



## 모듈러 초등학교 건물의 침기 성능 분석

### Experimental Analysis of Airtightness Performance in Modular Elementary School Buildings

김혜진\* · 이종성\*\* · 김대웅\*\*\*

Hyejin Kim\* · Jongsung Lee\*\* · Daeung Kim\*\*\*

\* Main author, Master' Course Student, Dept. of Architectural Engineering, Cheongju Univ., South Korea (khj0407@cju.ac.kr)

\*\* Coauthor, President, R&D Center, Jinwoo INC, Cheongju, South Korea (jwkc0996@daum.net)

\*\*\* Corresponding author, Assistant Professor, Dept. of Architectural Engineering, Cheongju Univ., South Korea (dkim@cju.ac.kr)

#### ABSTRACT

**Purpose:** This study analyzed the airtightness of modular elementary school buildings in South Korea. Modular buildings are typically constructed on-site using various prefabricated modules (walls, floors, roof, and structural frames). In South Korea, these buildings are frequently used temporarily during school remodeling or expansion, and more recently, they are being adopted as permanent facilities due to population shifts. However, air infiltration through joints between modules has been a recurring issue, leading to poor indoor air quality and increased heating/cooling energy consumption. Thus, it was important to accurately determine the infiltration rates through these gaps. **Method:** In this study, air infiltration rates were measured using standardized blower door tests in two modular elementary school buildings located in South Korea. The test procedure followed recommended guidelines for pressurization and depressurization, and the results were expressed as air changes per hour at 50 Pa (ACH50). **Results:** The measured infiltration rates ranged from approximately 5 to 31 ACH50 in the two modular elementary school buildings. Notably, the highest infiltration was consistently observed through the gaps of entrance doors, indicating that door assemblies represented the weakest point in modular classroom airtightness.

#### KEYWORD

모듈러 건물  
기밀 성능  
초등학교  
블로어 도어 실험

Modular Building  
Airtightness Performance  
Elementary School  
Blower Door Test

#### ACCEPTANCE INFO

Received Oct. 2, 2025  
Final revision received Oct. 10, 2025  
Accepted Oct. 16, 2025

© 2025. KIEAE all rights reserved.

## 1. 서론

### 1.1. 연구의 배경 및 목적

2000년대 초반에 소개된 모듈러 공법은 최근 건설 사업 변화의 핵심 이슈 중의 하나로 대두되고 있으며, 저탄소 및 제로 에너지 건물 정책과 더불어 모듈러 공법을 확대 사용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 일반적으로 모듈러 공법은 현장에서 모듈을 조립하기 때문에, 기존의 습식 공법에 비해 높은 생산성과 짧은 공사 기간 등의 장점이 있다. 그러나 모듈러 조립 시 기술의 숙련도 및 현장에서 발생할 수 있는 변수로 인해, 품질 저하 등의 문제점이 발생할 수 있다. 이를 효과적으로 대응하기 위해, 완성도가 높은 박스형 철골 조 모듈 사용 및 현장에서의 더욱 단축한 공정 방식을 적용하고 있다. 모듈러 공법은 학교 기반 시설로 처음으로 적용이 되었고, 현재 기숙사 및 군 시설, 상업용 건물 등 다양한 유형으로 사용이 확장되고 있다. 또 하나의 모듈러 방식의 특징으로는 사용 후, 재사용이 가능하여 친환경적으로 자원을 재활용할 수 있으며, 폐기물 및 이산화탄소 저감에도 기여할 수 있다. 또한, 현재는 기술의 발전으로 영구적으로 사용할 수도 있다.

이러한 모듈러 건물은 오래된 학교 건물의 증축 및 리모델링 기간 중에 학생과 교사의 쾌적한 생활을 목적으로 한 임시 모듈러 학교 건

물로 많이 사용되고 있다. 최근에는 영구적으로 사용하는 시설에도 모듈러 공법이 많이 적용되고 있는데, 특히, 인구 편차가 큰 지역의 영구적인 모듈러 건물의 사용이 증가하고 있다. 이는, 인구가 급격히 증가한 지역에서 학생 수용을 목적으로 하여 본래의 학교 건물 주변에 모듈러 학교 건물을 신축한 경우가 있다.

모듈러 건축 공법은 모듈의 공장 제작 후 현장 조립이라는 특성상 모듈러 건물에서 거주 시, 성능 및 실내 환경에 대한 문제점들이 지적되고 있다. 하지만, 대부분의 연구는 시공성 및 구조적 안정성, 경제성, 발주 시스템 확장 등에 초점을 맞추고 있으며, 거주 성능에 대한 환경적인 연구가 부족한 실정이다. 또한, 장기간의 이용을 목적으로 하여, 반영구적으로 사용되는 '정주형 및 이동가능정주형 모듈러 건물'과 단기간 이용을 목적으로 하여, 임시 사용 후, 재활용되는 '이동형 모듈러 건물'은 시공법이 상이하여, 환경 성능에도 차이가 있을 것이라고 예상된다.

