

< 논 문 >

## 간섭형 방음벽의 음향특성

### The Acoustical Characteristics of an Interference-type Noise Barrier

이우섭\* · 정성수\* · 서상준\* · 전오성\*\*

Woo Seop Lee, Sung Soo Jung, Sang Joon Suh and Oh Sung Jun

(2000년 2월 24일 접수 : 2000년 5월 20일 심사완료)

**Key Words:** Interference-type Noise Barrier(간섭형 방음벽), Insertion Loss(삽입손실), Boundary Element Method(경계요소법), End Correction(끝보정)

#### ABSTRACT

This study is concerned with the acoustic characteristics for recently developed interference-type noise barrier (T-shaped). To modify the previous shape more conveniently, the T-shaped noise barrier with tuning partitions was examined in detail by varying the number and the height of tuning partitions. The 2-D boundary element method (BEM) analysis were compared with the experimental results of 1/10 reduced scale model.

#### 1. 서 론

교통수단의 발달과 더불어 환경소음의 저감을 위해 방음벽에 대한 연구는 지금까지도 계속되고 있다. 일본은 미국 혹은 유럽보다도 실용적인 방음벽에 대한 투자와 연구를 하였는데, 이것은 일본도 우리 나라처럼 국토가 좁기 때문이다. 최근의 방음벽 개발 연구를 분석해보면, 기존의 단순한 형태에서 벗어나 이론에 기초하여 원하는 주파수 대역의 소음 저감을 할 수 있는 간섭형 상단부 형상물이 주목을 받고 있다. 이것은 일본의 Fujiwara 등<sup>(1,2)</sup>을 중심으로 개발되었는데, 기본원리는 격자형으로 구성된 방음벽 상단부 구조물에 입사파와 반사파의 간섭효과로 인해 상단부 표면에 무른 경계면(soft surface)을 형성하여 회절을 저감시키는 것이다. 그러나 Fujiwara 등이 개발한 T형 상단부는 주파수 튜닝(tuning)을 위해 설치되는 패널들이 격자형태로 구성되었기 때문에 각종 오염 물질들이 들어가는 경우 관리 측면에서 큰 문제점을 안고 있다.

본 연구에서는 Fujiwara 등이 개발한 상단부 간섭형 장

치에 대해 비용과 관리 측면에서 좀더 효율적인 방안을 살펴 보았다. 이를 위해 상단부에 설치되는 칸막이를 격자형태가 아닌 단순한 형태를 설치한 경우와 칸막이 개수와 높이 변화에 따른 삽입손실을 경계요소법으로 구하고 축척 모형실험에 의한 실험값과 비교·검증하였다.

#### 2. 경계요소법(BEM)

본 연구에서 이론값의 계산은 상용 프로그램인 SYSNOISE를 이용하여 2차원 경계요소법으로 해석하였다. 3차원으로도 해석이 가능하지만 대부분의 방음벽은 높이에 비하여 길이가 길기 때문에 2차원 해석을 사용해도 문제가 없기 때문이다. Fig. 1은 2차원 해석을 통해 계산될 영역의 단면도로서, 위치  $r_0$ 에 있는 점 음원으로부터 거리  $r$ 만큼 떨어진 수음점에서의 음압을  $p(r, r_0)$ 라 할 때, 음압은 식 (1)의 경계 적분방정식을 만족한다.

$$\epsilon(r)p(r, r_0) = G(r, r_0) - \int_t p(r_s, r_0) \cdot \left[ jk\beta G(r, r_s) - \frac{\partial G(r, r_s)}{\partial n(r_s)} \right] dt \quad (1)$$

\* 정희원, 한국표준과학연구원 음향진동그룹

\*\* 정희원, 전주대학교 기계공학과

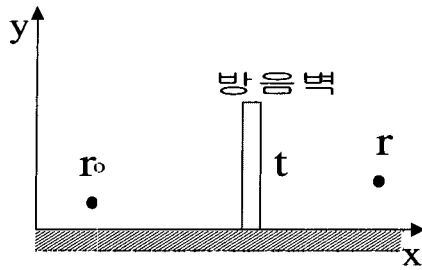


Fig. 1 Cross-section of the two-dimensional noise barrier

여기서  $\beta$  는 방음벽 표면의 어드미턴스,  $r_i$ 는 방음벽 경계 요소  $d_i$ 의 위치벡터,  $n$ 은  $d_i$ 의 바깥으로 향하는 단위 접선 벡터, 그리고  $\epsilon(r)$ 은 수음점의 위치에 의존하는 값으로서, 수음점이 표면  $t$ 를 제외한 전파 매질에서는 1,  $t$  상에서는 1/2이다.

