

능동소음제어 시스템의 마이크론 및 스피커 최적위치 선정

이홍원, 서성대, 남현도
단국대학교 대학원 전기공학과

Optimal Selection of Microphone and Speaker Positions in Adaptive Noise Control Systems

Hong-Won Lee, Sung-Dae Seo, Hyun-Do Nam
Department of Electrical Engineering, Dankook University

Abstract - In this paper, positions of microphones and speakers in adaptive noise control systems are selected using optimization techniques.

To get the optimal control characteristics of adaptive noise control system, It is necessary to optimize positions of microphones and speakers. Assume that control speakers are placed in a experimental enclosure several place indoors. Acoustic transfer functions from control speaker positions to microphone positions are measured for simulation program by experiments, and simulated annealing methods are used to select optimal positions of speakers and microphones.

1. 서 론

과학기술의 발달은 산업의 발전과 더불어 인간의 생활을 윤택하게 하였으나, 환경오염과 같은 문제점이 대두되었다. 특히 소음은 산업현장뿐 아니라 인간생활에 밀접한 영향을 준다. 소음을 제어하는 기법으로는 흡음재나 방음재를 이용한 수동 소음제어기법과 중첩의 정리를 이용한 능동 소음제어기법이 있다. 최근 들어 반도체 기술의 발달과 인간에게 큰 영향을 미치는 저주파 대역의 소음에 적합한 능동 소음 제어 기법의 연구가 활발히 이루어지고 있다[1].

공간 외부에 위치하는 소음원에 의하여, 창문등과 같이 부분적인 개구부를 가지는 실내 공간에 소음이 전파될 때, 능동소음제어 기법을 이용하여 소음을 제어하는 능동소음제어 시스템을 제안하였다. 최적의 제어특성을 얻기 위해서는 마이크론 및 스피커들의 위치를 최적화할 필요가 있는데 본 논문에서는 무작위 지향성 탐색 방법의 하나인 시뮬레이티드 어닐링 기법을 이용하였다. 모형 실내 공간의 여러 위치에 스피커들을 위치시키고 마이크론들과의 전달특성 값을 계측하여 시뮬레이티드 어닐링 기법을 이용하여 최적의 스피커와 마이크론의 위치를 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 선정하였다.

2. 본 론

2.1 능동 소음 제어 이론

능동소음제어는 중첩의 원리를 이용한 것으로 소음제어의 기본 원리는 덕트내에서 간단히 설명되어질 수 있다. 제어용 음원을 이용하여 제어 신호를 발생시킴으로써 발생된 소음을 상쇄시키는 것으로 이를 구성하면 그림 1과 같다.

소음원 G 에서 발생한 S_n 은 덕트를 따라서 전파되어 마이크론에 의해서 감지된다. 이 신호를 전기 신호로 변화하여 제어 시스템을 통해 위상과 음향의 크기를 가변하고 출력 스피커를 통해 제어음 S_c 가 방출된다. 음파의 전달 속도가 전기적 신호의 전달 속도에 비해 느리기 때문에 신호의 지연 D_s 는 전기적 지연 D_e 보다 작다. 그러

므로 소음원에 대한 제어음 S_c 의 180° 위상전환은 제어 시스템의 적절한 크기 보상과 위상 변화로 얻을 수 있다.

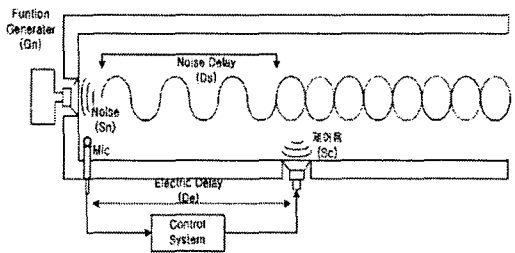


그림 1 능동 소음 제어의 기본 원리

2.2 최적화 기법과 위치 선정

능동 제어 시스템에서 사용되는 소스와 센서들의 최적 위치를 찾기 위하여 제어 대상이 되는 시스템의 음향장 특성을 이론적으로 예측하려는 많은 연구가 있어왔다. 계측 결과를 이용한 위치 선정 방법은 계측이 필요하다는 번거로움과 불편이 뒤따르지만 그 정확성은 이론적 예측보다 좋은 결과를 보여준다.

위치 선정의 기본적인 개념은 다음과 같다. 예를 들어 2차 소스로 이용되는 스피커가 놓여질 수 있는 적당한 후보 위치가 10곳이 있다면 각각의 스피커에 대하여 순차적으로 랜덤 입력 신호를 가진시키고 마이크론에서 측정된 값을 이용하여 주어진 음향 공간에서 각각의 스피커와 마이크론 간의 음향학적인 전달 함수를 구할 수 있다. 이와 함께 주어진 마이크론의 위치에서 주 소음원의 소음을 측정하면 이 음향공간에서 주어진 제어시스템이 발휘할 수 있는 최대의 소음 감소치를 실험 측정을 하지 않고서도 상당히 정확하게 계산할 수 있다.