따라서 본 연구는 모듈러 공법을 이용한 건축물의 환경 성능 개선을 위한 기초 연구로서, 국내에 위치한 이동형 모듈러 건물과 이동가능정주형 모듈러 건물의 환경 성능 비교·분석 및 환경 성능을 개선하기 위한 건축적 요소를 도출하는 것을 목적으로 하고 있다. 환경 성능을 정의하는 여러 요소 중, 실내 공기질 및 냉·난방에너지 증가에 큰 영향을 미치는 기밀성능에 초점을 맞추어 연구를 진행하였다. 모듈러 건축물의 기밀성능에 영향을 미칠만한 외피의 접합부위 및 설비시스템의 연결부위 등을 선정하여 블로어 도어를 이용한 가압/감

압법을 활용하여 측정하였다. 또한, 기밀성능 측정 결과는 국내 학회지인 KIAEBS와 미국의 학회지인 ASHRAE에서 제공하는 건축물의 기밀성능 기준을 사용하여 분석하였다.

### 1.2. 연구의 방법

본 연구에서는 모듈러 건물의 기밀성능을 분석하기 위해 블로어 도어(Blower door)를 이용한 가압 (Pressurization) 및 감압 (Depressurization)법을 활용하여 측정하였다. 측정 대상은 충북 및 인천에 위치하고 있는 모듈러 초등학교 건물의 각 한 개의 교실로 선정하였다. 충북에 위치한 A 초등학교는 본 건물의 증축을 위하여 임시적으로 약 1년 6개월 동안 사용하기 위해 지어진 이동형 모듈러 건물이며, 인천에 위치한 B 초등학교의 경우, 급증하는 학생을 수용하기 위해 약 5년간의 사용을 위한 이동가능정주형 모듈러 건물이다. 이 두 형태의 모듈러 건물은 일정 기간 거주 후에 재사용을 목적으로 하는 모듈러 건물이기 때문에 구조 형식은 프레임식으로 동일하며, 이에 따라, 외벽 및 바닥의 구성 방식은 동일하다. 다만, 단기간 사용을 하는 이동형 모듈러 건물인 A 초등학교의 천장재는 재사용 및 차음의 기능을 강화한 재료를 사용하였으며, 이와 반대로 장기간 사용을 하는 B 초등학교의 경우, 일반 건물의 천장재로 사용하는 석고보드가 사용되었다. 따라서, 두 모듈러 학교 건물에서 기밀성능에서 차이가 있을 것이라고 예상이 되어, 누기가 발생할 만한 접합 부위를 마스킹 테이프로 실링한 뒤, 한 부위씩 마스킹 테이프로 제거하며 각 부위의 기밀성능을 측정하였다.

### 1.3. 학교 모듈러 건물의 특성

국내 모듈러 건축은 철강재를 주요 구조 부재로 사용하는 스틸 모듈러 공법이 발달하였다. 공법의 유형으로는 모듈러 유닛을 적층하여, 벽체가 건물의 하중을 지지하는 적층식 또는 내력벽식이 있으며, 각형 강관을 이용한 구조 프레임을 구성하여 건물의 하중을 직접 지지하는 프레임 식이 있다[1]. 따라서, 내력벽식의 모듈러 건축 공법은 이런 특성으로 인하여, 기숙사, 단위 유닛으로 구성되는 주거 건물에 적합하며, 자유로운 공간 및 대공간을 구성할 수 있는 프레임식 모듈러 건축 공법은 학교의 넓은 교실이나 복도로 주로 사용된다. 또한, 재사용 및 이동 가능 여부에 따라서, 정주형, 이동가능정주형 및 이동형으로 구분된다[2]. 모듈러 건축물을 사용하는 주체에 의해 정주 기간이 정해지며, 보통은 일정 기간 사용 후에 재사용 및 재활용의 가능성이 있기에 이동형 및 이동가능정주형으로 간이 기초를 사용하여 주로 운용된다.

### 1.4. 학교 건물의 기밀성능에 대한 고찰

학교의 실내 환경 요소 중에 실내공기질은 학생들의 건강 및 학습에 영향을 미치는 요소로서 COVID-19 이후 건강한 실내공기질을 유지하기 위해 노력해 왔다. 일반적으로 학교 건물은 채광을 위해 상대적으로 큰 개구부가 설치되어 있어, 미세먼지의 유입 가능성이 다른 건물보다 큰 경향이 있다[3]. 또한, 도시형 학교 건물에서는 대지의 협소함과 더불어 외부의 소음에 의해 대부분 외부로 접한 교실 창문과 복도 측 교실 창문은 모두 닫힌 상태로 수업을 하고 있는 실정

이다[4]. 자연환기만으로 실내공기질을 유지했었던 과거와 달리, 현재는 일정하게 교실의 실내공기질을 유지시킬 수 있는 기계적 환기장치를 갖춘 교실이 지어지고 있으며, 법적으로 기계적 환기장치인 전열교환기 환기장치와 시스템 에어컨이 설치되어야 한다.

선행연구에서 학교보건법의 실내공기질 기준에 따라 학교 교실의 미세먼지 및 이산화탄소의 농도를 분석하기 위해, 5곳의 학교 교실에서 블로어 도어 실험 장비를 사용하여 기밀성능을 측정하였다. 그 결과, 복도 측의 창과 출입문에서 큰 누기량이 발생하였고, 건축물의 기밀성능 기준인 5.0 ACH50보다 평균 3.0배 높은 수치를 확인하였다[5]. 다른 선행연구에서도 블로어 도어 장비를 이용하여, 서울의 초등학교 교실에서 기밀성능을 측정하였다. 이 연구에서도 설비 시스템에 비해 창호에서 더 많은 누기량이 발생하였으며[6], 또 다른 선행연구에서도 유사한 결과가 확인되었다[7]. 이 연구에서 기밀성능을 측정한 학교 교실의 평균 환기량은 약 15 ACH50으로, 복도 측 창과 문에서 최대 누기량이 발생하였으며, 그다음으로 외부와 면한 창호, 기계 환기장치의 급배기구 순으로 큰 누기량이 발생하였다. 유사 연구들의 결론을 종합해 보면, 학교 교실의 기밀성능은 KIAEBS의 기준을 크게 초과하는 것으로 나타났다[8].

