한국소음진동공학회논문집 제 21 권 제 9 호, pp. 820~827, 2011.

http://dx.doi.org/10.5050/KSNVE.2011.21.9.820

열린 창문을 통해 유입되는 소음을 저감하는 능동소음제어 창문

Active Window to Reduce the Exterior Noise Flowed Through the Open Window

권 병 호*·박 영 진†

Byoungho Kwon and Youngjin Park

(2011년 6월 1일 접수 ; 2011년 7월 18일 심사완료)

Key Words : Active Noise Control(능동소음제어), Feedforward Control(피드포워드 제어), Rayleigh Integral Equation(Rayleigh 적분식)

ABSTRACT

Recently, noise has been regarded as one of the most notorious and frequent environmental pollutions which can be often encountered not only in the living space but also in the industrial site. Studies on physiological and psychological effects of long-term noise exposure to human being have commanded the public interest on noise issues. Since environmental noises such as traffic noise and construction noise is mainly flowed through the open window, it is necessary to develop the active noise control system to reduce it inside the building. Although control speakers and microphones for the noise signal measurement in the control region are essential for the conventional active noise control methods, it is impossible to implement them in the control region in the building environment because the control region is the living quarter and they may hinder activities of the residents. Therefore, we proposed the active window system to reduce the exterior noise flowed through the open window with microphones installed outside the window and control speakers installed at the frame of the window. To confirm the performance of the proposed active window, we carried out the simulation and experiment using active window system with 8 control speakers. Simulation results showed the noticeable noise reduction effect inside the control region within the frequency range without the spatial aliasing. Experimental result showed that the total acoustic potential energy inside the room of the scale model is reduced to about 10dB within the interest of frequency range.

1. 서 론

점점 더 복잡해지는 현대사회에서 소음은 산업현장에서뿐만 아니라 일상생활에서도 흔히 접하게 되는 환경오염 요소이다. 소음환경에 지속적인 노출은 인간에게 정신적 혹은 육체적으로 치명적인 질병을 유발할 수 있다는 연구 결과들의 발표로 그 관심이 급격히 고조되고 있다[1,2].

자동차나 열차의 주행에 의한 교통소음, 건설공사장 소음, 항공기소음 등은 건물외부에서 발생하여 내부로 전달되는 소음으로 그 전파영역이 넓을 뿐만 아니라 발생소음의 크기도 건물내부 소음보다 크기 때문에 건물환경에서 거주공간의 쾌적성을 침해하는 중요한 소음원으로 취급되고 있다. 이와 같은 외부 소음원에 대한 거주공간의 쾌적성을 향상시키는 방법으로는 크게 건물 재료의 흡음 및 차음

† 교신저자; 정회원, 한국과학기술원
E-mail : yjpark@kaist.ac.kr
Tel : (042)350-3036, Fax : (042)350-8220
* 한국과학기술원

특성을 이용한 수동소음제어 방법과 음향학적 중첩의 원리에 기반하여 추가적인 마이크로폰과 제어 스피커를 이용해 제어영역에서 소음을 저감시키는 능동소음제어 방법이 있다[3~5].

외부 소음원은 건물환경에서 자연 통풍을 위해 열린 창문을 통해 주로 유입된다. 이 경우에는 수동소음제어 방법을 직접적으로 적용할 수 없기 때문에 능동소음제어 방법을 이용하여 건물 내부 거주공간의 소음을 저감시켜야 한다. 일반적인 능동소음제어 방법은 제어영역에 소음을 측정하기 위한 마이크로폰의 설치를 필요로 하지만 건물환경에서는 제어영역이 사람들이 거주하는 생활공간이므로 마이크로폰 설치가 제한적이라는 문제점이 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서 Elliott와 David는 제어영역에서 떨어진 곳에 설치되어 있는 마이크로폰과 제어 스피커 및 제어영역 사이의 음향학적 전달함수를 이용하여 제어영역에서 소음을 저감 시킬 수 있는 가상 센서를 이용한 능동소음제어 방법을 제안하였다[6].

