

UV-TiO₂ 광촉매 기반의 공기 정화 시스템의 운전조건에 대한 연구

한창석 · 장혁상[†]

영남대학교 건설환경공학부

(2007년 12월 18일 접수, 2008년 2월 11일 채택)

A Study on the Operational Variables of the UV-TiO₂ Based Photocatalytic Air Cleaning System

Changseok Han · Hyuksang Chang[†]

School of Civil and Environmental Engineering, Yeungnam University

ABSTRACT : A study on the operational variables of the UV-TiO₂ based photocatalytic air cleaning system was tried. In this study, to examine effects as various air cleaning system conditions, a duct-type reactor was made, and TiO₂ was immobilized on a stainless mesh. Benzene was chosen as a target compound. Removal experiments for benzene were done under different initial benzene concentration, air velocity, TiO₂ loading, area coated TiO₂ as the same TiO₂ loading, and UV light intensity conditions. During the experiments, relative humidity was 55%, and reactor temperature was 45°C. As a result, the photocatalytic degradation of benzene decreased as the inlet concentration increased. But the photocatalytic degradation increased as the concentration boundary layer thickness, amount of TiO₂, area coated TiO₂ as the same amount of TiO₂, and UV light intensity increased. Based on results of current study, they can be applied to the design of air cleaning system over low level VOCs in the indoor air.

Key Words : Benzene, UV, TiO₂, Photocatalytic Reaction, Volatile Organic Compounds(VOCs), Boundary Layer

요약 : UV-TiO₂ 광촉매를 이용한 공기 정화 시스템에 운전조건에 대한 연구가 수행되었다. 이 연구에서 시스템의 운영 조건이 바뀌에 따른 오염물질 제거 특성을 관찰하기 위해 덕트 형태의 반응기를 제작하고, 스테인레스 격자망에 TiO₂를 코팅하였다. 또한 benzene을 이용하여 UV/TiO₂ 공정으로 유입농도를 변화시키고, 반응기로 들어오는 유량을 조절하여 TiO₂를 코팅한 스테인레스 격자망을 부착한 평판에서의 유속을 변화시켰으며, 코팅한 TiO₂ 광촉매량을 변화시키고, 일정한 양의 TiO₂ 광촉매를 코팅한 면적을 변화시켰으며, UV light intensity를 변화시켜 그에 따른 영향을 관찰하였다. 모든 실험에서의 상대습도는 55%, 반응기 온도는 45°C를 유지하였다. 실험의 결과를 살펴보면, benzene의 유입농도가 증가할수록 제거효율이 감소하였고, 유속이 느려질수록, 즉 농도 경계층 두께(concentration boundary layer thickness)가 증가할수록, 코팅한 광촉매량, 광촉매를 코팅한 면적, 조사한 UV 램프의 intensity가 증가할수록 benzene 제거효율이 증가하였다. 본 연구 자료를 바탕으로 실내 공기 중 저농도의 VOCs를 대상으로 공기 정화 시스템을 설계할 경우 유용하게 적용할 수 있는 자료를 제시할 수 있다고 판단된다.

주제어 : 벤젠, 자외선, TiO₂, 광촉매 반응, volatile organic compounds(VOCs), 경계층

1. 서론

현대 사회의 발전과 사회 구성원의 소득 증대는 개인의 건강 및 생활환경 개선에 대한 관심증가로 나타나고 있으며, 이러한 관심들은 웰빙(well-being)이라는 용어로 대변되어 사회 전반적으로 확산되고 있다. 최근에 개인이 체류하는 실내 공간은 에너지 효율 개선 및 방음 효과를 극대화하려는 형태로 공간 구조물이 배치되고 있고, 이와 함께 공간의 쾌적성과 안락함을 추구하려는 경향도 강하게 되어 이 요구에 부응하기 위한 다양한 형태의 실내 내장재들이 공급되고 있다. 이에 따라 실내 공기는 각종 내장재로부터 기인되는 공기오염물질을 함유할 가능성이 높아지고, 아

