

# 실증실험을 통한 측정 위치에 따른 주거공간 환기성능 평가\*

## Evaluation of Ventilation Performance of a Residential Unit for Different Sampling Points through Actual Field Tests

곽병창\*\* · 이수만\*\*\* · 김길태\*\*\*\* · 김종엽\*\*\*\*\*

Byung Chang Kwag\*\* · Soo Man Lee\*\*\* · Gil Tae Kim\*\*\*\* · Jong Yeob Kim\*\*\*\*\*

### Abstract

Ventilation plays an important role in controlling indoor air quality. Due to the recent spread of infectious diseases such as COVID-19 and with people spending more time indoors, there's been increased attention on the importance of ventilation performance. In many countries, ventilation is regulated by airflow rates and the number of air changes per hour (ACH). However, airflow rates and ACH alone do not provide an accurate account of actual indoor pollutant removal and ventilation uniformity in a space. This study looked into the ventilation performance of an actual residential unit using several sampling points instead of basing it off of airflow and air change rates. Literature review was used to derive relevant influencing factors and the tracer gas dilution method was used for the field test. The study measured air velocity, age of air, and ventilation efficiency at several locations and compared them to the average value at the center of the test space to determine the differences in ventilation performance at the selected measurement points. The study showed that different sampling locations resulted in different ventilation values. Findings of this study will be used to develop an experimental procedure for evaluating indoor ventilation performance of actual residential spaces.

**Keywords :** Ventilation Performance, Age of Air, Sampling Point, Ventilation Efficiency

### 1. 서 론

환기는 자연적 또는 기계적 수단을 이용해 실내외 공기를 교환함으로써 실내 공기를 쾌적하게 제어하는 행위이다(ASHRAE, 2010). 대부분 현대인들은 하루 일과 중 90% 이상을 실내에 머무는 것으로 나타나고 있으며, 그 중 약 14시간 정도를 주거공간에서 머무르는 것으로 나타났다(ASHRAE, 2010; 양원

호 외, 2010). 특히 최근 발생된 COVID-19 등과 같은 전염병의 확산으로 인해 재택근무, 자가격리, 비대면 수업 등이 증가되면서 집에 거주하는 시간이 증가하고 있는 것으로 나타났다(근거자료 추가). 실내 거주 시간이 증가함에 따라 거주자들의 안전하고 쾌적한 실내 공기환경 조성의 중요성이 높아졌으며, 이를 위한 실내 환기 성능에 대한 관심도 증가하고 있다(Sun and Zhai, 2020; 곽병창 외, 2021; Centers for Disease

\*본 연구는 국토교통부 건설분야 성능기반 표준실험절차 개발사업의 연구비지원(21DPSC-C163230-01)에 의해 수행되었습니다.

\*\*LH 토지주택연구원 연구정책부 수석연구원(주저자: byungchang.kwag@lh.or.kr)

\*\*\*LH 토지주택연구원 건설안전연구실 연구원

\*\*\*\*LH 토지주택연구원 건설안전연구실 수석연구원

\*\*\*\*\*LH 토지주택연구원 건설안전연구실 선임연구위원(교신저자: jykimgreen@lh.or.kr)

Control and Prevention, 2021; Schoen, 2020).

국내 주택 환기 관련 기준은 「건축물의 설비기준 등에 관한 규칙」에 따라 시간당 환기횟수를 사용하고 있다. 30세대 이상의 공동주택은 0.5회 이상의 시간당 환기횟수를 확보해야 하며, 30세대 미만 공동주택 및 단독주택에 대해서는 시간당 환기횟수가 0.5회 이상이 되도록 권장하고 있다(국토교통부, 2021).

다양한 연구를 통해 환기장치 가동에 따른 정량적 실내 환기 성능 개선이 확인되었다. 김기철 외(2011)은 공동주택을 대상으로 계절별 자연환기 사용 여부에 따른 환기횟수를 비교한 결과 자연환기를 사용하였을 때 장치를 사용하지 않은 경우와 대비하여 여름철에는 약 2.14배, 겨울철 약 1.56배 정도 환기횟수가 증가한다고 밝혔다. 이용준 외(2004)은 공동주택을 대상으로 자연환기 장치 사용에 따라 냉방기에는 71% 오염도가 감소하였으며, 난방기에는 9% 오염도가 감소하며, 중간기에는 73% 오염도가 감소하는 것을 보여주었다.

한편 공간 내 다양한 변수로 인해 환기 성능이 달라질 수 있으며, 특히 급기구와 배기구의 위치가 실내 환기 성능에 큰 영향이 있는 것으로 나타났다. 김기철 외(2011)은 실험을 통해 자연환기, 기계환기를 이용한 계절별 환기량을 비교한 결과, 기계환기 시스템의 급기구와 배기구의 위치, 그리고 자연환기 장치의 위치가 중요하다는 것을 보여주었다. 노광철 외(2006) 역시 급기구와 배기구 위치의 중요성을 강조하며 최적의 급배기구의 위치를 파악하는 연구를 수행하였다. 현세훈·박철수(2006)은 시뮬레이션을 통해 급기구와 배기구의 위치에 따른 실내 CO2 농도를 조사한 결과, 급기구와 배기구의 위치가 실내 CO2 농도에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다. 특히 최연희·송두삼(2017)은 급기구와 배기구의 위치에 따른 환기 성능에 끼치는 영향을 보여주었다. 최연희·송두삼(2017)의 연구에서 동일한 공간을 대상으로 급기구와 배기구의 위치에 따라 국소 환기

효율이 다르게 나타나는 것을 보여주었으며, 실내 대표점을 기준으로 산출된 환기 효율이 여러 지점에서 산출된 국소 환기 효율과 다르다는 것을 보여주었다. 즉 대표점을 바탕으로 환기 성능을 산출하는 방식은 실내 공간의 국소 지점에서의 환기 효율을 제대로 평가하기 어렵다는 것을 의미한다. 따라서 최연희·송두삼(2017)의 연구에서는 실내 공간에서 환기 성능을 평가하기 위해 새로운 평가 지표가 필요하다는 것을 제시하였다.

권경우 외(2006)은 신축 공동주택의 환기 방식별 환기량, 국소 평균 공기 연령, 환기 효율 측정을 통해 설계 풍량에 비해 실제 풍량이 대부분 낮게 측정되고 있으며, 동일 주택의 실별로도 차이가 나타나고 있으며, 신선한 외부 공기가 각 실로 균등하게 배분되지 않는 문제를 확인하였다. 손원득 외(2013)은 시뮬레이션을 활용하여 자연환기와 3중 환기를 비교하였다. 손원득 외(2013)은 창문의 위치에 따른 실내 풍속, 공기 연령, 공기 교환 효율을 분석하였으며, 그 결과 각 실의 환기 성능을 고려하는 것이 중요함을 보여주었다. 남상운 외(2013)은 다연동 온실의 환기 성능 평가를 위해 측고, 연동수, 측장의 유무, 천장의 위치 등 다양한 변수를 고려한 환기 성능을 비교하였다. 이를 통해 측정 위치에 따라서 환기율에 큰 차이가 발생하는 것을 확인하였다.

