

개구부를 가지는 실내의 능동소음제어시스템에서의 최적스피커 위치

Optimal Loudspeaker Positions of an Active Noise Control System with an Opening in an Enclosure

백 광 현*

Kwang-Hyun Baek

Key Words : Active Noise Control(능동소음제어), Opening(개구부), Optimal Position(최적위치).

ABSTRACT

Optimal loudspeaker positions are important as much as the control algorithms and hardware performance in the active noise control system. This study is similar to the past researches on the optimal transducer locations but with a far field noise source having a plane wave characteristic and the noise coming through an opening such as a window in the enclosure. An optimization technique called simulated annealing algorithm is used to find a set of optimal loudspeaker positions from a larger possible loudspeaker positions. Loudspeakers are placed on the surface of opening at the wall. Using the measured acoustic transfer impedances and numerical simulations with the optimization technique, optimal positions are identified and compared. When a small number of loudspeakers are used, loudspeaker positions on the opening near the center seems to be the best place, but when a larger number of loudspeakers are used it was difficult to find simple patterns in the optimal positions.

1. 서 론

능동소음제어시스템에 영향을 미치는 요소에는 여러 가지가 있을 수 있다. 트랜스듀서들의 위치는 그 중의 하나이며 본 논문에서 다루고자 하는 부분이기도 하다. 본 연구에서 시도한 연구과정은 과거에 이미 행해진 연구들과⁽¹⁾ 매우 유사하나 본 연구의 경우 주 소음원이 창문등과 같은 개구부를 가지는 실내 공간에서 멀리 떨어진 곳에 위치한 경우이다. 따라서 주 소음원에 의한 음장은 개구부를 통과할 때 평면파의 특성을 가진다고 가정하여도 크게 지장이 없는 경우이다.

본 연구의 주 목적은 이러한 평면파적인 특성을 가지는 소음원이 개구부를 통하여 실내에 음장을 형성할 때 능동소음제어시스템에 의하여 어떻게 효과적으로 억제하는가에 있다. 본 연구에서는 스피커의 위치를, 실내 벽면의 모서리진 여러 곳을 따라서 배치하는 통상적인 배치방법이 아니라

개구부 표면에 국한하여 그 최적 위치를 파악하고 얼마나 효과적인가를 중점적으로 평가하였다. 약 2평 정도 크기의 모형 실내공간에 창문을 내고 외부에서 가능한 한 평면파에 가까운 형태로 소음장이 진입하게 하였으며, 정해진 위치의 마이크로폰과 제어 스피커 위치 사이의 음향전달 특성을 미리 측정하였다. 이러한 데이터를 이용하여 개구부의 많은 가능한 위치 중에서 어떤 소수의 위치가 가장 효율적인가를 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 알아보았다. 계산시간의 최소화와 효율성을 위하여 Simulated Annealing기법⁽²⁾과 전수조사법(exhaustive searching)을⁽³⁾ 함께 사용하여 최적의 위치를 알아보았다.

2. 시스템의 모델링

Nelson과 Elliott⁽⁴⁾이 능동소음제어시스템에 대한 수식화 과정에 사용한 기술을 따라서 본 연구에서도 시스템에 대한 모델링이 이루어졌다. 실내공간에 형성된 단일 주파수 성분의 음장을 제어하기 위해 L개의 마이크로폰과 M개의 스피커로 구성된 능동소음제어시스템을 가정하자. 다음의 수식들에서 진한 소문자는 복소벡터량, 진한 대문자는 복소행렬을 나타낸다. 마이크로폰에서의 음압은 Fig. 1과 같이 주 소음원에 의한 음압과 2차 음원(제어 신호)에 의한 음압의 합으로 나타낼 수 있다.

