

능동 소음제어를 이용한 잔향실의 저주파 특성 개선 가능성 Improvements of Reverberation Chamber's Performance by using Active Noise Control

김영기* · 오시환* · 문상무* · 임종민* · 김홍배*

Youngkey K. Kim, Shi-Whan Oh, Sang-Mu Moon, Jong-Min Im and Hong-Bae Kim

Key Words : Reverberation Chamber (잔향실), Active Noise Control (능동소음제어), and Sound Power Measurement (음향파워측정)

ABSTRACT

An active method that improves low frequency characteristics of a reverberation chamber has been proposed. Spatial uniformity of sound pressure at low frequency has been increased by applying active noise control system. The system acts as frequency selective damping materials, which decreases resonance at low frequency and leave high frequency sound field as it is. Linearity of the chamber, which is essential for sound power measurement in the chamber, is guaranteed since fixed control logic has been adopted. Simple application and tests have been done in a small sized rectangular reverberation chamber which has 400Hz cutoff. Loud speakers were used to simulate a noise source and to construct an active noise control system. The spatial distribution of a sound field at 250Hz, 315Hz and 400Hz bands has been measured before and after control. The standard deviation of sound field has been decreased from 3.4dB to 2.5dB. The results show the possibility of active control system as a sound diffuser.

1. 서 론

잔향실법은 음원의 특성 및 측정 위치의 영향을 최소화하기 위해 측정 공간내의 음압 분포가 고른 확산(diffuse)음장을 가정한다[1]. 따라서, 측정하고자 하는 주파수가 낮은 경우 일정 크기 이상의 잔향실을 사용하여야 한다. 잔향실의 크기가 작아서 충분한 개수의 공진 모우드가 형성되지 않을 경우, 공간적인 음압 분포가 특정한 모우드의 형태를 따른다. 잔향실은 일반적으로 흡음을 차감으로, 발생된 공진 모우드는 잔향실내에 음압의 골과 산을 만들어 잔향실법의 적용이 불가능하게 된다. 잔향실이 측정하고자 하는 주파수에 비해 협소할 경우, 회전하는 반사면(sound diffuser) 등의 보조 수단을 사용할 수 있다. 회전하는 반사면은 특정한 모우드의 형성을 방해하여 잔향실 내의 음압분포를 고르게 해주는 역할을 한다. 이외에도 잔향실의 모양을 불규칙하게 하는 방법 등이 잔향실의 공간적 음압 분포 특성을 향상시키기 위해 사용되고 있다.

잔향실의 공간적 음압 분포 특성을 향상시키기 위한 방법의 하나로 ISO 3741은 ‘부록 D: 잔향실 설계 지침’에서 잔향실의 흡음을 이용하는 방법을 제안하고 있다[2]. 일반적으로 잔향실은 잔향특성을 유지하기 위해 낮은 흡음을 갖는 것이 원칙이지만, 저주파수에서는 예외일 수 있다. 저주파수에서 흡음을 높이면 공진특성이 약해지므로 음압의 공간적 분포를 고르게 해주는 효과가 있다. 물론 일반적인 물질은 고주파수로 갈수록 흡음이 높아지기 때문에 이러한 특성의 구현이 어렵지만, ISO 3741에서 제시하는 바와 같이 잔향실 벽면의 흡음을 구성할 수 있으면, 회전하는 반사면(sound diffuser[2])과 같은 보조 수단으로서의 효과를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 능동 소음 제어를 이용하여 저주파수에서 잔향실의 공간적 음압 분포를 개선하고자 한다. 제어 스피커 주변에서의 음압 제어는 능동 흡음재와 같은 현상으로 이해 할 수 있다[3]. 저주파수에서는 모우드 전체의 공진 특성을 저하시킬 수 있다. 능동 소음 제어 방법은 특정 주파수 대역에서 음압의 제어가 가능하므로 ISO 3741에서 제시한 바와 같이 저주파수에서만 작동하는 흡음 특성을 구현이 가능하다. 잔향실은 비교적 고정된 시스템 특성을 유지하므로 능동 소음 제어

* 한국항공우주연구원 위성연구부

E-mail : youngkey@kari.re.kr

Tel : (042) 860-2186, Fax : (042) 860-2234

의 적용에 큰 무리가 없다. 또한, 능동 소음 제어 방법은 저주파수에서 더 효율적으로 구현할 수 있는 것으로 알려져 있으므로 본 논문의 목적에 부합한다.