이러한 선행 연구는 급·배기구의 위치, 창문 위치, 측정 위치 등 주거 공간의 공간적인 영향에 의해 환기 성능이 달라질 수 있음을 보여주는 것으로서 여러 영향 요소들을 고려한 공간의 환기 성능을 효과적으로 평가하는 것이 필요함을 의미한다. 즉 환기 횟수로 환기 성능을 평가하는 기존의 평가 방법과 함께 실 공간의 특성을 고려한 환기 성능 평가 방법 개발과 이를 위한 체계적인 실험 절차 개발이 필요함을 의미한다.

본 연구는 실환경 기반 환기 성능 평가 방법 및 실험 절차 개발을 위한 기초 연구로서, 문헌 조사를 통해 환기 횟수 방식 외에 실환경 환기 성능을 파악할 수

있는 방법을 조사하고 각각의 특징을 분석하며, 실 환경 환기 성능 평가에 영향을 미치는 인자들을 도출한다. 그리고 실험을 통해 여러 영향 인자 중 실제 환경에서 국소 부위별 환기 성능의 차이를 측정, 분석하여 실 공간의 특성을 고려한 환기성능 평가방안을 마련하고자 한다.

본 연구는 주거공간 환기성능과 관련된 국내외 선행연구 및 관련 표준과 기준 등 문헌조사를 통해 (1) 주거건물의 환기성능에 영향을 줄 수 있는 실내 공간 요소와 실내 환기 성능을 평가하기 위한 방법을 파악하고, (2) 현재 표준에서 제시한 방법과 선행 연구에서 사용한 평가 방법 등이 가지고 있는 한계성을 분석한다. 그리고 (3) 세종시에 위치한 실증주택을 대상으로 실험을 수행하여 동일 공간 안에서 측정 위치별 실내 환기 성능을 비교한다.

## 2. 실내 환기성능 평가 관련 기술동향

### 2.1 국내외 환기성능 평가관련 표준 현황

건물 환기와 관련된 환기성능평가 실험방식, 환

경조건 등을 파악하기 위하여 국내 KS 표준(한국 산업표준, 2020a; 2020b; 2020c; 2018; 2021a; 2021b; 2021c; 2022; 한국공기청정협회, 2021)과 국외 ISO, ASTM, ASHRAE, EN 등과 같은 표준 및 기준(ASM, 2017; 2018; International Organization for Standardization, 2014; 2017; 2019; European Standards, 2010; 2019)을 검토한 결과는 Table 1 및 Table 2와 같다. 국내 표준은 KS B 6879 등 총 9개 표준을 검토하였으며, 국외 표준은 ISO 16494:2014 등 총 7개 표준 및 기준을 검토하였다. Table 1과 Table 2에 나타난 것과 같이 검토된 건물 환기 관련된 표준 및 기준은 환기장치의 기계적, 물리적 성능을 평가하는 방법과 추적가스법 등을 이용한 건물의 실내 환기 성능 평가방법 등 크게 2가지로 구분할 수 있었다.

KS B 6879나 ISO 16494등과 같이 환기장치의 기계적, 물리적 성능을 평가하는 표준은 장치 성능을 다양한 항목을 대상으로 성능을 평가하는 절차 등과 관련 실험 장비에 대한 정보를 제공하고 있다. 하지만 기존 환기 관련 표준들은 대체로 실험실 공간의

**Table 1.** The Standards for Ventilation in South Korea

Standard	Title	Category
KS B 6879	Heat Recovery Ventilators	
KS F 2921	Standard Test Method for Airflow Rate of Natural Ventilation System	
KS F 2807	Standard Test Method for Measuring Air Volume Flow Rate of Ventilation and Air Conditioning System	Evaluation of mechanical performances of ventilators
KS C IEC 60665	AC Electric Ventilating Fans and Regulators for Household and Similar Purposes	
KS B 6141	Air Filter Units for Ventilation	
SPS-KACA016-0146	Testing Methods for Fine Dust Removal Efficiency of Range Hoods	
KS F 2603	Standard Test Method for Measuring Indoor Ventilation Rate (Carbon Dioxide Method)	Evaluation of indoor ventilation performances
KS I ISO 16000-8	Indoor Air – Part 8: Determination of Local Mean Ages of Air in Buildings for Characterizing Ventilation Conditions	
KS L ISO 12569	Thermal Performance of Buildings – Determination of Air Change in Buildings – Tracer Gas Dilution Method	

**Table 2.** The International Standards for Ventilation

Standard	Title	Category
ISO 16494:2014	Heat recovery ventilators and energy recovery ventilators- Method of test for performance	Evaluation of mechanical performances of ventilators
ISO 16494-2:2019	Heat recovery ventilators and energy recovery ventilators – Method of test for performance – Part 2: Assessment of measurement uncertainty of performance parameters	
EN 14134:2019	Ventilation for buildings – Performance measurement and checks for residential ventilation systems	
ASTM D6245-18	Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation	Evaluation of indoor ventilation performances
ASTM E741-11(2017)	Standard Test Method for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution	
ISO 12569:2017	Thermal Performance of Buildings and Materials – Determination of Specific Airflow Rate in Buildings – Tracer Gas Dilution Method	
EN 15665:2009	Ventilation for buildings – Determining performance criteria for residential ventilation systems	

특정 환경 조건에서 장치를 설치한 후 환기장치의 성능을 평가하는 방식으로 진행이 되기 때문에, 환기 장치의 본연의 성능을 평가하고 파악하는 데에는 효과적이지만 실제 주거건물의 실내 환기 성능을 평가하는 데에는 충분한 정보를 제공하지 못한다. 실제 주거공간 안에서는 덕트 길이, 급·배기구의 위치 및 개수, 공간의 형태 등 다양한 공간적 변수들이 존재하고 있으나, 기존 환기 관련 표준들은 이런 변수들을 고려할 수 없는 것이다. 결국 기존 표준을 기반으로 장치의 성능이 검증될 수 있고 공간의 부피를 고려하여 법적 환기 기준에 맞는 환기량[m<sup>3</sup>/h, CMH]을 제공한다고 해도, 실내 공간 안에서 기류의 정체가 없거나 오염물질 희석률에서 차이가 없는 고른 환기 성능을 제공할 수 있는지를 보장할 수는 없는 것이다.