울러 공간 구조물의 특성상 실내외 공기의 상대적인 순환이 차폐되었기 때문에 오염된 실내 공기는 반 밀폐된 공간에서 오랫동안 체류하게 된다. 따라서 한번 오염되어 장시간 실내에 머물게 되는 공기는 실내에서 활동하는 사람들에게 지속적인 영향을 주게 된다. 공공시설 역시 개인이 체류하는 공간 특성과 크게 다르지 않기 때문에 도시인들은 경우에 따라 다르지만 활동 시간의 대부분을 부적절한 실내 공기 환경에서 보내게 될 가능성이 높다. 이러한 이유로 인해 실내 공기질 개선에 대한 관심이 높아지고 있다.¹⁾

실내 공기질 개선의 주요 관심 항목으로는 미세 입자에 의한 오염과 기체상 오염물질에 의한 오염으로 구분될 수 있는데, 이를 해결하기 위한 여러 가지 관리 및 제어 전략이 광범위하게 시도되고 있다. 특히, 기체상 오염물질 가운데서 대표적인 오염물질 중의 하나인 휘발성 유기화합물(volatile organic compounds ; VOCs)은 실내 악취 유발 및

[†] Corresponding author
E-mail: hschang@yu.ac.kr
Tel: 053-810-2547

Fax: 053-811-5288

자체 유해성 측면에서 주요한 제어 대상물질로 다루어지고 있다. 공기 중 VOCs를 제어하기 위해 연구되는 다양한 기술 중의 하나가 광촉매를 이용한 오염물질 제거기술인데, 이는 많은 연구자들에 의해 이미 여러 형태로 연구되었으며,¹⁻⁵⁾ 지금도 꾸준히 연구가 진행되고 있다. 광촉매 응용 연구 분야를 살펴보면, 재료 구조적인 측면에서 광촉매의 물성을 조작하여 광촉매 자체가 가지는 화학적 분해 성능을 증가 시키는 방법에 대한 연구^{4,6-8)}가 가장 중요한 기초 연구로 진행되고 있고, 이와 더불어 광촉매 물성 조작을 통해 UV나 플라즈마 대신 가시광선을 에너지원으로 사용하기 위한 광촉매 활성화기술 연구들이 많이 진행되었다. 하지만, 많은 연구가 있음에도 불구하고 현재 성능면에서 그리 만족스럽지 못한 것이 사실이다. 이러한 조건에서 판단해 보면, 촉매 및 촉매 활성화 기술의 선택 및 개선도 중요하지만 주어진 광촉매 재료와 광촉매 활성화 기술을 이용하여 광촉매가 가지는 오염물질 분해 성능을 최대한 발휘할 수 있도록 시스템적인 운전조건을 결정해 주는 것도 중요한 연구가 될 수 있다고 판단된다. 이는 광촉매의 작용 특성상 광촉매 자체의 분해 성능과는 별도로 주어진 시간에 광촉매 용량당 접촉하는 처리기체의 용량을 최대화시키는 것은 전체 제거 효율 측면에서 중요한 변수가 되기 때문이고, 광촉매의 물성이 고정된 상황에서 시스템 운전조건을 조절하는 것이 더 효과적으로 오염물질을 제거할 수 있는 하나의 방법이 되기 때문이다.

본 연구에서는 독일 Degussa사 제품의 TiO₂(P-25)를 기본 광촉매로 사용하여 여러 가지 시스템 운전 조건(유입농도, 농도 경계층 두께, 코팅한 광촉매의 양, 광촉매 코팅 면적, UV light intensity)에 따른 오염물질의 광분해 특성을 관찰하여 주어진 광촉매를 이용하여 광촉매 자체가 가지는 오염물질 분해 성능을 최대화시킬 수 있는 공기 정화 시스템 운전조건에 대한 연구를 수행하였다. 분석 대상 VOCs 물질로는 인체 발암성이 입증된 benzene을 사용하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1. 이론적인 방법

현재 연구되고 있거나 실제 생활에 적용되고 있는 광촉매를 이용한 제품의 경우, 처리대상 기체를 광촉매를 가득 채운 반응기 내로 통과시켜 오염물질을 제거하는 방법 보다는 대부분이 얇은 막의 형태로 광촉매를 부착한 지지체 표면위로 처리대상 기체를 흐르게 하여 오염물질을 분해하는 방법을 사용하고 있다. 이에 따라 채널 형태나 단순한 벽면 형태의 광촉매 반응기의 경우, 실제 처리대상 기체가 반응기로 유입 되었을 때 패킹 형태의 반응기와는 달리 반응기 내부의 전체 부피가 오염물질 분해에 사용되는 것이 아니라 광촉매와 처리대상 기체가 접촉하는 일부분에서만 분해 반응이 일어난다. 때문에 광촉매와 멀리 떨어진 지점을 지나는 처리대상 기체의 경우는 광촉매와의 접촉 없이 그대로 반응기를 통과해 밖으로 나가게 된다.

