

복합음원이 적용된 능동방음벽에 관한 선행 연구

A Preliminary Study on the Application of Compound Sources to Active Noise Barrier

백 광 현*

(Kwang-Hyun Baek*)

*단국대학교 기계공학과

(접수일자: 2010년 12월 1일; 채택일자: 2011년 1월 4일)

본 연구는 능동 방음벽의 성능과 관련하여 제어 음원으로서 복합음원의 사용 가능성을 알아보았다. 복합음원은 근접거리에서 위치하며 위상이 반대인 두 개의 단극음원으로 구성된다. 한 조의 복합음원 내 두 개의 단극음원의 세기는 각각 별도의 제어 채널을 구성하여 제어 되는 것이 아닌, 수음점 쪽에 위치한 음원의 세기에 다른 하나가 상수배로 비례하여 제어된다. 따라서 제어 시스템의 하드웨어 구성 비용이 낮아지며, 단극음원 하나당 한 채널로 구성되는 제어시스템에 비하여 비교적 세밀한 음장 형성이 가능하다고 알려져 있다. 본 연구에서는 이러한 복합음원을 방음벽 양 쪽에 무반사 바닥면을 가지는 비교적 간단한 시스템에 적용하여 단극음원 대비 어느 정도의 효용성이 있는지 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 알아보았으며 30~40 % 정도의 성능 향상이 가능함을 보여주었다.

핵심용어: 방음벽, 복합음원, 단극음원, 능동제어

투고분야: 소음 및 공력음향 분야 (10.6)

This preliminary study is about the application of the compound source to the active noise barrier system as control sources. A compound source is composed of two monopole sources but having opposite phase. However, both monopole sources in one compound source are not independently controlled. The source strength of monopole source close to the noise source is proportional to the other one. Therefore, the cost for the hardware system is cheaper than usual system but known to possibly having a similar performance in generating anti-noise acoustic field. In this study, using a simple active noise barrier system model having a non-reflective floor, the effectiveness of the system with compound sources is investigated through computer simulations and shows 30~40 % performance improvement of noise reduction.

Keywords: Active Noise Barrier, Compound Source, Monopole Source, Active Control

ASK subject classification: Noise and Aeroacoustics (10.6)

I. 서론

방음벽의 연구는 이론적 모델링의 역사가 1900년 이전으로 매우 오래되지만 능동방음벽에 관한 연구는 1990년 이후 Omoto [1]에 의하여 실험을 동반한 실질적인 연구가 시작되었다고 볼 수 있다. Omoto는 그 연구에서 방음벽 모서리에서 소음을 상쇄하여 방음벽에 의한 음영지역에서 소음 감소 효과를 증대시키고자 하였다. 비교적 최근의 연구로는 Ohnishi [2] 등의 연구 결과가 있는데, 현장

적용 전 단계의 시험모델 열개 및 구조에 대하여 비교적 상세하게 발표되었으며 약 3~5 dB 정도의 추가 삽입 손실이 가능함을 실물 크기 정도의 실험 결과에서 밝혔다. 이 실험 결과는 주 소음원이 실제 소음이 아니라 아스팔트 바닥면을 향하고 있는 스피커에 의해 방사된 소음에 의한 결과이지만 능동 방음벽의 실용 가능성에 대한 가장 근접한 연구 결과라 할 수 있다.

능동방음벽에 의한 성능 예측은 어느 정도 이상화된 수학적 모델링에 근거한 컴퓨터 시뮬레이션이 주를 이루게 된다. 수동적인 단순 방음벽에 의한 회절 현상의 모델링은 MacDonald [3]의 연구 결과가 가장 많이 인용 된다. 많은 사람들이 방음벽과 관련한 경험식 또는 이론적 모델

링과 실험을 하였으며 Li [4]는 이러한 연구들을 요약, 비교하였다. 본 연구에서는 MacDonald 및 Bowman [5]의 모델링에 바탕을 두어 시뮬레이션을 하였다.

일반적으로 능동 방음벽의 경우 마이크론의 배치 간격이 제어 음원 파장의 절반보다 작아야 소음 감소의 효과가 있다고 알려져 있으며 Shao [6]는 제어음원의 배열 형태에 관하여 연구 결과를 보여 주었으며 Yang [7]은 소음원과 제어 음원 사이의 평균거리에 관하여 연구를 하였다. 국내의 최근 연구 결과로는, 정성수 [8]등이 수동형 방음벽의 상단 형상 등에 의한 삽입 손실 효과에 대하여 연구하였으며 고효인 [9]에 의한 능동형 제어 시스템에 대한 연구가 있으나 그 이후로는 크게 주목할 만한 연구 결과가 없다.