$G(r, r_0)$ 는 방음벽이 없을 경우 수음점  $r$  지점의 음압으로서 식 (2)와 같다.

$$G(r, r_0) = -jH_0^2(k|r - r_0|)/4 \quad (2)$$

여기서  $H_0^2$ 는 제 2차 0종 Hankel 함수이다. 경계적분식 (1)을 풀기 위해서 경계요소법을 이용하였다. 방음벽  $t$ 를  $n=1, 2, 3, \dots, N$ 개의 요소들로 나누고,  $p(r, r_0)$ 가 일정하고 표면  $t$ 상의  $r$ 에 대해  $p(r_n, r_0)$ 와 같다면 식 (3)의  $m$ 개의 선형 방정식으로부터  $p(r_1, r_0), p(r_2, r_0), \dots, p(r_N, r_0)$ 을 구할 수 있다. 따라서  $p(r, r_0)$ 를 구하면 각각의 요소에서 계산된 음압을 식 (3)에 대입하여 수음점에서의 음압을 구할 수 있다. 본 연구에서는 정확한 결과를 얻기 위해서 요소의 최대 길이를  $\lambda/6$  보다 작게 설정하였다.

$$\epsilon(r)p(r, r_0) = G(r, r_0) - \sum_{n=1}^N p(r_n, r_0) \cdot \int_t \left[ jk\beta G(r, r_s) - \frac{\partial G(r, r_s)}{\partial n(r_s)} \right] dt \quad (3)$$

### 3. 실험 및 결과 분석

#### 3.1 실험방법

실험은 방음벽을 1/10 축소한 축척 모형 실험으로 한계 주파수가 70 Hz인 무향실(4.5×7×4.5 m<sup>3</sup>)에서 하였다. 지표면은 딱딱한 시멘트 포장 면으로 가정하여 무향실 바닥

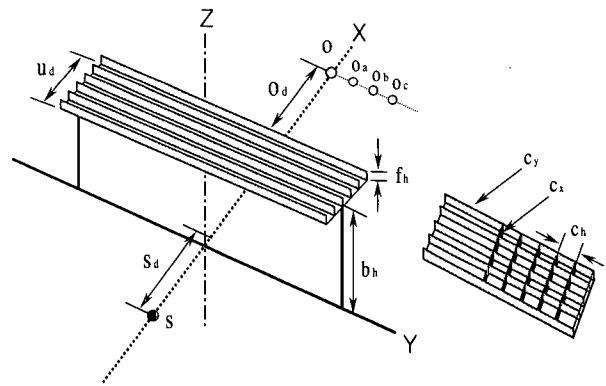


Fig. 2 Geometry of a interference-type noise barrier, sound source and receiver point

에 두께 0.005 m인 압축나무를 면적 4×7 m<sup>2</sup>이 되도록 설치하였다. 음원은 직경 0.03 m의 고주파용 확성기를 사용하였다. 음은 주파수 분석기(B&K 3550)에서 발생된 백색 잡음을 신호증폭기(B&K 2706)에서 증폭시킨 후 확성기를 통해 출력시켰다. 음압은 방음벽 뒤 수음점에 1/2-인치 마이크로폰(B&K 4165, 감도: 50 mV/Pa)으로 측정하고 주파수 분석기를 통해 1/15 옥타브 밴드의 중심 주파수로 분석하였다.