따라서 실제 반응기 운영에 있어서 광촉매가 코팅된 지지체 표면 위로 처리대상 기체가 흘러갈 때 실제 오염물질 분해에 사용되는 공간의 크기가 중요하게 작용한다.

유체가 고체 평면을 지날 때, 그 표면에는 유체의 동역학적 경계층과 물질 확산에 따른 농도 경계층, 즉 실제 오염물질이 확산을 통해 지지체에 부착된 광촉매와 접촉할 수 있는 기회를 가지게 되어 오염물질 분해에 관여하는 공간이 형성된다. 때문에 그 두께를 측정하거나 이론적으로 계산하여 시스템 운영 시 평판 사이의 거리를 결정해 주는 것은 불필요한 공간을 줄이고, 오염물질 분해를 최대한 끌어 올릴 수 있다는 측면에서 중요하다. 따라서 농도 경계층의 두께는 광촉매 반응 시스템을 운영하는데 중요한 변수가 될 수 있다. 이를 위해 반응기 내를 흐르는 유체에 대한 유체역학적 해석을 통하여 동역학적 경계층 형성과 물질전달 측면의 농도 경계층 형성을 이해하고, 둘 사이의 관계를 파악하는 것이 필요하다.

1904년 Prandtl⁹⁾이 발표한 유체역학 기본 원리에 따르면, 벽에 인접한 유체 층에 국한되어 고체 경계가 유체 흐름에 영향을 미치는 경계층(boundary layer)이 존재하며, 그 안에서 전단과 전단력이 생기고, 층류 표면 근처의 얇은 경계층에서 물질전달이 일어날 때가 있는데, 실제 유체의 흐름은 경계층과 비경계층으로 이루어진다고 언급하고 있다.¹⁰⁾ 이때, 평판 상의 비압축성 유동에 대한 마찰계수와 물질전달계수를 결정하려면 연속 방정식, 운동량 방정식 및 물질전달 방정식을 풀어야 하는데, 이미 수치적인 해가 식으로부터 Blasius¹¹⁾에 의해 구해져 있다.

$$* \text{연속 방정식 } \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$* \text{운동량 방정식 } \rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}) = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{\partial P}{\partial x} \quad (2)$$

$$* \text{물질전달 방정식 } u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} = D \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \quad (3)$$

이때, 벽에서의 국소속도 u 가 자유흐름속도 U_∞ 의 99%에 도달하는 거리를 동역학적 경계층(hydrodynamic boundary layer)이라 정의하면, 경계층 두께 δ 는

$$\delta = \frac{5x}{\sqrt{\frac{\rho U_\infty x}{\mu}}} = \frac{5x}{\sqrt{Re_x}} \quad (4)$$

가 되고, $Re_x = \frac{\rho U_\infty x}{\mu}$ 로 정의되며, Re_x 는 국소 Reynolds 수이다.¹⁰⁾ 농도 경계층(concentration boundary layer)은 확산성분의 생성이 없고, x 에 대한 c 의 2차 미분도함수 $\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$ 가 y 에 대한 c 의 2차 미분도함수보다 매우 작고, 정상상태, 비압축성, 물질 확산도가 일정한 상태의 2차원 흐름이라면

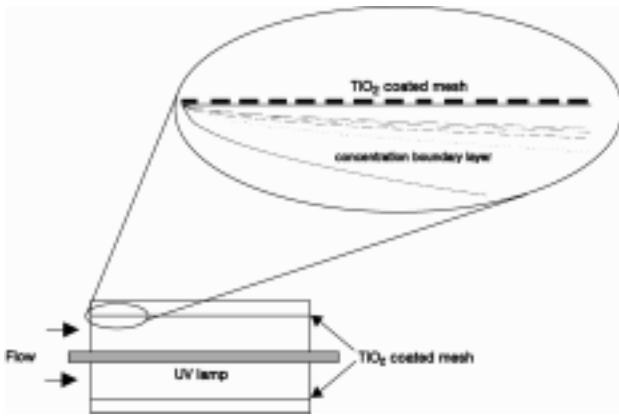


Fig. 1. Theoretical concentration boundary layer formed on the TiO₂ coated stainless mesh.

