



RESEARCH ARTICLE

빔포밍 방식 음향 카메라를 활용한 공동주택 기밀성능 측정 연구

곽병창¹ · 김길태² · 지원길³ · 김태민^{1*}

¹한국토지주택공사 토지주택연구원 책임연구원, ²한국토지주택공사 토지주택연구원 수석연구원,

³한국토지주택공사 토지주택연구원 연구원

The Study on Feasibility of the Beamforming based Acoustic Camera to Detect Air Infiltration of an Apartment Building

Kwag, Byung-Chang¹ · Kim, Gil-Tae² · Ji, Won-Gil³ · Kim, Tae-Min^{1*}

¹Assistant Research Fellow, Land and Housing Institute, Korea Land and Housing Cooperation, Sejong, Korea

²Research Fellow, Land and Housing Institute, Korea Land and Housing Cooperation, Sejong, Korea

³Researcher, Land and Housing Institute, Korea Land and Housing Cooperation, Sejong, Korea

*Corresponding author: Kim, Tae-Min, Tel: +82-44-902-9158, E-mail: ktaemin@lh.or.kr

ABSTRACT

The purpose of this paper was to investigate the feasibility of the beamforming algorithm-based acoustic method with a microphone array to analyze the airtightness of buildings. Performing the field tests, the impacts of various factors related to the acoustic and airtightness performances were analyzed. From the analysis, it was found that high frequency sound waves were feasible to detect air leakage spots on the exterior wall for the acoustic approach. When comparing the sound pressure levels detected by the acoustic camera with a calibrated microphone for the verification analysis, the averaged percent differences between two instruments was 3% proving the reliability of the acoustic camera method. However, in order to produce the reliable results, this paper also found that it needs to combine the sound pressure levels of the leakage spots detected by the acoustic camera. Based on these results, this paper could conclude that it is possible to evaluate the airtightness of an exterior wall using a microphone array, based on the resulting correlation between the changes in air leakages and sound pressure level differences.

주요어 : 공동주택, 기밀, 음향기법, 빔포밍 알고리즘

Keywords: Apartment house, Infiltration, Acoustic approach, Beamforming algorithm

OPEN ACCESS

Journal of KIAEBS 2020 December, 14(6): 674-686
<https://doi.org/10.22696/jkiaeb.20200057>

pISSN : 1976-6483
eISSN : 2586-0666

Received: October 27, 2020

Revised: November 26, 2020

Accepted: November 28, 2020

© 2020 Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems.



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

건물의 기밀성능과 관련된 침기는 건물의 내외부 온도 및 압력 차이에 의해 건물 외피의 틈새를 통해 유입되거나 유출되는 거주자가 의도하지 않은 공기의 이동을 의미한다. 이에 따라 의

도치 않게 유입된 외부공기를 실내 목표 온도로 맞추기 위해 냉방 또는 난방을 해야 하기 때문에 건물 에너지 부하가 늘어나게 된다(Liddament, 1986; Krarti, 2000; Emmerich et al., 2005; ASHRAE, 2009; Leprince et al., 2011). 기존 문헌에 따르면 건물의 침기가 냉난방 에너지 사용에 끼치는 영향이 약 20%~40% 정도를 차지하고 있다(Pettersson, 1978; Muehleisen et al., 2014; Raman et al., 2014a; Raman et al., 2014b). 즉, 에너지 고효율 건물, 심지어 제로 에너지 건물을 구축하기 위해서는 건물의 기밀성능을 확보하는 것이 매우 중요하다.

건물의 기밀성을 확보하기 위해서는 정확하게 건물의 기밀성능을 측정하는 것이 중요하며, 기밀성능 측정 방법으로 가스추적법, 기압법, 열화상법 등이 주로 사용되고 있다(Krarti, 2000; ASHRAE, 2009; 웅드람 외, 2019). 한편 국외에서는 위 세 가지 방법 이외에 음향기법을 활용하여 건물의 기밀성능을 파악하려는 연구도 있었다(Keast and Pei, 1979; Sonoda and Peterson, 1986; Oldham and Zhao 1993; Chen, 1995; Iordache and Catalina, 2012; Nagle and House, 2013; Varshney et al., 2013; Muehleisen et al., 2014; Raman et al., 2014a; Raman et al., 2014b; Berardi and Pouyan, 2018). 위 연구들은 기밀 실험과 동일하게 창문, 문틈이나 외벽에 발생된 균열 등을 통해 음향 에너지가 이동한다는 가정을 바탕으로 하고 있다(Raman et al., 2014a; Raman et al., 2014b). 대표적인 음향기법은 차음성능 측정 방법(Keast et al., 1979, Nagle and House, 2013; Oldham and Zhao 1993; Chen, 1995; Iordache and Catalina, 2012; Varshney et al., 2013)과 빔포밍 알고리즘을 이용한 방식이 있었다. 예를 들어, Iordache and Catalina (2012)은 실제 건물의 한 공간을 대상으로 한 실험 결과를 바탕으로 건물의 침기량과 차음성능 사이의 상관관계를 분석하여 회귀식을 제안하였다. 하지만 Iordache and Catalina (2012)의 회귀모델이 다른 사례에서도 비슷한 결과가 나오는지 추가 연구가 필요해 보인다. Varshney et al. (2013)은 실험실 조건에서 차음성능과 기밀성능과의 관계를 조사하였고, 상관관계를 4차 다항식 형태로 표현하였다. 이 시험 방법의 경우 침기 위치를 파악한 후 적용 가능하기 때문에 다양한 실내공간의 기밀성능 분석에는 어려움이 존재한다. 한편 Muehleisen et al. (2014)과 Raman et al. (2014a; 2014b)은 건물 외피에서 침기가 발생하는 위치를 찾고 침기량을 측정하기 위해 마이크로폰 어레이(Microphone array)를 활용한 빔포밍 방식과 근거리 음향 홀로그래피(Nearfield acoustic holography, NAH) 방식을 사용하였다. Muehleisen et al.과 Raman et al.은 빔포밍 방식을 활용하여 창문과 문 주변 틈새를 통해 새어나오는 음파를 측정하고 영상에 표시함으로써 침기가 발생하는 위치를 찾을 수 있음을 보여주었다. 하지만 빔포밍 방식으로는 침기량을 알기 어려우며, 침기량을 알기 위해서는 NAH 방식을 통해 파악할 수 있다고 결론을 내렸다.