제안된 방법은 Garcia-Bonito와 Rafaely가 Active Headrest에 적용하여 그 성능을 검증하였고[7,8], Diaz 등은 기차의 침대차에 적용하여 성능을 검증하였다[9]. 이와 같은 가상 센서를 이용한 능동소음제어 방법들은 제어영역에서 실제 마이크로폰까지의 거리가 상당히 짧아야 하며, 제어영역도 협소하므로 건물환경에 적용하기에는 어려움이 있다. 또한 Ise와 Takane 등은 제어영역 경계면에서 측정된 음압과 음압의 변화율을 이용하여 Kirchhoff-Helmholtz 적분식을 이용하여 내부 음장을 계산하고 경계면에 존재하는 제어 스피커들을 이용하여 계산된 내부 음장과 동일한 음장을 구현할 수 있는 경계면 제어방법을 제안하고 모의실험을 통해 가능성을 검증하였다[10,11]. Epain과 Friot은 반지름 0.3 m인 구 내부의 제어영역에 대해서 구면에 30개의 마이크로폰과 반지름 0.6 m인 구면에 30개의 제어 스피커를 이용하여 경계면 제어방법을 적용해 소음 저감 효과를 실험을 통해 검증하였다[12]. 이와 같은 경계면 제어방법에 의한 능동소음제어 방법은 제어영역에서 마이크로폰 설치 문제를 해결하고 제어영역 전체의 소음을 줄일 수는 있지만, 건물환경과 같은 넓은 영역에 적용하기 위해서는 상당히 많은 수의 마이크로폰과 제어 스피커가 필요하기 때문에 실용성이 떨어지는 문제점이 있다.

따라서 이 연구에서는 열린 창문으로부터 유입되는 외부 환경소음을 건물 내부에서 저감시키기 위해서 창문 외부에 설치되어 있는 마이크로폰과 창문 내부에 위치하는 다수의 제어 스피커를 이용하는 능동소음제어 창문을 제안하였고, 그 성능을 모의실험과 실제 축소모형 실험을 통해 검증하였다.

2. 능동소음제어 창문

2.1 문제 정의 및 개념

능동소음제어 창문을 제안함에 있어 다음과 같이 문제를 정의하였다.

· 소음원은 건물 외부에 존재하며, 소음은 열린 창문을 통해서 건물 내부로 유입된다.

· 능동소음제어를 위한 마이크로폰은 창문 외부에, 제어 스피커는 창문 내부에 설치된다.

· 개발하고자 하는 능동소음제어 창문의 크기는 가로, 세로 $1 \times 1\ m^2$이며, 소음제어를 위한 소음원의 관심주파수 대역은 창문 크기에 의해 공간 앨리어싱(spatial aliasing)이 발생하지 않는 300 Hz 이하의 저주파수 대역이다.

· 건물 내부 공간에서 창문을 통해 유입되는 소음을 저감시킴에 있어 닫힌 공간에 의한 음장 특성은 고려하지 않는다.

능동소음제어기법을 적용함에 있어 요구되는 마이크로폰과 제어 스피커는 일반적으로 제어영역에 설치되는데, 건물환경에서는 사람들이 생활하는 거주공간이 제어영역이므로 이곳에 마이크로폰과 제어 스피커를 설치할 경우 사람들의 주거 활동을 방해하여 건물 본연의 기능을 상실하게 된다. 따라서 건물 내부 거주공간에는 마이크로폰과 제어 스피커를 설치할 수 없으며, 이들은 능동소음제어 창문 내·외부에 설치된다. 또한 건물환경에서 외부 소음원인 교통소음과 건설현장소음 등은 일반적으로 건물의 창문과 멀리 떨어져 있으며, 저주파수 대역에 에너지를 많이 포함하고 있다. 따라서 이 논문에서 개발하고자 하는 능동소음제어 창문은 실제 건물환경을 고려하여 가로, 세로 $1 \times 1\ m^2$크기를 가지며, 창문 크기에 의한 공간 앨리어싱이 발생하지 않는 300 Hz 이하를 관심주파수 대역으로 정의한다. 마지막으로 능동소음제어

창문은 소음이 유입되는 경로상에서 소음제어가 이뤄지므로 건물 내부의 닫힌 공간에 의한 음장 특성을 고려하지 않는 이상적인 경우로 가정하였다.

이상에서 설명된 능동소음제어 창문은 Fig. 1과 같이 건물 외부에서 열린 창문을 통해 내부로 유입되는 소음을 창문 외부에 설치되어 있는 마이크로폰과 창문 내부에 설치되어 있는 제어 스피커를 이용하여 건물 내부의 제어영역에서 저감시킬 수 있는 시스템이다.

2.2 제어방법

이 연구에서 제안하는 능동소음제어 창문에는 건물 내부 제어영역에서 소음을 저감시키기 위한 제어 스피커의 제어 음을 창문 외부에 설치되어 있는 마이크로폰에서 측정된 외부 소음원의 음압 신호와 적절한 제어 이득값을 이용하여 계산하는 피드포워드 제어(feedforward control) 방법이 적용되었다.

피드포워드 제어방법에서 제어 스피커의 제어 이득값을 계산하기 위한 목적함수를 다음과 같이 정의한다.

