

능동방음벽 시스템의 제어 음원 위치 선정에 미치는 최적화 기법 성능 비교 연구

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

임형진* · 백광현†

Hyoung-Jin Im and Kwang-Hyun Baek

(2005년 3월 15일 접수 : 2005년 7월 22일 심사완료)

Key Words : Active Noise Barrier(능동방음벽), Simulated Annealing(모사 어닐링), Sequential Searching Method(순차적 탐색 기법), Genetic Algorithm(유전자 알고리즘)

ABSTRACT

There were many attempts to reduce noise behind the noise barrier using active control techniques. Omoto(1993), Shao(1997) and Yang(2001) tried to actively control the diffracted noise behind the barrier and main concerns were about the arrangement methods for the control sources. Baek(2004) tried to get better results using the simulated annealing method and the sequential searching technique. The main goal of this study is to develop and compare the performance of several optimization techniques including those mentioned above, hybrid version of simulated annealing and genetic algorithm for the optimal control source positions of active noise barrier system. The simulation results show fairly similar performance for the small size of searching problem. However, as the number of control sources are increased, the performance of simulated annealing algorithm and genetic algorithm are better than the others. Simulations are also made to show the performance of the selected optimal control source positions not only at the receiver position but at the surrounding volume of the receiver position and plotted the noise reduction level in 3-D.

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 방

음벽의 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 제시되었다. Omoto는⁽¹⁾ 제어음원의 수와 마이크로폰의 수를 동일하게 하여 직선 형태의 등 간격으로 배치시킴으로써 방음벽의 성능을 향상시키고자 하였다. 그 결과 마이크로폰의 배치 간격이 파장 길이의 1/2보다 작은 경우에 능동소음제어가 효과적임을 보였고, 제어음원이 주소음원에 가까워질수록 소음제어 효과가 큼을 보였다. 이에 반해 Shao는⁽²⁾ 제어음원을 직선형태와 원호형태의 배열을 사용하여 두 경우에 대해 비교함으로써 원호형태의

† 책임저자 : 정희원, 단국대학교 대학원 기계공학과
E-mail : khbaek@dankook.ac.kr
Tel : (02) 709-2563, Fax : (02) 709-2569

* 정희원, 단국대학교 대학원 기계공학과

배열이 더 좋은 결과를 나타냄을 보였다. Yang은⁽³⁾ 제어음원의 배열형태보다는 소음원과 제어음원간의 평균 거리가 소음 제어 성능에 더 영향을 미친다고 하였다. 이후 Baek은⁽⁴⁾ 모사 어닐링 방법을 이용하여 최적의 제어음원 위치를 알아보려고 하였다. 모사 어닐링 기법의 적용 시 목적 함수 계산 시간이 너무 많이 소요되어 Baek은⁽⁴⁾ 모사 어닐링 기법에 순차적 탐색 방법을 결합시킴으로써 다협적인 최적 위치의 결과이기는 하나 제어음원의 위치를 보다 효율적으로 배치시킬 수 있었다. 이에 대해 이 연구에서는 모사 어닐링 기법과 순차적 탐색 기법의 결합, 순수한 순차적 탐색, 유전자 알고리즘에 의한 탐색을 비교 분석해 봄으로써 최적화 기법의 성능 비교를 해보았다. 세 가지 방법에 대한 보다 정확한 비교를 위해 시스템 모델에 사용된 기본적인 변수들은 Baek과⁽⁴⁾ 동일하게 하였다. 또한 한 가지 경우에 대해서는 순수한 모사 어닐링 탐색 방법을 적용해 봄으로써 각각의 최적화 기법 성능을 비교해 보았고, 하이브리드 된 탐색이 어느 정도 효과가 있는지에 대해 알아보았다. 끝으로 수음 지역의 보다 일반적인 평가를 위해 유전자 알고리즘에 의해 찾아진 최적의 제어음원 위치에 대해 Z축 선상이 아닌 공간상으로 확대하여 방음벽의 성능을 평가하였다.

