

광촉매/광산화를 이용한 VOCs 처리장치 개발

전 보 경 · 최 금 찬 · 서 정 민*
동아대학교 환경공학과, *부산대학교 지역환경시스템전공
(2005년 12월 23일 접수; 2006년 8월 29일 채택)

Development for UV/TiO₂ Photocatalytic Oxidation Indoor Air Compound Process

Bo-Kyung Jeon, Kum-Chan Choi and Jeong-Min Suh*

Department of Environment engineering, Dong-a University, Busan 604-714, Korea

*Department of Regional environmental system engineering, Pusan National University, Miryang 627-702, Korea

(Manuscript received 23 December, 2005; accepted 29 August, 2006)

This study introduces a method to eliminate formaldehyde and benzene, toluene from indoor air by means of a photocatalytic oxidation reaction.

In the method introduced, for the good performance of the reaction, the effect and interactions of the TiO₂ catalyst and ultraviolet in photocatalytic degradation on the reaction area, dosages of catalysts, humidity and light should be precisely examined and controled. Experiments has been carried out under various intensities of UV light and initial concentrations of formaldehyde, benzene and toluene to investigate the removal efficiency of the pollutants. Reactors in the experiments consist of an annular type Pyrex glass flow reactor and an 11W germicidal lamp. Results of the experiments showed reduction of formaldehyde, benzene and toluene in ultraviolet /TiO₂/ activated carbon processes (photooxidation-photocatalytic oxidation-adsorption processes), from 98% to 90%, from 98% to 93% and from 99% to 97% respectively. Form the results we can get a conclusion that a ultraviolet/TiO₂/activated carbon system used in the method introduced is a powerful one for th treatment of formaldehyde, benzene and toluene of indoor spaces.

Key Words : Formaldehyde, TiO₂ catalyst, Photocatalytic oxidation

1. 서 론

산업발달은 인간생활에 많은 편리함과 혜택을 주지만 최근에 들어 환경오염과 같은 큰 문제점을 야기하고 있으며, 건물이 밀폐화되고 실내에 존재하는 오염물질 배출원이 증가함에 따라 공기오염은 비단 실외뿐만 아니라 실내에서도 중요한 문제로 거론되고 있다^{1~3)}.

실내 환경(Indoor Air Environment)은 인간을 둘러싸고 있는 실내의 총체라고 정의할 수 있으며, 21세기에는 생활환경의 측면에서 다루어져야 할 부분이다⁴⁾.

실내 환경(Indoor Air Environment)은 일반 대기 환경(Outdoor Air Environment)과는 달리 물리적, 화학적, 생물학적으로 매우 다양한 오염물질이 존재하며, 내부에서는 공기의 순환이 잘 안되고 정체 할 가능성이 크다는 점에서 대기환경과 구별되나 국가에서의 실내오염에 대한 정책은 대기환경에 비하여 아직 미흡한 실정이다. 이러한 실내오염물질들은 복합적인 배출원에서 기인되며 그 배출량은 물질에 따라 상당한 편차가 있을 뿐만 아니라 오염물질의 농도 분포 역시 시간적, 공간적 특성에 따라 매우 다양하게 나타날 수 있다^{5,6)}.

국내에서의 실내 공기질에 관한 연구는 다른 선진국에 비하여 늦은 감은 있지만 몇몇 연구자들에 의하여 서울 등 대도시를 중심으로 연구가 수행되어오고 있는 실정이다.

Corresponding Author : Jeong-Min Suh, Department of Regional environmental system engineering, Pusan National University, Miryang 627-702, Korea
Phone: +82-11-810-4778
E-mail: suhjm@pusan.ac.kr

실내오염물질 중 포름알데하이드(HCHO, Formaldehyde)는 주로 일반주택 및 공공건물에 많이 사용되는 단열제인 건축자재, 실내가구의 칠, 가스 난로 등에서의 연소과정, 접착제, 흡연 등에서 발생될 뿐만 아니라 약, 화장품 및 음식물의 방부제 등으로 그 사용범위가 광범위한은 이미 조사 보고되고 있다⁷⁻¹⁰⁾.

이는 알러지 증상을 가져오는 자극제이고 또한 발암물질로서 실내오염물질 중 하나이며, 특히 sick building syndrome(SBS)의 주 원인 물질이기도 하다. 실내공기환경에 있어서 포름알데하이드의 기준은 미국 EPA에서 설정한 기준과 ASHRAE에 의해 비사업장 환경에 적용될 수 있는 단기 최대 허용치에서 $120\mu\text{g}/\text{m}^3$ (약 100ppb)을 OSHA(Occupational Safety and Health Administration)의 산업보건기준은 TWA 0.3ppm으로 규정하고 있다.

한국의 경우에도 2004년 5월에 기존 지하생활공간 공기질 관리법이 다중 이용시설 등의 실내 공기질 관리법으로 전문 개정·시행됨에 따라 실내 공기질 중 포름알데하이드 단기 최대 허용치를 $120\mu\text{g}/\text{m}^3$ (약100ppb)로 재정하여 이미 포름알데하이드에 대한 관리를 시작했다.

이에 본 연구에서는 대표적인 실내오염물질인 휘발성유기화합물(VOC, Volatile Organic Compound) 중 B.T.(Benzene, Toluene)와 HCHO(Formaldehyde)를 제어대상물질로 선정하여 이들 물질을 제어하기 위한 하이브리드기술로 TiO_2 광촉매에 자외선을 조사시켜 ① 자외선 영역의 빛을 이용한 광촉매 산화반응, ② 활성탄을 이용한 흡착, 그리고 ③ 광촉매 산화 및 활성탄 흡착 복합공정 등 세 가지의 공정들

이 가지고 있는 핵심기술을 도입·병합하여 사무실, 일반가정집 등의 배출원에 적용할 수 있는 새로운 제어기술을 개발 하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

본 연구에서 사용된 실험장치는 시료가스 도입부, 유량 조절부, 유입 시료 채취부, TiO_2 광촉매 흡착부, 광산화 반응부, TiO_2 광촉매 코팅부, 활성탄 흡착부, 유출 시료 채취부 및 분석부로 구성이 되어 있다. 특히 활성탄 흡착부는 탈부착이 가능하므로 활성탄 흡착 단독공정과 광산화-활성탄 흡착 복합 공정의 실험이 모두 가능하도록 설계되었다.