KS I ISO 16000, ISO 12569, ASTM D6245 등과 같이 건물의 실내 환기 상태를 평가하는 표준은 대체로 추적가스법을 이용하고 있으며, CO<sub>2</sub> 와 SF<sub>6</sub>와 같은 추적가스의 농도를 파악하여 국소 평균 공기

체류시간을 계산하고 환기효율 등을 산출하여 단순 기계장치의 성능을 평가하는 것이 아닌 실내 공간의 환기 상태를 평가하는 것을 목적으로 한다. 그런데, 이러한 표준에서 국소 평균 공기 체류시간을 측정하기 위한 측정점의 구체적인 정보와 측정시간 등에 대한 구체적인 정보는 미흡한 것으로 나타나, 실제 환경에서 실내 환기 성능을 평가하기 위한 표준적인 방법을 개발하기 위해서는 명확한 측정점 및 측정시간 설정 등과 같은 추가 정보가 필요한 것으로 나타났다.

특히 국외의 기준 중 EN 15665은 국내외에서 건물의 환기상태를 보여주기 위해 일반적으로 사용하는 환기횟수 방식은 공간의 환기성능을 대변하기 위한 간단한 방법이지만, 환기에 의해 실내 환경에서 오염물질이 적절히 희석되는지, 공간별 또는 구역별로 고른 환기성능을 보여주는지 등 대상 공간의 환기성능을 실제로 보여주는 데에는 한계가 있으며, 따라서 공기연령 또는 오염물질 희석률 등과 같은 평가지표 도입의 필요성을 제시하였다.

## 2.2 국내외 환기관련 선행연구 조사

건물 실내 환기와 관련된 선행연구 26개 조사를 통해 연구동향과 함께 실내 환기 성능에 영향을 주는 인자를 파악하고자 하였다. 검토한 선행연구들은 대체로 상업건물, 공동주택, 단독주택 및 교실, 어린이집, 농업시설 및 축사 등 다양한 건물을 대상으로 환기구의 위치, 측정점의 위치 등 여러 영향 인자에 따른 건물 실내 환기 상태 평가와 관련된 연구를 진행하였으며, 주로 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 시뮬레이션을 이용하여 여러 인자들의 영향을 파악하였다.

현세훈·박철수(2006) 등과 같은 선행연구는 건물의 실내 공간적 요소가 환기 성능에 끼치는 영향을 보여주었으며, 이를 위해 공기연령, 기류분포, 오염물질 농도 저감 등과 같은 지표를 사용하였다(현세훈·박철수, 2006; 최연희·송두삼, 2017; 권경우 외, 2006; 조우진 외, 1999; 이우원·한화택, 1999; 최선호 외, 2000; 강대호 외, 2001; 장재수 외, 2005; 박진철 외, 2005; 홍봉재, 2007; 권혁민 외, 2008; 김묘선 외, 2010; 구재현, 2012; 손원득 외, 2013; 이종은 외, 2015; 황해성, 2020; Sherman and Wilson, 1986; Meiss et al., 2013; Huifen et al., 2014; Merzkirch et al., 2016; You et al., 2017; Cho et al., 2018; Peng et al., 2019; Rabanillo-Herrero et al., 2020; Zhou et al., 2020; Zhao et al., 2021). 비록 대상 건물의 종류와 규모 등이 다르지만, 이와 같은 선행연구를 통해 공간 안에서 환기구의 위치, 창문의 위치, 측정 위치 등에 따라 국소 공기연령과 오염물질 농도 저감률이 다른 것을 확인할 수 있었다.

선행연구에서 건물의 실내 환기성능과 직접적인 연관이 있는 논문의 주요 평가지표는 공기연령, 기류분포, 오염물질 농도 등의 지표가 사용되었다. 이와 같은 지표를 실험을 통해 확인하기 위해서는 추적가스를 활용하여 실내의 환기성능을 측정하는 방식을 사용한다. 그런데 이러한 방식을 활용하는 대

부분의 연구는 측정점의 위치, 개수, 측정시간, 반복 횟수 등의 구체적인 정보가 제시되지 않거나 동일하지 않은 것을 확인하였다. 특히 선행 논문을 바탕으로 환기 성능 평가를 위해서는 측정 위치가 중요한 것으로 파악되었다(최연희·송두삼, 2017; 강대호 외, 2001; 장재수, 2005; 황해성 외, 2020). 즉 공간의 환기성능평가를 위해 단순히 하나의 대표 측정점을 이용하거나 몇 군데에서 측정된 값을 평균한 값을 이용하여 환기성능을 평가할 것이 아니라, 공간의 형태와 크기 등을 고려하여 측정구역을 구분하는 국소적 환기성능평가의 필요성을 확인했다.

## 2.3 실내 환기성능 영향 인자 도출

국내외 환기성능 평가관련 표준과 선행연구 조사를 통해 환기장치의 성능이 법적 기준을 만족하더라도 실내 환기성능을 보여주는 것에 한계가 있는 것을 확인하였으며, 환기 풍량, 측정위치, 급배기구의 위치 및 개수, 공간형태 등과 같은 인자들이 실내 공간의 환기 성능 및 평가에 영향을 주기 때문인 것으로 나타났다. 선행연구에서 검토되었던 영향 인자들을 Table 3과 같이 분류하였다. 공간 형상이나 환기

Table 3. Categorization of Parameters

Design Parameter	Operation Parameter
Floor Plan	Ventilation Airflow Rate
Space Size	Ventilation Time
Location of Vents	Operation Mode
Number of Vents	Maintenance Status
Air Tightness (Infiltration)	
Evaluation Parameter	
	Measurement Point
	Measurement Time
	Measuring Rate
	Contaminant Concentration
	Air Distribution

구의 위치, 환기풍량과 같은 요소들은 각각 디자인과 관련된 인자 및 환기시스템 운영과 관련된 인자로서 실내 환기 성능에 직접적인 영향을 주는 인자로 분류되었다. 그리고 측정 위치와 측정 기간, 그리고 측정 주기 등은 실내 환기성능 평가와 관련된 인자로 분류되었다. 실내 환기성능 평가를 위해서는 Table 3에 분류된 인자 중 성능평가와 관련된 인자를 중심으로 명확한 실험절차가 구성되어야 한다. 또한 공간의 규모와 형상에 따라 측정 위치가 달라질 수도 있기에 디자인 요소 및 운영 요소가 고려되어 실험절차가 개발되어야 할 것이다.