물질전달 방정식이 적용되어, 운동량 방정식과 물질전달 방정식과의 관계에 의해서 두 경계층의 두께 사이의 관계는 Schmidt 수로 결정 된다.

$$\frac{\delta}{\delta_c} = Sc^{1/3} \quad (5)$$

이때, δ 는 동역학적 경계층의 두께, δ_c 는 농도 경계층의 두께이다.¹²⁾ Fig. 1에 반응기의 스테인레스 격자망 표면에 형성되는 이론적인 농도 경계층을 나타내었으며, 위의 식을 이용하여 이론적인 동역학적 경계층과 농도 경계층의 두께를 계산하여 경계층이 화학 반응이 일어나는 공간으로 어느 정도 기여를 할 것인지 이론적으로 계산하였다. 이를 바탕으로 반응기 내 유속 조절을 통하여 평판에 생성되는 농도 경계층 두께를 이론적으로 계산하여 실험에 이용하였다.

2.2. 실험적인 방법

2.2.1. 공기 정화 시스템

공기 정화 시스템에서의 여러 운전 조건에 대한 영향을 파악하기 위해 Fig. 2와 같은 채널 형태의 공기 정화 시스템을 제작하여 benzene 분해 실험을 수행하였다. 본 실험에 사용한 공기 정화 시스템은 시료 발생 장치, 공급 공기용 공기 정화 장치, 폭 160 mm, 높이 160 mm, 길이 410 mm의 광촉매 반응장치, 평판에서의 유속을 조절하기 위해 시스템으로 유입되는 공기의 유량을 조절하는 유속 조절 장치로 이루어져 있다.

시스템의 입구에 설치된 공급 공기용 공기 정화 장치는 실험실 공기 중 입자상 물질을 제거하기 위하여 HEPA(high efficiency particulate air) filter를 제작하여 부착하였다. 실험용 benzene(99.9%, Duksan) 가스는 soap film bubble test로 보정한 MFC(mass flow controller, 5850E, Brooks Instrument, USA)로 건조 공기를 조절하여 반응기 내로 공급하였다. 이때, 건조 공기의 유량을 조절하여 항온수조(LCB-6D, (주)대한랩테크, Korea) 내 bubbler 내부의 액상 benzene

을 버블링하여 공급하였으며, 공급되는 benzene의 농도는 공기 정화 시스템 내부에서 일정한 농도(ppm 수준)로 유지하였다. 본 실험은 실험 시 공급하는 오염물질을 극저농도로 일정하게 조절하는 것이 굉장히 어렵고 공기 정화 시스템에서의 오염물질 분해반응을 쉽게 관찰하기 위해 실제 실내에 존재하는 오염물질의 농도 보다 높은 농도에서 수행되었다.

시스템으로 공급되는 공기는 실험실 내부 공기를 인버터 컨트롤러(SV008iG5-1U, LS Industrial Systems Co., Ltd., Korea)로 송풍기(삼상유도전동기, 1HP, 현대공업, Korea)를 제어하여 공급하였고, 반응기로 유입되는 공기 유량을 조절하여 반응기 내부의 TiO₂가 코팅된 스테인레스 격자망이 부착된 평판에서의 표면 속도를 조절하였다. 또한 반응이 일어나는 광촉매 반응장치 전단에 혼합 챔버(mixing chamber)를 따로 설치하여 공급되는 benzene과 공기가 충분히 섞일 수 있도록 하였다.

