

UV-A 광량 변화를 통한 TiO₂ 광촉매의 폼알데하이드 저감 성능 실험

Experiments on Formaldehyde Reduction Performance of a TiO₂ Photocatalyst through UV-A Irradiance Change

유민상(Min Sang Yoo)¹, 김성은(Seong Eun Kim)², 송용우(Yong Woo Song)³,
방주예(Joo Ye Bang)¹, 박진철(Jin Chul Park)^{4†}

¹중앙대학교 석사과정, ²중앙대학교 박사과정, ³중앙대학교 박사 후 연구원, ⁴중앙대학교 건축학부 교수

¹Master Course, Architectural Engineering, Graduate School, Chung-Ang University, Seoul, 06974, Korea

²Ph.D Course, Architectural Engineering, Graduate School, Chung-Ang University, Seoul, 06974, Korea

³Ph.D, Architectural Engineering, Chung-Ang University, Seoul, 06974, Korea

⁴Professor, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang University, Seoul, 06974, Korea

(Received January 13, 2023; revision received January 31, 2023; Accepted: February 01, 2023)

Abstract This study confirmed the performance of reducing formaldehyde concentration by controlling UV-A light change based on HCHO (Formaldehyde) reduction experiment method ISO (International Standard Experiment Method) 22197-4. Previous studies have investigated TiO₂ photocatalysts and application methods for reducing formaldehyde, but experiments on the performance of reducing formaldehyde concentration according to the UV-A light intensity are scarce. For this experiment, a photo reactor and an experimental device suggested by ISO were manufactured and tested. The amount of light irradiated to the photocatalyst was 10 W/m², 15 W/m², and 20 W/m². As a result of the experiment, it was confirmed that the higher the UV-A amount irradiated to the photocatalyst, the higher the performance of reducing the concentration of formaldehyde.

Key words Formaldehyde(폼알데하이드), ISO Standard(국제표준실험), Photocatalyst TiO₂(TiO₂ 광촉매), UV-A Irradiance(자외선광량)

† Corresponding author, E-mail: jincpark@cau.ac.kr

기호설명

R_F : 시험편에 의해 제거된 폼알데하이드 제거율 [%]
 n_F : 시험편에 의해 제거된 폼알데하이드 양 [μmol]

\varnothing_{F0} : 공급 폼알데하이드 부피분율 [$\mu\text{L/L}$]
 \varnothing_F : 반응기 출구에서의 폼알데하이드 부피분율 [$\mu\text{L/L}$]
 f : 표준상태로 환산한 시험가스 유량 (0°C, 101.3 kPa, 건가스) [L/Min]

1. 서 론

1.1 연구 배경

실내오염물질은 주로 재실자의 호흡기, 기관지, 눈 피부 등에 영향을 끼친다.^(1,2) 하루 평균 86%를 실내에서 보내는 사람들은⁽³⁾ 내외부적으로 발생하는 실내오염물질에 지속적으로 노출되고 있다.⁽⁴⁾ WHO(World Health

Organization)는 실내오염물질 노출로 인해 매년 전 세계 약 630만 명의 인구가 사망한다고 발표함으로써, 그 심각성을 강조하였다.⁽⁵⁾

대표적인 가스상 실내오염물질인 폼알데하이드는 자극성 냄새가 나는 무색의 기체로 사람의 호흡기, 소화기, 피부를 통한 경로로 침투해 인체에 좋지 않은 영향을 주는 발암성 물질이다.^(6,7) 주로 건축자재, 생활용품, 가구 등에서 발생하며, 새집증후군, 빌딩증후군을 유발하는 대표적인 물질이다.^(8,9) 또한, 폼알데하이드는 지속적으로 장시간 방출하는 특징을 가지고 있어, 지속적인 관리가 필요한 물질이다.⁽¹⁰⁾ 실내 폼알데하이드 농도를 관리하기 위해 국내 각 정부 부처들은 관련 법규를 제안하고 있다.⁽¹¹⁾ 공동주택의 경우 신축 공동주택 대상으로 입주 전 폼알데하이드 농도 기준을 규정하고 있으며, 다중이용시설의 경우 시설별 유지 기준을 제시하고 있다. 하지만, 환경부의 신축 공동주택 오염물질 측정 결과에 따르면 2010~2019년 사이 준공된 공동주택에서 약 13%가 폼알데하이드 기준을 초과하였으며, 실내오염물질 기준 초과 사례 중 폼알데하이드 초과 사례 비중은 55%를 차지하였다.⁽¹²⁾ 또한, 사람이 거주 중인 주택과 다중이용시설에서 폼알데하이드 기준을 초과하는 사례가 지속적으로 발생하고 있어 별도의 저감 방안이 필요한 물질이다.^(13,14)