* 책임저자, 정회원, 단국대학교
E-mail : khbaek@dku.edu
Tel : (02)709-2553, Fax : (02)709-2589

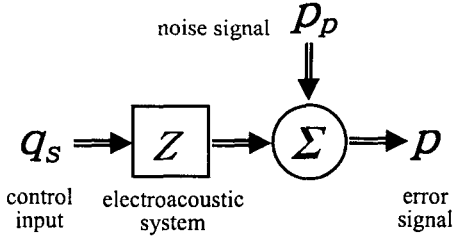


Fig. 1 Block diagram for an ANC system

위의 그림을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}_p + \mathbf{Z}\mathbf{q}_s \quad (1)$$

여기서 \mathbf{p} 는 $L \times 1$ 복소 전체 음압, \mathbf{p}_p 는 소음원에 의한 $L \times 1$ 복소 음압, \mathbf{Z} 는 $L \times M$ 복소 음향 전달임피던스 행렬, \mathbf{q}_s 는 2차 소스(제어 음원)의 복소 음압의 세기를 나타낸다. 일반적으로 마이크론의 수를 스피커의 수보다 많이 사용하게 되며, 이 때 오차압력신호의 절대값의 제곱을 J 라 할 때, (1)식에 적용된 결과는 다음과 같다.

$$J = [\mathbf{q}_s^H \mathbf{Z}^H \mathbf{Z} \mathbf{q}_s + \mathbf{q}_s^H \mathbf{Z}^H \mathbf{p}_p + \mathbf{p}_p^H \mathbf{Z} \mathbf{q}_s + \mathbf{p}_p^H \mathbf{p}_p] \quad (2)$$

(2)식은 일반적 Hermitian제곱 형태이며 $\mathbf{Z}^H \mathbf{Z}$ 은 양의 정부호이므로 J 는 제어 음원의 신호가 다음과 같을 때 최소값을 갖는다.⁽⁵⁾

$$\mathbf{q}_{opt} = -[\mathbf{Z}^H \mathbf{Z}]^{-1} \mathbf{Z}^H \mathbf{p}_p \quad (3)$$

이 때의 J 의 최소값은 다음과 같이 주어진다.

$$J_{min} = \mathbf{p}_p^H [\mathbf{I} - \mathbf{Z}(\mathbf{Z}^H \mathbf{Z})^{-1} \mathbf{Z}^H] \mathbf{p}_p \quad (4)$$

능동제어가 이루어지지 않을 때의 J 값은 $\mathbf{p}_p^H \mathbf{p}_p$ 이므로 \mathbf{Z} 와 \mathbf{p}_p 만 주어지면 그 시스템에서 얻을 수 있는 최대한의 소음 감소치는 다음의 식으로부터 계산되어질 수 있다.

$$\text{Attenuation [dB]} = 10 \log_{10} \left(\frac{\mathbf{p}_p^H \mathbf{p}_p}{\mathbf{p}_p^H [\mathbf{I} - \mathbf{Z}(\mathbf{Z}^H \mathbf{Z})^{-1} \mathbf{Z}^H] \mathbf{p}_p} \right) \quad (5)$$

또한 control effort라 불리는 제어 신호의 제곱 값의 합은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{q}_{opt}^H \mathbf{q}_{opt} = \mathbf{p}_p^H \mathbf{Z} [\mathbf{Z}^H \mathbf{Z}]^{-2} \mathbf{Z}^H \mathbf{p}_p \quad (6)$$

3. 컴퓨터 시뮬레이션 결과

Fig. 2에 보인 것과 같이 실내 공간(2.1m × 2.1m × 3.4m)에 스피커와 마이크론을 설치하고 \mathbf{Z} 행렬을 측

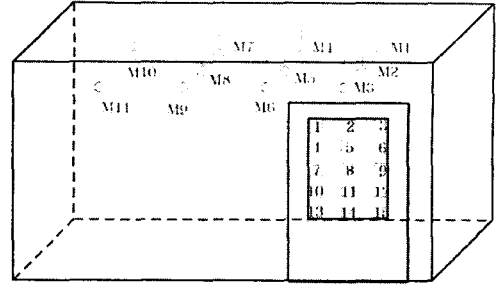


Fig. 2 Loudspeaker positions on the opening and microphone positions inside the enclosure

정하였다. 마이크로폰은 약 160cm의 높이의 11 곳에 설치하였으며 스피커는 개구부를 5×3으로 균등 배분한 프레임 안에 가능한 균일하게 배치하였다. 192Hz 순음의 소음을 실내의 외부에 설치된 스피커에서 발생시키고 음파 가이드를 통하여 개구부로 유도되도록 하여 가능한 한 평면파적인 특성을 갖도록 하였다.