능동방음벽의 실용성 및 성능 개선을 위해서는 제어 시스템의 하드웨어 구성이나 알고리즘 이외에 제어 음원과 오차 센서의 종류와 위치 선택도 매우 중요하다. 본 연구에서는 위에서 언급한 요소 중에서 제어 음원의 한 형태로 Chen [10]의 복합음원 (compound source)의 적용 가능성에 대하여 알아보았다. Chen은 복합음원을 무한 자유음장에서의 방사 소음에 적용하여 능동적으로 제어하고자 하였다. 복합음원은 제어 파장 대비 근접거리에 위치하며 위상이 반대인 두 개의 단극음원으로 구성된다. 한 조의 복합음원 내 두 개의 단극음원의 세기는 각각 별도의 제어 채널을 구성하여 제어 되는 것이 아니어서 제어 시스템의 하드웨어 구성 비용이 낮아지며, 단극음원 한 개당 한 채널로 구성되는 제어시스템에 비하여 비교적 세밀한 음장 형성이 가능하다고 알려져 있다. 본 연구에서는 이러한 복합음원을 제어 음원으로 사용하여, 방음벽 양 쪽에 무반사 바닥면을 가지는 비교적 간단한 시스템에 적용, 단극음원 대비 어느 정도의 성능 향상이 가능할 지 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 알아보았다.

II. 방음벽에 의한 음장과 복합음원의 모델링

방음벽의 크기는 수평방향으로 반 무한 평면을 가정하였으며 지면에서의 반사는 없는 경우에 대하여 다루었다. 방음벽 양쪽이 반사면인 경우 음원의 바닥면에 대한 이미지와 수음점의 바닥면에 대한 이미지를 고려하면 음원 1 개에 대하여 4가지 음장 계산 경로가 발생한다. 따라서 주 소음원 및 제어음원에 대하여 이러한 경우를 모두 고려하면 계산은 가능하다. 그러나 본 연구에서는 능동

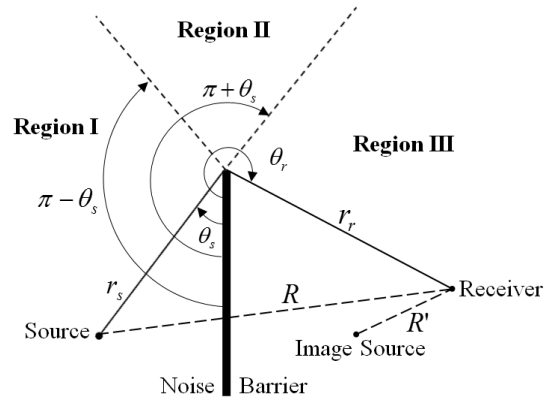


그림 1. 반 무한 평면을 갖는 방음벽에 의한 음장 선도
Fig. 1. Schematic diagram of the acoustic field by a semi-infinite noise barrier.

방음벽에는 처음 적용되는 복합음원의 적용 가능성, 즉 단극음원 대비 효율성이 있는가에 초점을 맞추었기에 바닥면이 없는 비교적 간단한 음장의 경우를 가정하여 시뮬레이션 하였다. 바닥면 반사까지 고려하면 능동시스템에 의한 수음점에서의 추가 삽입 손실이 고려된 이미지에 의한 음장의 복잡성 때문인지 아니면 복합음원의 비효율성 때문인지 판단하기가 애매 할 것으로 예상되었기 때문이다.

주 소음원은 하나의 단극음원으로 가정하였고 제어음원은 반대위상을 갖는 한쌍의 단극음원으로 구성된 복합음원으로 가정하였다. 방음벽에 의한 음의 회절과 수음점에서의 음압 등 전체 시스템 모델링은 MacDonald의 방법을 따랐으며 주요 수식을 요약하면 다음과 같다. 그림 1은 방음벽과 음원 및 수음점의 위치에 따른 음장의 영역이 크게 세 영역으로 구분되어는 것을 보여주고 있다. 각 영역별 음장은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \text{Region I} & : p_T = p_d + p_r + p_D \\ \text{Region II} & : p_T = p_d + p_D \\ \text{Region III} & : p_T = p_D \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 p_d 는 음원에 의해 직접적 영향을 받는 음장, p_r 은 방음벽에 의하여 반사된 음장, p_D 는 방음벽에 의하여 회절된 음장을 나타낸다. 이때 p_d 와 p_r 은 각각 다음과 같이 주어진다.