이와 같이 음향기법을 활용한 건물의 기밀성능 측정 연구는 소리를 통해 건물의 기밀성능을 빠르게 측정할 수 있는 것과 블로어 도어와 같은 무거운 장비를 사용하지 않아도 된다는 장점이 있다. 그럼에도 아직 음향기법을 활용한 건물의 기밀성능 측정방법이 국내 공동주택에 적용된 사례가 없으며, 특히 빔포밍 알고리즘 기반의 마이크로폰 어레이의 적용 가능성에 대한 연구가 부족한 상황이다. 따라서 본 연구는 공동주택을 대상으로 빔포밍 알고리즘 기반의 음향카메라를 활용하여 기밀성능을 측정하는 방법의 적용 가능성을 파악하고자 하였다.

방법론

실험 개요

본 연구는 음향기법을 활용하여 국내 공동주택의 기밀성능 측정 가능성을 분석하기 위한 연구이기 때문에 동일한 침기 틈새를 통한 침기량과 음압레벨(Sound Pressure Level, SPL) 차를 측정하는 실험을 진행하였다. Figure 1에 표시되어 있는 것처럼, 국내에서 건물 기밀성능 측정에 많이 사용되는 블로어 도어 테스트를 이용하여 건물 외벽의 기밀성능을 측정하고, 무지향성 마이크로폰과 음향카메라(마이크로폰 어레이)를 이용하여 외벽을 사이에 두고 실내의 음압레벨 차이와 침기 위치 파악을 진행하였다.

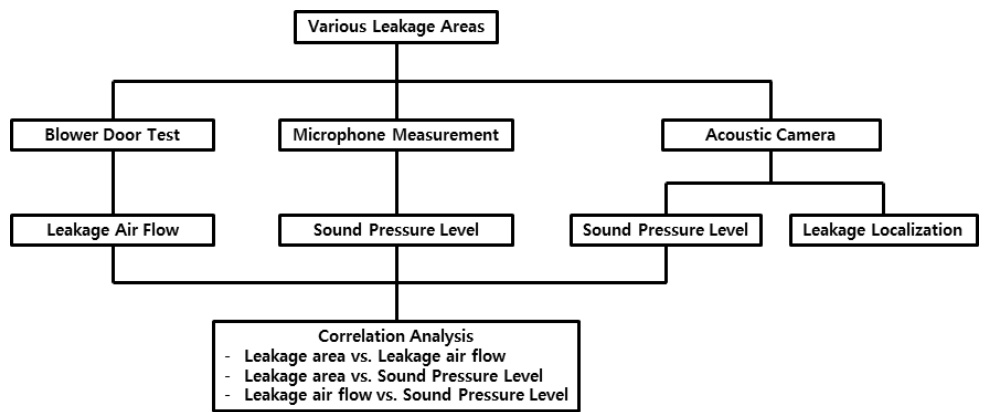


Figure 1. Schematic flowchart of the experiments

실험은 세종특별시에 위치한 LH토지주택연구원 주택성능연구개발센터의 실증주택에서 진행되었다. 실험의 편의성을 위하여 3층 규모의 실증주택의 1층에 위치하고 한 면이 외벽인 방 하나를 선정하여 실험을 진행하였다. 실험 대상공간에 대한 정보는 Table 1과 Figure 2와 같다.

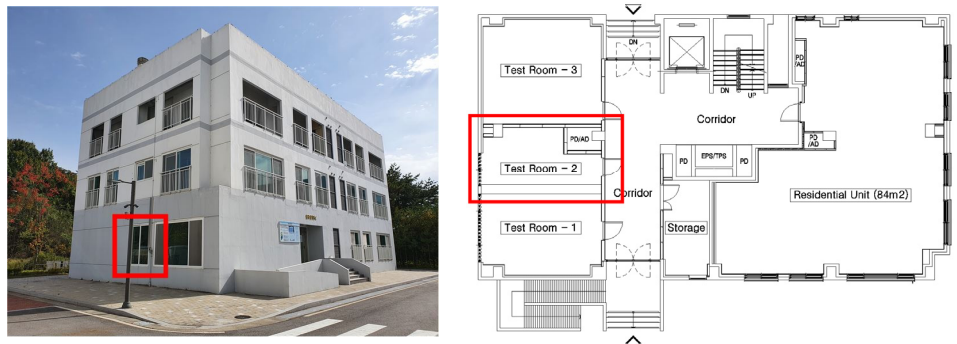


Figure 2. The testbed building and the floor plan

Figure 1과 같이 침기가 발생하는 틈새 면적에 따른 침기량과 음압레벨 차를 측정하기 위하여 본 연구에서는 창문의 틈 너비를 조절하면서 다양한 틈새 면적을 만들어서 실험을 진행하였으며 자세한 내용은 Table 2와 같다. 창호 벽면 외 내부벽에서 침기가 발생하는 경우 음

향기법을 이용한 기밀성능 결과에 오차가 발생할 수 있기 때문에 내부벽의 틈새를 최대한 밀폐하여 침기 발생이 창호에서만 발생할 수 있도록 구성하였다. 실험 중 창문 개구부의 높이는 고정으로 설정하였다.