· 건물 외부에서 열린 창문을 통해 내부로 유입되는 소음에 대해서 n개의 제어 스피커를 이용하여 창문을 둘러싸는 반지름 r의 반구면을 통과하는 음파워(acoustic power)를 최소화한다.

위의 목적함수를 만족시키는 제어 스피커의 제어 이득값은 외부 소음원이 단일주파수 성분이고, Fig. 1에서와 같이 창문을 둘러싸는 반구면이 창문에서 충분이 떨어져 있다고 가정할 경우 식 (1)과 같이 표현된다.

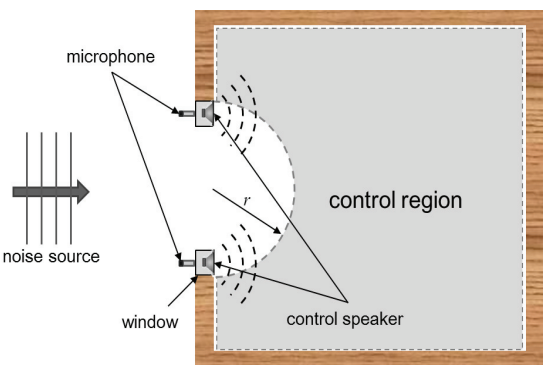

Fig. 1 Concept of the proposed active window

$$J(\omega)=\frac{1}{2\rho_0 c}\int_S \left|p_n(\omega)-P_s(\omega)\cdot \boldsymbol{k}(\omega)\right|^2 dS,$$
$$\boldsymbol{k}(\omega)_{optimal}=\arg\min_{\boldsymbol{k}(\omega)} J(\omega). \tag{1}$$

여기에서 p_n는 외부 소음원에 의한 내부 공간의 음압이고, P_s는 제어 스피커들에 의한 내부 공간의 음압으로 $1\times n$벡터이다. k는 제어 스피커들의 제어 이득값으로 $n\times 1$벡터이다. ρ_0는 공기밀도이고, c는 음파의 전파속도, n은 제어 스피커의 개수, S는 창문을 둘러싸는 반구면을 의미한다.

제어 이득값 k를 계산하기 위해서 식 (2)로부터 식 (3)을 얻을 수 있다. 식 (2), (3), (4)에서 편의상 (ω)는 생략한다.

$$\frac{\partial J}{\partial \boldsymbol{k}^H}=0. \tag{2}$$

$$\int_S \left(P_s^H p_n - P_s^H\cdot P_s\cdot \boldsymbol{k}\right)dS=0. \tag{3}$$

따라서 식 (3)으로부터 계산되는 최적 제어 이득값 k는 식 (4)와 같다.

$$\boldsymbol{k}=\left(\int_S P_s^H\cdot P_s dS\right)^{-1}\left(\int_S P_s^H p_n dS\right). \tag{4}$$

식 (4)로부터 제어 이득값을 계산함에 있어 제어 스피커에 의한 내부 음압 P_s는 제어 스피커를 이상적인 점음원으로 모델링하면 스피커가 설치되는 위치에 대한 함수로 쉽게 계산될 수 있다. 하지만 열린 창문을 통해 유입되는 외부 소음원에 의한 내부 음압 p_n은 직접 측정되거나 이론식을 이용하여 계산되어야 한다. 이 연구에서 제안하는 능동소음제어 창문에서는 내부 음장을 직접 측정할 수 없으므로, Rayleigh 적분식을 이용하여 내부 음장을 계산한다.

2.3 Rayleigh 적분식을 이용한 내부 음장 예측

건물환경에서 열린 창문으로 유입되는 외부 소음원에 의한 내부 공간의 음장을 Rayleigh 적분식을 이용하여 예측하기 위해서 건물환경에서 창문과 외부 소음원을 다음과 같이 가정한다.

· 창문을 포함하는 벽면은 무한 크기의 강체 배플(rigid baffle)이다.

· 외부 소음원은 창문으로부터 충분히 멀리 떨어

져 있어 평면파로 입사한다.

