



광촉매 환기시스템을 이용한 폼알데하이드 오염 농도 저감 성능 실험

Experiment on the Reducing Performance of Contamination Concentration of Formaldehyde Using a Photocatalytic Ventilation System

방주예* · 임세현** · 심성진*** · 김성은**** · 송용우***** · 박진철*****

Jooye Bang* · Sehyeon Lim** · Sungjin Sim*** · Seongeun Kim**** · Yongwoo Song***** · Jinchul Park*****

* Main author, Graduate Student, School of Architectural Engineering, Chung-Ang Univ., South Korea (bang0927@naver.com)

** Coauthor, Graduate Student, School of Architectural Engineering, Chung-Ang Univ., South Korea (dlatpgus7578@naver.com)

*** Coauthor, Graduate Student, School of Architectural Engineering, Chung-Ang Univ., South Korea (ssj3029@gmail.com)

**** Coauthor, Graduate Student, School of Architectural Engineering, Chung-Ang Univ., South Korea (asteria03@naver.com)

***** Coauthor, Ph.D, School of Architectural Engineering, Chung-Ang Univ., South Korea (yongma0930@naver.com)

***** Corresponding author, Professor, School of Architectural Engineering, Chung-Ang Univ., South Korea (jincpark@cau.ac.kr)

ABSTRACT

Purpose: As people spend more time indoors, the importance of indoor pollutant management in their homes is increasing. The number of deaths from indoor pollutants has also increased, and interest in indoor pollutants has increased due to the recent COVID-19 virus and fine dust problems. In particular, there is a growing concern about formaldehyde, one of the representative gas pollutants. To overcome the limitations of the mechanical ventilation system, we would like to develop a system that effectively removes formaldehyde from gas-phase pollutants by combining a photocatalytic reactor with a heat transfer exchanger. To this end, we would like to review the performance through experiments in residential studio spaces and contribute to the removal of indoor formaldehyde. **Method:** This study conducted an experiment to control the concentration of formaldehyde using a heat exchanger combining a photocatalytic reactor to improve indoor air quality. The experiment compared and analyzed the internal circulation mode and photocatalytic mode at three ventilation rates: 0.5ACH, 1.0ACH, and 2.0ACH, and was conducted in an indoor residential studio space. **Result:** The photocatalytic mode showed significantly better performance than the internal circulation mode in reducing the concentration of formaldehyde. As the number of ventilation increased, photocatalytic modes showed higher formaldehyde concentration reduction rates from 40% to 98%. This has confirmed that the photocatalytic reactor is effective in removing gaseous contaminants.

KEYWORD

실내공기
TiO₂ 광촉매
전열교환기
폼알데하이드

Indoor Air
Photocatalyst TiO₂
Heat Exchanger
Formaldehyde (HCHO)

ACCEPTANCE INFO

Received Aug. 7, 2023

Final revision received Aug. 17, 2023

Accepted Aug. 22, 2023

© 2023. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

1.1. 연구의 배경

한국인들은 하루 평균 약 20.6시간을 실내에서 보내며, 그중 16시간을 주택에서 보내는 것으로 나타났다[1]. 최근에는 많은 기업이 채택근무제를 도입하여, 2021년에는 2019년 대비 약 100만 명의 채택근무자가 증가했다[2, 3]. 이에 따라 주택에서 실내 오염물질 관리가 더욱 중요해졌다.

WHO(World Health Organization) 보고서에 따르면, 약 320만 명의 사람들이 매년 실내 오염물질로 인해 사망한다고 한다[4]. 또한, 최근 COVID-19 바이러스의 공기 전파 문제, 미세먼지 문제로 인해 실내 오염물질에 대한 관심이 증가하고 있다[5].

환경부에서는 인체 건강에 직접적인 영향을 미치는 실내 오염물질을 지정하고 있으며, 이는 가스상 물질, 입자상 물질로 구분할 수 있다. 가스상 물질에는 오존(O₃), 이산화탄소(NO₂), 일산화탄소

(CO), 휘발성 유기화합물(VOCs), 폼알데하이드(HCHO) 등이 있으며, 입자상 물질에는 미세먼지(PM_{2.5}, PM₁₀), 곰팡이, 석면, 총부유세균(TAB) 등이 있다[6].