2. 능동방음벽 시스템에 대한 모델링

이 연구에서 방음벽의 크기는 반무한 평판으로써 지면에서 음의 반사는 없는 것으로 가정하였으며 모든 음원(주소음원, 제어음원)은 점 음원으로 가정하였다. 그리고 방음벽 시스템에 있어서 회절 현상은 Bowman에⁽⁵⁾ 의해 정립된 이론식을 사용하여 모델링하였다. 이 연구에서 사용된 능동방음벽 시스템의 모델은 Fig.1과 같고, (a)는 방음벽의 입체적인 모습을 나타내고, (b)는 각각 방음벽의 위와 옆에서 이 모습을 나타내고 있다. 이 능동방음벽 시스템에서 오차 센서(마이크로폰)에서의 음압 P 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 k 는 파동수, r 은 제어음원과 오차 센서 사이의 거리이며, A 와 Z_0 는 다음과 같다.

$$A = -iZ_0q \quad (2)$$

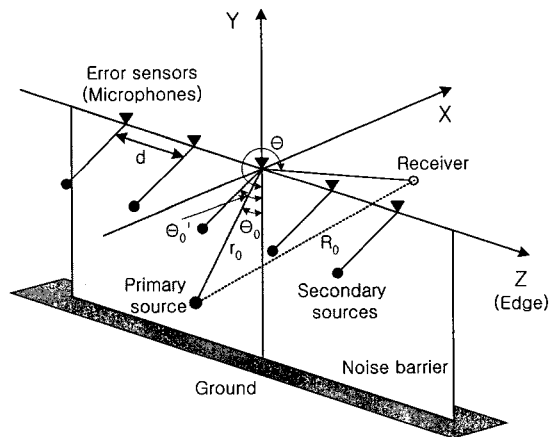
$$Z_0 = \frac{w^2 \rho_0}{4\pi c_0} \quad (3)$$

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

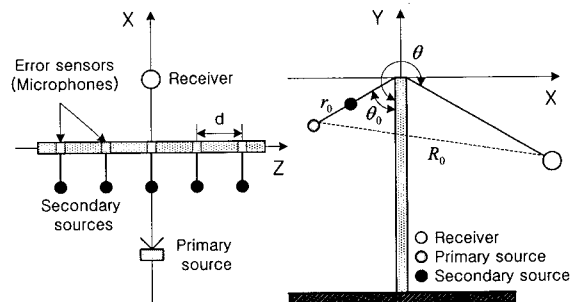
주소음원에 의한 음이 방음벽 상단을 지나 회절로 인한 수음점에서의 음압은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_r = \sum_{l=0}^L A_l \cdot \phi_l \quad (4)$$

식 (4)에서 $l=0$ 은 주소음원만의 경우를 나타내며, $l=1, 2, 3, \dots, L$ 은 제어음원들을 나타내고 있다. A_l 는 l 번째 제어음원에 대한 위상과 크기를 나타내



(a) Active noise barrier in 3-D view



(b) Top view(left) and side view(right) of active noise barrier

Fig. 1 Geometry of an active noise barrier system

는 복소 계수로 식 (2)에서 계산 된다. 한편 ϕ 는 다 음과 같이 Bowman에⁽⁵⁾ 의한 식으로 표현된다.

$$\phi_i(P) = -\sqrt{\frac{2}{\pi k R_{1l}}} e^{-i(\pi/4)} \times \left\{ \text{sgn}(\pi + \theta_0 - \theta) \frac{e^{i k R_i}}{\sqrt{k(R_{1l} + R_i)}} F[\sqrt{k(R_{1l} - R_i)}] + \text{sgn}(\pi - \theta_0 - \theta) \frac{e^{i k R_i'}}{\sqrt{k(R_{1l} + R_i')}} F[\sqrt{k(R_{1l} - R_i')}] \right\} \quad (5)$$

R_i 과 R_i' 은 각각 수음점에서부터 각 음원까지의 거리와 수음점에서부터 각 이미지음원까지의 직선 거리를 의미하고 R_{1l} 은 각 음원에서부터 방음벽 상단을 지나 수음점까지의 최단거리를 표시하고 있다. 그리고 파동수 k 와 R_{1l} , R_i , R_i' 에 관련된 함수 F 는 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 주수음원에 의한 수음점에서의 음압이고, P_{on} 은 제어음원을 작동시켰을 때 수음점에서의 음압이다.

