

# 제어 음원이 방음벽 모서리에 설치되는 능동방음벽의 오차센서 위치에 관한 연구

## Study on the Position of Error Sensors in an Active Soft Edge Noise Barrier

백 광 현\*

Kwang-Hyun Baik

(2010년 11월 16일 접수 ; 2010년 11월 29일 심사완료)

**Key Words** : Active Control(능동 제어), Noise Barrier(방음벽), Error Sensor Position(오차센서 위치)

### ABSTRACT

Based on the MacDonald's analytic model for the diffracted sound field of a semi-infinite noise barrier, computer simulations were performed for various positions of error microphones for an active noise barrier system. The simulation process also included the effects of floor reflections on both sides of the barrier. The results were also compared with Niu's simulation results and showed a straight line arrangement of sensors and actuators, in the order of primary source, secondary source and error microphone is better than over the top arrangement of the error microphones.

### 1. 서 론

방음벽에 있어서 그 존재에 의한 음영지역에 대한 연구는 그 역사가 상당히 오래된다. 이 논문 및 방음벽관련 논문들에서 주로 인용된 MacDonald<sup>(1)</sup>의 연구도 1915년으로 거슬러 올라간다. 그 외에도 상당히 많은 사람들이 방음벽과 관련한 경험식 또는 이론적 모델링과 실험 결과를 발표했으며 이에 대한 내용은 Li<sup>(2)</sup>의 논문에 잘 요약 비교되어 있다. Li는 그 논문에서 MacDonald와 Hadden과 Pierce<sup>(3)</sup>의 두 가지 해석적 방법과 Fresnel과 Kirchoff의 방법을 포함한 두 가지의 근사식에 대하여 주로 기술하였다. 이 연구에서는 MacDonald의 식에 바탕을 두어 시뮬레이션이 이루어졌다.

능동 방음벽의 경우 Omoto<sup>(4)</sup>에 의하여 본격적으로 연구가 시작되었다고 볼 수 있는데 마이크로폰

의 배치 간격이 제어 음원 파장의 절반보다 짧은 경우에 소음 감소 효과가 효과적임을 시뮬레이션 및 실험을 통하여 보여주었다. Shao<sup>(5)</sup>는 제어소스의 직선 및 원호 형태의 배열에 따른 성능차이에 대하여 연구하였으며 Yang<sup>(6)</sup>은 배열 형태보다는 소음원과 제어 음원 사이의 평균거리가 중요하다고 주장하였다. Baik<sup>(7)</sup>의 경우 Shao와 Yang의 연구 결과를 바탕으로 제어 음원 위치의 배열 형태를 좀 더 일반화하여, 어떤 위치가 더 최적의 결과를 보이는지에 대하여 연구하였다.

비교적 최근의 연구 결과로는 Niu<sup>(8)</sup>의 오차센서 위치에 관한 논문이 있다. Niu와 그의 동료들은 이 논문에서 능동방음벽(active noise barrier)이라는 용어 대신 능동 연질모서리 방음벽(active soft edge noise barrier)이라는 용어를 사용하였다. 방음벽 상단 모서리를 따라 음압을 최소화하여 음향학적으로 부드러운 모서리(soft edge)를 갖게 한다는 의미에서 사용되었으나 용어의 비 일관성 및 큰 범주에서는 이 또한 능동방음벽에 속하므로 이 논문에서는

\* 교신저자; 정회원, 단국대학교  
E-mail : khbaek@dankook.ac.kr  
Tel : (031)8005-3501, Fax : (031)8005-3509



로 주어지는 Fresnel 적분 함수이다.

여기에 바닥면의 반사를 고려하려면, 음원 및 수음점의 바닥면에 대한 이미지를 고려해 주어야한다. 일반적 능동방음벽의 관심 지역인 영역III에 수음점이 위치할 경우 방음벽 양쪽의 바닥면에 의한 반사는 Fig. 2와 같이 네 개의 경로를 고려해야 한다. 첫째는 음원으로부터 수음점까지 직접적 경로, 둘째로는 음원 쪽 바닥면 반사를 고려하기위한 음원의 이미지로부터 수음점까지의 경로, 셋째로는 음원으로부터 수음점 쪽 바닥면의 반사를 고려하기 위한 수음점 이미지까지 음원으로부터의 경로, 마지막 넷째로는 음원의 이미지로부터 수음점 이미지까지의 경로이다.

