



## 단계적 기밀개선 적용 대학 강의실의 Blower Door 및 Tracer Gas 기반 기밀성능 평가

### *Airtightness Evaluation of a University Classroom Applying Stepwise Airtightness Improvements Using the Blower Door and Tracer Gas Method*

이준우\* · 정한웅\*\* · 강경모\*\*\*

Junwoo Lee\* · Hanung Jeong\*\* · Kyungmo Kang\*\*\*

\* Bachelor Student, Dept. of Architectural Engineering, Daejin Univ., Pochon, Korea (junwoolee3352@gmail.com)

\*\* Bachelor Student, Dept. of Architectural Engineering, Daejin Univ., Pochon, Korea (hanungj3765@gmail.com)

\*\*\* Assistant Professor, Dept. of Architectural Engineering, Daejin Univ., Pochon, Korea (kyungmo@daejin.ac.kr)

#### ABSTRACT

**Purpose:** This study examined the airtightness of a university classroom by focusing on the main leakage parts of the building. Many Korean schools are old, and poor airtightness increases energy use. For this reason, improving airtightness is an important part of green remodeling in educational buildings. However, the effect of step-by-step airtightness improvement has not been well studied in real classrooms. **Method:** In this study, the leakage parts were divided into three groups: architectural, mechanical and electrical, and miscellaneous envelope leakage. Airtightness improvements were applied step-by-step, and the changes in performance were measured using the Blower Door Test and the Tracer Gas Method. Four cases (Baseline, Architectural improvement, Architectural + Mechanical/Electrical improvement, and Architectural + Mechanical/Electrical + Miscellaneous leakage improvement) were tested. The Blower Door Test followed ASTM E779 and ISO 9972, and the Tracer Gas Method followed KS I ISO 16000-1. **Result:** ACH<sub>50</sub> decreased from 25.9h<sup>-1</sup> to 14.0h<sup>-1</sup> (46% reduction). The ACH measured by the Tracer Gas Method also decreased from 0.38h<sup>-1</sup> to 0.18h<sup>-1</sup> (51% reduction). The Effective Leakage Area (ELA) decreased by about 53% in the final case, showing that both airflow and leakage area were reduced. The contribution of each leakage group was architectural parts (72.1%), miscellaneous envelope leakage (19.7%), and mechanical/electrical parts (8.2%). This means most leakage occurs through windows, doors, and joints. The study also confirmed that ACH<sub>50</sub>/20 may overestimate natural ventilation. This study provides practical data for deciding priorities when planning airtightness improvements in school green remodeling.

#### KEYWORD

블로우도어  
추적가스법  
대학 강의실  
기밀Blower Door Test  
Tracer Gas Method  
University Classroom  
Airtightness

#### ACCEPTANCE INFO

Received Nov. 28, 2025

Final revision received Dec. 9, 2025

Accepted Dec. 15, 2025

© 2025. KIEAE all rights reserved.

## 1. 서론

### 1.1. 연구의 배경 및 목적

기후 위기가 심화됨에 따라 전 세계적으로 탄소중립 사회 실현을 위한 노력이 강화되고 있으며, 대한민국 정부도 2050 탄소중립을 선언한 후 보다 구체적인 목표와 비전을 제시하고 있다. 국가 전체 온실가스 배출량 중 간접 배출량 포함 시 24%를 차지하는 건물 부문에서는 제로에너지빌딩(Net Zero Energy Building, NZEB)과 그린리모델링 사업이 건물 에너지 성능 향상을 위한 주요 정책으로 추진되고 있다. 특히 그린리모델링은 노후화된 건축물의 외피·설비 성능을 개선하여 에너지 효율을 향상시키고 쾌적한 실내 환경을 조성하는 사업으로, 기존 건축물의 탄소 배출을 줄이는 데 중요한 역할을 한다[1].

통계청 생활시간조사에 따르면 한국인은 하루 생활의 약 90%를 실내에서 보내고 있으며[2], 이로 인해 건축물에서 발생하는 에너지 사용량은 지속적으로 증가하고 있다. 건물의 에너지 소비는 냉·난방 및 급탕 부문에 집중되어 있으며, 교육 및 연구시설의 경우 전체 에

너지 사용 비율 중 62.9%가 냉·난방 및 급탕 부문에 집중되어 있다 [3]. 선행연구에서는 누기와 침기가 건물 에너지 손실의 주요 원인으로 보고되고 있으며, 특히 비산업용 건물에서는 환기 및 침기를 통해 손실되는 난방에너지가 전체 냉·난방 에너지 사용량의 약 48%를 차지하는 것으로 나타났다[4]. 이러한 결과는 기밀성능이 확보되지 않을 경우 외부 공기 유입으로 인한 열손실이 지속적으로 발생할 수 있음을 의미하며, 특히 장시간 재실이 이루어지는 학교시설과 같은 건축물에서는 기밀성능 개선이 에너지 성능 향상과 실내환경 품질 확보에 직접적인 영향을 미치는 핵심 요소이다.

