

3차원 공간의 소음 제어를 위한 센서 및 트랜스듀서 최적위치 선정

Optimal position selection
of sensors and transducers for noise control of 3D

이 흥 원*, 서 성 대**, 남 현 도***
(Hong-Won Lee, Sung-Dae Seo, and Hyun-Do Nam)

* 단국대학교 대학원 전기공학과(전화:(02)709-2582, 팩스:(02)795-8771, E-mail : ds1fil@dankook.ac.kr)
** 단국대학교 대학원 전기공학과(전화:(02)709-2581, 팩스:(02)795-8771, E-mail : ssdsp@dankook.ac.kr)
*** 단국대학교 전기전자컴퓨터공학부(전화:(02)709-2574, 팩스:(02)795-8771, E-mail : hdnam@dku.edu)

Abstract : In this paper, the optimal position selection of error sensors and transducers to attenuate interior noise from outside noise sources using active control techniques is presented. To get an optimal control characteristics in adaptive noise control systems, it is necessary to optimize the positions of sensors and transducers. A new type of simulated annealing method has been proposed as searching technique to find optimal transducers and sensors positions in which the sum of the squared pressures at sensor position in an enclosure can be best minimized. Computer simulations and experiments have been performed to show the effectiveness of the proposed method.

Keywords : active noise control, simulated annealing method, optimal positions, digital signal processors

1. 서 론

소음을 제어하는 기법으로는 흡음재나 방음재를 이용한 수동 제어기법과 중첩의 원리를 이용한 능동 소음제어기법이 있는데, 반도체 기술의 발전으로 인간에게 큰 영향을 미치는 저주파 대역의 소음에 적합한 능동 소음제어기법의 연구가 활발히 이루어지고 있다.[1]

능동 제어시스템의 성능은 크게 디지털 필터와 알고리즘에 의해 상당 부분 좌우된다. 그러나 이 두 가지 못지않게 중요한 역할을 하는 것이 제어소스와 센서들의 위치와 수의 선택이다. 일반적으로 같은 수의 센서와 소스들은 이용해도 크게는 몇 배 이상의 차이가 날 수 있다[2,3].

본 논문에서는 외부 소음원에서 발생한 소음이 창문 등과 같이 부분적인 개구부를 통하여 실내 공간에 전파될 때, 이를 제어하기 위한 능동 소음제어 시스템의 트랜스듀서 및 센서의 최적 위치를 추정하는 기법을 제안하였다. 최적의 제어 특성을 얻기 위해서는 트랜스듀서 및 센서들의 위치를 최적화 할 필요가 있는데 본 논문에서는 무작위 지향성 탐색 방법의 하나인 새로운 형태의 시뮬레이티드 어닐링 기법을 제안하였다. 실험용 공간의 여러 위치에 트랜스듀서들을 위치시키고 센서들과의 전달특성 값을 계측하여 시뮬레이티드 어닐링 기법을 이용하여 최적의 트랜스듀서와 센서의 위치를 시뮬레이션을 이용하여 선정하였고, 소음원이

정현파와 실제 도로소음을 이용하여 실험을 통하여 검증하였다.

II. 최적화 기법

능동 제어시스템에서 사용되는 소스와 센서들의 최적 위치를 찾기 위하여 제어 대상이 되는 시스템의 물리적 특성(음향장)을 이론적으로 예측하려는 많은 연구가 있어왔다. 그러나 그 어느 연구 결과도 실제 상황에 적용하는 경우에 있어서 계속된 데이터를 바탕으로 한 위치 선정보다 좋은 결과를 보여주지는 못했다. 본 논문에서는 계속된 데이터를 기초로 하는 최적화 기법을 이용하여 최적 위치를 선정하였다.

