

공동주택 층간소음 저감을 위한 능동소음제어(ANC) 기술 적용가능성 분석

남진원¹, 김호진², 김준환³, 위혁⁴, 김중관^{5*}

Analysis of Applicability of Active Noise Control (ANC) technique for Reducing Inter-Floor Noise in Apartment Buildings

Jin-Won Nam¹, Ho-Jin Kim², Jun-Hwan Kim³, Hyuk Wee⁴, Joong-Kwan Kim^{5*}

Abstract: In this study, numerical simulations for reducing noise between floors in an apartment building was carried out using Active Noise Control (ANC) technology. In order to examine the feasibility of using ANC to reduce noise between floors, accelerometers and microphones for noise collection were installed in the inter-floor noise test facility to measure noise and vibration caused by the impact ball drop test. By using the measured data, Filtered-x Least Mean Square (Fx-LMS) algorithm-based ANC simulations were carried out. In the simulations, after deriving optimal simulation conditions including the adaptive control convergence coefficient, the noise reduction effect was analyzed through numerical simulations using the number of installed accelerometers and speakers as variables. Finally, it was confirmed that the noise between floors could be reduced using ANC technology under limited conditions.

Keywords: Active noise control, Inter-floor noise, Numerical simulation, Fx-LMS algorithm, Apartment building, Accelerometer, Secondary path

1. 서론

최근 도시화와 인구밀도 증가로 인해 아파트, 오피스텔, 빌라 등 공동주택에 거주하는 가구의 비율이 지속적으로 증가하고 있으며, 이에 따라 층간소음으로 인한 사회적 문제가 증가하고 있는 상황이다. 전국 공동주택에 거주하는 응답자의 94.3%가 층간소음을 느끼며, 61.5%가 층간소음으로 인해 생활의 불편을 느낀다고 조사된 바 있다(KICT, 2013). 여기서 층간소음이란 공동주택의 한 층에서 발생한 소리가 다른 층 가구에 전달되는 소음 공해로 정의되며, 공기 전달음보다 상부층의 바닥 충격이 바닥, 벽체 등의 구조물을 통해 하부층으로 전달되는 고체 전달음이 보다 큰 문제로 인식되고 있다. 또 이러한 고체 전달음은 주파수 대역에 따라 경량 충격음과 중량 충격음으로 구분되며, 층간소음 분쟁은 주로 중량 충격음 유형인 것으로 알려져 있다. 한편 2013년 국토교통부는「주택

건설기준 등에 관한 규정 제14조 2항」을 신설하여 기존의 135mm 내외의 슬래브 두께를 공동주택 층간 바닥의 콘크리트 슬래브 두께는 210mm 이상으로 하며, 라멘구조는 150mm 이상으로 하도록 하고, 각 층간 바닥충격음이 경량충격음은 58dB 이하, 중량충격음은 50dB 이하의 구조가 되도록 하여 층간소음 저감을 위한 슬래브 두께 증가와 바닥충격음에 대한 기준을 법제화 한 바 있다. 그러나, 한국건설기술연구원에 따르면 슬래브 두께 증가는 경량 충격음을 상당 부분 개선할 수 있으나, 중량 충격음의 경우에는 소음 저감효과가 크지 않은 것으로 나타났으며(KICT, 2013), 일반적인 표면완충공법, 차음 2중 천장공법, 뜬바닥공법, 고강성 바닥공법, 중공 슬래브 등과 같은 슬래브 구조 및 재료를 통해 층간소음을 제어하고자 하는 기존의 전형적인 기법들도 중량충격음 개선효과가 크지 않고, 시공 효율성, 경제적 타당성 측면에서 한계가 노출된 상황이라 할 수 있다(Park et al., 2022).

따라서, 본 연구에서는 최근 항공, 자동차, 설비, 기계 분야를 비롯하여 이어폰과 헤드폰 등 음향기기에 널리 사용되고 있는 능동소음제어(Active Noise Control, ANC) 기술(Kuo and Morgan, 1999; Elliott, 2008; Duan et al., 2014; Oh et al., 2018; Kim and Altinsoy, 2022)을 응용하여 층간소음을 저감시키는 연구를 수행하였다. 능동소음제어 기술의 층간소음 저감 활용 가능성을 검토하기 위하여 층간소음시험시설에서 가속도계와 소음 수집용 마이크로폰을 설치하여 임팩트볼 낙하에 의한

¹정회원, 인하공업전문대학 건설환경공학과 조교수

²정회원, ㈜에이테크솔루션 대표이사

³정회원, ㈜크리에이티브솔루션 이사

⁴정회원, ㈜에이알이 수석연구원

⁵정회원, 한서대학교 무인항공기학과 조교수

*Corresponding author: jkwankim@hanseo.ac.kr

Hanseo Univ., 236-49, Gomseom-ro, Nam-myeon, Taean-gun, Chungcheongnam-do, 32158, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2022년 11월 30일까지 학회로 보내주시면 2022년 12월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

소음진동을 측정하였으며, Filtered-x Least Mean Square (Fx-LMS) 알고리즘 기반의 능동소음제어 시뮬레이션을 수행하였다. 이 과정에서 적응제어 수렴계수 등의 최적 시뮬레이션 조건을 도출한 후 가속도계와 스피커 수량을 변수로 하는 수치 시뮬레이션을 통해 소음저감효과를 분석하였다.

