

능동방음벽 시스템의 제어 음원 위치 선정에 미치는 최적화 기법 성능에 관한 고찰

A Study on the Performance of Optimization Techniques on the Selection of Control Source Positions in an Active Noise Barrier System

임형진* · 백광현**

Hyoung-Jin Im, Kwang-Hyun Baek

Key Words : Active Noise Barrier(능동방음벽), Simulated Annealing, Sequential Searching Method(순차적 탐색기법)

ABSTRACT

There have been several kinds of attempts to actively control the deflected noise behind the noise barrier. Omoto's work in 1993 would be one of the fundamental studies, where he placed the control sources uniformly parallel to the noise barrier. Following this study, Yang pointed that the average distance between the noise source and control sources is more important than the arrangement of control sources such as a straight line or an arc type distribution. In 2004, Baek tried to show optimal arrangement of control sources while keeping the average distance between the noise source and control sources. He used simulated annealing algorithm which is one of the natural algorithms for the selections of optimal control source positions, but the searching technique was a hybrid of the simulated annealing and the sequential searching to adapt to the vast amount of searching time. This study is about the performance comparison between the pure sequential searching and the hybrid one. The simulation results show very similar performance and a pure simulated annealing searching will be more beneficial for the noise reduction performance but at the cost of computing time.

1. 서 론

회절현상이란 음파가 진행하는 동안 장애물을 만났을 때 장애물 뒤쪽으로 음파가 전달되는 현상이다. 이와 같은 원리로 방음벽 상단에서 회절현상이 발생함으로써 새로운 음원이 형성되어 방음벽 배면에 소음이 미치게 된다. 방음벽 배면에서의 소음을 줄이기 위한 방법으로 방음벽 상단의 형상을 달리하면서 방음벽의 성능을 향상시키는 연구들이 진행되어왔다. 그러나 이는 방음벽 배면에 소음이 미치는 정도의 차이는 있을 수 있으나 회절현상을 해결할 수는 없다. 따라서 이러한 회절현상을 해결하기 위한 방법으로 능동소음제어기법이 제시 되었다. Omoto는⁽¹⁾ 제어음원의 수와 마이크로폰의 수를 동일하게 하여 직선 형태의 등 간격으로 배치 시켜 방음벽의 성능을 향상시키고자 하였다. Shao는⁽²⁾ 제어음원을 직선형태와 원호형태의 배열을 사용

하여 두 경우에 대해 비교함으로써 원호형태의 배열이 더 좋은 결과를 나타냄을 보였다. Yang은⁽³⁾ 제어음원의 배열 형태보다는 소음원과 제어음원간의 평균 거리가 소음 제어 성능에 더 영향을 미친다고 하였다. 이후 Baek은⁽⁵⁾ Simulated Annealing 방법을 이용하여 최적의 제어음원 위치를 알아보려고 하였다. Simulated Annealing 기법의 적용 목적 함수 계산 시간이 너무 많이 소요되어 Baek은 Simulated Annealing 기법에 순차적 탐색 방법을 결합시킴으로써 타협적인 결과를 얻게 되었고, 제어음원의 위치를 보다 효율적으로 배치시킬 수 있었다. 이에 대해 본 연구에서는 Simulated Annealing 기법과 순차적 탐색 기법의 결합과 순수한 순차적 탐색기법을 비교 분석해 보았다. 두 가지 방법에 대한 보다 정확한 비교를 위해 시스템 모델에 사용된 기본적인 변수들은 Baek과⁽⁵⁾ 동일하게 하였다. 또한 한 가지 경우에 대하여 순수한 Simulated Annealing 탐색 방법을 적용해 봄으로써 방음벽 시스템의 성능이 어느 정도 향상되는지 알아보고, 하이브리드 된 탐색이 어느 정도 효과가 있는지에 대해 알아보았다.

* 단국대학교 기계공학과 대학원
E-mail : space22@dankook.ac.kr
Tel : (02) 709-2567

** 단국대학교 기계공학과

2. 능동방음벽 시스템에 대한 모델링

본 연구에서 방음벽의 크기는 반무한 평판으로써 지면에서 음의 반사는 없는 것으로 하였으며 모든 음원(주소음원, 제어음원)은 점 음원으로 가정하였다. 그리고 방음벽 시스템에 있어서 회절 이론은 Bowman에⁽⁴⁾ 의해 정립된 이론식을 사용했다. Fig. 1과 같이 구성된 능동방음벽 시스템에서 오차 센서(마이크로폰)에서의 음압 P는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있고, 주소음원에 의한 음이 방음벽 상단을 지나 회절로 인한 수음점에서의 음압은 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$P = \frac{A}{kr} e^{ikr} \quad (1)$$

여기서 k는 파동수, r은 제어음원과 오차 센서 사이의 거리, A는 다음과 같다.

$$A = -iZ_0 q \quad (2)$$

$$Z_0 = \frac{w^2 \rho_0}{4\pi c_0} \quad (3)$$

식 (2)에서 q는 음원의 세기를 나타내고, 식 (3)에서 w는 음원의 각진동수, ρ_0 는 공기의 밀도, c_0 는 공기 중에서 음파의 속도를 나타낸다.