$$p_d = \frac{A}{kR} e^{ikR} \tag{2}$$

$$p_r = \frac{A}{kR'} e^{ikR'} \tag{3}$$

여기서 R 과 R' 은 각각 음원 및 이미지 음원으로부터 수음점까지의 거리를 의미하고 k 는 파동수를 나타낸다. 그리고 $A = -iZ_0q$, $Z_0 = \omega^2\rho_0/4\pi c_0$ 이며 ω 는 음원의 각진동수, q 는 음원의 세기, ρ_0 는 공기의 밀도, c_0 는 공기 중 음파의 속도를 나타낸다. $R_1 = r_s + r_r$ 으로 주어지며 음원으로부터 방음벽 상단을 통한 수음점까지의 최단거리를 나타낸다. 한편 p_D 는 $kR_1 \gg 1$ 인 경우 다음과 같이 주어진다.

$$p_D = -\sqrt{\frac{2}{\pi k R_1}} A e^{-i\pi/4} \times \text{sgn}(\pi + \theta_s - \theta_r) \frac{e^{ikR}}{\sqrt{k(R_1 + R)}} F[\sqrt{k(R_1 - R)}] + \text{sgn}(\pi - \theta_s - \theta_r) \frac{e^{ikR'}}{\sqrt{k(R_1 + R')}} F[\sqrt{k(R_1 - R')}] \quad (4)$$

함수 F 는 Fresnel 적분 함수를 나타내며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(\mu) = \int_{\mu}^{\infty} e^{ix^2} dx \quad (5)$$

한편 L 개의 제어음원과 M 개의 오차마이크로폰사이의 음향전달특성을 나타내는 $M \times L$ 복소 임피던스행렬 Z 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z = \frac{-i\omega\rho_0}{4\pi} \begin{bmatrix} e^{ikr_{11}} & e^{ikr_{12}} & \dots & e^{ikr_{1L}} \\ r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1L} \\ e^{ikr_{21}} & e^{ikr_{22}} & \dots & e^{ikr_{2L}} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2L} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{ikr_{M1}} & e^{ikr_{M2}} & \dots & e^{ikr_{ML}} \\ r_{M1} & r_{M2} & \dots & r_{ML} \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서 r_{ij} 는 i -번째 오차 마이크로폰과 j -번째 제어 음원 사이의 거리를 나타낸다. 본 연구에서 사용되는 제어 음원의 경우 그림 1과 같이 두 개의 단극음원이 한 쌍이 되어 하나의 복합음원을 구성하므로, 수음점에 가까운 제어 음원들과 오차 마이크로폰 사이의 음향전달특성을 Z_1 , 주 소음원을 향하고 있는 제어 음원들과 오차 마이크로폰 사이의 전달 특성을 Z_2 라 할 때, 주 소음원 및 제어 음원들에 의한 수음점에서의 음압 $p(M \times 1$ 복소 벡터)는 다음과 같이 복소 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$p = p_p + [Z_1 \quad Z_2] \begin{bmatrix} q_{s1} \\ \dots \\ q_{s2} \end{bmatrix} = p_p + Z_1 q_{s1} + Z_2 q_{s2} \quad (7)$$

p_p 는 주 소음원에 의한 수음점에서의 음압을 나타내며 q_{s1} 과 q_{s2} 는 각각 수음점에 가까운 제어음원들의 세기와 주 소음원에 가까운 제어음원들의 세기를 나타내는 $L \times 1$ 복소 벡터 들이다. 일반적인 능동제어시스템처럼 총 2 L 개의 제어음원이 각각의 제어 채널을 가지는 경우라면 $[Z_1 \quad Z_2]$ 행렬은 $M \times 2L$, $[q_{s1} \quad q_{s2}]^T$ 벡터는 $2L \times 1$ 의 크기를 가지게 된다. 그러나 본 연구에서 적용하는 복합음원의 경우 주 소음원에 가까운 음원의 세기 q_{s2} 는 수음점에 가까운 음원의 세기 q_{s1} 에 상수배로 비례하며 위상이 반대이므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} q_{s2_1} \\ q_{s2_2} \\ \vdots \\ q_{s2_L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -a_{22} & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -a_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_{s1_1} \\ q_{s1_2} \\ \vdots \\ q_{s1_L} \end{bmatrix} \quad (8)$$