국내외 학교 건물의 기밀성능을 측정한 선행연구에서 또한 학교 건축물의 기밀성능이 에너지 성능과 실내환경에 직접적인 영향을 미친다는 점을 공통적으로 보고하고 있다. 국내 연구에서는 특히 노후 학교시설에서 낮은 기밀성능이 반복적으로 확인되었다. Yang et al.[5]은 준공 후 20년 이상 경과한 초등학교 교실을 대상으로 수행한 Blower door test에서 평균 ACH<sub>50</sub>가 약 18h<sup>-1</sup> 수준으로 나타났다고 보고하였으며, Eom et al.[6] 역시 유사한 조건의 학교시설에서 ACH<sub>50</sub>가 15~20h<sup>-1</sup> 범위로 측정되었다고 제시하였다. 반면 해외 연구에서는 국내보다 상대적으로 양호한 기밀성능이 확인되었

다. Fernández-Agüera et al.[7]은 19세기 석조 교육시설을 대상으로 실측한 결과 ACH<sub>50</sub>가 약 4~8h<sup>-1</sup> 범위로 나타났으며, Colinart et al.[8]은 외피 개선 이전 약 10h<sup>-1</sup> 수준이었던 기밀성능이 개선 후 3~5h<sup>-1</sup> 수준까지 감소하였다고 보고하였다.

이러한 결과는 국내 학교시설의 기밀성능이 해외 사례에 비해 상대적으로 취약함을 보여준다. 실제로 국내의 연구를 종합한 분석에서는 해외 평균 기밀성능이 약 ACH<sub>50</sub> 6.9h<sup>-1</sup> 수준인 반면, 국내 학교시설은 평균 17.8h<sup>-1</sup>로 약 2.6배 높은 수준을 보였으며 건물 간 편차 역시 큰 것으로 나타났다[5-13]. 이는 국내 학교 건물이 외피 누기로 인한 에너지 손실 위험이 크다는 점을 시사하며, 향후 학교시설의 그린리모델링에서 기밀 성능 개선이 우선적으로 고려될 필요가 있음을 의미한다. 더불어 국내 학교시설의 약 66%가 준공 후 20년 이상 경과한 노후 건물임에도 불구하고, 현재 그린리모델링 사업은 주택 및 일부 공공건축물 중심으로 진행되고 있어 학교시설을 대상으로 한 실증 기반 기밀개선 연구는 여전히 부족한 상황이다.

따라서 본 연구에서는 대학 강의실을 대상으로 건축, 설비 및 기타 주요 누기 부위에 대한 기밀 개선을 수행한 후 Blower door test를 통해 기밀성능 개선 효과를 정량적으로 평가하고자 한다. 또한 자연상태에서 Tracer gas method를 적용하여 정상압 조건에서의 실제 기밀성능을 추가로 측정하고 두 측정 결과를 비교함으로써 기밀 개선의 영향도와 주요 누기 부위의 우선순위를 도출하고자 한다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 측정 개요

측정공간은 1991년에 준공된 경기도 포천시에 위치한 대학교며, 측정 공간의 바닥 면적은 54.8m<sup>2</sup>, 층고는 3.4m이며 체적은 184m<sup>3</sup>이다. 실험은 2025년 8월 4일부터 9월 2일 사이에 수행하였고 실험 기간 중 외부 온도는 26.4°C ± 3.14°C이었으며, 외부 습도는 85.5% ± 13.96%이었다. Fig. 1.은 측정 공간의 사진이다.

### 2.2. 실험 개요

기밀 개선은 건축, 설비(기계·전기), 기타 외피 부분으로 구분하여 단계적으로 수행하였다. 건축 부문에는 외부에 면한 창문(3600×1550mm) 2개와 복도와 연결된 창문(2000×600mm) 1개, 그리고 복도와 연결된 출입문(2000×1700mm) 1개로 구성되어 있다. 설비(기계·전기) 부문은 냉·난방기기, 화재경보기 등의 기계설비와 분전반, 콘센트 등 전기설비가 해당된다. 기타 외피 부문은 건축 및 설비 부문의 기밀개선 후, 인센스를 활용한 누기 탐지 과정을 통해 추가적으로 확인된 외피 누기 위치를 별도로 분류한 것이다. 이 과정에서 벽체 접합부, 실내 벽체 균열, 미사용 파이프 슬리브 개구부 등이 확인되었으며, 해당 요소들을 기타 외피 부분으로 구성하였다. 건축 부문을 Architectural (A), 설비(기계·전기) 부문을 Mechanical and Electrical (M&E), 기타 외피 부문을 Miscellaneous envelope leakage (M)으로 칭하며, 각 부문별 구성 요소는 Table 1.에 정리하였다.

기밀성능 평가는 네 가지 Case로 구분하여 수행하였다. Baseline

은 기밀개선을 실시하지 않은 상태이며, Case A는 건축 부문만 개선한 상태, Case A+M&E는 건축 부문에 더해 설비(기계·전기) 부문을 추가 개선한 상태, Case A+M&E+M은 앞선 두 부문에 더하여 기타 외피 부위까지 기밀개선을 모두 적용한 상태이다. 각 Case의 구성은 Table 2.에 제시하였다.

기밀개선은 선행연구를 참고하여 기밀 개선은 PE필름과 테이프를 이용하여 수행하였다[14,15]. Fig. 2.는 부문별 기밀개선 사진이다.