3. 컴퓨터 시뮬레이션 조건

이 연구의 컴퓨터 시뮬레이션에 사용된 주수음원과 제어음원 및 기타 부수적인 조건은 Baek과⁽⁴⁾ 동일하게 하였다. 주수음원의 주파수 및 위치는 $f=5$ kHz, $(r_0, \theta_0) = (0.5 \text{ m}, 60^\circ)$ 로 하였으며 제어음원의 위치는 $(r, \theta) = (0.2 \text{ m}, 60^\circ)$ 로 하였다. 그리고 마이크론의 간격은 $d=0.03 \text{ m}$ 로 Z축을 중심으로 15개를 등간격으로 배치 시켰으며, 수음점의 위치는 $(r, \theta) = (1.0 \text{ m}, 60^\circ)$ 로 하였다. 위의 조건들은 모사 어닐링 기법, 순차적 탐색기법, 유전자 알고리즘 세 가지 모두 동일하게 적용 되었다.

제어음원이 위치할 탐색 공간의 후보군은 Fig. 2와 같이 Z축을 기준으로 0.0075m씩 좌우 20개(원점을 포함하여 총 41개)로 정하여 모사 어닐링 기법과 순

차적 탐색기법을 적용하였다. 두 가지 최적화 기법에 의해 선택된 제어음원은 항상 Z축을 중심으로 좌우 대칭으로 배치되기 때문에 이 연구에서는 Fig. 2와 같이 +Z축만을 고려했고 별도의 언급이 없는 한 제어음원의 개수는 -Z축과 원점에 위치 할 개수를 제외하고 +Z축에 대한 것만으로 한다.

4. 유전자 알고리즘의 적용

유전자 알고리즘은 생물의 진화 원리를 이용한 것으로 1859년 다윈에 의한 '종의 기원'을 기초로 하고 있다. 이는 자연계 생물들은 그들의 유전자를 보존하고 생존을 지키기 위해 자손을 생산하고 끊임없이 환경과 투쟁하며 적응해 가는 일련의 과정은 주어진 환경에서 최선이라는 사실에 입각한 것이다. 유전자 알고리즘의 구조는 Fig. 3과 같이 크게 초기집단 생성, 적합도 평가, 재생산, 교배, 돌연변이로 구성된다. 초기집단의 생성단계에서는 주어진 문제의 해가 될 가능성이 있는 개체들의 집합인 집단이 형성되고, 집단의 개체들은 문제의 목적함수(수음 지역에서의 평균 음압 감소량)에 의해 적합도를 평가 받게 된다. 목적함수의 적합도가 평가 되면 현재 집단의 개체들 중 일부는 재생산을 위해 선택 된다. 또 교배를 통하여 개체들이 서로 재결합 하고 상호 간에 유전자 정보를

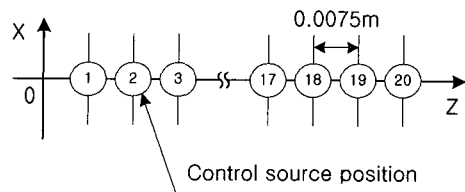


Fig. 2 Searching points of control sources

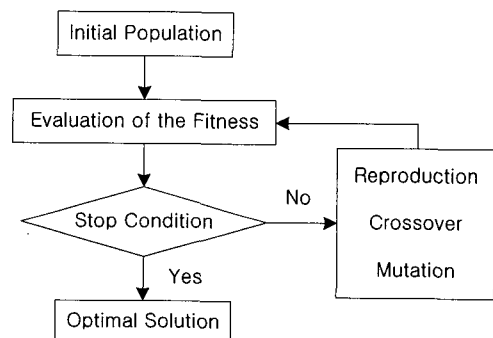


Fig. 3 Flow chart of the genetic algorithm

교환함으로써 집단에 새로운 개체를 도입하게 되며, 돌연변이는 집단에 새로운 정보를 도입하는 수단으로써 하나 이상의 유전자 정보를 임의로 변경하게 된다. 위와 같은 과정에 의해 새롭게 생성된 집단은 목적함수에 의해 다시 평가되고 최적의 해가 찾아질 때까지 일련의 연산과정을 반복하게 된다.⁽⁶⁾

