

음원을 둘러싼 인클로저 개구부를 통해 투과되는 소음의 능동 제어

Active Control of Transmitted Noise through Opening of Enclosures Surrounding a Noise Source

이한울* · 홍진숙* · 정의봉**

Hanwool Lee, Chinsuk Hong and Weuibong Jeong

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

ABSTRACT

In this study, we investigate active control technology to reduce the noise transmitted to the outside through the opening of enclosures. A numerical model based on acoustic boundary element method is first established. Using the numerical model, the acoustic transfer functions of the field points over the opening to the primary source at arbitrary locations are estimated. The feedforward control to minimize the acoustic power through the opening is then numerically implemented. The controller generates the secondary source to destructively interfere the noise transmission through the opening. Finally, a parametric study is conducted to evaluate the effects of the location and the number of the microphones on the control performance. Furthermore, the effects of the location of the secondary source on the performance of active noise control are investigated. It is followed that the control system implemented in this study leads to a significant reduction of about 35dB in sound power through the open using only on secondary source located at the optimized position.

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 환경 개선의 중요성이 증대되고 있다. 산업에서 이용되는 기계는 작동 시 소음을 발생시키는데, 이러한 소음은 구조물 주위에 인클로저(Enclosure)를 설치하여 외부로 방사되는 문제를 방지할 수 있다. 구조물 주위에 설치되는 인클로저는 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, 인클로저 외부에서 작업을 수행할 수 있도록 한다. 이 때, 기계가 작동 중에 도어를 열게 되면, 내부 소음이 외부로 유출될 수 있을 뿐만 아니라, 도어의 개폐 시 발생하는 번거로움으로 인해 작업의 능률이 떨어지는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하게 위하여 개폐형 도어를 부착하는 대신 개구부에 센서를 설치하고, 인클로저 내부에 스피커를 설치하여 제어 음원을 발생 시켜 개구부를 통과하는 소음을 저감시켜 주는 능동 소음 제어 기법(Active Noise Control)⁽¹⁾을 이용하면 보다 효율적이고, 확실하게 소음을 저감시킬 수 있다.

한편, 외부 소음의 실내 유입을 방지하기 위해 소음 전파 경로를 능동적으로 차단하여 내부 공간의

† 교신저자; 정희원, 울산과학기술대학교 기계공학부

E-mail : cshong@uc.ac.kr

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

* 부산대학교 대학원 기계공학부

** 부산대학교 기계공학부

소음을 줄이는 능동 소음 제어에 관한 연구가 활발하게 이루어져 왔다. Nam⁽²⁾은 적응필터의 수렴성을 증가시키기 위하여 다중채널 leaky LMS 알고리즘을 이용하여 능동방음벽을 구현하였고, Choi⁽³⁾는 다중채널 FXLMS 알고리즘을 사용하는 기법과 소음의 특성이 평면파에 가깝다는 가정 하에 제어용 스피커 수만큼의 단일채널 LMS 알고리즘을 사용하는 기법을 제시하였다.

또한, 능동 소음 제어 시스템을 최적화하기 위해 제어 음원 및 마이크론의 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 마이크론의 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 음원을 둘러싼 인클로저의 개구부를 통해 외부로 투과되는 소음을 저감하기 위하여 시뮬레이션을 이용하여 피드포워드 소음 제어(Feedforward Noise Control)를 수행하였다. 또한, 제어의 성능을 향상시키기 위하여 참조 마이크론과 제어 음원의 위치 최적화를 수행하였으며, 그에 따른 제어 성능을 예측해 보았다.