### 3. 측정 위치별 환기 성능 평가

#### 3.1 실험 방법

본 연구는 실내 환기성능에 영향을 주는 인자 중 측정 위치에 따른 환기성능 차이를 파악하였다. 본 연구는 SF6(육불화유황가스, Sulfur hexafluoride) 추적가스를 이용하여 여러 측정 위치에서의 추적가스 농도 변화를 모니터링하고, 각 위치별 공기연령을 계산하여, 측정 위치별 환기성능 차이를 파악하

였다. 실험은 Fig. 1과 같이 세종시에 위치한 실증주택 1세대의 침실에서 진행되었다. Fig. 2와 같이 추적가스를 분사하는 튜브와 추적가스를 측정점에서 포집할 수 있도록 튜브를 설치하였고, 멀티가스모니터를 이용하여 각 측정점에서의 추적가스 농도를 모니터링 하였다. 본 실험에서 사용한 추적가스법은 감소법을 사용하였다. 측정 대상공간은 Fig. 1과 같이 세대의 침실3이며 실험 대상공간의 환경 정보는 Table 4와 같다.

정점의 위치는 Fig. 3과 같으며, 동일 측정 위치에서 측정 높이를 1.1m와 1.8m로 구분하여 측정하였다. 침실3을 대상으로 환기장치를 가동하였을 때 각 측정점에서의 풍속과 추적가스 농도 변화를 측정하였다. 측정된 추적가스 농도 변화를 토대로 각 측정점에서의 공기연령과 환기효율을 계산하였다. 실험에서 풍속, 추적가스 농도, 대상공간의 침기율 등을 측정하기 위해 3차원 풍향풍속계, 멀티가스모니터, 블로어도어 장비를 활용하였으며, 각 장비들의 사양은 Table 5와 같다.

측정점의 위치는 Fig. 3과 같으며, 동일 측정 위치

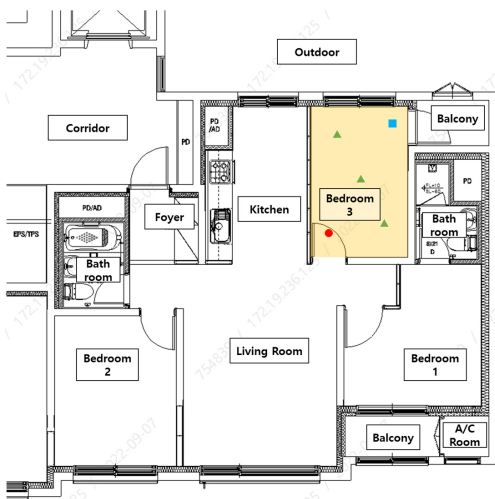


Fig. 1. The Floor Plan of the Residential Unit

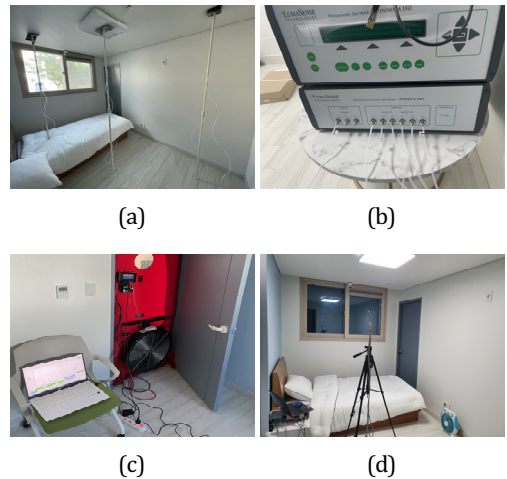


Fig. 2. The Images of the Field Tests; (a) Tracer-Gas Dilution Test, (b) Multi-Gas Monitor, (c) Infiltration Test, (d) Airflow Velocity Test

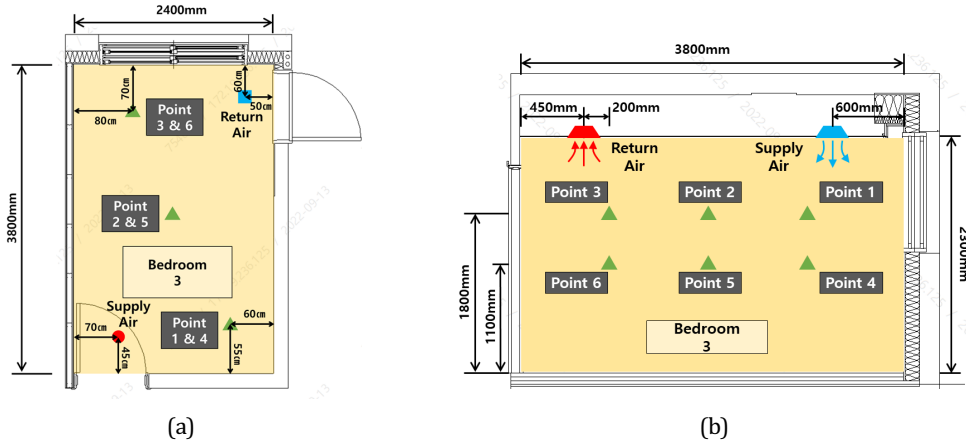


Fig. 3. The Tracer-Gas Sampling Points: (a) Floor Plan, (b) Side Section

Table 4. Descriptions of the Test Room

Category	Specification
Room Size	- Length 3.8m
	- Width 2.4m
	- Height 2.3m
Infiltration Rate	Air Change per Hour (ACH) = average 7.88
	- Depressurization 7.65
	- Pressurization 8.10
Ventilation Flow Rate	Supply Air 17m <sup>3</sup> /h
	Return Air 15m <sup>3</sup> /h
Ventilation Rate	Air Change per Hour (ACH) = 0.76

에서 측정 높이를 1.1m와 1.8m로 구분하여 측정하였다. 침실3을 대상으로 환기장치를 가동하였을 때 각 측정점에서의 풍속과 추적가스 농도 변화를 측정하였다. 측정된 추적가스 농도 변화를 토대로 각 측정점에서의 공기연령과 환기효율을 계산하였다. 실험에서 풍속, 추적가스 농도, 대상공간의 침기율 등을 측정하기 위해 3차원 풍향풍속계, 멀티가스모니터, 블로어도어 장비를 활용하였으며, 각 장비들의 사양은 Table 5와 같다.