1. 능동 소음제어 시스템의 모델링

그림 1은 다중채널 능동제어 시스템을 간략하게 표현한 블록다이어그램이다. 이 시스템에 사용되는 센서가 L , 트랜스듀서의 수가 M 이라고 가정한다. 주소음원과 제어 트랜스듀서에 의해 각각의 센서에서 계측되는 소음의 합은 다음과 같이 P 로서 나타낼 수 있다.

$$e = P_p + Zq_s \quad (1)$$

여기서 P_p 는 $L \times 1$ 벡터, Z 는 $L \times M$ 행렬, q_s 는 $M \times 1$ 벡터이다.

각각의 센서에서 측정되는 신호의 절대값의 제곱의 합은 식(2)와 같으며, 최적 위치를 추정하기 위해서는

에러센서에서 계측되는 신호 자체를 최소화 하기 보다는 식 (2)와 같은 형태로 표시되는 파워의 합을 목적 함수로 사용한다.

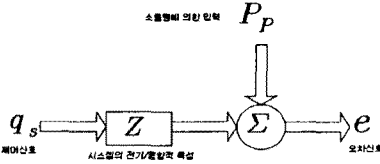


그림 1 능동소음제어시스템의 블록 다이어그램
Fig. 1 Block diagram of ANC systems

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

여기서 H 는 Hermitioan transpose 이다.

(1)식을 (2)식에 대입하여 정리하면 식 (3)과 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)으로 표시되는 목적함수를 최소화 시키는 제어 입력신호 q_s 는 식 (4)와 같으며, 이러한 제어 입력이 가해 질 때 최소화된 목적함수는 식 (5)와 같다[3].

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

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

제어 전 상태의 목적함수 값은 식 (6)과 같으므로 이론적인 최대의 소음 감소치는 식 (7)과 같다[3].

$$J_{P_r} = P_p^H P_p \quad (6)$$

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

제어 트랜스듀서로 입력되는 신호의 절대값의 합으로 표시되는 제어 파워(control effort)는 식 (8)과 같다.

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

2. 시뮬레이티드 어닐링 기법

본 논문에서 다루는 최적화 문제는 탐색공간이 비선형적인 특성을 갖고 있어서 미분이나 기타 전통적인 방식의 최적화 기법으로는 최적의 값을 찾는 것이 불가능하므로 무작위 지향성 탐색 방법의 하나인 시뮬레이티드 어닐링 기법[5,6]을 이용하였다. K 개의 트랜스듀서 후보 위치 중 최적의 I 개를 선정하는 경우를 고려하면, P_p 와 Z 를 알고 있다면 식 (1)을 이용하여 계산할 수 있다. 총 K 개의 센서가 사용되었다면 $J \times K$ 크기의 Z 행렬을 구할수 있으며 임의의 I 개의 열을 골라내어 축소된 $J \times I$ 크기의 Z 행렬을 새로 구성할 수 있다. 따라서 K 개의 후보 위치 중 최적의 I 개를 찾는 문제는, 어떤 축소된 전달 특성 행렬이 최대의 소음 감쇄를 가져오는지 찾아내는 조합적 최적화 문제가 된다. 어떤 트랜스듀서 위치를 이용할 것인지

나타내는 방법은 2진수 표시법을 이용하였다. 예를 들어 '1010'로 표시되는 위치는 트랜스듀서 1번과 3번 위치에 있는 스피커들을 사용한다는 표시다. 따라서 K 개의 위치 중에서 I 개의 '1'을 가지는 K bit 스트링이 생성되고 이에 해당하는 트랜스듀서 위치와 센서들 간의 축소된 전달특성 행렬을 만든 후 최대 소음 감소치를 계산해 낸다. 다음으로 기존의 스트링을 바탕으로 다음 스트링을 만들어내어 그 목적함수 값을 계산한다. 새로운 스트링이 과거의 스트링보다 목적 함수 값이 좋으면 새로운 스트링이 과거의 스트링을 대체한다. 만족하지 않을 경우 e_1 은 기존의 목적함수, e_2 는 새로운 목적함수라고 하면 $E = e_1 - e_2$ 라고 하면 식 (10)과 같이 확률 함수의 경우를 만족할 경우 기존 스트링을 대체한다.

$$T_{i+1} = a T_i \quad (9)$$

$$\text{rand} < e^{(-|E|/T_{i+1})} \quad (10)$$

여기서 rand는 0과 1사이의 랜덤수이며 a는 냉각 상수이며 0.9, T_i 는 냉각 스케줄이라 하며 초기온도 T_0 는 0.98로 선정하였다.