실내 오염물질 저감 시키는 대표적인 방법으로는 자연 환기, 기계 환기가 있다[7]. 자연 환기는 실내외 온도 및 압력을 이용하여 자연적인 환기를 유도한다. 그러나 미세먼지가 많은 날은 외부 공기가 유입되는 환기가 어렵다. 기계 환기는 환기 팬, 송풍기 등을 동력으로 활용하여 강제로 환기하는 것으로, 대표적인 기계 환기장치로는 전열교환기가 있다. 전열교환기는 2006년 이후로 100세대 이상의 공동주택에서 설치가 의무화되었으며, 2020년부터는 30세대 이상 및 신축 공동주택에 설치가 확대되었다[8]. 또한, 2020년부터는 전열교환기에 미세먼지 필터 설치를 의무화하고 있다[9]. 이에 따라 최근 전열교환기는 HEPA H10 등급 이상의 제품과 탄소필터를 포함한 제품들이 출시되고 있다. 하지만 필터방식의 제품은 미세먼지와 같은 입자상 물질을 걸러주지만, 별도의 환기를 시키지 않으면 가스상 오염물질 제거가 어려워 주기적인 자연 환기가 필요한 상황이다[10].

1.2. 연구의 목적

기존의 기계 환기 시스템만으로 가스상 오염물질 제거의 한계가 존재하고 있어 가스상 오염물질 저감 효과를 갖고 있는 광촉매를 일정한 장치에 적용하고 이를 전열교환기와 결합시켰다.

이 시스템은 전열교환기 작동 시 광촉매 반응기를 통과시켜 화학 반응을 유도하고, 이를 통한 가스상 오염물질을 제거하는 원리로 활용하고자 한다. 이러한 시스템을 이용한 실내 오염물질 제거 성능검토를 위해 본 연구는 실제 주거용 원룸 공간을 대상으로 현장실험을 하였다. 실험을 위해 가스상 오염물질 중 대표적인 폼알데하이드를 대상으로 외부 공기 오염으로 창문을 열지 못하는 환경을 가정하여, 일반 전열교환기의 내부순환 모드와 광촉매 모드를 비교 실험하였다. 이를 통해 실내 오염물질 중 가스상 오염물질 제거 성능검토를 목표로 하였다.

2. TiO₂ 광촉매 오염물질 제거 효과 고찰

2.1. 폼알데하이드 유해성

폼알데하이드는 무색의 기체로 입자성 오염물질로 구분되며 석탄산계, 접착제 제조, 목제품 제조, 비료 및 농약, 수용성 페인트 등 다양한 분야에서 사용되는 물질이다[11]. 따라서 폼알데하이드는 단열재, 바닥재, 합판 등 건축자재 및 화장품, 생활용품, 가구 등 일상생활에서 자주 접할 수 있는 물질로 공기 중 농도 1.00ppm 이하에서 눈, 코, 목 등에 자극을 일으키는 발암물질이다[12]. 이러한 폼알데하이드의 제거방법은 다양하게 존재하고 있으며, 대표적으로 환기장치를 이용한 흡착 방법과 TiO₂ 광촉매를 이용한 분해를 통한 방법이 있다.

2.2. 기존 환기장치를 이용한 폼알데하이드 제거 방식

환기장치를 이용한 폼알데하이드 제거방법은 환기장치에 활성탄 필터를 부착해 폼알데하이드를 흡착시켜 제거할 수 있다. 활성탄은 탄소로 구성되어 있으며 다공성 물질로 넓은 표면적을 통해 흡착이 이루어진다[13]. 활성탄 필터는 헤파필터와 공기청정기 및 습식 공기청정기에 부착되어 실내 오염물질을 제거할 수 있다. 활성탄 필터를 부착한 공기청정기 및 습식 공기청정기에서의 폼알데하이드를 제거 성능 실험[14], 공기청정기 내의 활성탄 필터에 TiO₂ 광촉매를 부착 후 실내 오염물질 제거[15], 다양한 종류의 활성탄을 이용하여 폼알데하이드 제거[16] 등 다양한 연구가 진행되고 있다. 하지만 활성탄 필터는 성능을 유지하기 위해 교체주기에 따라 교체를 해야 한다. 교체하지 않고 활성탄 필터를 계속해서 사용할 경우 흡착력이 떨어져 공기청정기 가동 시 실내 오염물질이 흡착되지 않고 실내에 머무르게 된다.

2.3. TiO₂ 광촉매를 이용한 폼알데하이드 제거 효과

TiO₂ 광촉매는 빛을 이용한 촉매의 한 종류로 UV 광원을 통해 발생하는 빛에너지와 화학반응을 통하여 폼알데하이드와 반응을 일으켜 O₂와 H₂O로 분해하여 제거할 수 있다[17]. 최근에는 TiO₂ 광촉매가 발려진 목재를 이용하여 폼알데하이드를 분해[18], 광촉매 코

팅 두께에 따른 폼알데하이드 제거 성능 확인[19], 공동주택에서의 폼알데하이드 농도 비교[20] 등 많은 연구가 진행되고 있다. 하지만 기존 연구들의 경우 폼알데하이드 농도 제거를 위한 광촉매의 조건이 다르며, 챔버 및 목업 실험 위주로 진행되고 있어 실증연구가 부족한 상황이다.