건물 시공에 사용되는 재료들은 단위 부피당 질량이 크기 때문에 일반적으로 음향학적 강체로 생각할 수 있으며, 열린 창문을 제외하고는 외부 소음이 내부로 유입될 수 없기 때문에 무한한 벽면으로 가정할 수 있다. 또한 창문이 설치되는 창틀의 두께는 창문의 크기에 비해 상당히 작아 무시할 수 있다고 가정하며, 일반적인 외부 소음원은 건물의 창문과 상당히 떨어져 있어 창문으로 입사될 때에는 평면파로 가정할 수 있다. 이와 같은 가정하에서 가로, 세로 $a \times b$ m^{2}크기를 갖는 창문을 통해 유입되는 외부 소음원에 의한 내부 공간의 음압은 식 (5)와 같이 Rayleigh 적분식으로 표현할 수 있다[13,14].

$$p_n(x,y,z;\omega) = -\frac{jk\rho_0 c}{2\pi}\int_{-b/2}^{b/2}\int_{-a/2}^{a/2} U_{z=0}(x_0,y_0,0)\frac{e^{jkR}}{R}dx_0dy_0. \quad (5)$$

여기서 $R=\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+z^2}$ 이며, (x,y,z)와 (x_0,y_0,z_0)는 음압 예측 위치와 창문면의 위치를 나타내고, k는 파수, U_z=0는 창문면에서의 소음의 속도이다. U_z=0는 외부 소음원의 입사 방향에 따라 결정된다. 이와 같이 계산된 내부 공간의 음장을 이용하여 능동소음제어 창문의 각 제어 스피커의 제어 이득값을 계산한다.

3. 능동소음제어 창문의 제어 성능

3.1 제어 스피커의 제어 음

건물환경에서 외부 소음원이 단일주파수 성분이라는 가정하에 제어 스피커의 제어 이득값은 식 (4)에 의해 계산되었다. 계산된 제어 이득값 k를 이용하여 i번째 제어 스피커의 제어 음 p_{ci}은 주파수 영역에서 식 (6)과 같이 계산된다.

$$p_{ci}(\omega) = k_i(\omega)M(\omega)e^{j\phi_d}. \quad (6)$$

여기서 $M(\omega)=\int_{-\infty}^{\infty} m(t)e^{-j\omega t}dt$ 이며, $k_i(\omega)$는 단일주파수 성분의 외부 소음원에 대한 i번째 제어 스피커의 제어 이득값이며, $m(t)$는 마이크로폰에서 측정된 신호이고, ϕ_d는 마이크로폰에서 제어 스피커 사이의 거리에 의한 위상 차이이다. 식 (6)으로 표현되는 주파수 영역의 제어 음은 시간영역에서 식 (7)과 같이 표현될 수 있다.

$$p_{ci}(t) = |k_i(\omega)|\cdot m\left(t+t_{\angle k_i(\omega)}+t_d\right). \quad (7)$$

$|k_i(\omega)|$와 $t_{\angle k_i(\omega)}$는 해당 주파수에 대한 i번째 제어 스피커의 제어 이득값의 크기와 시간지연이며, t_d는 마이크로폰에서 제어 스피커 사이의 거리에 의한 시간지연이다.

외부 소음원이 저주파 대역의 광대역 주파수 성분인 경우의 제어 스피커의 제어 음은 단일주파수 성분의 외부 소음원에 대한 제어 이득값의 푸리에 변환을 통해 계산된 시간영역제어 이득값 $f_i(t)$와 마이크로폰에서 측정된 신호 $m(t)$의 convolution으로 식 (8)과 같이 계산된다.

$$p_{ci}(t) = f_i(t)\otimes m(t+t_d) \quad (8)$$

여기서 $f_i(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} k_i(\omega)e^{j\omega t}d\omega$ 이다. 식 (8)에 의해 얻어지는 제어 스피커의 시간영역제어 이득값은 실제 디지털 제어기에서 구현되기 위해 이산화(discretization)되어야 하며 유한한 길이를 가져야 한다[15]. 따라서 시간영역의 제어 이득값 $f_i(t)$을 샘플링 시간을 T_s로 이산화하고 유한한 길이가 되도록 식 (9)와 같이 표현할 수 있다[16].

$$\bar{f}_i(n_dT_s) = \frac{1}{N_f}\sum_{k=0}^{N_f-1} k_i(k)e^{j\frac{2\pi k}{N_f}}, \quad -\frac{N_f}{2} \le n_d < \frac{N_f}{2}. \quad (9)$$

여기에서 n_d는 정수이고, N_f는 제어 이득값의 길이를 나타내며, 샘플링주파수 f_s=1/T_s와 주파수 분해능, d_f =f_s/N_f에 의해 결정된다.