Table 1. Description of the testbed building

Category	Description
Location	Sejong City LH Housing Environment Research and Innovation
Space size	Area 15.56 m ² , Volume 52.66 m ³
Type of exterior wall	Reinforced concrete
Window type	Sliding window
Window size [m]	Height : 2.1, Width : 1.8

Table 2. Description of the experiment cases

Case	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
Leakage Height [m]	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
Leakage Width [m]	0	0.0075	0.0200	0.0450	0.0600	0.0830
Leakage Area [m ²]	0	0.0158	0.0420	0.0945	0.1260	0.1743

Table 3은 본 연구에서 사용된 측정 장비들의 목록과 사양 등을 보여주고 있다.

Table 3. Instrument information used for experiments

Equipment	Model	Specification
Blower Door Test	Minneapolis TEC Model 3	<ul style="list-style-type: none"> • Air Flow Range : 11 to 6,300 CFM • Accuracy +/- 4% or 1 CFM
Microphone	GRAS 146AE 1/2"	<ul style="list-style-type: none"> • Frequency Range : 3.15 Hz to 20 kHz • Sensitivity : 50 mV/Pa
Omni-direction Speaker	Ntek OMNI 4" LT	<ul style="list-style-type: none"> • Max Sound Pressure Level : 123 dBA
FFT Analyzer	RION SA-02M	<ul style="list-style-type: none"> • Frequency Range : 20 Hz to 20 kHz
Sound Level Meter	RION NL52	<ul style="list-style-type: none"> • Frequency Range : 10 Hz to 20 kHz • Level Range : 20 to 130 dB • Sensitivity : -27 dB re 1 V/Pa
Acoustic Camera	Norsonic Nor-848	<ul style="list-style-type: none"> • Frequency Range : 100 Hz to 20 kHz • Sensitivity : -26 +/-3 dBFS/Pa @ 1 kHz 94 dB

기밀성능 측정

블로어 도어 테스트를 이용하여 대상 공간과 실외 압력차(ΔP)를 일정한 상태가 되었을 때 주입하거나 빼내는 공기유량(Q)을 측정을 하고 압력과 유량 데이터를 기록한다. 기록된 데이터를 로그 변환하고 식 (1)을 적용하면 유체계수 C 와 n 을 구할 수 있으며, 이를 바탕으로 압력차가 50 Pa일 때의 공기 유량을 산출할 수 있다(Krarti, 2000; The Energy Conservatory, 2017).

$$Q = C \cdot \Delta P^n [m^3/h] \tag{1}$$

C, n : Correlation coefficients derived from curve fitting of pressure differentials and air flow rates
 Q_{ref} : Reference volume air rate at a reference pressure difference

음압레벨 차이 측정

침기가 발생하는 개구부에 의해 건물 외피의 차음성능은 하락하게 되며 개구부 크기 증가에 따라 실내의 음압레벨 차이는 더욱 감소하게 된다. 본 연구에서는 기밀성능 실험과 동일한 조건에서 실내의 음압레벨 차와 침기 위치를 측정하기 위해 실내에 무지향 스피커를 위치시켰으며, 모든 틈새에서 외부로 방출되는 단위 면적 당 음의 세기가 유사할 수 있도록 공간 내 음의 분포를 최대한 고르게 구성하고자 하였다. 또한 소음 측정 시 배경소음(약 30 dB) 보다 최소 6 dB 이상 높은 소음 및 일반적인 단창 창호의 차음성능을 고려하여 실내 공간에 약 80 dB 이상의 소음이 요구되었다. 따라서 외부 요인에 의한 실외 소음 측정 결과의 오차를 최소화 하기 위해 실내 공간을 약 100 dB의 충분한 음에너지로 구성하였다.

작은 공간의 경우 저주파 대역에서 음향 모드에 의한 음장 불균형이 발생할 수 있기 때문에 실내 평균 소음도를 측정하였으며, 소음 측정은 현장 차음성능 측정 방법(KS F 2809)과 유사하게 수행하였다. Figure 3과 같이 모서리에서 500 mm 떨어진 3지점과 중앙 1지점에서 높이 1.2 m에 무지향성 마이크로폰을 위치시켜 실내 공간 평균 음압을 측정하였다. 실외에는 동일한 마이크로폰을 창문 개구부로부터 1 m와 5 m 떨어진 지점에 위치시켜 이격거리에 따른 소음감쇠량을 분석하였다.