주어진 스피커와 마이크의 위치에서 \mathbf{Z} 와 \mathbf{p}_p 가 측정되면, 모든 입의의 수의 스피커 조합에 대하여서도 능동 소음제어시스템이 발휘할 수 있는 소음감소치를 계산해 낼 수 있다. 물론 실측치는 계산된 결과와 오차가 발생하나 무시할만한 양이다. Fig. 2에서 보인 예의 경우에는 총 15개의 스피커 중 7 개 또는 8개의 최적의 스피커 위치를 찾는 문제가 탐색공간의 크기에 있어서 가장 큰 문제이나 그 크기는 ${}_{15}C_7 = 6435$ 이므로 모든 경우에 대한 조사가 가능하다. 그러나 모집단이 되는 스피커의 후보 위치가 두 배로만 커져도 총 조합의 수는 기하급수적으로 늘어나 전수 조사는 불가능해지며 통상적인 최적화기법으로는 전역 최적치를 구하기가 매우 어려워진다. 이 경우 Simulated Annealing기법 등이 매우 유용하게 사용될 수 있다.⁽⁶⁾

Table 1은 사용된 스피커의 수에 따른 최적의 스피커 위치에서 얻어진 소음감소치와 이 때 필요한 제어 입력신호의 파워 값을 보여주고 있다.

Table 1 Attenuations and control efforts obtained with optimal loudspeaker positions

Number of loudspeakers used	Attenuation [dB]	Control Effort
1	7.58	1.98
2	9.84	1.62
3	12.25	2.71
4	16.15	29.89
5	20.47	33.58
6	21.74	21.83
7	24.30	146.09
8	31.64	150.70

당연히 스피커의 수가 많아질수록 더 좋은 결과를 보여주고 있으며 스피커의 수가 6개가 될 때까지는 소음감소 레벨이 약 22dB 정도에 수렴하는 듯하다가 다시 급격히 증가되는 양상을 보여주고 있다. 이것은 총 마이크로폰의 수 11에 사용된 스피커의 수가 근접함에 따라 (3)식에서 사용된 2차 소스의 최적 세기가 정방형 행렬의 역을 구하는 fully determined 경우의 해에 근접해지면서 발생하는 현상이다. 따라서 총 사용된 스피커 수가 7개 이상인 경우는 그 결과에 의미를 부여하기 힘들다. 그 보다는 총 사용된 스피커 수가 5개인 경우와 6개인 경우의 control effort를 비교해 보면 소음감소레벨은 증가함에도 오히려 제어 입력신호

파워의 합은 줄어든 것을 알 수 있다. 이것은 찾아진 6개의 스피커 위치가 최적이며 강건함을 보여주는 증거로 볼 수 있다.

Fig. 3은 Table 1에 보인 결과 중 사용된 총 스피커의 수가 1~6개인 경우의 최적의 위치를 표시한 것이다. 1개가 사용된 경우 최적의 위치는 한 가운데 임을 보여주고 있는데 이것은 개구부를 통해 들어오는 소음의 음장 특성을 고려 할 때 매우 당연한 결과라 할 수 있다. 뒤집어 생각해 보면 외부의 스피커에 의해 생성된 소음이 개구부에 수직한 방향으로 비교적 잘 유도되어진 것을 나타낸다고 판단 할 수도 있다. 사용된 스피커의 수가 증가되어도 한 가운데에 위치한 8번 스피커는 항상 사용됨을 알 수 있다. 총 4개의 스피커가 사용된 경우를 보면 스피커의 배치가 비교적 중심에 대하여 대칭인 모양을 이루고 있음을 관찰할 수 있다. 5개 이상의 스피커가 사용된 경우에는 더 이상 중심부에 대칭인 간결한 배열 형태는 찾기가 힘들다.