따라서 본 연구는 TiO₂ 광촉매 필터를 이용한 전열교환기를 통해 실증연구를 수행하였다. 실내 오염물질 중 일상생활에서 자주 접하게 되는 폼알데하이드를 이용하여 실제 사람이 거주하고 있는 공간에 폼알데하이드 가스를 주입하여 이를 통해 광촉매를 이용한 폼알데하이드 제거 성능을 확인하고자 한다.

3. 광촉매 환기 시스템의 폼알데하이드 제거 실험

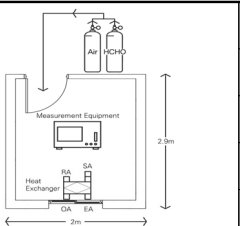
3.1. 실험 개요

Test-Bed는 전라남도 담양에 있는 H 기업의 기숙사로 작업자들이 실제로 거주하고 있는 곳에서 진행하였다. Test-Bed의 크기는 Fig. 1.과 같다. 폭 2m, 길이 2.9m, 높이 2.45m로 면적은 5.8m², 체적은 14.2m³이다. Test-Bed에는 전열교환기와 측정기기를 설치했다. 폼알데하이드 가스는 실의 복도에서 Test-Bed로 주입하였으며, 실내의 폼알데하이드 가스 농도를 측정기기를 통해 실시간으로 확인하였다. 실험 실시 전 Test-Bed의 침기를 확인하기 위하여 기밀 성능 실험을 진행했다. 또한, Test-Bed 체적에 산출한 결과로 바탕으로 Test-Bed 체적에 따라 환기횟수 0.5ACH를 산출하였으며, 이후 환기횟수를 증가시킨 1.0ACH와 2.0ACH를 적용해 실험을 진행하였다.

3.2. 실험 조건

ISO 22197-4 광촉매 폼알데하이드 제거 실험법을 통해 실험을 진행했다. ISO 22197-4를 이용한 선행연구로 콘크리트 광 반응을 제작하여 폼알데하이드 제거 실험을 진행하였다[21]. 이 연구에서는 콘크리트로 제작된 시편에 광촉매를 코팅 후 UV-A Lamp를 이용하여 시편의 크기 및 두께에 따른 폼알데하이드 제거 성능을 확인하였다. 실험 결과 시편의 크기, 개수가 증가할수록 폼알데하이드의 제거 성능이 향상되는 것을 확인하였다.

본 실험에서도 ISO 22197-4를 인용하여 실험 조건을 설정하였다. 실험 조건은 Table 1.과 같다. 폼알데하이드 가스 농도는 1.0ppm이며, 광촉매에 반응하는 광원 UV-A Lamp, 광량 10W/m², 온도 25°C, 습도 50%로 ISO의 조건과 같이 실험을 진행하였다. 그러나 실험 장치는 아크릴 수지, 스테인리스 스틸, 유리로 제시되어 있지만 본 실험은 스테인리스 스틸로 실험하였다. 따라서



Width	2m
Length	2.9m
High	2.45m
Surface	5.8m ²
Volume	14.2m ³

Fig. 1. Experimental conditions

Table 1. ISO 22197-4 & Test Condition

Condition	ISO 22197-4	Test condition
Test gas	Formaldehyde gas	
Concentration	1.0ppm	
Light source	UV-A Lamp	
Quantity of light	10W/m ² (± 0.5W/m ²)	
Temperature	25°C (± 2.5°C)	
Humidity	50%	
Test equipment	Acrylic resin, Stainless steel, Glass	Stainless steel



(a) Installation of heat exchanger (b) Photocatalytic reactor

Fig. 2. Photocatalytic heat exchanger

Table 2. UV-A lamp condition

Power Consumption	Lamp Current	Voltage	Bulb Shape	Length
18W	0.36A	59V	T 26	604mm

폼알데하이드 농도 저감을 확인하기 위해 광촉매 모드와 내부순환 모드의 환기횟수는 실에 체적에 맞는 환기횟수를 고려하여 0.5ACH, 1.0ACH, 2.0ACH를 각각 비교하였다.

본 실험에 사용된 TiO₂ 광촉매가 적용된 전열교환기는 Fig. 2.와 같이 일반 전열교환기에 광촉매 반응기를 부착하였다. 광촉매 반응기는 덕트 내부에 TiO₂ 광촉매를 도포 후 관 내부에 UV-A 램프를 부착시켰다. 전열교환기의 OA(Out Air)와 EA(Exhaust Air)는 실외에 접촉되어 있으며, SA(Supply Air)와 RA(Return Air)는 각각 실의 끝부분 천장에 설치하였다.

광촉매 반응기에 사용한 UV-A 램프는 P사의 TL-D 18W 램프를 활용하였다. 램프의 조건은 Table 2.와 같다. 램프의 소비 전력은 18W이며, 전류는 0.36A, 전압은 59V이다. 램프의 형태는 T 26이며, 총 길이는 604mm이다.