### 2.3. 실험 방법

#### 1) Blower Door Test

Blower door test는 개구부에 팬을 설치한 후, 실내로 외기를 도입하여 가압 또는 실내 공기를 외부로 방출시켜 감압하여 실내외의 압력차를 인위적으로 발생시키고 건물로 들어오는 누기량을 측정하여 기밀성능을 파악하기 위해 사용하는 측정방법이다[16]. 측정에 사용된



Fig. 1. Overview of the university classroom used for the airtightness and ventilation measurements

Table 1. Building component categorization

Part	Component
Architectural	Windows, doors
Mechanical and electrical	EHP, fire sensors, distribution panelboards, communications connectors, electrical sockets, speaker, HRV
Miscellaneous envelope leakage	Wall joints, interior cracks, unused pipe sleeve opening

\*EHP: Electric heat pump

\*HRV: Heat recovery ventilation unit

Table 2. Airtightness improvement cases

Case	Included leakage parts
Case baseline	No sealing
Case A	Architectural components
Case A+M&E	Architectural+ Mechanical&Electrical components
Case A+M&E+M	Architectural+Mechanical&Electrical+ Miscellaneous envelope leakagecomponents



a) Architectural components



b) Mechanical and electrical components



c) Miscellaneous envelope leakage components

Fig. 2. Component-wise airtightness improvement photographs

장비는 Retrotec 6100 (Retrotec, Everson, WA USA)이며, American Society for Testing and Materials (ASTM) E779:2010 및 ISO 9972:Europe (2016)을 기준으로 측정하였다[17,18].

Blower door를 이용한 측정값으로 누기계수와 누기지수를 산정한 뒤, 임의의 압력차에서 외피를 통한 누기량을 다음 수식(Eq. 1)으로 예측한다[15].

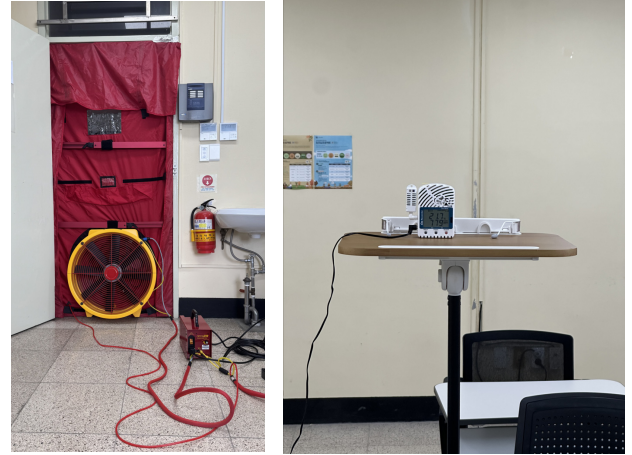
$$Q = C(\Delta p)^n \quad (\text{Eq. 1})$$

여기서,  $Q$ 는 건물 외피를 통한 누기량( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $C$ 는 누기계수 ( $\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{Pa}^n)$ ),  $n$ 는 유량지수로 난류는 0.5, 층류는 1.0을 사용한다.  $\Delta p$ 는 실내·외의 압력차(Pa)이며, 기준 압력차로 50Pa를 사용한다. (Eq. 1)을 사용하여 도출한 기준 압력차에서의 누기량  $Q_{50}$  값과 체적( $V$ )을 가지고 기밀성능에 대한 지표로 주로 사용하는  $\text{ACH}_{50}$ 을 다음 수식(Eq. 2)을 이용하여 계산한다[15].

$$\text{ACH}_{50} = \frac{Q_{50}}{V} \quad (\text{Eq. 2})$$

## 2) Tracer Gas Method

Tracer gas method에는 농도감쇠법, 일정농도주입법, 일정농도



a) Blower door test

b) Tracer gas method

Fig. 3. Field measurement photographs

유지법 등이 있다. 본 연구에서는 일반적으로 가장 많이 사용하는 농도감쇠법을 사용하였고, 농도감쇠법은 일반적인 공기 중에 포함되어 있지 않거나 포함되어 있어도 농도가 낮은 표준가스( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SF}_6$  등)를 추적가스로 설정하고, 실내 공간에 주입하여 농도를 상승시킨 후 시간에 따른 표준가스의 농도 감소량을 통해 공기교환율(Air Changes per Hour, ACH)을 추정하는 방법이다.

추적가스를 이용한 농도감쇠법은 실내공기가 혼합을 위하여 팬을 사용하여 균일하게 혼합되게 한다. 균일하게 혼합되었다고 가정하고, 다음 질량보존방정식(Eq.3)을 기반으로 계산한다[19].

$$V \frac{d(C(t))}{dt} + Q(t) * C(t) = E(t) \quad (\text{Eq. 3})$$

여기서,  $V$ 는 체적( $\text{m}^3$ ),  $C(t)$ ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )는 농도,  $Q(t)$ ( $\text{m}^3, \text{h}^{-1}$ )는 유량,  $E(t)$ ( $\text{m}^3, \text{h}^{-1}$ )는 가스 주입률이다. 표준가스 주입이 종료되어 주입률이 0이 되면, 다음 식(Eq. 4)으로 표현할 수 있다[19].

$$\text{ACH} = \frac{\ln(C_0 - C_{bg}) - \ln(C_f - C_{bg})}{\Delta t_h} \quad (\text{Eq. 4})$$

여기서,  $C_0$ 는 추적가스의 초기 농도,  $C_f$ 는 최종 농도이며,  $C_{bg}$ 는 추적가스 주입 이전의 배경 이전의 추적가스 농도이다. 측정에 사용된 장비는 T&D사의 TR-76Ui를 사용하였으며, KS I ISO 16000-1 기준으로 측정하였다[20]. ACH 측정은 각 Case별로 6회 측정하여 평균값을 사용하였다. Fig. 3.은 Blower door test와 Tracer gas method 실험 사진이다.