## 2. 모듈러 초등학교 기밀성능 측정개요

### 2.1. 대상 모듈러 초등학교 기밀성능 측정개요

#### 1) 충북 A 초등학교

충청북도 제천에 위치한 A 초등학교는 2023년 7월에 준공되어 약 1년 6개월 동안 사용된 이동식 모듈러 건물이다. 교실 내 외측 창은 알루미늄으로 구성된 틸트 앤 턴 창이고, 복도 측 창은 알루미늄으로 구성된 단창이며, 출입문의 경우 알루미늄으로 구성된 미닫이 문이었다. 교실 내에는 천장형 EHP와 전열교환기의 급배기구가 설치되어 있었다. 2024년 12월에 1층에 위치한 한 교실을 대상으로 현장 측정을 진행하였다.

#### 2) 인천 B 초등학교

인천 용현동에 위치한 B 초등학교는 2025년 3월에 준공된 2층 규모의 이동가능정주형 모듈러 건물이다. 교실 내 외측 창은 알루미늄으로 구성된 이중창이고, 복도 측 창은 알루미늄으로 구성된 단창이며, 출입문의 경우 알루미늄으로 구성된 미닫이문이었다.

교실 내에는 천장형 EHP와 전열교환기의 급배기구가 설치되어 있었다. 2025년 3월에 2층에 위치한 한 교실을 대상으로 현장 측정을 진행하였다. Table 1.과 Fig. 1.에 측정 대상 교실의 정보와 측정 대상 건물의 전경을 나타내었다.

Table 1. Overview of measurement area

Standard	A elementary school	B elementary school
Ceiling height (m)	2.5	2.5
Floor area (m <sup>2</sup> )	59	111
Volume (m <sup>3</sup> )	147.5	277.5



a) A elementary school building



b) B elementary school building

Fig. 1. Picture of elementary school building

Table 2. Domestic and international airtightness standards

Standard	ASTM E779	CGSB 149.10	EN 13829	ISO 9972/ KS L ISO 9972
Origin	USA	Canada	Europe	International
Pressure range	10~60Pa	15~50Pa	10~50Pa (≤100Pa)	10~50Pa (≤100Pa)
Leakage results	EfLA, CFM50	EqLA	CFM50/ft <sup>2</sup> , ACH	CFM50/ft <sup>2</sup> , ACH, EqLA, ELA
Related standard	Energy Star, IECC, LEED, ASHRAE	R-2000, LEED, Canada, ASHRAE, Vancouver	Passive house, ATTMA L2	International standard

## 2.2. 기밀성능 측정 기준

블로어 도어를 이용한 건물의 기밀성능 측정 기준은 나라마다 차이가 있다. 해외의 경우, 미국의 ASTM E779, 캐나다의 CGSB, 유럽의 EN 13829, ISO 9972 등이 있다. 국내의 경우, ISO 9972를 기반으로 작성된 KS L ISO 9972(단열-건물 기밀성 측정)의 건물의 기밀성능을 측정하는 표준 방법으로 채택되고 있다[9]. KIAEBS는 건축물의 기밀성능 측정 기준으로 ISO 9972 및 KS L ISO 9972를 채택하고 있으며, Table 2.에 각 나라 별 건물 기밀성능을 측정하는 표준 내용을 나타내었다[10].

본 연구에서는 기밀성능의 측정 기준으로 미국에서 기밀 성능 실험 시, 주로 사용되는 ASTM E779 기준을 이용하였다. ASTM E779는 10~60Pa의 압력 범위에 대해 측정을 하며, ASHRAE, LEED,

Table 3. Domestic and international airtightness evaluation standards

Country		Airtightness standard		
		Standard	Pressure difference	Target buildings
Korea	Building airtightness criteria (KIAEBS)	5.0 ACH	50Pa	-
USA	ASHRAE	4.4 ACH	50Pa	Residential (Averages)
		1.4~2.1 ACH		Commercial (Averages)
Japan	Energy conservation standard	3.3~8.3 ACH	50Pa	Each regional
Germany	DIN 4108-7 and EnEV (2008)	3.0 ACH	50Pa	Natural ventilation
		1.5 ACH		Mechanical ventilation
		0.6 ACH		Passive house

Washington State Energy code, IECC 등 다양한 건물 성능 평가에서 기밀성능 실험 방법으로 이용되고 있다. 현장 측정을 진행할 때, 이상적인 기상 조건으로 외부 풍속 0~2m/s, 외부 온도 5~35°C를 제시하고 있으며, 실내의 온도차에 건물의 높이를 곱한 값이 200m·°C 이하인 경우에 시험을 진행하는 것을 권장하고 있다[10].

## 2.3. 국내외 기밀성능 평가 기준 검토

Table 3.에 국내외 기밀성능 평가 기준을 정리하여 나타내었다[11]. 국내 학회지인 KIAEBS에서 제공하는 건축물의 기밀성능 기준에 따르면, 일반 건축물의 경우, 5.0 ACH50, 에너지 절약 건물의 경우, 3.0 ACH50, 제로에너지 건물의 경우, 1.5 ACH50 이하를 만족하도록 권장하고 있다.