Fig. 4에서는 스피커의 위치를 더 이상 개구부의 표면에 국한시키지 않고 공간 내부에도 배치할 수 있도록 확장하고 최적화 기법을 이용하여 찾아진

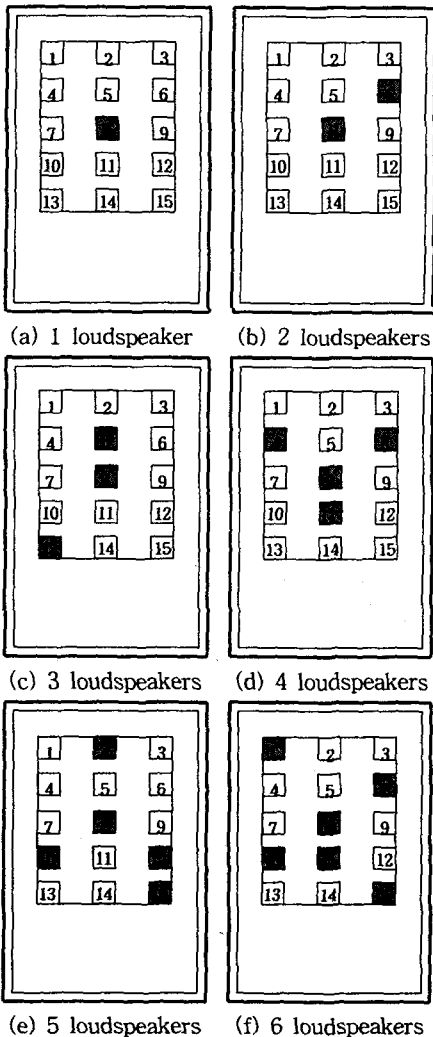


Fig. 3 The best loudspeaker positions on the surface of the opening

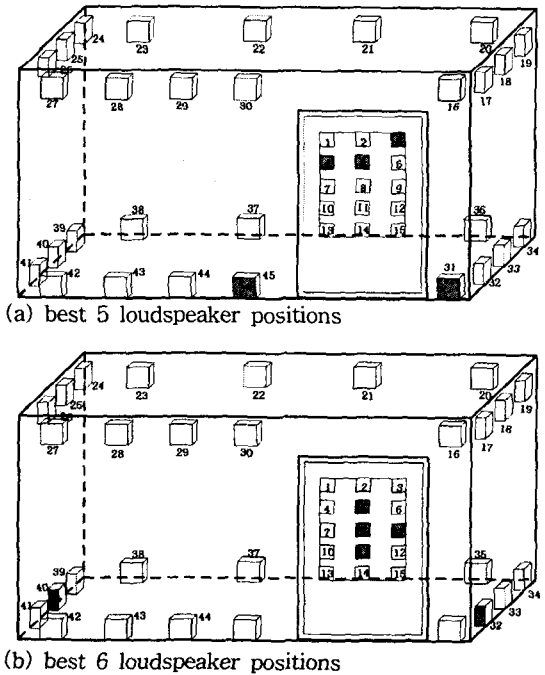


Fig. 4 The best loudspeaker positions on the surface of the opening and inside of the enclosure