이 연구에서 사용된 유전자 알고리즘의 해 파라미터는 2진수의 비트 스트링 형태로 나타내었으며, 제어음원이 위치할 정의역과 분해능은 각각 $z=0.0\sim 1.0$ m, 0.03 m로 하였다. 개체들로 구성된 초기 집단은 랜덤 변수를 사용하여 생성하였고, 개수는 20개로 하였다. 제어음원이 위치할 분해능을 0.03 m로 하였기 때문에 정의역 구간 내에서 제어음원이 위치할 수 있는 개수는 약 33개이지만 만일 초기 집단의 크기가 너무 작게 되면 유전적 부동으로 인해 탐색이 원치 않는 방향으로 빨리 수렴하게 되고, 또 너무 크게 되면 성능 향상에 비해 연산 시간이 길어지기 때문에 임의로 33개보다 작은 20개로 하였다. 유전자 알고리즘의 정지조건으로 사용된 총 세대 수는 5,000세대까지 진행하도록 하였다. 초기 집단의 크기를 20으로 하여 유전자 알고리즘을 수행하게 되면 모두 100,000가지의 경우를 확인하게 된다. 재생산 시 필요한 교배확률과 돌연변이 확률은 각각 시행착오를 거쳐 최적의 해에 가장 빨리 수렴하는 0.8(80%), 0.2(20%)로 하였다. 목적함수와 적합도의 평가는 수음 지역에서의 평균 음압으로써 나타내었다. 그리고 세대가 진행되면서 최적의 개체가 살아남지 못하고 소멸되는 것을 방지하기 위해 엘리트 전략을 사용하였다. 엘리트 전략을 사용함으로써 현재 세대에서 유전적으로 가장 강한 특성을 갖고 있는 개체를 다음 세대로 전달할 수 있게 되었다.

5. 컴퓨터 시뮬레이션 결과

Fig. 3은 2개(-Z축과 원점을 포함하여 총 5개)의 제어음원을 선택하는데 있어서 모사 어닐링 기법과 순차적 탐색기법, 유전자 알고리즘을 별도로 적용한 경우를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 소음이 감소하는 영역과 증가하는 영역이 거의 일치하고, $z=1.6$ m 이상 되는 지점에서 약간의 성능 차이가 발생하지만 각기 다른 방법을 적용했음에도 불구하고 수음점에서 음압의 감소량이 거의 일치함을 보이고

있다. 다시 말해 찾아진 제어음원의 위치가 세 가지 방법 모두 거의 유사함을 알 수 있다. 이와 같이 세 방법 모두 비슷한 결과를 보여주는 것은 순차적 탐색 기법과 모사 어닐링 기법은 총 20개 중 2곳을 찾는 문제이고, 유전자 알고리즘의 경우 총 33개 중 2곳을 찾는 문제이므로 상대적으로 탐색공간의 크기가 작아 세 경우 모두 거의 유사한 최적의 결과를 보여주는 것으로 판단된다.

Fig. 4는 3개의 제어음원을 찾는 경우로써 세 가지 방법을 각기 독립적으로 적용했을 때를 나타내고 있고, Table 1은 각각의 알고리즘에 의해 찾아진 제어음원의 최적 위치와 그 때의 평균 음압 감소량을 보이고 있다. Table 1에서 제어음원이 위치는 Z축을 중심으로 좌우 대칭으로 배열했기 때문에 -Z축과 원점을 제외한 +Z축의 위치만을 나타내었다. 수음 지역

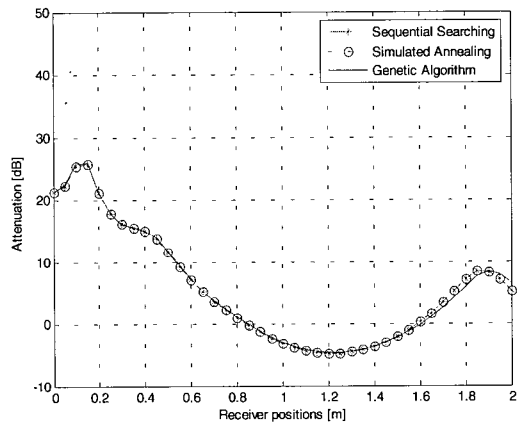


Fig. 4 Attenuation at the receiver positions with 5 control sources in optimal positions