실험 시간은 한국산업표준(KS I ISO 16000-8)에 따라 4시간 동안 농도 감소법으로 진행되었다(한국

Table 5. Description of the Test Equipment

Equipment	Specification
Multi-gas monitor	Model: INNOVA 1512 & 1403
	Type: Photo-acoustic Multi-gas Analyzer
	Repeatability: 1% of measured value
	Pumping Rate: 30cm <sup>3</sup> /s Volume Flow Rate: 1.4-17.5ml/s (SF6)
Blower Door System	Model: Minneapolis Blower Door System with DG-1000 Gauge
	Flow Accuracy: +/-3%
3D Anemometer	Model: WA-790
	Type: Ultrasonic 3D Anemometer
	Range: 0~10m/s
	Accuracy: ±2%+0.02m/s Resolution: 0.005m/s

산업표준, 2020c). 추적가스 분사장치와 팬을 이용하여 실험공간의 모든 측정점에서 추적가스의 농도를 3.5cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>에 도달하도록 하였다. 실험을 통해 각 측정점에서 SF6의 농도 변화를 측정한 후 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 측정 위치별 국소 평균 공기연령을 계산하고 식 (3)을 이용하여 각 측정 위치별 환기효율을 계산하였다(한국산업표준, 2020c). 또한 3

차원 풍향풍속계를 이용하여 각 추적가스 농도 측정 위치에서 실내 공기 이동속도를 측정하였다.

$$\bar{\tau} = \frac{\int_{t_0}^{\infty} \phi dt}{\phi_{t=t_0}} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} \phi_t dt &= \int_{t_0}^{t_e} \phi_t dt + \int_{t_e}^{\infty} \phi_{t=t_e} e^{-\lambda_{tail}(t-t_e)} dt \\ &= \Delta t \left( \frac{\phi_{t_0}}{2} + \phi_{(t_0+1)\Delta t} + \dots + \phi_{(t_0+(n-1)\Delta t)} + \frac{\phi_{t_e}}{2} \right) \\ &\quad + \frac{\phi_{t=t_e}}{\lambda_{tail}} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\tau_n = \frac{V}{Q_0} \quad (3)$$

$$E_i = \frac{\tau_n}{\tau_i} \quad (4)$$

$\tau$  : 국소 평균 공기 체류시간(공기연령)

$\tau_n$  : 명목환기 시간 [h]

$t$  : 시간 [h]

$\phi_{t=t_0} = t=t_0$ (지연 시작) 추적가스초기농도 ( $\text{cm}^3/\text{m}^3$ )

$\lambda_{tail}$  : 시간에 대한 농도의 로그 그래프 기울기의 절댓값

$V$  : 실내공간 체적 [ $\text{m}^3$ ]

$Q_0$  : 환기량 [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]

$E_i$  : 측정 위치 i에서의 환기 효율

### 3.2 실험 결과

Fig. 3과 같이 실험 대상 공간이 작고 직사각형의 단순한 형태임에도 불구하고 Fig. 4와 같이 측정 위치에 따라 추적가스의 농도 감소 형태가 다르며, 측정 위치별로 국소공기연령 값도 차이가 큰 것으로 나타났다.

실험결과 Fig. 4와 Table 6에 나타난 바와 같이 실내 중앙상단에서의 공기연령이 가장 낮게 나왔으며, 측정위치가 호흡선 높이 1.1m에서 방 모서리 쪽에 위치한 Point-4와 Point-6에서의 공기연령이 상대적으로 높게 나타난 것을 확인할 수 있었다. 또한 3차원 풍향풍속계를 이용하여 동일 위치에서 기류 속도

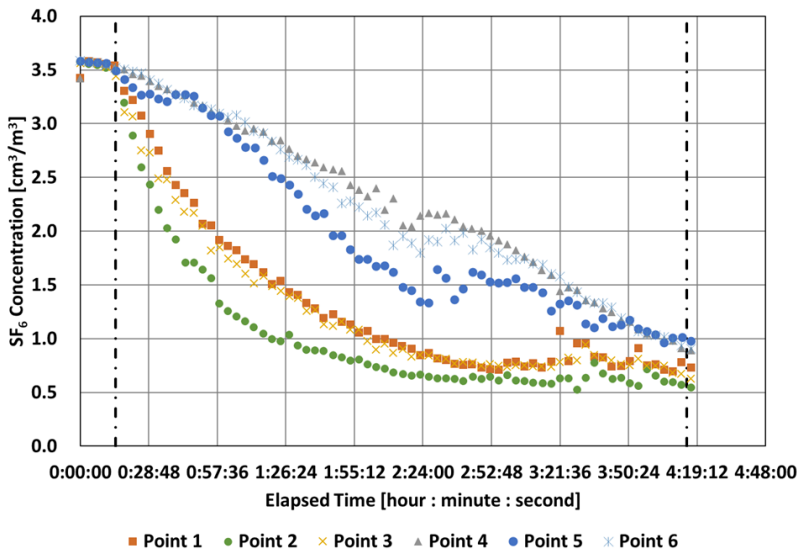


Fig. 4. The Tracer-Gas ( $\text{SF}_6$ ) Concentration Changes at Different Sampling Points



를 측정한 결과 측정점 Point-2에서 3분 평균 속도가 가장 높게 나타났으며, Point-4와 Point-6에서 풍속이 상대적으로 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과는 동일한 실내 공간에서 환기장치를 가동한 경우 높이 1.8m인 상층부에서의 공기 속도가 높이 1.1m에 비해 상대적으로 빠르고 이에 따라 환기성능이 더 높은 것을 의미하며, 또한 급기구와 배기구 사이의 거리가 가장 짧은 대각선 경로에서 환기가 잘 이루어지는 경로인 것을 보여주고 있다. 그리고 이 경로를 벗어나게 되면 상대적으로 환기 성능이 떨어지는 결과를 보여주고 있다. 본 실험에서는 동일 높이에서 공기연령의 차이가 약 1.2~1.3배 정도 차이가 나는 것을 확인하였다.

환기효율 측면에서도 Table 6에 나타난 것과 같이 공기연령이 낮은 측정점의 환기효율이 공기연령이 높은 측정점의 환기효율보다 높은 것으로 나타났다. 이는 실내 공간 안에서 측정위치에 따라 공기연령 및 환기효율이 다를 수 있기 때문에, 단순히 환기횟수를 이용하여 실내 환기 성능을 평가하는 환기횟수 방식과, 공간 안에서 명확한 기준 없이 추적가스의

농도를 측정하고 국소평균공기연령을 계산하는 방식으로는 실환경 기반 환기성능을 평가하는 것에 한계가 있음을 의미한다.

Table 7과 같이 공간의 중심점과 다양한 측정점 평균값과 비교한 결과, 측정점의 조합별 평균값과 중심점과의 공기연령 및 환기효율에서 차이가 있는 것을 확인할 수 있었다. 공간의 중심점인 Point 5에서의 공기연령은 8,036[s]인 반면, 높이 1.8m에 위치한 Point 1부터 Point 3의 평균값은 5,131[s]이었으며, Point 4부터 Point 6의 평균값은 9,021[s]로 나타났다. 이에 따라 Point 5 대비 각각 36%와 10% 정도 공기연령에서 차이가 나는 것으로 나타났다. 전체 측정점 평균값과의 차이는 약 19% 정도 발생되는 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구는 주거공간을 대상으로 실환경 기반 환기 성능 평가방법 및 실험절차를 개발하기 위한 기초연구로서 실환경 기반 환기성능 평가도입의 필요성과