따라서 복합음원 한 개에 하나의 제어 채널만을 사용하여 두 개의 단극음원을 제어할 수 있다. 각 복합음원 내 두 번째 단극음원에는 첫 번째 단극음원의 신호에 정해진 상수배의 이득만을 갖도록 하면 되기 때문이다. 여기에 추가로 각 복합음원마다 다른 상수 a_{ii} 를 사용하지 않고 통합된 하나의 상수 a 를 사용하여 더 간단한 제어 형태로 정리하면 $q_{s2} = -a q_{s1}$ 로 표현되므로 (7)식은 다음과 같이 정리된다.

$$p = p_p + Z_1 q_{s1} - a Z_2 q_{s1} = p_p + (Z_1 - a Z_2) q_{s1} = p_p + Z_T q_{s1} \quad (9)$$

$Z_T = Z_1 - a Z_2$ 이며 총 음압 신호 제곱의 합을 최소화하는 최적의 제어 음원 세기 q_{opt} 는 다음과 같다.

$$q_{opt} = -[Z_T^H Z_T]^{-1} Z_T^H p_p \quad (10)$$

복합음원 또는 단극음원을 이용한 능동방음벽에 의한 성능 추정은 능동 제어 시스템의 작동 전, 후의 수음점 음압의 비로, 추가적 삽입 손실 (Insertion Loss) Additional IL 로 나타내었다.

$$\text{Additional } IL = 20 \log(|p_{\text{control off}}|/|p_{\text{control on}}|) \quad (11)$$

III. 컴퓨터 시뮬레이션 결과

그림 2와 같이 3개의 수음점은 방음벽 모서리의 수직 위치에서 0.72 m 아래에, 또 다른 3개는 1.12 m 아래에 위치시키고 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. z-축의 위치는 xy평면에 수직이며 방음벽의 모서리를 따라서 위치한다. 160 Hz 순음의 주 소음원의 위치는 직교 좌표로 (-2.0 m, -1.06 m, 0.0 m)이며 복합음원의 위치와 방향은 주 소음원과 방음벽 모서리를 잇는 선상에 위치시켰다. 2개의 단극음원이 한 조를 이루어 총 16조의 복합음원이 z축 방향으로 z=0을 중심으로 좌우 대칭 형태로 0.4 m 등 간격으로 배열하였다. 오차 마이크로폰 역시 총 16개가 사용되었으며 각 복합음원과 동일한 z축 좌표를 가지도록 배열하였으며 그 위치는 그림 2에 보이는 것과 같이 방음벽 모서리에서 떨어진 거리와 각도로 나타내었다. 주요 제한 및 주파수는 Niu [11]의 연구 결과와 비교 검증하기 위하여 동일하거나 유사하게 정해졌다.

그림 3은 오차 마이크로폰의 위치는 방음벽 모서리에서 0.1 m 연직 상방 ($r=0.1$ m, $\theta=180^\circ$)에 위치시키고 복합음원의 거리 r (그림 2의 오차 마이크로폰에 대한 정의와 동일하게 방음벽 모서리로부터 떨어진 거리를 의미함)에 따른 영향을 보여주고 있다. 복합음원 내 두 단극음원 간 거리 (이하 Δd 라 지칭)는 0.2 m이며, 복합음원 세기의 비 (이하 a로 지칭)는 0.05인 경우이다. 복합음원 위치가 방음벽 모서리에서 떨어질수록 거의 선형적으로 비례하여 추가삽입손실치가 커지며 모든 수음점에서 유사한 경향을 보이고 있다. 이는 제어 음원이 점점 주 소음원에 가까이 다가갈수록 능동시스템의 성능이 좋아진다는 의미이므로, 일반적인 능동소음제어시스템의 경향 일치하는 결과이기도 하다.

그림 4는 복합음원의 거리 r을 0.12 m로 하고 나머지

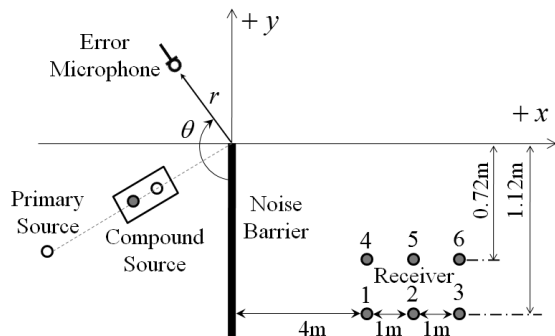


그림 2. 능동방음벽의 음원, 오차마이크로폰 및 수음점 배치도
Fig. 2. Layout of sources, error microphones and receiver positions.