실험에서는 TiO₂ 광촉매가 적용된 전열교환기와 일반 전열교환기의 실내 공기만 순환하는 내부순환 모드를 비교하여 실험을 진행하였다. 광촉매 모드와 내부순환 모드의 차이는 Table 3.과 Fig. 3.과 같다. 두 모드는 외기 유입을 차단하고 실내 공기만을 순환시키기 위해 내부 댐퍼를 개방하였다. 광촉매 모드는 폼알데하이드가 광촉매 반응기를 지나며 UV-A Lamp가 ON이 되어 광촉매 반응이 일어난다. 내부순환 모드는 UV-A Lamp가 OFF 상태이며 광촉매 반응기를 지나가도 빛이 없기 때문에 광촉매 반응이 일어나지 않는다.

Test-Bed 내의 폼알데하이드 농도를 확인하기 위해 Fig. 4.와 같이 'KINSCO'의 Airwell Plus III를 활용하였다.

Table 3. Test conditions for each heat exchanger mode

Category	Inflow of outside air	Internal damper open	UV-A Lamp
Photocatalytic mode	X	O	O
Internal circulation mode	X	O	X

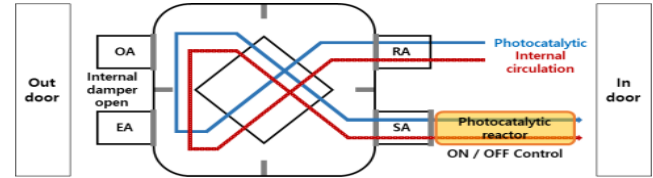


Fig. 3. Heat exchanger



KISCO Airwell Plus III	
Division	Content
Measuring Gas	HCHO
Measured flow rate	1.0L/min
Measured range	0~10ppm
Minimum measured concentration	0.01ppm

Fig. 4. Measurement equipment

Table 4. Experimental conditions

Experimental time	60min
Start Concentration	659ppm
Concentration after 90 minutes	644ppm
Decreased value	15ppm
Reduction rate	2%

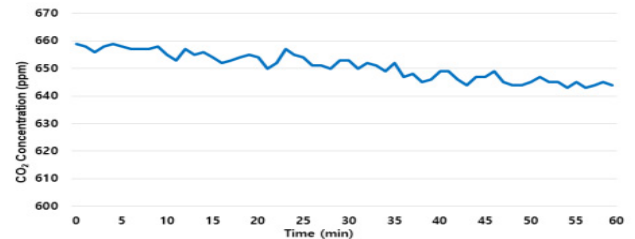


Fig. 5. Airtight performance test result

4. 실험 결과

4.1. Test-Bed 기밀성능 실험

먼저 Test-Bed의 이산화탄소 농도 저감을 통해 Test-Bed의 기밀성능을 확인하였다. 실험 결과 Table 4., Fig. 5.와 같다. CO₂ 농도는 실험 시작 시 659ppm에서 60분 후 644ppm으로 약 2% 감소하였다. 실험 결과를 바탕으로 Test-Bed 내의 자연 침기량 계산 결과 약 0.1ACH가 나타났다. 일반 주거시설의 기밀성능 환기횟수는 0.15ACH로[22] Test-Bed의 기밀성능은 일반 주거시설보다 좋은 것으로 확인되었다.

Table 5. 0.5ACH experiment results

Category	Reduction rate after 90 minutes
Photocatalytic mode	40%
Internal circulation mode	11%

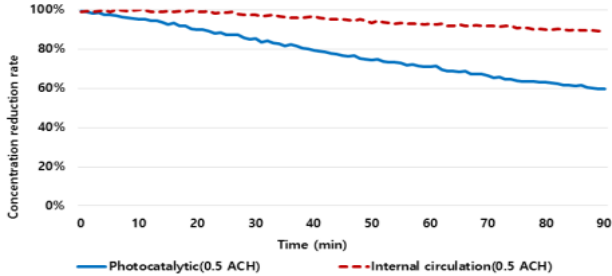


Fig. 6. Reduced formaldehyde concentration of 0.5ACH

Table 6. 0.5ACH reduction rate data trend equation

Category	Trend line	R ²	Elapsed time (min)		
			30%	50%	90%
Photocatalytic mode	$y = 0.00001x^2 - 0.0058x + 1.0135$	0.997	60	110*	300*
Internal circulation mode	$y = -0.0013x + 1.0109$	0.970	239*	393*	700*

*Predicted value by formula

4.2. 광촉매 환기장치의 폼알데하이드 농도 저감 실험

1) Test-Bed 환기횟수 0.5ACH 실험 결과

광촉매 반응기가 적용된 전열교환기를 이용해 대표적인 실내 오염물질인 폼알데하이드 농도 저감 성능 확인하기 위해 Test-Bed 내부에 ISO 기준을 만족하는 1ppm의 폼알데하이드 농도를 100% 기준으로 실험했다. 실험 결과는 Table 5., Fig. 6.과 같다. 실험 90분 후 폼알데하이드 농도는 광촉매 모드 40%, 내부순환 모드 11% 감소하였다. 광촉매 모드는 내부순환 모드와 비교하였을 때 약 29.8% 효율이 좋은 것으로 확인되었다.