2. 음원을 둘러싼 Enclosure 구조물

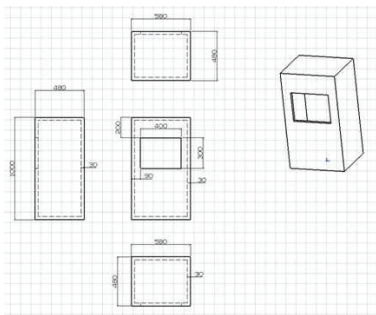


Fig. 1 Schematic of an enclosure under the study

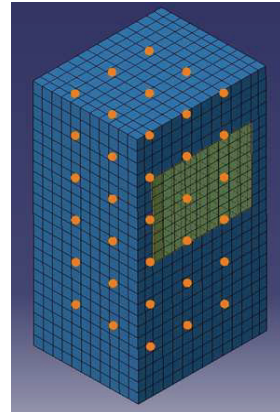


Fig. 2 Acoustic BE model for the interior field of the enclosure with an opening. The solid dots denote candidate locations of the primary sources

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

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 인클로저 모델을 대상으로 하여 내부 소음 특성을 분석하고, 이를 바탕으로 피드포워드 제어 기법을 이용하여 개구부 상의 음향 파워를 저감시켰다.

인클로저 내부의 소음 특성을 분석하기 위하여, 구조물을 Fig. 2와 같이 경계 요소로 모델링하였으며, 상용 소프트웨어인 sysnoise를 이용하여 150mm 간격으로 54점의 음원과 개구부에 정의된 필드포인트 위의 100점의 마이크론 사이의 전달함수를 각각 구하였다. 인클로저 내부의 54개점의 음원을 Fig. 2에 나타내었고, 필드포인트 상의 100개의 마이크론의 노드 번호를 편의를 위해 Fig. 3과 같이 정의하였다.

해석은 5~1000Hz의 범위를 5Hz 간격으로 수행하였으며, 이 때 전달함수를 구하기 위한 음원은 백색소음으로 정의하였다.

본 연구에서는 하나의 소음원이 Fig. 4과 같은 위치에 존재하는 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 이 때 필드포인트 상에서의 주파수별 음향파워는 Fig. 5에 나타내었고, 각 피크에서의 음향파워 값을 Table 1에 나타내었다. 1000Hz 이내에 10개 이상의 피크가 존재하는 것을 확인하였는데, 그 중 하나인 375Hz에 해당하는 주파수의 소음을 줄이는 것을 목표로 설정하였다. 소음을 저감시키는 방법으로는 피드포워드 기법을 이용하였고, 앞서 구한 전달함수를 이용하여 피드포워드 제어 및 센서, 제어 음원의 위치 선정을 위한 코드를 작성하여 연구를 수행하였다.

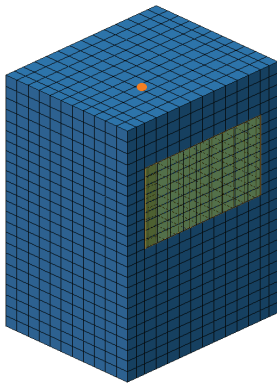


Fig. 4 Position of a noise source in an enclosure

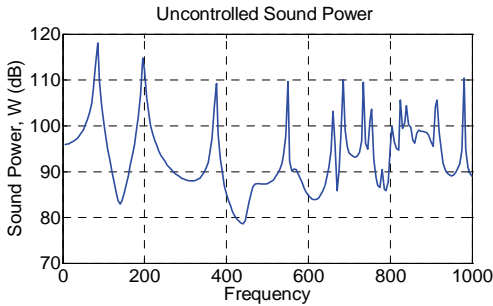


Fig. 5 Uncontrolled sound power on field points

Table 1 Sound power at peaks for uncontrolled case

Freq. [Hz]	sound power [dB]	Freq. [Hz]	sound power [dB]
85	118.1	735	109.5
195	114.8	805	99.86
375	109.3	825	105.6
550	109.6	940	104.3
660	103.1	915	105.6
685	110	980	110.4

3. 인클로저 투과 소음 저감을 위한 능동 소음 제어

3.1 Feedforward 제어 기법을 이용한 음향 파워의 최적화

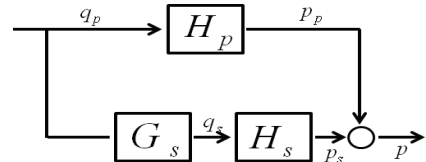


Fig. 6 Block diagram for active feed-forward control

피드포워드 제어 시 마이크로폰에서 측정되는 음압은 식 (1)과 같이 기존 소음원에 의한 음압과 제어 음원에 의한 음압의 합으로 정의된다.