따라서 방음벽을 중심으로 양쪽 모두 바닥면의 반사를 고려한다면, 주 소음원과 제어 음원에 의해 영역III의 수음점에서 형성되는 음장에 대한 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p = \sum_{j=1}^4 p_{pri.D} + \sum_{j=1}^4 \sum_{n=1}^N p_{sec.D}(n,j) \quad (8)$$

첫째 항은 주 소음원에 의한 기여를, 둘째 항은 총  $N$ 개의 제어 음원에 의한 기여를 나타낸다. 또한 각각의 음원에 대하여 4가지 경로를 모두 고려해야 함을 나타내고 있다.

제어 음원의 경우 직접음과 바닥면 반사에 의한 음을 고려해야 하므로  $r$ 지점의 음압은,  $N$ 개의 제어 음원과 이미지에 의한 음압의 합으로 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

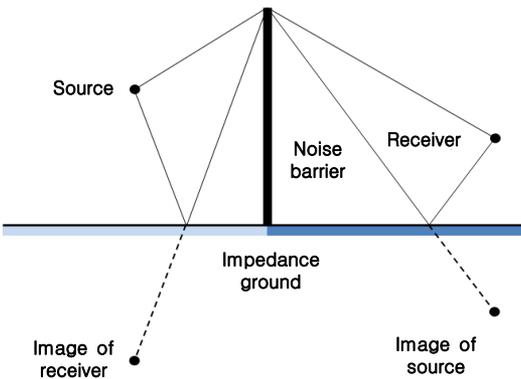


Fig. 2 Four pathways of sound diffraction over the barrier on reflective ground

$$p(\mathbf{r}) = \sum_{n=1}^N \left( \frac{i\omega\rho_0 q_n}{4\pi|\mathbf{r}-\mathbf{r}_n|} e^{-ik|\mathbf{r}-\mathbf{r}_n|} + \frac{i\omega\rho_0 q_n}{4\pi|\mathbf{r}-\mathbf{r}_n'|} e^{-ik|\mathbf{r}-\mathbf{r}_n'|} \right) \quad (9)$$

여기서  $q_n, \mathbf{r}_n, \mathbf{r}_n'$ 은 각각  $n$ 번째 제어 음원의 세기, 위치 벡터 및 이미지의 위치 벡터를 나타낸다.

능동 제어시스템에서 총  $N$ 개의 제어 음원과  $M$ 개의 오차 센서(마이크로폰)가 사용될 경우, 오차 센서에서 감지되는 총 음압의 신호  $P$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$P = P_p + Zq_s \quad (10)$$

$P_p$ 는 주 소음원에 의한  $M$ 개의 오차 센서에서의 음압 신호 벡터를,  $q_s$ 는  $N$ 개의 제어 음원 출력 벡터를,  $Z$ 는 오차 센서와 제어 음원간의 임피던스 행렬을 나타낸다. 이때 총 음압 신호 제공의 합을 최소화하는 최적의 제어 음원 세기  $q_{opt}$ 와  $Z$ 는 다음과 같다.

$$q_{opt} = -[Z^H Z]^{-1} Z^H P_p \quad (11)$$

$$Z = \begin{pmatrix} Z(r_1^e|r_1^c) & Z(r_2^e|r_2^c) & \dots & Z(r_1^e|r_M^c) \\ Z(r_2^e|r_1^c) & & & \\ \vdots & & \ddots & \\ Z(r_N^e|r_1^c) & & & Z(r_N^e|r_M^c) \end{pmatrix} \quad (12)$$

$r_n^e, r_m^c$ 를 각각 오차 센서 및 제어 음원의 위치 벡터라 할 때,  $Z$ 행렬의 각 요소는 다음의 식으로부터 계산되어진다.

$$Z(r_n^e|r_m^c) = \sum_{n=1}^N \left( \frac{i\omega\rho_0}{4\pi|r_n^e-r_m^c|} e^{-ik|r_n^e-r_m^c|} + \frac{i\omega\rho_0}{4\pi|r_n^e-r_m^c|} e^{-ik|r_n^e-r_m^c|} \right) \quad (13)$$