감소율 그래프를 바탕으로 추세방정식을 산정한 값은 Table 6.과 같다. 결정계수(R²) 값은 0.970 이상으로 나타났다. 추세방정식의 정확도가 높은 것으로 확인되어 추세방정식을 바탕으로 폼알데하이드 농도 감소에 따른 경과 시간을 예측했다. 광촉매 모드는 실험 60분 경과 폼알데하이드 농도가 30%, 110분 후 50%, 300분 후 90% 저감되는 것으로 예측된다. 내부순환 모드의 저감 시간은 239분 후 30%, 393분 후 50%, 700분 후 90%로 예측되었다.

2) Test-Bed 환기횟수 1.0ACH 실험 결과

Test-Bed 내부 환기횟수 기준에 부합한 0.5ACH 실험과 더불어 환기횟수를 2배 증가시켜 오염물질 저감 효과 증대 여부 확인을 위해 환기횟수 1.0ACH를 적용했다. 실험 결과는 Table 7., Fig. 7.과 같다. 실험 90분 후 폼알데하이드 농도는 광촉매 모드 75%, 내부순환 모드는 9% 저감되는 것을 확인하였다. 광촉매 모드는 내부순환 모드와 비교하였을 때 약 63.8% 효율이 좋은 것을 알 수 있다.

Table 7. 1.0ACH experiment results

Category	Reduction rate after 90 minutes
Photocatalytic mode	75%
Internal circulation mode	9%

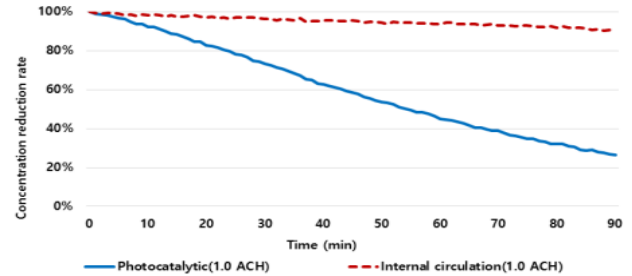


Fig. 7. Reduced formaldehyde concentration of 1.0ACH

Table 8. 1.0ACH reduction rate data trend equation

Category	Trend line	R ²	Elapsed time (min)		
			30%	50%	90%
Photocatalytic mode	$y = 0.00003x^2 - 0.0111x + 1.0415$	0.998	33	55	109*
Internal circulation mode	$y = -0.0013x + 1.0197$	0.971	326*	548*	993*

*Predicted value by formula

Table 8.은 감소율 그래프를 바탕으로 추세방정식을 산정하였다. 추세방정식 데이터를 바탕으로 결정계수(R²) 값이 0.971 이상으로 데이터의 정확도가 높은 것으로 확인되어 폼알데하이드 농도 감소에 따른 경과 시간을 예측했다. 광촉매 모드는 실험 33분 경과 30%, 55분 후 50%까지 감소하였고 109분 후 폼알데하이드 농도가 90% 저감하는 것으로 예측된다. 내부순환 모드의 저감 시간은 326분 후 30%, 548분 후 50%, 993분 후 90%로 예측되었다. 광촉매 모드의 실험 결과는 1.0ACH는 0.5ACH에 비해 폼알데하이드 저감률이 87.5% 상승했다.

3) Test-Bed 환기횟수 2.0ACH 실험 결과

0.5ACH에서 환기횟수를 2배 증가시킨 1.0ACH 뿐만 아니라, 더 증가시킨 2.0ACH까지 적용했다. 이러한 환기횟수가 현실적인 의미를 갖지 않을 수 있지만, 향후 자연 환기와의 실내 오염물질 농도 저감 성능 확인을 위해 실험을 진행하였다. 2.0ACH 실험 결과는 Table 9., Fig. 8.과 같다. 실험 90분 후 폼알데하이드 농도는 광촉매 모드의 경우 98%, 내부순환 모드는 11% 저감되는 것을 확인하였다. 광촉매 모드는 내부순환 모드와 비교하였을 때 약 86.7% 효율이 좋은 것으로 확인되었다.