시료가스는 유량 조절부에 설치된 M.F.C에 의해 유입 시료 채취부-반응기-유출 시료 채취부를 통과하고, 시료가스가 흐르는 관로는 테프론 재질의 관을 사용하여 시료가스와의 반응이 없도록 하였다. 그리고 본 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

2.1.1. 시료가스 도입부

시료가스 도입부는 본 실험의 처리대상 가스인 B.T.와 HCHO의 시료가스를 광산화-활성탄 흡착 반응부로 유입시키는 부분으로, 그 구성은 standard air gas bomb, 유량계(Rotameter; Dwyer社), Tedlar bag(100L×2EA) 그리고 교반기로 이루어져 있다. 미세 유량계로 일정량의 standard air를 Tedlar bag에 정량 주입하고, air sampling standard method를 적용하여 B.T와 HCHO용액의 적정량을 micro syringe를 사용하여 주입 후 교반기에서 충분히 혼합한다. 또한 반응기로 시료가스가 유입 시 반응기내에 균일하게 퍼질 수 있도록 유입부에 buffer plate를 설

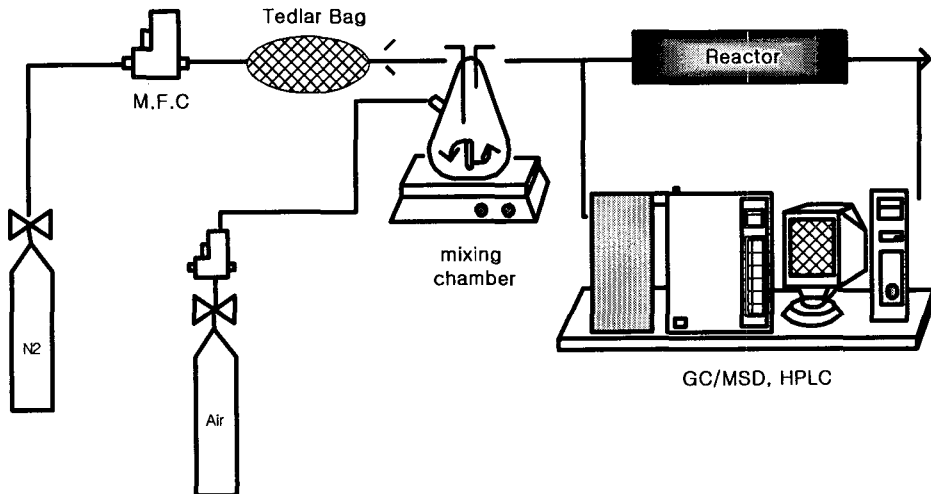


Fig. 1. Flow sheet of experimental apparatus.

치하였다.

2.1.2. 유량 조절부

유량 조절부는 반응기 내로 유입되는 시료가스의 유량을 조절하기 위하여 유량 조절기가 부착된 유량계와 시료가스를 이동시키기 위한 M.F.C(로 구성되어 있고 유량계의 유량은 실험 시마다 출구의 유량을 Bubble 유량계(Digiflow BF-05; SIBATA社)로 보정하였다.

2.1.3. 유입시료 채취부

유입시료 채취부는 광산화 반응기로 유입되는 농도를 측정하기 위하여 반응기 전단부에 설치하였으며 유입·유출시료 채취에 사용된 장비는 타원형구(球)의 중간에 septem이 장착된 시료채취구(Gas sampling bulb: 1,000ml, Glass Stopcocks Cat. No. 2-2144-u, SUPELCO)를 사용하였으며, 반응기와 마찬가지로 외부광선에 의한 영향을 차단하기 위하여 외부를 불투명한 스펀지로 감싸서 사용하였다.

2.1.4. TiO₂ 광촉매 흡착부

본 연구에서 사용된 광촉매는 TiO₂(Degussa P-25, Germany)를 사용하였다. P-25의 결정입자 형태는 약 70%가 anatase 형태를 갖고 있으며, 30%가 rutile 형태를 띠고 있다. 이 촉매 입자의 평균 지름은 2~3nm, 비표면적은 55m²/g이다.

2.1.5. 광산화 반응기

광산화 반응기는 아크릴, germicidal 램프, pyrex 재질의 유리관 그리고 안정기로 이루어져 있다. 광산화 반응부는 11W, 253.7nm와 380nm의 파장을 동시에 방사하는 UV램프(G11T8 Germicidal lamp), 안정기, 290nm 이상의 파장을 선별하여 방사시키기 위한 pyrex filter tube(ψ30), 길이 250mm, 높이

250mm, 넓이 250mm의 아크릴 재질의 모양으로 이루어져 있다. 단파장의 자외선으로 인한 피해를 막기 위해 아크릴관의 외부를 알루미늄 박막으로 썼다. 본 실험에서 사용한 UV램프는 253.7nm와 380nm의 자외선을 동시에 발생시키는 UV램프(G11T8 Germicidal lamp)를 사용하였으며, 본 실험에 사용된 UV램프의 파장의 측정 결과는 Fig. 2에 나타나 있다.

UV 램프 선정 시 가장 중요한 점은 실내공기 정화를 목적으로 함으로 램프 자체에서 나오는 오존 농도가 중요한 램프선정의 기준이 된다. Table. 1은 각각의 UV램프에서 발생하는 자외선 방출 값과 실제 측정된 오존 농도를 나타낸 것으로, 실내공간에 적용이 가능하게 하기위한 조건으로 램프의 크기가 작고 방출되는 오존 농도가 낮은 램프를 선정하였다. 현재 EPA에서 규정하고 있는 실내 공간 중 오존농도의 권고치는 국가 마다 다소 차이가 있으나 50ppb~120ppb 이하의 수준이다.