능동방음벽에 의한 성능 추정은 능동 제어시스템의 작동 전, 후의 수음점 음압의 비로, 다음과 같이 추가적 삽입 손실  $\Delta IL$ 로 나타내었다.

$$\Delta IL = 20 \log(|p_{off}|/|p_{on}|) \quad (14)$$

### 3. 컴퓨터 시뮬레이션 결과

Fig. 3과 같은 음원과 오차 센서들의 배치에서, 160 Hz 순음의 주 소음원(z축 좌표 0)은 방음벽 상단으로부터 2.2635 m 떨어져있고 1.22 m 높이의 방음벽과의 각도는 62.1도를 이루고 있다. 총 16개의 오차 마이크로폰과 16개의 제어 음원이 1대 1대응 형태로, z=0을 중심으로 +, - 방향으로 대칭 배치되었으며 각 음원 간, 센서 간 거리는 0.4 m로 하였다. 따라서 Fig. 3은 x-y 평면상의 배치만 보여주고 있다.

### 3.1 오차 마이크로폰 방향의 영향

Fig. 3과 같이 제어 음원을 방음벽 상단에 위치시키고 오차 마이크로폰과의 거리는 0.08 m로 고정시키고 방향( $\theta$ )을 바꾸어 가면서  $R_1 \sim R_6$ 의 수음점 위치에서의 추가적 삽입 손실을 계산하였다. 수음점의 위치는 그림과 같이 방음벽으로부터 4, 5, 6 m 떨어져 있고 바닥면에서는 0.1 m, 0.5 m 떨어져 있다. 방음벽과 오차 마이크로폰이 이루는 각도  $\theta$ 를

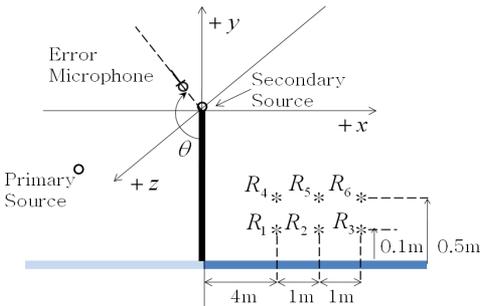


Fig. 3 Positions of error microphones and receivers

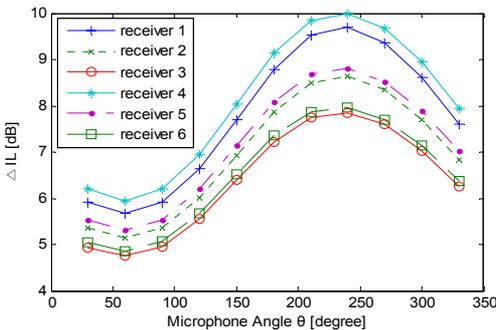


Fig. 4  $\Delta IL$  variations due to error microphone position angle change.(distance from the barrier edge located control sources are kept to 0.08m)

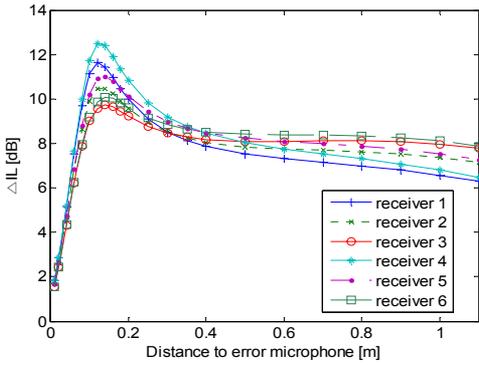
30~330°까지 30° 간격으로 바꾸어가며 6개의 수음점에서의 능동 제어시스템에 의한 추가적 삽입손실을 계산하여 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 제어 음원과 오차마이크로폰과의 거리를 0.08 m로 한 이유는 Niu의 연구 결과에서 제일 우수한 결과를 보여주었기 때문에 가장 최상의 조건이라 믿어지는 거리를 고정 시키고 오차 마이크로폰의 방향에 의한 영향을 고찰하기 위함이다. 수음점의 위치에 상관없이 전체적으로 매우 일관된 경향을 보여주고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 60°의 각도에서 가장 저조한 4.7~6.0 dB 정도의 추가 삽입손실이 계산되었다. 반면에 최고의 결과는 240° 근처에서 7.9~10.0 dB의 추가 삽입손실 값을 보여준다. 주 소음원이 방음벽이 이루는 각도가 약 62°인 것을 고려한다면 당연한 결과로 볼 수 있다. 60°인 경우 제어 음원의 제어 방향 주안점이 주 소음원을 향하여 있으므로 수음점에서의 결과가 안 좋아진 것으로 보인다. 또한 최고의 결과를 보여준 240°는 오차 마이크로폰의 위치가 그와는 정 반대로 위치한 경우이다. 240°(소음원, 제어 음원, 오차 마이크로폰의 순서로 직선 연결되는 배열)는 62°에 180°가 더해진 경우에 근접하므로 이 역시 앞서의 고찰과 동일한 맥락에서 설명되어진다.