국외의 경우, 기밀성능을 평가하는 대표적인 지표로 ASHRAE가 있으며, 단독주택을 주된 대상으로 하여 나타낸다[12]. ASHRAE에 따르면, 0.6 ACH50 이하는 'Super Tight', 1~2 ACH50는 'Tight', 3~10 ACH50는 'Average', 14~20 ACH50는 'Loose', 27 ACH50 이상은 'Very Loose'로 평가하고 있다.

## 2.4. 모듈러 초등학교 기밀성능 측정 방법

### 1) 블로어 도어를 이용한 기밀성능 측정 방법

두 초등학교 교실의 기밀성능은 Retrotec사의 6100-High Flow Blower Door System을 이용하여 현장 측정을 진행하였다. Fig. 2.에 각 측정 대상 교실의 평면도를 나타내었으며, Fig. 3.과 같이 각 교실의 출입문에 블로어 도어 장비를 설치하였다. Fig. 4.에는 Retrotec사의 FanTestic 프로그램을 통한 블로어 도어 측정 결과를 나타내었다.

블로어 도어 현장 측정을 진행하기 전에 실내외 온도를 측정한 결과, A 초등학교 현장 측정 당시 실외 온도가 약 13°C, 실내 온도가 약

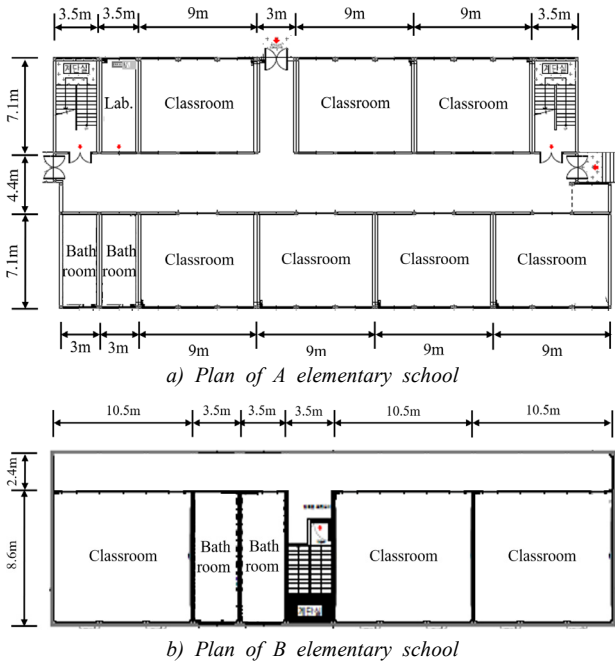


Fig. 2. Plans of two modular elementary school buildings



Fig. 3. The Installation of The Bower Door Equipment

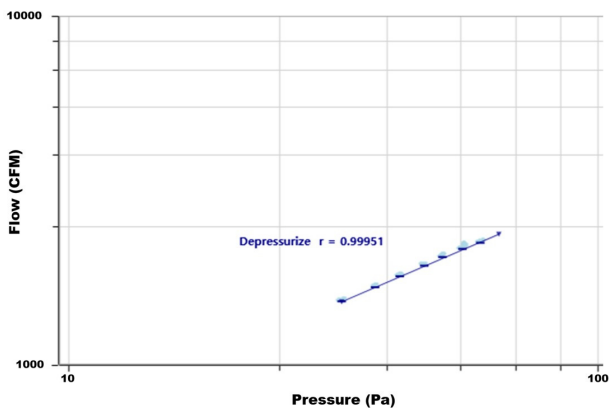


Fig. 4. The blower door test result graph

15°C, B 초등학교 현장 측정 당시 실외 온도가 약 5°C, 실내 온도가 약 7°C로 외부 온도가 5~35°C 범위에 있는 것을 확인하였으며, 외부

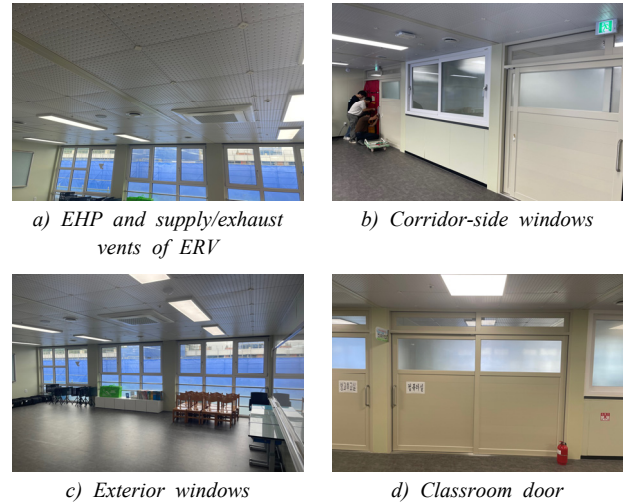


Fig. 5. Expected air infiltration weak points of a modular elementary school



Fig. 6. Expected air infiltration weak points of b modular elementary school

풍속이 2m/s 이하인 것을 확인하였다. 또한 측정 당시 실내외 온도 차에 건물의 높이를 곱한 값이 200m·°C 미만인 것을 확인하였다.