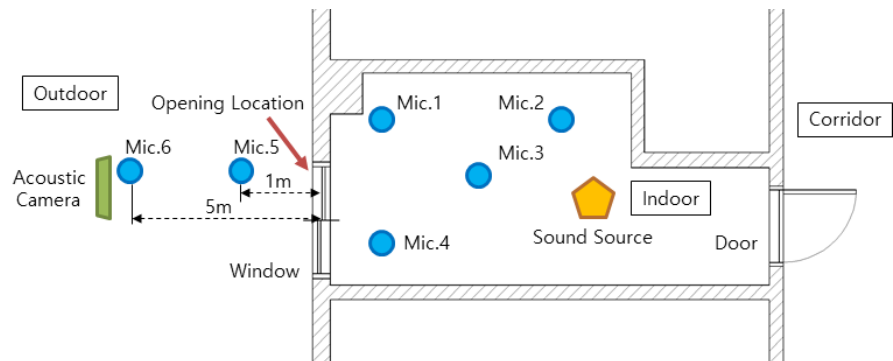


Figure 3. Schematic drawing of the experiment setup

본 연구에서 사용된 음향 카메라는 128개의 MEMS 마이크로폰이 나선형배열로 구성되어 있으며, Delay and Sum (DAS) 및 Minimum Variance (MV) 알고리즘을 이용하여 소음 위치를 분석한다. 음향 카메라는 대상 공간의 외벽이 카메라에 포착될 수 있도록 창문 개구부로부터 5 m 떨어진 지점에서 마이크로폰과 동일 선상에 배치시켜 무지향성 마이크로폰 측정 결과와 비교 분석할 수 있도록 구성하였다. 소음 측정은 백색잡음을 발생시켜 모든 주파수 대역을 동시에 측정하였으며, 음압레벨 차 계산이 용이하도록 측정 결과를 1/3 옥타브 대역으로 변환하여 분석하였다.

실험결과

기밀성능 측정결과: 블로어 도어 테스트

블로어 도어 테스트를 통해 기밀성능 측정 결과는 Figure 4와 Table 4와 같다. 창문 개구부를

통해 새어나오는 유량 변화만을 검토하기 위해 각 Case에서 측정된 유량에서 창문이 닫힌 상태에서 실험한 Case 1에서 측정된 유량을 빼주었다. 이를 통해 다른 벽체나 외벽의 균열, 창문을 주변 틈새로 새어나오는 유량 등의 영향을 제거할 수 있었다.

Figure 4와 같이 침기가 발생하는 틈새의 면적이 증가에 따라 침기량이 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 틈새 면적과 침기량 사이의 관계는 2차 다항식으로 표현될 수 있다.

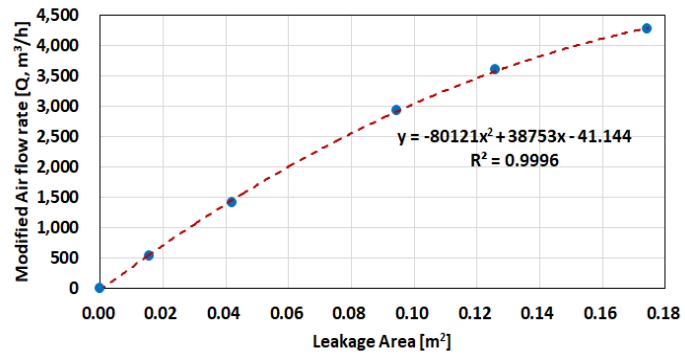


Figure 4. The resulting correlation between effective leakage area and air flow rate

Table 4. Results of the blower door test

Case	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
Leakage Area [m ²]	0	0.0158	0.0420	0.0945	0.1260	0.1743
Measured Air Flow Rate at 50Pa [m ³ /h]	446	969	1,848	3,366	4,048	4,707
Modified Air Flow Rate at 50Pa [m ³ /h]	0	523	1,402	2,920	3,602	4,261

음압레벨 측정결과 : 무지향성 마이크로폰

1) 측정 주파수 영향 분석

선행연구(Raman et al., 2014a, 2014b; Varshney et al., 2013)에서는 음향 기법을 이용한 기밀성능 분석 시 주파수 대역의 영향을 분석하기 위해 500 Hz, 4,000 Hz, 5,000 Hz 대역을 선정하였으며, 본 연구에서는 해당 주파수를 중심주파수로 하는 1/3 옥타브 밴드와 일반 환경에서 발생하기 어렵기 때문에 외부 요인이 적을 것으로 판단되는 1/3 옥타브 밴드의 중심주파수 10,000 Hz를 추가로 선정하여 실험을 수행하였다.

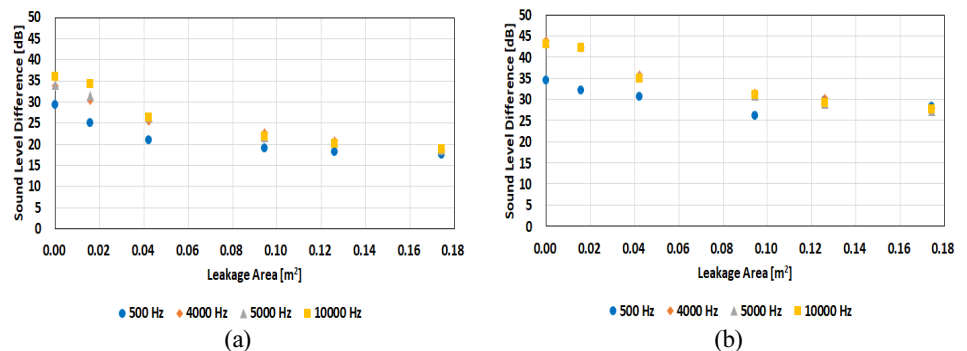


Figure 5. The resulting Δ SPLs for various cases for different distances from the leakage openings (a) distance = 1 m, (b) distance = 5 m

개구부 면적에 따른 음압레벨 변화를 측정하였으며, Figure 5와 같이 전반적으로 개구부의 면적이 증가함에 따라 실내의 음압레벨 차는 줄어드는 경향을 보였다. 1/3 옥타브 밴드의 중심주파수 500 Hz는 다른 주파수 대역과의 차이가 있는 것으로 나타났으며, 4,000 Hz, 5,000 Hz, 10,000 Hz에서의 음압레벨 차는 모든 케이스에서 서로 비슷한 수치를 나타내었다.