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

여기서 \tilde{p}_p 는 소음원에 의한 마이크로폰의 음압을 말하며, \tilde{p}_s 는 제어 음원에 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 제어 음원을 말하고, $\overline{H_s^*}$ 는 제어 음원과 필드포인트 상의 각 노드 중에서 제어를 위해 사용되는 마이크로폰의 음압 사이의 전달함수를 말한다.

이 때, 마이크로폰에서 구한 음압과 M matrix를 이용하여 식 (3)과 같이 목적 함수로 둘 수 있다.

$$J^* = p^H \overline{M} p \quad (3)$$

(단, $\overline{M} = \frac{A}{\rho c} I$)

여기서 A는 필드포인트의 면적을 나타내며, ρ 는 공

기의 밀도, c 는 공기의 음속을 나타냈다.

식 (3)에 식 (2)를 대입하여 이를 전개하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

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

식 (4)를 목적함수로 두고, 이를 최소화하기 위해서 식 (5)와 식 (6)을 만족하는 하여야 한다.

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

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

이 때, 식 (5)와 식 (6)을 만족시키는 제어 음원 \widetilde{q}_s^* 는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

$$J_{\min} = (\widetilde{p}_p + \overline{H}_s \widetilde{q}_s^*) \overline{M} (\widetilde{p}_p + \overline{H}_s \widetilde{q}_s^*) \quad (8)$$

이 때, 식 (7)은 목적함수 즉, 필드포인트 상에 설치된 각각의 마이크론의 음압의 제곱의 합이 최소가 되도록 하는 제어 소스를 말한다. 식 (8)은 앞서 구한 제어 음원을 발생시켰을 때, 필드포인트 전체의 음향 파워를 나타낸다. 이러한 이유로 제어를 위해 필드포인트 상의 어느 위치에 마이크론을 설치하느냐에 따라서 제어 성능이 달라진다. 따라서 마이크론의 최적 위치 배치가 능동 소음 제어에 있어서 중요한 고려 대상이 된다.

한편, 제어 전 후의 음향 파워의 dB값의 차이, 즉 소음 감소치는 식 (9)로 정의될 수 있다.

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

3.2 마이크론의 배치가 최적화에 미치는 영향

앞서 언급했듯이 마이크론의 위치와 수가 해석 결과에 많은 영향을 미친다. 이를 확인하기 위하여 제어에 고려되는 마이크론의 위치와 수를 달리하여 피드포워드 제어를 실시하였고, 그에 따른 제어 성능을 예측해 보았다. 이 때, 소음원과 제어 음원의 위치는 Fig. 6과 같이 배치시켰고, Table 2에 나타낸 것과 같이 마이크론의 수와 위치를 바꾸어 가며 6가지 경우에 대하여 그 결과를 비교해 보았다. Table 1에서와 같이 1000Hz 이내의 존재하는 여러 피크들 중 임의의 한 주파수인 375Hz의 소음을 저감하기 위한 피드포워드 제어를 실시하였다. 각 경우에 대하여 식 (3)에서 정의된 목적함수가 최소가 되도록 하는 제어 음원을 생성시키고, 이 제어 음원과 원래의 소음원의 합에 의한 필드포인트 상의 음향 파워를 Fig. 7에 나타내었다. 결과에서 보는 바와 같이 마이크론의 위치와 수에 따라서 주파수별 제어 성능이 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통하여 개구부 상의 음향 파워를 최소화하기 위해서는 적절한 마이크론의 수와 위치를 선정하는 것이 중요시 된다.

