



## 녹색건축인증의 주거용건축물 자연환기성능항목 개선방안

### *The Improvement Plan of Natural Ventilation Performance Evaluation of Residential Buildings in Green Building Certification (G-SEED)*

명일\* · 윤혜경\*\*

Il Myung\* · Hea-Kyung Yoon\*\*

\* Ph.D. Candidate, Dept. of Architecture, Hongik Univ., South Korea (bankban@naver.com)

\*\* Corresponding author, Professor, Dept. of Architecture, Hongik Univ., South Korea (yoonh@hongik.ac.kr)

#### ABSTRACT

**Purpose:** G-SEED has had a significant impact on reducing carbon emissions and saving energy in the eco-friendly building sector. Additionally, it has contributed to improving indoor air quality by promoting the use of pollutant reduction materials. However, an analysis of formaldehyde and VOCs concentrations in 30 buildings that obtained G-SEED revealed that some VOC concentrations exceeded recommended levels, despite the use of materials emitting less than the TVOC standard. To address this issue, this study conducted a feasibility study on the appropriate ratio of natural ventilation performance suggested by G-SEED for ventilation windows, which can affect the reduction of indoor TVOC emissions. **Method:** Measurements and simulation analyses were carried out in three locations in certified buildings. In the measurement analysis, TVOC concentration characteristics were studied with windows and doors closed. During natural ventilation, there was a rapid decrease in concentration within 30 minutes. Based on these findings, a simulation of natural ventilation was conducted by applying a ratio of 11 ventilation windows per floor area. The results showed that when the ventilation window application rate was at least 6%, the TVOC concentration decreased to IAQ level 1 within 30 minutes. **Result:** Consequently, based on the measurement and simulation results, this study proposes an improvement plan to revise the ratio of windows in the natural ventilation performance category of residential buildings in the current G-SEED, lowering the minimum requirement from 8% to 6%.

#### KEYWORD

G-SEED(녹색건축인증)  
주거용 건축물  
실내 공기질  
자연환기

G-SEED(Green Building Certification - Green Standard for Energy and Environment Design)  
Residential Building  
IAQ(Indoor Air Quality)  
Window Ventilation

#### ACCEPTANCE INFO

Received Jul. 30, 2024  
Final revision received Sep. 24, 2024  
Accepted Sep. 30, 2024

© 2024. KIEAE all rights reserved.

## 1. 서론

### 1.1. 연구의 배경 및 목적

최근의 주거환경은 에너지 절약 기조에 따른 건축물의 기밀성 향상으로 인해 창문의 틈에 의한 극간풍(외기)의 침기량 및 환기량의 부족으로 나타나고 있으며, 이는 실내에 사용되는 마감재, 접착제, 내장재, 가구에서 발생하는 각종 오염물질이 외부로 빠져나갈 수 없는 현상을 야기시키고 있다. 이에 따라 환경부는 국민건강보호와 환경상 위해예방을 위해 「신축 공동주택 실내공기질 측정 공고제도」를 시행하고 있으며, 녹색건축인증에서는 실내공기 오염물질 저방출자재의 사용에 대한 항목을 필수항목으로 지정하여 친환경 인증 마감재의 사용을 유도하고 있다. 또한 건축자재 이외의 실내공기질 발생원을 제거하는 자연환기성능부분에 대해서도 별도의 평가항목을 두어 실내공기질 개선에 기여하고 있다.

이렇듯 공기질 향상을 위한 자연환기성능이 중요함에도 불구하고 Myung & Yoon(2023)이 제시한 연구에서 자연환기성능항목에 대한 평점 취득비율이 공동주택에서 약 27%로 매우 낮게 나온 것을 알 수 있다[5].

이에 본 연구에서는 녹색건축인증을 취득한 건축물을 대상으로 서울시 보건환경연구원의 실태조사를 인용하여 오염물질 농도를 분석하였으며, 현장에서의 공기질측정을 통해 자연환기시의 오염물질 방출량 및 감소량을 측정하였다. 녹색건축인증을 받은 주거용건축물이 실내공기오염물질 농도에 대한 권고기준을 만족하고 있는지 여부 및 녹색건축인증의 친환경마감재 설치 현황과 방출량과의 상관관계를 분석하였으며, 오염물질 농도저감을 위한 자연환기장치 비율을 오염물질 감소율과 연계하여 현재의 자연환기장치 적용비율에 대한 인증기준의 타당성을 검토하였다. 본 논문을 통하여 녹색건축인증에서 취득한 실내공기질 관련 친환경자재 설치현황과 실제 방출량 및 자연환기시의 감소량을 분석함으로써 녹색건축인증에서의 자연환기성능항목 개선을 위한 기초자료로서 활용될 수 있기를 기대한다.

### 1.2. 연구의 방법 및 절차

녹색건축인증 본인증을 취득한 공동주택 30건을 대상으로 실내재료마감표 및 시공된 건축자재를 분석하여 녹색건축인증에서 취득한 실내공기오염물질 저감자재의 사용 비율과 서울시 보건환경연구원에서 측정한 실측값을 비교 분석하여 각 마감자재별 적용 현황과 포름알데히드(HCHO) 및 VOCs(휘발성유기화합물) 방출량의 권

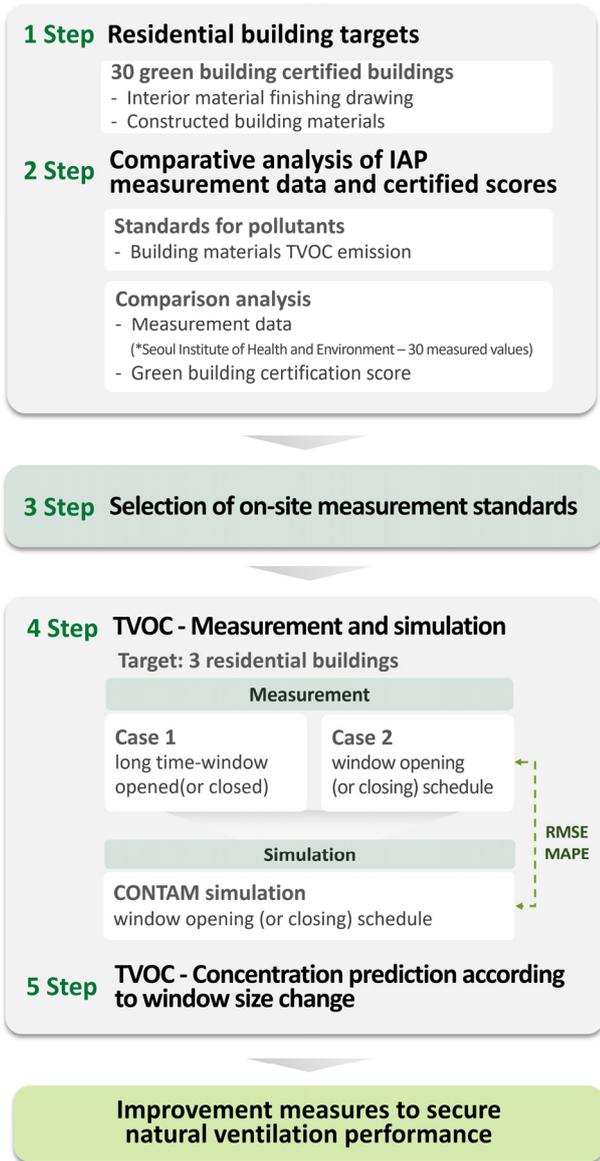


Fig. 1. Overall process of study

고기준 부합 여부를 상관 분석하였다. 이때 가장 많이 적용된 벽, 천정, 바닥의 마감재, 접착제, 내장재를 도출하여, 이 중 가장 많이 시공된 건축자재가 사용된 3건의 주거용건축물을 대상으로 자연환기시의 오염물질 방출량 및 오염물질 감소율을 현장 측정하였다.

26시간 동안 창 개폐를 통한 1차 실험과 스케줄 반응을 통한 2차 실험을 토대로 TVOC(총휘발성유기화합물)에 대한 농도 증가율 및 감소율을 제시하였다. 이후 CONTAM 프로그램을 통해 환기창의 크기변화와 환기량 스케줄에 따른 방출량 저감에 대한 예상데이터를 파악하여 녹색건축인증에서의 최적의 자연환기창 면적 비율을 추정했으며 본 연구수행에 따른 연구흐름도는 Fig. 1.과 같다.