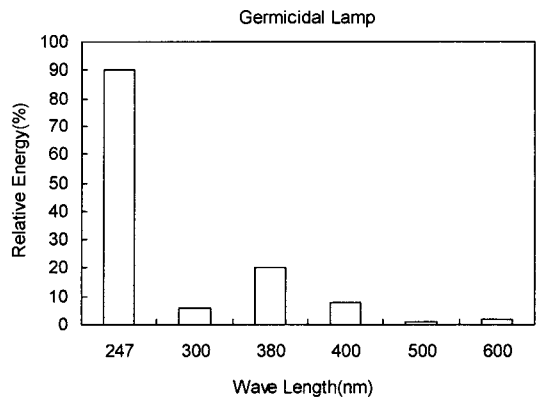


Fig. 2. Wavelength distribution of Germicidal lamp.¹¹⁾

Table 1. Ultraviolet output and Ozone concentration of lamp

Model	Wattage (W)	Tube Length (mm)	Ultraviolet Output (W/m ²)	Ozone concentration (ppb)
HUV-900 (ozone lamp)	3W	136	0.9	10000
HUV-127 (ozone lamp)	4W	212	1.5	16000
G5T5 (Germicidal lamp)	5W	136	12	25
G6T5 (Germicidal lamp)	6w	212	1.5	35
G11T8 (Germicidal lamp)	11w	212	2.2	41
G25T8 (Germicidal lamp)	25w	440	7.0	120

· 광촉매를 담체에 박막을 입혀 고정화시키기 위해 본 실험에서는 화학적인 방법으로, 가수분해와 중합 반응을 이용하는 sol-gel법을 사용하였다. 또한 활성탄 흡착장치는 본 실험의 주 반응장치라 하기보다는 주 반응인 광산화 반응기에서 반응 후 라디칼 상태로 배출되는 여러 가지 중간생성물을 제어하기 위한 부 반응장치로서 의미를 가진다.

실험에 사용한 흡착제는 파쇄상 활성탄(Coconut Base, 4×8Mash)을 사용하였다.

2.2. 시료가스의 제조

본 실험에 사용된 HCHO와 B.T의 시료가스는 Standard Air bomb에 M.F.C(mass flow controller, 5850E series, Japan)를 장착하여 Standard Air를 Tedlar bag으로 정량 유입시키고, Air sampling standard method¹²⁾를 적용하여 구한 적정량의 HCHO와 B.T.용액을 Tedlar bag에 주입하여 제조하였다. 즉, 일정 유량의 Standard Air를 Tedlar bag에 주입한 후 Micro syringe(1μl)를 사용하여 HCHO와 B.T.용액 적정량을 주입하고, 균일한 농도의 시료가스를 얻기 위하여 Magnetic stirrer 와 Mixing chamber로 구성된 교반기를 통과시켜 충분한 혼합이 이루어질 수 있도록 구성하였다.

$$C_{ppm} = 22.4 \times 10^6 \left(\frac{\rho V_L}{M V} \right) \left(\frac{T}{273} \right) \left(\frac{760}{P} \right)$$

- C: Concentration of test gas (ppm)
- ρ: Density of liquid sample (g/ml)
- M: Molecular weight of sample (g/mol)
- V_L: Volume of liquid sample (ml)
- V: Volume of Tedlar bag (ℓ)
- T: Temperature (K)
- P: Pressure (mmHg)

시료가스의 농도는 HCHO와 B.T.는 1~3 ppm의 농도로 유입하였다.

2.3. 실험순서

실험을 수행함에 앞서 반응기의 유입과 유출부의 유량을 보정하기 위하여 유량 조절기가 부착된 유량계와 Bubble 유량계를 사용하여 유량을 보정하였고 더욱 정확성을 높이기 위해 M.F.C를 사용하였다.

Tedlar bag내의 시료가스를 magnetic stirrer를 이용하여 교반시켜 HCHO 와 B.T 모의가스를 발생시켜 각각 유입시켰다. HCHO 와 B.T(Carrier gas : Standard air) 모의가스의 농도를 1~3ppm으로 제조하였다. 본 실험에서 HCHO와 B.T는 처리유량을 각각 1, 2, 3, 5 LPM으로 변화시키면서 유량과 농도

에 따른 HCHO와 B.T의 UV광산화/광촉매 산화, 활성탄 흡착, UV광산화/광촉매 산화 활성탄 복합공정의 처리효율을 비교·검토하였다.

2.4. 측정 및 분석

2.4.1. HCHO

포름알데하이드는 2,4-DNPH(Dinitrophenylhydrazine) cartridge(SKC Sorbent Tube, 226-120, U.S.A)를 이용하여 측정하였다. Supelco Formaldehyde-2,4-DNPH Cartridge 는 10cm의 유리튜브에 고순도로 정제된 2,4-DNPH가 코팅되어 있는 흡착제가 충전되어있으며, 흡착제의 전·후에는 폴리에틸렌 필터로 구성되어 있다.

DNPH 유도체화 방법은 공기 중에 존재하는 카르보닐화합물과 DNPH와의 반응에 의해 생성되는 DNPH 유도체를 분석하는 방법으로 시료의 포집 시 알데히드뿐만 아니라 케톤과도 반응하여 안정한 유도체를 형성하는 것이 특징이다¹³⁾.

Fig. 3은 카르보닐 화합물과 2,4-DNPH와의 유도체화 반응을 나타낸 것으로 이와 같은 반응을 통해 카르보닐 화합물은 안정한 2,4-DNPH Hydrazone유도체 형태로 전환되고 H₂O를 부산물로 생성하게 된다¹⁴⁾.

시료가스인 포름알데하이드의 반응 전·후의 농도 분석은 HPLC(HP1100, USA)를 사용하여 측정하였으며, HPLC의 분석 조건은 Table. 2에 나타내었다.

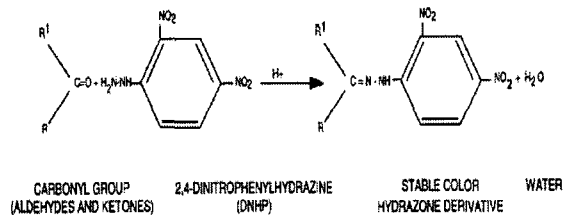


Fig. 3. Derivative reaction of carbonyl compounds.