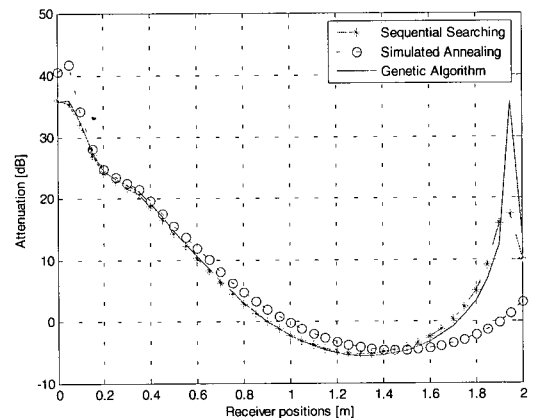


Fig. 5 Attenuation at the receiver positions with 7 control sources in optimal positions

의 평균 음압 감소량은 Table 1에서 알 수 있듯이 유전자 알고리즘에 의한 값이 순차적 탐색기법에 비해서는 0.34 dB, 모사 어닐링 기법에 비해서는 0.84 dB 큼을 알 수가 있다. 순차적 탐색과 모사 어닐링 기법의 경우엔 순차적 탐색 방법이 모사 어닐링 기법보다 0.5 dB 정도 나은 결과를 볼 수 있다. 이는 모사 어닐링 기법이 순차적 탐색보다 더 나은 결과가 나올 것으로 예상했으나 모사 어닐링 기법에 의한 탐색이 방음벽 시스템 전체에 걸친 최적의 해가 아닌 국부 최적해로 수렴한 것으로 보인다.

$z=0.0\sim 0.1m$ 지역에서는 모사 어닐링 기법에 의한 방법이 조금 더 효과적임을 보이고 있고, $z=1.7m$ 이상인 지역에 대해서는 유전자 알고리즘과 순차적 탐색기법에 의한 방법이 모사 어닐링 기법에 비해 상대적으로 급격한 시스템의 성능 향상을 가져옴을 알 수가 있다. 또, 소음이 증가하는 측면에서 보면 모사 어닐링 기법에 의한 방법이 나머지 두 방법에 비해 소음이 증가하는 구간이 더 넓음을 알 수 있다.

Fig. 5는 4개의 제어음원을 찾는 경우를 보여주고 있다. 이 경우엔 모사 어닐링 기법을 독립적으로 적

용하지 않고 순차적 탐색기법과 하이브리드 시켜 제어음원을 찾았다. 다시 말해 우선 2개의 제어음원을 모사 어닐링 기법으로 찾아 고정시킨 다음 다시 2개의 제어음원을 모사 어닐링 기법으로 찾은 경우이다. 4개의 제어음원을 찾는 경우엔 3개의 제어음원을 찾을 때와 마찬가지로 유전자 알고리즘에 의한 방법이 가장 좋은 결과를 보임을 알 수가 있다. Table 1에 의하면 유전자 알고리즘에 의한 수음 지역의 평균음압 감소량은 순차적 탐색기법에 비해서는 1.21 dB, 순차적 탐색기법과 모사 어닐링 기법이 결합 된 경우에 비해서는 1.09 dB 큼을 알 수가 있다. 또 유전자 알고리즘을 적용했을 때를 제외한 나머지 두 경우에 대해서는 모사 어닐링 기법과 순차적 탐색기법을 병행하였을 때가 단순 순차적 탐색기법을 적용했을 때보다 0.12 dB 정도 큼을 알 수가 있다. 수음 지역 $z=0.0\sim 1.0m$ 사이에서는 유전자 알고리즘에 의한 방음벽의 성능이 훨씬 좋으며, 제어음원의 수가 적을 때보다 미약하나마 소음이 감소하는 영역도 넓어졌음을 알 수가 있다. 반대로 $z=1.0m$ 이상인 지역에 대해서는 오히려 유전자 알고리즘에 의한 방법이 소음을 더 증가시킴을 볼 수가 있고, 이 영역에서는 순차적 탐색기법과 모사 어닐링 기법에 순차적 탐색기법을 병행 했을 때가 유전자 알고리즘을 적용했을 때보다 소음 증가 구간이 작음을 확인할 수 있다.