실내 폼알데하이드 저감의 대표적인 방법으로는 환기가 있다. 하지만, 외부 미세먼지 유입, 냉난방 에너지 부하 증가, 환기 인식 부족 등 문제점으로 인해 환기 외의 저감 방안이 필요한 상황이다.^(15,16) 광촉매는 실내 폼알데하이드를 저감 할 수 있는 또 하나의 방법이다. 광촉매는 빛에너지가 가해지면 전자(e-)와 정공(h+)을 생성한다.⁽¹⁷⁾ 해당 물질은 산소(O₂) 및 물(H₂O)과 반응을 통해 음이온(O₂⁻)과 수산화라디칼(OH⁻)을 생성하며, 이는 폼알데하이드를 물과 이산화탄소(CO₂)로 분해한다.

광촉매의 종류는 대표적인 물질로 TiO₂, ZnO, ZrO₂, CdS, WO₃, SnO₂, V₂O 등이 있으며, 그 중 TiO₂ (이산화티타늄) 광촉매는 화학적, 광화학적 안정성이 높고, 내구성, 효율 등이 뛰어난 특징을 가지고 있다. 또한, 화학반응 후에도 성질이 변하지 않아 반영구적으로 사용할 수 있는 특징을 가지고 있다.⁽¹⁸⁾ 따라서 TiO₂ 광촉매 적용을 통해 실내 폼알데하이드를 효과적으로 제거할 수 있을 것으로 판단된다.

1.2 연구 목적

TiO₂ 광촉매를 이용한 폼알데하이드 제거 관련 많은 연구가 진행되고 있다. 신축 공동주택의 내부 마감재 위 광촉매 도포⁽¹⁹⁾, 고로슬래그와 혼용한 광촉매⁽²⁰⁾ 등 실내 폼알데하이드 제거를 위한 연구와 팔라듐-이산화티타늄(Pb-TiO₂) 복합 광촉매⁽²¹⁾와 같은 폼알데하이드 저감 효율을 높이기 위한 연구가 진행되었다. 하지만 기존의 연구들은 폼알데하이드 제거를 위한 광촉매 적용 조건 및 기준이 명확하지 않으며, 이에 따른 폼알데하이드 농도 제거 효과 또한 객관적인 판단이 어려운 상황이다. 또한 광촉매의 폼알데하이드 제거 효율을 높이는 연구는 별도의 물질을 첨가하여 진행되었다. TiO₂ 광촉매를 이용한 폼알데하이드 제거 실험법 및 기준은 ISO(International Organization for Standardization)에서 22197-4를 통해 제시하고 있다.⁽²²⁾ ISO 기준을 준용한 폼알데하이드 제거 관련 연구 또한 진행되었으며^(23,24), ISO 22197-4 실험법 조건인 시험편의 크기 및 개수 변화에 따른 폼알데하이드 저감 성능을 높이는 연구가 진행되었다.

실내 폼알데하이드 제거를 위한 광촉매 선행 연구의 경우, 실내 광촉매 적용 방안 및 광촉매 폼알데하이드 제거 효율을 높이기 위한 연구가 진행되었다. 실내에 적용된 광촉매의 효율을 높이기 위해서는 광촉매 적용 면적을 증가시키거나, 별도의 첨가물을 적용해야 하나, 이는 적용 면적의 한계 및 별도 첨가물 광촉매의 상용화 등의 한계점이 있다. 하지만 ISO 조건 중 하나인 TiO₂ 광촉매에 조사되는 자외선(UV-A) 광량의 경우, 전압 조절을 통해 광량을 증가시킬 수 있으며 광량에 따라 광촉매의 폼알데하이드 저감 효율에 영향을 끼칠 것으로 예상되나, UV-A 광량에 따른 폼알데하이드 농도 제거 성능을 연구한 사례는 미비한 상황이다.

따라서, 본 연구에서는 ISO 22197-4를 바탕으로 TiO₂ 광촉매에 조사되는 UV-A 광량 변화에 따른 폼알데하이드 농도 저감 성능을 확인하였다.