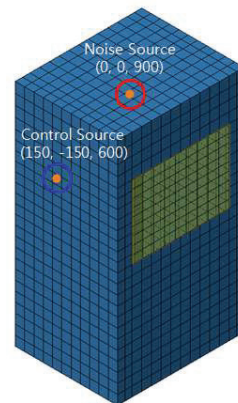


Fig. 6 Position of a noise and a control speaker for reviewing the effect of the placement of microphones

Table 2 6 cases of microphones set for reviewing the effect of the placement of microphones

	마이크로폰의 수	마이크로폰의 위치
case 1	1	10
case 2	1	77
case 3	2	10, 77
case 4	2	77, 90
case 5	3	10, 11, 80
case 6	3	5, 71, 100

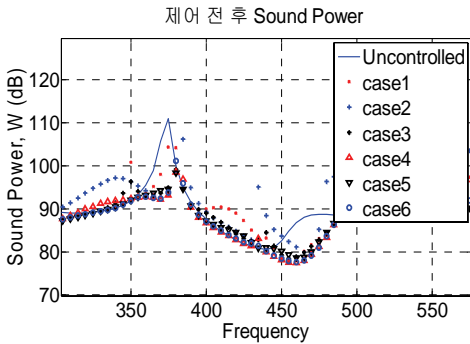
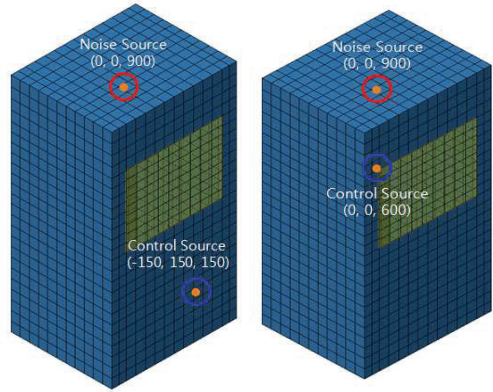


Fig. 7 Sound power on 6 cases for reviewing the effect of the placement of microphones

3.3 제어 음원의 위치가 제어 결과에 미치는 영향

앞의 절에서는 마이크로폰의 위치와 수가 제어 결과에 많은 영향을 미치는 것을 확인하였다. 본 절에서는 제어 음원의 위치가 제어 결과에 미치는 영향을 검토하기 위하여 Fig. 8과 같이 제어 음원의 위치를 달리한 두 가지 경우에 대하여 피드포워드 제어를 수행하였다. 이 때, 마이크로폰의 수를 1~3개로 다르게 정의하여, 제어 성능이 어떻게 달라지는지에 대한 검토도 함께 수행해 보았다. 마찬가지로 소음원과 제어 음원의 수는 각각 1개로 설정하였고, 375Hz의 소음을 저감을 목표로 하였다.

Fig. 8의 (a)와 같이 제어 음원을 위치시킨 경우에 대하여 마이크로폰을 각각 1~3개 사용하였을 때에 대하여 최적의 마이크로폰 위치를 선정하였고, 이 때, 제어 전과 후의 필드포인트 상의 음향 파워를 예측하여 그 결과를 Table 7에 나타내었다. 또한 주파수별 음향 파워의 감소치를 Fig. 9에 나타내었다. 단일 주파수의 소음을 저감하기 위해 마이크로폰의 수를 하나만 사용해도 이론적으로 최대 제어



(a) control source 1 (b) control source 2

Fig. 8 Position of a noise and a control speaker for reviewing the effect of the position of a control source

Table 3 Position of microphones and sound attenuation at 375 Hz using control source 1

마이크로폰의 수	최적 마이크로폰의 위치	제어 전 후의 음향 파워 감소[dB]	이론상의 최대 음향 파워 감소[dB]
1	94	11.5920	11.5942
2	94, 100	11.4826	
3	94, 98, 100	11.3620	

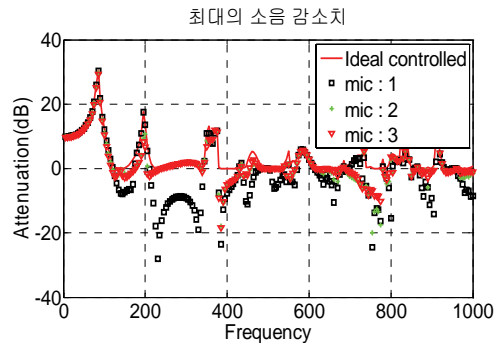


Fig. 9 Sound Attenuation using a control source 1 due to the number of microphones

성능에 가까운 결과를 얻을 수 있었다. 작은 차이지만 오히려 1개의 마이크로폰을 사용했을 때, 해당 주파수의 음향 파워가 가장 낮은 것을 확인하였다. 반면 마이크로폰의 수가 많아지면 보다 넓은 주파수 영역에서 전반적으로 음향 파워가 감소하는 경향을 확인하였다.