Niu의 실험에서는 오차 마이크로폰의 각도를 90°, 180°, 270°의 세 위치에서만 수행하였는데 270° 위치에 있을 때와 180° 위치에 있을 때 거의 동일하게 좋은 결과를 보여 주었다. 방음벽의 두께가 존재하고 스피커의 지향성이 단극 음원과는 다르므로 실험 결과가 이 시뮬레이션 결과와 일치하는 경향이라 명확히 단언할 수는 없지만 90°의 실험 결과가 안 좋았다는 것으로 판단할 때 전체적으로 일치한다고 보인다.

### 3.2 오차 마이크로폰 거리의 영향

Niu의 경우 방음벽 상단에 위치한 제어음원으로부터 연직 상방의 180°에 위치한 오차 마이크로폰이 0.08 m 떨어진 경우가 최적이라고 주장하였다. 그러나 앞서의 결과에서 보듯이 최적의 방향이 240도인 경우 이러한 것은 더 이상 사실이 아닐 수 있다. 제어 음원과 오차 마이크로폰 사이의 거리를 0.01~1.1 m까지 변화시켜가며 시뮬레이션한 결과를

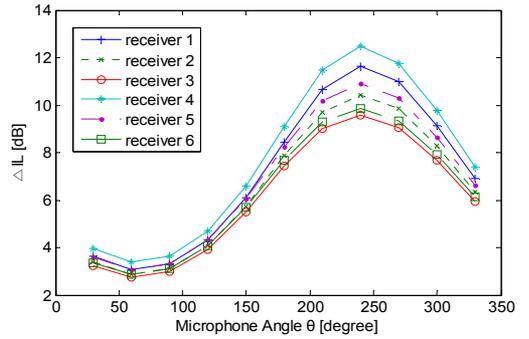


**Fig. 5**  $\Delta IL$  variations due to distance(from control source to error microphone) change.(the angle is kept to 240 degree)

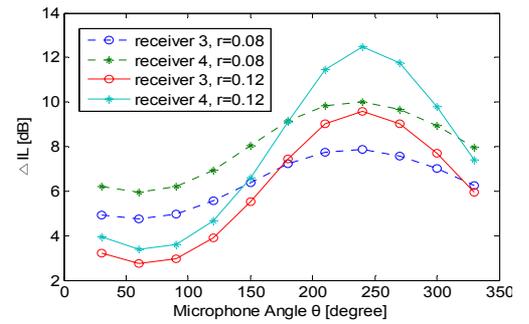
종합하여 Fig. 5에 나타내었다. 최적의 결과는 거리가 0.12 m 떨어진 경우에 9.6~11.6 dB 정도의 추가 삽입 손실을 수음점 위치에 가져올 수 있으며 거리가 0.08 m 떨어진 경우에 비하면 평균 2 dB 정도의 더 좋은 결과를 보여준다. 이러한 현상에 대한 근본적 원인으로는 앞서 설명한 방향성의 차이가 기본적으로 작동하기 때문인 것으로 보인다. Niu의 경우 오차 마이크로폰은 제어 음원에 대해서는 직접 음의 영향을 주로 받는 위치에 있지만 주 소음원에 대해서는 그렇지 못하므로 마이크로폰의 거리가 조금만 떨어져도 두 음원간의 상관관계 감지가 급속히 약해질 것으로 추정된다. 반면에 이 연구의 일직선상의 배열에서는 좀더 상관관계가 유지되므로 더 좋은 소음 감소 효과를 보이는 것으로 판단된다.