2. 폼알데하이드 저감 실험

2.1 실험 장치 구성

본 연구는 국제표준시험기준 ISO 22197-4(이하 ISO)를 바탕으로 TiO₂ 광촉매 반응기를 제작하여 폼알데하이드 저감 실험을 진행하였다. ISO 기준이 제시하고 있는 반응기 구성 및 실험 계통도는 Table 1과 같으며, 이를 바탕으로 반응기 및 실험 장치를 제작하였다.

제작된 광반응기는 Fig. 1과 같이 기류가 고르게 분포될 수 있도록 광반응기 내부에 철망을 삽입하였으며, 광촉매가 원활하게 조사될 수 있도록 상판 일부가 개봉된 구조로 제작하였다. 개봉된 부위에는 빛이 원활하게 투과되고, 화학적 내구성이 높은 석영(Quartz)유리를 적용하였으며⁽²⁵⁾, 유리의 크기는 ISO의 기준 크기인 가로 50 mm, 세로 100 mm를 적용하였다. 광반응기 내부에 설치되는 광촉매 시험편은 추가적인 화학반응을 방지하기 위해 화학적 안정성을 가지고 있는 Pyrex 유리를 사용하였다.⁽²⁶⁾ 시험편의 면적은 ISO 시험법에 기재된 면적과 동일하게 50 cm²로 구성하였다.

광 반응기를 적용한 실험 계통은 Fig. 2, 측정 장비는 Table 3과 같다. 주입 가스는 ISO 시험 방법에 맞춰 습공기와 폼알데하이드를 혼합하여 주입하였다. 가스가 반응기를 거쳐 측정 장비로 원활하게 주입될 수 있도록 반응기와 측정 장비 사이에 펌프를 설치하였으며, 반응기에 유입되는 가스량과 펌프의 유량이 동일하도록 설정하였다. TiO₂ 광촉매에 조사되는 Lamp는 UV-A BL Lamp를 사용하였으며, 반사판을 적용한 거치대를 제작하여 반응기 시험편에 UV-A 광이 집중되도록 하였다. 실험에 적용되는 Lamp의 광량은 변압기를 이용하여 전압 변동을 통해 광량을 조절하였으며, 광량 측정기를 이용하여 실험 조건 광량을 확인 후 적용하였다.

Table 1 ISO 22197-4 Schematic diagram of test equipment

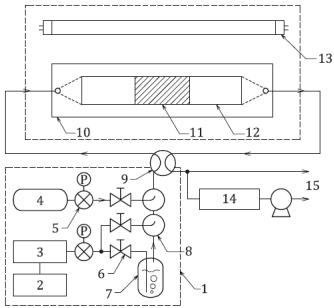
	1	test gas supply	9	4-way valve
	2	air compressor	10	photoreactor
	3	air-purification system	11	test piece
	4	standard gas (pollutant)	12	air-tight optical window
	5	pressure regulator	13	light source
	6	mass-flow controller	14	analyzer
	7	humidifier	15	vent
	8	gas mixer		

Table 2 Test piece

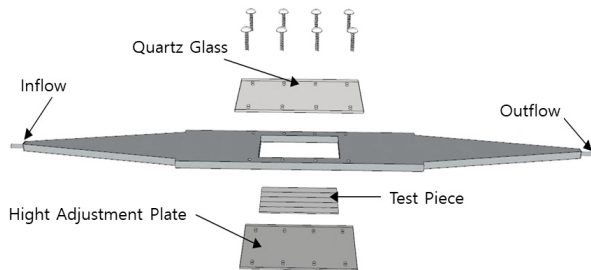
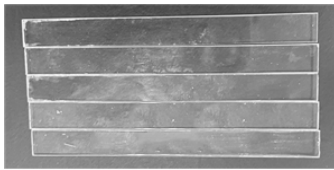


Fig. 1 Photoreactor.