Table 2. The analytical conditions of High Performance Liquid Chromatograph

Items	HCHO Analysis Condition
HPLC	HP 1100, U.S.A
Detector	DAD
Column	Zorbox C ₁₈
Mobile Phases	45% acetonitrile/55% water
Analysis Time	20min
Injection Volume	20μl
Column Temperature	25℃
Flow Rate	1.3 ml/min
Purge Gas and Flow	He(99.99%), 100ml/min

2.4.2. Benzene, Toluene의 분석

시료가스인 B.T.의 농도 분석은GC-MSD(micro mass plattform-II, UK)를 사용하여 측정하였으며, GC-MSD 분석 조건은 Table 3에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. UV/TiO₂ 광촉매 산화 공정에 의한 처리특성

UV/TiO₂ 광촉매 산화 공정에 의한 실내공기 오염물질의 연속공정 처리 효율을 조사하기 위하여 자체 개발한 반응기 안에 있는 램프 주위를 Pylex 광학 필터로 에워싸서 자외선 영역의 빛을 조사시킨 후 UV/TiO₂ 광촉매 산화 공정에 의한 HCHO 및 B.T.처리 실험을 수행하였다.

유입농도는 HCHO는 1, 2, 3ppm으로 하였고 Benzene, Toluene의 유입농도는 2ppm으로 하여 반응기에 유입시키고 각각의 처리유량을 1, 2, 3, 5 LPM으로 하여 실험을 수행하였다.

Fig. 4은 UV/TiO₂ 광촉매 연속 공정에 대한 유입

Table 3. The analytical conditions of gas chromatography

Items		Conditions
Column	Model number	HP 19091Z-433 (HP-1)
	Length	30m
	Diameter	0.25mm
	Film thickness	0.25 μ m
Inlet	Initial temp.	200 $^{\circ}$ C
	Split ratio	2 : 1
Oven	Initial temp.	40 $^{\circ}$ C (3min)
	Rate	8 $^{\circ}$ C/min
	Final temp.	60 $^{\circ}$ C (0.5min)
Detector	Type	MSD
	Temp.	250 $^{\circ}$ C

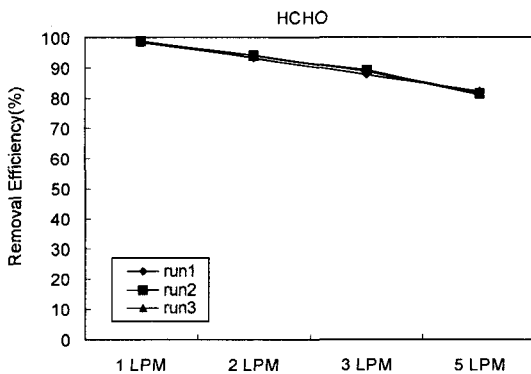


Fig. 4. The removal efficiency of HCHO. using photocatalytic oxidation process.(concentration : 1ppm)

농도 1ppm일 때 유량별 HCHO의 제거율을 나타낸 것이다. 1LPM에서는 약 99%의 제거 효율은 나타내었으나 그 이상의 유량에서는 제거효율이 감소하기 시작하여 5LPM에서는 제거효율이 약 80%까지 감소되었다.

Fig. 5는 유입농도 2ppm에 대한 유량별 HCHO의 제거율을 나타낸 것이다. 1ppm 일 때 보다 약간 낮으나, 유량이 1LPM일 때의 제거효율은 약 98%로 조사되었으며, 그 이상의 유량에서는 제거효율이 점점 감소하는 추세를 보이다가 5LPM에서의 농도가 약 700ppb로 제거효율이 65%로 급격히 감소함을 알 수 있다.

Fig. 6는 처리농도 3ppm에 대한 HCHO의 제거율을 나타내었다. 1LPM에 대한 제거효율은 약 96%로 나타났는데, 이는 저유량에서는 처리농도에 따라 제거효율은 큰 차이를 나타내지 않았다. 2, 3, 5 LPM의 제거 효율은 약 90%, 82%, 70%로 각각 나타났다. 예비실험을 통해서 유입농도가 증가되어도

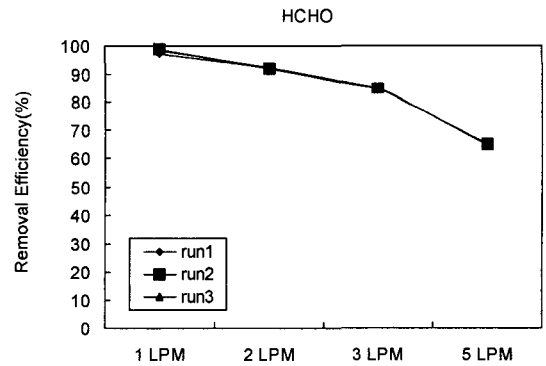


Fig. 5. The removal efficiency of HCHO. using photocatalytic oxidation process.(concentration : 2ppm)

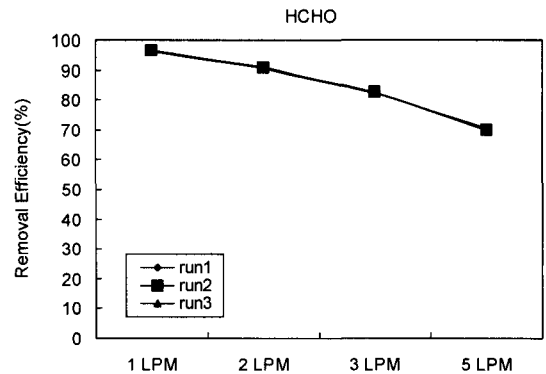


Fig. 6. The removal efficiency of HCHO. using photocatalytic oxidation process.(concentration : 3ppm)

저 유량일 때는 제거효율에 큰 차이를 나타내지 않고, 유량이 높아지면 높아질수록 제거 효율이 감소된다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 7에 유입농도 2ppm에 대한 Benzene의 제거 효율을 나타내었다. 1LPM에서 120ppb의 농도를 유입하였을 때 약 94%의 제거효율을 나타내었다. 2LPM에서의 제거효율은 83%, 3 LPM에서는 72%, 5 LPM에서는 63%의 제거효율을 나타냈다.