능동 소음 제어를 잔향실에 적용할 경우, 크게 두 가지의 의문점을 제시할 수 있다. 첫째, 제어스피커에 의한 국부적인 음압 제어가 음장 분포를 고르게 할 수 있는가에 대한 의문점이다. 벽면에 고르게 분포한 흡음재는 공진의 특성을 약화시키므로 확산음장의 형상에 도움을 준다. 하지만, 제어스피커는 매우 큰 흡음 특성을 보일 수 있으나, 면적이 작다. 따라서, 제어 전후의 음장의 분포 변화를 확인하여 실제적인 가능성을 확인해야 한다. 둘째, 능동 소음제어를 이용하는 경우 잔향실의 선형성이 보장되는가에 대한 의문점이다. 이론적으로 고정된 제어 알고리즘을 사용하는 경우, 시스템의 선형성에는 문제가 없다. 하지만, 능동 소음 제어는 제어 음원을 별도로 사용하므로 비정상적인 음압 발생에 따른 비선형성이 발생할 수 있다. 따라서, 실제 구현을 통해 발생할 수 있는 문제점을 확인하여야 한다.

본 연구는 잔향실의 축소모델을 이용해 실험적으로 제안된 방법의 가능성을 검증한다. 능동제어의 사용에 목적을 둔 연구이므로 능동제어 알고리즘은 사용이 용이한 간략화된 내부 모델 제어(Internal Model Control) 방법[4]을 사용한다.

2. 이론

2.1 잔향실의 흡음을 설계 지침

ISO3741의 부록 D 잔향실의 설계 지침은 잔향실의 흡음을 대해 다음과 같이 설명한다.

가. 잔향실의 벽면 흡음을 낮게 하여 잔향음장이 형성되도록 한다.

나. 다음의 주파수 f_c 이하에서는 공진 특성을 약화시키기 위해 벽면의 흡음을 증가시킨다.

$$f_c = \frac{2000}{V^{1/3}} \text{ Hz} \quad (1)$$

다. 벽면의 평균 흡음율은 f_c 이하에서는 0.16을 넘지 않게 하고, f_c 이상에서는 0.06을 넘지 않

게 한다.

2.2 잔향실의 특성 평가 방법

ISO3741의 부록 E는 광대역 소음을 측정하는 경우 음장의 특성은 측정된 음압의 표준편차로 측정하도록 권고하고 있다. 표준편차의 계산식은 다음과 같다.

$$S_s = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_s} (L_{pi} - L_{pm})^2 / (N_s - 1)} \quad (2)$$

여기서,

S_s : 표준편차 (dB)

L_{pi} : 측정지점에서의 음압레벨

L_{pm} : 측정된 음압레벨의 평균

N_s : 측정 음원 혹은 마이크의 위치

2.3 내부 모델 제어 (Internal Model Control, IMC) 방법

내부 모델 제어(IMC)방법은 플랜트의 응답 모델이 제어기에 반영된 제어 방법이다[4]. 가장 간단한 능동 소음 제어 방법은 -180도 위상 차를 두는 음을 재생하는 것이라 할 수 있다. 내부 모델 제어 방법은 내부 플랜트의 응답에 의해 변형되는 만큼 위상을 더 보상해 재생하는 방법이다.

본 연구에서 사용한 IMC 방법은 기존의 IMC 방법을 간략화하여 특정 주파수(챔버의 공진 주파수)에 적용한 방법이다. 그림 1과 같이 출력되는 신호에 노치필터를 적용하면 특정 주파수에만 능동 소음 제어를 적용할 수 있다. 이 경우, 내부 모델은 플랜트 응답의 크기와 위상으로부터 구할 수 있으므로 간단하게 제어기를 구성할 수 있다. 단일 주파수의 경우 그림 1에서 $\hat{G}(z)$ 는 상수로 표현할 수 있으며, 실험적으로 비교적 쉽게 구할 수 있다. 여러 개의 공진 주파수를 제어하고자 할 경우, 제어기를 병렬 연결하여 사용할 수 있다.