	
Test Piece	
Density	2.23 g/cm ³
Max. Use Temperature	500 °C
Thermal Conductivity	1.14 W/m·K
Co-Efficient of Linear Expansion	3.3 × 10 ⁻⁶ /°C

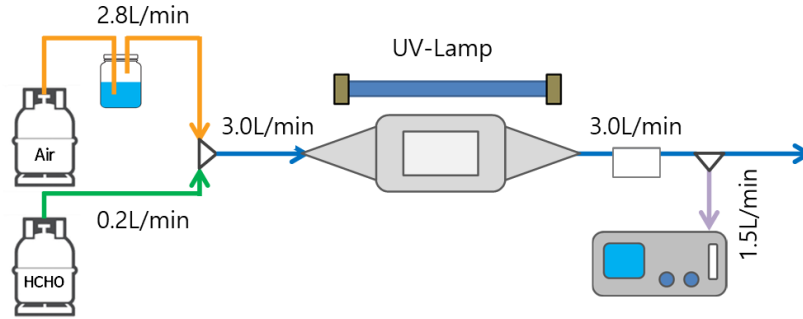




Fig. 2 Test diagram.

Table 3 Measurement equipment

Gas Measuring Equipment		Ultraviolet Measuring Instrument	
			
Measuring Gas	HCHO	UV Sensor Range	290~390 nm
Sensor	EC	Sensor Structure	Exclusive UV Photo Sensor
Measurement Range	0 ~ 10 ppm		
Flow Rate	1.5 L/min		

2.2 실험 조건 및 방법

ISO기준 및 본 연구의 실험 조건은 Table 4와 같다. 반응기 내부 온습도 조건은 ISO에서 제시하고 있는 기준 온도 25℃, 습도 50%를 적용하였으며, 폼알데하이드 주입 농도는 ISO 기준과 동일하게 농도 1 ppm으로 하였다. 측정기의 흡입 유량인 1.5 L/min을 제외한 가스는 외부로 배출될 수 있도록 by-pass를 설치하였으며, 반응기 내 농도가 연속적으로 1 ppm이 유지되도록 하였다. 광량은 ISO 실험 조건인 10 W/m²를 기본 광량 조건으로 적용하였다. TiO₂ 광촉매는 조사되는 광량이 높을수록 더욱 활발한 광화학 반응이 일어나며⁽²⁷⁾, 이에 따라 오염물질 제거 효율 또한 증가할 것으로 사료 된다. 따라서, 표준 조건의 150%인 15 W/m²와 200%인 20 W/m² 광량 조건을 추가로 적용하였으며, 이에 따른 폼알데하이드 농도 저감량을 비교하였다.

실험 방법은 먼저 폼알데하이드 가스를 주입 후, 반응기 내 농도가 약 1.0 ppm을 30분 동안 일정하게 유지되는 것을 확인하였으며, 농도 안정화 후, UV-A Lamp를 가동하였다. 총 3시간 동안 농도 감소 추세를 확인하였으며, Lamp 종료 후 반응기 내 폼알데하이드 가스가 정상적으로 주입되고 있었는지 확인하기 위해 농도가 다시 초기농도로 상승하는지 확인하였다. 이와 같은 순서로 광량 조건별로 Lamp 가동 전과 후의 폼알데하이드 농도를 비교하였으며, 각각 실험을 3회 진행 후 결과 데이터를 평균하여 확인하였다.

Table 4 Experimental conditions

Experimental Conditions	Gas Type	Temperature/ Humidity	HCHO Concentration	Air Flow	Lamp Type	UV-A Irradiance	UV Lamp On Time
ISO 22197-4	Formaldehyde	25℃ ±2.5/ 50%	1.00 ppm	3.0 L/min	UV-A	10 W/m ²	3 hours
This Experiment	(HCHO)					10 / 15 / 20 W/m ²	

3. 실험 결과

3.1 UV 광량 조건 별 폼알데하이드 농도 저감 성능

UV-A 광량 조건별 TiO₂ 광촉매의 폼알데하이드 농도 저감 성능 실험 결과는 Table 5 및 Fig. 3과 같다.

첫째, TiO₂ 광촉매에 ISO 표준 조건 광량인 10 W/m²의 UV-A 광선을 조사할 경우, 반응 전 폼알데하이드 시작 농도는 1.02 ppm였으며, 광반응 종료 후 0.86 ppm으로 나타났다. 시작 농도에서 0.16 ppm이 저감되었으며, 농도 저감률은 15.22%이 확인되었다.