## 2. 문헌 및 이론 고찰

### 2.1. 선행연구 고찰

주거용 건축물의 녹색건축인증에 대한 선행연구는 국내외 친환경

경건축물인증제도에 대한 비교분석, 인증기준 개정에 따른 평가항목 분석, 인증평가분야의 개선방향에 대한 연구로 나눌 수 있으며, 실내공기질에 대한 선행연구는 실내공기질 인증제도 분석, 실내공기오염물질 농도 측정, 실내공기환경에 대한 개선분석으로 크게 나눌 수 있다. 신축 주거용 건축물의 실내공기질 관련 연구는 공동주택의 실내공기질 권고기준과 현장에서 실측된 포름알데히드 및 TVOC농도를 비교하는 연구가 대부분이다. 또한, 2000년대초의 새집증후군 이슈, 다중이용시설 등의 실내공기질 관리법 제정 등으로 실내공기질 관련 연구가 다수 진행되었으나, 녹색건축인증 및 건강친화형주택건설기준 등이 의무화됨에 따라 실내공기질에 대한 측정을 바탕으로 한 연구는 현저하게 줄어들었다. 지금까지의 실내공기환경에 대한 선행연구들은 실내공기오염물질의 방출특성 및 방출량에 대한 공기질 실태조사에 국한되어 수행되었으며, 녹색건축인증에서도 공기환경 항목의 세부기준에 대한 개선방안을 도출한 연구는 미미한 실정이다.

Myung & Yoon(2023)은 녹색건축인증에서 실내공기오염물질 저방출자재에 대한 공기질 항목의 점수를 분석하여 공동주택과 도시형생활주택의 공기환경에 대한 오염물질 저감자재성능을 비교하였으며, 자연환기 및 기계환기설비의 규모별 특성에 따른 환기설비 설치유형을 도출하였다[5].

Kim et al.(2015)은 공동주택의 준공 후 경과시간에 따른 실내공기질에 대한 건강위해성 평가에 관한 연구를 통해 실내공기질 지표의 적절성을 검토하였으며, Nam et al.(2017)은 실내온도차에 따른 오염물질의 방출특성과 실내공기질을 평가하였다[3, 6].

Xu et al.(2022)는 간헐적 환기가 사무실 포름알데히드 농도에 미치는 영향을 예측 모델을 기반으로 제시하였으며 업무를 시작하기 전 간헐적 환기를 진행하는 경우가 VOC 농도제어에 효과적임을 제시하였다[15].

Yun & Jang(2022)은 녹색건축인증 실내환경 분야 취득현황 및 설문조사 분석을 통해 공동주택의 평균 취득률을 조사하였으며, Yun(2022)은 국내에서 시행되고 있는 녹색건축인증기준의 실내공기질 평가분야 개선을 위해 G-SEED, LEED(Leadership in Energy and environmental Design), BREEAM(Building Research Establishment Environmental Assessment Method), WELL building standard 등의 국내외 친환경건축인증제도를 비교분석하였다[13, 14].

이렇듯 선행연구에서 녹색건축인증의 공기환경에 대한 평가항목 개선 필요성을 제시하였으며, 이를 바탕으로 녹색건축인증취득 건축물을 대상으로 한 실내공기질의 현장실측을 통해 자연환기에 대한 세부항목별 개선방안을 도출할 필요가 있다.

### 2.2. 실내공기질 관련제도 고찰

#### 1) 실내공기질 관리법

신축 공동주택 100세대 이상은 입주 전 포름알데히드, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스티렌, 라돈 등의 오염물질을 측정하고, 측정결과서 원본을 첨부하여 주민 입주 7일 전까지 특별자치시장·특별자치도지사·시장·군수·구청장에게 제출해야 한다. 또한 측정결

과 보고(공고)를 주민 입주 7일 전부터 60일간 공동주택 관리사무소 입구 게시판, 각 공동주택 출입문 게시판, 시공자의 인터넷 홈페이지에 공고하여야 한다. 2024년 3월 15일 이후에는 공동주택 공기질 측정과정에 입주예정자가 입회함으로써 측정결과에 대한 분쟁을 방지하고 있다. 이는 시공사의 오염물질 저방출소재 사용을 독려할 뿐 아니라 입주자에게는 공기질에 대한 정보를 공유함으로써 거주자의 건강증진에 기여하고 있다는 것을 알 수 있다.

2) 건강친화형 주택건설기준

벽체(기둥 및 칸막이벽 포함), 천장, 바닥에 사용하는 최종마감재, 접착제, 내장재등에 대해서 TVOC, 포름알데히드를 평가한다.

3) 국내의 친환경 인증제도의 자연환기장치 설치 기준

G-SEED, LEED, BREEAM, WELL 등 국내외의 친환경인증제도에서는 환기에 대한 평가를 진행하고 있으며, 그 중 자연환기성능에 대한 평가는 G-SEED와 WELL인증에서 자연환기장치의 개구부 면적을 통하여 환기성능을 평가하고 있다. Table 3.과 같이 G-SEED에서는 바닥면적 대비 자연환기장치의 설치비율을 8% 이상을 기준으로 하고 있으며 WELL에서는 4% 이상을 기준으로 하고 있다.

2.3. 실내공기오염물질의 인체에 미치는 영향

포름알데히드 및 VOCs의 경우 신경계, 호흡계, 두통, 정신착란 뿐 아니라 발암성 물질로서 거주자의 건강에 미치는 영향이 매우 크며 Table 4.와 같다[12].

AI-Okby(2022)에서 제시하고 있는 TVOC 방출량의 영향은 Table 5.와 같으며, 실내공기질 범위에서 IAQ level1을 유지하기 위해 0.065ppm이하로 유지하는 것이 중요하다[16].

2.4. 실내공기질 분석 방법

실내공기오염물질 방출량 분석은 수도권 소재의 녹색건축인증을 신청한 주거용 건축물을 대상으로 2019년에서 2022년까지의 서울시 보건환경연구원에서 측정한 포름알데히드 및 VOCs의 방출량 결과를 인용하였다. 이를 토대로 마감재 특성 및 오염물질 측정 기준을 도출하였으며 이에 부합한 현장 3곳에 대해 자연환기에 따른 오염물질 감소율을 측정하였다.

3. 녹색건축인증의 자연환기시 오염물질 감소율 측정기준 선정

3.1. 세대내 인증기준에 적합한 건축자재 설치 현황 분석

녹색건축인증에서의 실내공기오염물질 방출량 기준은 건강친화형 주택건설기준에 근거하여 소형챔버법에 의한TVOC와 포름알데히드의 방출량을 기준으로 바닥, 천정, 벽에 사용된 각 마감재, 접착제, 내장재 및 가구재. 실란트등에 대하여 오염물질 저방출제품을 적용하였는지를 평가한다.

분석대상은 녹색건축인증을 취득한 주거용건축물로 서울시 보건환경연구원에서 오염물질 방출량을 측정한 건축물을 대상으로 하였다. Fig. 2.에서 보여지듯이 세대내 사용된 건축자재 중 바닥재의 경

Table 1. Recommended standards for indoor air quality in newly built apartment buildings: indoor air quality management act enforcement rules

Division	Pollutant	Emission
1	Formaldehyde	210( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
2	Benzene	30( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
3	Toluene	1000( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
4	Ethylbenzene	360( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
5	Xylene	700( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
6	Styrene	300( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
7	Radon	138( $\text{Bq}/\text{m}^3$ )

Table 2. Health-friendly housing construction standards

Division	Pollutant	Release amount after 7 days (small chamber method)
1	TVOC	0.10( $\text{mg}/\text{m}^2\text{h}$ )or less
		sealant : 0.1( $\text{mg}/\text{m}^2\text{h}$ )or less
2	Formaldehyde	0.015( $\text{mg}/\text{m}^2\text{h}$ )or less
		sealant : 0.01( $\text{mg}/\text{m}^2\text{h}$ )or less

Table 3. Natural ventilation window installation ratio for domestic and international eco-friendly building certification for residential building

Division	Environment friendly certification system	Ratio of natural ventilation windows to floor area
1	G-SEED	more than 8%
2	WELL	more than 4%

Table 4. Effects of indoor air pollutants on the human body

Division	Pollutant	Effects on the human body
1	Formaldehyde	Carcinogenic substances, Respiratory problems
2	Benzene	Carcinogenic substances, Nervous system abnormalities
3	Toluene	Respiratory, Eye, and Central nervous system abnormalities
4	Ethylbenzene	Central nervous system and Skin irritation
5	Xylene	Respiratory, Eye, and Skin irritation

Table 5. TVOC categories concerning the IAQ levels

IAQ Levels	Category	TVOC
1	Good	0~0.065(ppm)
2	Moderate	0.066~0.22(ppm)
3	Unhealthy for sensitive peoples	0.23~0.66(ppm)
4	Unhealthy	0.67~2.2(ppm)
5	Very unhealthy	2.3~5.5(ppm)

우 마루전용접착제를 사용한 강마루의 적용비율이 75%이상이었으며, 일부 비닐시트와 비닐계타일을 적용한 곳도 있었다. 벽체와 천정 마감재의 경우 100%가 벽지와 천정지로 구성되어 있었으며 내장재로 석고보드를 사용하였다는 것을 알 수 있다.

