

인클러져 개구부 투과소음 능동제어

Active Control of Transmitted Noise through Opening of Enclosures

이한울* · 홍진숙† · 정의봉**

Hanwool Lee, Chinsuk Hong and Weuibong Jung

Key Words : Active Noise Control(능동소음제어), Feedforward Control(피드포워드 제어), Enclosure(인클러져), Active Noise Barrier(능동 방음벽), Position Optimization(위치 최적화), Noise Attenuation(소음 감소치)

ABSTRACT

This paper presents active noise control for the reduction of transmission noise passing through opening of enclosures. Enclosures are essential measure to protect noise propagation from operating machinery. Access openings of the enclosures are important path of noise leakage. First, we modeled and analyzed the noise characteristics passing through the openings of the enclosure generated by the operation of the machinery based on the finite element method. We then implemented a feedforward controller to actively control the acoustic power through the opening. Finally, we conducted optimization of placement of the reference sensors for several cases of the number of sensors. A good control performances were achieved using a minimum number of microphones arranged a optimal placement.

1. 서 론

생활수준이 개선됨에 따라 소음으로부터 벗어나 보다 쾌적한 환경에서 생활하고자 하는 욕구가 증대되고 있으며, 생활 소음감소에 대한 필요성이 부각되는 동시에 산업 현장에서도 소음감소를 통해 근로 환경이 개선의 중요성이 증대되고 있다. 산업에서 이용되는 기계는 작동 시 소음을 발생시키는데, 이러한 소음은 구조물 주위에 인클러져(Enclosure)를 설치하여 외부로 방사되는 것을 방지할 수 있다. 구조물 주위에 설치되는 인클러져는 작업자의 출입을 용이하게 하기 위하여 부분적인 개구부가 필요하다.

그러나 이러한 개구부는 내부 소음을 외부로 유출시키는 통로가 될 수 있으므로, 일반적으로 개구부에 개폐형 도어를 설치하여, 이를 열고 닫으며, 인클러져 외부에서 작업을 수행할 수 있도록 한다. 이 때, 기계가 작동 중에 도어를 열게 되면, 내부 소음이 외부로 유출될 수 있을 뿐만 아니라, 도어의 개폐시 발생하는 번거로움으로 인해 작업의 능률이 떨어지는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하게 위하여 개폐형 도어를 부착하는 대신 개구부에 센서를 설치하고, 인클러져 내부에 스피커를 설치하여 제어 신호를 발생 시켜 개구부를 통과하는 소음을 저감시켜주는 능동 소음 제어 기법(Active Noise Control)⁽¹⁾을 이용하여 능동 방음벽(Active noise barrier)을 구축하면 보다 효율적이고, 확실하게 소음을 저감시킬 수 있다.

한편, 외부 소음의 실내 유입을 방지하기 위해 소음 전파 경로를 능동적으로 차단하여 내부 공간의 소음을 줄이는 능동 방음벽에 관한 연구가 활발하게 이루어져 왔다. Nam⁽²⁾은 다중채널 LMS 알고리즘을

† 교신저자; 정회원, 울산과학기술대학교 디지털기계학부
E-mail : cshong@uc.ac.kr

Tel : (052) 279-3134, Fax : (052) 279-3137

* 부산대학교 대학원 기계공학부

** 부산대학교 기계공학부

이용하여 능동방음벽을 구현하였고, Choi⁽³⁾은 다중 채널 FXLMS 알고리즘을 이용하였다.