조건은 그림 3과 같은 상태에서 오차 마이크로폰이 연직 상방으로 방음벽 모서리에서 떨어진 거리에 따른 변화를 보여주고 있다. 수음점1과 2에서는 0.1 m에서 최대의 추가삽입손실을 가져오지만 나머지 수음점에서는 0.12 m 일 때 최대의 추가삽입손실이 있음을 알 수 있다. 복합음원과의 거리 때문이기도 하지만 기본적으로 0.1-0.14 m 범위 밖의 오차 마이크로폰 거리에 대해서는 성능이 급격히 떨어진다. 이는 회절 현상이 발생하는 방음벽 모서리에서 오차 신호 감지 거리가 멀어지면서 수음점과의 음장 상관관계가 떨어지기 때문일 것이다. 반면 너무 가까운 경우에는 오차 마이크로폰과 복합음원 내 두 개의 단극음원이 일직선상에 가깝게 위치하게 됨에 따라 주 소음원에 가까운 단극음원의 기여도가 떨어지기 때문인 것으로 추정된다. 그림 5는 그림 4와 동일한 조건에서 복합음원 세기의 비 a 값을 0.05에서 3.2로 바꾼 결과이다. a값이 1보

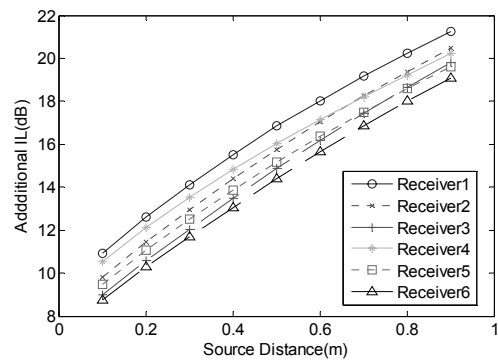


그림 3. 복합음원 위치에 따른 수음점에서의 추가 삽입손실 (오차 마이크로폰: $r=0.1$, $\theta=180^\circ$, 제어음원: $\Delta d=0.2$, $a=0.05$)
Fig. 3. Additional insertion loss at the receiver positions with the position of compound source (error microphone: $r=0.1$, $\theta=180^\circ$, control source: $\Delta d=0.2$, $a=0.05$).

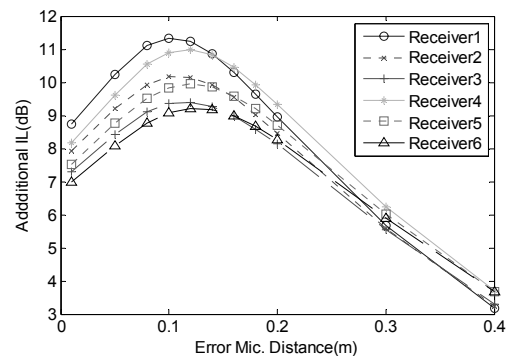


그림 4. 오차 마이크로폰 위치에 따른 수음점에서의 추가 삽입손실 (오차 마이크로폰: $\theta=180^\circ$, 제어음원: $r=0.12$, $\Delta d=0.2$, $a=0.05$)
Fig. 4. Additional insertion loss at the receiver positions with the error microphone position (error microphone: $\theta=180^\circ$, control source: $r=0.12$, $\Delta d=0.2$, $a=0.05$).

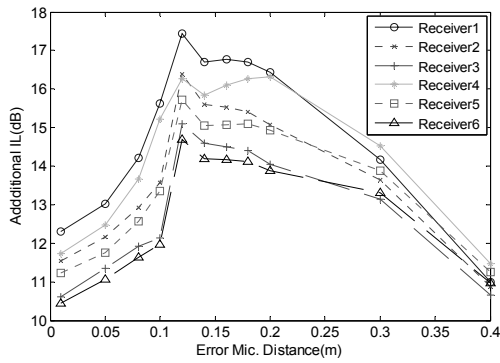


그림 5. 오차 마이크론 위치에서 다른 수음점에서의 추가 삽입손실 (오차 마이크론: $\theta=180^\circ$, 제어음원: $r=0.12$, $\Delta d=0.2$, $a=3.20$)
 Fig. 5. Additional insertion loss at the receiver positions with the error microphone position (error microphone: $\theta=180^\circ$, control source: $r=0.12$, $\Delta d=0.2$, $a=3.20$).