실제 분해 반응이 일어나는 광촉매 반응장치는 두께가 10 mm인 아크릴 재질로 폭 160 mm, 높이 160 mm, 길이 205 mm인 반응장치 두 개를 연결하여 benzene 분해 실험을 할 수 있도록 제작하였고, 반응장치 높이 방향 가운데에 UV 램프(germicidal 15W, G15T8-AN, Sanyo Denki Co., Japan) 3개를 장착하여 광촉매를 활성화하는데 사용하였다. 반응에 사용한 광원은 UV-C 파장영역을 가지고 최대 파장대가 250 nm이다. 또한 광촉매 반응장치 내부 벽면에 흡을 과 TiO₂를 코팅한 스테인레스 격자망을 부착한 평판을 장착할 수 있도록 하였다.

광촉매 반응장치 후단에는 반응장치 내부에 장착된 평판의 표면 유속을 측정하기 위해 Hot Wire Thermo-Anemometer(Model 407123, Extech Instruments cop., USA)를 사용하였다. 또한 반응장치의 전·후단에 septum을 설치하여 gas tight syringe(50 μ L, SGE)를 사용하여 반응기체 40 μ L를 채취한 후 FID가 장착된 GC(Varian, CP-3800, USA)를 사용하여 광촉매에 의한 농도 감소를 측정하였다. GC-FID 분석 조건은 Table 1에 정리하였다.

시스템 운전 조건에 따른 benzene 분해 특성을 알아보기 위하여 실험 시 UV 램프에 의한 온도 영향을 배제하기 위해 UV 램프 작동 시 방사되는 열에 의해 증가되는 온도(40 $^{\circ}$ C)를 측정하여 반응기를 해당 온도 이상(45 $^{\circ}$ C)으로 유지 하였다. 이를 위해 실리콘 열선과 단열재를 사용하여 반응기를 보온하였으며, 디지털 온도 조절계(DX4-KCSNR, (주)한영전자, Korea)를 사용하여 온도를 조절하였다. 또한 반응기로 공급되는 공기는 실험실 내 공기를 HEPA filter로 정화하여 사용하였기 때문에 실험실 내의 상대습도를 디지털 온·습도계로 항시 체크하여 일정한 상대습도(55%)가 유지되도록 하였다.

실험 초기 반응기로 유입된 오염물질이 촉매표면에 흡착되어 제거되는 영향을 배제시키기 위해 공기 정화 시스템을 UV 램프가 작동되지 않은 상태에서 일정시간 가스를 흘려 반응장치 입·출구에서 채취한 오염물질의 농도가

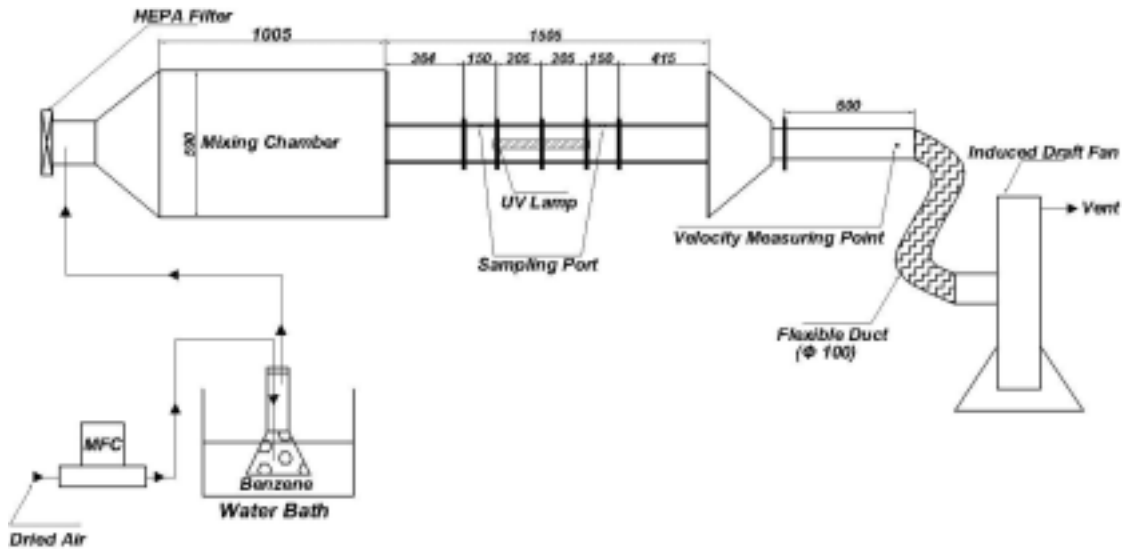


Fig. 2. Schematic diagram of air cleaning system.