음원(S)과 수음점(O)의 높이는 지면에 두었는데, 이것은 본 연구에서 간섭형 방음벽 상단부의 회절에 의한 영향만 고려하기 때문에 직접파와 지면에 반사되는 파와의 간섭을 없애기 위해서이다. 물론 실험에서는 스피커의 높이(약 0.01 m)와 마이크로폰의 반경(약 0.005 m)으로 인해 계산값과 약간의 오차는 있으나 여기서는 무시하였다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 방음벽과 음원과의 거리( $S_d$ )는 1.5 m, 방음벽과 수음점까지의 거리( $O_d$ )는 2 m로 하였다. 방음벽은 길이 4.5 m, 높이( $b_h$ ) 0.4 m, 두께 0.02 m인 것을 설치하였고, 칸막이 바닥면은 두께가 0.005 m 그리고 폭( $u_d$ )은 0.11 m이고, 칸막이( $C_x, C_y$ )는 두께 0.003 m, 높이( $f_h$ )는 0.01 m와 0.02 m인 두 종류로 하였다. 방음벽과 그 상단부에 사용되는 재질은 모두 아크릴로 하여 음향학적으로 강제로 취급하였다.

Fujiwara 등이 개발한 형태는 Fig. 2의 오른쪽 그림에 나타냈듯이  $C_x$ 와  $C_y$ 가 모두 설치된 격자형이다. 이에 반해 본 연구에서의 주안점은 실용성과 사후관리를 위해  $C_x$  칸막이를 제거하고  $C_y$  만을 설치한 상단부 형상물의 효과에 있다.

#### 3.2 BEM 해석

방음벽에 대한 간단한 음장해석은 Maekawa<sup>(3)</sup>, Lam<sup>(4)</sup>

등의 이론이 유용하게 사용된다. 그러나 간섭형 방음벽과 같이 상단부에 기하학적으로 복잡한 구조물이 설치될 경우는 이론적으로 해석하기가 어렵다. 따라서 이 경우는 수치 해석 방법인 경계요소법(BEM)이 효과적이며 본 연구에서는 SYSNOISE<sup>(5)</sup>를 사용하여 이론적 예측값을 구하였다.

BEM을 사용할 경우 계산하고자 하는 모델의 형상에 따라 어떤 특정 주파수에서는 부정확한 값이 나타날 수 있다. 한 예로서, Fig. 3은 높이 0.4 m인 단순 수직형 방음벽에 대해 BEM으로 계산한 삽입손실(Insertion Loss)인데, 결과에서 보듯이 17 kHz 부근에서 불규칙한 피크치가 발생하고 있다. 이러한 피크치는 계산상의 오차이지만 이것을 제거하는 일반적인 방법은 생략하였다. 본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 안정된 구간인 주파수 15 kHz 이하에서만 BEM 해석을 하였다.

간섭형 방음벽의 원리는 상단부에 설치되는 칸막이 사이의 공간에 입사파와 바닥면에서의 반사파의 위상차가  $\pi$  일 때 소멸 간섭으로 인해, 그 경계면에서 음향 에너지를 완전히 흡수하는 무른 임피던스 표면을 형성함으로써 회절음의 에너지를 감소시키는 것이다. 그러나 칸막이의 길이가  $\lambda/2$ 의 정수배와 같다면 위상차가 0이기 때문에 오히려 보강 간섭으로 인해 소음레벨이 증가하는 단점이 있다. 따라서 차량의 주파수 스펙트럼을 분석하여 소음저감 대상 주파수 밴드에 맞도록 소멸 간섭을 이용하고, 보강 간섭이 발생하는 주파수 영역은 관심 대역에서 벗어나도록 설계하면 된다. 물론 가장 좋은 방향은 광대역에 걸쳐 무른 음향 임피던스 면이 형성되도록 설계하는 것이다.

Fig. 4는 높이 0.2 m인 칸막이를 단단한 지면에 11개 설치했을 때, p1 과 p2 지점에서의 음압레벨을 BEM으로 계산한 것이다. 이 경우 상쇄간섭이 발생하는 지점은 이론적