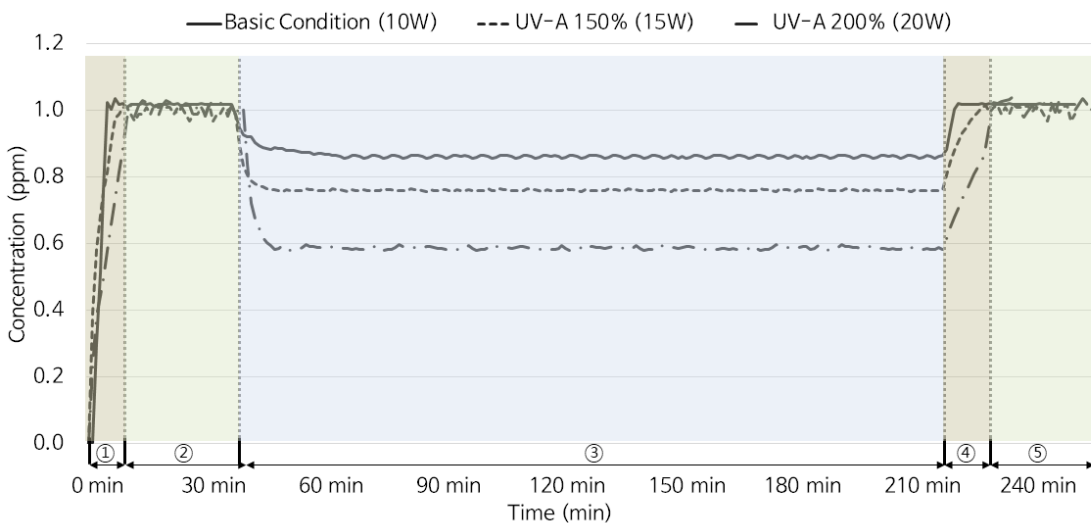
둘째, 광량 15 W/m²를 적용하였을 때, 폼알데하이드 농도는 0.99 ppm에서 0.23 ppm가 저감된 0.76 ppm이 나타났다. 농도 저감률로 환산하였을 때 24.43%이 나타났으며, 표준 광량 대비 저감률이 약 9.21% 증가하였다.

셋째, 광량 20 W/m²를 적용하였을 때, 폼알데하이드 농도는 1.00 ppm에서 0.42 ppm이 저감된 0.58 ppm이 나타났다. 농도 저감률은 42.37%로, 표준 광량 대비 농도 저감률이 약 27% 증가하였다.

이를 통해 TiO₂에 조사되는 UV-A Lamp의 광량에 따라 폼알데하이드 저감 성능이 비례적으로 증가하는 것을 확인하였다. 이는 광량 증가에 따른 광화학 반응이 더욱 활성화되어 산화반응을 촉진하기 때문인 것으로 사료된다.

3.2 폼알데하이드 제거량 산출

실험 방법 및 조건 및 광량 증가에 따른 TiO₂ 광촉매의 폼알데하이드 저감 성능 실험을 진행하였으며, 이를 바탕으로 폼알데하이드 제거량을 확인하였다. 제거량 산출식은 ISO 22197-4을 참고하였으며, 식(1), (2)와 같다.



① : Gas injection, ② : Maintain concentration, ③ : UV-A Reaction, ④ : Concentration increase again, ⑤ : Concentration check

Fig. 3 HCHO concentration test result according to UV-A irradiance.

Table 5 Concentration reduction according to UV-A irradiance

UV-A Irradiance	Concentration Variation			Decrease rate	
	Starting	Ending	Decrease		
10 W/m ²	1.02 ppm	0.86 ppm	0.16 ppm	15.22%	(-)
15 W/m ²	0.99 ppm	0.76 ppm	0.23 ppm	24.43%	(▲ 9.21%)
20 W/m ²	1.00 ppm	0.58 ppm	0.42 ppm	42.37%	(▲27.15%)

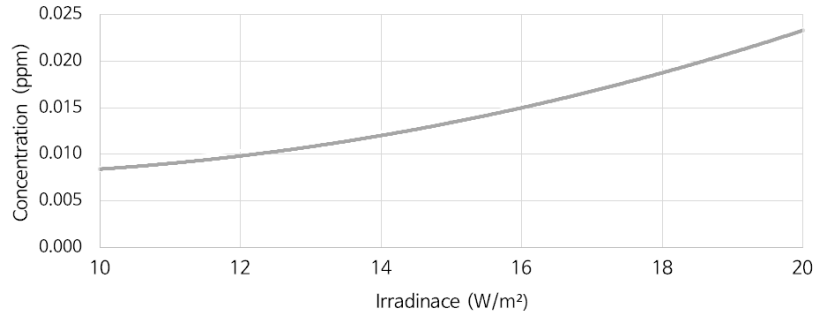


Fig. 4 HCHO removal quantity trend equation graph according to UV-A irradiance.