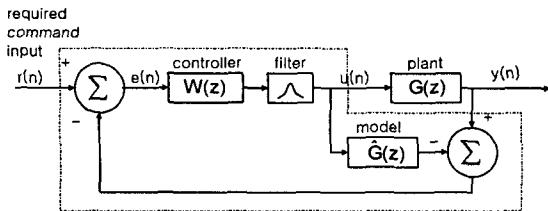


그림 1. 한 개의 공진주파수를 제어하기 위한 내부 모델 제어(IMC) 알고리즘

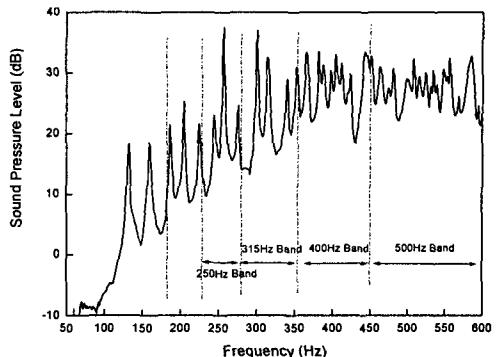


그림 3. 축소 잔향실 내부의 제어전 음압 평균

3. 구현 및 실험

3.1 축소모형 잔향실

본 연구에서는 축소모형 잔향실(그림 2)을 사용하여 제안된 방법을 검증하였다. 그림에서 격자는 음압의 분포를 측정하기 위한 27 개의 측정점을 나타낸다.

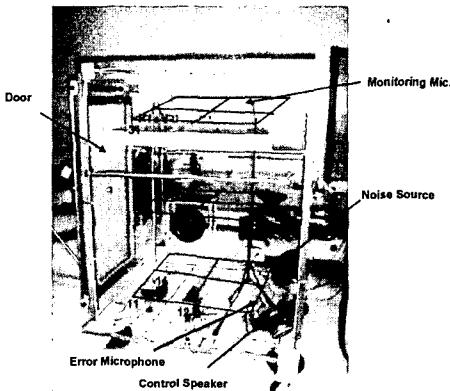


그림 2. 축소모형 잔향실 (크기: 1360x940x108, 30t 아크릴)

잔향실의 유효주파수는 잔향실의 공진주파수 분포를 통해 간접적으로 판단할 수 있다. 일반적으로 측정하고자 하는 밴드 내에 최소 5 개 이상의 공진 주파수가 존재하는 경우 공간 내부에 확산음장이 형성된다고 본다. 그림 3 은 제어스피커만을 작동시켰을 때 측정지점 27 곳에서 측정되는 음압의 평균이다. 그림에서 315Hz 밴드는 공진 주파수가 4 개 400Hz 밴드는 공진 주파수가 10 개이다. 따라서 실험에 사용한 잔향실은 400Hz 부터 유효한 잔향실이라 할 수 있다.

3.2 제어기 설계

본 연구에서는 잔향실의 유효 주파수를 315Hz로 낮추는 효과를 자져 오기 위해서 240Hz ~ 350Hz 사이의 공진 주파수를 제어 대상으로 선정하였다. 제어기는 내부 모델 제어기(IMC)를 DSP 보드를 이용하여 구성하였다. 노치 필터를 사용할 경우, 단순히 크기와 위상을 조절하면 되므로, 제어기는 그림 4 와 같이 구성된다.

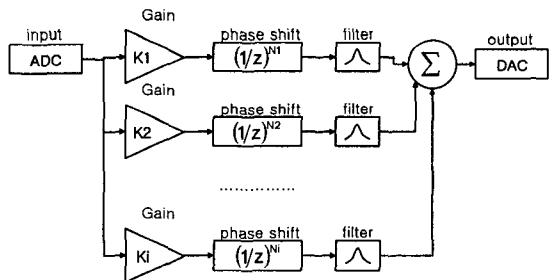


그림 4. 노치 필터를 이용한 단순화된 IMC 제어기

하나의 공진 주파수에 대한 내부 모델은 공진 주파수에서 제어 음원과 오차 마이크로폰의 주파수 응답을 측정하여 구성하였다. 표 1 은 이를 정리한 것이다.

표 1. 공준 주파수에서의 음원과 고차마이크로폰의 주파수 응답 (샘플링 4.0kHz)

Freq(Hz)	245	256	277	301	316	340
Mag(dB)	27.4	28.6	36.6	37.2	37.5	32.9
Phase (deg)	61.2	29.5	62.9	101.0	83.0	80.2
Relative Gain	0.2	0.8	0.2	0.3	0.2	0.0
Delay N	2	1	3	3	3	3

구성된 제어기의 주파수 응답 함수는 그림 5 와 같다.