또한, 능동 소음 제어 시스템을 최적화하기 위해 제어 스피커 및 마이크로폰의 위치 최적화에 관한 연구 역시 활발하게 이루어져 왔다. Baek⁽⁴⁾은 유전자 알고리즘을 이용하여 밀폐된 실내 공간 내의 소음에 대한 최적 위치 선정에 관한 연구를 수행하였고, Nam⁽⁵⁾은 개구부를 통해 외부에서 실내로 유입되는 소음을 방지하기 위한 능동소음 제어 시스템의 스피커 및 마이크로폰의 위치 최적화를 수행하기 위해 시뮬레이티드 어닐링 기법(Simulated Annealing Method)을 제안하였고, Im⁽⁶⁾은 능동방음벽의 성능 향상과 제어음원의 최적의 위치를 찾는 데 있어 시뮬레이티드 어닐링 기법과 순차적 탐색기법(Sequential Searching Method)을 병행하여 사용하였다.

본 연구에서는 소음을 발생시키는 구조물을 둘러싼 인클러저의 개구부를 통해 외부로 투과되는 소음을 저감하기 위하여 구조물의 소음 특성을 분석하고, 시뮬레이션을 이용하여 피드포워드 소음 제어(Feedforward Noise Control)를 수행하였다. 또한, 제어의 성능을 향상시키기 위하여 마이크로폰의 위치 최적화를 수행하였으며, 마이크로폰 수에 따른 제어 성능을 예측해 보았다.

2. Feedforward 제어 기법을 이용한 음향 파워의 최적화

피드포워드 제어 시 마이크로폰에서 계측되는 음압은 식 (1)과 같이 기존 소음에 의한 음압과 제어 신호에 의한 음압의 합으로 정의된다.

$$\tilde{p} = \tilde{p}_p + \tilde{p}_s \quad (1)$$

여기서 \tilde{p}_p 는 내부 소음에 의한 마이크로폰의 음압을 말하며, \tilde{p}_s 는 제어 소스에 의한 마이크로폰의 음압을 말한다.

식 (1)을 전달함수와 제어 소스의 이용하여 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{p} = \tilde{p}_p + \overline{H}_s \tilde{q}_s \quad (2)$$

여기서, \tilde{q}_s 는 제어를 위해 제어 스피커에서 발생하는 음향소스를 말하고, \overline{H}_s 는 제어 소스와 마이크로폰 사이의 전달함수를 말한다.

이 때, 창문을 통해 외부로 유출되는 소음의 음향 파워를 식 (3)과 같이 목적 함수로 둘 수 있다.

$$J = p^H p \quad (3)$$

식 (3)에 식 (2)를 대입하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J = \tilde{p}_p^H \tilde{p}_p + \tilde{q}_s^H \overline{H}_s^H \tilde{p}_p + \tilde{p}_p^H \overline{H}_s \tilde{q}_s + \tilde{q}_s^H \overline{H}_s^H \overline{H}_s \tilde{q}_s \quad (4)$$

식 (4)를 목적함수로 두고, 이를 최소화하기 위해서는 식 (5)와 식 (6)을 만족하여야 한다.

$$\frac{\partial J}{\partial Re(q_s)} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial J}{\partial Im(q_s)} = 0 \quad (6)$$

이 때, 식 (5)와 식 (6)을 만족시키는 제어소스 \tilde{q}_s 는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{q}_s = -(\overline{H}_s^H \overline{H}_s)^{-1} \overline{H}_s^H \overline{H}_p \tilde{p}_p \quad (7)$$

식 (4)에 식(7)을 대입하면, 최소화된 목적함수를 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$J_{\min} = \tilde{p}_p^H \overline{H}_p^H (I - \overline{H}_s (\overline{H}_s^H \overline{H}_s)^{-1} \overline{H}_s^H) \overline{H}_p \tilde{p}_p \quad (8)$$

또한, 이론적인 최대의 소음 감소치는 식 (9)로 정의될 수 있다.

$$Attenuation(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{J}{J_{\min}} \right) \quad (9)$$