## 3. 측정결과

본 연구에서는 Blower door test와 Tracer gas method로  $\text{ACH}_{50}$ , ACH, ELA를 측정하였으며, 이러한 측정 결과를 한눈에 비교하기 위해 주요 지표( $\text{ACH}_{50}$ , ACH, ELA) Case별 결과를 Table 3.에 정리하였다.

### 3.1. Blower Door Test 측정결과

Fig. 4.는 각 Case를 Blower door test로 ACH<sub>50</sub>을 측정된 그래프이다. 개선을 하지 않은 Case Baseline의 ACH<sub>50</sub>은 25.9h<sup>-1</sup>로 측정되었다. 건축 부문 기밀개선을 진행한 Case A의 ACH<sub>50</sub>은 17.3h<sup>-1</sup>, 건축, 설비(기계, 전기) 부문 기밀개선을 수행한 Case A+M&E의 ACH<sub>50</sub>은 16.3h<sup>-1</sup>, 건축, 설비(기계, 전기), 기타 외피 부문 기밀개선을 수행한 Case A+M&E+M의 ACH<sub>50</sub>은 14.0h<sup>-1</sup>로 측정되었다. 기밀 개선을 하기 전인 Case Baseline와 건축, 설비(기계, 전기), 기타 외피 부문 기밀개선을 수행한 Case A+M&E+M의 ACH<sub>50</sub>을 비교하였을 때 ACH<sub>50</sub> 기준 약 46% 절감이 가능했다. 이러한 측정 결과

Table 3. Summary of airtightness performance by case

Case	ACH <sub>50</sub> (1/h)	ACH (1/h)	ELA (cm <sup>2</sup> )
Case baseline	25.9	0.34	1272.0
Case A	17.3	0.27	737.0
Case A+M&E	16.3	0.24	722.4
Case A+M&E+M	14.0	0.18	601.2

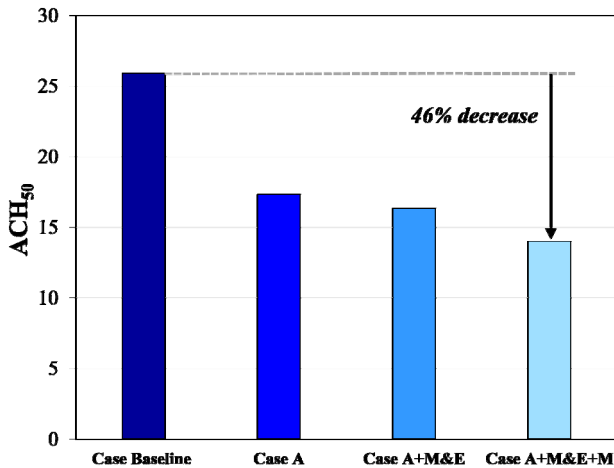


Fig. 4. ACH<sub>50</sub> (air changes per hour at 50 Pa) measured by the Blower door test for each airtightness improvement case

로 미루어볼 때, 외피개선을 통한 기밀성능의 변화폭이 가장 컸다.

Fig. 5.는 각 부문을 개선했을 때의 ACH의 감소되는 정도를 나타내는 그래프이다. 건축 부문 개선 시 8.6h<sup>-1</sup> 감소하였으며, 설비(기계, 전기) 부문 개선 시 1.0h<sup>-1</sup>, 기타 외피 개선 시 2.3h<sup>-1</sup> 감소하였다. 각 부문의 기밀성능 개선 기여도를 상대 비교하였을 때 건축 부문이 72.1%로 가장 높은 비중을 차지하였고, 기타 외피 부문이 19.7%, 설비(기계, 전기) 부문이 8.2%로 상대적으로 기여도가 낮았음을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 건축, 기타 건축 부위와 같은 건물의 외피를 통한 공기의 누기가 설비 등의 요소에서 발생하는 공기의 누기보다 많이 발생하고 있다는 것을 의미한다.