이와 같은 결과는 고주파 대역의 경우 건물 자체의 차음성능 보다는 틈새에 대한 영향을 크게 받으며, 직진성이 강하기 때문에 빔포밍을 이용한 음 추적 및 소음도 산출 시 오차를 최소화 할 수 있기 때문이다. 추가적으로 4,000 Hz 대역의 측정 결과가 외부 소음 영향이 적은 10,000 Hz 대역과 유사한 경향을 보이기 때문에 추후 실험 수행 시 4,000 Hz 대역을 사용해도 무방할 것으로 판단된다. 결과적으로 음향기법을 이용하여 건물의 기밀 위치 및 기밀성능을 측정하기 위해서는 저주파에 비해 직진성과 틈새 투과성이 높은 고주파 영역을 활용하는 것이 합리적으로 판단된다.

2) 이격거리 영향 분석

소음은 음원으로부터 거리가 증가할수록 크기가 줄어들기 때문에 음원 크기를 측정하는 경우 음향파워 또는 이격거리에 대한 소음도로 결과를 제시한다. 본 연구에서는 음향카메라를 통해 대상공간의 외벽을 측정하기 위하여 개구부로부터 5 m 떨어진 지점에서 측정된 소음도를 이용하여 기밀성능을 분석하고자 하였으며, 추후 측정 거리에 대한 보정을 위해 이격거리가 다른 두 위치(1 m, 5 m)에서 소음 측정을 수행하여 이격거리에 따른 거리 감쇠를 분석하였다. Table 5는 이격거리에 따른 소음 측정 결과와 식 (2)의 거리감쇠식을 통해 계산된 위치별 소음도를 나타낸다(정일록, 2005). 여기서 SPL_{r_1} 은 인접한 위치(r_1)에서의 소음도, SPL_{r_2} 는 먼 위치(r_2)에서의 소음도를 나타낸다.

$$L_d = SPL_{r_1} - SPL_{r_2} = 10 \log_{10} (r_2/r_1) [dB] \quad (2)$$

Table 5. Resulting average Δ SPLs at different distances for various cases

Case	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
Leakage Area [m ²]	0	0.0158	0.0420	0.0945	0.1260	0.1743
Actual Δ SPL at 1 m	34.7	32.1	26.0	22.1	20.5	18.6
Actual Δ SPL at 5 m	43.5	42.3	35.4	31.2	29.4	27.6
Expected Δ SPL at 5m	41.7	39.1	33.0	29.1	27.5	25.6
Percent Difference [%]	4	8	7	7	7	8

Table 5와 같이 측정된 음압레벨과 예측된 음압레벨의 단순 소음도 크기를 비교하면 약 7% 차이가 존재하였으며, 이를 통해 추후 측정 이격거리에 대한 영향은 거리 감쇠식을 통해 보정 가능한 것으로 판단된다.

음압레벨 측정결과 : 음향 카메라

1) 침기 위치 분석

Figure 6는 음향카메라를 이용하여 측정된 개구부 크기에 따른 빔포밍 맵(beamforming map)을 나타낸다. 주파수 대역은 4,000 Hz부터 10,000 Hz까지 설정하였으며, 각 Case에 대한 소음 크기 변화를 비교할 수 있도록 범례 설정을 30~60 dB으로 설정하였다.

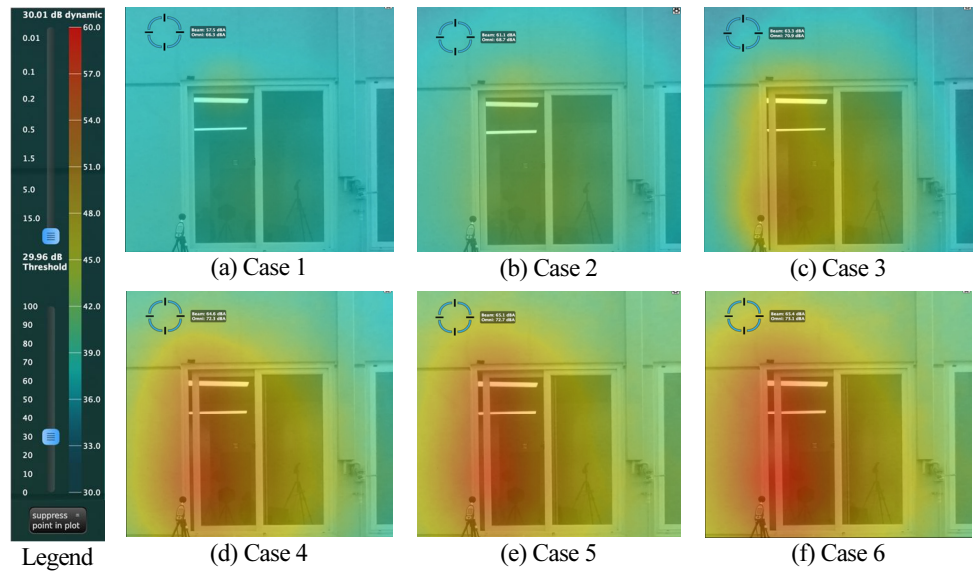


Figure 6. The resulting beamforming maps for various leakage areas

그림과 같이 문을 완전히 닫은 경우(Case 1)에도 창호 상부 및 중앙 틈새에서 미세한 소음이 새어나오는 것을 확인할 수 있으나, 창문 개방면적이 증가함에 따라 개구부 위치에서 길쭉한 slit 형태의 영역이 넓어지면서 개구부에서의 소음 크기가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같이 음향 카메라를 이용하여 소음도가 높은 영역의 위치를 측정할 수 있었으며, 개구부 크기에 따른 소음 차이 분석도 가능한 것을 확인할 수 있었다.