## 2) 예상 침기 취약 부위 선정

모듈러 초등학교 교실 내에서 침기가 발생하는 부위와 각 부위 별 침기량을 분석하기 위하여 Fig. 5., Fig. 6.과 같이 예상 침기 취약 부위를 선정하였다. 기밀성능 실험을 진행한 선행연구를 바탕으로 주로 침기가 발생하는 부위를 선정하였으며, 예상 침기 취약 부위로 EHP와 전열교환기의 급·배기구, 복도 측 창문, 외측 창문, 교실 출입문을 선정하였다.

예상 침기 취약 부위를 선정한 뒤에, 각 예상 침기 취약 부위 별 침기량을 분석하기 위하여, 예상 침기 취약 부위를 마스킹 테이프로 실링 처리를 하였다. 그 후, 예상 침기 취약 부위를 실링한 마스킹 테이프를 한 곳씩 제거해 가면서 블로어 도어 실험을 진행하였다. 마스킹 테이프 실링 제거는 침기가 예상되는 틈새 부위의 길이가 짧은 순으로 진행하였으며, Table 4.에 각 Case에 대해 나타내었다.

Table 4. Blower door test case configuration

Elementary school	Case	EHP and supply/exhaust vent of ERV	Corridor-side windows	Exterior windows	Entrance doors
A	1	O	O	O	O
	2	X	O	O	O
	3	X	X	O	O
	4	X	X	X	O
	5	X	X	X	X
B	6	O	O	O	O
	7	X	O	O	O
	8	X	X	O	O
	9	X	X	X	O
	10	X	X	X	X

X: unsealed, O: sealed

### 2.5. 기밀성능 평가 방법

블로어 도어를 활용한 기밀성능 측정 방법은 창 및 출입문 등의 개구부에 팬을 설치하여 실내외 압력차를 인위적으로 발생시켜 일정 압력차에 도달하였을 경우의 팬의 풍량을 측정하는 방법으로 압력차와 누기량의 상관관계로 Eq. 1에 의해 정의된다[5].

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

여기서, Q는 누기량이며, ΔP는 압력차로 4Pa 및 50Pa가 일반적으로 사용된다. n은 압력 지수로 0.5 < n < 1.0 사이 값을 가지면 실험의 결과가 정확한 것으로 판단되며, 이 이외의 값을 보이면, 실험을 재 실시 하여야 한다. 앞서 언급했듯이, 목적이 다른 두 개의 모듈러 건물의 기밀성능을 비교 분석하기 위해서, 50Pa에서의 공기교환율을 비교하였다. 따라서, 시간당 50Pa에서의 공기교환율(Air Change Rate per Hour, ACH50)의 개념을 이용하였다.

## 3. 모듈러 초등학교 기밀성능 측정 결과 및 분석

### 3.1. 기밀성능 측정 결과

블로어 도어를 이용한 모듈러 초등학교 기밀성능 측정결과를 Table 5에 나타내었다. 각 Case를 10Pa에서 60Pa로 가압을 하는 가압법으로 2회씩 측정하고, 60Pa에서 10Pa로 감압을 하는 감압법으로 2회씩 측정한 후, 총 4개의 ACH50 결과값의 평균값을 계산하여 나타내었다.

또한, 블로어도어 실험의 정확도를 나타내는 r값과 침기 부위의 틈새바람 특성을 나타내는 압력차 지수 n값을 함께 나타내었다. 누기가 발생하는 면적을 나타내는 지표이며, 기밀성능 진단에 중요한 값인 압력차 지수 n값은 보통 0.6~0.8 사이의 값을 갖게 된다[7]. n값이 0.5에 가까우면 틈새의 흐름이 적은 층류의 형태이며, 1.0에 가까우면 틈새가 크게 열려있는 난류의 형태이다[9]. ASHRAE에서는 값이 0.5~1.0을 벗어나면 비정상적인 측정 결과로 재측정을 권고하고 있다[13]. 측정결과, 정확도를 나타내는 r값은 모든 Case에

Table 5. Blower door test results

Elementary school	Case	r	n	ACH50
A	1	0.99	0.652	13.32
	2	0.99	0.624	15.38
	3	0.99	0.653	15.38
	4	0.99	0.647	15.39
	5	0.99	0.646	21.79
B	6	0.99	0.652	5.84
	7	0.99	0.632	6.29
	8	0.99	0.674	7.48
	9	0.99	0.691	8.04
	10	0.99	0.639	9.76