### 3.2. Tracer Gas Method 측정결과

Fig. 6.은 Tracer gas method으로 각 Case의 ACH를 6회씩 반복 측정된 그래프이다. 개선을 하지 않은 Case Baseline의 ACH는 0.34±0.03h<sup>-1</sup>로 측정되었다. 건축 부문 기밀개선을 진행한 Case A의 ACH는 0.27±0.05h<sup>-1</sup>, 건축, 설비 부문 기밀개선을 수행한 Case

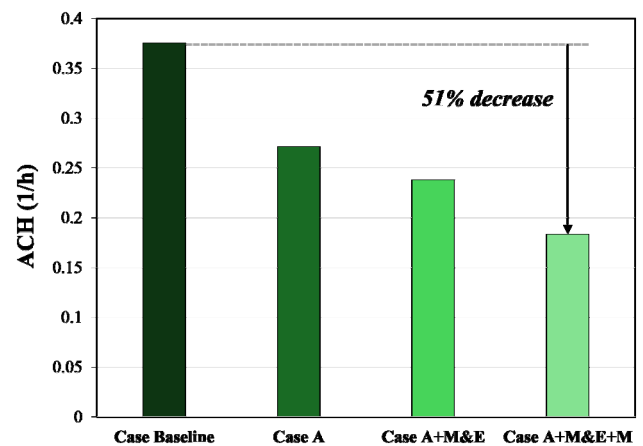


Fig. 6. ACH measured under natural pressure conditions for each airtightness improvement case

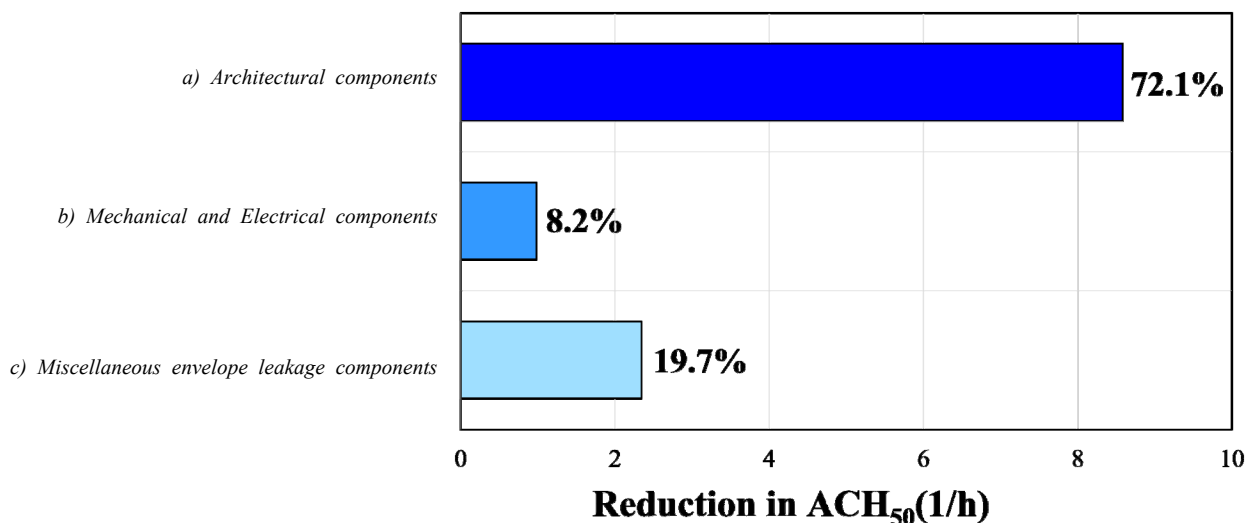


Fig. 5. ACH<sub>50</sub> reduction by component after airtightness improvements

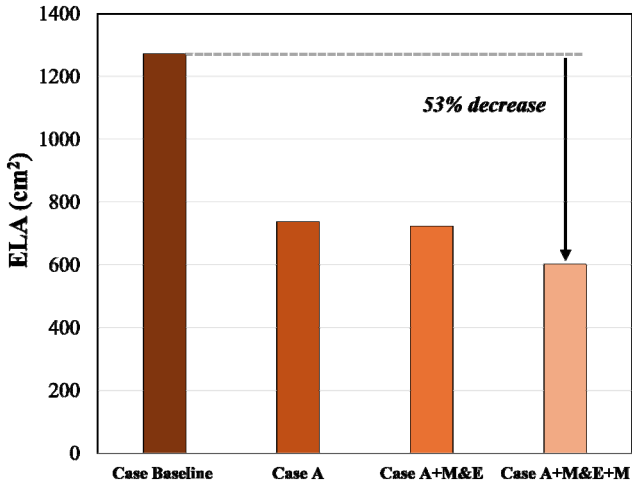


Fig. 7. Effective Leakage Area (ELA) measured for each airtightness improvement case

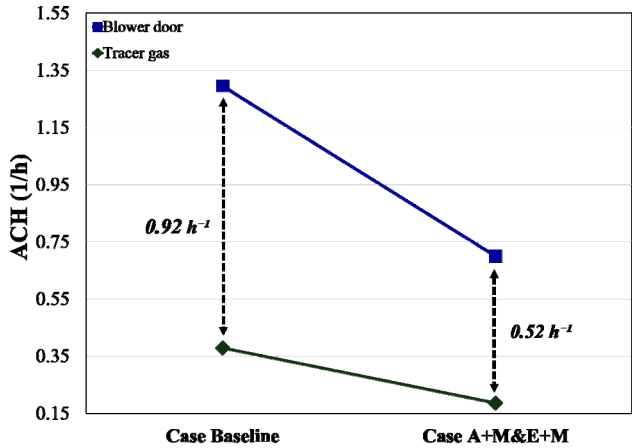


Fig. 8. Comparison of ACH between blower-door ( $ACH_{50/20}$ ) and tracer-gas methods before and after airtightness improvements.