3.2 모의실험을 통한 성능 검증

제안된 능동소음제어 창문의 성능을 검증하기 위한 모의실험에서는 Fig. 2와 같이 반무한 공간으로 모델링된 건물환경에 가로, 세로 1×1 m^{2}크기의 창문에 이상적인 점음원으로 모델링된 8개의 제어 스피커가 설치된 능동소음제어 창문을 가정한다. 또한 외부 소음원은 평면파로 창문에 수직하게 입사하며, 외부 소음원을 측정하기 위한 마이크로폰은 창문 외부에 제어기의 시간지연을 고려할 수 있는 위치에

설치되어 외부 소음원의 음압을 측정한다고 가정한다. 외부 소음원에 의한 내부 음장은 식 (6)의 Rayleigh 적분식을 이용하여 계산되며, 제어 스피커의 주파수 별 제어 이득값은 창문을 둘러싸는 반구면의 반지름이 1.5 m인 경우에 대해서 식 (4)로부터 계산하였고, 시간영역제어 이득값은 식 (9)로부터 계산하였다. 모의실험에서 성능 검증을 위한 내부 공간 내 제어영역은 제어 이득값을 계산하기 위해 정의한 창문을 둘러싸는 반구면의 반지름을 고려하여, 반지름 1.5 m의 반구면 이후에서 반지름 25 m의 반구면 사이의 공간을 정의하였다. 또한 제어 성능을 정량적으로 나타내기 위한 제어 성능지표는 제어영역 V에서 제어 전·후의 전체 음향 포텐셜 에너지의 비로 식 (10)과 같다.

$$\Pi(\omega)=10\log_{10}\left(\frac{\bar{J}(\omega)_{before\ control}}{\bar{J}(\omega)_{after\ control}}\right). \tag{10}$$

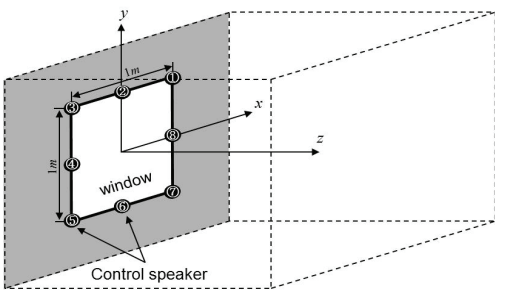

Fig. 2 Building environment modeled as the semi-infinite space and control speakers position of active window for simulation

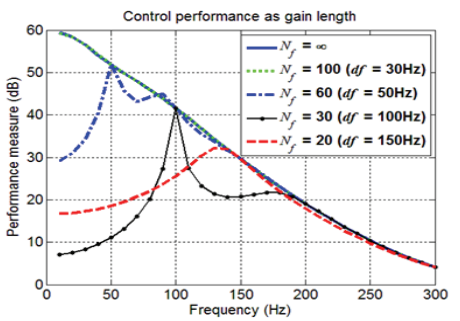

Fig. 3 Simulation result for single frequency noise as gain length; the infinite case is equal to a single frequency control gain case

여기서 $\bar{J}(\omega)=\int_V |p(x,y,z;\omega)|^2\ dV$ 이다.

단일주파수 성분의 외부 소음원에 대한 능동소음제어 창문의 제어 성능을 확인하기 위해서 10 ~ 300 Hz의 단일주파수 성분의 외부 소음원에 대해서 식 (7)에 의해 계산되는 제어 스피커의 제어 음을 이용하여 모의실험을 수행하였다. 모의실험에서 외부 소음원의 주파수 성분을 고려하여 샘플링주파수를 3 kHz로 하였다. 단일주파수 성분의 외부 소음원에 대한 모의실험에서의 제어 성능은 능동소음제어 창문에서 외부 소음원의 해당 주파수에 대한 이상적인 제어 성능을 의미하며, 다양한 조건들에서의 제어 성능에 대한 기준이 된다.

단일주파수 성분의 외부 소음원에 대한 능동소음제어 창문의 제어 성능을 식 (10)의 제어 성능지표로 나타낸 결과는 Fig. 3의 실선과 같다. 이 결과로부터 능동소음제어 창문의 제어 성능은 외부 소음원의 주파수 성분이 높아질수록 나빠짐을 알 수 있다. 이는 열린 창문을 통해 유입되는 외부 소음원의 주파수 성분이 높아질수록 창문의 크기에 비해 외부 소음원의 파장이 짧아지면서 외부 소음원에 의한 내부 음장의 방향성이 복잡해지고, 공간적 앨리어싱 (spatial aliasing) 때문에 능동소음제어 창문의 제어 스피커로는 외부 소음원에 의해 유입되는 음장을 동일하게 구현해 줄 수 없기 때문이다.