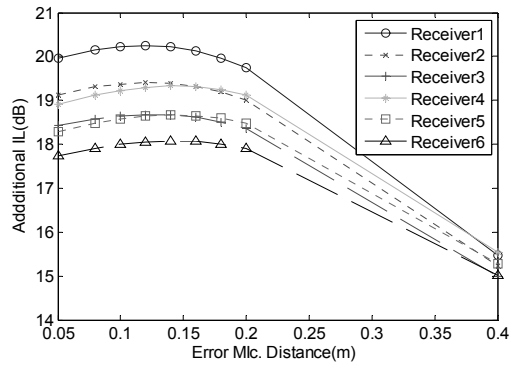


그림 7. 오차 마이크론 위치에서 다른 수음점에서의 추가 삽입손실 (오차 마이크론: $\theta=180^\circ$, 제어음원: $r=0.80$, $\Delta d=0.2$, $a=0.05$)
 Fig. 7. Additional insertion loss at the receiver positions with the error microphone position (error microphone: $\theta=180^\circ$, control source: $r=0.80$, $\Delta d=0.2$, $a=0.05$).

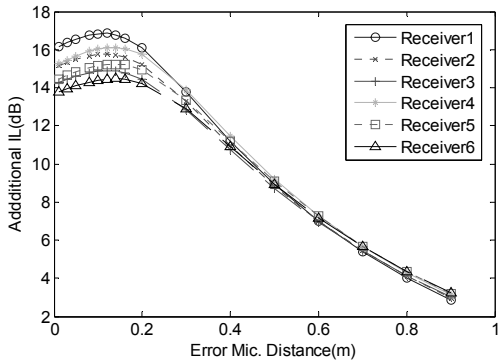


그림 6. 오차 마이크론 위치에서 다른 수음점에서의 추가 삽입손실 (오차 마이크론: $\theta=180^\circ$, 제어음원: $r=0.50$, $\Delta d=0.2$, $a=0.05$)
 Fig. 6. Additional insertion loss at the receiver positions with the error microphone position (error microphone: $\theta=180^\circ$, control source: $r=0.50$, $\Delta d=0.2$, $a=0.05$).

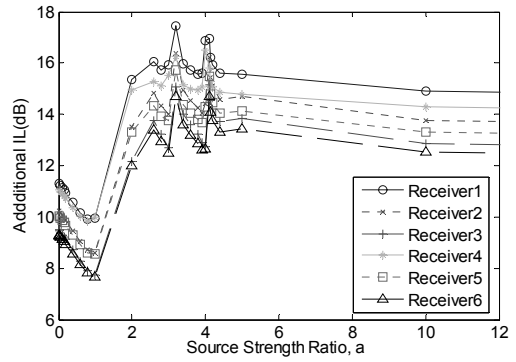


그림 8. 복합음원 세기의 비, a 값 변화에 따른 수음점에서의 추가 삽입손실 (오차 마이크론: $r=0.12$, $\theta=180^\circ$, 제어음원: $r=0.12$, $\Delta d=0.2$)
 Fig. 8. Additional insertion loss at the receiver positions with compound source strength ratio a. (error microphone: $r=0.12$, $\theta=180^\circ$, control source: $r=0.12$, $\Delta d=0.2$).

다 커졌다는 것은 주 소음원을 향한 단극음원의 세기가 더 크다는 것을 의미한다. 오차 마이크론의 위치가 연직 상방으로 0.12 m 떨어졌을 때 명확히 최대의 추가 삽입손실을 가져오며 이후 거리 증가하면 수음점 위치에 따라 다소 다르지만 전체적으로 추가 삽입손실 값은 줄어든다. 그림 4의 경우 수음점에 따라 추가 삽입손실의 최대값은 9.2-11.3 dB 이었지만 그림 5의 경우에는 14.7-17.4 dB로 월등히 좋은 결과를 보여주고 있다.

그림 6은 그림 4의 조건과 비교할 때 복합음원의 거리 r이 0.50 m로 바뀐 경우의 결과이다. 복합음원의 거리가 길어져 주소음원에 가까워짐에 따라 전체적으로 추가 삽입손실 값이 명백히 커졌음을 알 수 있다. 이 경우에도 오차 마이크론이 0.12 m 떨어진 경우에 제일 좋은 결과를 보여주었다. 오차 마이크론의 거리가 방음벽 모서리에서 0.4 m 정도 이상이 떨어지면서 수음점에 따른 차

이가 거의 없다. 이는 수음점과 오차 마이크론 간의 상관관계가 많이 떨어져서 수음점 위치 변화에 따른 성능 차이가 없음을 의미하는 것으로 판단된다. 그림 7은 그림 6의 조건에서 복합음원의 거리 r을 0.80 m로 바꾼 결과이다. 복합음원의 거리가 더 떨어져서 주 소음원에 더 근접함에 따라 더 큰 추가삽입손실 값을 보여주며 이는 앞서의 고찰이 옳았음을 보여주는 것으로 판단된다. 여전히 오차 마이크론이 0.12 m 떨어진 경우에 제일 좋은 결과를 보여주고 있으나 0.05-0.20 m의 범위에서는 큰 차이는 없다.