시뮬레이티드 어닐링 기법에서 가장 중요한 것은 과거의 스트링으로부터 새로운 스트링을 만들어 낼 때 사용되는 업그레이드 방법이다. 본 논문에서는 한 개의 비트를 무작위로 바꿔주는 기법을 제안 하였다. Traveling Salesman 문제의 경우에는 스트링의 임의의 두 지점을 선택하여 그 사이에 있는 비트들의 순서를 거꾸로 뒤집어 배열하여 새로운 스트링을 만들어 내는 방법이 매우 효과적이라고 알려져 있으나 본 논문의 경우에는 제안한 기법보다 좋은 결과를 얻을 수 없었다.

III. 컴퓨터 시뮬레이션

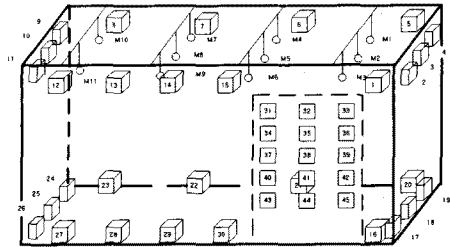


그림 2. 실험용 공간의 구조도

최적 트랜스듀서 및 센서의 위치를 추정하기 위하여 그림 2와 같이 실험실 내에 위치한 모형 실내 공간 내의 30 곳 및 창문의 15곳 등 45곳의 트랜스듀서 후보 위치 및 11곳의 센서 후보 위치에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 소음원으로는 192[Hz] 소음을 방사하는 스피커를 실험용 공간의 외부에 위치시켰으며, 실험용 공간의 모델링을 위하여 트랜스듀서 후보

위치 45곳에서 센서 후보 위치 11곳간의 음향 전달 함수(Z , 45×11 행렬)는 실험을 통하여 측정하였다. 제안된 알고리즘과 몬테카를로 알고리즘(M.M.) 및 시뮬레이션 이터드 어닐링 중 가장 유명한 기법(S.A.)(6) 등을 이용하여 위치를 최적화하고 결과를 비교하였다.

1. 트랜스듀서 최적 위치

1.1 트랜스듀서가 모두 내부에 위치한 경우

표 1은 제안된 알고리즘을 이용하여 내부에 위치한 트랜스듀서 중에서 가장 좋은 결과를 보인 위치 조합에 대하여 소음 감소치가 가장 좋은 것부터 순서대로 5개의 결과를 나열한 것이며, 4개의 트랜스듀서만으로도 11개의 센서 위치에서 평균적으로 약 12.8[dB]의 소음 감소를 가져올 수 있음을 보여주고 있다.

순서	소음감소[dB]	소요파워	스피커 위치 번호			
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

표 1. 최적 내부 트랜스듀서 위치(4개 사용시)

그림 3은 제안된 알고리즘과 M.M. 및 S.A. 기법을 이용하여 내부에 위치한 30개의 트랜스듀서 위치를 최적화한 결과이다. 본 논문에서 제시한 방법이 다른 알고리즘에 비해 빠른 수렴을 보임을 알 수 있다.