### 3.2. 실내공기오염물질 저방출제품의 적용과 방출량 분석

본 연구에서 분석한 입주전 주거용건축물에 대한 녹색건축인증에서의 오염물질 저방출제품의 적용여부와 VOCs 및 포름알데히드의 실내공기오염농도 분석 결과를 요약하면 다음과 같다.

세대내에 사용된 마감재, 접착제, 내장재에 벽, 바닥, 천정에서 30개 모든 현장에서 환경표지인증기준에 적합한 자재를 사용하였으나, 각 현장마다 상이한 오염물질 방출량을 나타내었다.

휘발성 유기화합물 중 벤젠을 제외한 스티렌과 에틸벤젠은 3개 현장(10%), 자일렌은 6개 현장(20%), 톨루엔은 10개의 현장(33%)에서 권고치를 초과하였다. 벤젠, 스티렌, 에틸벤젠, 자일렌은 측정세대의 평균값이 권고치를 초과하지 않았으나, 스티렌은 평균값이 권고치의 1.043배 이상 농도분포를 보이고 있다.

포름알데히드에서는 30개 모든 현장에서 권고치 이하의 방출량을 나타내었으며, 평균값이 권고치의 23.28%로 낮은 오염물질 방출량을 나타내었다.

이는 녹색건축인증에서 만족한 오염물질 저감자재의 적용과 실제 방출량의 상관관계에서 TVOC의 경우 총휘발성유기화합물 저감자재를 사용하였음에도 불구하고 일부 VOCs에서는 오염물질 방출량이 높게 측정된 것을 알 수 있으며, 포름알데히드의 경우 유해물질 저감자재를 사용함으로써 오염물질 방출량이 낮게 측정된 것을 알 수 있어 환경표지인증기준에 적합한 자재의 사용이 포름알데히드의 방출량을 낮추는 데 영향이 있다고 할 수 있다.

### 3.3. 마감재 및 방출량 특성분석을 통한 자연환기시 오염물질 감소율 측정기준 선정

Myung & Yoon(2023)에 따르면 공동주택의 경우 녹색건축인증에서 자연환기성능항목의 점수를 취득한 곳은 15개 프로젝트 중 4개의 프로젝트만이 가장 하위등급인 4급의 점수를 취득하였으며, 나머지 11개의 프로젝트가 점수를 미취득 하였던 것을 알 수 있다.

이에 녹색건축인증에서의 자연환기성능 확보에 대한 환기장치 적용비율의 적정성을 확보하기 위해 자연환기시 오염물질 감소율을 측정하기 위한 기준은 Table 6.과 같다. 서울시 보건환경연구원 자료를 분석하여 세대내에 가장 많이 적용된 마감재(바닥: 강마루, 벽체: 벽지, 천정: 천정지)를 사용한 현장을 대상으로 하였다. 또한 30개 모든 현장에서 녹색건축인증기준에 적합한 자재를 사용하였음에도 일부 현장에서 권고치를 초과한 VOCs에 대해 여러 가지 종류의 휘발성 유기화합물 농도의 총합을 나타내는 TVOC를 측정기준으로 하였다[9].

## 4. 녹색건축인증의 자연환기성능항목 개선방향

### 4.1. 자연환기성능 평가의 산출기준

자연환기를 통해 신선한 외기를 실내로 유입시켜 공기질을 향상함으로써 건강한 실내환경을 조성하는 항목으로 세대내 전용면적 및 확장면적 대비 개폐가능한 창 의 유효면적 비율로 점수를 부여한다.

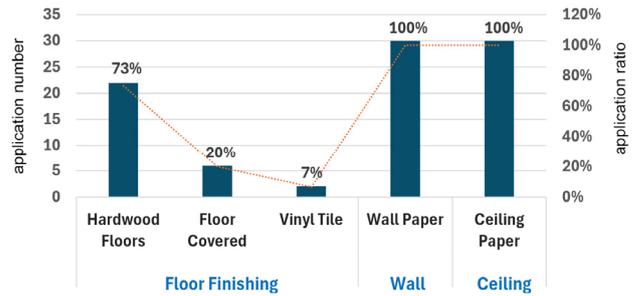


Fig. 2. Floor finishing material application rate

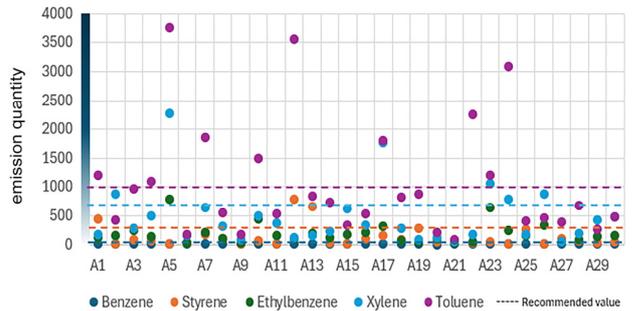


Fig. 3. Correlation analysis of VOCs emissions and recommendations

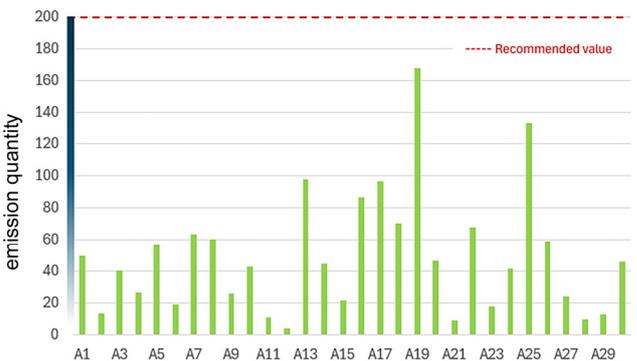


Fig. 4. Correlation analysis of formaldehyde emissions and recommendations

Table 6. Based on field measurement of pollutant reduction rate during natural ventilation

Division	Floor Finishing	Wall Finishing	Ceiling Finishing	Pollutant
Measurement Standard	Hardwood Floors	Wall Paper	Ceiling Paper	TVOC

Table 7. Standards for installing natural ventilation windows in residential and non-residential buildings

Residential Building		Non-Residential Buildings	
Grade	Ventilation window ratio	Grade	Ventilation window ratio
1	More than 14%	1	More than 8%
2	Less than 12~14%	2	Less than 6~8%
3	Less than 10~12%	3	Less than 4~6%
4	Less than 8~10%	4	Less than 2~4%

최초 녹색건축인증의산출기준은 공동주택의 자연환기장 적용비율이 바닥면적대비 10%이상이었으며, 이는 건축법 시행령 제 51조 및 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙 제14조(배연창의 유효면적 산정 기준 등)에 근거하였다. 하지만 2016년에 공동주택의 경우 확장면적을 함께 검토하므로 개폐면적이 10%를 넘기가 어려운 상황이 발생할 수 있을 것을 대비하여 Table 7.과 같이 세대별 개폐가능한 창면적이 전용면적 및 확장면적의 8% 이상인 경우로 조정하였다.

4.2. 자연환기에 따른 TVOC 농도 감소율 측정

실내공기오염물질 방출량 분석은 앞서 측정기준 선정에서 실제 농도가 높게 확인되었던 TVOC를 대상으로 하였다. 본 연구는 실내공기오염물질 방출량 개선을 위한 방법으로 자연환기 방식을 채택하였으며 이에 창문 개폐를 통한 TVOC 농도 방출량 특성을 분석하였다. 본 연구에서 진행한 TVOC 농도 방출량 분석은 크게 2가지로 주거용 건축물 3곳을 대상으로 세대 내 자연환기에 따른 TVOC 농도 측정과 NIST에서 제공하고 있는 CONTAM 프로그램 3.4.0.1 version으로 진행하였다. 또한, 시뮬레이션 결과의 정확성과 신뢰성 확보를 위해 실측값과 RMSE, MAPE 오차율 분석을 진행하였다[4, 10]. 따라서 실측과 오차율 분석을 통해 검증된 CONTAM 시뮬레이션 모델을 활용하여 창문 크기변화에 따른 TVOC 농도 예측 결과를 제시하였다[4].