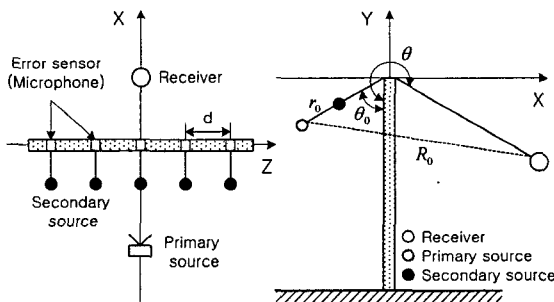


Fig. 1 Geometry of active noise barrier system. (left - top view, right - side view)

$$P_r = \sum_{i=0}^L A_i \cdot \phi_i \quad (4)$$

(4) 식에서 $i=0$ 은 제어음원이 없는 경우, 즉 주소음원만이 있는 경우를 의미하고, $i=1,2,\dots,L$ 은 제어음원의 수를 나타내고 있다. A는 1번째 제어음원에 대한 위상과 크기를 나타내는 복소 계수로 식 (2)에서 계산 된다. ϕ 는 식 (5)와 같이 Bowman에⁽⁴⁾ 의한 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \phi_i(P) = & -\sqrt{\frac{2}{\pi k R_{1l}}} e^{-i(\pi/4)} \\ & \times \left\{ \operatorname{sgn}(\pi + \theta_0 - \theta) \frac{e^{ikR_i}}{\sqrt{k(R_{1l} + R_i)}} F[\sqrt{k(R_{1l} - R_i)}] \right. \\ & \left. + \operatorname{sgn}(\pi - \theta_0 - \theta) \frac{e^{ikR'_i}}{\sqrt{k(R_{1l} + R'_i)}} F[\sqrt{k(R_{1l} - R'_i)}] \right\} \quad (5) \end{aligned}$$

R_i 과 R'_i 은 각각 수음점에서부터 각 음원까지의 거리와 수음점에서부터 각 이미자음원까지의 거리를 의미하고 R_{1l} 은 각 음원에서부터 방음벽 상단을 지나 수음점까지의 최단 거리를 표시하고 있다. 그리고 파동수 k와 R_{1l} , R_i , R'_i 에 관련된 함수 F는 Fresnel 적분을 나타내고 있다.

제어음원의 사용으로 인한 능동방음벽 시스템의 성능은 식 (6)과 같이 수음점에서 음압의 비로 평가했다.

$$\Delta L = 20 \log \left(\frac{P_{off}}{P_{on}} \right) \quad (6)$$

여기서 P_{off} 는 제어음원이 없을 때 주소음원에 의한 수음점에서의 음압이고, P_{on} 은 제어음원을 작동시켰을 때 수음점에서의 음압이다.

3. 컴퓨터 시뮬레이션 결과

본 연구의 컴퓨터 시뮬레이션에 사용된 주소음원과 제어음원 및 기타 부수적인 조건은 Baek과⁽⁵⁾ 동일하게 하였다. 주소음원의 주파수 및 위치는 $f = 5\text{kHz}$, $(r_0, \theta_0) = (0.5\text{m}, 60^\circ)$ 로 하였으며 제어음원의 위치는 $(r, \theta) = (0.2\text{m}, 60^\circ)$ 로 했다. 그리고 마이크로폰의 간격은 $d=0.03\text{m}$ 로 Z축을 중심으로 15개를 등 간격으로 배치시켰으며, 수음점의 위치는 $(r, \theta) = (1.0\text{m}, 60^\circ)$ 로 하였다.

Simulated annealing 기법과 순차적 탐색기법을 적용하기 위해 제어음원이 위치할 탐색 공간의 후보군은 Z축을 기준으로 0.0075m 씩 좌우 20개(원점을 포함하여 총 41개)로 정하였다. 두 가지 최적화 기법에 의해 선택된 제어음원은 항상 Z축을 중심으로 좌우 대칭으로 배치되기 때문에 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 +Z축만을 고려했고 별도의 언급이

없는 한 제어음원의 개수는 -Z축과 원점에 위치 할 개수를 제외하고 +Z축에 대한 것만으로 한다.