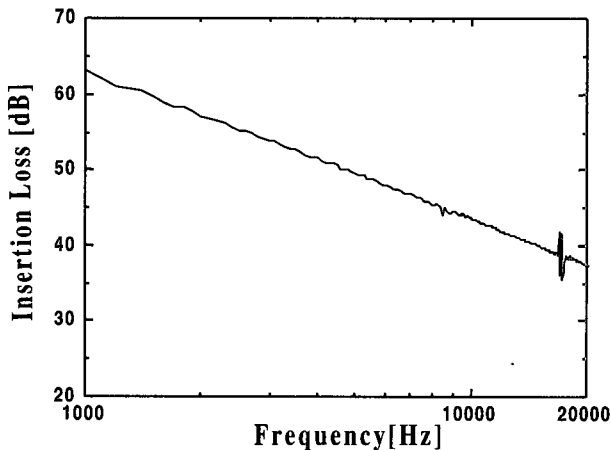


Fig. 3 Sound pressure level calculated by using BEM for a simple barrier (height 0.4 m).

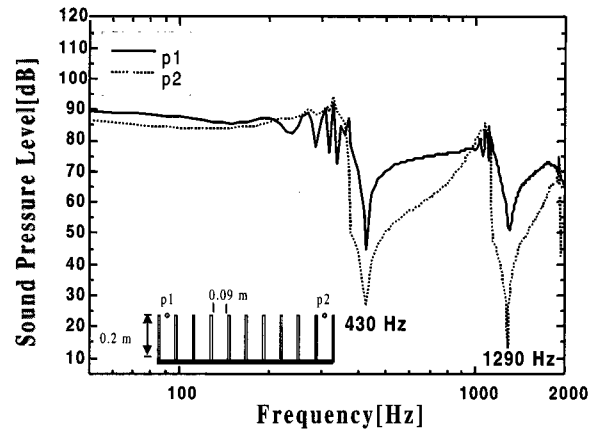


Fig. 4 Sound pressure level at the positions of p1 and p2.

으로 칸막이 길이가 음 파장의  $\lambda/4$ 인 425 Hz,  $3\lambda/4$  인 1275 Hz ... 등의 기수배에서 예상되는데, 그림 4에서 보듯이 BEM 해석결과가 이론값과 잘 일치함을 확인할 수 있다. 두 지점 모두 같은 주파수에서 감쇄가 크게 발생하는데 상대적으로 p2 지점에서는 칸막이 수의 증가로 인해 p1 지점보다 더 큰 음압감쇄가 발생하고 있다.

### 3.3 삽입손실에 대한 2차원 BEM 해석과 축척모형 실험값의 비교

Fig. 2에서처럼  $C_v$  칸막이 만을 설치할 경우, 이들 칸막이 수와 높이 변화에 따른 삽입손실에 대해 BEM 해석 결과와 축척 모형 실험값을 비교하였다. 여기서 모형실험은 1/10 축척이므로 실측과는 10배 차이가 발생되는데 예를 들어, 모형실험에서 길이가 0.1 m라면 실측에서는 1 m이고 주파수 10 kHz는 실측에서는 1 kHz에 해당된다.

높이 0.01 m인 칸막이를 9개 설치한 경우 방음벽에서 2 m 떨어진 수음점 (O)에서의 삽입손실에 대한 결과를 Fig. 5에서 비교하였다. 칸막이 높이가 0.01 m일 경우 이론적으로는 약 8.7 kHz(실측: 870 Hz) 부근에서 큰 삽입손실 효과를 기대할 수 있는데, BEM에 의한 예측값과 실험값을 보면 6 kHz~15 kHz의 비교적 광역의 주파수 대역에서 큰 삽입손실의 효과가 발생됨을 볼 수 있다. 6 kHz 부근부터 큰 삽입손실이 발생하는 것은 음향학적으로 끝보정(end correction) 효과로 인해 실제 칸막이의 높이보다 증가되어 예측된 주파수보다 더 낮은 저주파수에서 그 효과가 발생되기 때문이다. 삽입손실이 비교적 광대역에서 발생하는 주요 요인은 칸막이 사이에서 입사음과 반사음의 간섭과 더불어 칸막이 끝에서 여러 번 산란되어 좀더 복잡한 현상이 유발되기 때문으로 사료된다. 한편, 실험값이 BEM 해

석만큼 높은 삽입손실을 가지지 못하는 이유는 BEM 해석은 2차원인데 비해 실제 실험은 3차원이기 때문이며, 또한 음원의 지향성에도 관계되는 것으로 판단된다. 특히 음원의 지향성<sup>(6)</sup>에 관련된 부분은 최근에 관심이 되는 부분으로 좀더 검증이 필요한 분야이다.