2. 본 론

2.1 능동소음제어(ANC)

ANC 기술의 기본 원리는 소음 또는 진동을 센서로 측정하고 실시간으로 이와 반대되는 위상의 제어음을 발생시켜 소음을 저감하는 것이다. 이러한 ANC 기술은 최근 연산/신호처리(Digital Signal Processing, DSP) 기술의 비약적 발전으로 다양한 분야로 확대 적용되고 있는 기술이지만, 현재까지 건설분야에서의 적용사례와 연구는 건설현장에서 발생하는 소음제어를 위한 적용성 검토 중심의 기초적인 단계이다(Kwon et al. 2014). 한편 공동주택에서 발생하는 층간소음은 음파의 주기가 긴 저주파의 특징이 있는데, ANC는 이러한 저주파 소음 제어에 효율이 높기 때문에 층간소음 중 구조적 기술로 해결이 어려운 중량충격음 제어 효과에 대한 기술적 검토를 수행할 필요가 있다.

ANC 시스템은 일반적으로 소음원의 특성을 파악하기 위한 입력 센서부와 입력된 신호를 분석하고 역위상의 신호를 생성하는 DSP/CPU, 역위상의 신호로부터 아날로그 출력을 증폭시키는 파워앰프와 제어음을 출력하는 스피커로 구성된다. 본 연구에서는 상부층의 충격원에 의해 발생한 슬래브/마감재의 진동이 공기를 통해 저주파 형태의 중량충격음이 하부층으로 전달되는 공동주택의 층간소음 전달특성을 연구대상으로 고려하였다. 이러한 저주파 형태의 중량충격음 형태의 층간소음 측정을 위해 가속도센서를 슬래브에 부착하여 진동을 감지하고, DSP에서 이로 인해 발생하는 중량충격음의 역위상을 실시간 연산하여 상쇄음을 앰프로 인가한 후 스피커를 통해 상쇄 음향을 하부층의 이용자에게 전달하여 층간소음 체감수준을 감소시키는 시스템을 구성하였다.

2.1.1 ANC DSP 구동 알고리즘

일반적인 ANC 시스템의 알고리즘은 feedforward 제어와 feedback 제어 방식이 적용되며, 상부 세대에서 발생한 중량충격음을 제어하되 하부 세대에서 발생하는 대화 소리, TV 소리 등과 같은 생활음에는 간섭되지 않아야 한다. 또한 층간소음 특성상 슬래브의 진동과 발생 소음의 상관관계가 높으므로 슬래브에서 가속도계를 통해 직접 진동을 감지한 후 즉각적으로 역위상의 음향을 생성하는 feedforward 제어 방식을 적용하였다.

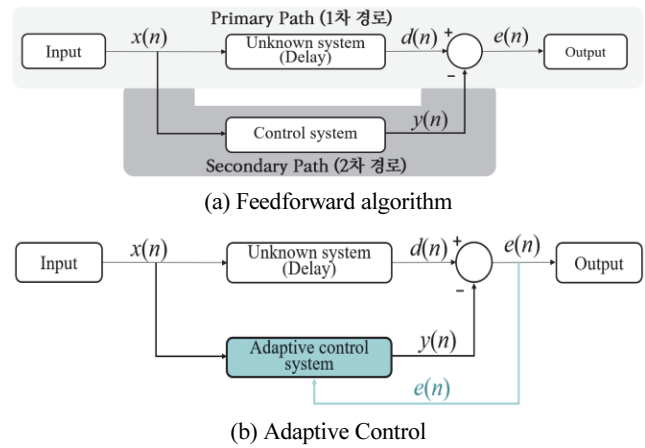


Fig. 1 Feedforward algorithm and adaptive filter

기본적인 feedforward 제어 알고리즘은 Fig. 1과 같다. 여기서 Primary Path는 소음원으로부터 발생한 진동이 공기 또는 구조물을 통하여 이용자의 귀로 전달되는 소음전달 경로이다. 그리고 Secondary Path는 소음원으로부터 소음/진동을 측정하여 발생시킨 역위상의 제어음이 이용자의 귀까지 전달되는 경로로 정의된다. 본 연구에서는 Fx-LMS(Filtered-x Least Mean Square) 알고리즘을 기반으로 제어 필터 계수를 지속적으로 업데이트함으로써 오차를 최소화하는 적응형 필터(adaptive filter)를 통해 층간소음의 능동제어 가능성을 분석하였다. 여기서 오차는 마이크로폰으로부터 측정한 소음과 소음의 역위상인 제어음 간의 오차를 의미하며, 이 오차가 최소화 되도록 계수 업데이트가 지속적으로 수행되어 적응형 필터의 계수가 수렴되게 작동되도록 구성하였다.