감소율 그래프를 바탕으로 추세방정식을 산정하여 결정계수(R²) 값은 0.948 이상으로 폼알데하이드의 정확도가 높은 것으로 확인되어 Table 10.과 같다. 추세방정식으로 폼알데하이드 농도 감소에 따른 경과 시간을 예측했다. 광촉매 모드는 실험 24분 경과 30%, 40분 후 50%, 80분 후 90% 감소하였다. 내부순환 모드의 저감 시간은 252분 경과 30%, 396분 후 50%, 705분 후 90%로 예측된다. 이는 0.5ACH와 1.0ACH 실험 결과에 폼알데하이드 저감률은 각각 약

Table 9. 2.0ACH experiment results

Category	Reduction rate after 90 minutes
Photocatalytic mode	98%
Internal circulation mode	11%

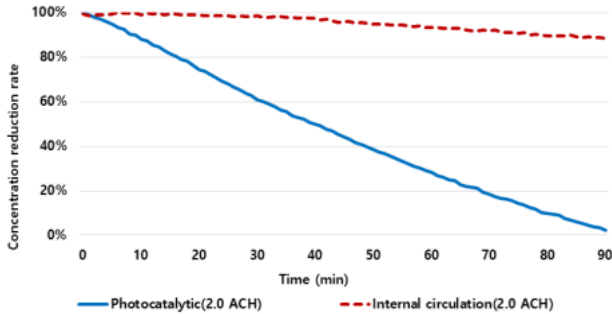


Fig. 8. Reduced formaldehyde concentration of 2.0ACH

Table 10. 2.0ACH reduction rate data trend equation

Category	Trend line	R ²	Elapsed time (min)		
			30%	50%	90%
Photocatalytic mode	$y = 0.00004x^2 - 0.0147x + 1.0348$	0.999	24	40	80
Internal circulation mode	$y = -0.0013x + 1.0154$	0.948	242*	396*	705*

*Predicted value by formula

145%, 30% 증가하였다.

4.3. 소결

실험에서 광촉매 모드의 환기횟수별 실험 종합 결과는 Table 11., Fig. 9와 같다. 실험 90분 동안 각각의 저감률은 0.5ACH는 40%, 1.0ACH 75%, 2.0ACH 98%로 환기횟수가 증가할수록 광촉매 모드의 폼알데하이드 저감 속도가 가속화되는 것으로 확인되었다.

환기율별 폼알데하이드 농도 감소율의 추세방정식은 Table 12. 와 같다. 폼알데하이드 농도가 30% 감소하였을 때 0.5ACH는 60분, 1.0ACH는 33분, 2.0ACH는 24분으로 0.5ACH를 기준으로 각각 27분, 36분 단축되었다. 90% 저감이 될 경우에는 0.5ACH는 300분, 1.0ACH는 109분, 2.0ACH는 80분으로 0.5ACH를 기준으로 각각 191분, 220분 단축되었다. 0.5ACH는 2배 증가된 1.0ACH의 폼알데하이드 저감률은 87.5% 증가하였고, 4배 증가된 2.0ACH의 저감률은 145% 증가했다. 이를 통해 환기횟수가 증가함에 따라 Test-Bed 내의 폼알데하이드 농도 저감 속도가 가속화되는 것으로 확인되었다.

종합적으로 내부순환 모드와 광촉매 모드를 비교한 결과, 내부순환 모드는 Test-Bed 환기횟수에 따른 폼알데하이드 농도 저감률이 9~11%로 유사한 양상으로 나타났다. 반면, 광촉매 모드는 환기횟수가 증가함에 따라 내부순환 모드보다 40%에서 98%까지 더 높은 폼알데하이드 농도 저감률이 나타났다. 이를 통해 광촉매 모드는 내부순환 모드보다 폼알데하이드 제거 효율이 우수한 것을 알 수 있다.

Table 11. Photocatalytic mode experiment results

Category	Reduction rate after 90 minutes
0.5ACH	40%
1.0ACH	75%
2.0ACH	98%

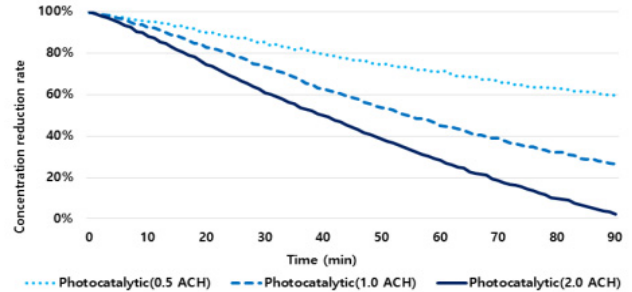


Fig. 9. Reduced formaldehyde concentration of photocatalytic mode

Table 12. Photocatalytic mode rate data trend equation

Category	Trend line	R ²	Elapsed time (min)		
			30%	50%	90%
0.5ACH	$y = 0.00001x^2 - 0.0058x + 1.0135$	0.997	60	110*	300*
1.0ACH	$y = 0.00003x^2 - 0.0111x + 1.0415$	0.998	33	55	109*
2.0ACH	$y = 0.00004x^2 - 0.0147x + 1.0348$	0.999	24	40	80