Fig. 8에 유입농도 2ppm에 대한 Toluene의 제거 효율을 나타내었다.

1LPM에서 40ppb의 농도를 유출되었을 때 약 99%의 제거효율을 나타내었다. 2LPM, 3LPM까지도 80% 이상의 제거효율을 나타내었으나, 5LPM에서 급격히 감소하여 67%의 제거효율을 나타내었다.

TiO₂ 광촉매산화 공정에 의한 HCHO 및 B.T. 처리 실험결과, HCHO와 Toluene은 유량이 1LPM 일 때 제거효율이 약 99%로 나타났으며, Benzene은 제

거효율이 약 94%로 HCHO와 Toluene보다는 제거 효율이 월등히 낮음을 알 수 있다. HCHO, Benzene, Toluene의 유입농도가 2ppm으로 같을 때의 결과를 고찰하면 HCHO와 Benzene은 유량이 2LPM일 때까지의 제거효율이 약 92% 이상으로 조사되었으나, Toluene은 이보다 10%이상 낮은 제거효율을 나타내었다. 물질에 따라 조금의 차이는 있지만 유량이 5LPM 일 때 HCHO, Benzene, Toluene의 제거효율이 급격히 감소됨을 알 수 있었다.

예비실험의 통하여 유입농도가 저 농도이며, 이때의 유량이 각각 1~3 LPM일 때 UV/TiO₂ 광촉매산화 처리가 가장 적절하게 이루어짐을 알 수 있었다.

본 예비 실험에서는 광원의 세기와 장치의 규모 등으로 보아 1~2ppm이 적절한 처리농도로 보인다. 더 높은 고농도의 HCHO와 B.T.의 처리를 위해서는 광원의 세기를 높이고 체류시간 등을 늘리는 등의 조치가 필요한 것으로 판단된다. 그러나 본 실험의 목적은 실내공기 정화이므로 목적에 맞는 적당한 처리 범위라고 할 수 있다. 저 유량일 때의 처리 효율이 높으나 유량이 높아지면서 제거효율이 낮아짐을 알 수 있었다. 따라서 유량적인 면에서 고용량을 처리할 수 있는 예비단계의 실험으로써 처리가능 여부를 검토하였고, 챔버형 순환공기정화용 실험에서는 대용량을 처리하고자 한다.

3.2. 활성탄 단독 공정에 의한 처리 특성

본 예비실험에서는 활성탄 단독 공정에 의한 HCHO 및 B.T. 처리 효율을 살펴보기 위하여, Standard Air를 사용하여 농도가 1~3 ppm인 HCHO 및 농도가 2ppm인 B.T. 시료가스를 제조하고, 유량이 1LPM, 2LPM, 3LPM, 5LPM일 때의 활성탄 흡착특성을 분석하였다.

Fig. 9은 처리농도 1ppm에서 활성탄 단독공정에 대한 HCHO의 흡착효율은 나타낸 것이다. 활성탄

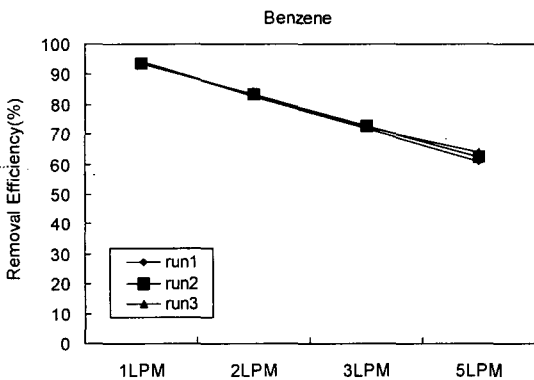


Fig. 7. The removal efficiency of Benzene using photocatalytic oxidation process.(concentration : 2ppm)

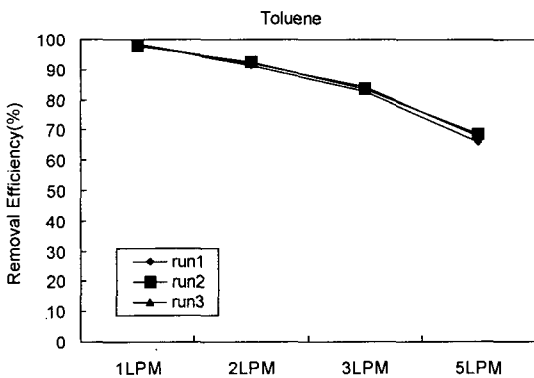


Fig. 8. The removal efficiency of Toluene using photocatalytic oxidation process.(concentration : 2ppm)

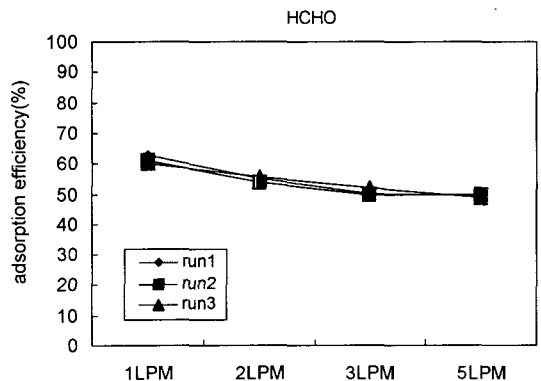


Fig. 9. The removal efficiency of HCHO using activated carbon process.(concentration : 1ppm)

단독공정에서의 흡착효율은 1LPM에서 약 62%로 조사되었고 2LPM, 3LPM, 5LPM은 각각 55%, 51%, 50%으로 나타났다. 이는 광촉매 산화 공정에 비해 효율이 많이 떨어지는 것으로 나타났다. 특이한 점은 유량에 변화에 따른 흡착효율이 많이 차이가 나지 않는다는 것이다. 이는 저 유량에서는 활성탄의 흡착 능력에 크게 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 10와 Fig. 11은 HCHO의 유입농도가 2ppm, 3ppm 일 때의 활성탄 흡착효율을 나타낸 것이다. 유입농도가 2ppm일 때의 유량에 따른 흡착효율을 살펴보면 1LPM에서 5LPM까지의 흡착효율이 66%~55%로 나타났다. 3ppm에서의 흡착효율은 1LPM, 2LPM, 3LPM, 5LPM의 유량에서 약 61%, 56%, 50%, 49%의 흡착효율을 조사할 수 있었다.