ANC 성능향상을 위한 적응형 필터를 업데이트 시키기 위하여 본 연구에서는 Fx-LMS(Filtered-X LMS) 알고리즘을 적용하였으며, 적용된 Fx-LMS 알고리즘 블록도는 Fig. 2와 같다. 여기서 Primary Path인 $P(z)$ 는 가속도계 신호 $x(n)$ 로부터 제어지점에 설치된 마이크로폰 위치의 원소음신호 $d(n)$ 까지의 소음 전파 시스템이며, Secondary Path인 $S(z)$ 는 제어

Table 1 Components of ANC algorithm

Component	Description
$P(z)$	Primary path for noise propagation
$x(n)$	Acceleration signal from accelerometer
$d(n)$	Noise signal from microphone
$y(n)$	Control signal
$y'(n)$	Control signal at microphone
$e(n)$	Error signal
$W(z)$	Adaptive filter for ANC
$S(z)$	Secondary path for control signal propagation

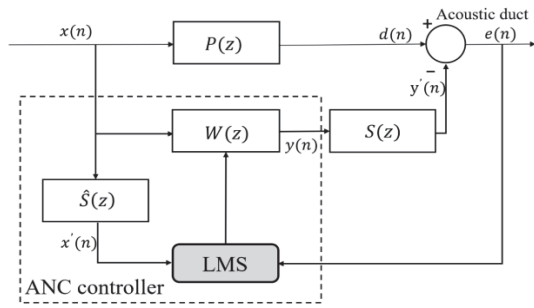


Fig. 2 System block diagram using Fx-LMS algorithm

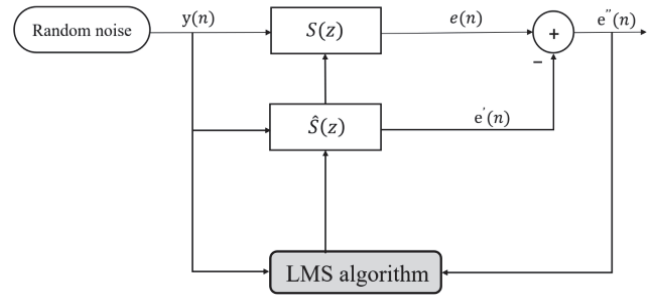


Fig. 3 Secondary path modelling diagram

기 출력신호 $y(n)$ 으로부터 마이크론 위치의 제어신호 $y'(n)$ 까지의 음향 전파 시스템이다. 즉, 가속도 신호 $x(n)$ 가 입력되면 적응형 필터 $W(z)$ 를 통과하여 제어 출력 $y(n)$ 이 생성되고, 이 신호는 스피커에서 방사되어 제어 공간 내 공기의 파동 형태로 전파하여 마이크론 위치에서 원소음신호 $d(n)$ 를 상쇄한다. 이와 같은 Secondary Path $S(z)$ 를 FIR (Finite Impulse Response) 필터 형태로 근사하여 모델링한 $\hat{S}(z)$ 를 활용하여 가속도계 신호 $x(n)$ 를 필터링한 후 적응형 필터 $W(z)$ 를 업데이트하여 Fx-LMS 알고리즘 기반의 시스템을 구성하였다.

본 연구에서 사용되는 제어 신호 생성 알고리즘은 다음과 같다.

$$x' \text{ 신호: } x'_{rkm}(n) = \sum_{j=1}^{L_s} \hat{s}_{kmj} \times x_r(n-j) \quad (1)$$

$$W(z) \text{ 업데이트: } \Delta w_{rki} = \mu \sum_{m=1}^M e_m(n) \times x'_{rkm}(n-i) \quad (2)$$

$$\text{제어 신호: } y_k(n) = \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^{L_w} w_{rki} \times x_r(n-i) \quad (3)$$

여기서, R 는 가속도계의 채널 수, K 는 스피커(y)의 채널 수, M 은 마이크론(e)의 채널 수, L_w 는 W 필터 길이이며, L_s 는 Secondary Path 길이이다.

2.1.2 Secondary Path 모델링 방법

한편, DSP의 Fx-LMS 알고리즘 동작에 필요한 제어출력신호와 마이크론 신호 사이의 Secondary Path 모델링은 다음 Fig. 3에 제시된 블록 다이어그램과 같이 LMS를 활용한 시스템 식별 방식으로 수행하였다. 1kHz 까지의 대역제한 랜덤 노이즈를 통하여 시스템을 가진하였으며 LMS 알고리즘을 활용하여 충분히 수렴시켜 모델링하였다.

$$\text{입력 신호: } y_k(n) = \text{random noise} \quad (4)$$

$$\text{모델 출력신호: } e'_m = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{L_s} \hat{s}_{kmi} \times y_k(n-i) \quad (5)$$

$$\text{모델 업데이트: } \Delta \hat{s}_{kmi} = \mu \times \{e_m(n) - e'_m(n)\} \times y_k(n-i) \quad (6)$$