**Table 6.** Test Results in Airflow Rate, Age of Air, and Ventilation Efficiency

Sampling Point	Height [m]	Air Velocity [cm/s]	Age of Air [s]	Ventilation Efficiency
Point 1	1.8	8	5,655	0.835
Point 2	1.8	9	4,278	1.103
Point 3	1.8	8.4	5,459	0.865
Point 4	1.1	6	9,578	0.493
Point 5	1.1	7.5	8,036	0.587
Point 6	1.1	6.5	9,448	0.500

**Table 7.** Comparison Analysis between the Center Point (Point 5) and Other Point Combinations

Sampling Point	Height [m]	Air Velocity [cm/s]	Age of Air [s]	Ventilation Efficiency
Center Point (Point 5)	1.1	7.5	8,036	0.587
Average (Point 1,2,3)	1.8	8.5	5,131	0.934
Average (Point 4,5,6)	1.1	6.7	9,021	0.527
Average (Point 1 - 6)	-	7.5	7,076	0.731

실험절차 개발을 위해 고려해야 할 요소 및 방법을 제시하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위해 환기관련 표준 및 선행연구 조사 등 문헌조사를 수행하고, 추적가스법을 이용한 실증 실험을 진행하였다. 주요 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 환기 관련 국내외 표준을 조사한 결과, KS I ISO 16000, ISO 12569, ASTM D6245 등과 같이 건물의 실내 환기 상태를 평가하는 표준은 대체로 추적가스법을 이용하며 국소 평균 공기 체류시간을 계산하고 환기효율 등을 산출하는 방식으로 단순기계장치의 성능을 평가하는 것이 아닌 실내 공간의 환기 상태를 평가하는 것을 목적으로 한다. 그런데, 이러한 표준에서 국소 평균 공기 체류시간을 측정하기 위한 측정점의 구체적인 정보와 측정시간 등에 대한 구체적인 정보는 미흡한 것으로 나타나, 실제 환경에서 실내 환기 성능을 평가하기 위한 표준적인 방법을 개발하기 위해서는 공간의 크기 및 형태에 따른 측정점의 위치 및 측정시간 등과 같은 추가 정보가 필요한 것으로 나타났다.
- (2) 환기 관련 선행연구 조사 결과, 대체로 선행연구에서 CFD 전산유체역학 시뮬레이션을 활용하여 다양한 건물을 대상으로 환기구의 위치, 측정점의 위치 등 여러 영향 인자가 실내 환기 성능에 끼치는 영향을 파악하고자 하였다. 그리고 여러 영향 요소들로 인하여 측정 위치에 따라 국소 공기연령과 오염물질 농도 저감률 결과가 달라질 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 하지만, 선행연구에서 사용한 공기연령 측정 방식이 연구별로 동일하지 않은 것으로 나타났으며, 이와 같은 원인으로 환기 관련 국내외 표준에서 명확한 실험 절차를 제시하고 있지 않기 때문에 파악되었다.
- (3) 본 연구는 실증 실험을 통해 동일 공간 안에서

측정 위치별 공기연령 및 환기효율 등 환기 성능에 차이가 있음을 보여주었다. 해당 공간은 시간당 환기횟수가 0.76으로 법적 기준을 만족하고 있지만 실험 결과 국소 부위별 환기 성능이 다른 것으로 나타났다. 이와 같은 실험은 환기횟수를 통해 해당 공간의 환기성능을 간단하게 파악할 수 있는 지표로 활용할 수 있지만, 실제 실내 환경을 대상으로 구체적인 환기 성능을 파악하기에는 한계가 있을 수 있음을 의미한다.

- (4) 추적가스법을 이용하여 직사각형 형태의 소형 침실 공간을 대상으로 측정 위치별 추적가스 농도 변화를 측정하고 공기연령을 계산한 결과, 동일한 실내 공간에서 측정 위치에 따라 추적가스 농도 변화가 다른 것을 확인할 수 있었으며 공기연령에서 최대 2.24배 차이가 나타났다. 측정 위치가 1.8m 높이 실내 중앙에서 공기연령이 가장 낮게 나타났으며, 호흡선 높이인 1.1m에서 방 모서리 쪽에 위치한 측정점에서 공기연령이 상대적으로 높게 나타났다. 이로 인하여 공기연령이 낮은 측정점의 환기효율이 공기연령이 높은 측정점에서의 환기효율보다 상대적으로 높게 나타났다.

이와 같은 결과는 급기구와 배기구가 천장에 설치되어 있기 때문에 급기구를 통해 실내로 유입된 신선한 외부 공기가 배기구쪽으로 이동하는 과정에서 상층부(1.8m 높이)에서 이동속도가 호흡선(1.1m 높이)보다 상대적으로 빠르기 때문인 것으로 파악되었다. 즉, 급기구와 배기구 사이의 거리가 가장 짧은 1.8m 높이 두 환기구 사이의 대각선 경로에서 공기연령이 주변 측정점보다 상대적으로 낮고 환기가 잘 이루어지는 것을 의미하며, 이 경로에서 벗어난 측정 위치에서는 상대적으로 환기 성능이 낮은 것을 의미한다. 따라서 실내 환기 성능을 평가하기 위해 명확한 측정 위치 기준 없이 추적가스의 농도를 측

정하고 국소평균공기연령을 계산하는 방식은 실환경 기반 환기성능을 평가하는데 한계가 있을 수 있음을 의미한다.

- (5) 공간의 중심점에서의 측정 결과와 다양한 측정점 조합의 평균 측정값과 비교한 결과, 측정점의 조합별 평균값과 중심점과의 공기연령 및 환기효율에서 차이가 있는 것을 확인하였다. 공간의 중심점에서의 측정결과와 1.8m 측정점 평균값 및 1.1m 측정점 평균값과의 차이가 약 36%와 10% 정도인 것으로 나타났고, 전체 측정점 평균과의 차이는 약 19%인 것으로 나타났다. 즉, 이와 같은 실험 결과는 실내 환기성능 파악을 위한 측정점을 실내 공간 중심점으로 설정하는 경우 정확한 환기 성능 파악에 한계가 있을 수 있음을 의미하고, 정확한 환기성능 파악을 위한 체계적인 측정점 설정이 필요한 것을 의미한다.