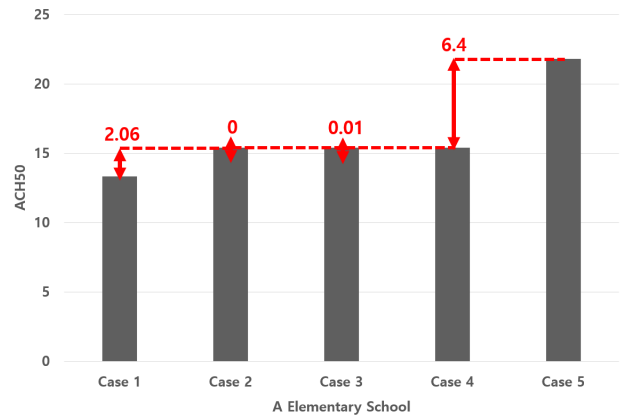


Fig. 7. Airtightness measurement results in A elementary school

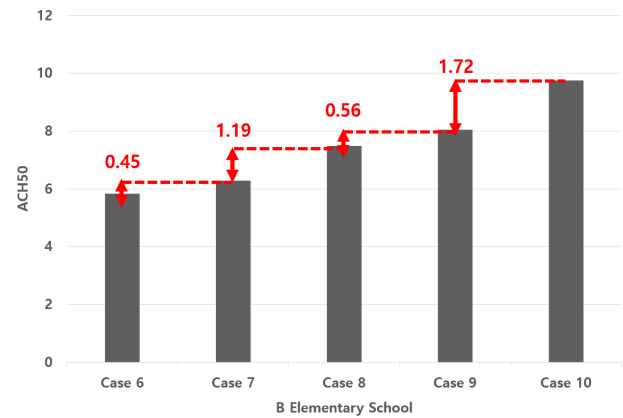


Fig. 8. Airtightness measurement results in B elementary school

서 0.99값을 나타내었으며, 압력차 지수 n값은 0.5~1.0을 벗어나지 않은 것을 확인하였다.

### 3.2. 예상 침기 취약 부위 별 침기량 분석

두 모듈러 초등학교 건물의 각 Case 별 블로어 도어 기밀성능 결과값의 차이를 통해서 예상 침기 취약 부위 별 침기량을 분석하였다.

#### 1) 충북 A 초등학교

Fig. 7.은 A 초등학교의 Case 별 기밀성능 측정 결과를 나타내고 있다. Case 1과 Case 2의 결과값의 차이를 통해 'EHP와 전열교환기

의 급·배기구'에서의 침기량을, Case 2와 Case 3의 결과값의 차이를 통해 '복도 측 창문'에서의 침기량을, Case 3과 Case 4의 결과값의 차이를 통해 '외측 창문'에서의 침기량을, 마지막으로 Case 4와 Case 5의 결과값의 차이를 통해 '교실 출입문'에서의 침기량을 파악하였다.

그 결과, EHP와 전열교환기의 급·배기구에서 ACH50값이 약 2 회 정도 증가하였으며, 복도 측 창문과 외측 창문은 기밀성능에 별다른 영향을 미치지 못한 것으로 나타났으며, 교실 출입문에 의해 약 6 회의 ACH50값의 증가가 측정되었다. 따라서, 교실 출입문에 의해 기밀성능이 가장 크게 영향을 받았으며, 상당량의 누기량이 발생하는 것으로 나타났다.

## 2) 인천 B 초등학교

이동가능정주형 모듈러 초등학교 건물의 기밀성능 측정 결과는 Fig. 8.에 나타내었다. Case 6과 Case 7의 결과값의 차이를 통해 'EHP와 전열교환기의 급·배기구', Case 7과 Case 8의 측정값 차이는 '복도 측 창문', Case 8과 Case 9의 측정값 차이는 '외측 창문', 마지막으로 Case 9와 Case 10의 차이는 '교실 출입문'에 의한 기밀성능을 알 수있다. 그 결과, EHP와 전열교환기의 급·배기구에서 ACH50값이 약 0.5, 복도 측 창문에서 약 1.2 증가하였다. 또한, 외측 창문에 의해, 앞서 두 개의 Case를 합한 ACH50값 보다 약 0.6 증가하였으며, 교실 출입문에서 가장 큰 1.7 ACH50값이 측정되었다.

## 3.3. 소결

이동식 모듈러 초등학교 건물인 충북 A 초등학교의 자연상태 침기량 결과값은 21.79 ACH50이며, 예상 침기 취약 부위 별 침기량 분석 결과, '교실 출입문'에서 가장 많은 침기가 발생하였고, 그다음으로 'EHP와 전열교환기의 급·배기구'에서 많은 침기가 발생하였으며, '복도 측 창문'과 '외측 창문'에서는 침기가 거의 발생하지 않았다. 이동가능정주형 모듈러 초등학교 건물인 인천 B 초등학교의 자연상태 침기량 결과값은 9.76 ACH50이며, 예상 침기 취약 부위 별 침기량 분석 결과, '교실 출입문', '복도 측 창문', '교실 출입문', 'EHP와 전열교환기의 급·배기구' 순으로 침기가 많이 발생했다.

복도 측 창문과 외측 창문이 다른 제품으로 시공된 인천 B 초등학교와 달리, A 초등학교는 복도 측 창문과 외측 창문이 동일한 제품으로 시공되어, 두 창문에서의 침기량 결과값이 유사하게 나온 것을 확인하였다.

블로어 도어 기밀성능 실험 결과에 따라 침기가 발생한 예상 침기 취약 부위에서의 기밀 보강이 필요한 것으로 사료되며, 특히, 모든 Case 중에서 가장 많은 침기가 발생한 충북 A 학교의 '교실 출입문'에서의 기밀 보강이 가장 많이 필요하다고 판단하였다.

블로어 도어 측정 결과, A 초등학교 결과값에서 마스킹 테이프를 전혀 실링 처리를 하지 않은 자연상태인 Case 5의 경우, KIAEBS 일반 건물 기준에 비해 큰 값을 나타내었으며, ASHRAE 기준과 비교하였을 때, 'Loose'에 해당하였다. 또한, B 초등학교 결과값에서 마스킹 테이프를 전혀 실링 처리를 하지않은 자연상태인 Case 10의 경우, 9.76 ACH50으로 KIAEBS 일반 건물 기준과 비교하였을 때, 약 1.9배 정도 큰 값을 나타내었으며, ASHRAE 기준과 비교하였을 때,



Fig. 9. Ceiling materials of B elementary school

'Average'에 해당하였다.