Fig. 6의 그래프는 능동방음벽 시스템의 보다 일반적인 평가를 위해 소음 평가 위치를 공간으로 확대한 결과이며 유전자 알고리즘을 사용한 경우이다. 그래프에 나타난 평면의 위치는 수음점의 위치 (r ,

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

No. of total control sources used	Sequential searching	
	Control source positions [m]	Average noise reduction [dB]
5	0.0675, 0.075	5.73
7	0.0675, 0.075, 0.1275	7.75
9	0.0675, 0.075, 0.1275, 0.150	8.84
No. of total control sources used	Simulated annealing+ Sequential searching	
	Control source positions [m]	Average noise reduction [dB]
5	0.0675, 0.075	5.73
7	0.0600, 0.105, 0.1125	7.25
9	0.0675, 0.075, 0.1425, 0.150	8.96
No. of total control sources used	Genetic algorithm	
	Control source positions [m]	Average noise reduction [dB]
5	0.068, 0.076	5.72
7	0.068, 0.076, 0.122	8.09
9	0.076, 0.106, 0.137, 0.145	10.05

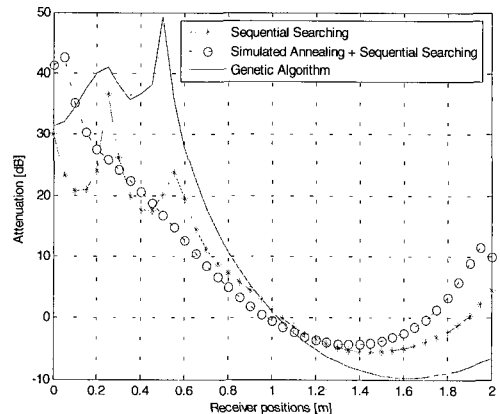
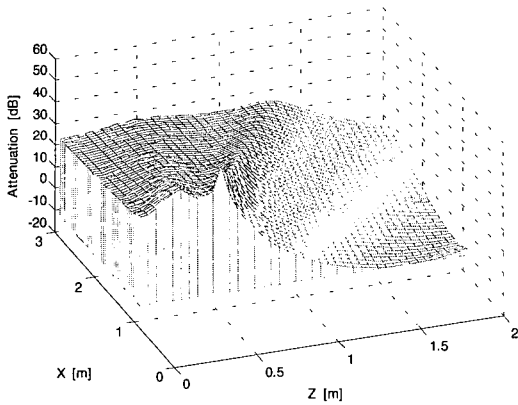
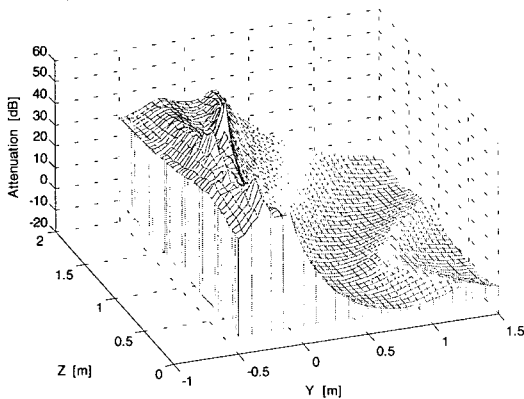


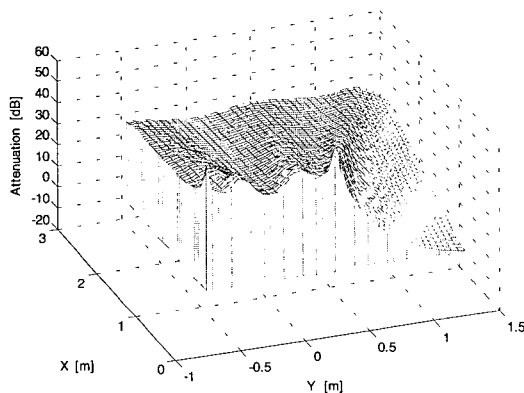
Fig. 6 Attenuation at the receiver positions with 9 control sources in optimal positions



(a) Plot for the XZ plane



(b) Plot for the ZY plane



(c) Plot for the XY plane

Fig. 6 Attenuation variations along the XZ, ZY and XY plane with total 9 control sources

$\theta = (1.0 \text{ m}, 60^\circ)$ 을 중심으로 정하였다. Table 2는 제어음원의 위치와 Fig. 6의 각각의 평면에 대한 평균 음압을 보이고 있다. 제어음원은 유전자 알고리즘을 이용하여 총 9개의 제어음원의 위치를 찾은 결과이

Table 2 Secondary source positions and mean attenuations at the each plane

Control source positions [m]		0.076, 0.106, 0.137, 0.145
Average attenuation [dB]	XZ plane	17.77
	ZY plane	8.58
	XY plane	25.34

고, Table 2에서 제어음원의 위치는 제어음원의 배열 형태가 Z축을 중심으로 좌우 대칭이기 때문에 -Z축과 원점을 제외한 +Z축만을 표현했다.