A+M&E의 ACH는  $0.24 \pm 0.04 h^{-1}$ , 건축, 설비, 기타 외피 부문 기밀개선을 수행한 Case A+M&E+M의 ACH는  $0.18 \pm 0.02 h^{-1}$ 로 측정되었다. 기밀 개선을 하기 전인 Case Baseline에서 건축, 설비, 기타 외피 부문 기밀개선을 수행한 Case A+M&E+M의 측정값을 비교하였을 때 ACH 기준 약 51% 절감이 가능했다. 이는 Blower door test로 측정된  $ACH_{50}$ 의 기밀성능 개선 시 감소율과 유사했다. 두 방법 모두 Case Baseline에서 Case A+M&E+M으로 주요 누기 부위의 기밀 개선을 했을 때, 유사한 감소 추세를 보였으며, 단계적 기밀개선 효과가 방법에 측정 방법에 무관하게 일관됨을 확인했다.

### 3.3. ELA (Effective Leakage Area) 측정결과

ELA (Effective Leakage Area)는 자연상태에서 공기가 누기되는 유효 면적을 나타내는 지표로, 외피를 통해 실제로 발생하는 누기 규모를 정량적으로 파악할 수 있다. 자연상태의 압력차는 일반적으로 약 4Pa로 간주되며, 이에 따라 ELA 산정에도 동일한 기준이 사용된다[17].

Fig. 7.은 각 Case별 ELA를 측정한 그래프이다. 개선을 진행하지 않은 Case Baseline의 ELA는  $1272.0 cm^2$ 이었다. 건축 부문의 기밀

개선을 진행한 Case A의 ELA는  $737.0 cm^2$ , 건축, 설비(기계, 전기) 부문의 기밀개선을 진행한 Case A+M&E의 ELA는  $722.4 cm^2$ 이며, 건축, 설비(기계, 전기), 기타 외피 부문을 개선한 Case A+M&E+M의 ELA는  $601.2 cm^2$ 로 ELA는 Case가 진행될수록 지속적으로 감소하는 경향을 보였다. 특히 Case Baseline 대비 Case A+M&E+M에서는 약 53% 감소하여, 외피 누기 면적이 절반 이하로 줄어든 것으로 확인되었다. 이는 건축, 설비(기계, 전기), 기타 외피 부문 등 주요 누기 위치에서의 누기량이 단계적 기밀개선을 통해 효과적으로 저감되었음을 의미하며, 각 지표의 결과는 Fig. 4.~Fig. 7.에서 제시한 바와 같이 Case별로 일관된 개선 경향을 보였다.

### 3.4. Blower Door Test와 Tracer Gas Method 비교

Blower door test로 측정된 건물의 기밀성능은 압력차이를 인위적으로 설정한 조건에서 측정된 결과이다. 자연상태에서 나타나는 실제 공기교환률이 다를 수 있기 때문에 두 조건 간 비교가 필요하다. 하지만 Blower door test는 50Pa의 인위적인 압력차에서 공기교환률을 측정되므로, 실제 자연상태에서 Tracer gas method로 측정된 공기교환률과 직접 비교하기 어렵다. 이에 여러 기존 연구들은 Blower door test로 측정된  $ACH_{50}$ 값에 20을 나누어 자연상태에서의 공기교환률을 추정하는 방식을 사용하며[21,22], Tracer gas method로 측정된 값과 단순 비교를 통해 두 측정방법 간의 상대적인 차이와 과대평가 가능성을 검토해 왔다. 따라서 본 연구에서도 두 방법의 결과를 비교하여 두 측정방법 간의 상대적인 차이 확인하고자 하였다. Fig. 8.이 Blower door test와 Tracer gas method의 측정값을 비교한 그래프이다.

기밀개선을 진행하지 않은 Case Baseline에서 Blower Door Test로 측정된 공기교환률은  $1.30 h^{-1}$ , Tracer Gas Method로 측정된 공기교환률은  $0.38 h^{-1}$ 이며, 이때 두 방법 간 공기교환률 차이는  $0.92 h^{-1}$ 로 나타났다. 모든 부문에 대한 기밀개선을 적용한 Case A+M&E+M에서는 Blower Door Test가  $0.70 h^{-1}$ , Tracer Gas Method가  $0.18 h^{-1}$ 로 측정되어 두 방법 간 차이가  $0.52 h^{-1}$ 로 감소하였지만, Blower Door Test로 측정된  $ACH_{50}$ 를 20으로 나누어 자연상태 공기교환률을 추정할 경우, Tracer Gas Method로 측정된 값에 비해 과대평가될 수 있음을 시사한다. 본 연구에서 Baseline과 Case A+M&E+M에서 Blower Door 기반 ACH를 Tracer Gas 결과에 가깝게 환산하기 위해 역산한 변환계수는 20보다 높은 범위에서 형성되었고, 본 연구의 실험 조건에서는 Blower Door Test  $ACH_{50}$ 를 Tracer Gas ACH와 유사한 수준으로 비교하기 위해 적용한 환산계수가 Baseline에서는 약 68.2, Case A+M&E+M에서는 약 76.5 수준일 때 가장 근접하였다.