HCHO의 활성탄 흡착 단독공정에서 할 수 있는 것은 본 실험에서 조사한 유량 범위 내에서는 활성탄 흡착의 경우 흡착 효율의 변화가 저 유량, 저 농도

일 때 광촉매 산화 공정에 비해 유량에 따른 효율의 변화가 크게 나타나지 않는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 12과 Fig. 13은 각각 benzene 과 toluene의 활성탄 흡착효율을 나타내었다. benzene의 경우 흡착효율이 77%~65%의 범위로 조사되었으며 toluene은 1LPM → 88%, 2LPM → 84%, 3LPM → 80%, 5LPM → 74%로 조사되었다. 위의 결과는 선진연구자들의 의해 연구된 결과와 유사한 것으로 toluene이 benzene보다 높은 흡착율을 나타내었다.

활성탄 단독 공정에서는 toluene의 흡착효율이 가장 높게 나타났으며, 다음으로 benzene, HCHO 순으로 나타났다.

3.3. UV/TiO₂ 광촉매 산화 - 활성탄 복합공정의 처리특성

UV/TiO₂ 광촉매 산화 - 활성탄 복합공정에 의한 HCHO 및 benzene, toluene의 처리효율을 살펴보기 위하여 TiO₂ 산화 반응기부와 활성탄 흡착부를 직렬로 연결하여 처리유량 1LPM, 2LPM, 3LPM,

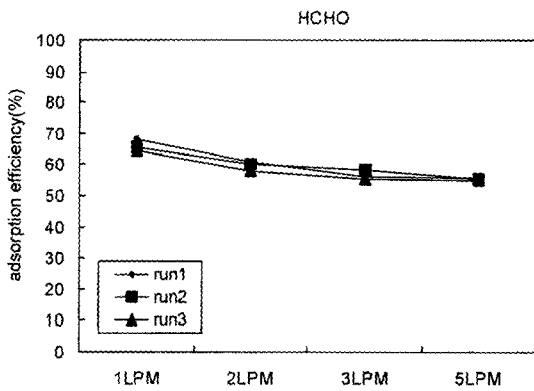


Fig. 10. The removal efficiency of HCHO using activated carbon process. (concentration : 2ppm)

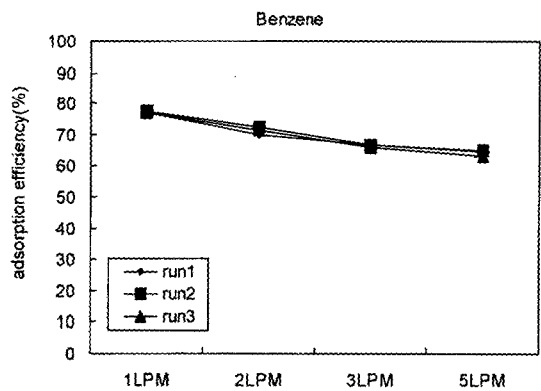


Fig. 12. The removal efficiency of benzene using activated carbon process. (concentration : 2ppm)

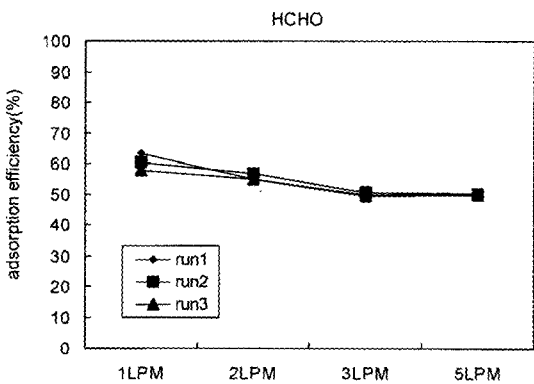


Fig. 11. The removal efficiency of HCHO using activated carbon process.(concentration : 3ppm)

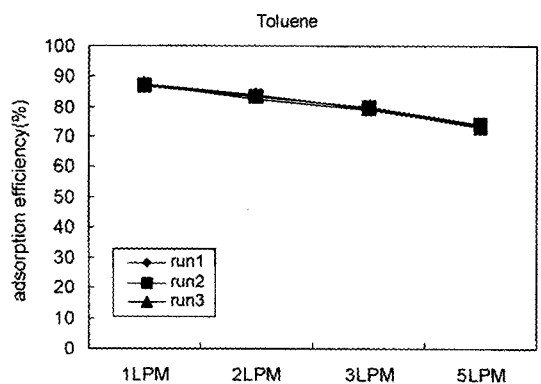


Fig. 13. The removal efficiency of toluene using activated carbon process. (concentration : 2ppm)

5LPM으로 동일하게 적용하고 유입농도를 HCHO는 1ppm, 2ppm, 3ppm으로 하였으며, benzene과 toluene은 2ppm의 유입농도로 처리 실험을 수행한 결과를 Fig. 14~Fig. 18에 나타내었다.

Fig. 14는 유입농도를 1ppm로 HCHO의 제거효율을 나타낸 그림이다. UV광산화/광촉매-활성탄 복합공정에 의한 HCHO의 제거효율은 1LPM일 때 97%, 2LPM일 때 94%, 3LPM일 때 91%, 5LPM일 때 91%로 각각 조사되었다.