다만, 0.12 m 이상 마이크로폰의 거리가 멀어지면 파장의 절반 거리 이내에 있음에도 성능이 떨어지는 것은 점차로 회절의 중심 영역에서 떨어져 두 음원 사이의 다른 회절 정도에 대한 감지가 약해지고 이미지 소스에 의한 영향의 차이가 커지기 때문인 것으로 추정된다. 그러나 0.4 m 이상 거리가 멀어지면 더 이상 성능 저하 경향이 지속되지 않는다. 특히 수음점 3과 6이 그러한데 이들은 방음벽에서 가장 멀리 떨어진 지점으로 회절의 영향에 상대적으로 덜 민감하기 때문인 것으로 추정된다.

Fig. 6은 오차 마이크로폰과 제어 음원 사이의 거리를 0.12 m로 고정하고 다양한 오차 마이크로폰 각도에 대한 시뮬레이션 결과이다. Fig. 4에 보인 것과 같이 60°에서 최저, 240°에서 최고인 매우 유사한



**Fig. 6**  $\Delta IL$  variations due to error microphone position angle change.(distance to the barrier edge located control sources are kept to 0.12 m)



**Fig. 7**  $\Delta IL$  comparison for the best and worst results shown in Fig. 4 and Fig. 6

결과를 보이고 있다. 그러나 다른 점은 30~180까지와 330°에서는 수음점 위치의 차이에 따른 변화가 적다는 것이다. 이것은 비록 0.04 m 더 길어진 얼마 되지 않는 차이이지만, 오차 마이크로폰이 주 소음원과 제어 음원 사이에 놓이는 불리한 상황에서는 거리의 차이가 별로 크게 기여하지 못함을 명백히 보여주고 있다. Fig. 4와 Fig. 6의 두 경우에서 최선과 최악의 결과를 보여주는 수음점 3과 4의 결과를 함께 비교해 놓은 Fig. 7은 좀 더 명확히 어떤 영향이 있는지 보여주고 있다. 평균적으로는 Niu의 오차 마이크로폰 위치 설정 및 거리가 변동이 적다. 그러나 이것은 좋은 결과라기보다는 좋지 못한 설정에 기인한 전반적 성능 저하로 해석하는 게 옳은 것으로 판단된다. 이 연구에서 제시하는 일직선상의 에러 마이크로폰 위치 설정 방법에서는 최악의 수음점 위치에서도 Niu의 설정에서보다 훨씬 좋거나 유사한 결과를 보여주고 있다.

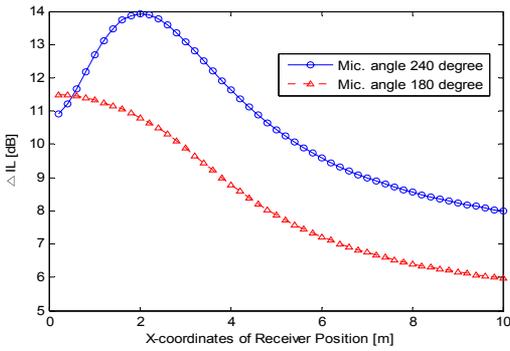


Fig. 8  $\Delta IL$  comparison for the error microphone angle of 240 degree( $r=0.12$  m) and 180 degree( $r=0.08$ )

Fig. 8은 이 연구에서 추정된 최적의 오차 마이크로폰 위치 및 Niu가 주장한 최적의 위치에 따른 시뮬레이션 결과의 비교이다. 수음점의 높이는 0.1 m로 고정하고 방음벽에서 수음점이 멀어짐에 따른 변화를 비교한 것이다. 방음벽에 아주 가까운 0.1~0.2 m의 영역을 제외하고는 이 연구에서 제시하는 위치 조건이 훨씬 우수한 결과를 가져 온다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

이 연구에서는 능동방음벽, 특히 그 중에서도 제어 음원을 방음벽 상단의 모서리에 위치시켜 음향학적으로 부드러운 모서리를 갖게 하는 시스템에서 어떠한 마이크로폰의 위치가 좋은지에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 알아보았다. 이러한 방음벽의 존재에 의해 회절이 이루어지는 음장에 대한 수식 표현은 MacDonald의 식에 바탕을 두었으며 방음벽 양쪽의 바닥에 의한 반사도 시뮬레이션에서 고려하였다.