1) 측정대상 선정

측정은 앞서 제시하였던 녹색건축인증 분석 결과에서 실내재료 마감으로 가장 많이 적용하였던 바닥-강마루, 벽체-석고보드 및 벽지, 천정-석고보드 및 천정지를 적용한 수도권 건축물 3곳을 대상으로 진행하였다. Table 8.과 같이 모두 천정고가 2.3m로 동일하였으며 마감재 시공에 따른 TVOC 농도 특성 분석을 위해 가구재가 없는 미서기장이 설치된 침실에서 측정을 진행하였다.

2) TVOC 실내공기질 측정 분석

본 연구의 TVOC 농도 측정 방법은 2가지 Case로 진행하였으며 Case 1의 경우 TVOC 방출량 특성을 분석하기 위해 동절기 및 하절기에 20시간 장시간 밀폐와 6시간 자연환기에 따른 TVOC 농도 측정을 진행하였다[2].

Case 2의 경우 각 세대 내 침실에서 창문을 개방하고 30분 사전환기 후 5시간 밀폐하여 방출량을 측정하였으며, 이후 30분 환기하여 감소량을 측정하였다.

측정 위치 선정은 국내 실내공기오염물질 측정 기준을 참고하여 침실의 벽 또는 창문으로부터 1m를 이격하고, 바닥면으로부터 1.2~1.5m 높이를 기본 측정점으로 하였다(SPS-C KACA0038). 주거용 건축물의 실시간 TVOC 농도 변화량 측정을 위해 Table 10.과 같이 CMOSens® 플랫폼과 금속 산화물 기반 센서 기술을 결합한 Sensirion의 SEK-SVM4x를 활용하였다. 실내 온도·습도 변화와 외부 기류 영향 분석을 위해 Testo 405i 장비를 활용하였으며 측정 결과의 오차를 개선하기 위해 SKT-9300(TVOC)로 추가 측정을 진행하였다.

본 연구는 주거용 건축물에 대한 녹색건축인증 기준의 타당성 확

Table 8. TVOC measurement progress building construction information

R.B	Date	O.T.A (°C)	I.T.A (°C)	Floor area	Floor high	Volumn	Window opening area
B1	3/12	8.7	13.1	9.22m <sup>2</sup>	2.3m	21.21m <sup>3</sup>	0.88m <sup>2</sup>
B2	3/14	13.9	18.0	7.50m <sup>2</sup>		17.25m <sup>3</sup>	0.8m <sup>2</sup>
B3	3/19	9.5	15.0	8.25m <sup>2</sup>		18.98m <sup>3</sup>	1.30m <sup>2</sup>

R.B: Residential Buildings, O.T.A: Outside Temperature Average, I.T.A: Inside Temperature Average

Table 9. Indoor air quality measurement points of B1, B2, and B3

Elements	Plan	Section
B1		
B2		
B3		

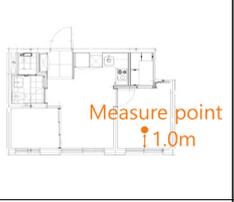
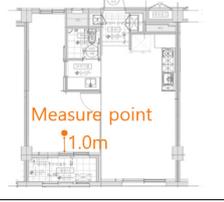
Table 10. TVOC concentration simple measurement equipment and sensor

Elements	TVOC	Wind speed
Equipment	SKT-9300(TVOC)	TESTO 405i
Sensor	SEK-SVM4x	
Measurement status		

보를 위한 간이측정 실험으로 냉난방이 가동되지 않는 입주 전 건축물을 대상으로 하며 방출량 특성분석을 위한 동절기와 하절기의 실험조건은 Table 11.과 같다.

Fig. 5.에서 동절기의 20시간동안 방출량 분석에서 기상청 상세 관측자료의 외기온도를 활용한 실내온도 및 외기온도를 분석할 결과 실내의 평균온도는 5.74°C였으며, 외기의 평균온도는 14.67°C였음을 알 수 있으며, 하절기의 20시간동안 방출량 분석에서 실내온도 및 외기온도를 분석할 결과 실내의 평균온도는 27.22°C였으며, 외기의 평균온도는 33.15°C였음을 알 수 있어, 냉난방을 가동하지 않는 준공 전 건축물의 동절기 실내의 온도차가 하절기 실내의 온도차

Table 11. Experimental conditions for emission characteristic analysis

Elements	Winter season	Summer season
Date	2024.02.27.~2024.02.29	2024.09.03.~2024.09.05
Region	Seoul mapo	Seoul gangseo
Floor area	7.50m <sup>2</sup>	11.25m <sup>2</sup>
Floor high	2.3m	2.3m
Volumn	17.25m <sup>3</sup>	25.87m <sup>3</sup>
Measure point plan		
Window effective opening area	0.8m <sup>2</sup>	1.1m <sup>2</sup>
Measurement floor	3F	13F
Outdoor temperature (average)	5.74°C	33.15°C
Indoor temperature (average)	14.67°C	27.22°C
Humidity (average)	48.06%	55.13%

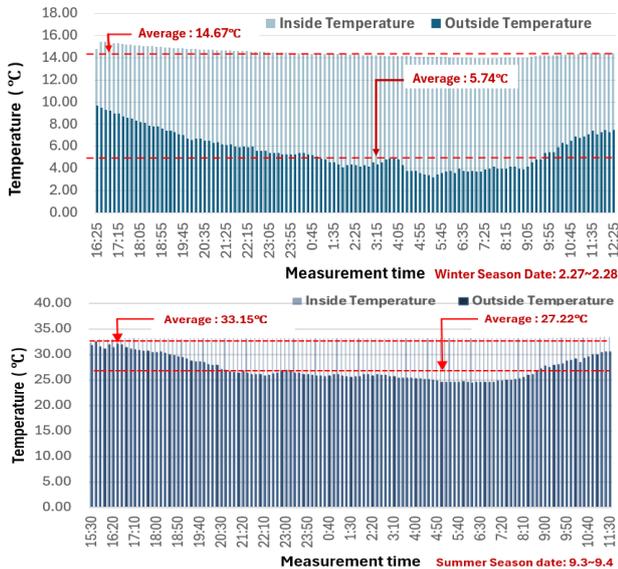


Fig. 5. Measurement data of outdoor/indoor temperature in winter and summer season

보다 크다는 것을 알 수 있다[17].

Fig. 6.은 측정 전 창문을 열어 30분 환기를 진행한 다음 20시간 동안 장시간 창과 문을 닫고 2월 28일에 측정된 TVOC 결과이다. 이때의 온도분포는 14~15°로 일정하였으며, 습도는 40~48%를 유지하였다. TVOC 농도 변화의 경우 16시 25분부터 16시 45분까지 약 20분간 농도가 0.1ppm 구간에서 정체하였으며 농도가 16시 45분부터

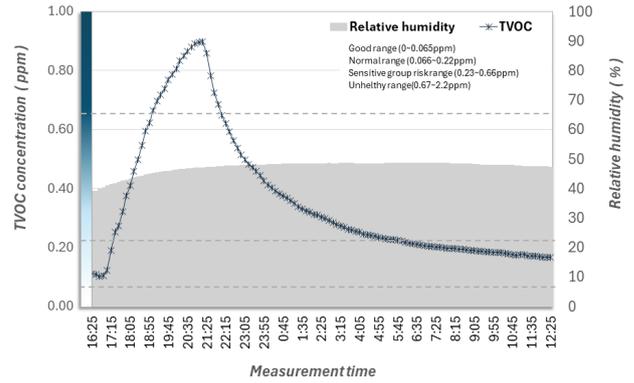


Fig. 6. Indoor air quality measurement results on February 28th

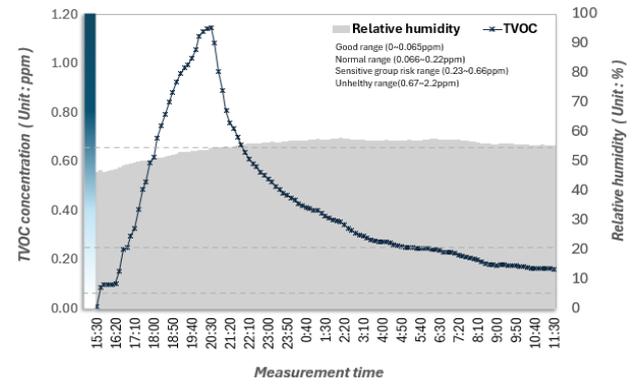


Fig. 7. Indoor air quality measurement results on September 4th

증가하여 21시 25분까지 평균 0.0027ppm/min으로 상승하였다. 농도 증가 이후, 21시 25분부터 12시 30분까지 -0.0008ppm/min으로 감소하였다. 감소 이후에는 농도가 0.1~0.2 ppm 사이로 유지되는 특성이 나타났다.