Fig. 15와 Fig. 16은 HCHO의 유입농도가 각각 2ppm과 3ppm일 때의 UV/TiO₂ 광촉매 산화 - 활성탄 복합공정에서의 제거효율을 나타낸 것이다. 위의 결과를 UV/TiO₂ 광촉매 산화 공정과 비교해 보면, 유량이 1LPM일 때의 제거효율은 UV/TiO₂ 광촉매 산화 공정이 약99%의 제거효율을 나타낸 반면 위의 그림과 같이 연속공정에서의 1LPM의 제거효율은 약 98%의 제거효율을 나타내었다. 그러나 2LPM, 3LPM, LPM일 때는 오히려 연속공정이 97%~90%의 제거효율로 UV/TiO₂ 광촉매 산화 공정 보다 높

은 제거효율이 나오는 것으로 조사되었다. 이것은 UV/TiO₂ 광촉매 산화 공정에서의 문제점인 유량이 증가할수록 제거효율이 급격히 낮아지는 문제를 해결할 수 있게 된 것이라고 판단할 수 있다. UV/TiO₂ 광촉매 산화 - 활성탄 복합공정에서는 유량이 증가하더라도 제거효율이 급격하게 떨어지는 현상은 나타나지 않았다. 그 이유로서는 3LPM이상에서 UV/TiO₂ 광촉매 산화 공정을 거치고 미처리된 가스들이 UV/TiO₂ 광촉매 산화 - 활성탄 복합공정의 후단에서 흡착됨을 의미하며, 이것은 저 농도 실내 공기 정화 장치로서 유량이 높아질 경우에도 높은 제거효율을 기대할 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 17과 Fig. 18는 benzene 과 toluene의 유입농도가 2ppm으로 유량이 1LPM, 2LPM, 3LPM, 5LPM 일 때 UV/TiO₂ 광촉매 산화 - 활성탄 복합공정에서의 제거 효율을 나타낸 것이다. Benzene의 경우 1LPM의 처리효율은 98%이며 5LPM일 때 93%로 조사되었다. Toluene의 경우는 1LPM~5LPM까지의 제거효율 범위가 99%~97%로 가장

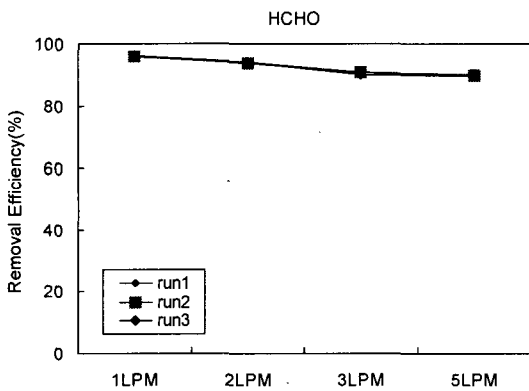


Fig. 14. Removal efficiency of HCHO by hybrid process.(concentration : 1ppm)

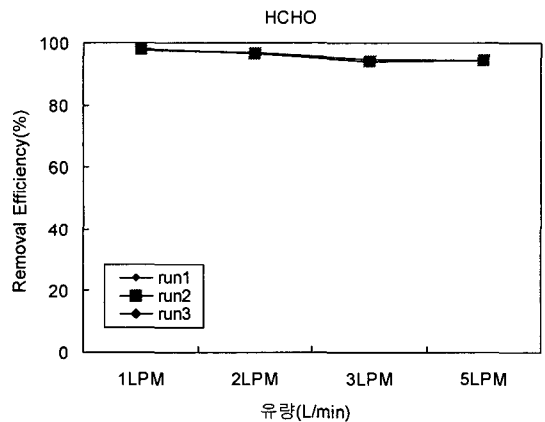


Fig. 16. Removal efficiency of HCHO by hybrid process.(concentration : 3ppm)

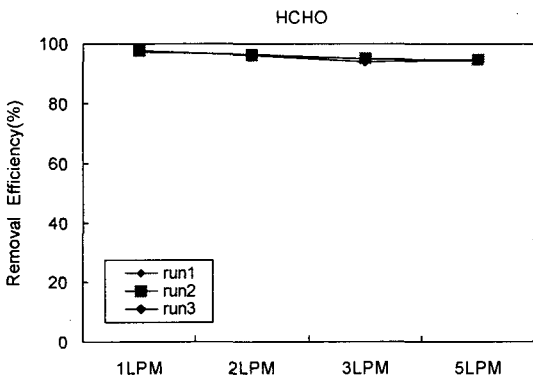


Fig. 15. Removal efficiency of HCHO by hybrid process.(concentration : 2 ppm)

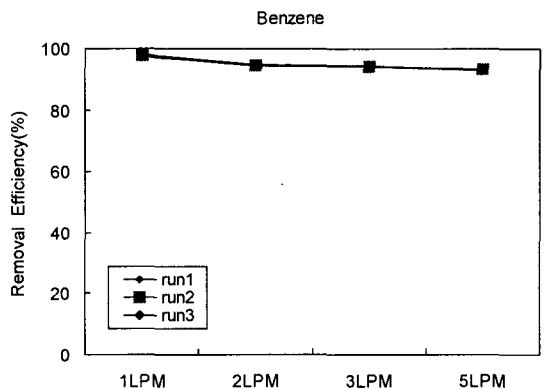


Fig. 17. Removal efficiency of benzene by hybrid process.(concentration : 2ppm)

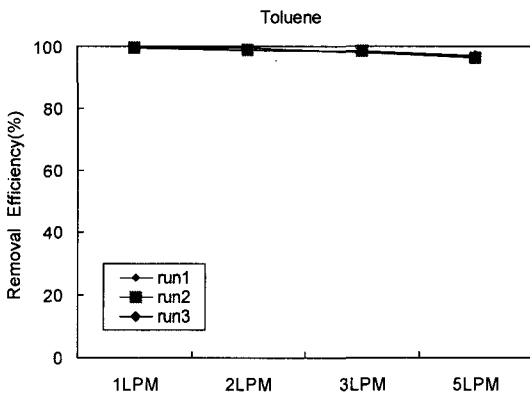


Fig. 18. removal efficiency of toluene by hybrid process.(concentration : 2ppm)

제거효율이 좋은 것으로 나타났다.

UV/TiO₂ 광촉매 산화 - 활성탄 복합공정에서의 처리효율은 HCHO : 약 98%~90%, Benzene: 약 98%~93%, Toluene: 약 99%~97%로 조사되었다.

본 실험에서 알 수 있는 것은 UV/TiO₂ 광촉매 산화 - 활성탄 복합공정에서는 저 농도, 고 유량의 공기정화 장치에 적용이 가능할 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 실내공기 오염물질의 처리를 목적으로 UV/TiO₂ 광촉매 산화공정을 단독 구성하고 UV/TiO₂ 광촉매 산화-활성탄 복합공정으로 하여 실내공기오염의 대표적인 물질인 HCHO와 benzene, toluene 처리의 제거율을 높이기 위해 영향인자들을 고찰하였으며, 단독 및 복합공정의 적용가능성을 검토하였다.