2) 측정 결과의 신뢰성 분석

음향 카메라는 음원 위치를 분석하기 위해 여러 대의 마이크로폰에서 측정된 결과를 후처리 과정을 거치기 때문에 수음점에서의 소음 측정 결과에 대한 교정 방법이 전무하다. 따라서 본 연구에서는 음향카메라 소음 측정 결과에 대한 신뢰성을 분석하기 위해 동일 위치에서 마이크로폰으로 측정된 결과와 소음 측정 결과를 비교하였다. 앞장에서 언급되었듯이 1/3 옥타브 대역의 중심주파수 4,000, 5,000, 10,000 Hz의 평균 소음도에 대해 측정 결과를 비교하였다.

Table 6과 Figure 7과 같이 동일한 위치에 설치된 마이크로폰과 음향카메라 측정 값을 비교하였다. Figure 6에서 확인할 수 있듯이 개구부가 존재하지 않는 경우에는 창호 틈새에서 누설되는 소음이 존재하였으며, 빔포밍 맵에서 가장 높게 분석된 소음에 비해 6 dB 이내에 있는 지점들을 선정하여 식 (3)을 통해 합산하였다. 음향카메라 측정 결과와 마이크로폰 측정

값과 비교한 결과 평균 3% 정도 차이를 보이는 것으로 나타났으며, Figure 7과 같이 침기 틈 새 면적 증가에 따른 음압레벨 차 감소 경향도 유사한 것으로 나타났다.

Table 6. Resulting average Δ SPLs for various cases of two different instruments

Case	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
Effective Leakage Area [m ²]	0	0.0158	0.0420	0.0945	0.1260	0.1743
Microphone (Δ SPL at 5 m)	43.5	42.3	35.4	31.2	29.4	27.6
Acoustic Camera (Δ SPL at 5 m)	44.6	43.0	36.6	31.9	30.5	29.1
Percent Difference [%]	2	2	3	2	3	5

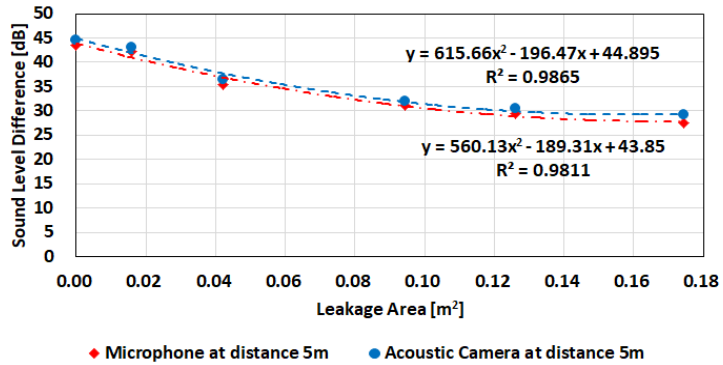


Figure 7. The resulting Δ SPLs for various cases for two different instruments

$$\begin{aligned}
 \text{Sum of SPL} &= 10\log_{10}\left(\sum_{i=1}^n 10^{SPL_i/10}\right) & (3) \\
 &= 10\log_{10}\left(10^{SPL_1/10} + 10^{SPL_2/10} + \dots + 10^{SPL_n/10}\right) [dB]
 \end{aligned}$$

3) 개구부 외 틈새에 대한 음향 에너지 보정

창문을 완전히 닫힌 상태에서도 공간 내부 상태에 따라 내부벽, 출입문 등에서 침기가 발생하기 때문에 기밀성능 측정 시 창호가 존재하는 면에서 발생하는 침기만을 고려하기 위해 창문이 닫힌 상태의 기밀량을 다른 실험 결과에서 보정함으로써 창호 개구부에 대한 영향만을 고려할 수 있도록 하였다(Muehleisen et al., 2014).

음향카메라를 이용한 소음 측정의 경우에도 개구부 외 틈새에 의한 우회전달음이 존재할 수 있기 때문에 기밀성능 측정 보정을 한 것과 같이 식 (4)와 식 (5)를 이용하여 각 Case에서 측정된 음압에서 Baseline의 측정 음압을 보정하였다. 이를 통해 다른 경로로 전달되는 소리를 제거하면서 개구부 면적이 확장됨에 따른 실내외 음압레벨 차가 감소되는 양을 Table 7과 같이 구할 수 있었으며, 개구 면적과 음압레벨 차의 변화량 관계를 Figure 8과 같이 구할 수 있었다.

$$\begin{aligned}
 \text{Modified } SPL_{out} &= SPL_{case\ i} - SPL_{case\ 1} & (4) \\
 &= 10\log_{10}\left(10^{SPL_{case\ i}/10} - 10^{SPL_{case\ 1}/10}\right) [dB]
 \end{aligned}$$

$$\text{Modified } \Delta SPL = SPL_{in} - \text{Modified } SPL_{out} \quad (5)$$