시간영역제어 이득값을 이용한 능동소음제어 창문의 제어 성능을 확인하기 위해서 10 ~ 300 Hz의 단일주파수 성분의 외부 소음원에 대해 식 (9)에 의해 계산되는 제어 스피커의 제어 음을 이용하여 모의실험을 수행하였다. 시간영역제어 이득값을 이용한 모의실험은 3 kHz 샘플링주파수로 제어기가 구동되는 경우에 제어 이득값의 길이, N_f에 따른 제어 성능을 비교하기 위해서 N_f = 20, 30, 60, 100인 경우에 대해서 모의실험을 수행하였다. 이는 제어 이득값의 길이에 따라 주파수 분해능 df가 결정되기 때문에 df의 차이에 대한 제어 성능을 검증하기 위해서 이다. 시간영역제어 이득값을 이용하여 단일주파수 성분의 외부 소음원에 대한 능동소음제어 창문의 제어 성능을 시간영역제어 이득값의 길이, N_f에 따라 식 (10)으로 정의된 제어 성능지표로 계산한 결과는 Fig. 3과 같다. 주파수 분해능 df가 30 Hz인 N_f = 100인 제어 이득값을 이용한 경우는 무한대 길이의 시간영역제어 이득값을 적용한 경우 즉, 단일주파수 제어 이득값을 적

용한 경우와 동일한 제어 성능을 보이는 것을 알 수 있다. 또한 $N_f = 60$, 30, 20인 제어 이득값을 이용한 경우는 주파수 분해능 df가 각각 50 Hz, 100 Hz, 150 Hz이기 때문에, 외부 소음원의 주파수 성분이 해당 주파수의 배수인 경우에 이상적인 제어 성능(무한대 길이의 시간영역제어 이득값을 이용한 경우)과 동일하며, df에 해당되지 않는 주파수 대역에서는 제어 성능이 보장 되지 않음을 알 수 있다. 따라서 능동소음제어 창문에서 유한 길이의 시간영역제어 이득값을 이용하여 광대역 주파수 소음원을 제어할 경우, 소음원의 주파수 대역과 목표 제어 성능을 고려하여 제어 이득값의 길이를 결정해야 한다.

4. 축소모형을 이용한 성능검증 실험

제안된 능동소음제어 창문의 성능을 검증하기 위해서 건물환경을 모사한 축소모형을 제작하였으며, band-limited white noise에 대해서 축소모형 내부의 소음 저감 효과를 실험을 통해 검증하였다. 실험 환경은 Fig. 4와 같으며, 축소모형의 크기는 가로, 세로, 높이 $1.2 \times 1.5 \times 1.2\ m^3$의 직육면체이다. 축소모형에서 창문의 크기는 가로, 세로 $0.3 \times 0.3\ m^2$이고, 축소모형의 창문 가장자리에 제어 스피커(SAMMISOUND NDU-75)를 직접 설치할 수 없어서 Fig. 4의 오른쪽 아래 그림과 같이 스피커와 덕트로 이뤄진 제어 스피커 시스템을 제작하여 스피커의 위치가 창문 가장자리에 Fig. 2와 같이 등 간격으로 위치되도록 하였다. 제어 스피커 시스템에 의한 영향을 보상할 수 있는 역필터는 사전 실험을 통해 미리 계산하였으며, 이를 제어 음 계산 시 적용하였다. 축소모형에서의 창문 크기는 이 논문에서 제안하는 능동소음제어 창문의 약 1/3이므로 외부 소음원의 관심주파수 대역은 창문의 크기와 제어 스