Fig. 3은 2개(-Z축과 원점을 포함하여 총 5개)의 제어음원을 선택하는데 있어서 Simulated annealing 기법과 순차적 탐색기법을 별도로 적용한 경우를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 각기 다른 방법을 적용했음에도 불구하고 수음점에서 음압의 감소량이 일치함을, 즉 동일한 위치를 찾아내었음을 알 수 있다. 이와 같이 두 가지 방법 모두 동일한 결과를 보여주는 것은 탐색공간에 비해 선택 개수가 상대적으로 적기 때문으로 판단된다. 총 20 개 중 2곳을 찾는 문제이므로 탐색 공간의 크기가 너무 작아서 생긴 현상으로 판단된다. Table. 1은 이 경우를 포함한 6개까지의 위치 선정 결과를 요약해 놓은 것이고 선정 된 음원의 위치는 Fig. 2에서 각각의 위치에 해당한다.

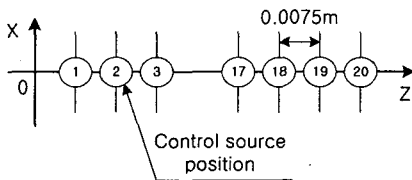


Fig. 2 Searching point of control source.

Table. 1 Secondary source positions found and mean attenuation at the receiver positions.

No. of control sources used	Sequential searching	
	control source positions	average noise reduction (dB)
2	9, 10	5.31
3	9, 10, 17	7.90
4	9, 10, 17, 20	8.92
6	9, 10, 17, 18, 19, 20	10.92
No. of control sources used	S.A. + Sequential searching	
	control source positions	average noise reduction (dB)
2	9, 10	5.31
3	8, 14, 15 (found from pure S.A. searching)	8.51
4	9, 10, 19, 20	9.44
6	9, 10, 17, 18, 19, 20	10.92

(S.A. : Simulated Annealing)

Fig. 4는 4개의 제어음원을 찾는 경우로서 순수하게 순차

적 탐색기법을 적용한 경우와 Simulated Annealing 기법을 이용하여 2개를 찾아 고정된 다음 다시 Simulated Annealing 기법으로 2개의 위치를 찾음으로써 Simulated Annealing 기법에 순차적 탐색기법을 적용한 경우의 결과를 보여주고 있다. Fig. 4는 Table. 1과 같이 선택 된 최적의 음원 위치가 약간 다를 수 있다. Simulated Annealing 기법과 순차적 탐색기법을 병행한 경우의 평균 감소량이 순수하게 순차적 탐색기법을 사용했을 때 보다 약 0.52dB 정도 큼을 알 수가 있다. 이는 순차적 탐색기법보다 Simulated Annealing 기법이 가미되어 좀 더 우수한 결과를 보인 것을 알 수 있다.

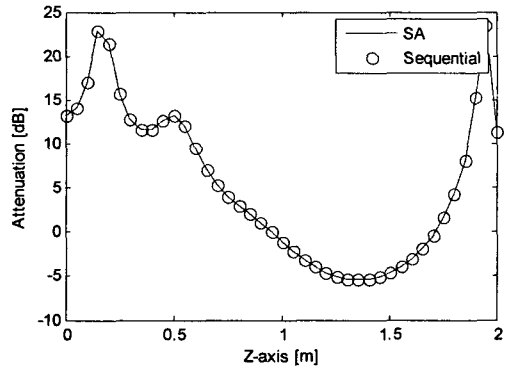


Fig. 3 Attenuation at the receiver positions with 5 control sources in optimal positions.

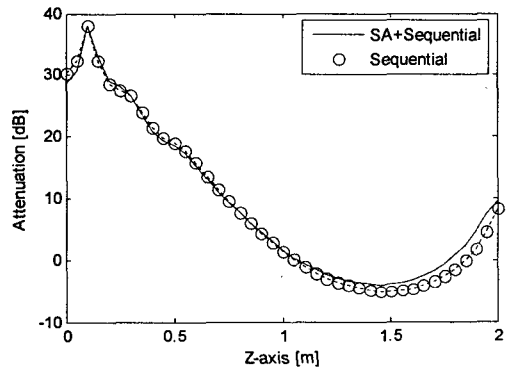


Fig. 4 Attenuation at the receiver positions with 9 control sources in optimal positions.

Fig. 5는 6개의 최적의 제어음원을 선택했을 때 수음점의 음압 감소를 나타내는 경우이다. 6개 모두를 순차적 탐색기법으로 찾았을 때와 2개를 Simulated Annealing 기법으로 찾고 이를 고정시킨 다음 다시 Simulated Annealing 기법을 적용하여 2개를 찾아 고정시킨 후 마지막 2개를 또 다시 Simulated Annealing 기법을 적용하여 음원을 찾는,

즉, Simulated Annealing 기법과 순차적 탐색기법을 병행하였을 때를 나타낸 것이다. 두 가지 경우 모두 Table. 1과 같이 최적의 위치가 동일하고 수음점에서의 평균 음압 감소치도 동일함을 보이고 있다. 앞서 Fig. 4에서는 Simulated Annealing 기법이 순차적 탐색기법보다 낡음을 알 수 있었고 Fig. 5에서는 두 가지 최적화 방법이 동일한 결과를 보임을 알 수가 있다.