TVOC농도 방출량 특성 분석에서 온도 및 습도의 영향을 고려하여 동절기와 하절기의 특성비교를 위해 추가로 9월 3일~4일 20시간동안 방출량 특성을 분석하였다. Fig. 7.의 온도분포는 30~33°로 일정하였으며, 습도는 47~64%를 유지하였다. TVOC 농도 변화의 경우 13시 30분부터 16시 20분까지 약 50분간 농도가 0.1ppm 구간에서 정체하였으며 농도가 16시 20분부터 증가하여 20시 30분까지 평균 0.0042ppm/min으로 상승하였다. 농도 증가 이후, 20시 30분부터 11시 30분까지 -0.0011ppm/min으로 감소하였다. 이는 동절기(2월 28일 측정)의 4시간30분의 농도 증가 후 점차 감소되는 특성과 달리 하절기(9월 3일 측정)에는 약 4시간의 농도 증가 후 감소되는 특성을 보여 동절기보다 온도가 높은 하절기에 TVOC방출량이 좀 더 빠르게 나타남을 알 수 있으나, 방출량 특성곡선은 거의 비슷함을 알 수 있다.

이처럼 ‘Huangfu 2020’와 ‘Xu et al 2022’에서 제시한 실험 결과 그래프와 같이 장시간 창과 문을 닫고 TVOC 농도를 분석한 결과, 2월 28일에는 약 4시간 30분 정도, 9월 3일에는 약 4시간 농도 증가 후 농도가 점차 감소하는 특성을 확인하였다[2, 15].

동절기 TVOC농도의 경우 2월 28일 12시 30분부터 2월 29일 16시 00분까지 0.1~0.2 ppm 사이로 유지되었으며 창문을 열어 환기를 진행한 16시부터 농도가 급격히 줄어 16시 32분에는 0.023ppm으로

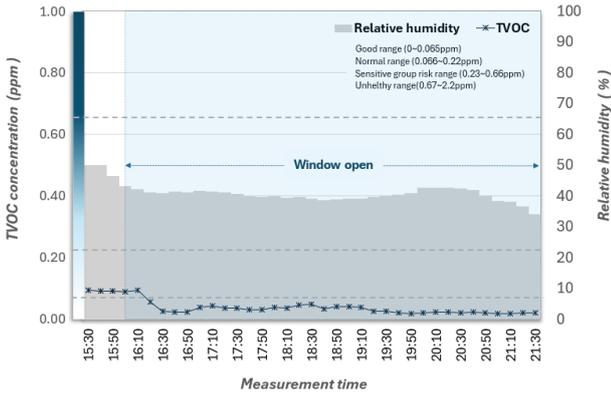


Fig. 8. Indoor air quality measurement results on February 29th

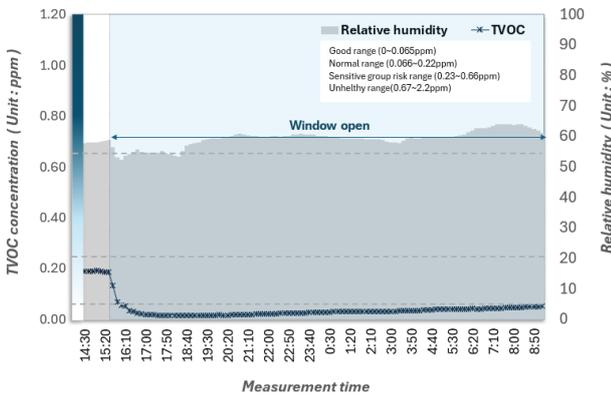


Fig. 9. Indoor air quality measurement results on September 4~5th

감소하였다가 이후 0.05ppm이하로 유지되는 특성이 분석되었다 (Fig. 8). 하절기 TVOC농도의 경우 9월 4일 11시 30분부터 15시 20분까지 0.2 ppm 이하로 유지되었으며 창문을 열어 환기를 진행한 15시 30분부터 농도가 급격히 줄어 16시에는 0.056ppm으로 감소하였다가 이후 0.02ppm이하로 유지되는 특성이 분석되었다(Fig. 9).

동절기 및 하절기의 장시간 창문을 통해 자연환기에 따른 TVOC 농도를 분석한 결과, 자연환기를 진행한지 약 30분만에 0.06ppm이하로 유지됨을 확인하였다.

동절기의 Fig. 6와 Fig. 8.의 데이터 분석 결과, Fig. 6.의 최대 농도는 21시 05분의 0.90ppm이었으며 최소농도는 12시 25분의 0.17ppm으로 분당 -0.0008ppm/min으로 감소하였다. Fig. 8.의 경우 16시 10분에 최대 농도인 0.091ppm으로 측정되었으며 16시 32분에 최소농도인 0.023ppm으로 분당 -0.0031ppm/min으로 농도가 감소하였다.

하절기의 Fig. 7와 Fig. 9.의 데이터 분석 결과, Fig. 7.의 최대 농도는 20시 30분의 1.15ppm이었으며 최소농도는 11시 30분의 0.16ppm으로 분당 -0.0011ppm/min으로 감소하였다. Fig. 9.의 경우 15시 30분에 최대 농도인 0.19ppm으로 측정되었으며 16시 40분에 최소농도인 0.02ppm으로 분당 -0.0024ppm/min으로 농도가 감소하였다.

이렇게 창문개폐를 통한 농도감소율이 침기에 의한 자연감소보다 동절기에 약 4.3배 하절기에 약 2.2배 높음을 확인하였다. 실내공기질 실험을 바탕으로 본 연구는 창과 문을 닫은 경우 약 4시간에서

4시간 30분 정도 TVOC 농도가 급격히 증가하는 경향을 확인하였으며 창문을 통한 자연환기 진행 시 약 30분 만에 TVOC 농도가 급격히 감소함을 확인하였다.

이를 바탕으로 본 연구는 TVOC 농도가 급격히 상승한 경우 창문을 통한 자연환기가 TVOC 농도 감소에 효과가 있는지 여부 파악을 위한 창문 스케줄 반영 실내공기질 실험을 추가적으로 진행하였다.

### 3) 창문 스케줄 반영 TVOC 농도 특성 분석

본 연구의 창문 스케줄을 반영한 TVOC 농도 측정의 경우 앞서 진행한 실험 결과의 TVOC 농도 증가 경향과 자연환기에 따른 TVOC농도 감소 효과를 반영하여 Fig. 10.과 같이 진행하였다.

Table 9.에 제시된 B1, B2, B3 주거시설의 TVOC 농도 측정을 Fig. 10.의 창문 스케줄을 적용하여 측정한 결과는 Fig. 11.과 같이 분석되었다.

B1 주거시설의 경우 실내온도 13.1° 습도 58%로 Fig. 11.과 같이 창과 문을 닫고 5시간 30분 동안 TVOC 농도를 분석한 결과, 0.60ppm까지 농도가 증가하였으며 창문을 열고 자연환기를 30분 진행한 결과, 0.01ppm이하로 유지됨을 확인하였다. B2 주거시설의 경우 실내온도 18° 습도 45%로 Fig. 11.과 같이 16시 55분에 최고 농도 0.69ppm까지 증가하였으며 창문을 통한 자연환기를 시작하기 전까지 0.69~0.68ppm을 유지하였으며, 이후 창문을 열고 자연환기를 30분 진행한 결과, 0.022ppm이하로 유지됨을 확인하였다. B3 주거시설의 경우 실내온도 15° 습도 59%로 B1와 B2 주거용 건축물의 농도보다 약 0.2ppm 정도 낮게 측정되었다. Fig. 11.과 같이 14시 45분에 최고 농도 0.40ppm까지 증가하였으며 창문을 통한 자연환기를 시작하기 전까지 0.40~0.30ppm을 유지하였다. 이후 창문을 열고 자연환기를 30분 진행한 결과, 0.010ppm이하로 유지됨을 확인하였다.