그림 8은 지금까지의 결과 중 오차 마이크론 ($r=0.12$ m, $\theta=180^\circ$)과 복합음원($r=0.12$ m, $\Delta d=0.2$ m)에 관한 가장 좋은 조건의 조합에 대하여 복합음원 세기의 비 a 값의 영향을 보여주고 있다. 다소 복잡한 경향을 보여주고 있으나 6개의 모든 수음점에서 $a=3.2$ 와 4.1에서

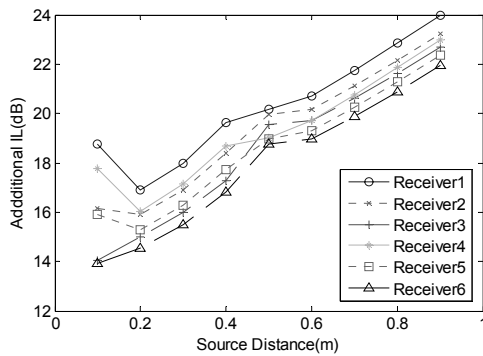


그림 9. 복합음원 위치에 따른 수음점에서의 추가 삽입손실 (오차 마이크로폰: $r=0.12$, $\theta=180^\circ$, 제어음원: $\Delta d=0.2$, $a=3.20$)

Fig. 9. Additional insertion loss at the receiver positions with the position of compound source (error microphone: $r=0.12$, $\theta=180^\circ$, control source: $\Delta d=0.2$, $a=3.20$).

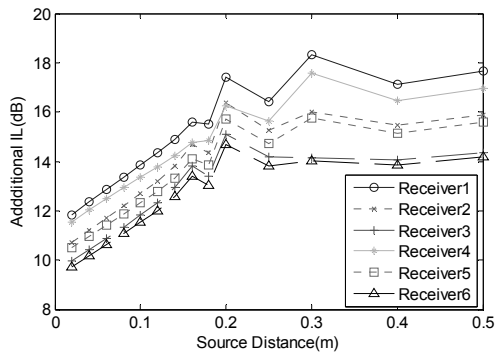


그림 10. 복합음원 이격거리 (Δd)에 따른 수음점에서의 추가 삽입손실 (오차 마이크로폰: $r=0.12$, $\theta=180^\circ$, 제어음원: $r=0.12$, $a=3.20$)

Fig. 10. Additional insertion loss at the receiver positions with the compound source distance Δd (error microphone: $r=0.12$, $\theta=180^\circ$, control source: $r=0.12$, $a=3.20$).

스파이크 형태의 최대값을 보여주고 있으나 평균적으로 a 값이 2.4~5 사이에서는 큰 차이가 없는 것으로 보인다. 이에 대한 명확한 이유를 설명하기는 어려우며 주 소음원, 복합음원, 오차 마이크로폰, 수음점의 위치와 복합적인 상관성이 있는 것으로 추정된다. 그림 8에서 주목할 점은 a 가 0에서 2까지 변하는 구간의 결과이다. $a=0$ 인 경우 복합음원이 아닌 하나의 단극음원을 사용하는 일반적 능동제어시스템과 동일한 경우의 결과이다. 따라서 복합음원의 사용이 평균적으로 4 dB 정도 또는 그 이상의 추가 삽입손실 효과가 있음을 알 수 있다. a 값이 0에서 1.5 정도까지는 오히려 하나의 단극음원을 쓰는 것이 더 낫다는 것을 알 수 있다.