다음은 Fig. 8의 (b)와 같이 제어 음원을 위치시킨 경우에 대하여 앞서와 같은 방법으로 마이크로폰의 수를 1~3개로 바꾸어 가면서 375Hz에 해당하는 소음을 제어하기 위한 최적의 마이크로폰 위치를 선정하고, 이 때, 제어 전과 후의 필드포인트 상의 음향 파워를 예측하였다. 마이크로폰의 수에 따른 최적 위치 및 제어 성능을 Table 4에 나타내었고, 주파수별 음향 파워의 감소치를 Fig. 10에 나타내었다. 마찬가지로 하나의 마이크로폰을 사용하여도 단일 주파수에 대해서 충분한 제어 효과를 나타내는 것을 확인할 수 있었고, 마이크로폰의 수가 증가함에 따라 보다 넓은 주파수 영역에 대한 음향 파워가 감소하는 경향을 다시 확인하였다.

제어 음원의 위치를 바꾸어 가며 제어 성능을 비교한 결과 전자는 최대 11.59dB가 감소하는 반면, 후자는 최대 28.61 dB가 감소하였다. 이를 통하여 음향 파워를 제어함에 있어서 마이크로폰의 위치 뿐 아니라 제어 음원의 위치도 중요하게 고려해야 함을 알 수 있었고, 제어 음원의 위치 최적화를 수행함으로써 제어 성능을 증대시킬 수 있다고 예상되었다.

Table 4 Position of microphones and sound attenuation at 375 Hz using control source 2

마이크로폰의 수	최적 마이크로폰의 위치	제어 전 후의 음향 파워 감소[dB]	이론상의 최대 음향 파워 감소[dB]
1	92	28.4386	28.6079
2	92, 100	28.4259	
3	5, 82, 100	28.5567	

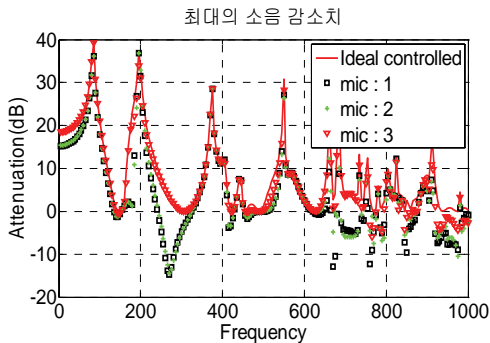


Fig. 10 Sound Attenuation using control source 2 due to the number of microphones

3.4 제어 음원의 최적 위치 선정 및 음향 파워의 능동 제어

다음은 제어 성능을 극대화하기 위한 제어 음원의 위치를 최적화하였다. 우선 인클로저 내부에 하나의 소음원이 존재하는 Fig. 4와 같은 모델에 대하여 개구부를 통과하는 소음을 최소화하기 위해 피드포워드 해석을 수행하였다. 소음원과 제어 음원은 각각 1개로 가정하였고, 제어를 위해 사용되는 마이크로폰의 수 역시 1개를 사용한다고 가정하였다. 해석은 5~1000Hz 범위 내에서 5Hz 간격으로 실시하

Table 5 Position of microphones and sound attenuation at 375 Hz in optimal position of the control source

마이크로폰의 수	최적 마이크로폰의 위치	제어 전 후의 음향 파워 감소[dB]	이론상의 최대 음향 파워 감소[dB]
1	80	31.5212	31.6349