Fig. 6은 3개의 제어음원을 찾는데 있어 순수한 Simulated annealing 기법과 순수한 순차적 탐색기법을 이용한 결과이다. Table. 1에서 볼 수 있듯이 평균 음압은 순수 Simulated Annealing 기법에 의한 결과가 약 0.61dB 정도 높으며, 찾아진 최적 제어음원의 위치도 완전히 다름을 알 수 있다. 이것은 탐색 공간이 비선형성을 갖어 순차적 탐색기법과 같은 선형적 탐색 방법으로는 찾을 수 없는 결과를 Simulated Annealing 기법이 찾은 것으로 보인다.

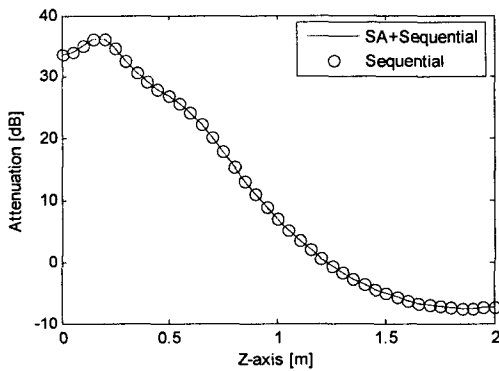


Fig. 5 Attenuation at the receiver positions with 13 control sources in optimal positions.

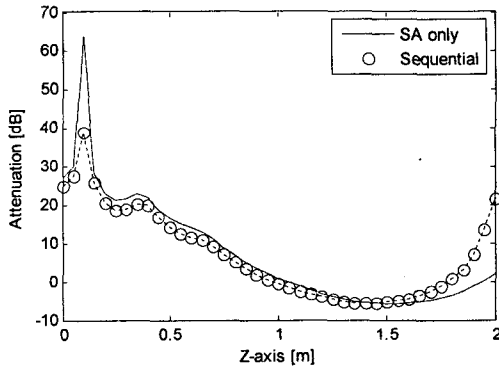


Fig. 6 Attenuation at the receiver positions with 7 control sources in optimal positions.

Fig. 6은 Simulated Annealing 기법에 의한 결과가 수음점 $z=0.1m$ 부근에서 집중적으로 더 좋은 결과를 보이는 반

면 $z=1.5m$ 이상인 지점에서는 오히려 순차적 탐색 결과보다 더 좋지 않음을 볼 수 있다. 이것은 소음 감소량의 단순 평균값에 의한 탐색이 갖을 수밖에 없는 한계인 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 능동방음벽 시스템에서 방음벽의 성능을 향상시키고 동시에 제어음원의 최적의 위치를 찾는 데 있어 Simulated Annealing 기법과 순차적 탐색기법을 사용하였다. 각각의 방법을 독자적으로 사용할 때와 두 가지 방법을 결합하여 사용할 때를 비교해 봄으로써 각각의 최적화 기법의 성능을 알 수가 있었다. 제한된 탐색 공간에서 찾아야 할 제어음원의 수가 상대적으로 작게 되면 두 가지 방법 모두 동일한 결과를 얻게 되지만 제어음원의 수가 늘어날수록 Simulated Annealing 기법이 순차적 탐색기법보다 낡은 결과를 얻게 되었다. 또, 순차적 탐색기법과 Simulated Annealing 기법을 병행하여 사용함으로써 순차적 탐색기법을 독자적으로 사용할 때보다 성능이 향상됨을 알 수 있었다.

참고 문헌

- (1) Omoto, A. and Fujiwara, A., 1993, "A study of an Actively Controlled Noise Barrier", Journal of Acoustical Society of America Vol. 94, No. 4, pp. 2173~2180.
- (2) Shao, J., Sha, J.-H. 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, No. 2, pp. 381~385.
- (3) Yang, J. and Gan, W.-S., 2001, "On the Actively Controlled Noise Barrier", Journal of Sound and Vibration Vol. 240, No. 3, pp. 592~597.
- (4) Bowman, J. J., Senior, T. B. A. and Uslenghi, P. L. E., 1969, Electromagnetic and Acoustic Scattering by Simple Shapes, Chap. 8, North-Holland Publishing Company.
- (5) 백광현, 2004, "능동방음벽 시스템에서의 제어음원 위치에 관한 고찰", 한국소음진동공학회논문집, 제14권, 제2호, pp. 164~171.