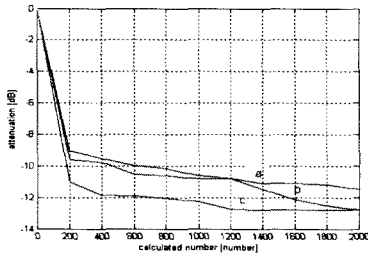


그림 3 알고리즘 수렴성 비교
a: M.M., b: S.A., c: 제안기법

스피커 수 (조합)	소음 감소 [dB]	소요 파워	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					

표 2 트랜스듀서에 따른 최적 내부 스피커 위치

표2는 제어에 쓰이는 트랜스듀서의 총 수를 1개부터 8개까지 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.

1.2 트랜스듀서가 내부와 창문에 배치된 경우

표 3은 내부와 창문에 위치한 모든 트랜스듀서를 이용하여 총 45곳의 위치에서 트랜스듀서 6개 사용시 가장 좋은 트랜스듀서 위치를 5개까지 나열한 것이다. 센서 11개 위치에서 트랜스듀서 6개 사용시 약 26.80[dB]의 소음감쇄를 볼 수 있다.

순서	소음감소[dB]	소요파워	스피커 위치 번호							
1	26.80	26.49	17	25	35	38	39	41		
2	26.74	27.60	17	25	35	37	38	41		
3	26.26	12.19	13	17	30	32	35	41		
4	25.83	1.37	13	17	30	32	33	41		
5	25.79	24.35	16	25	35	38	39	41		

표 3. 최적 내부 및 창문 트랜스듀서 위치(6개 사용시)

표 4는 내부와 문에 위치한 모든 트랜스듀서를 이용하여 총 45곳의 위치에서 1개부터 8개까지의 스피커 수를 늘려가면서 최적의 위치와 소음 감소를 나타낸 표이다. 같은 수의 스피커를 사용하면 표 2보다 더 좋은 결과를 보였다.

스피커 수 (조합)	소음 감소 [dB]	소요 파워	스피커 위치 번호											
1	7.58	1.98	38											
2	9.84	1.62	36	38										
3	13.89	19.23	1	39	42									
4	18.97	1.66	2	17	30	35								
5	21.70	5.68	16	30	33	34	35							
6	26.80	26.49	17	25	35	38	39	41						
7	33.86	20.90	13	30	32	36	40	41	45					
8	43.40	1.77	2	16	20	21	23	30	32	37				

표 4. 트랜스듀서 수에 따른 최적 내부 및 창문 스피커 위치

2. 센서 최적 위치

순서	소음감소[dB]	마이크로폰 위치 번호					
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

표 5 최적 센서 위치(6개 사용시)

실험에 사용할 DSP의 성능을 고려하여 내부와 창문에 5개의 스피커를 사용시 최적위치인 16, 30, 33, 34, 35 위치에 트랜스듀서를 고정하고 전 질에서 시행한

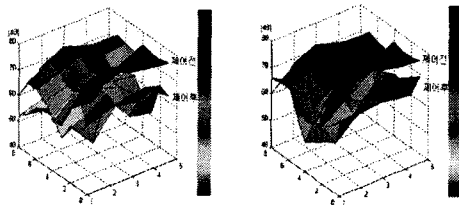
시뮬레이션과 같은 방법으로 최적의 6개를 선정하고 선정된 6개의 센서를 사용할 때 제어 값을 고정하고 총 11개 전체의 센서에서의 소음감쇄를 표 5에서 볼 수 있다.

IV. 실험 및 검토

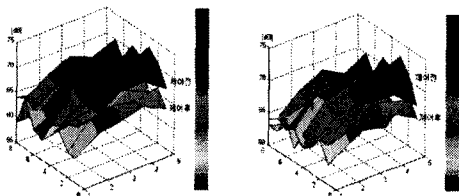
전장에서 계산된 최적 위치를 검증하기 위치를 검증하기 위하여 실험을 수행하였다. 실험용 공간의 전체적인 모양은 그림 2와 같고 크기는 가로 3.4m, 세로 2.1m, 높이 2.1m이며 센서들의 높이는 1.5m에 설치하였다. 하드웨어는 DSP TMS320VC33[7], 마이크로 증폭기, LPF(Low Pass Filter), 신호 증폭기, 스피커 증폭기 등으로 구성하였으며, 적응필터는 24차의 다중채널 FXLMS 알고리즘을 이용하여 구현하였다.