2.2 층간소음 수집 실험

층간소음 슬라브 진동 가속도, 실내 소음 신호, Secondary Path 데이터 등 층간소음 저감 ANC 시뮬레이션을 위한 데이터 수집을 위하여, 본 연구에서는 Photo 1과 같이 서산에 위치한 한국건설생활환경시험연구원(KCL)의 옥외실증센터 층간소음시험시설에서 층간소음, 진동특성, 실내 소음 전달특성 데이터 수집을 실시하였다. 층간소음 측정시설은 벽식구조의 공동주택을 재현한 층간소음 전용 측정 수음실로 1층 높이가 2.43m, 2층 높이가 2.38m로 5.28m×4.68m의 평면구조로 슬래브 두께는 180mm이고, 벽체 두께는 240mm이다. 1층 수음실에는 일반적인 주택 현관이 있으며 창문은 없다. 실내 잔향특성을 거주 공간과 유사하게 만들기 위하여 바닥과 벽체에 흡음재를 설치하였다. 2층 수음실은 현관과 약 2.00m×1.80m 크기의 대형창이 설치되어 있으며 바닥은 시멘트 몰탈로 마감되어 있다.



Photo 1 Weathering Technology Assessment Center of KCL

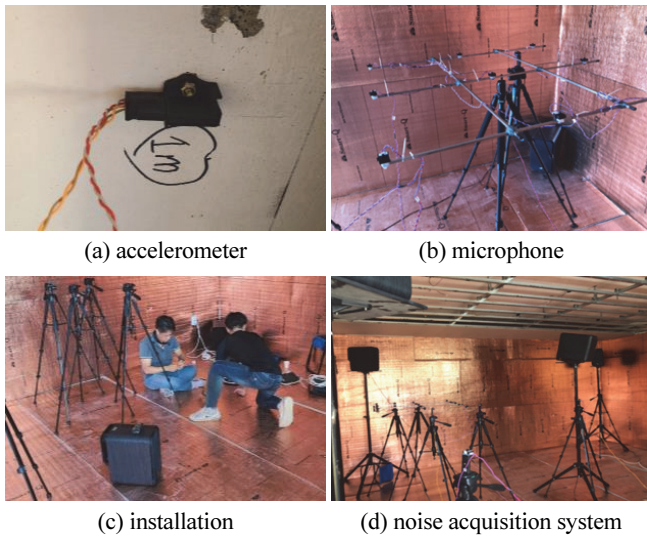


Photo 2 Installation of noise acquisition system

2.2.1 층간소음 수집시스템 구성

층간소음 ANC 시뮬레이션을 위한 데이터 수집에 사용된 가속도계는 Analog Device사의 MEMS타입 ADXL 317 Digital accelerometer, 마이크로폰은 Knowles사 Digital microphone를 각각 적용하였으며, 사용된 가속도계와 마이크로폰의 세부 사양은 Table 2와 Table 3과 같고, 설치 전경은 Photo 2에 나타내었다. 한편 가속도계와 및 앰프는 모두 A2B(Automotive audio Bus) 연결방식으로 자체 개발된 16채널의 데이터 수집장치와 연결하였으며, 48kHz의 샘플링 속도를 적용하여 데이터를 수집하였다.

한편, 가속도계, 스피커 및 마이크로폰의 배치방법은 아래 Fig. 4와 같으며, 3축 가속도계 9개와 5개의 가진음 발생용 스피커, 그리고 층간소음과 가진음 측정용 마이크로폰 15개를 각각 설치하였다.

층간소음 모사 가진은 Fig. 5와 같이 임팩트 볼을 2층에서 바닥으로 자유낙하시키는 방식을 적용했다. 임팩트볼은 소음 진동을 명확하게 확인하고 수집하기 위하여 표준 임팩트볼의 무게보다 다소 무거운 3.5kg을 적용하였고, 낙하 높이는 1m로 모든 시험 케이스에서 일정하게 유지하였다. 가진 위치는 아래 그림과 같이 총 3곳의 위치에 대하여 각각 3회 이상 가진

Table 2 Specification of accelerometer

Model	Axis	Range	Resolution	Data type	Bandwidth	Operating temp.
ADXL 317	3	±16g	14 bit	48 kHz I2S/TDM	500~4kHz	-40~+125°C

Table 3 Specification of microphone

Model	Directivity	Sensitivity	Operating temp.
SPM1423HM4H-B	Omnidirectional	22 dBFS(94dB SPL@1kHz)	-40~+100°C

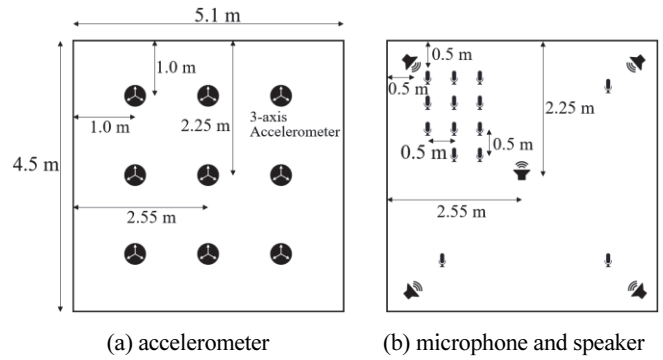


Fig. 4 Locations of accelerometer, microphone and speaker

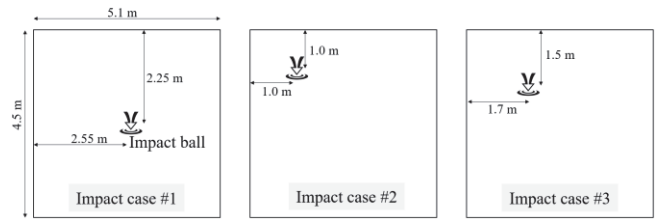


Fig. 5 Impact loading cases

하였고, 자유낙하 이후 임팩트 볼의 반동에 의한 충격소음은 제외하였다.