본 실험 결과를 바탕으로 TVOC 농도의 경우 농도가 높은 경우에도 30분간의 단기간 환기에서도 농도 감소 효과가 나타남을 확인하였다. 따라서 본연구에서는 단기간 환기에서도 큰 효과를 보였던 창문을 통한 자연환기 진행 시 바닥면적 대비 적정 크기의 창호 선정을 위해 추가로 시뮬레이션 분석을 진행하였다.

### 4.3. 자연환기에 따른 TVOC 시뮬레이션 분석

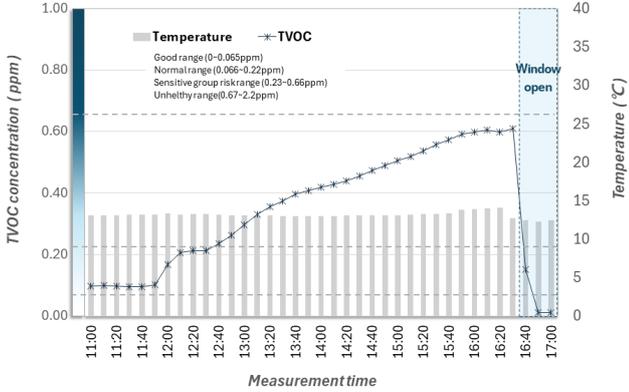
앞서 검토가 필요하였던 자연환기창 적정비율 제시를 위해 본 연구에서는 시뮬레이션을 통한 예측분석으로 진행하였다. 적정한 개구부 크기 제시는 CONTAM 프로그램을 활용하였으며 예측 모델을 분석하기 전, 시뮬레이션 결과의 적정성을 판단하기 위해 실측에 따른 TVOC 시뮬레이션 분석을 진행하였다[7].

#### 1) CONTAM 입력조건 선정

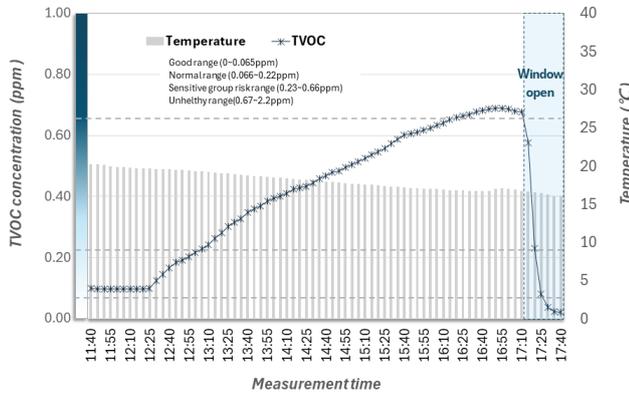
실측에 따른 TVOC 시뮬레이션 분석 과정은 CONTAM 입력조건에 대해 입력조건과 실험 결과 분석으로 진행하였으며 이를 통해 분석된 시뮬레이션 결과를 실측데이터와 비교 검증분석을 진행하였다. 또한, TVOC 농도변화에 영향을 주는 풍속, 침기에 대한 고려를 위해 CONTAM의 Airflow Element model은 2개를 적용하였으며 Table 12.의 입력조건을 활용하여 Two Opening 모델을 적용하였다.



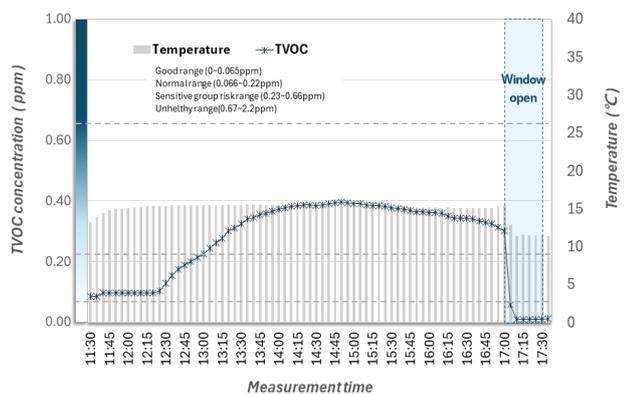
Fig. 10. Measurement of indoor air quality in residential building B1, B2, B3 - window opening/closing schedule



B1



B2



B3

Fig. 11. TVOC concentration measurement results in residential facilities B1, B2, B3

또한, 침기로 인한 농도변화 반응을 위해 ‘ASHRAE Fundamental’과 ‘Blower Door Test를 이용한 공동주택의 기밀성능에 관한 연구’(임연영 2023)에서 제시한 EqLA 데이터를 적용하였다. 외부 풍속의 경우 Fig. 12.와 같이 TESTO 405i 측정데이터를 활용하였다[1, 11].

2) 실측과 시뮬레이션 비교 검증

시뮬레이션 결과의 신뢰성과 적정성을 판단하기 위해 본 연구에

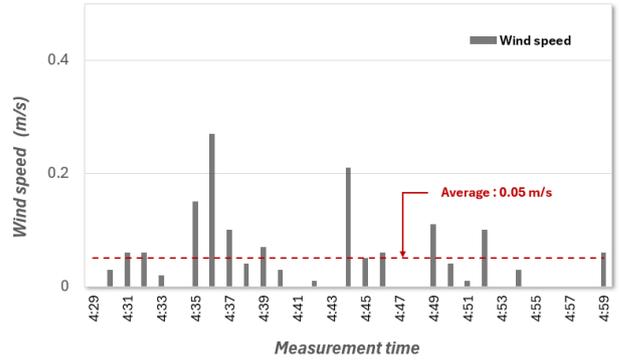


Fig. 12. Wind speed measurement data when windows are open in residential building B1

Table 12. TVOC concentration simple measurement equipment and sensor

Buildings	Elements			Input conditions (Unit)	
B1	Indoor	TVOC	Constant coefficient	Initial concentration 0.146ppm	
				Generation rate 7.57E-05 g/min	
		Airflow Path	Leakage area	Discharge Coefficient	0.611
				Flow Exponent	0.65
			Two-way Flow Model	Pressure Difference	10Pa
					0.88m <sup>2</sup>
	Outdoor	Temperature		11°C	
		TVOC concentration		0.010ppm	
	B2	Indoor	TVOC	Constant coefficient	Initial concentration 0.140ppm
					Generation rate 8.30E-05 g/min
Airflow Path			Leakage area	Discharge Coefficient	0.611
				Flow Exponent	0.65
			Two-way Flow Model	Pressure Difference	10 Pa
					0.80m <sup>2</sup>
Outdoor		Temperature		16°C	
		TVOC concentration		0.015ppm	
B3		Indoor	TVOC	Constant coefficient	Initial concentration 0.085ppm
					Generation rate 1.52E-04 g/min
	Airflow Path		Leakage area	Deposition Rate	3.21E-05 g/min
				Discharge Coefficient	0.611
			Two-way Flow Model	Flow Exponent	0.65
				Pressure Difference	10 Pa
	Outdoor	Temperature		11°C	
		TVOC concentration		0.009ppm	

Table 13. RMSE and MAPE analysis results based on comparison of actual measurements and simulations of B1, B2, B3 residential buildings

Residential Buildings	RMSE(ppm)	MAPE(%)
B1	0.057	0.725
B2	0.050	0.210
B3	0.014	0.189
Average	0.040	0.375

Table 14. Ratio of windows to actual floor area of residential buildings B1, B2, B3 and window size according to 1~10%

Residential Buildings-Window Area(m <sup>2</sup> )			
Ratio	B1	B2	B3
Actual(ratio)	0.88(9.54%)	0.80(10.67%)	1.30(15.71%)
10%	0.92	0.75	0.83
9%	0.83	0.67	0.74
8%	0.74	0.60	0.66
7%	0.65	0.52	0.58
6%	0.55	0.45	0.50
5%	0.46	0.37	0.41
4%	0.41	0.30	0.33
3%	0.33	0.22	0.25
2%	0.25	0.15	0.16
1%	0.17	0.07	0.08

서는 실측데이터와 시뮬레이션 결과에 대해 비교 검증분석을 진행하였다[8].

따라서 실측과 비교하여 Table 13.과 같이 낮은 RMSE와 MAPE 결과가 나타난 B1, B2, B3 시뮬레이션 모델을 활용하여 창문 개구부 크기변화에 따른 예측분석과 적정 개구부 크기 제시 분석을 진행하였다.