Table 6 HCHO reduction result

UV-A Irradiance	10.0 W/m ²	15.0 W/m ²	20.0 W/m ²
HCHO Reduction	0.0084 μmol/cm ² ·h	0.0134 μmol/cm ² ·h	0.0233 μmol/cm ² ·h

$$R_F = \frac{\varnothing_{F0} - \varnothing_F}{\varnothing_{F0}} \times 100 \quad (1)$$

$$\eta_F = R_F \times \frac{\varnothing_{F0} \times f \times 1.016 \times 60}{100 \times 22.4} \quad (2)$$

광량별 폼알데하이드 제거량은 Table 6과 같이 10 W/m²에서 0.0084 μmol/cm²·h, 15 W/m²에서 0.0134 μmol/cm²·h, 20 W/m²에서 0.0233 μmol/cm²·h가 나타났으며, 이를 바탕으로 작성된 추세방정식 그래프는 Fig. 4와 같다. 결과적으로, 광촉매에 조사되는 광량이 높아질수록 더 많은 폼알데하이드가 제거되는 것을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구는 TiO₂ 광촉매의 광량별 실내 폼알데하이드 저감 효율을 확인하고자 하였다. ISO 22197-4를 바탕으로 실험 장치 제작 및 조건을 적용하여 TiO₂ 광촉매에 조사되는 UV-A의 광량, 10 W/m², 15 W/m², 20 W/m²에 따른 폼알데하이드 농도 저감 성능을 비교 및 분석하였다.

첫째, ISO22197-4 표준 실험 조건인 광량 10 W/m²를 적용했을 때, 폼알데하이드 농도는 시작 시 1.02 ppm, 종료 시 0.86 ppm으로 시작 농도 대비 15.22% 저감 하는 것을 확인하였다.

둘째, 광량 변화에 따른 추가 실험 결과, 광량 15 W/m²를 적용하였을 때, 시작 시 0.99 ppm, 종료 시 0.76 ppm으로, 24.43%의 저감율을 보였다. 광량 20 W/m²를 적용하였을 때, 시작 시 1.00 ppm에서 종료 시 0.58 ppm으로, 42.37%의 저감율을 보였다. 각 광량의 저감률을 광량 10 W/m²와 비교하였을 때, 15 W/m²는 약 9%, 20 W/m²는 27% 증가한 것을 확인 할 수 있었다.

셋째, ISO 22197-4의 폼알데하이드 제거량 산출식을 인용하여 각 광량별 폼알데하이드 제거량을 확인하였으며, 10 W/m²에서 0.0084 μmol/cm²·h, 15 W/m²에서 0.0134 μmol/cm²·h, 20 W/m²에서 0.0233 mol/cm²·h를 확인하였다.

본 연구의 실험을 통해 TiO₂에 조사되는 UV-A 램프의 광량에 따라 폼알데하이드 저감 성능 및 제거량이 증가하는 것을 확인하였으며, 효율적인 적용 광량 조건을 도출하였다. 이를 바탕으로, 실내공기질 개선을 위한 장치인 환기 설비 및 공기청정기에 광촉매 및 조사되는 광량 20 W/m² 조건을 적용한다면 효과적으로 폼알데하이드를 제거할 것으로 사료되며, 관련 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 2022년도 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원에 의한 결과의 일부임(과제번호: 22SCIP-C146254-05).