Table 2에 나타났듯이 세 개의 평면 중에서 XY 평면에서 소음 감소량이 가장 큼을 알 수 있고, 상대적으로 ZY 평면에서의 소음 감소량은 다른 평면에 비해 작음을 볼 수 있다. Fig. 6의 (a)그림을 보면 방음벽에서 멀어질수록 소음이 감소하는 레벨은 작아지지만 소음 감소 영역이 비교적 넓게 분포되어 있음을 볼 수 있다. $z=1.0\sim 2.0 \text{ m}$ 인 구간에 대해서 방음벽과 가까운 영역은 오히려 소음이 증가하는 반면 평면의 방음벽에서 멀어질수록(좌표의 원점에서 +X축과 +Z축 방향) 소음이 감소함을 알 수가 있다. (b)의 그림은 ZY 평면에서의 음압 감소량을 나타낸 것으로 방음벽 높이 방향(Y축)에 대해서는 방음벽의 가장 상단 부근에서 음압감소 효과가 뛰어나고 방음벽 끝단 부위를 지나 그 이상 되는 지점에 대해서는 오히려 소음이 증가함을 볼 수 있다. 또, 동일한 높이에서는 방음벽을 따라 원점에서 멀어질수록 전체적으로 감소 효과가 작아짐을 알 수 있다. (c)의 그림은 XY 평면에서의 음압 감소량을 나타낸 것으로 (a)에서와 마찬가지로 방음벽에서 멀어질수록 소음 감소 레벨은 작아지지만 소음이 감소하는 영역은 넓어짐을 나타내고 있다. 또한 방음벽의 높이 방향에 대해서는 평면의 대각선 방향(좌표의 원점에서 +X축과 +Y축 방향)으로 소음이 증가하는 구간은 줄어들고 감소하는 영역이 점점 증가함을 볼 수 있다.

6. 결 론

이 연구에서는 능동방음벽 시스템에서 방음벽의 성능을 향상시키고 동시에 제어음원의 최적의 위치를 찾는데 있어 순차적 탐색기법, 모사 어닐링 기법, 순차적 탐색기법과 모사 어닐링 기법의 병행, 유전자 알고리즘 최적화 기법을 사용하였다. 제한된 탐색 공간에서 찾아야할 제어음원의 수가 상대적으로 작게

되면 각각의 방법 모두 유사한 결과를 얻게 되지만 찾아야할 제어음원의 수가 증가할수록, 즉 탐색의 크기가 커질수록 모사 어닐링 기법과 유전자 알고리즘에 의한 결과가 더 효과적임을 보였다. 특히 제어음원의 수가 증가 할수록 유전자 알고리즘에 의한 방음벽의 성능 향상이 모사 어닐링보다 큼을 확인하였다. 모사 어닐링 기법에 순차적 탐색기법을 함께 사용한 것은 순수 모사 어닐링 기법의 탐색 시간을 줄이기 위해 성능 감소를 어느 정도 감수한 예정된 결과이므로 단순히 유전자 알고리즘에 의한 방음벽의 성능이 더 우수하다고 단정 짓기는 어렵다. 따라서 보다 우수한 최적화 기법을 판별하기 위해서는 수음점의 개수 및 위치, 제어음원의 개수 등 다양한 조건하에서 각각의 최적화 기법을 독립적으로 적용해 봄으로써 가능하다고 판단된다.

능동방음벽 시스템의 성능을 평가하는데 있어 Z축을 따라 평가함과 동시에 더 나아가 공간상에서 소음 감소량을 평가하였다. 이로써 보다 일반적으로 소음 감소 영역을 평가할 수 있었다.

후 기

이 연구는 2004학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.

참 고 문 헌

- (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) 백광현, 2004, "능동방음벽 시스템에서의 제어 음원 위치에 관한 고찰", 한국소음진동공학회논문집, 제 14 권, 제 2 호, pp. 164~171.
- (5) 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.
- (6) 진강규, 2000, 유전알고리즘과 그 응용. 교우사, 서울.