## 4. 결론

본 연구에서는 실제 대학 강의실의 누기 부위를 건축, 설비(기계, 전기), 기타 외피 부문으로 구분하고 단계적으로 기밀개선을 수행하였을 때, 기밀성능의 변화를 Blower door test와 Tracer gas method으로 분석하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 대학교 강의실의 개선 전 기밀 성능은 ACH<sub>50</sub> 기준 25.9h<sup>-1</sup>로 매우 낮은 수준으로 측정되었다. 건축, 설비(기계, 전기), 기타 외피 부분으로 구분한 각 주요 누기 부위의 기밀 개선을 통해 CaseA+M&E+M에서 ACH<sub>50</sub> 기준 14.0h<sup>-1</sup>로 측정되어, 개선 전보다 약 46% 감소하여 기밀성능이 크게 향상됨을 확인하였다.
- 2) Tracer gas method로 측정한 자연상태에서의 ACH 또한 동일한 감소 추세를 보였다. 개선 전 ACH는 0.34h<sup>-1</sup>이었으며, 건축, 설비(기계, 전기), 기타 외피 부분을 개선한 Case A+M&E+M에서 0.18h<sup>-1</sup>으로 측정되어, 약 51% 감소하였다. 두 측정방법 모두 기밀개선에 따른 성능 개선 경향이 일치한다는 점을 확인할 수 있었다.
- 3) 누기 면적을 나타내는 ELA 역시 동일한 감소 추세를 보였으며, 최종 Case에서 약 53% 감소하여 누기 규모가 절반 이하로 줄어들었으며, 이는 ACH 감소와 동일한 경향을 보여 기밀개선 효과가 실제 누기 면적에서도 일관되게 나타났음을 확인하였다.
- 4) 부문별 기밀성능 개선 효과는 각 부위의 상대적 기여도를 명확히 보여주며, 이는 향후 학교시설 그린리모델링에서 기밀 보강의 우선순위를 판단하는 데 도움이 될 수 있다. 본 연구에서 건축 부문 개선은 8.58h<sup>-1</sup>, 기타 외피 부문은 2.34h<sup>-1</sup>, 설비 부문은 0.98h<sup>-1</sup>의 감소를 나타내어, 전체 기밀성능 향상 기여도는 건축(72.1%), 기타 외피(19.7%), 설비(기계, 전기)(8.2%) 순으로 확인되었다. 이는 실제 학교 건물에서 창호·문·접합부 등 외피를 통한 누기가 전체 누기량의 대부분을 차지한다는 점을 보여주며, 향후 기밀성능 개선을 위한 그린리모델링 시 건축 외피 부분을 최우선적으로 보강해야 함을 시사한다.
- 5) Blower door test와 Tracer gas method 비교 결과, 두 방법은 기밀 개선에 따른 감소 추세를 일관되게 나타냈으나, Blower door test로 측정한 ACH<sub>50</sub> 값을 20으로 환산한 값이 Tracer Gas Method로 측정한 ACH보다 일관되게 큰 값을 보였다. 이를 통해 선행연구들과 마찬가지로 Blower door test의 압력차를 이용한 측정방식으로 공기교환율을 추정하는 경우 과대평가가 될 수 있는 가능성이 있음을 확인하였다[15]. 또한 기존 연구에서는 통상적으로 20을 ACH<sub>50</sub>을 환산계수로 활용해 왔으나, 본 연구에서는 68.2~76.5 범위의 계수가 Tracer gas 측정값에 가장 유사한 결과를 보였다. 이는 20 계수 적용이 보수적 참고값으로 사용 가능하더라도, 실제 교육시설에서 건물 특성과 운전 조건에 따라 더 높은 교정계수가 형성될 수 있음을 시사한다. 따라서 ACH<sub>50</sub>을 ACH로 환산하여 추세를 비교하는 것은 유용하지만, 실제 공기교환율과 비교했을 때 과대평가 될 수 있는 가능성이 있으므로, 기밀성능 평가 시 이 점을 고려할 필요가 있다.

본 연구는 대학 강의실을 대상으로 주요 누기 부위를 건축, 설비, 기타 외피 부분으로 구분하여 단계적으로 기밀개선을 수행하고, 이에 따른 기밀성능 변화를 검증하였다. 그 결과 ACH<sub>50</sub>, ACH, ELA 모두에서 개선 단계에 따라 일관된 성능 향상이 확인되었으며, 특히 건축 외피 부분의 보강이 전체 개선 효과의 대부분을 차지함을 확인하였다. 또한 Blower door test와 Tracer gas method 비교를 통해

압력 기반 측정이 자연상태 공기교환율을 다소 과대평가할 가능성을 확인하였고, 기밀성능 평가 시 고려해야함을 제시하였다. 이러한 연구 결과는 학교의 그린리모델링에서 기밀 보강의 우선순위 설정에 참고자료로 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

## Acknowledgement

본 연구는 2025학년도 대전대학교 학술연구비 지원으로 이루어졌습니다.