3. 인클러져 투과 소음 저감을 위한 능동 소음 제어

Fig. 1은 능동 소음 제어를 수행할 기계와 인클러져의 구조도이다. 내부에 소음을 발생시키는 기계가 있고, 기계 주위를 개구부를 가지는 인클러져가 둘러싸고 있다. 인클러져 내부의 1번과 2번 위치에 소음원이 존재하고, 두 소음원은 서로 크기가 같고, 위상은 반대라고 가정하였다. 또한 3번과 4번 위치에는 능동 소음 제어를 수행하기 위한 제어 스피커가 설치되어 있다. 내부에서 발생하여 인클러져의 한 부분에 위치한 개구부를 통해 외부로 유출되는 소음을 저감시키기 위하여 개구부 상의 임의의 위치에 마이크론을 설치하고, 피드포워드 제어를 이용하여 개구부를 통해 방출되는 소음이 최소가 되도록 하는 제어신호를 스피커를 통해 발생시킨다.

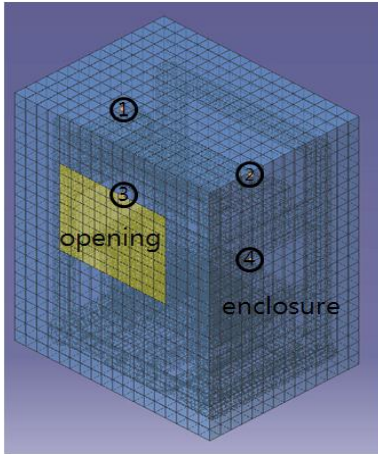


Fig. 1 Model of a Structure with an enclosure

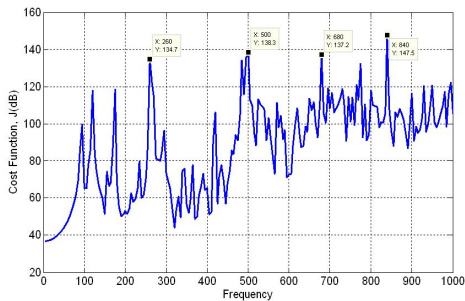


Fig. 2 Uncontrolled Cost Function [dB]

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100

Fig. 3 Node number on the Field point

Fig. 2는 제어 신호 없이 1번과 2번 위치의 내부 소음만 발생할 때, 개구부에서의 음향 파워값을 0~1000Hz까지 5Hz 간격으로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 260Hz, 500Hz, 680Hz, 840Hz 등에서 높은 음향 파워값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 개구부에 설치하는 마이크론을 정의하기 위하여, Fig. 3과 같이 100점의 노드 번호를 부여하였다. 본 연구에서는 피드포워드 제어를 수행하기 앞서 상용 소프트웨어인 sysnoise를 이용하여 제어 신호를 포함한 각 음향소스와 개구부 상의 각 노드 사이의 전달함수를 미리 구해두었다. 소음이 발생하는 위치와 제어 스피커의 위치는 고정하고, 개구부 상의 마이크론의 수와 그 위치에 따른 제어 성능을 중심으로 연구를 수행하였다.

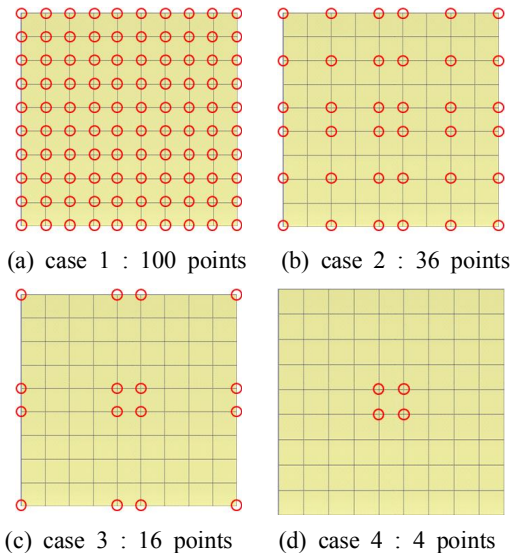


Fig. 4 Arrangements of microphones on the openings to evaluate the effect of the number of the sensors