Niu는 이와 유사한 연구에서 오차 마이크로폰의 위치는 방음벽 선상으로 제어 음원 바로 위의 연직상방으로 위치하는 것이, 일반적인 주소음원, 제어 음원, 에러 센서 순의 일직선 상 배치 방법보다 좋다고 주장하였다. 그러나 이 연구의 다양한 에러 마이크로폰 위치(배치 각도 및 제어 음원과 떨어진 거리)에서의 시뮬레이션 결과는 전통적 배치 방법보다 더 우월함을 보여주고 있으며, 이는 물리적 고찰과도 일치한다고 판단된다. 부분적으로 Niu의 이론적

계산 조건의 불명확성과 실험 검증 세팅 방법의 제한성이 이러한 차이를 유발한 것으로 추정된다.

이 연구에서, 오차 마이크로폰의 위치는 제어 음원이 방음벽 상단 모서리에 고정된다는 조건하에서는, 오차 마이크로폰이 주 소음원과 일직선상에 위치하되 제어 음원 너머 수음점 쪽에 배치하는 것이 가장 좋은 결과를 가져오며 반대로 배치하면 최악의 결과를 가져온다는 것을 보여주었다. 또한 주 소음원의 주파수 및 위치에 따라 달라질 수 있지만, 본 연구에서 수행한 조건에서는 0.12 m가 제어음원까지의 최적의 거리였다. 이 숫자는 조건에 따라 바뀔 수 있지만 너무 가깝지도 멀지도 않은 특정 거리에서 최적의 결과를 가져올 수 있다는 경향을 여러 조건의 시뮬레이션에서 확인하였다.

이 연구에서 가능한 여러 조건하에서 시뮬레이션을 통하여 최적의 에러 마이크로폰 위치에 관하여 연구하였으나, 제어 음원에 대한 위치의 제한 조건으로 제어 음원 위치 변화에 따른 다양한 상황에 대한 연구가 되지 못하였다. 또한 제어방식도 음원과 센서가 1대 1 대응 방식의 구성이어서 다소 제한된 조건의 에러 마이크로폰 위치에 관한 연구였다고 볼 수 있다. 추후 연구에서는 이러한 다양한 조건을 고려한 시뮬레이션을 통하여 보다 광범위한 조건에서 오차 센서와 제어 음원의 최적 위치 관계를 규명할 수 있는 연구가 진행 돼야 할 것으로 사료된다.

#### 후 기

이 논문은 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) MacDonald, H. M., 1915, "A Class of Diffraction Problems," Proc. London Math. Society, Vol. 14, pp. 410~427.
- (2) Li, K. M. and Wong, H. Y., 2005, "A Review of Commonly Used Analytical and Empirical Formulae for Predicting Sound Diffracted by a Thin Screen," Applied Acoustics, Vol. 66, pp. 45~76.

(3) Hadden, W. J. and Pierce, A. D., 1981, "Sound Diffraction Around Screens and Wedges for Arbitrary Point-source Locations," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 69, pp. 1266~1276.

(4) Omoto, A. and Fujiwara, K., 1993 "A Study of an Actively Controlled Noise Barrier," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 94, pp. 2173~2180.

(5) Shao, J., Sha, J.-Z. and Zhang, Z.-L., 1997 "The Method of the Minimum Sum of Squared Acoustic Pressures in an Actively Controlled Noise Barrier," *Journal of Sound and Vibration*,

Vol. 204, pp. 381~385.

(6) Yang, J. and Gan, W.-S., 2001 "On the Actively Controlled Noise Barrier," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 240, pp. 592~597.

(7) Baek, K. H., 2004, "Study on the Positions of Control Sources in an Actively Controlled Noise Barrier," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 164~171.

(8) Niu, F., Zou, H., Qiu, X. and Wu, M., 2007, "Error Sensor Location Optimization for Active Soft Edge Noise Barrier," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 299, pp. 409~417.