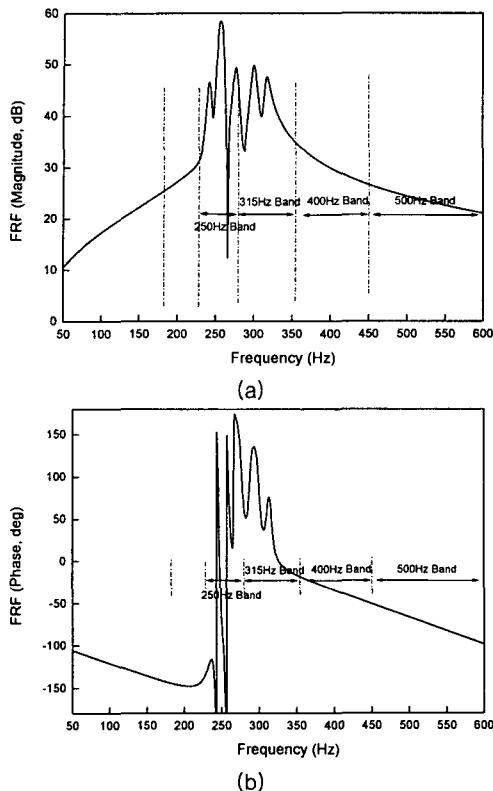


그림 5 제어기의 주파수 응답 (a) 크기 (b) 위상

3.3 제어 성능

제어 전후의 잔향실 내부의 평균 음압은 그림 6 과 같다. 그림에서 250Hz 밴드와 315Hz 밴드의 주파수 성분에 대해 제어가 이루어 졌음을 알 수 있다.

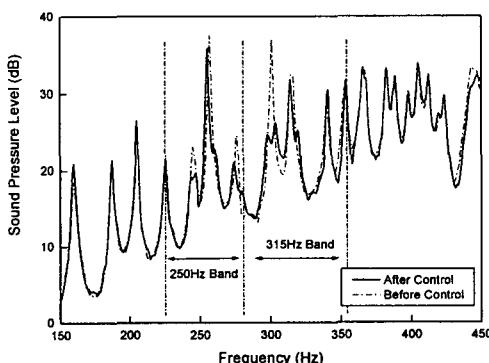


그림 6. 제어 전후의 잔향실 평균 음압비교

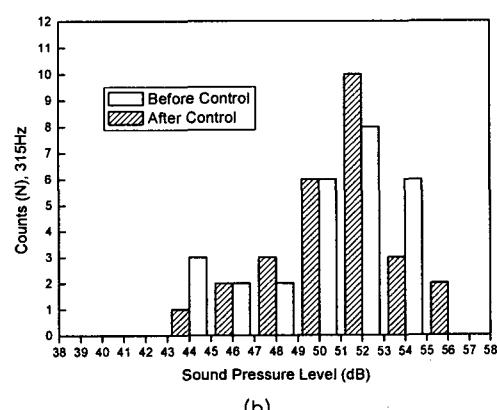
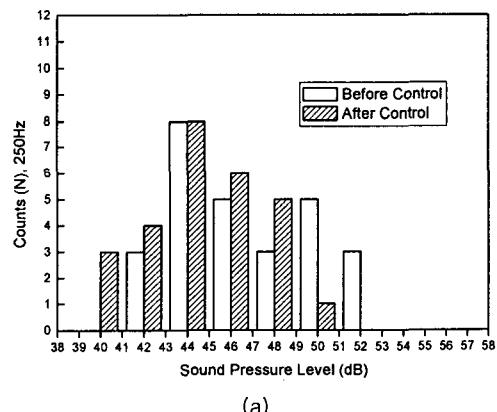
제어 주파수 중 301Hz 의 경우는 최대 10dB 이상의 제어 성능을 보이지만, 256Hz 의 경우 별다른 제어 성능을 확인할 수 없다. 수작업에 의한 IMC 제어의 한계로 판단된다. 그러나 향후 진보된 형태의 능동 소음 제어를 사용할 경우, 향상된 성능을 기대할 수 있다.

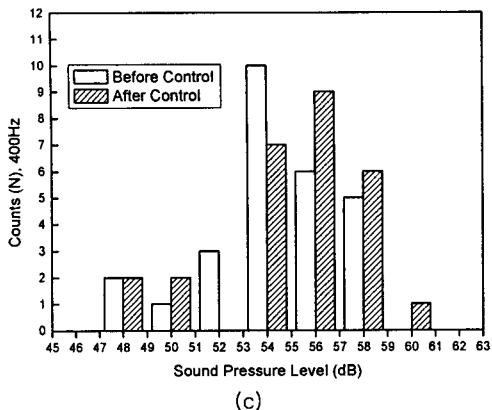
3.4 제어 전후의 음압 분포

제어 전후의 음압 분포를 각 밴드별로 비교하였다. 표 1은 27개 지점에서 측정된 데이터의 평균과 표준편차를 250Hz, 315Hz, 400Hz 밴드에서 비교한 결과이다. 또한 그림 7은 250Hz, 315Hz, 400Hz 밴드의 제어 전후 음압 분포를 나타낸다.