단기간 사용하는 이동식 모듈러 건물인 A 초등학교와 장기간 사용하는 이동가능정주형 모듈러 건물인 B 초등학교의 기밀성능 측정 결과를 비교했을 때, 천장재를 식고보드로 마감한 B 초등학교가 천장재를 흡음 판넬로 마감한 A 초등학교보다 ACH50 결과값을 기준으로 2배 이상 기밀한 것을 확인하였다. 이동식 모듈러 건물은 단기간의 재사용을 목표로 하기 때문에, 이동가능정주형 모듈러 건물에 비해 재사용 및 운반이 용이한 재료를 사용한다. 이동식 모듈러 건물인 충북 A 초등학교의 천장재는 Fig. 9.와 같이 흡음 판넬 조립 구조로 있었으며, 기밀성능 현장 측정하는 동안, 천장 부근에서 공기의 흐름이 감지되었다. 이는, 천장 부분에서의 기밀성능이 교실 안에서의 여러 부분 중, 가장 낮은 것으로 판단하였다.

## 4. 결론

본 연구는 모듈러 공법을 이용한 건축물에서 환경 성능을 개선하기 위한 연구이며, 특히, 실내공기질과 냉·난방에너지 소비량에 크게 영향을 미치는 기밀성능에 초점을 맞추어 블로어 도어를 활용한 가압/감압법을 사용하여 측정하였다. 또한, 측정결과는 KIAEBS와 ASHRAE의 건축물의 기밀성능 기준에 따라 분석하였다. 측정대상으로는 모듈러 유닛의 재사용에 초점을 맞춘 이동식 및 이동가능정주형의 두 개의 모듈러 학교 건물을 선정하였다. 이 두 개의 모듈러 건물의 침기 취약 부위인 접합부위를 선정하여 기밀성능을 측정 및 분석을 실시하였다. 본 연구의 주요 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 이동가능 정주형 모듈러 초등학교는 장기간 재실자가 실내에서 쾌적하게 생활할 수 있도록 이동식 모듈러 초등학교의 디자인을 향상시킨 모듈러 건물이다. 두 모듈러 초등학교의 기밀성능을 측정한 결과, 이동식 모듈러 초등학교 건물의 기밀성능은 약 21 ACH50이었으며, 이동가능정주형 모듈러 초등학교 건물의 기밀성능은 약 9.8 ACH50으로 기존의 이동식 모듈러 건물에 비해 약 2배 이상 기밀성능이 향상된 것을 확인하였다.
- 2) 국내 학교 교실의 기밀성능을 평가한 선행연구에 따르면, 한 연구에서는 12개 학교 교실의 블로어 도어 실험 결과, 6.5~24.4 ACH50 범위로 평균 15.5 ACH50이 나왔다[7]. 다

른 선행연구에서는 6개의 학교 교실의 블로어 도어 실험 결과, 10.7~24.0 ACH50 범위로 평균 14.9 ACH50이 나왔다[14]. 선행연구와 비교하였을 때, 본 연구에서 기밀성능을 측정할 모듈러 학교 교실이 국내에 습식 공법으로 시공된 일반 학교의 기밀성능에 크게 벗어나지 않는 것을 확인하였다.

- 3) 이동식 모듈러 건물의 경우, 장기간 이용을 목적으로 한 이동 가능정주형 모듈러 건물과 달리, 단기간 이용 후, 재활용을 위해 분해 및 이동된다는 특성 때문에, 이동의 편리함과 재활용을 위한 목적으로 제작된다. 따라서, 이동식 모듈러 초등학교의 천장재가 흡음 판넬로 마감되어, 천장 부근에서 기밀성능이 낮은 것으로 판단되며, 이를 석고보드로 대체한 이동가능정주형 모듈러 초등학교에서 기밀성능이 향상된 것을 확인하였다. 이를 바탕으로 향후 이동식 모듈러 건물의 수요가 늘어남에 따라, 다른 천장재 및 마감 방식에 따른 기밀성능 분석이 필요한 것으로 사료된다.
- 4) 이동식 모듈러 초등학교 건물에서 예상 침기 취약 부위에서의 침기량은 교실 출입문(6.4 ACH50) > EHP와 전열교환기의 급배기구(2.1 ACH50) > 외측 창문=복도 측 창문(0 ACH50) 순으로 나타났다. 이동가능정주형 모듈러 초등학교 건물에서 예상 침기 취약 부위에서의 침기량은 교실 출입문(1.7 ACH50) > 복도 측 창문(1.2 ACH50) > 교실 출입문(0.6 ACH50) > EHP와 전열교환기의 급배기구(0.5 ACH50) 순으로 나타났다.
- 5) 예상 침기 취약 부위 별 침기량 결과값을 통해, 환경 성능 개선을 위하여 각 부위 별 기밀 보강 작업이 필요하다고 판단되며, 특히 두 모듈러 건물에서 공통적으로 교실 출입문에서 침기가 가장 많이 발생하여, 교실 출입문에 대한 기밀 보강이 필요한 것으로 사료된다.