References

1. Kim, Y. S., 1995, Health effects of Indoor air pollution, The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, The Magazine of the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, Vol. 24, No. 1, pp. 29-32.
2. Song, Y. W., Kim, S. E., Jung, Y. G., Yoo, J. Y., and Park, J. C., 2021, Controlling Nitrogen Oxide and Ultraviolet-A Irradiance in Ventilation Duct System Using TiO₂ Photocatalyst, Building and Environment, Vol. 199.
3. Korean National Institute Of Environmental Research, 2019, Handbook on the Exposure Factor of Koreans.
4. Lee, C. H., Lee, B. K., Back, K. J., and Choi, H. J., 2009, Analysis of Indoor Concentrations of Particulate Matter and Formaldehyde in Dwelling Spaces, Proceedings of the Korea Air Pollution Research Association Conference, pp. 352-353.
5. WHO, 2022, WHO Annual report 2021: WHO Asia-Pacific Centre for Environment and Health in the Western Pacific Region, WHO Departmental news.
6. Jung, K. C., 1995, Industrial Addiction Manual, Shinkwang Publishing Company, pp. 442-445.
7. Yang, W. H., 2018, Indoor air Quality and Risk Management, Jipmundang Publishing Company, p. 111.
8. Lee, E. T., 2005, Characteristics and Emission Analysis of Indoor Formaldehyde Sources, Korean Air Cleaning Association, Vol. 18, No. 4, pp. 14-25.
9. Asan Medical Center in Seoul, The cause of new house syndrome, Encyclopedia.
10. Nam, K. C. and Lee, Y. H., 2016, An Analysis on HCHO, TVOC, CO₂ Concentration of Existing-Housing Indoor-Air in Summer, KIEAE Journal, Vol. 16, No. 6, pp. 115-122.
11. The Ministry of Environment of Korea, 2022, Enforcement Decree of the Indoor Air Quality Control Act
12. The Ministry of Environment of Korea, 2022, The Inspection Results of the Inspection of the Pollution Level of New Apartments by the Inspection Agency 2010-2019, Environmental statistics portal.
13. Noh, K. C., 2018, A Case of Demonstrating the Reduction of Fine Dust in an Apartment Entilation System and Air Purifier, Air Cleaning Technology Vol. 31, No. 3, pp. 1-11.
14. Busan Institute of Health and Environment, 2021, Busan Institute of Health and Environment, Health and Environment LIFE.
15. Kim H. J. and Park J. S., 2009, Effects of Ventilation System Operation on Annual Energy Consumption in Apartments, Proceeding of Annual Conference of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, Vol. 29, No. 1, pp. 757-760.
16. Kim, J. H., Cho, H., Lee J. I., Kim Y. S., and Jeong, J. W., 2009, A Study on Current Problems of Heat Recovery Ventilator Operated by Occupants in High-rise Apartment Houses, Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, Vol. 25, No. 2, pp. 249-256.
17. An, S. W., Jang, J. W., and Park, J. W., 2016, Use of Photocatalyst in Civil & Environmental Engineering, Applied Chemistry for Engineering, Vol. 19, No. 5, pp. 25-32.
18. Kim, W. J., Jung, J. U., and Jeon, K. Y., 2009, Development of Visible Ray Photocatalyst for Reinforcement of Air Cleaning Function Indoors and Outdoors, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol. 25, No. 12, pp. 121-128.
19. Kim, H. T., Park, H. S., and Hong, W. H., 2005, A Study on Improvement Effect of Indoor Air Quality throughout the Photocatalyst Coating, Proceeding of Annual Conference of the Architectural Institute of Korea, Vol. 25, No. 1, pp. 351-354.
20. Lee, D. B., Kim, K. R., and Kim, H. J., 2004, NO_x and HCHO Clearance Characteristic of Cement Mortar using of the Carriers which Phtocatalyst Powder and Blast Furnace Slag Powder, Proceeding of Annual Conference of the Architectural Institute of Korea, Vol. 24, No. 1, pp. 211-214.
21. Wu, R. J., Liu, Y. S., Lai, H. F., Wang, J. H., and Chavali, M., 2014, Promotion Effect of Pd on TiO₂ for Visible

- Light Photocatalytic Degradation of Gaseous Formaldehyde, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 14, No. 9, pp. 6792-6799.
22. ISO, 2016, ISO(International Organization for Standardization) 22197-4, Part 4: Removal of Formaldehyde.
 23. Adhi, P. M., Rahman, H., Nuriskasari, I., Syamsudin, and Syahrom, A., 2022, A Simple and Low-cost Photocatalytic Air Purification Test Method, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 2243.
 24. Hot, J., Topalov, J., Ringot, E., and Bertron, A., 2017, Evaluation of Formaldehyde Degradation in a Standardized Photoreactor, In *Healthy Buildings 2017 Europe*.
 25. Puzynin, A. I., 2012, How to Synthesize Quartz Glass, *Glass and Ceramics*, Vol. 68, No. 9, pp. 297-301.
 26. Park, Y. B., Lee, U. S., Yang, C. Y., and Kim, B. H., 2020, Micro Grinding of Pyrex Glass, *The Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 2020, No. 12, pp. 305-307.
 27. Yoo K. H., 2005, Air Cleaning Technology Using Photocatalyst, *Air Cleaning Technology*, Vol. 18, No. 2, pp. 39-48.