2.2.2 Secondary Path 모델링 데이터 수집

전술한 바와 같이 ANC에 있어 secondary path는 스피커에서부터 마이크로폰까지의 전달경로를 의미하며 제어신호 생성 이후 통과하게 되는 D/A 컨버터, 파워앰프, 스피커, 음향 전달 공간 등의 특성을 포함한다. 실제 층간소음 제어에 있어서는 수집된 진동신호로부터 이를 감쇠시킬 수 있는 제어음이 생성되어 거주자에의 귀로 전달되는 과정으로 ANC 설계에 있어 중요한 부분 중 하나이다. 따라서, 층간소음 제어 환

Table 4 Specification of speaker

Model	Crossover Freq.	Sensitivity	Impedance
Polk signature series	2.5kHz	90dB	8 ohm output

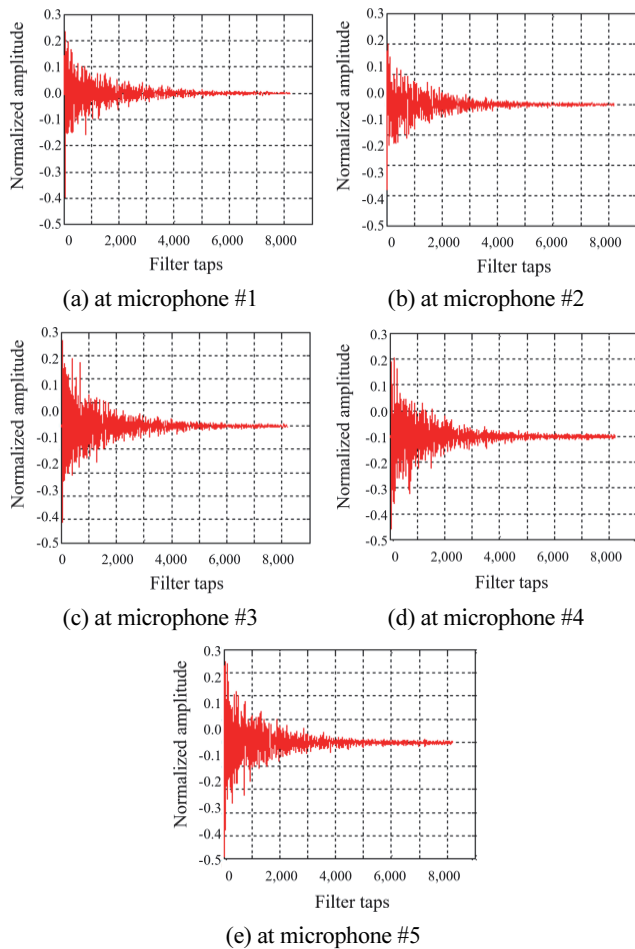


Fig. 6 Secondary path measurements from speaker #1 to each microphone

경에서 있어서는 반드시 Secondary path의 특성을 고려한 모델링이 필수적이며, 본 연구에서는 실험공간에 설치된 각각의 스피커에서 20Hz에서 1kHz까지의 로그처프(Log chirp) 형태의 가진음을 발생시키고, 설치된 5개의 마이크로폰에서 각각 이를 수집하여 실험환경에서의 secondary path 특성을 파악하였다. 실험공간 중앙에 설치된 스피커 #1에서 5개의 마이크로폰에서 측정된 secondary path 측정결과를 Fig. 6에 예시로 표현하였다.

2.2.3 시뮬레이션 조건 및 최적 변수 도출

ANC 기술을 활용한 소음 저감과정에서는 다양한 영향인자에 의해 저감효과에 차이가 발생한다. 먼저 소음을 측정하는 센서부의 조건, 감쇠 음향을 발생시키는 스피커의 조건, 제어하고자 하는 주파수의 영역대 및 필터의 성능과 관련된 수렴계수 등이 대표적인 영향인자로 꼽을 수 있다. 이러한 영향인자에 대한 최적 조건을 도출하기 위해서는 매우 많은 경우에 대한 변수 검토가 요구되기 때문에 본 연구에서는 ANC 기

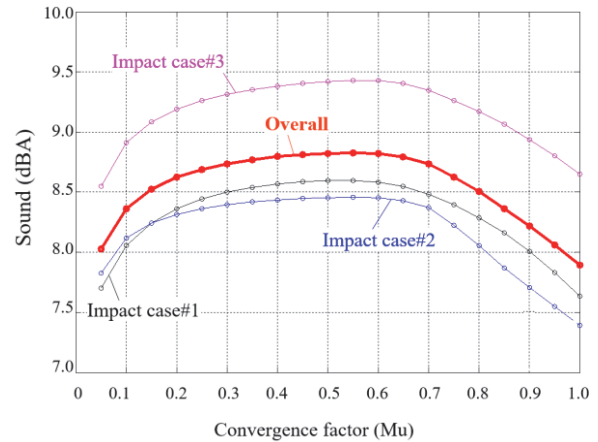


Fig. 7 Simulation of noise control performance according to convergence factors

술의 중간소음 저감 가능성에 초점을 맞추고 센서와 스피커의 개수를 1개와 5개로 제한하였다. 또한, 제어 주파수의 경우에도 공동주택 중간소음 저감을 위해 설치될 장비의 성능을 고려하여 40~500Hz로 설정하였다.