Table 7. Resulting average Δ SPLs at different distances for various cases

Case	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
Leakage Area [m ²]	0	0.0158	0.0420	0.0945	0.1260	0.1743
Measured Δ SPL at 5 m	44.6	43.0	36.6	31.9	30.5	29.1
Modified Δ SPL at 5 m	-	48.0	37.4	32.2	30.7	29.3

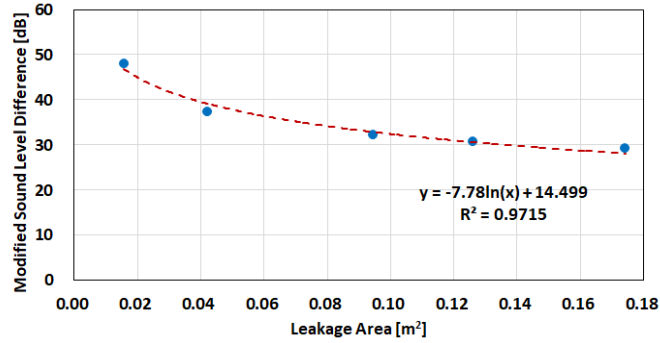


Figure 8. The resulting correlation between leakage area and modified Δ SPL

분석

상관성 분석

현장 실험결과를 바탕으로 창문 개구부를 통한 음압레벨 변화와 침기량 변화와의 상관관계를 분석하였다. 창문이 닫힌 상태(Case 1)을 Baseline으로 설정하고 다른 인자의 영향은 배제하고 창문의 개구면적이 확장됨에 따른 실내의 음압레벨 차 변화와 침기량 변화에 끼치는 영향만 고려하기 위하여 앞 절에서 설명된 것과 같이 각 실험 결과 값에서 Baseline 결과 값을 보정하고 상관성 분석을 진행하였다. Figure 9과 같이 개구부가 확장되어 실내의 음압레벨 차가 줄어들수록 침기량은 증가하는 경향이 나타나는 것을 볼 수 있으며, 이와 같은 관계는 지수함수로 표현될 수 있었다.

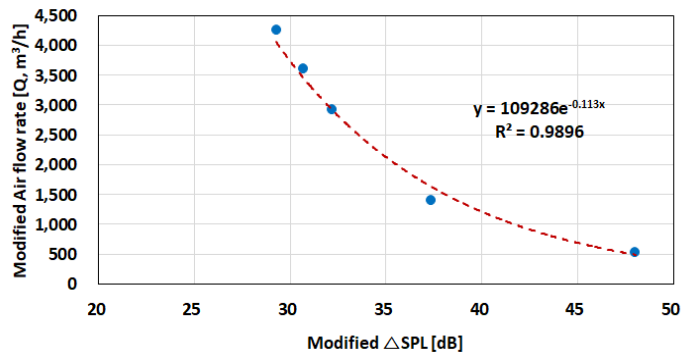


Figure 9. The resulting correlation between sound pressure level difference and air flow rate

적용성 검토

앞에서 설명한 것과 같이 빔포밍 알고리즘 기반 음향카메라를 적극적으로 활용하여 건물의 기밀성능을 파악하려는 연구는 미비하였고, 심지어 Muehleisen et al. (2014)과 Raman et al. (2014a; 2014b)과 같이 빔포밍 방식으로 침기 발생 위치 파악은 가능하지만 침기량을 파악하는 것은 어렵다는 관점이 있었다. 하지만 본 연구의 결과는 음향카메라로도 침기위치 파악과 침기량을 파악이 가능함을 보여주어 본 방식의 적용 가능성을 보여주었다. 실험결과 및 수행방법 등을 토대로 빔포밍 방식의 장점을 정리하였다.

- 빔포밍 방식은 추적가스나 열화상법에 비해 손쉽게 침기 위치 파악이 가능
- 빔포밍 방식으로 파악된 침기 위치들의 음압레벨 합과 마이크로폰으로 측정된 소음도는 유사
- 블로어 도어 테스트와 같이 실험을 위한 사전작업이 적으며 빠르게 측정이 가능
- 음향정보와 침기량과의 관계를 토대로 음향정보를 이용해 외벽의 침기량 파악 가능
- 한 번의 실험으로 외벽의 틈새에 의한 기밀성능과 차음성능을 동시에 파악이 가능

하지만 본 연구의 수행방법 및 결과를 바탕으로 아래와 같은 한계점도 발견되었으며, 이에 대한 추가적인 연구도 필요한 것으로 생각된다.

- 공간의 외벽이 아닌 다른 벽체, 덕트 등에서 발생하는 침기량 파악 어려움
- 침기가 발생하는 균열 부위의 형상이 다양함
- 고층 건물의 경우 실외에 음향카메라나 마이크로폰, 또는 스피커 설치의 어려움
- 기존의 방식과 비교하였을 때 표준화된 실험 방법 미비

정리 및 결론

본 연구는 빔포밍 알고리즘 기반의 마이크로폰 어레이를 활용한 기밀성능 측정방법의 적용 가능성을 살펴보는 것을 목적으로 하였다. 현장 조건에서 빔포밍 알고리즘에 의한 음향 정보와 기밀성능과 관련된 영향 인자를 분석하였으며, 침기 면적 증가로 인해 야기되는 침기량 변화와 실내외 음압레벨 차 변화와의 상관관계를 분석하였다.