## 참고문헌

- 강대호·함흥돈·박병윤·손장열(2001), “추적가스를 이용한 공조시스템의 환기성능 및 국소배기성능 평가에 관한 실험적 연구”, 「대한건축학회 학술발표대회 논문집」, 21(1): 685~688.
- 곽병창·김태민·김길태·지원길·박경용(2021), “공동주택 세대 습기 제어를 위한 환기 시스템 운영 전략 효과 연구”, 「한국건축환경설비학회 논문집」, 15(5): 572~585.
- 구재현(2012), “기계 환기시스템의 실내 환기성능 특성 해석에 관한 연구”, 「한국가스학회지」, 16(2): 31~37.
- 국토교통부(2021), “건축물의 설비기준 등에 관한 규칙, 국토교통부령 제882호, 시행 2021.08.27.”, 2022.09. 16 읽음. <https://www.law.go.kr>.
- 권경우·조시진·최의성·박준석(2006), “공동주택의 환기방식별 다수실 환기 성능에 관한 연구”, 「대한설비공학회 2006년도 하계학술발표대회 논문집」, 399~404.
- 권혁민·양정훈·석호태·이성재·양기영(2008), “CFD를 이용한 공동주택 천정플래넘 환기시스템 성능 평가”, 「한국건축환경설비학회 2008년 추계학술발표대회 논문집」, 301~304.
- 김기철·성상철·노광철·오명도(2011), “계절별 공동주택 환기성능평가”, 「대한설비공학회 2011년도 하계학술발표대회 논문집」, 751~756.
- 김묘선·김영일·정광섭(2010), “급·배기 위치에 따른 환기성능 연구”, 「대한설비공학회 2010년도 하계학술발표대회 논문집」, 317~323.
- 남상운·김영식·서동욱(2013), “다연동 플라스틱 온실의 자연환기성능 평가”, 「생물환경조절학회지」, 22(1): 7~12.
- 노광철·한창우·오명도(2006), “환기가 되는 강의실에서 천장형 에어컨의 풍량이 실내공기질에 미치는 영향”, 「대한설비공학회 2006년도 동계학술발표대회 논문집」, 24~24.
- 박진철·유형규·차진영(2005), “공동주택에서의 실외 급·배기구 위치에 따른 환기효율 향상 연구”, 「한국태양에너지학회 논문집」, 25(2): 71~79.
- 손원득·김도훈·임시내·이왕희·김정호·박경순(2013), “공동주택의 환기타입별 성능평가방법에 관한 연구”, 「대한설비공학회 2013년도 하계학술발표대회 논문집」, 567~570.
- 손원득·김도훈·임시내·이왕희·김정호·박경순(2013), “공동주택의 환기타입별 성능평가방법에 관한 연구”, 「대한설비공학회 2013년도 하계학술발표대회 논문집」, 567~570.
- 양원호·손부순·윤충식·이기영(2010), 「국민일일 시간활동 양상에 따른 개인노출 평가연구」, 국립환경과학원.
- 이용준·이승복·이경희(2004), “실내공기질을 고려한 공동주택의 하이브리드 환기시스템의 성능평가”, 「한국생태환경건축학회」, 4(3): 203~210.
- 이우원·한화택(1999), “배기구 위치 및 풍량변화에 따른 실내환기효율의 측정 실험”, 「대한설비공학회 1999년도 하계학술발표대회 논문집(I)」, 372~378.
- 이종은·강재식·김유민(2015), “하이브리드 환기시스템의 환기성능 평가분석”, 「한국생활환경학회지」, 22(3): 454~459.
- 장재수·노광철·오명도(2005), “냉방시 시스템에어컨과 환기유닛 적용 강의실에서 실내 CO2 농도와 국

- 소평균공기 연령 연구”, 「대한설비공학회 논문집」, 17(8): 36~746.
19. 조우진·윤동원·손장열·이승민(1999), “공기조화에  
서 공기취출방식에 따른 실내공간의 환기효율 및 온  
도분포 특성평가”, 「대한건축학회 논문집」, 15(4):  
205~212.
  20. 최선호·한화택·정광섭·박영철·이정재(2000), “냉  
방조건시의 개별공조시스템에 의한 환기특성”, 「대한  
설비공학회 2000년도 동계학술발표회 논문집(I)」,  
164~169.
  21. 최연희·송두삼(2017), “실험을 통한 환기시스템의  
국소적 환기효율 분석”, 「대한설비공학회 논문집」,  
29(2): 63~67.
  22. 한국공기청정협회(2021), 「SPS-KACA016-0146 가  
정용 레인지 후드의 미세먼지 제거효율 시험방법」.
  23. 한국산업표준(2018), “KS F 2921, 자연환기설비의 환  
기성능 시험방법”, 2022.09.15 읽음. [https://standard.  
go.kr/](https://standard.go.kr/).
  24. 한국산업표준(2020a), “KS B 6141 환기용 공기 필터  
유닛”, 2022.09.15 읽음. <https://standard.go.kr/>.
  25. 한국산업표준(2020b), “KS B 6879 열회수형 환기 장  
치”, 2022.09.15 읽음. <https://standard.go.kr/>.
  26. 한국산업표준(2020c), “KS I ISO 16000-8 건물에서  
의 환기상태 평가를 위한 국소 평균 공기 체류시간의  
측정”, 2022.09.15 읽음. <https://standard.go.kr/>.
  27. 한국산업표준(2021a), “KS F 2603 실내 환기량 측  
정방법(이산화탄소법)”, 2022.09.15 읽음. [https://  
standard.go.kr/](https://standard.go.kr/).
  28. 한국산업표준(2021b), “KS F 2807, 공기조화 - 환기  
설비의 풍량 측정방법”, 2022.09.15 읽음. [https://  
standard.go.kr/](https://standard.go.kr/).
  29. 한국산업표준(2021c), “KS L ISO 12569 건물 열 성능  
-건물 내 환기 측정 - 추적 가스 희석법”, 2022.09.15  
읽음. <https://standard.go.kr/>.
  30. 한국산업표준(2022), “KS C IEC 60665 가정용 환풍  
기 및 조절기의 성능 측정 방법”, 2022.09.15 읽음.  
<https://standard.go.kr/>.
  31. 현세훈·박철수(2006), “취출구 위치에 따른 실내 CO2  
농도 분석”, 「대한건축학회 2006년도 학술발표대회  
논문집」, 653~656.
  32. 홍봉재(2007), “환기방식 및 급배기구의 위치에 의한  
실내 환기특성 평가”, 「한국건축환경설비학회 논문  
집」, 1(3): 38~43.
  33. 황해성·이성호·한승호(2020), “컨테이너형 스마트  
팜의 재배 환경 개선을 위한 환기 효율 평가”, 「대한기  
계학회 논문집」, 44(11): 873~879.
  34. American Society for Testing and Materials (2017),  
ASTM E741-11 Standard Test Method for Determining  
Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer  
Gas Dilution, Accessed September 15, 2022. [https://  
www.astm.org/e0741-11r17.html](https://www.astm.org/e0741-11r17.html).
  35. American Society for Testing and Materials (2018),  
ASTM D6245-18 Standard Guide for Using Indoor  
Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor  
Air Quality and Ventilation, Accessed September  
15, 2022. <https://www.astm.org/d6245-18.html>.
  36. ASHRAE (2010), *Guideline 10, Interactions Affecting  
the Achievement of Acceptable Indoor Environments*,  
American Society of Heating, Refrigerating and Air-  
Conditioning Engineers.
  37. Centers for Disease Control and Prevention (2021),  
Ventilation in Buildings, Accessed September 16,  
2022. [https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/  
community/ventilation.html](https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/community/ventilation.html).
  38. Cho, G. Y., M. S. Yeo and K. W. Kim (2018), “Design  
Parameters of Double-Skin Façade for Improving  
the Performance of Natural Ventilation in High-Rise  
Residential Buildings”, *Journal of Asian Architecture  
and Building Engineering*, 12(1): 125~132.
  39. European Standards (2010), EN 15665:2009 Ven-  
tilation for Buildings. Determining Performance  
Criteria for Residential Ventilation Systems, Accessed  
September 15, 2022. [https://www.en-standard.eu/  
bs-en-15665-2009-ventilation-for-buildings-deter-  
mining-performance-criteria-for-residential-ventil-  
ation-systems/](https://www.en-standard.eu/bs-en-15665-2009-ventilation-for-buildings-determining-performance-criteria-for-residential-ventilation-systems/).
  40. European Standards (2019), EN 14134:2019 Venti-  
lation for Buildings. Performance Measurement and  
Checks for Residential Ventilation Systems, Accessed  
September 15, 2022. [https://www.en-standard.eu/  
bs-en-14134-2019-ventilation-for-buildings-perfo-  
rmance-measurement-and-checks-for-residential-  
ventilation-systems/](https://www.en-standard.eu/bs-en-14134-2019-ventilation-for-buildings-performance-measurement-and-checks-for-residential-ventilation-systems/).
  41. Huifen, Z., Y. Fuhua and Z. Qian (2014), “Research  
on the Impact of Wind Angles on the Residential