그림 9의 결과는 그림 3의 결과와 대비되는 결과로서 오차 마이크로폰의 거리 및 a 값에 차이가 있다. a 값의 영

향으로 전체적으로 그림 3의 결과에 비해 2~5 dB 정도 좋은 결과를 보이는 것으로 판단되며 그림 3에 비해서 단순 증가가 아닌 구간이 작은 복합음원 거리 r 값에 대하여 존재함을 볼 수 있다. 그림 10은 복합음원 내 단극음원 간 거리 Δd 의 영향을 보여주고 있다. 다른 나머지 요소들의 값은 최적의 결과를 보여준 값을 사용하였다. $\Delta d=0.16$ m까지는 두 음원간 거리가 멀어질수록 성능이 거의 선형적으로 향상되었으나 그 이후에는 거리 증가가 다소 불규칙한 성능 향상을 가져오며 0.3 m 이상에서는 성능 향상이 미약함을 알 수 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 능동방음벽의 제어 음원으로 복합음원의 적용 가능성에 대하여 알아보았다. 방음벽 양쪽에 무반사 바닥면을 가지는 비교적 간단한 시스템에 적용, 단극음원 대비 어느 정도의 성능 향상이 가능할 지 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 알아보았다. 근접 거리에 위치한 위상이 반대인 두 개의 단극음원으로 구성되는 복합음원의 세기 조절은 하나의 제어 채널만을 이용되 복합음원 내 주 소음원을 향한 단극음원의 세기는 반대쪽을 향한 음원의 세기에 반대 위상의 상수배로 비례하도록 제어하여, 동일한 수의 독립된 단극음원이 사용되는 제어 시스템에 비하여 하드웨어 구성 단가 및 제어 알고리즘과 속도에 이점이 있다.

총 16개의 제어 음원을 사용할 때, 일반적 단극음원 형태의 제어 시스템 대비 복합음원 사용 시 평균 4 dB 이상의 추가 삽입손실 증가 효과가 있었다. 복합음원의 경우 두 배의 제어 음원이 사용되므로 다소 이점이 있을 수 있으나, 제어 채널의 수나 장비가 16채널용 그대로를 사용가능하므로 음원 구동용 파워 앰프나 이득 조절을 위한 추가 부속만으로 30~40% 정도의 성능 향상이 예상되는, 경제성 및 효율성이 있는 제어 음원 시스템인 것으로 판단된다. 비록 160 Hz 하나의 주파수에 대한 시뮬레이션이었지만 다양한 조합의 오차 마이크로폰 위치 및 복합음원 위치와 조건에 대한 계산 결과에서 최적의 성능을 내는 조합을 알아내었으며 전체적으로 일관된 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있었다. 방음벽 양단이 무반사 바닥면이라는 제한된 조건의 결과이기는 하지만 충분히 본 연구의 목적을 이루었다고 본다. 추후의 연구에서 바닥면 반사, 복합음원의 위치 및 오차 마이크로폰 위치 등에 대한 현실적 제한 조건이 엄격히 고려된 경우에 대하여 수행되면 현장 적용 가능성이 높을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었습니다.

참고 문헌

1. A. Omoto and K. Fujiwara, "A study of an actively controlled noise barrier," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 94, no. 4, pp. 2173–2180, 1993.
2. K. Ohnishi, et al, "Development of the product-type active soft edge noise barrier," *18th International Congress on Acoustics*, vol. II, pp. 1041–1044, 2004.
3. H. M. MacDonald, "A class of diffraction problems," *Proc. London Math. Society*, vol. 14, no. 1, pp. 410–427, 1915.
4. K. M. Li and H. Y. Wong, "A review of commonly used analytical and empirical formulae for predicting sound diffracted by a thin screen," *Applied Acoustics*, vol. 66, no. 1, pp. 45–76, 2005.
5. J. J. Bowman, T. B. A. Senior and P. L. E. Uslenghi, "Electromagnetic and acoustic scattering by simple shapes," Chap. 8, Hemisphere Publishing Co., New York, 1987.
6. J. Shao, J. Z. Sha and Z. L. Zhang, "The method of the minimum sum of squared acoustic pressures in an actively

- controlled noise barrier," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 204, no. 2, pp. 381–385, 1997.
7. J. Yang and W. S. Gan, "On the actively controlled noise barrier," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 240, no. 3, pp. 592–597, 2001.
8. 정성수, 김용태, 이우섭, "방음벽 상단부 형상에 따른 삽입손실 연구," *한국음향학회지*, 21권, 7호, 624–631쪽, 2002.
9. 고효인, "능동제어를 통한 방음벽 상단 모서리의 음향임피던스의 효과," *한국음향학회 2004년도 추계학술발표대회논문집*, 23권, 2호, 561–564쪽, 2004.
10. W. Chen, H. Pu and X. Qiu, "A compound secondary source for active noise radiation control," *Applied Acoustics*, vol. 71, no. 2, pp. 101–106, 2010.
11. F. Niu, H. Zou, X. Qiu and M. Wu, "Error sensor location optimization for active soft edge noise barrier," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 299, no. 1–2, pp. 409–417, 2007.

저자 약력

●백 광 현 (Kwang-Hyun Baek)

1992년: ISVR, Southampton University (MSc)
1996년: ISVR, Southampton University (Ph.D.)
1999년 3월 ~ 현재: 단국대학교 기계공학과 부교수