표 1. 제어 전후의 공간적 음압 분포 비교

Freq (Hz)	250	315	400
Mean (dB) (Before/After)	46.5/44.9	51.0/50.2	54.7/55.0
Stand Dev. (Before/After)	3.1/2.7 (-0.4dB)	3.4/2.5 (-0.9dB)	2.8/2.9 (+0.1dB)





(c)

그림 7 제어 전후의 공간적 음압 분포 비교 (a) 250Hz 밴드 (b) 315Hz 밴드 (c) 400Hz 밴드

제어가 수행된 250Hz 및 315Hz 밴드에서는 각각 -0.4dB, -0.9dB 의 성능 향상이 이루어 졌음을 알 수 있다. 반면 제어가 이루어지지 않은 400Hz 밴드에서는 +0.1dB 로 제어 전후에 거의 변화가 없음을 알 수 있다.

3.5 선형성 확인

소음원의 음압을 최대에서부터 서서히 줄여나가며 잔향실의 응답을 확인하여 잔향실의 선형성을 확인하였다. 음압의 조절은 오디오 앰프의 감쇠비(ATTENUATION)를 이용하여 수행되었으며, -2dB~16dB 까지 수행하였다. 그림 8은 마이크로폰 위치 19에서 측정한 음압을 앰프의 감쇠비 변화에 따라 나타낸 것이다. 또한 그림 9는 전체 레벨(Overall Level)을 감쇠비의 변화에 따라 나타낸 것이다.

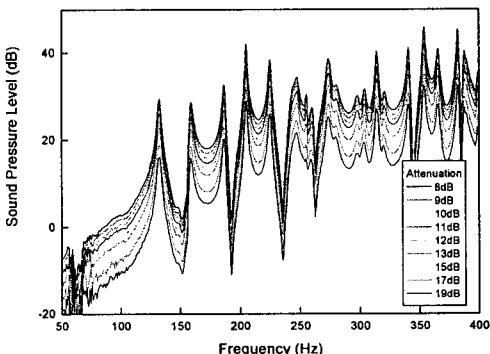


그림 8 소음원의 출력 변화에 따른 잔향실의 응답

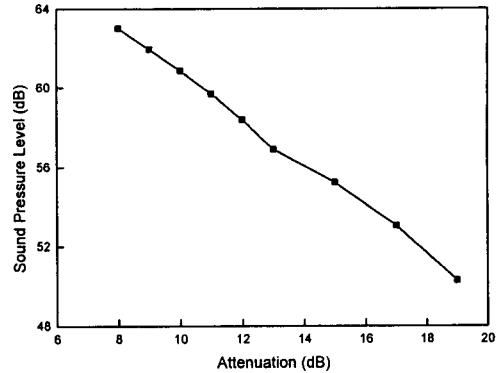


그림 9. 소음원의 출력 변화에 따른 전체 음압 레벨 (Overall Sound Pressure Level)의 변화

측정 결과에서 잔향실은 제어음원의 성능 범위 내에서 선형적인 응답을 보이고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 잔향실의 성능 향상 방법의 하나로 능동 소음 제어 방법의 이용을 제안하고 이의 가능성을 실험적으로 검증하였다. 검증 결과 초보적인 능동 소음 제어 알고리즘을 적용하였음에도 불구하고, 능동 소음 제어 방법의 적용에 따라 음압의 공간적 분포가 고르게 됨을 알 수 있었다. 유효 주파수 아래의 저주파수 대역에서 음압의 공간적 분포에 대한 표준편차가 최대 -0.9dB 향상 되었다. 또한, 잔향실은 선형적인 응답을 보임을 확인하였다. 이는 능동 소음을 사용한 경우에도 성공적으로 음압을 측정할 수 있음을 의미한다.

참고 문헌

- (1) Irwin, J. D., and Graf, E. R., 1979, "Industrial Noise and Vibration Control," Prentice-Hall, INC.
- (2) ISO 3741:1999, Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure – Precission methods for reverberation rooms.
- (3) P. A. Nelson and S. J. Elliott, 1992, "Active Control of Sound," Academic Press.
- (4) S. J. Elliott and P. A. Nelson, 1993, "Active Noise Control," IEEE Signal Processing Magazine, pp. 12~33.