*Predicted value by formula

5. 결론

폼알데하이드는 대표적인 가스상 오염물질로 단순 기계 환기를 통한 제거가 어려운 물질이다. 이에 본 연구는 TiO₂ 광촉매 반응기를 전열교환기에 결합해 주거용 공간에서 실험을 진행하였다. 또한, 폼알데하이드 제거 성능을 확인하기 위해 전열교환기의 내부순환 모드와 광촉매 모드를 비교하였다.

첫째, Test-Bed의 기밀성능을 확인하기 위해 이산화탄소를 주입해 농도 저감을 확인했다. 실험 시작 시 659ppm에서 60분 후 644ppm으로 약 2% 감소했으며, 침기량은 0.1ACH로 나타났다. 일반 주거시설의 환기횟수가 0.15ACH로 Test-Bed의 기밀성능이 우수한 것으로 나타났다.

둘째, Test-Bed의 환기횟수가 0.5ACH로 산출되었으며, ISO 기준인 폼알데하이드 1ppm을 100% 기준으로 90분간 실험을 진행하였다. 그 결과 광촉매 모드 40%, 내부순환 모드 11%로 나타났다. 또한, 추세방정식을 통해 농도 감소에 따른 경과 시간을 예측한 결과 광촉매 모드는 실험 300분 후, 내부순환 모드 700분 후 90%로 예측되었다.

셋째, 0.5ACH에서 환기횟수를 증가시킨 1.0ACH와 2.0ACH에 대해 실험하였다. 1.0ACH는 광촉매 모드와 내부순환 모드는 각각 75%, 9% 감소하였으며, 추세방정식을 이용해 광촉매 모드 109분, 내부순환 모드 993분 후 폼알데하이드 농도 90% 저감되는 것으로 예측되었다. 2.0ACH의 실험 결과 광촉매 모드는 98%, 내부순환 모드 11% 감소하였으며, 추세방정식을 이용한 결과 폼알데하이드 농

도 90%가 광촉매 모드 80분 후 저감되었으며, 내부순환 모드는 705분으로 예측되었다. 2.0ACH 광촉매 모드는 0.5ACH, 1.0ACH 보다 폼알데하이드 저감률이 각 145%, 30% 증가하였다.

위의 실험 결과 내부순환 모드는 환기횟수에 따른 폼알데하이드 농도 저감률이 9~11%로 유사한 값으로 나타났다. 광촉매 모드의 경우 환기횟수가 증가함에 따라 폼알데하이드 농도의 저감률이 증가하는 것을 확인하였다. 반면, 본 연구에서는 몇 가지 한계점이 발견되었다. 첫째, Test-Bed 규모가 원룸 형태로 제한되어 다양한 가구와 바람의 방향이 바뀔 수 있는 다양한 평형에서 실험을 진행 및 실내 환경의 다양성과 실제 상황을 반영하기 어려웠다. 둘째, ISO 기준으로 실험을 진행하였으나 폼알데하이드 농도가 1ppm으로 실제 생활에서의 농도보다 높아 추후 더 낮은 농도에서의 실험이 필요하다. 셋째, 실험 시간이 90분으로 짧아 실험 결과에 대해 추세방정식을 이용하여 결과를 예측할 수밖에 없었으며, 실제 폼알데하이드 농도 저감 시간을 확인하지 못하였다. 따라서 추후 연구 진행 시 실험 시간을 길게 하여 추가적인 폼알데하이드 농도 저감 확인이 필요하다. 마지막으로, 향후 연구에서는 광촉매 반응기가 부착된 전열교환기의 실질적인 효과 분석을 하고자 더 많은 변수와 다양한 실험 환경을 고려한 연구를 하고자 한다.

Acknowledgement

이 연구는 국토교통부기술혁신연구사업의 일환으로 국토교통부/국토교통과학기술진흥원(No.22SCIP-C146254-05) 및 한국연구재단(No.NRF-2022R1A6A3A01086791)의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