#### 4.4. 시뮬레이션 예측을 통한 적정 자연환기창비율 제시

앞서 검증된 B1, B2, B3 시뮬레이션 모델을 활용하여 창문 크기변화에 따른 시뮬레이션 분석을 진행하였다. 우선, 자연환기성능 평가 기준상 측정을 진행한 현장이 몇등급에 해당하는지 확인하였으며 적정 환기창 비율제시를 위해 바닥면적 대비 환기창의 비율을 1~10%까지 크기를 변경하여 시뮬레이션 분석을 진행하였다.

##### 1) 개구부 크기변화에 따른 TVOC 농도 예측

자연환기성능 평가 기준상 측정을 진행한 B1, B2, B3 주거용 건축물의 환기창 비율은 Table 14.의 Actual 데이터와 같으며 가장 환기창의 비율이 크게 시공된 현장은 C주거용 건축물이었다. 녹색건축 인증에서 제시한 환기창 비율 등급을 확인하면 B1의 경우 4급에 해당하며 B2는 3급, B3는 1급에 해당하는 것으로 확인되었다. 따라서 본 연구에서는 Table 14.의 1~10% 환기창 비율에 따른 B1, B2, B3 각각의 창문 크기를 적용하여 건축물별 개구부 크기변화에 따른 11개의 시뮬레이션 TVOC 농도 예측을 진행하였다.

CONTAM을 통해 B1, B2, B3 주거용건축물 각각의 11개 비율의 창문을 적용하여 예측분석을 진행한 결과, B1 주거용건축물의 경우

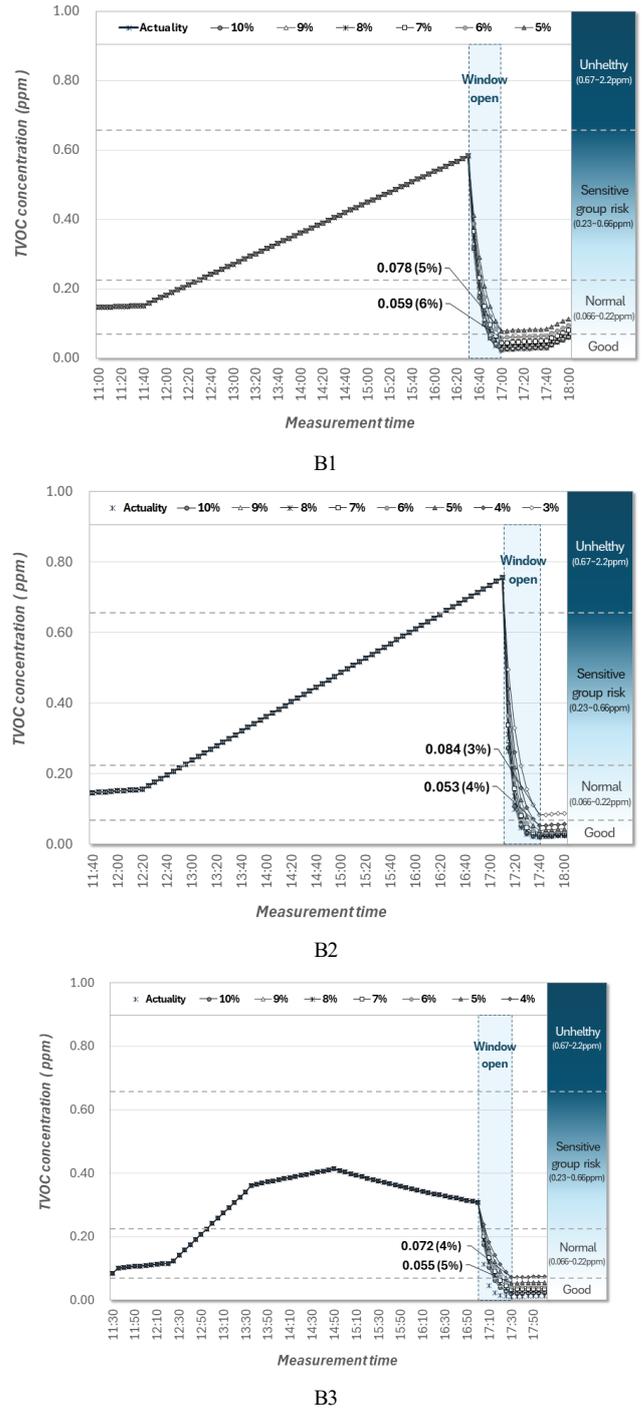


Fig. 13. TVOC concentration measurement results in residential facilities B1, B2, B3

바닥면적 대비 5% 이하에서의 환기창 비율 적용시 0.078ppm으로, Table 5.에서 제시한 TVOC 농도 기준의 IAQ level 1(0~0.065ppm)을 벗어났다. 하지만 자연환기창의 면적을 늘려 6% 비율의 환기창 적용 시 0.059ppm으로 IAQ level 1에 부합함을 알 수 있었다.

B2 주거용 건축물의 경우 바닥면적 대비 3% 이하의 환기창 비율을 적용하였을 때 0.084ppm으로, IAQ level 1을 벗어났으며 바닥면적 대비 자연환기창의 면적 비율이 4% 시 0.053ppm으로 IAQ level 1에 부합함을 알 수 있었다.

Table 15. Proposal of standards for installing natural ventilation windows in residential buildings that reflect TVOC concentration analysis results

Existing - Residential Building		→	Proposed change - Residential Building	
Grade	Ventilation window ratio		Grade	Ventilation window ratio
1	More than 14%	1	More than 12%	
2	Less than 12~14%	2	Less than 10~12%	
3	Less than 10~12%	3	Less than 8~10%	
4	Less than 8~10%	4	Less than 6~8%	

마지막으로 실측 농도가 가장 낮게 측정되었던 B3 주거용 건축물의 경우 바닥면적 대비 4% 이하의 환기창 비율 적용 시 0.072ppm으로 IAQ level 1을 벗어났으며, 바닥면적 대비 자연환기창의 면적 비율이 5%의 환기창 적용 시 0.055ppm으로 IAQ level 1에 부합함을 알 수 있었다.

따라서 바닥면적 대비 환기창 비율을 분석하여 시뮬레이션 분석을 진행한 결과, 0.065ppm이하의 농도분포를 가지기 위해서는 바닥면적 대비 최소 6% 이상의 환기창을 적용하였을 때 30분의 단기간 자연환기만으로도 TVOC 농도 기준에서 제시한 IAQ level 1까지 환기가 가능함을 확인하였다.

2) 녹색건축인증의 자연환기성능향목 개선안 제시

본 연구는 TVOC 시뮬레이션 예측분석 결과를 바탕으로 녹색건축인증 항목 중 자연환기성능확보(7.2항목)의 자연환기창 비율 변경 안을 제시하려고 한다. 자연환기성능확보(7.2항목)의 경우 2016년부터 적용된 공동주택 확장면적 대비 환기창 비율 적용으로 8% 적용이 어려운 실정이었다. 따라서 녹색건축인증에서 주거용 건축물의 자연 환기창 비율에 대한 적정 크기 안을 TVOC 농도 분석결과를 반영하여 제시하였다.

자연 환기창은 앞서 시뮬레이션 분석 결과와 같이 바닥면적 대비 최소 6% 이상의 환기창을 적용하였을 경우 TVOC 농도가 30분의 단기간 자연환기만으로도 감소 효과가 나타남을 확인하였다.

따라서 TVOC 농도 개선 효과 분석을 바탕으로 자연환기창 비율을 조정한다면 Table 15.와 같이 설치 기준안을 고려할 수 있으며, 자연환기창의 바닥면적 대비 설치비율을 최소 8%에서 최소 6%로 변경하는 안을 제시한다.

5. 결론

녹색건축인증에서 주거용건축물의 오염물질 저방출 제품 적용과 방출량의 상관관계 및 자연환기창 설치 비율로 살펴본 자연환기성능확보 항목 분석에 대한 개선방향 연구결과는 다음과 같다.

첫째, 2019년에서 2022년까지 서울시 보건환경연구원에서 측정 한 녹색건축인증을 받은 주거용건축물의 마감재, 내장재, 접착제를 분석한 결과 30개 현장 중 모든 현장에서 환경표지인증기준에 적합한 자재를 사용하였으나, 각 현장별로 포름알데히드 및 VOCs의 방출량이 상이하였다. 휘발성 유기화합물 중 벤젠을 제외한 스티렌과 에틸벤젠은 3개 현장(10%), 자일렌은 6개 현장(20%), 톨루엔은 10

개 현장(33%)에서 권고치를 초과하였으며, 포름알데히드에서는 30개 모든 현장에서 권고치 이하의 방출량을 나타내었다. 이는 녹색건축인증에서 TVOC가 기준치 이하로 방출된 자재를 사용하였음에도 현장에서의 각종 VOCs의 농도가 권고치를 초과할 수 있다는 것을 나타내며, 이는 오염물질 저방출제품을 적용하여 오염원 자체를 제거하는 것만 중요한 것이 아니라 실내에서 발생된 오염된 공기를 희석시키는 자연환기가 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.