2.2.1 소음감소 계산의 수식화

다음의 그림 2는 전형적인 다중채널 능동제어 시스템을 간략하게 표현한 블록다이어그램이다. 이 시스템에 사용되는 마이크론의 수가 L , 스피커의 수가 M 이라고 가정한다.

주소음원과 제어 스피커에 의해 각각의 마이크론에서 계측되는 총합은 다음과 같이 p 로서 나타낼 수 있을 것이다.

$$p = p_p + Zq_s \quad (1)$$

p_p : 마이크론에서 계측되는 값($L \times 1$ 벡터)

Z : 스피커와 마이크론간의 전달 특성($L \times M$ 행렬)

q_s : 제어 입력신호($M \times 1$ 벡터)

각각의 마이크로폰에서 측정되는 신호의 절대값의 제곱의 합은 다음과 같다.

$$J = p^H p \quad (2)$$

H : Hermitian Transpose

(1)식을 (2)식에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$J = [q_s^H Z^H Z q_s + q_s^H Z^H p_p + p_p^H Z q_s + p_p^H p_p] \quad (3)$$

식 (3)식으로 표시되는 목적함수를 최소화 시키는 제어 입력신호 q_s 는 다음과 같다.

$$q_{opt} = -[Z^H Z]^{-1} Z^H p_p \quad (4)$$

$$J_{min} = p_p^H [I - Z(Z^H Z)^{-1} Z^H] p_p \quad (5)$$

$$J_p = p_p^H p_p \quad (6)$$

제어 전 상태의 목적함수 값은 식 (6)이므로 시스템의 이론적인 최대의 소음 감소치는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Attenuation(dB)} &= 10 \log_{10} \left(\frac{J_p}{J_{min}} \right) \\ &= 10 \log_{10} \left(\frac{p_p^H p_p}{p_p^H [I - Z(Z^H Z)^{-1} Z^H] p_p} \right) \quad (7) \end{aligned}$$

제어 스피커로 입력되는 신호의 절대값의 합으로 표시되는 제어 파워(control effort)는 다음과 같다.

$$q_{opt}^H q_{opt} = p_p^H Z [Z^H Z]^{-2} Z^H p_p \quad (8)$$

2.2 시뮬레이티드어닐링 기법

시뮬레이티드어닐링(simulated annealing) 기법[2] 고체의 냉각에서 에너지의 최저준위 상태에 이르는 과정과 조합적 최적화 기법간의 유사성을 Kirkpatrick과 Cerny가 발견한 이래 많은 이론적 발전과 사용에 따라 붙여진 이름이다. 이 알고리즘의 대표적인 적용 예는 Travelling Salesman Problem[3]으로 세일즈맨이 어떤 순서로 도시를 다녀야 여행 거리가 짧은지를 풀어야 하는 대표적인 조합적 문제이다.

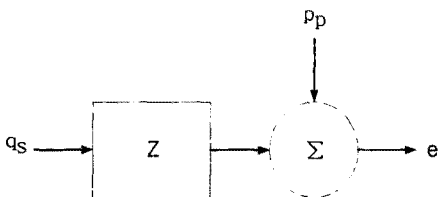


그림 2 능동 소음제어시스템의 블록다이어그램

어떠한 스피커와 마이크로폰의 위치이던지 p_p 와 Z 만 계속되면 최대의 소음 감소치를 계산해 낼 수 있다. 스피커의 경우 30곳의 후보 위치가 있을 경우 그 중 최적의 10곳을 선정하려 할 때, 각 경우의 소음 감소치를 계산할 수 있는지 그 기본 개념은 그림 2와 같다. 총 20개의 마이크로폰이 사용되었다면 20×30 크기의 Z 행렬을 구할 수 있으며 이로부터 임의로 10개의 열(column)을 골라내어 축소된 20×10 크기의 Z 행렬을 추출해 낼 수

있을 것이다. 따라서 30곳의 후보 위치 중 최적의 10곳을 찾는 문제는, 어떤 축소된 전달 특성 행렬이 최대의 소음 감소를 가져오는지 찾아내는 조합적 최적화 문제(combinatorial optimization problem)가 되는 것이다.