Fig. 6은 Fig. 5와 같은 조건에서 칸막이 수만 5 개로 줄인 경우이다. Fig 5와는 달리 6 kHz 이상에서 큰 삽입손실의 효과를 볼 수 없다. 이 결과는 칸막이 높이가 비교적 낮고, 칸막이 사이의 간격이 9개의 경우와 비교해서 넓기 때문에, 입사되는 음과 반사음이 완전히 중첩을 이루지 못하고 오히려 칸막이 끝에서 산란되는 파들의 효과가 더 크기 때문으로 판단된다. 이것은 곧 이론적인 결과와 비슷한 주파수 대역과 큰 삽입손실을 얻기 위해서는 칸막이 높이와 수에 어떤 입계가 존재함을 암시한다. 결과에는 보이지 않았지만 칸막이수가 2개인 경우는 주파수 튜닝 효과가 전혀 나타나지 않았다.

다음은 상단부 칸막이 높이를 0.01 m 더 증가시켜 총

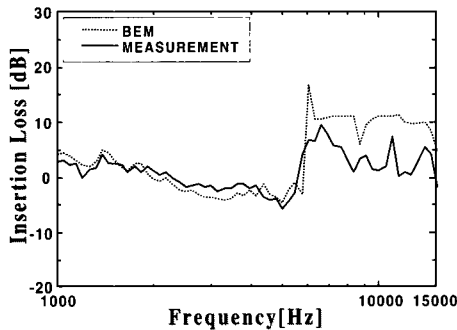


Fig. 5 Comparison of BEM result with measured values for the noise barrier with 9 partitions ( $C_y$ ) and  $f_h=0.01$  m: BEM(dotted line), measured value(solid line).

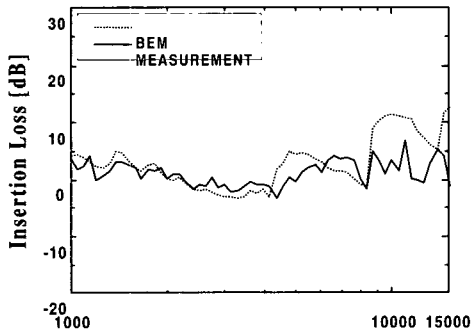


Fig. 6 Comparison of BEM result with measured values for the noise barrier with 5 partitions ( $C_y$ ) and  $f_h=0.01$  m: BEM(dotted line), measured value(solid line).

0.02 m로 한 경우의 결과를 Fig. 7에 나타냈다. 이론적으로는 약 4.1 kHz(실측: 410 Hz)에서 큰 삽입손실 효과를 기대할 수 있는데, BEM과 실험값을 비교해보면 3.8 kHz 이상에서 큰 삽입손실이 발생되어 잘 일치함을 확인할 수 있다. 그러나 약 8 kHz~10 kHz 주파수 영역에서는 다소 낮은 삽입손실 효과가 발생되는데, 이것은 칸막이 높이가 음 파장과  $\lambda/2$ 의 정수배에서 보강 간섭이 발생되어 칸막이 끝단 부분에 음향학적으로 높은 임피던스를 가지는 경계면이 형성되므로 음원에서 발생된 소음을 모두 반사시켜 음압레벨이 증가하는 역효과가 발생된다.

이와 같은 역효과를 제어하기 위한 방법은 서로 다른 높이를 가진 칸막이를 복합적으로 설치함으로써, 보강 간섭으로 야기되는 삽입손실의 감소를 어느 정도 보상할 수 있으며, 큰 삽입손실을 얻는 주파수 대역을 확대시키는 효과도 얻을 수 있다. 한편, 칸막이 높이가 0.01 m인 Fig. 5와 비교했을 때, 칸막이 높이의 증가로 인해 더 넓은 주파수 영역에서 간섭형 장치의 효과를 볼 수 있으며, 삽입손실이 0 dB 이하인 주파수 영역도 상당히 줄어든 것을 알 수 있다. 따라서 간섭형 장치의 효과에 칸막이 높이가 중요한 변수임을 알 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 7과 같은 조건에서 칸막이 수만 5개로 설정한 경우이다. Fig. 7의 결과와 마찬가지로 4.1 kHz 이상의 주파수 영역에서 간섭형 장치의 효과를 확인할 수 있다. 지금까지의 결과를 종합하면 칸막이 수가 최소한 5개, 높이는 0.02 m이어야 이론적 예측값과 실험값이 잘 일치함을 알 수 있다. 실제 이 장치를 효과적으로 활용하기 위해서는 근본적으로 먼저 교통 소음원의 주파수 특성을 분석한 후, 소음 저감 주파수 대역을 선정해야 한다.