3.1 마이크론의 수에 따른 제어 성능 비교

마이크론의 수에 따른 제어 결과를 비교해 보기 위하여 Fig. 4와 같이 개구부 상의 마이크론의 수를 다르게 배치하여 소음 제어를 수행하였다. 그림에서 적색 원은 마이크론의 위치를 나타낸 것이다. 각 경우에 따른 제어 결과를 Fig. 5에 나타내었고, 제어 후의 소음 감소치를 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 마이크론의 수가 달라짐에 따라 주파수별 제어 성능이 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 마이크론의 수에 따른 각 피크 값에 대한 소음 감소치를 Table 1에 나타내었다. 마이크론의 수를 4개로 선정하고 제어를 수행하였을 경우에 대체로 제어 성능이 떨어지지만, 그 밖의 경우에 대해서는 거의 비슷한 제어 성능을 나타내었다.

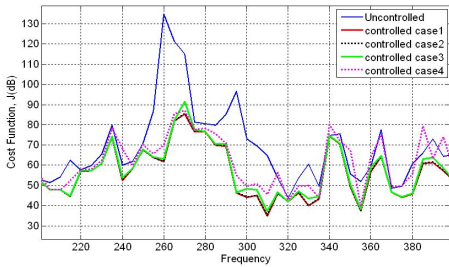


Fig. 5 Variation of cost functions with the number of microphones

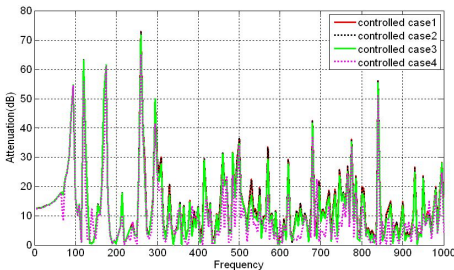


Fig. 6. Variation of attenuation with number of microphones

Table 1 Noise attenuation in dB at peaks

	260 Hz	500 Hz	680 Hz	840 Hz
case 1	72.88	36.27	42.44	55.98
case 2	72.70	36.17	42.17	55.90
case 3	71.63	34.48	41.56	55.34
case 4	64.79	34.06	37.05	51.24

3.2 마이크론의 위치에 따른 제어 성능

피드포워드 제어를 위한 마이크론의 수가 같을 때, 마이크론의 위치 따른 제어 성능을 비교하기 위하여 Fig. 7과 같이 마이크론의 배열을 다르게 하여 제어를 수행하였다. 각 경우에 따른 제어 성능을 Fig. 8에 나타내었고, 제어 후의 소음 감소치를 Fig. 9에 나타내었다. Table 2는 마이크론의 위치에 따른 각 피크 값에서의 소음 감소치를 나타낸 것이다.

마이크론의 수가 같더라도, 마이크론의 위치가 달라지면 주파수별 제어 성능에 차이가 나는 것을 확인하였다.

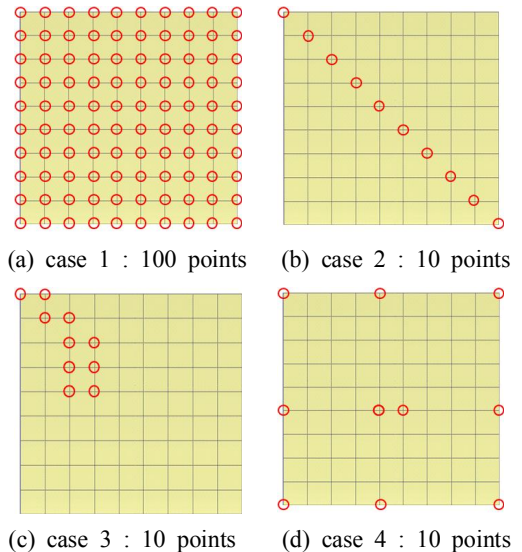


Fig. 7 Arrangements of microphones to evaluate the effect of the location of the sensors