한편 필터의 수렴계수(μ)의 경우에는 적용한 W 필터(L_w)와 secondary path 길이(L_s)에 대해 0.3~0.8까지를 변수로 하여 측정된 소음에 대한 저감 효과를 검토한 결과 Table 5와 Fig. 7에서 알 수 있듯이 수렴계수가 0.5~0.55일 경우에서 각각의 측정된 소음조건에 대해 가장 우수한 제어성능을 나타내었으며, 수렴계수가 0.7 이상에서는 발산의 가능성이 있어 주의가 필요할 것으로 나타났다.

이상의 시뮬레이션 조건 검토과정을 통해 도출된 최적 ANC 사양 및 시뮬레이션 조건을 정리하면 다음 Table 6과 같다.

Table 5 Simulation results for optimization of convergence factor

Cases	μ	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80
Impact case #1		8.50	8.54	8.57	8.59	8.60	8.60	8.58	8.55	8.48	8.39	8.28
Impact case #2		8.39	8.42	8.43	8.45	8.45	8.45	8.45	8.43	8.37	8.22	8.06
Impact case #3		9.31	9.35	9.38	9.40	9.42	9.43	9.43	9.41	9.35	9.26	9.17

Table 6 Simulation condition and ANC specifications

Cases	No. of accelerometer	No. of speaker	Speaker location	control range	μ
Simulation #1	1	1			
Simulation #2	1	5	bottom slab	40~500 Hz	0.5
Simulation #3	5	1			
Simulation #4	5	5			

2.3 층간소음 저감 효과 시뮬레이션

층간소음 저감 효과 시뮬레이션에는 Matlab으로 구현된 Fx-LMS 알고리즘이 적용되었으며, KCL 서산 옥외실증센터에서 측정된 가진 데이터와 소음 데이터를 기반으로 secondary path를 모델링하고 입력 데이터를 알고리즘에 통과시켜 측정된 소음에 대한 역위상 음향을 생성하고 이를 스피커로 출력하여 소음저감 효과를 분석하였다. 각각의 시뮬레이션 조건별 시뮬레이션 결과는 다음 Fig. 8과 같다.

Fig. 8에서 알 수 있듯이 시뮬레이션의 결과인 ANC 제어 후의 소음 $e(n)$ 에 대한 파워스펙트럼밀도(Power Spectral Density, PSD)를 원소음 $d(n)$ 의 PSD와 비교하여 ANC 제어 성능을 분석하였다. Fig. 8(a)은 슬래브 중앙에서 가진하는 경우로서, 평균적으로 감소되는 층간소음은 약 4.12dB로 분석되었으며, 가진하는 위치가 모서리로 바뀔 때마다 평균 층간소음 제어량을 비롯한 소음 저감효과가 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 원인은 소음원을 측정하는 가속도 신호와 제어 대상 위치의 소음 신호 간의 상관관계가 부족하여 제어기에서 생성되는 소음제어 신호의 신뢰도가 낮아지기 때문으로 판단된다. 한편, 가진위치, 가속도계 설치위치, 스피커 설치 위치가 모두 중앙으로 동일한 경우인 impact case #1의 경우에는 마이크론의 위치와 상관없이 모두 상대적으로 양호한 제어성능이 나타났다.

한편 Fig. 8(b)에서 알 수 있듯이 가속도계 1개와 스피커 5개를 사용한 경우에는 Fig. 8(a)와 비교하여 전반적으로 향상된 제어성능이 나타나 스피커의 설치 개수는 층간소음 제어 성능에 매우 직접적인 것을 확인할 수 있다. 그러나 가속도계 설치수량 부족으로 가속도계로부터 가진위치가 멀어질수록 제어성능이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

가속도계를 추가로 설치한 Simulation#3의 경우에는 총 5곳에서 진동을 측정하였으며, Fig. 8(c)와 같이 제어 음향은 스피커 1대로 생성한 시뮬레이션 조건으로, 그림에서와 같이 가속도계 수량 증가에 따라 제어 성능이 향상되는 경향으로 분석되었지만, 상대적으로 스피커 대수를 증가에 따라 제어 성능이 향상되는 것보다는 효과가 낮은 것으로 파악되었다.

결국 가속도계를 증가시키더라도 스피커가 부족한 경우에는 제어 성능을 크게 개선하지 못하는 것으로 나타났으며, 해당 경우에 있어 3채널 이상의 가속도 채널 이상에서는 큰 성능 차이가 없을 것으로 예상된다.