## References

- [1] 온실가스종합정보센터(GIR), 지속가능한 녹색사회 실현을 위한 대한민국 2050 탄소중립 전략, <https://www.gir.go.kr/home/board/read.do?menuId=10&boardMasterId=3&boardId=1067>, 2021.01.27. // (Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea (GIR), 2050 Carbon neutral strategy of the republic of Korea: Towards a sustainable and green society, <https://www.gir.go.kr/home/board/read.do?menuId=10&boardMasterId=3&boardId=1067>, 2021.01.27.)
- [2] 통계청, 2024년 생활시간조사 결과, [https://kostat.go.kr/board.es?mid=a10301060400&bid=220&act=view&list\\_no=437764](https://kostat.go.kr/board.es?mid=a10301060400&bid=220&act=view&list_no=437764), 2025.07.28. // (Statistics Korea, 2024 Time use survey report, [https://kostat.go.kr/board.es?mid=a10301060400&bid=220&act=view&list\\_no=437764](https://kostat.go.kr/board.es?mid=a10301060400&bid=220&act=view&list_no=437764), 2025.07.28.)
- [3] 국가에너지통계종합정보시스템(KESIS), 2023년 에너지총조사보고서, <https://kesis.keei.re.kr/board.es?mid=a10201040100&bid=0004>, 2025.03.13. // (Korea Energy Statistics Information System, 2023 Energy consumption survey report, <https://kesis.keei.re.kr/board.es?mid=a10201040100&bid=0004>, 2025.03.13.)
- [4] M. Orme, Estimates of the energy impact of ventilation and associated financial expenditures, *Energy and Buildings*, 33(3), 2001, pp.199–205.
- [5] S. Yang et al., Passive PM2.5 control plan of educational buildings by using airtight improvement technologies in South Korea, *Journal of Hazardous Materials*, 423(Part A), 2022, 126990.
- [6] Y.S. Eom et al., Evaluation of outdoor particle infiltration into classrooms considering air leakage and other building characteristics in Korean schools, *Sustainability*, 13(13), 2021, 7382.
- [7] J. Fernández-Agüera et al., CO2 concentration and occupants' symptoms in naturally ventilated schools in Mediterranean climate, *Buildings*, 9(9), 2019, 197.
- [8] T. Colinart, M. Bendouma, P. Glouanec, Building renovation with prefabricated ventilated façade element: A case study, *Energy and Buildings*, 186, 2019, pp.221-229.
- [9] H.H. Jo et al, Particulate matter in school buildings: Influence of influx control of outdoor PM particles and building renovation in summer, *Environmental Pollution*, 329, 2023, 121582.
- [10] B. Han et al., Field tests of indoor air cleaners for removal of PM2.5 and PM10 in elementary school classrooms in Seoul, Korea, *Aerosol and Air Quality Research*, 22, 2022, 210383.
- [11] H. Na et al., Optimizing indoor air quality and noise levels in old school classrooms with air purifiers and HRV: A CONTAM simulation study, *Journal of Building Engineering*, 73, 2023, 106645.
- [12] A. Martín-Garín et al., Airtightness analysis of the built heritage—field measurements of nineteenth century buildings through blower door tests, *Energies*, 13(24), 2020, 6727.
- [13] T. Sekki, M. Airaksinen, A. Saari, Impact of building usage and occupancy on energy consumption in Finnish daycare and school buildings, *Energy and Buildings*, 105, 2015, pp.247-257.
- [14] S. Bae et al, Improvement in the applicability of the air tightness measurement using a sudden expansion of compressed air, *Building and Environment*, 61, 2013, pp.133-139.
- [15] G. Hong, D.D. Kim, Airtightness of electrical, mechanical and architectural components in South Korean apartment buildings using the fan pressurization and tracer gas method, *Building and Environment*, 132, 2018, pp.21-29.
- [16] 권오현 외 4인, Blower Door를 이용한 국내 주거용 건물의 기밀도

- 실측 사례 분석, 대한건축학회 논문집 - 계획계, 제26권 제7호, 2010, pp.303-310. // (O.H. Kwon et al, Case analysis of field measurements of airtightness in Korean residential buildings using a blower door, Journal of the Architectural Institute of Korea (Planning & Design), 26(7), 2010, pp.303-310.)
- [17] ASTM International, ASTM E779-10: Standard test method for determining air leakage rate by fan pressurization, West Conshohocken: ASTM International, 2010.
- [18] International Organization for Standardization, ISO 9972:2015, Thermal performance of buildings – Determination of air permeability of buildings – Fan pressurization method, 2015.
- [19] G. Remion, B. Moujalled, M. El Mankibi, Review of tracer gas-based methods for the characterization of natural ventilation performance: Comparative analysis of their accuracy, Building and Environment, 160, 2019, 106180.
- [20] 국가기술표준원, KS I ISO 16000-1: 실내공기 – 제1부: 일반사항 및 시료채취전략, 2024. // (Korean Agency for Technology and Standards (KATS), KS I ISO 16000-1: Indoor air – Part 1: General aspects and sampling strategy, 2024.)
- [21] G. Hong, B.S. Kim, Field measurements of infiltration rate in high rise residential buildings using the constant concentration method, Building and Environment, 97, 2016, pp.48-54.
- [22] F.R. d'Ambrosio Alfano et al, Experimental analysis of air tightness in Mediterranean buildings using the fan pressurization method, Building and Environment, 53, 2012, pp.16-25.