어떤 스피커 위치를 이용할 것인지 나타내는 방법은 2진수 표시법을 이용하였다. 예를 들어 '0101'로 표시되는 위치는 2번과 4번의 위치에 있는 스피커들을 사용한다는 식이다. 따라서 30개의 위치 중에서 10개의 위치를 선택하는 경우에는 30bit의 길이를 가지는 스트링(string)으로 모든 위치를 표시하고 이중 어떤 10곳의 '1'이 가장 좋은 결과를 가져오는지 알아내야 한다. 초기에는 무작위로 10개의 '1'을 가지는 30bit 스트링이 생성되고 이에 해당하는 스피커 위치와 마이크로폰 간의 축소된 전달특성 행렬을 만든 후 이 구성으로 최대 소음 감소치를 계산해 낸다. 다음으로 기존의 스트링을 바탕으로 무작위로 다음 스트링을 만들어내어 그 목적함수 값을 계산한다. 새로운 스트링이 과거의 스트링보다 목적함수 값이 좋으면 새로운 스트링이 과거의 스트링을 대체한다. 그렇지 않은 경우 $e^{(-1/T)}$ 으로 주어지는 확률에 의해 과거의 스트링을 대체할 수 있게 되는데 여기서 T 는 과거와 현재의 스트링의 목적함수 값의 차이를 말하며 T 는 변하는 값으로 온도를 나타낸다. 이 두가지 방법으로도 새 스트링이 살아남지 못하게 되면 과거의 스트링을 기준으로 다시 새 스트링을 만들어 내어 위의 과정을 반복하게 된다.

온도는 초기에는 높은 값으로 설정이 되고 각 온도 별로 탐색하게 되는 총 스트링의 수를 제한하며, 각 온도에서 설정된 제한 조건을 만족시키면 다음 스테이지의 온도로 넘어가서 반복하게 된다. 온도가 낮아지는 정도는 냉각상수(cooling coefficient)로 불리는 값을 과거 온도에 곱하여 정해지게 되는데 이 값은 문제의 성격과 패턴에 따라서 적절히 조절해 주어야 한다. 이러한 전체적인 과정이 설정된 매우 낮은 극한 값에 이르거나 이미 설정된 전체 탐색 숫자에 이르면 탐색과정이 중단 되며 그동안 찾은 목적함수 값 중 최적의 값을 산출해 낸 스트링이 최적의 스피커 위치가 되는 것이다.

2.3 시뮬레이션 결과

시뮬레이티드어닐링 기법을 이용하여 실험실 내에 위치한 모형 실내 공간의 30곳에서 스피커들을 위치시키고 11곳의 지점에 마이크로폰을 놓고 이들 간의 전달특성 값을 계속하여 최적의 스피커와 마이크로폰의 위치를 찾아보았다.

주 소음원은 원반에서 전해오는 평면파 형태의 음장 제한을 위하여 웨이브가이드 형태의 덕트를 만들어 모형 실내의 개구부(창문)를 향하도록 배치하였다. 주 소음원은 192[Hz]로 가진시키고 모든 실험이 실행 되었으며, 스피커와 마이크로폰의 위치는 그림 3과 같다.

2.3.1 스피커 최적 위치

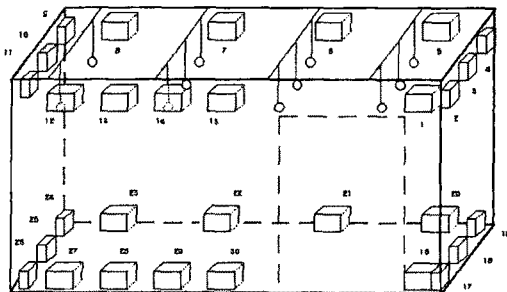


그림 3 제어 스피커 위치

표 1은 가장 좋은 결과를 보인 위치 조합에 대하여 소

음 감소치가 가장 좋은 것부터 순서대로 10개의 결과를 나열한 것이며, 4개의 스피커만으로도 11개의 마이크로폰 위치에서 평균적으로 약 12.8[dB]의 소음 감소를 가져올 수 있음을 보여주고 있다.

표 1 실내에서 가장 좋은 스피커 위치(4개 사용시)

순서	소음감소	소음파워	스피커 위치 번호			
	[dB]					
1	12.79	1.78	15	17	18	30
2	12.61	1.88	15	16	18	30
3	12.50	21.25	15	16	17	30
4	11.05	2.00	1	3	14	15
5	11.00	2.04	2	3	14	15
6	10.85	3.66	1	14	15	16
7	10.79	0.90	1	3	15	17
8	10.69	3.73	2	14	15	16
9	10.6	0.98	2	3	14	15
10	10.55	63.88	1	2	17	30

표 2는 제어에 쓰이는 스피커의 총 수를 1개부터 8개 까지 늘려 나갈 때 얼마만큼의 소음감소를 가져올 수 있는지를 계산한 결과이다. 스피커 6개나 7개를 사용하면 약 19~24[dB] 정도의 매우 좋은 소음 감소를 가져올 수 있음을 보여 준다.