빔포밍 알고리즘 기반 음향카메라를 활용하여 실험 공간의 외벽 쪽 침기가 발생하는 위치를 시각적 분석이 가능하였으며, 해당 위치에서 수음점으로 전달된 소음 크기도 함께 분석 가능하였다. 본 연구에서는 직진성이 높은 고주파 대역(1/3 옥타브 대역의 중심주파수 4,000, 5,000, 10,000 Hz의 평균 소음도)를 대상으로 하였으며, 빔포밍 맵에서 가장 높은 소음을 기준으로 6 dB 이내의 소음 지점의 소음을 합산하는 형태로 수음점의 소음도를 계산하였다. 동일 위치의 무지향성 마이크로폰 측정 결과와 단순 소음도 비교 시 약 3% 차이가 존재하였기 때문에, 음향 카메라를 통해 소음 측정이 가능한 것으로 판단된다.

침기면적에 의한 침기량 변화와 실내외 음압레벨 차 변화와의 상관성 분석 결과, 침기 면적이 증가하여 실내외 음압레벨 차이가 줄어들게 되면 침기량은 증가하는 형태를 보였다. 또한 음향카메라를 이용하여 단면의 틈새 위치를 추적함과 동시에 각 위치의 침기량을 분석할 수 있기 때문에, 합리적인 기밀성능 측정 방안이 마련될 수 있을 것으로 판단된다.

결과적으로 빔포밍 방식의 음향 카메라를 활용하여 건물의 기밀성을 파악하는 것은 가능하지만, 현장 적용을 위해서 더욱 정밀한 연구가 필요하다는 결론을 얻을 수 있었다. 특히 본 연구에서는 음압차와의 상관식을 통해 간접적으로 기밀성능을 도출하였기 때문에 추후 연구에서는 직접적인 침기량 분석을 위한 틸새 크기 별 음압차 분석, 침기 틸새의 형상별 영향 분석 등을 수행할 예정이며, 추가 연구가 이루어지면 음향카메라를 활용한 기밀성능 측정이 기존의 방식을 대체할 수 있을 것으로 기대된다.

후기

본 연구는 국토교통부 AI기반 스마트하우징 기술개발사업의 연구비지원(20SHTD-B157107-01)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Chen, K.T. (1995). Study of acoustic transmission through apertures in a wall. *Applied acoustics*, 46(2), 131-151.
2. Iordache, V., Catalina, T. (2012). Acoustic approach for building air permeability estimation. *Building and Environment*, 57, 18-27.
3. Muehleisen, R.T., Tataru, E., Betr, B. (2014). Relationship between air infiltration and acoustic leakage of building enclosures. *Journal of the Acoustical Society of America*. 135(4). <https://doi.org/10.1121/1.4877858>.
4. Oldham, D. J., Zhao, X. (1993). Measurement of the sound transmission loss of circular and slit-shaped apertures in rigid walls of finite thickness by intensimetry. *Journal of Sound and Vibration*, 161(1), 119-135.
5. Sonoda, T., Peterson, F. (1986). A sonic method for building air-leakage measurements. *Applied energy*, 22(3), 205-224.
6. Undram, M., Song D., Kim, J. (2019). A Review of the Test Methods for Air-tightness Performance of Building Components Using the Blower Door System. *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 31(5), 216-226.
7. Varshney, K., Rosa, J. E., Shapiro, I., Scott, D. (2013). Air-infiltration measurements in buildings using sound transmission loss through small apertures. *International Journal of Green Energy*, 10(5), 482-493.
8. Berardi, U., Pouyan, S. (2018, 11). Exploring acoustical approaches for pre-screening the airtightness of building enclosures. In *Proceedings of Meetings on Acoustics 176ASA*. Acoustical Society of America, 35(1), 040005.
9. Keast, D. N., Pei, H. S. (1979, 5). The use of sound to locate infiltration openings in buildings. In *Proceedings of the ASHRAE-DOE Conference on the Thermal Performance of the Exterior Envelope of Buildings*, Orlando, FL, 85.
10. Leprince, V., Bailly, A., Carrié, F.R., Olivier, M. (2011, 10). State of the art of non-residential buildings air-tightness and impact on the energy consumption. In *32nd AIVC Conference Towards Optimal Airtightness Performance*.

11. Raman, G., Chelliah, K., Prakash, M., Muehleisen, R.T. (2014a, 11). Detection and quantification of building air infiltration using remote acoustic methods. Paper presented at the Inter Noise 2014, 43rd International Congress on Noise Control Engineering.
12. Raman, G., Prakash, M., Ramachandran, R.C., Patel, H., Chelliah, K. (2014b, 2). Remote detection of building air infiltration using a compact microphone array and advanced beamforming methods. Paper presented at the Berlin Beamforming Conference.
13. Jung, I.R. (2005). Noise and Vibration Engineering (2nd edition). Shinkwang.
14. Krarti, M. (2000). Energy Audit of Building Systems, An Engineering Approach. Florida: CRC Press.
15. Liddament, M.W. (1986). Air infiltration calculation techniques - An application guide. Air Infiltration and Ventilation Center, University of Warwick, Coventry, Great Britain.
16. Emmerich, S.J., McDowell, T., Anis, W. (2005). Investigation of the impact of commercial building envelope airtightness on HVAC energy use. National Institute of Standards and Technology, NISTIR.
17. Nagle, P., House, S. (2013). Assisting NatHERS Compliance.
18. Pettersson, B. (1978). Infra-Red Thermography and Thermal Insulation in Buildings. National Swedish Authority for Testing, Inspection and Metrology Publication SP-RAPP 1978: 22, 1978.
19. The Energy Conservatory. (2017). Model 3 Minneapolis Blower Door™ System - User Manual. The Energy Conservatory.
20. ASHRAE. (2009). ASHRAE Handbook - Fundamental. ASHRAE, Atlanta.