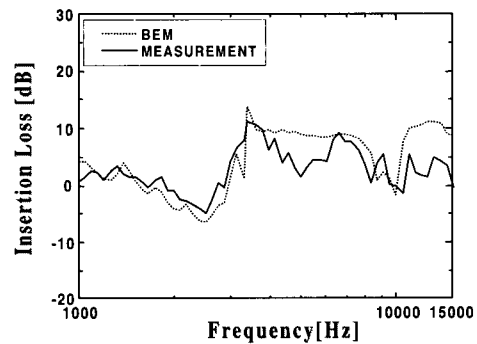


Fig. 7 Comparison of BEM result with measured values for the noise barrier with 9 partitions ( $C_y$ ) and  $f_h=0.02$  m: BEM(dotted line), measured value(solid line).

### 3.4 칸막이 $C_x$ 의 설치 유·무와 수음자의 위치에 따른 삽입손실 비교

Fujiwara 등의 모델과 본 연구와의 차이점을 살펴보기 위해,  $C_y$ (높이 0.01 m) 수를 5개와 9개로 선택하고,  $C_x$ (높이 0.01 m)의 간격(Ch)을 0.025 m, 0.05 m로 설정한 조건에 대해 삽입손실 측정값을 Fig. 9에 비교하였다. Fig. 9(a)와 (b)는  $C_y$ 가 각각 5개와 9개로 두 경우 모두  $C_x$ 의

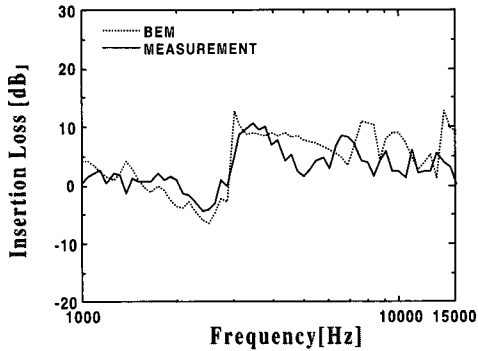


Fig. 8 Comparison of BEM result with measured values for the noise barrier with 5 partitions ( $C_y$ ) and  $fh=0.02$  m: BEM(dotted line), measured value(solid line).

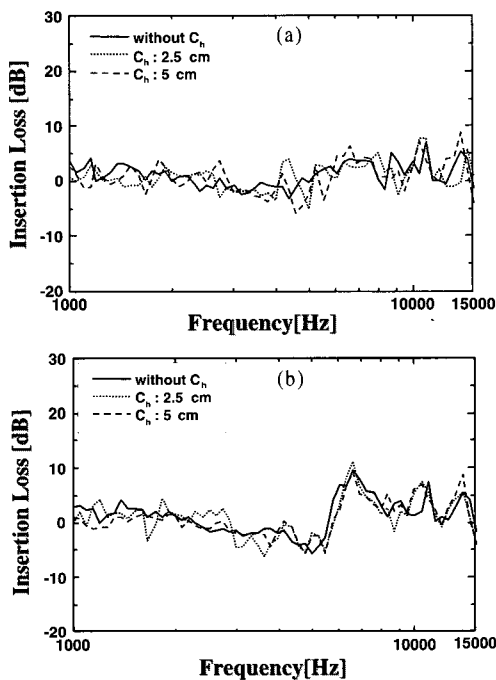


Fig. 9 Comparison of the measured insertion loss for the noise barrier in case of with and without  $C_x$  ( $fh=0.01$  m): (a) 5 partitions ( $C_y$ ), (b) 9 partitions( $C_y$ ).