- Building Energy Consumption”, *Mathematical Problems in Engineering*, 2014: 1~15.
42. International Organization for Standardization (2014), ISO 16494:2014 Heat recovery ventilators and energy recovery ventilators — Method of test for performance, Accessed September 15, 2022. <https://www.iso.org/standard/56867.html>.
  43. International Organization for Standardization (2017), ISO 12569:2017 Thermal performance of buildings and materials — Determination of specific airflow rate in buildings — Tracer gas dilution method, Accessed September 15, 2022. <https://www.iso.org/standard/69817.html>.
  44. International Organization for Standardization (2019), ISO 16494-2:2019 Heat recovery ventilators and energy recovery ventilators – Method of test for performance – Part 2: Assessment of measurement uncertainty of performance parameters, Accessed September 15, 2022. <https://www.iso.org/standard/69574.html>.
  45. Meiss, A., J. Feijó-Muñoz and M. A. García-Fuentes (2013), “Age-of-the-air in Rooms According to the Environmental Condition of Temperature: A Case Study”, *Energy and Buildings*, 67: 88~96.
  46. Merzkirch, A., S. Maas, F. Scholzen and D. Waldmann (2016), “Field Tests of Centralized and Decentralized Ventilation Units in Residential Buildings - Specific Fan Power, Heat Recovery Efficiency, Shortcuts and Volume Flow Unbalances”, *Energy and Buildings*, 116: 376~383.
  47. Peng, Y., Z. Gao, R. Buccolieri, and W. Ding (2019), “An Investigation of the Quantitative Correlation between Urban Morphology Parameters and Outdoor Ventilation Efficiency Indices”, *Atmosphere*, 10(1): 1~17.
  48. Rabanillo-Herrero, M., M. Á. Padilla-Marcos, J. Feijó-Muñoz, R. Gil-Valverde and A. Meiss (2020), “Ventilation Efficiency Assessment According to the Variation of Opening Position in L-Shaped Rooms”, *Building Simulation*, 13: 213~221.
  49. Schoen, L. J. (2020), “Guidance for Building Operations During the COVID-19 Pandemic, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers”, *ASHRAE Journal*, May 2020, 72~74.
  50. Sherman, M. H. and D. J. Wilson (1986), “Relating Actual and Effective Ventilation in Determining Indoor Air Quality”, *Building and Environment*, 21(3~4): 135~144.
  51. Sun, C. and Zhai, Z. (2020), “The Efficacy of Social Distance and Ventilation Effectiveness in Preventing COVID-19 Transmission”, *Sustainable Cities and Society*, 62: 102390.
  52. You, W., J. Shen and W. Ding (2017), “Improving Wind Environment of Residential Neighborhoods by Understanding the Relationship between Building Layouts and Ventilation Efficiency”, *Energy Procedia*, 105: 4531~4536.
  53. Zhao, W., S. Kilpeläinen, R. Kosonen, J. Jokisalo, S. Lestinen and P. Mustakallio (2021), “Thermal Environment and Ventilation Efficiency in a Simulated Office Room with Personalized Micro-Environment and Fully Mixed Ventilation Systems”, *Building and Environment*, 188: 1~11.
  54. Zhou, J., Y. Hua, Y. Xiao, C. Ye and W. Yang (2020), “Analysis of Ventilation Efficiency and Effective Ventilation Flow Rate for Wind-driven Single-sided Ventilation Buildings”, *Aerosol and Air Quality Research*, 21(5): 1~21.

---

요 약

---

일반적으로 실내 공기질을 조절하기 위해서는 환기의 역할이 중요하다. 최근 코로나-19 등 감염병의 확산으로 거주자들의 실내에서 보내는 시간이 늘어남에 따라 환기의 중요성은 더욱 높아지고 있으며, 환기성능에 대한 관심도 더욱 높아지는 추세이다. 많은 국가에서 현재 환기 성능을 파악하는 지표로서 시간당 환기횟수를 사용하고 있으며, 국내에서도 공동주택을 대상으로 시간당 0.5회 이상의 환기횟수를 확보하도록 규제하고 있다. 하지만, 선행연구 및 국내의 환기성능 평가 관련 표준을 검토한 결과 시간당 환기횟수만을 통해 실내 환기 성능을 평가하는데에는 실질적 실내 환기 성능을 평가하는 데에는 한계가 있는 것으로 나타났으며, 실질적인 환기 성능을 평가하기 위해서는 실내 국소부위를 대상으로 오염물질 저감속도와 공간내 환기 성능 균일도 등을 고려하는 것이 필요할 것이다. 이에 대해 본 연구에서는 추적가스 희석법을 이용한 실증 실험을 통해 측정 위치별 유속, 공기연령 및 환기효율을 측정하고 비교하였으며, 측정점별 조합에 따른 평균값과 공간 내 중심점에서의 측정값을 비교하여 측정점 선정에 따른 환기 성능 차이를 비교 조사하였다. 본 연구 결과는 향후 실환경 기반의 주거공간 실내 환기성능을 평가하기 위한 실험절차 개발을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

**주제어** : 환기성능, 공기연령, 측정위치, 환기효율

---