마지막으로 Fig. 8(d)는 가속도계와 스피커를 모두 5개로 증가하여 설치한 경우로, 스피커 운영 대수와 가속도계 개수의 증가로 인하여 층간소음 제어성능이 크게 개선된 것을 알 수 있다. 특히 층간소음을 감소시키기 위한 요구 제어 성능을 만족할 수 있는 최소의 가속도계와 스피커가 설치된 경우에는 가진 위치에 따른 제어성능 변화가 크지 않은 것으로 분석

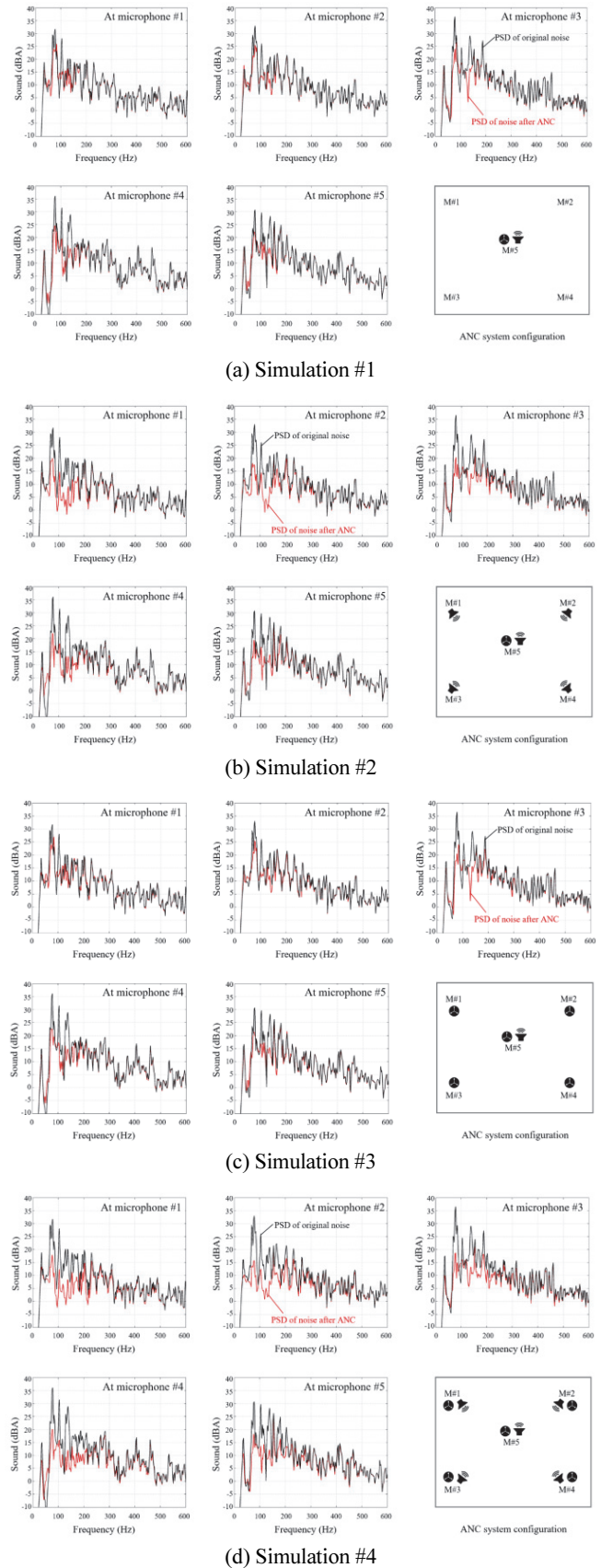


Fig. 8 Simulation results using ANC system

Table 7 Simulation results according to microphones

	Cases	M#1	M#2	M#3	M#4	M#5	Overall
Simulation #1	Impact case #1	3.18	3.35	4.43	5.49	3.57	4.12
	Impact case #2	0.39	0.46	0.93	1.24	0.75	0.80
	Impact case #3	0.42	0.74	1.61	1.67	0.93	1.13
Simulation #2	Impact case #1	6.77	6.88	6.80	7.77	5.60	6.81
	Impact case #2	2.00	2.00	2.40	2.59	2.69	2.37
	Impact case #3	5.52	5.21	6.75	5.86	3.25	5.43
Simulation #3	Impact case #1	3.37	4.04	6.21	6.68	4.03	5.02
	Impact case #2	1.32	2.19	5.39	5.94	2.70	3.48
	Impact case #3	1.01	2.00	5.59	6.18	3.46	3.48
Simulation #4	Impact case #1	9.10	8.57	9.09	9.54	7.10	8.72
	Impact case #2	8.57	7.72	9.59	9.28	7.42	8.52
	Impact case #3	9.95	9.19	10.20	10.31	7.50	9.54

되어 해당 기술의 공동주택 적용 가능성을 충분히 검토해볼 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 거주자의 위치에 해당하는 마이크론 위치는 제어 성능에 실험조건에 영향을 줄 수 있는 인자이며, ANC 기술에 의한 소음저감은 제한된 특정 위치에 대해서는 효과를 확인할 수 있으므로 실용화를 위해서는 시스템 설치 및 운영에 대한 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단된다. 이상의 층간소음 저감 효과 시뮬레이션을 통해 원소음 대비 제어된 소음 결과를 Table 7에 정리하였다.