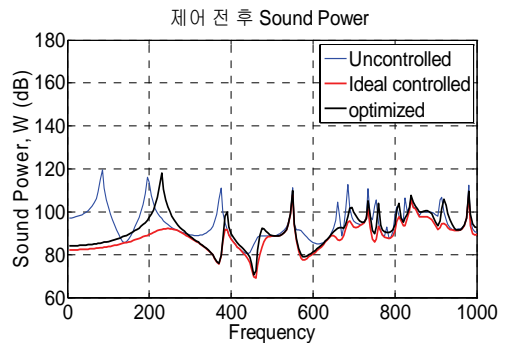


Fig. 11 Sound Power on field points in optimal position of the control source

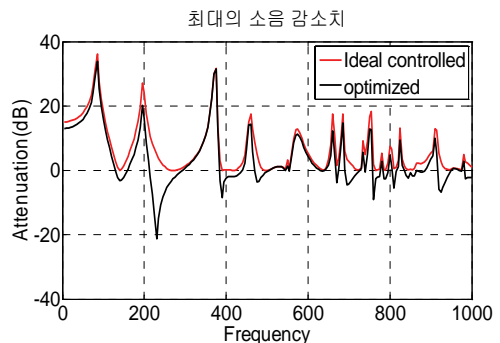


Fig. 12 Sound Attenuation on field points in optimal position of the control source

었고, Table 1에서와 같이 범위 내에 여러 피크 중에서 375Hz의 소음을 저감하는 것을 목표로 제어를 수행하였다.

먼저 필드포인트 상의 음향 파워가 최소가 되도록 하는 제어 음원의 최적화를 위치를 구하였고, 인클로저 내부의 제어 음원의 위치를 Fig. 11에 나타내었다. Table 5는 앞서 구한 제어 음원을 사용할 경우 최적의 마이크로폰의 위치와 그 제어 성능을 나타내었다. 주파수별 음향 파워를 Fig. 11에 나타내었고, 제어 전 대비 음향 파워의 감소치(dB)를 Fig. 12에 나타내었다. 필드포인트 상의 80번 노드 점에 하나의 마이크로폰을 사용하면 소음 제어를 목표로 한 375Hz 소음에 대하여 약 31.52dB 가량의 음향 파워를 저감을 할 수 있다고 예측되었다. 따라서 피드포워드 소음 제어에 있어서, 제어 음원의 위치와 마이크로폰의 위치의 중요성을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 소음원을 둘러싼 인클로저의 개구부를 통해 외부로 투과되는 소음을 저감하기 위하여 능동적인 방법으로 음향 파워의 저감을 수행하였다. 우선 임의의 위치에 하나의 소음원이 존재할 때, 주파수별 음향 파워를 구하고, 그 중 음향파워가 높은 하나의 주파수를 선정하여 피드포워드 해석을 수행하였다. 이 때, 제어 음원의 수는 소음원과 마찬가지로 1개로 가정하였고, 제어를 위한 마이크로폰의 수를 1개~3개로 바꾸어 가며 최적의 마이크로폰의 위치를 선정하고 각각의 제어 성능을 비교해 보았다. 마이크로폰의 수는 저감하고자하는 단일 주파수의 음향 파워 저감에 큰 기여를 하지 못하지만, 넓은 영역의 주파수의 소음 저감에 기여하는 것을 확인하였다.

또한 능동 소음 제어의 성능에 있어서 제어 음원의 위치의 중요성을 확인하였다. 제어 음원의 위치에 따라 제어 전과 후의 음향 파워의 감소의 차이가 큰 것을 확인하였고, 제어를 목표로 하는 주파수의 소음을 가장 많이 저감할 수 있는 제어 음원의 위치를 선정하였다. 이 때 제어 음원과 마이크로폰의 수를 각각 1개로 정의하였으며, 이러한 방법을 통하여 최종적으로 해당 주파수의 음향파워는 31.52dB 정도까지 저감할 수 있는 것을 확인하였다.

본 연구는 내부의 구조물이 없는 인클로저를 대상으로 시뮬레이션을 통해 제어 음원 및 마이크로폰의 위치를 최적화하고, 그 성능을 예측하였다. 향후 실험을 통해 그 결과를 검증할 뿐 아니라, 인클로저 내부에 소음이 있는 구조물에 대해서도 같은 프로세스를 적용해 볼 예정이다.

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.