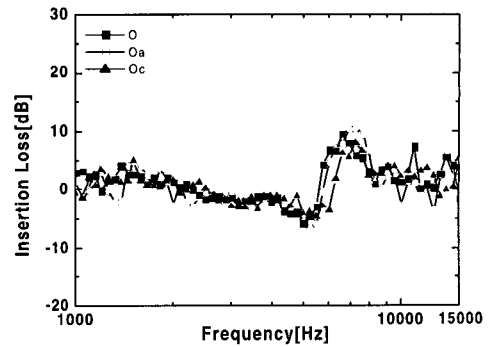


Fig. 10 Measured insertion loss for the noise barrier at different receiver positions.  $O$  (■),  $O_a$  (○),  $O_c$  (▲).

설치 유·무와 관계없이 비슷한 삽입손실을 가짐을 확인할 수 있다. 이 결과는  $C_x$ 를 설치하지 않아도 비슷한 효과를 얻을 수 있기 때문에 비용면이나 관리면에서 본 연구에서의 모델이 더 실용적이라고 볼 수 있다.

Fig. 10은  $C_y$ (높이 0.01 m)를 9개,  $C_x$ 는 없는 경우로서, Fig. 2에서 보듯이 수음점의 위치가  $O$ , 그리고  $O$  지점 옆으로 0.5 m, 1.5 m 각각 떨어진  $O_a$ 와  $O_c$  지점에서 삽입손실을 비교한 것이다. 결과를 보면 세 지점 모두 비슷한 주파수 특성의 삽입손실 효과를 볼 수 있으며, Fig. 9(b)의 칸막이가 있는 경우의 결과와도 비슷하다. 이것은 곧 수음자의 위치에 관계없이 주파수 튜닝의 효과를 얻을 수 있음을 뜻한다.

## 4. 결론

본 논문에서는 간섭형 방음벽에 대한 삽입손실을 모형 축척실험과 BEM으로 해석하였다. 간섭으로 인해 큰 삽입손실이 기대되는 주파수 영역에서 실험 값과 BEM 해석 결과는 전반적으로 잘 일치하였다. 큰 삽입손실이 발생하기 시작하는 주파수는 이론적 예측값보다 낮은 곳에서 발생되어 음향학적으로 끝 보정 효과를 고려해야 됨을 알 수 있었다. 본 실험의 결과로부터 간섭 효과가 충분히 나타나기 위해서는 최소한 칸막이 수가 5 개 그리고 높이는 0.02 m 이상이어야 됨을 새로이 밝혀냈다. 칸막이  $C_x$ 의 설치 유·무 그리고 수음점의 위치 변화에 따른 삽입손실은 비슷한 결과를 나타냈다. 특히 칸막이  $C_x$ 를 설치하지 않아도 충분한 효과를 낼 수 있기 때문에 비용과 관리면에서 효과적이라고 할 수 있다. 추후 본 연구결과를 토대로 주파수 튜닝을 할 수 있는 새로운 형태의 방음벽 연구를 할 것이며, 현재 운행되는 차량들의 운행 소음에 대한 주파수 특성 분석 연구도 병행함으로써 최적의 효율을 얻도록 할

예정이다.

### 참 고 문 헌

(1) Fujiwara, K., Hothersall D. C., and Kim, C-H, 1998, "Noise Barriers with Reactive Surfaces," Appl. Acoust. Vol. 53, pp. 255~272.

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

(3) Maekawa, Z., 1968, "Noise Reduction by Screens," Appl. Acoust. Vol. 1, pp. 157~173.

(4) Lam, Y. W., 1994, "Using Maekawa's Chart to Calculate Finite Length Barrier Insertion Loss," Appl. Acoust. Vol. 42, pp. 29~40.

(5) SYSNOISE Rev. 5.3 (LMS/NIT, Belgium, 1996).

(6) Matsumoto, G., Fujiwara, K., and Omoto, A., 1999, "A Study on the Insertion Loss of a Noise Barrier for a Directional Sound Source," J. Acoust. Soc. Jpn. (E), Vol. 20, pp. 325~328.