결과이다. 내부에 배치할 수 있는 스피커의 위치

는 통상적으로 모서리에 가능하므로 공간 상하부에 각각 15개 씩 총 30개의 위치를 추가하고 개구부에 위치한 15개의 위치까지 포함하여 총 45개의 위치에서 가장 좋은 5개와 6개의 위치를 찾아 그 결과를 표시한 것이다. 명백히 이 경우에는 그 가능한 조합의 수가 전수조사 방법으로는 찾기가 힘들 정도로 많기 때문에 최적화기법을 적용한 결과이다 Fig. 4의 결과에서 관찰할 수 있는 바와 같이, 비교적 적은 수의 스피커가 사용되는 경우에는, 비록 내부 벽면에 배치된 스피커 후보 위치의 수가 개구부에 비해 두 배 많았어도, 개구부의 위치가 주도적인 역할을 한다는 것을 보여주고 있다. 또 한 가지 재미있는 사실은 개구부에서 찾아진 최적의 위치들은 더 이상 개구부를 중심으로 하여 대칭인 분포 형태를 보이지 않는다는 것이다. 이 것은 그러한 역할을 내부 공간에 배치된 스피커가 행함으로서 발생한 현상이라 추측된다. 5개의 경우와 6개의 위치를 비교해 보면 공통되어지는 것은 개구부에 위치한 5번 스피커 위치만이 유일하다. 이 것은 모집단의 스피커 위치 수 45에 비해 너무 작은 수의 최적 위치가 찾아졌기 때문에 발생한 현상으로 볼 수 있다. 또는 적용되는 최적화기법의 오차에 기인한 것일 수도 있다. 총 6개의 스피커가 사용된 Fig. 4(b)의 경우 시뮬레이션 결과 약 43.4dB의 소음감소가 약 1.77의 control effort 사용만으로도 가능한 것으로 계산되어졌다. 이 것은 Table 1의 6개 스피커가 사용된 결과와 비교해 보면 소음 감소 레벨은 약 두 배가 되면서도 소요파워는 1/10도 안되는 놀라운 결과이다.

4. 요약

개구부를 가지는 실내공간의 능동소음제어시스템에 영향을 미치는 여러 요소 중 2차 소스로 자주 사용되어지는 스피커의 최적위치에 대하여 알아보았다. 본 연구에서는 최적화 기법과 전수 조사법을 이용하여 개구부에 위치하는 스피커를 어떤 위치에 배치하는 것이 좋은가를 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 주 소음원은 평면과적인 특성을 가지는 음장을 가정하였으며 이에 따라 이와 유사한 환경을 조성하여 실험을 하였다.

개구부에 위치하는 최적의 스피커의 위치는 적은 수의 스피커가 사용되는 경우에는 주로 개구부의 가운데를 중심으로 대칭적인 배치 양상을 보였다. 이 것은 개구부에 진입하는 소음원에 의한 음장의 평면과적인 특성에도 일치하는 결과로 판단되었다. 그러나 개구부의 스피커 배치 위치의 모집단으로 선정된 위치의 수가 적어 스피커 수가 증가됨에 따른 경향은 파악하기가 어려웠다. 참고적으로 실내 공간 내부에 스피커가 배치된 경우에 대하여 측정된 데이터를 이용하여 내부벽면과 개구부 표면을 통 털어 전체적으로 어떤 위치가 최적인지를 알아보았다. 이 경우에는 개구부만으로 국한하여 찾아진 결과와는 달리 일정한 배치 경향은 찾기가 힘들었다. 그러나 스피커의 배치가 가능한 모집단의 수가 증가하면 그에 따라 같은 수의 스피커를 사용하더라도 매우 큰 성능의 차이가 발생할 수 있음도 보여주었다.

참 고 문 헌

- (1) Baek, K.-H. and Elliott, S. J., 1995, "Natural Algorithms for Choosing Source Locations in Active Control System", Journal of Sound and Vibration Vol. 186, No 2, pp.245~267.
- (2) Van Laarhoven, P. J. M. and Aarts, E. H., 1988, Simulated Annealing: Theory and Applications, Kluwer Academic Publishers.
- (3) Rao, S. S., 1994, optimization Theory and Applications, Wiley Eastern Limited.
- (4) Nelson, P. A. and Elliott, S. J., 1992, Active Control of Sound, Academic Press, London.
- (5) Noble, B. and Daniel, J. W., 1988, Applied Linear Algebra, Prentice-Hall International.
- (6) 백광현, 2000, "등가소스법을 이용한 공간 내의 음장 모델링에서 경계면 조건 오차의 최소화에 관한 연구", 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 581~586.