INTER-NOISE 95
7. Fujiwara, K., Naotuki, F. Sound shielding efficiency of a barrier with a cylinder at the edge. Noise Control Engineering Journal, Vol. 37, No. 1(1991)