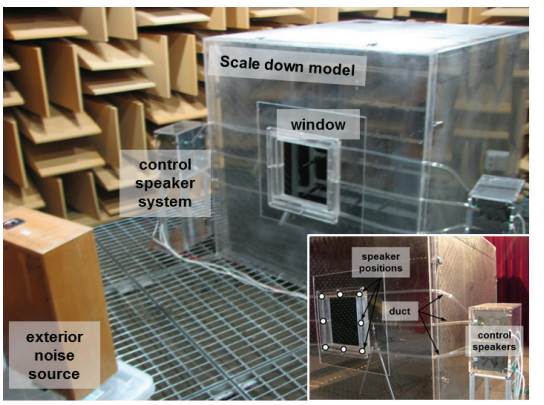

Fig. 4 Experimental setup and control speaker system

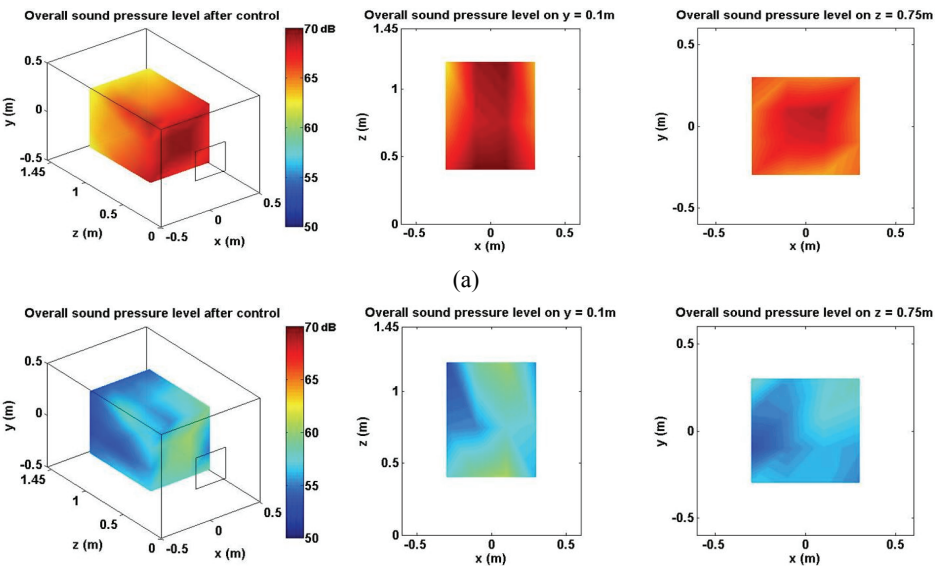

Fig. 5 Experimental result; sound pressure level inside a scale model (a) before control and (b) after control

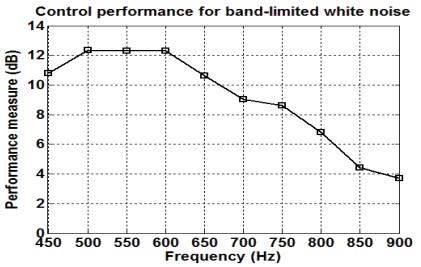

Fig. 6 Performance measure as the frequency for the band-limited white noise

피커의 주파수 응답 함수를 고려하여 450~900 Hz로 정하였다. 따라서 450~900 Hz의 band-limited white noise를 창문에서 1.5 m 떨어진 곳에 위치하는 외부 소음원을 모사하기 위한 스피커로 재생하여 성능 검증 실험을 수행하였다. 외부 소음원에 해당하는 신호는 창문 외부에 설치된 마이크로폰을 이용하여 직접 측정하지 않고 외부 소음원을 모사한 스피커의 입력 신호를 제어기의 입력 신호로 사용하였다.

제어 성능은 축소 모형 내부 48개의 마이크로폰을 이용하여 제어 전·후의 음압을 측정하여 식 (10)으로 정의되는 제어 성능지표를 계산하였다. 측정시 사용된 마이크로폰의 위치는 Fig. 5의 축소모형 좌표계에서 z=0.4, 0.75, 1.2 m일 때, (±0.1, ±0.1, z) m, (±0.3, ±0.3, z) m, (±0.3, ±0.1, z) m, (±0.1, ±0.3, z) m이다. 제어과정에서 샘플링주파수는 10 kHz이었으며, N_f= 10인 시간영역제어 이득값을 이용하여 제어하였다. 제어 전·후에 축소모형 내부에서 측정된 음압신호를 측정하여 관심주파수 대역 450~900 Hz의 전체 음압 레벨을 나타낸 결과는 Fig. 5와 같다. 이 결과로부터 축소모형 내부의 공간 전역에서 소음 저감 효과를 확인할 수 있었다. 제어 성능을 정량적으로 나타내기 위해서 관심주파수 대역에서 계산된 제어 성능지표는 Fig. 6과 같다. Band-limited white noise에 대해서 700 Hz 이하에서는 제어 성능 지표가 약 10 dB 이상 됨을 확인하였고 주파수 성분이 높아질수록 제어 성능이 나빠짐을 알 수 있었다. 이는 모의실험 결과에서 언급했듯이 창문의 크기에 비해 외부 소음원의 파장이 짧아지면서 외부 소음원에 의한 내부 음장의 방향성 복잡해지고, 공간적 앨리어싱으로 인해 외부 소음원에 의한 내부 음장을 창문 가장자리에 위치하는 제어 스피커로 구현해 줄 수 없기 때문이다.