둘째, 세대 내 마감재로 강마루, 벽지, 천정지를 시공한 B1, B2, B3 주거용 건축물 3개 현장의 TVOC의 방출특성과 자연환기 시 TVOC 농도 감소량을 실내공기질 측정을 통해 진행하였다. 우선 B3 주거용 건축물을 대상으로 방출량 특성을 분석한 결과, 창과 문을 닫은 경우 약 4시간 30분 정도 TVOC 농도가 급격히 증가하는 경향을 확인하였으며 창문을 통한 자연환기 진행 시 약 30분 만에 TVOC 농도가 급격히 감소함을 확인하였다. 특성 분석 결과를 바탕으로 자연환기 스케줄을 적용하여 실내공기질 측정을 진행한 결과, TVOC 농도의 경우 농도가 높은 경우에도 30분간 환기에서도 농도 감소 효과가 나타남을 확인하였다.

셋째, 30분만에 효과가 나타난 자연환기창을 대상으로 바닥면적 대비 적정 자연환기창 비율 선정을 위해 CONTAM 시뮬레이션으로 예측분석을 진행하였다. 자연환기창 적정비율 선정을 위한 예측 분석 전 농도실측결과와 CONTAM 시뮬레이션 모델 비교 검증에서 B1, B2, B3 주거용 건축물의 평균 RMSE를 분석한 결과, 0.040 ppm으로 매우 낮은 오차로 분석되었다. 해당 검증모델 결과를 바탕으로 바닥면적 대비 환기창 비율 적용 시뮬레이션 분석을 진행한 결과에서는 바닥면적 대비 최소 6% 이상의 환기창을 적용하였을 때 30분의 단기간 자연환기만으로도 TVOC 농도 기준에서 제시한 IAQ level 1까지 환기가 가능함을 확인하였다.

넷째, 이에 본 연구에서는 현재 녹색건축인증에서 주거용 건축물의 자연환기성능향목 개폐창비율을 최소 8%에서 6%로 수정하는 개선안을 제시하며, 이를 통해 녹색건축인증 기준 변경 시 오염물질의 방출량 및 감소량을 고려한 자연환기창의 적정비율에 대한 참고 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

다섯째, 본 연구는 주거용 건축물에 대한 녹색건축인증 기준의 타당성확보를 위한 간이측정 실험을 실시하였으며, 냉난방이 가동되지 않는 입주 전 건축물을 대상으로 실내공기질을 측정함에 따라 실내외 온도차를 고려한 오염물질 방출량 및 감소량을 파악하는데 한계점이 있어, 향후 논문에서는 입주 후의 냉난방가동에 따른 실내외 온도차 및 오염물질농도 분석을 통하여 녹색건축인증에서의 공기환경에 대한 입주 후까지 고려한 실내공기질 평가 개선방안을 제공하고자 한다.

Acknowledgement

본 연구는 2024학년도 홍익대학교 학술연구진흥비로 이루어졌습니다.

## References

- [1] ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), Ventilation and infiltration, In: 2021 ASHRAE® Handbook – Fundamentals, SI ed., Peachtree Corners, GA: ASHRAE, 2021, pp.16.11-16.12.
- [2] Y. Huangfu et al., Whole-house emission rates and loss coefficients of formaldehyde and other volatile organic compounds as a function of the air change rate, *Environmental Science & Technology*, 54(4), 2020.01, pp.2143-2151.
- [3] 김다영 외 4인, VOC 농도 예측을 통한 공동주택 실내공기질의 위해성 평가 방법, 한국건축환경설비학회 2015년도 추계학술발표대회 논문집, 2015.11, pp.59-60. // (D.Y. Kim et al., Application of health risk assessment to evaluate indoor air quality in residential building, 2015 Fall Conference of KIAEBS, 2015.11, pp.59-60.)
- [4] L. Lu et al., High-performance formaldehyde prediction for indoor air quality assessment using time series deep learning, *Building Simulation*, 17(3), 2024.03, pp.415-429.
- [5] 명일, 윤혜경, 녹색건축인증기준에서 실내환경분야의 평가항목 분석, 대한건축학회논문집, 제39권 제1호, 2023.01, pp.217-224. // (I. Myung, H.K. Yoon, The analysis of evaluation items in the indoor environment performance field in G-SEED, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 39(1), 2023.01, pp.217-224.)
- [6] 남기철, 이영환, 최봉석, 주택 실내 공기중 오염물질 농도의 계절기와 하절기 비교 분석, 한국생태환경건축학회지, 제17권 제3호, 2017.06, pp.125-131. // (K.C. Nam, Y.H. Lee, B.S. Choi, A comparative analysis on concentration of pollutants in housing indoor-air between winter and summer, *KIEAE Journal*, 17(3), 2017.06, pp.125-131.)
- [7] L.C. Ng, A.K. Persily, S.J. Emmerich, IAQ and energy impacts of ventilation strategies and building envelope airtightness in a big box retail building, *Building and Environment*, 92, 2015.10, pp.627-634.
- [8] H.D. Nusantara, B. Erfianto, The anomaly detection in time series data of VOC (Volatile Organic Compound) to generate indoor air quality alerts, *Building of Informatics, Technology and Science (BITS)*, 4(4), 2023.03, pp.1821-1827.
- [9] 서울특별시청, 신축공동주택 실내공기질 측정자료(2019~2022년), <https://cleanindoor.seoul.go.kr/board.do?menuNo=226&contentsNo=&boardConfigNo=60&page=> // (Seoul Metropolitan Government, Indoor air quality measurement data for newly built apartment buildings(2019~2022), <https://cleanindoor.seoul.go.kr/board.do?menuNo=226&contentsNo=&boardConfigNo=60&page=>)
- [10] A. Singh, M. Islam, N. Dinh, Forecasting indoor air quality using machine learning models, 2024 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), 2024.01, pp.1-6.
- [11] 임연영, Blower Door Test를 이용한 공동주택의 기밀성능에 관한 연구, 서울과학기술대학교 석사학위논문, 2023.08. pp.36-37. // (Y.Y. Yim, A study on air-tightness performance of apartment using a blower door test, Master's thesis, Seoul National University of Science and Technology, 2023.08, pp.36-37.)
- [12] 윤계옥, 입주전 신축 공동주택의 휘발성유기화합물 및 폼알데하이드 실측에 관한 연구, 대한건축학회논문집 계획계, 제29권 제7호, 2013.07, pp.265-272. // (J.O. Yoon, Field measurement of VOC concentrations in new apartments, *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design*, 29(7), 2013.07, pp. 265-272.)
- [13] 윤요선, 장대회, 녹색건축인증 실내환경 분야 취득현황 및 설문조사 분석, 대한설비공학회 2022년도 하계학술발표대회 논문집, 2022.06, pp.1343-1344. // (Y.S. Yun, D.H. Jang, G-SEED indoor environment field acquisition status and survey analysis, SAREK Summer Annual Conference, 2022.06, pp.1343-1344.)
- [14] 윤요선, 녹색건축 인증제도 실내공기질 평가분야 개선을 위한 해외 인증기준 비교분석, 대한건축학회 추계학술발표대회논문집, 제42권 제2호, 2022.10, p.908. // (Y.S. Yun, Comparative analysis of overseas standards for improvement of indoor air quality evaluation of G-SEED, Autumn Annual Conference of AIK, 42(2), 2022.10, p.908.)
- [15] B. Xu et al., Study on the effect of an intermittent ventilation strategy on controlling formaldehyde concentrations in office rooms, *Atmosphere*, 13(1), 2022.01, 102.
- [16] Al-Okby et al., Evaluating of IAQ-index and TVOC parameter-based sensors for hazardous gases detection and alarming systems, *Sensors*, 22(4), 2022.02, 1473.
- [17] 기상청, 지역별상세관측자료, [https://www.weather.go.kr/plus/land/current/aws\\_table\\_popup.jsp](https://www.weather.go.kr/plus/land/current/aws_table_popup.jsp) // (Korea Meteorological Administration, Detailed observation data by region, [https://www.weather.go.kr/plus/land/current/aws\\_table\\_popup.jsp](https://www.weather.go.kr/plus/land/current/aws_table_popup.jsp))