[1] 국립환경과학원, 한국인의 노출계수 핸드북, 2019. // (Korean National Institute of Environmental, Korean exposure factors handbook, 2019.)
 [2] 통계청, 경제활동인구조사, 2019.08. // (Statistics Korea, Economically active population survey visual survey by working type, 2019.08.)
 [3] 통계청, 경제활동인구조사, 2021.08. // (Statistics Korea, Economically active population survey visual survey by working type, 2021.08.)
 [4] WHO, Ambient (outdoor) air pollution, 2021.
 [5] 김석경 외 3인, 업무공간내 코로나 19 전파감소를 위한 실내환경계획 및 관리에 관한 전문가 조사연구, 한국실내디자인학회 2021 춘계학술발표대회 논문집, 2021.05, pp.200-204. // (S.K. Kim et al., An expert survey to identify the design and management strategies for reducing the spread of COVID 19 in workplaces, 2021 Korean Institute of Interior Design Spring Conference Proceedings, 2021.05, pp.200-204.)
 [6] 환경부, 실내공기질 관리법 시행규칙, 환경부령 제1032호, 2023. // (Ministry of Environment, Enforcement rules of the indoor air quality control, Ordinance of the Ministry of Environment No. 1032, 2023.)
 [7] 질병관리청, 슬기로운 환기 가이드라인, 2021. // (Korea Disease Control and Prevention Agency, Guidelines for wise navigation, 2021.)
 [8] 국토교통부, 건축물의 설비기준에 관한 규칙, 국토교통부령 467호, 2017. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Rules on the building equipment standards, Ordinance of the Ministry of Land, Infrastructure and Transport No. 467, 2017.)
 [9] 한국산업표준, 환기용 공기 필터 유닛, 2020. // (Korean Industrial Standards, Air filter units for ventilation, 2020.)
 [10] 환경부, 실내공기 제대로 알기 100문 100답, 2019. // (Ministry of Environment, Knowing indoor air properly 100 questions 100 answers, 2019.)
 [11] 한국산업안전공단, 화학물질 유통·사용 실태조사 결과보고서

폼알데하이드, 2008. // (Korea Occupational Safety & Health Agency, Chemical distribution and use survey results report formaldehyde, 2008.)
 [12] 이윤규, 김창남, 기존 공동주택의 실내공기질 실태에 관한 측정 연구, 대한건축학회 논문집 계획계, 제20권 제11호, 2004.11, pp.327-334. // (Y.G. Lee, C.N. Kim, A field survey on indoor air quality of the existing apartment houses, Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, 20(11), 2004.11, pp.327-334.)
 [13] G. Ashitha, K. Krishna, Strategies to design modified activated carbon fibers for the decontamination of water and air, Environmental Chemistry Letters, 16(4), 2018.12, pp.1137-1168.
 [14] 김용진 외 4인, 공기청정기의 암모니아, 초산 및 아세트알데히드 탈취성능과 톨루엔 및 포름알데히드 정화성능 비교 분석, 한국실내환경학회지, 제3권 제3호, 2006.09, pp.236-246. // (Y.J. Kim et al., Performance test of air cleaners: Deodorization of ammonia, acetic acid and acetaldehyde and gas removal of toluene and formaldehyde, Indoor Environment and Technology, 3(3), 2006.09, pp.236-246.)
 [15] C.H. Ao, S.C. Lee, Indoor air purification by photocatalyst TiO2 immobilized on an activated carbon filter installed in an air cleaner, Chemical Engineering Science, 60(1), 2005.01, pp.103-109.
 [16] Y. Song et al., Removal of formaldehyde at low concentration using various activated carbon fibers, Journal of Applied Polymer Science, 106(4), 2007.11, pp.2151-2157.
 [17] J. Auvinen, L. Wirtanen, The influence of photocatalytic interior paints on indoor air quality, Atmospheric Environment, 42(18), 2008.06, pp.4101-4112.
 [18] L. Song et al., TiO2-WO3 loaded onto wood surface for photocatalytic degradation of formaldehyde, Forests, 14(3), 2023.03, p.503.
 [19] 박영규, 광촉매 코팅두께가 포름알데히드의 광산화 반응에 미치는 영향 연구, 대한환경공학학회지, 제29권 제11호, 2007.11, pp.1243-1250. // (Y.G. Park, The effect of TiO2 film thickness on the photodegradation of formaldehyde, Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 29(11), 2007.11, pp.1243-1250.)
 [20] 홍원화, 김현테, 박현식, 신축공동주택의 실내마감재 광촉매 코팅에 의한 실내공기질 개선효과에 관한 연구, 대한건축학회 논문집 계획계, 제21권 제8호, 2005.08, pp.235-242. // (W.H. Hong, H.T. Kim, H.S. Park, A study on improvement effect of indoor air quality throughout the photocatalyst coating on the indoor finishing material in newly apartment building, Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, 21(8), 2005.08, pp.235-242.)
 [21] J. Hot et al., Evaluation of formaldehyde degradation in a standardized photoreactor, Healthy Buildings 2017 Europe Conference, 2017.07.
 [22] 강지연, 김형근, 홍구표, 공동주택 구조 형식에 따른 기밀성능 측정 및 분석, KIEAE Journal, 제19권 제6호, 2019.12, 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), 2019.12, pp.81-86.)