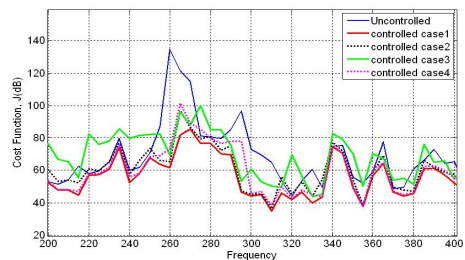


Fig. 8 Variation of the cost function with the location of the microphones

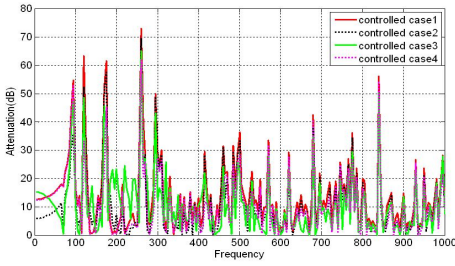


Fig. 9 Variation of attenuation with the location of the microphones

Table 2 Noise attenuation at peaks for positions of microphone [dB]

	260 Hz	500 Hz	680 Hz	840 Hz
case 1	72.88	36.27	42.44	55.98
case 2	69.31	33.25	38.10	53.73
case 3	64.95	21.85	34.91	50.23
case 4	61.76	28.05	40.62	54.33

3.3 제어 성능을 최적화하기 위한 센서 위치 선정

앞서 확인한 결과를 통하여, 센서의 수가 충분히 많다면 제어 성능이 높아지는 것을 확인하였다. 그러나 실제 실험에서는 마이크로폰의 수에 한계가 있을 뿐만 아니라, 마이크로폰의 수가 많아질수록 실험의 오차가 발생할 가능성이 높아진다. 따라서 가능한 적은 마이크로폰을 적절한 곳에 위치시킴으로써, 특정한 주파수의 소음을 효과적으로 저감시키

Table 3 Optimal positions of microphone and noise attenuation at peaks (2 microphones used)

	제어 후 소음 감소치 [dB]	최적 마이크로폰 위치 (2개 사용 시)
260 Hz	72.8635	(62, 79)
500 Hz	36.1478	(37, 56)
680 Hz	42.3607	(11, 19)
840 Hz	55.9684	(55, 77)

Table 4 Optimal positions of microphone and noise attenuation at peaks (3 microphones used)

	제어 후 소음 감소치 [dB]	최적 마이크로폰 위치 (3개 사용 시)
260 Hz	72.8750	(47, 62, 90)
500 Hz	36.2531	(8, 37, 96)
680 Hz	42.4310	(41, 66, 88)
840 Hz	55.9645	(75, 77, 96)

Table 5 Optimal positions of microphone and noise attenuation at peaks (4 microphones used)

	제어 후 소음 감소치 [dB]	최적 마이크로폰 위치 (4개 사용 시)
260 Hz	72.8833	(42, 48, 74, 78)
500 Hz	36.2646	(21, 37, 83, 93)
680 Hz	42.4395	(25, 41, 44, 77)
840 Hz	55.9763	(49, 55, 68, 80)