Table 1. GC-FID analysis conditions

Target VOC	Benzene
GC-FID	Varian CP-3800
Column Type	Capillary Column(Varian, CP7414) 30 m * 0.32 mm * 1.80 μm film
Injector Temperature	200 °C
Oven Temperature	130 °C
Detector Temperature	250 °C
Carrier Gas Flow Rate	N ₂ , 1.6 mL/min

일정하게 유지되는 것을 확인한 후에 본 실험을 수행하였다. 또한, UV 램프의 파장을 안정화시키기 위해 UV/TiO₂ 시스템 작동 10분 후에, 시료를 5회 이상 채취하여 분석하였다.

2.2.2. 실험 광촉매의 물성

본 연구에서는 기상 및 액상 VOCs 처리 분야에 널리 사용되고 있는 독일 Degussa P-25를 사용하였다. P-25는 anatase가 80%, rutile이 20% 인 혼합구조를 가지고 있으며,¹³⁾ 입경이 20~30 nm, 비표면적이 55 m²/g 인²⁾ 비다공성 구형입자 형태이다.

실험에서 TiO₂를 스테인레스 격자망에 고정시키기 위해 다음과 같이 수행하였다. 비이커를 초순수와 5%(w/w)의 TiO₂비로 채우고, 교반기를 사용하여 회전 속도 1,200 rpm으로 TiO₂를 분산시킨 후 분산액에 스테인레스 격자망(152 mm * 205 mm, #120)을 1시간 동안 놓아두었다. 이 후 건조기에서 105 °C로 1시간 동안 건조하고, 오븐을 사용하여 TiO₂ 광촉매가 anatase에서 rutile로 전환되는 온도를 넘지 않는 범위(370 °C)에서 1시간 동안 소성시켜 광촉매 반응기에 장착하였다. 이 과정을 반복하여 스테인레스 격자망에 부착되는 TiO₂ 양을 조절하였다. 스테인레스 격자망 및 TiO₂가 코팅된 스테인레스 격자망 표면 상태를 관찰하기 위하여 FE-SEM(field emission-scanning electron microscope, Hitachi model s-4100, Japan)을 사용하였다.

FE-SEM의 분석 결과를 Fig. 3에 제시하였는데, TiO₂가 스테인레스 격자망에 고르게 부착되어 있는 것을 볼 수 있다.

3. 결과 및 고찰

공기 정화 시스템 설계 시 유입 가스의 농도와 농도 경계층 두께(유속), 광원의 세기, 코팅한 촉매의 양, 그리고 촉매를 코팅한 면적은 중요한 인자들이다. 동일한 조건에서 TiO₂를 코팅하지 않은 평판에 UV를 조사하여 benzene 분해 기본 실험을 수행하였고, TiO₂를 코팅한 스테인레스 격자망을 부착한 평판에 UV를 조사하여 실험을 수행하였다.

선 연구⁵⁾와 같이 식 (6)을 사용하여 benzene의 제거효율을 계산하였다.

$$\eta = \left(1 - \frac{C_a}{C_i}\right) \times 100 \quad (6)$$

여기서, η는 제거효율(%)이고, C_i는 입구농도로 주입 농도가 안정된 후 반응기 입구에서의 유입농도, C_a는 출구농도로 반응기를 지나고 난 후의 출구에서의 농도를 나타낸다. TiO₂를 코팅하지 않은 기본 실험에서는 benzene의 분해 반응이 일어나지 않았다.