본 연구는 두 개의 모듈러 학교 건물을 대상으로 측정하여 연구 대상의 폭이 제한적이었으며, 측정 방법은 유사하나, 두 개의 모듈러 건물의 건축적, 시공 방식의 차이를 충분히 반영하지 못했다는 한계점이 있다. 본 연구는 모듈러 학교 건축물의 기밀성능을 측정 및 분석함으로써, 향후 모듈러 학교 건축물의 환경을 개선할 수 있는 기초 자료를 제공한다는 것에 의의를 가질 수 있다고 판단된다. 추후, 다양한 형태의 대공간 및 내력벽식 형태의 모듈러 학교 건물에서의 기밀성능 분석과 기밀성능에 따른 모듈러 학교 건물에서의 에너지 시뮬레이션을 이용하여 기밀 및 에너지 성능을 개선할 수 있는 디자인 가이드라인 구축에 관한 연구를 진행할 예정이다.

### Acknowledgement

이 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 연구입니다(RS-2025-00522046).

### References

[1] 손승문, 모듈러 건축물의 벽체와 바닥패널의 내화성능 실험 및 고온해석에 관한 연구, 한남대학교 석사학위논문, 2014. // (S.M. Son, Study on fire resistance performance experiments about floors and walls of modular buildings and analysis in high temperature. Master's

thesis, Hannam University, 2014.)

[2] 김성현, 양대원, 이동형 안침실 모듈의 공간구성에 대한 건축계획적 연구 - 모듈러 건축 공법을 기반으로, 의료·복지 건축, 제29권 제2호, 2023, pp.49-60. // (S.H. Kim, N.W. Yang, Architectural planning study on spatial composition of mobile seclusion module - Based on modular construction system, Journal of Korean Institute of Healthcare Architecture, 29(2), 2023, pp.49-60.)

[3] 정승민, 미세먼지 저감을 위한 학교 교실 환기시스템 및 시스템에어컨의 운전제어 방안에 관한 연구, 동아대학교 석사학위논문, 2019. // (S.M. Jeong, A study on the operation control method of ventilation system and system air conditioner for dust reduction in classroom, Master's thesis, Dong-A University, 2019.)

[4] 이선영, 윤효원, 운동장 없는 도시형 소규모 초등학교의 환경 개선에 관한 연구 - 일조, 채광, 자연환기, 소음을 중심으로, 대한건축학회논문집, 제27권 제8호, 2011, pp.3-12. // (S.Y. Rieh, H.W. Yoon, A study on the improvement of environment for the urban mini school without playground - With focus on daylight, natural ventilation and noise, Journal of the Architectural Institute of Korea, 27(8), 2011, pp.3-12.)

[5] 김태진, 학교 교실의 실내공기질 실태에 관한 연구, 동아대학교 석사학위논문, 2020. // (T.J. Kim, A study on the actual condition of indoor air quality in school classrooms, Master's thesis, Dong-A University, 2020.)

[6] 윤종석, 초등학교 다목적 교실의 기밀성에 관한 연구, 서울과학기술대학교 석사학위논문, 2020. // (J.S. Yoon, A study on the air tightness of multi-purpose classroom in elementary, Master's thesis, Seoul National University of Science and Technology, 2020.)

[7] 박성철, 학교 교실의 기밀성능과 실외 미세먼지 침투 사이의 관계 분석, 연세대학교 석사학위논문, 2022. // (S.C. Park, Relationship between air tightness performance and outdoor particle penetration in school classrooms, Master's thesis, Yonsei University, 2022.)

[8] 한국건축친환경설비학회, 건축물의 기밀성능 기준, 2013.06. // (Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, Building Airtightness Criteria, 2013.06.)

[9] 강지연, 김형근, 홍구표, 공동주택 구조 형식에 따른 기밀성능 측정 및 분석, 생태환경건축학회지, 제19권 제6호, 2019, pp.81-86. // (J.Y. Kang, H.G. Kim, G.P. Hong, Airtightness of multi-family residential buildings with differential structural systems, KIEAE Journal, 19(6), 2019, pp.81-86.)

[10] 웅드람, 송두삼, 김주옥, Blower Door를 이용한 건물의 기밀성능 시험 방법의 고찰, 설비공학논문집, 제31권 제5호, 2019, pp.216-226. // (M. Undram, D.S. Song, J.W. Kim, 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), 2019, pp.216-226.)

[11] 박환출, 이지연, 이정재, 학교 교실 기밀성능 측정 및 미세먼지 유입 차단방안에 관한 연구, 대한건축학회논문집, 제36권 제8호, 2020, pp.101-106. // (H.C. Park, J.Y. Lee, J.J. Yee, A study on the measurement of air-tightness performance and measures to prevent fine dust inflow of school classrooms, Journal of the Architectural Institute of Korea, 36(8), 2020, pp.101-106.)

[12] 조재훈, 초고층 주거건물에서의 단위세대 기밀성능 측정 및 평가, 대한건축학회논문집, 제26권 제10호, 2010, pp.337-344. // (J.H. Jo, Measurements of the dwelling unit airtightness in high-rise residential buildings, Journal of the Architectural Institute of Korea, 26(10), 2010, pp.337-344.)

[13] ASHRAE Standard 119, Air leakage performance for detached single-family residential buildings, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 1988.

[14] 박환출, 학교 교실의 실내공기질 개선을 위한 환기 및 공기청정 장치 연동제어 알고리즘 개발에 관한 연구, 동아대학교 박사학위논문, 2021. // (H.C. Park, A study on development of interlocked control algorithm of ventilation and air cleaning system for improving indoor air quality in school classroom, Master's thesis, Dong-A University, 2021.)