그림 2에서의 트랜스듀서와 센서 위치에서 선정된 최적위치(트랜스듀서 : 16, 30, 33, 34, 35, 센서 : 2, 6, 7, 9, 10, 11)와 임의의 위치(트랜스듀서 : 18, 24, 26, 31, 41, 센서 : 1, 4, 5, 8, 9, 11)의 실험 결과를 비교하였다. 소음원은 시뮬레이션에서 이용된 192[Hz]의 주파수의 정현파와 실제 도로소음을 이용하였다.

그림 4는 정현파를 이용한 실험 결과로서 최적위치에서 최대 20[dB] 이상 평균 [11dB]의 소음감쇄와 임의의 위치에서 최대 20[dB] 이상 평균 9[dB]의 소음감쇄를 보여준다.



(a) 최적 위치에서의 공간 전체 소음감쇄
(b) 임의의 위치에서의 공간 전체 소음감쇄



(a) 최적 위치에서의 공간 전체 소음감쇄
(b) 임의의 위치에서의 공간 전체 소음감쇄

그림 5는 실제 도로소음을 이용한 실험 결과로서 최적위치에서 최대 10[dB] 평균 6[dB]의 소음감쇄와 임의의 위치에서 최대 7[dB] 평균 2[dB]의 소음 감쇄를 보여준다.

마이크로폰이 위치한 부근에서는 최적 위치와 임의의 위치가 큰 차이를 보이지 않으나 공간 전체에서는 최적 위치에서 실험한 결과가 좋은 결과를 보였다. 트랜스듀서 및 센서의 위치를 여러 가지로 옮겨가며 실험하였으나 유사한 결과를 보였다.

V. 결론

본 논문에서는 외부 소음원에서 발생한 소음이 창문을 통해 실내 공간에 전파되는 것을 방지하기 위한 능동 소음제어 시스템의 트랜스듀서 및 센서의 최적 위치를 추정하는 기법을 제안하였다.

최적의 제어특성을 얻기 위해서는 트랜스듀서 및 센서들의 위치들을 최적화 할 필요가 있는데 본 논문에서는 무작위 지향성 탐색 방법의 하나인 새로운 형태의 시뮬레이티드 어닐링 기법을 제안하였다.

최적의 트랜스듀서 및 센서 위치에서 정현파와 실제 도로 소음을 가진시킨 실험 결과 최적의 위치에서 실험한 결과가 임의의 위치에서 실험한 결과보다 전체적으로 좋은 결과를 보였다.

참고 문헌

- [1] S.M. Kuo and D.Morgan Active Noise control System, John Wiley and Sons. Inc, 1996.
- [2] C.P. Kuo and R. Bruno, "Optimal actuator placement on an active reflector using a modified simulated annealing technique," Second conference on Recent Advances in Active Control of Sound and Vibration, pp. 1056-1067, 1993.
- [3] K.H. Baek and S.J. Elliott, "Natural algorithms for choosing source locations in active control systems," J. of Sound and Vibration, vol. 186, pp. 245-267, 1995.
- [4] 남 현도, 서 상대, "다중채널 LMS 알고리즘을 이용한 능동방음벽 구현," 조명·전기설비학회 논문지 게재 예정, 2003.
- [5] P.J.M Van Laarhoven and E.H. Aarts, Simulated Annealing: Theory and Applications, Kluwer academic publisher, 1988.
- [6] V. Cerny, "Themodynamical approach to the traveling salesman problem: an efficient simulation algorithm," Journal of Optimization Theory and Applications, Vol. 45, pp 41-51, 1985.
- [7] Texas Instruments, TMS320V33 Programmer's Guide, 2000.