Table 6 Iteration number for numbers of microphones

마이크로폰 수	반복 계산 횟수
2개	4950 번
3개	161700 번
4개	3921225 번

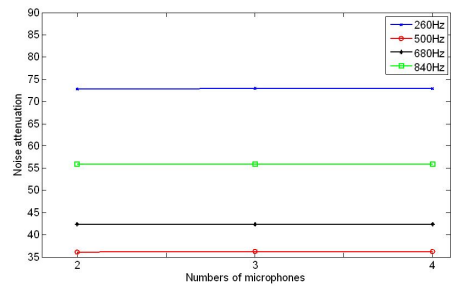


Fig. 10 Variation of the attenuation with the number of microphones

는 기법이 필요하다. 본 연구에서는 능동 소음 제어를 위해 사용하는 마이크로폰에 수를 2~4개로 바꾸어 가면서 각각 모든 경우의 수를 계산하여, 특정 주파수에 대하여 소음 저감에 가장 효과가 있는 마이크로폰의 위치를 선정하고, 그 위치에 따른 제어 결과를 비교하였다. Table 3, 4, 5는 각각 마이크로폰의 수가 2개, 3개, 4개일 경우, 각 주파수별 최적 마이크로폰 위치 및 소음 감소치를 나타낸 것이다. 또한, 마이크로폰의 수에 따른 주파수별 반복 계산 횟수를 Table 5에 나타내었다. 마이크로폰의 수가 달라지더라도 주파수 별로 최적 위치가 거의 비슷한 곳에 위치하는 것을 알 수 있다. 또한 마이크로폰의 수가 증가함에 따라 반복 계산 횟수는 눈에 띄게 많이 늘어나지만, Fig. 10에서 보는 바와 같이 소음의 최대 감소치는 거의 비슷한 것으로 확인되었다. 이를 통해 적은 수의 마이크로폰을 사용하더라도 적절한 위치에 마이크로폰을 배치한다면 뛰어난 제어 성능을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 소음을 발생시키는 구조물을 둘러싼 인클러저의 개구부를 통해 외부로 투과되는 소음을 저감하기 위하여 구조물의 소음 특성을 분석하였다. 분석한 구조물의 소음 특성을 통해 소음이 크게 발생하는 주파수에 대해 시뮬레이션을 이용하여 피드포워드 소음 제어를 수행하고, 각각의 단일 주파수에 대한 소음 저감 효과를 확인하였다.

또한, 제어의 성능을 향상시키기 위하여 마이크로폰의 위치 최적화를 수행하였으며, 마이크로폰 수에 따른 제어 성능을 분석하였다. 마이크로폰의 수가 많을수록 소음 저감에 효과가 크지만, 시뮬레이션이 아닌 실제 실험을 통한 제어에서는 센서의 수가 많아지면 제어 시스템 구현에 어려움이 발생하므로 적은 센서를 적절한 곳에 위치시켜서 최대의 제어 효과를 내는 것이 필요하다. 따라서 마이크로폰의 수에 따른 마이크로폰의 최적 위치를 선정하였고, 최대 제어 효과를 예측해 보았다.

향후 시뮬레이션을 통해 선정된 마이크로폰의 최적 위치에 따른 제어 성능을 실험을 통해 검증해 볼 예정이다.

참 고 문 헌

(1) Kuo, S. M. and Morgan, D., 1996, Active Noise Control System, John Wiley and Sons. Inc, New York.

(2) Nam, H. D. and Seo, S. D., 2003, Implementation of Active Noise Barriers Using Multiple Channel LMS Algorithms, Journal of the Korean Institute of Illumination and Electrical Installation Engineers, Vol. 17, No. 6, pp. 147~153.

(3) Choi, Y. H., Choi, J. I., Kim, D. S., Nam, H. D. and Shim, J. S., 2010, Active Noise Barrier Using Adaptive Filters, ICS, pp. 217~218.

(4) Baek, K. H. and Elliott, S. J., 1995, Natural Algorithms For Choosing Source Locations In Active Control Systems, Journal of Sound and Vibration, Vol. 186, No. 2, pp. 245~267.

(5) Nam, H. D. and Lee, H. W., 2004, Optimal Position Selection of Microphones and Speakers in Adaptive Noise Control System, Journal of the Korean Institute of Illumination and Electrical Installation Engineers, Vol. 18, No. 1, pp. 90~97.

(6) Im, H. J. and Beak, K. H., 2004, A Study on the Performance of Optimization Techniques on the Selection of Control Source Positions in an Active Noise Barrier System, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, pp. 1012~1015.