5. 결 론

이 연구에서는 건물환경에서 열린 창문을 통해 유입되는 외부 환경소음을 건물 내부에서 저감시키기 위한 능동소음제어 창문을 제안하였다. 제안된 능동소음제어 창문은 건물 본연의 기능인 사람들의 생활을 보장하기 위해서 제어영역인 건물 내부에 마이크로폰과 제어 스피커를 설치하지 않고, 창문 외부에 설치되어 있는 마이크로폰과 창문 내부에 위치하는 다수의 제어 스피커를 이용하여 소음이 유입되는 경로상에서 소음을 저감시킨다. 능동소음제어 창문에 적용되는 피드포워드 제어 방법에서 각 제어 스피커의 제어 이득값을 계산함에 있어 건물 내부의 음압은 음향학적 이론식인 Rayleigh 적분식을 이용하여 예측하였으며, 이를 이용하여 외부 소음원의 주파수 별 제어 이득값을 계산하였다. 제안된 능동소음제어 창문의 제어 성능은 반무한 공간으로 모델링된 건물 환경에서 이상적인 점음원으로 모델링된 8개의 제어 스피커가 설치되어 있는 경우에 대해 모의실험을 통해 검증하였다. 모의실험 결과 외부 소음원의 주파수 별 제어 성능을 확인할 수 있었으며, 저주파 대역의 광대역 주파수 성분의 외부 소음원인 경우 시간영역제어 이득값의 길이에 따라 제어 성능이 결정되므로 목적에 맞는 제어 이득값의 길이를 결정해야 함을 알 수 있었다. 또한 축소 모형에서의 실험을 통해 제안된 능동소음제어 창문의 성능을 검증하였다. Band-limited white noise 외부 소음에 대해서 축소 모형 내부 공간 전역에서 소음 저감 효과를 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원의 산업원천기술개발사업[KI001865, 전자파, 음향 및 건물 환경을 개선하는 지능형 건설 IT 융합 신기술 개발]의 일환으로 수행하였음.

참 고 문 헌

(1) Ising, H. and Kruppa, B., 2004, Health Effects caused by Noise: Evidence in the Literature from the

Past 25 Years, Noise and Health, Vol. 6, No. 22, pp. 5~13.

(2) Goines, L. and Hagler, L., 2007, Noise Pollution: A Modern Plague, Southern Medical Journal, Vol. 100, No. 3, pp. 287~294.

(3) Beranek, L. L. and Ver, I. L., 1992, Noise and Vibration Control Engineering: Principle and Applications, New York, Wiley.

(4) Kuo, S. M. and Morgan, D. R., 2002, Active Noise Control: A Tutorial Review, Proceedings of IEEE, Vol. 87, pp. 943~973.

(5) Yoo, W.-Y., Kim, W.-Y., Hwang, W.-G. and Lee, Y.-Y., 2002, Active Noise Control of Enclosed Sound Field Using LQR Controller, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 12, No. 1, pp. 12~20.

(6) Elliott, S. J. and David, A., 1992, A Virtual Microphone Arrangement for Local Active Sound Control, The 1st International Conference on Motion and Vibration Control, Yokohama, Japan, pp. 1027~1031.

(7) Garcia-Bonito, J., Elliott, S. J. and Boucher, C. C., 1997, Generation of Zones of Quite Using a Virtual Microphone Arrangement, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 101, No. 6, pp. 3498~3516.

(8) Rafaely, B., Elliott, S. J. and Garcia-Bonito, J., 1999, Broadband Performance of an Active Headrest, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 106, No. 2, pp. 787~793.

(9) Diaz, J., Egaña, J. M. and Viñolas, J., 2005, A Local Active Noise Control System based on a Virtual-microphone Technique for Railway Sleeping Vehicle Application, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 20, No. 8, pp. 2259~2276.

(10) Ise, S., 1999, A Principle of Sound Field Control based on the Kirchhoff-Helmholtz Integral Equation and the Theory of Inverse Systems, ACUSTICA - Acta Acustica, Vol. 85, pp. 78~87.

(11) Takane, S., Suzuki, Y. and Sone, T., 1999, A New Method for Global Sound Field Reproduction based on Kirchhoff's Integral Equation, ACUSTICA - Acta Acustica, Vol. 85, pp. 250~257.

(12) Epain, N. and Friot, E., 2007, Active Control of Sound Inside a Sphere via Vontrol of the Acoustic Pressure at the Boundary Surface, Journal of Sound and Vibration, Vol. 299, No. 3, pp. 587~604.

(13) Kim, Y.-H., 2010, Sound Propagation: an Impedance based Approach, JOHN WILEY & SONS, Singapore.

(14) Williams, E. G., 1999, Fourier Acoustics: Sound Radiation and Nearfield Acoustical Holography, ACADEMIC PRESS, London.

(15) Franklin, G. F., Powell, J. D. and Workman, M., 1998, Digital Control of Dynamics Systems, 3rd Edition, Addison Wesley.

(16) Oppenheim, A. V. and Schafer, R. W., 1999, Discrete-time Signal Processing, PRENTICE HALL International.