실험결과 UV 광산화/광촉매 공정에서 HCHO의 제거효율은 유입농도 1 ppm에 대한 유량별 제거효율은 약 99%~80%, 유입농도 2 ppm에 대한 유량별 제거효율은 약 98%~65%, 유입농도 3 ppm에 대한 유량별 제거효율은 약 96%~70%로 조사되었다.

Benzene의 제거효율은 유입농도 2ppm 유입유량 1 LPM → 94%, 2 LPM → 83%, 3 LPM → 72%, 5 LPM → 63%로 조사되었다. Toluene의 제거효율은 1 LPM에서의 약 99%, 2LPM, 3LPM까지도 80% 이상의 제거효율을 나타내었고 5LPM의 유량에서는 67%로 나타났다.

UV 광산화/광촉매 공정에서의 제거효율은 유량이 증가할수록 제거효율이 점차 낮아짐을 알 수 있었고, 유입농도가 저 농도일 때 적정유량이 1LPM~3LPM인 것을 확인하였다. 실내공기 정화장치로서는 고유량으로 저농도를 처리할 수 있어야 한

다. 따라서 단일장치로서 TiO₂ 광촉매반응기 만으로는 부족함을 알 수 있었다.

활성탄 단독공정에서 처리농도 1ppm에서 HCHO의 흡착 제거 효율은 활성탄 단독공정에서의 흡착효율은 1LPM에서 약 62%로 조사되었고 2LPM, 3LPM, 5LPM은 각각 55%, 51%, 50%로 나타났다. 2ppm일 때의 유량에 따른 흡착효율을 살펴보면 1LPM에서 5LPM까지의 흡착효율이 66%~55%로 나타났다. 3ppm에서의 흡착효율은 1LPM, 2LPM, 3LPM, 5LPM의 유량에서 약 61%, 56%, 50%, 49%의 흡착효율을 조사할 수 있었다. 이는 광촉매 산화공정에 비해 효율이 많이 떨어지는 것으로 나타났다. Benzene의 경우 흡착효율이 77%~65%의 범위로 조사되었으며, Toluene은 1LPM 일 경우 88%, 2LPM 에서 84%, 3LPM 일 때 80%, 5LPM 에서 74%로 조사되었다. 특이한 점은 유량에 변화에 따른 흡착효율이 광촉매산화 단독 공정보다 많이 차이가 나지 않는다는 것이다.

UV광산화/광촉매-활성탄 복합공정에서의 처리효율은 HCHO: 약 98%~90%, Benzene: 약98%~93%, Toluene: 약99%~97%로 조사되었다.

본 실험에서 알 수 있는 것은 UV광산화/광촉매-활성탄 복합공정에서는 저 농도, 고 유량의 공기정화 장치에 적용이 가능하리라는 것을 알 수 있다. 이는 UV광산화/광촉매 공정에서의 문제점인 유량이 증가할수록 제거효율이 급격히 낮아지는 문제를 해결 할 수 있게 되었다. UV광산화/광촉매-활성탄 복합공정에서는 유량이 증가하더라도 제거효율이 급격하게 떨어지는 현상은 나타나지 않았다. 본 연구에서의 실험결과 본 연구에서 제작하여진 장치의 적용 가능한 공간은 신축아파트, 신축빌딩, 리모델링 건물 등 새롭게 만들어진 건축물과 겨울철 난방으로 인해 실내오염 물질의 증가가 우려되는 일반 가정집 등으로 적용 범위를 확대 할 수 있다. 다만 실제 적용을 위해서는 앞으로 더욱 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 경남지역환경기술개발센터 연구개발사업의 일환으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 서정민, 박정호, 최금찬, 2003, 대기오염개론, GS Tech.com, pp.219-231.
- 2) Photodegradation of volatile organic compound (VOCs) and NO for indoor air purification using TiO₂. 2003, promotion versus inhibition ef-

- fect of NO, Applied Catalysis B : Environmental 42, pp.119-129
- 3) Juan, Z. and X. Yang, 2003, Photocatalytic oxidation for indoor air purification: a literature review, Building and Environment 38, pp.645-654.
 - 4) Hines, A. L., et al., 1993, Indoor Air Quality and Control, New Jersey, PTR PrenticeHall.
 - 5) 한국대기보전학회 측정분석분과위원회, 1998, 대기환경과 휘발성 유기화합물질.
 - 6) Testuro, N., F. akira, S. Phillip and H. Kazuhito, 1998, Photocatalytic Degradation of Gaseous Formaldehyde Using TiO₂ Film, J. of Enviro & Tech.(32), 23.
 - 7) Obee, T. N. and R. T. Brown, 1995, TiO₂ Phtocatalysis for Indoor Air Application, Effects of Humidity and Trace Contaminants Levels on the Oxidation Rate of Formaldehyde, Roluene and 1,3-Butadiene, J. of Enviro & Tech.(29), 5.
 - 8) Pawel, W., D. P. Wyon, Y. K. Baik, G. Clausen and P. O. Fanger, 1999, Perceived air quality, sick building syndrome (SBS) symptoms and productivity in an office with two different pollution loads, indoor Air(9), 1, pp.165~179
 - 9) 최금찬, 2002, 실내공간공기질 관리방안 및 현황 연구, 부산광역시 연구보고서.
 - 10) 김윤신, 1999, 실내공기질 관리방안에 관한 연구, 환경부 연구보고서.
 - 11) 한성 자외선, UV파장측정 정보, www.hansunguv.co.kr.
 - 12) Moris, K., Method of Air sampling and Analysis, 2th Edition.
 - 13) Sirju, A. P. and P. B. Shepson, 1995, Laboratoy and Field investigation of the DNPH cartrige technique for the measurement of atmospheric carbonyl compounds, Environmental Science Technolohy(29), 2, pp.384-392.
 - 14) U.S.A, EPA, 1999, Determination of form-aldehyde in ambient air using adsorbent car-tridge followed by high performance liquid chromatography(HPLC), compendium method TO-11A.