3. 결론

본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 층간소음 감소를 위한 ANC 기술의 적용 가능성을 검토하기 위하여 진동 측정을 위한 가속도계, 소음 측정을 위한 마이크로폰, 데이터 수집장치, 실내 음장 가전을 위한 앰프 및 스피커로 구성된 층간소음 ANC 데이터 수집 시스템을 구성하였다.
- 2) 구성된 ANC 데이터 수집 시스템을 활용하여 층간소음 슬래브 진동 및 실내 소음을 계측하고, 이를 활용하여 Fx-LMS 알고리즘 기반의 적응형 필터를 활용한 feedforward ANC 제어 시뮬레이션을 수행하였다.
- 3) 개발중인 ANC 시스템의 층간소음 제어 가능성 검토를 위하여 표준 층간소음시험시설에서 3가지의 소음 발생조건에 대한 진동 및 소음신호와 제어기 및 실내 음향 공간의 secondary path를 측정하고, 이를 활용하여 층간소음 제어 시뮬레이션을 실시하였다. 그 결과 층간소음 측정과 제어에 필요한 가속도계, 마이크로폰과 스피커가 적절하게 설치된 경우에 있어서는 40~500Hz의 주파수 영역에서 6dB 이상의 소음저감이 가능하다는 것을 확인하였다.

- 4) 한편 공동주택에 ANC 시스템을 적용할 경우 소음 측정과 역위상 음향 생성은 고정된 특정위치에서 진행되는 반면, 거주자는 특정 고정된 위치에 지속적으로 머무는 것이 아니므로 층간소음 저감분야에서 ANC 기술을 실용화하기 위해서는 소음 저감 효과 영역에 대한 설계와 이를 고려한 시스템 설계에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서 확인한 층간소음의 능동소음제어 실현 가능성을 바탕으로, 추후에는 층간소음시험시설 또는 실제 공동주택 내에서 층간소음 능동제어 실험을 진행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부의 국토교통기술사업화지원사업[과제번호 : 21TBIP-C161155-01]을 통해 수행되었습니다.

References

1. Duan, J., Li, M., Lim, T. C., Lee, MR., Cheng, MT., Vanhaaften, W., and Abe, T., (2014), Combined Feedforward-Feedback Active Control of Road Noise Inside a Vehicle Cabin, *Journal of Vibration and Acoustics*, Transactions of the ASME., 136(4), 1-8.
2. Elliott, S. J., (2008), A Review of Active Noise and Vibration Control in Road Vehicles, *ISVR Technical Memorandum, Institute of Sound and Vibration Research* (981), University of Southampton, 1-25.
3. KICT. (2013), A Study on Noise Reduction Solution for Adjacency Household in Apartment House, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 1-26.
4. Kim, S., and Altinsoy, M. E., (2022), Active Control of Road Noise considering the Vibro-acoustic Transfer Path of a Passenger Car, *Applied Acoustics*, 192, Elsevier, Article 108741.
5. Kuo, S. M., and Morgan, D. R., (1999), Active Noise Control: A Tutorial Review, *Proceeding of the IEEE*, (87)6, 943-973.
6. Kwon, N., Park, M., Lee, H., Ahn, J., and Kim, S. (2014), The Development of Noise Management Model using Active Noise Control Technique on Construction Site, *Journal of Korea Construction Engineering and Management*, 15(2), 12-22.
7. Oh, C., Ih, K., L, J., and Kim, JK., (2018), Development of a Mass-producible ANC System for Road Noise, *ATZ Worldwide* 120(7), Springer, 58-63.
8. Park, J. Y., Cha, H., and Yoon, T. H. (2022), Vibration Control Plan to Reduce Noise between Floors, *Proceedings of Spring Annual Conference*, Architectural Institute of Korea, 42(1), 787-790.

Received : 08/20/2022
 Revised : 08/27/2022
 Accepted : 09/14/2022

요 지 : 본 연구에서는 능동소음제어(ANC, Active Noise Control) 기술을 이용하여 공동주택의 층간소음을 저감시키는 시뮬레이션 기반 연구를 수행하였다. ANC의 층간소음 저감 활용 가능성을 검토하기 위하여 층간소음시험시설에서 가속도계와 소음 수집용 마이크를 설치하여 임팩트볼 낙하에 의한 소음진동을 측정하여 Fx-LMS 알고리즘 기반의 능동소음제어 시뮬레이션을 수행하였다. 이 과정에서 적응제어 수렴계수 등의 최적 시뮬레이션 조건을 도출한 후 가속도계와 스피커 수량을 변수로 하는 수치 시뮬레이션을 통해 소음저감효과를 분석하여 제한된 조건에서 층간소음을 저감시킬 수 있는 것을 확인하였다.

핵심용어 : 능동소음제어, 층간소음, 수치 시뮬레이션, 필터-x 최소제곱평균 알고리즘, 공동주택, 가속도계, 2차 전달경로