표 2에서 관찰 할 수 있는 또 다른 것은 스피커 6개를 썼을 때가 5개를 썼을 때보다 오히려 제어에 소요된 전체파워는 2.86에서 2.65로 줄어들었다는 것이다. 이는 6개의 스피커를 쓰는 경우가 보다 효율적으로 역할 분담이 되었다는 것을 보여준다.

표 2 스피커수에 따른 내부에서 가장 좋은 스피커 위치

스피커수 (조합)	소음감소 [dB]	소음파워	스피커 위치 번호																			
1	2.64	0.64	15																			
2	5.46	0.82	3	15																		
3	9.02	1.01	2	3	15																	
4	12.79	1.78	15	17	18	30																
5	15.58	2.86	2	14	15	17	30															
6	18.97	2.65	2	10	14	15	17	30														
7	24.24	2.1	1	3	12	14	15	17	29													
8	34.02	2.37	1	3	10	11	14	15	16	29												

2.3.2 마이크로폰 최적 위치

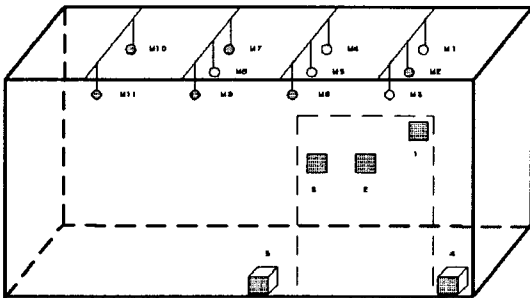


그림 4 6개의 마이크로폰의 최적위치

그림 4와 같이 개구부에 3개 바닥에 2개를 고정 시킨 후 11개의 마이크로폰 위치 중 최적의 6개의 위치를 선

정하였다. 스피커 최적 위치에서와 같은 방법으로 총 5개 스피커와 11개의 마이크로폰의 전달 특성을 계속하여 시뮬레이션을 하였다.

표 3 가장 좋은 마이크로폰 위치(6개 사용시)

순서	소음감소 [dB]	마이크로폰 위치 번호					
		2	6	7	9	10	11
1	16.23	2	6	7	9	10	11
2	14.03	1	3	5	6	7	9
3	13.14	1	3	4	6	7	11
4	12.87	2	3	5	6	7	9
5	11.90	1	3	5	6	7	11
6	11.54	1	2	3	5	7	9
7	11.39	1	2	4	5	7	8
8	11.13	1	3	4	5	6	9
9	11.04	2	3	4	5	8	9
10	10.86	2	4	5	6	8	11

표 3은 마이크로폰을 6개 사용시 가장 좋은 조합 10가지를 나열한 것이다. 조합 1번의 마이크로 폰 위치를 그림 4에서 나타내었는데, 전반적으로 개구부보다는 공간 안쪽의 마이크로폰 들이 많이 선택된 것을 볼 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 능동소음제어 시스템의 스피커의 최적 위치를 선정하였다. 시뮬레이션에 필요한 알고리즘은 무지향성 탐색 방법의 하나인 시뮬레이티드 어닐링 기법을 사용하였으며, 스피커의 개수를 달리하면서 최적의 위치를 선정하였다.

시뮬레이션 결과 제어 스피커의 위치는 문 주위를 위주로 고루 퍼져 있는데, 주로 문과 같은 쪽과 좌우측 벽면에 분포 되어 있으며 마주보는 벽면에는 없다. 또 전반적으로 벽면의 상부에 위치한 스피커가 바닥에 위치한 스피커보다 많다는 것을 알 수 있다.

통상적으로 스피커 위치에만 큰 관심을 가지는데, 마이크로폰 최적 위치 시뮬레이션에서 마이크로폰의 위치만으로도 소음 감소치의 변화를 볼 수 있고 마이크로폰의 위치가 얼마나 중요한지를 볼 수 있다.

본 시뮬레이션을 이용하여 능동 방음벽[4]의 스피커 위치의 최적화를 선정하고 내부와 능동 방음벽의 전체의 최적 위치와 개수를 선정하고 이를 이용하여 마이크로폰의 최적 위치를 선정 할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] S.M. Kuo and D. Morgan, *Active Noise Control System*, John Wiley and Sons. Inc, 1996.
- [2] P.J.M Van Laarhoven and E.H. Aarts, *Simulated Annealing: Theory and Applications*, Kluwer academic publisher, 1988.
- [3] V. Cerny, "Thermodynamical approach to the travelling salesman problem: an efficient simulation algorithm," *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol.45, pp.41-51,1985.
- [4] 권혁, 서성대, 남현도, "능동소음제어 기법을 이용한 Active Noise Barrier 구현," *전력전자 학술대회 논문집*, pp.730-733, 2002