3.1. 유입농도에 따른 영향

공기 정화 시스템에서 benzene의 유입농도에 따른 실험 결과를 Fig. 4에 나타내었는데, benzene의 유입농도가 증가함에 따라 benzene의 분해율이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이 결과는 다른 연구들과 유사한 결과를 보여 준다.^{2,3,14)}

이와 같은 결과로 살펴보면, 광촉매 공정은 저농도의 오염물질에 대한 제거 효과가 고농도 오염물질에 대한 제거 효과 보다 더 좋은 것으로 보이고, 유입되는 오염물질의

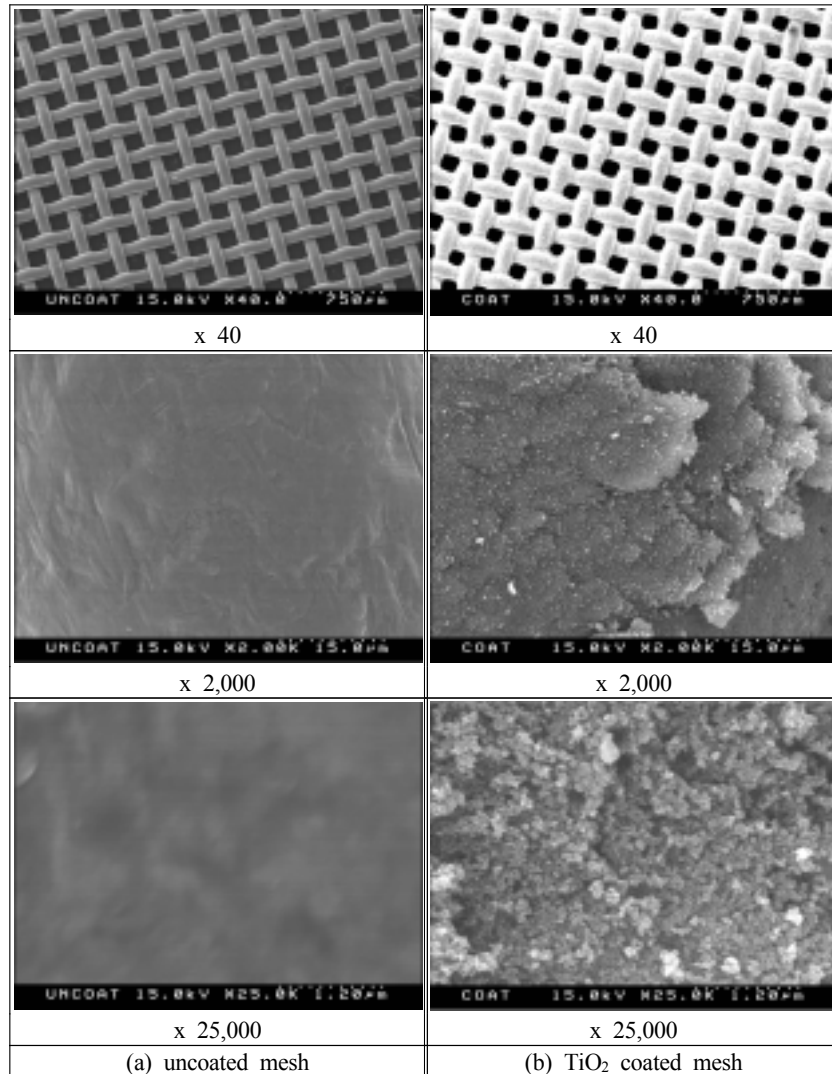


Fig. 3. FE-SEM photographs of uncoated stainless mesh and TiO₂ coated stainless mesh.

농도에 따라 오염물질의 제거효율이 달라질 것이라고 생각된다. 이는 실내에는 오염물질이 대부분 저농도로 존재하기 때문에 이 결과를 이용하여 공기 정화 시스템을 운전할 경우 대상오염물질 처리를 위해 충분히 적용될 수 있다고 판단된다. 또한 Jeong¹⁵⁾ 등은 광촉매를 이용하여 10 ppm 농도의 benzene 제거 실험을 수행하였으며, Ao^{16,17)} 등은 20, 35 ppb 농도의 BTEX 분해 실험을 통하여 극저농도에서의 VOCs 분해 가능성을 제시하였다. 또한 Ao^{16,17)} 등이 수행한 두 실험의 비교를 통하여 초기 유입농도가 낮을수록 광분해 효율이 증가한다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 기체상 오염물질의 경우 유입되는 오염물질의 초기 농도는 반응의 중요한 운전 변수가 되며 오염물질 분해반응은 일반적으로 Langmuir-Hinshelwood 메커니즘을 따르며, 초기 유입농도가 낮은 경우 대부분 1차 반응속도를 따른다고 보고되고 있다.¹⁸⁾ 따라서 오염물질이 고농도로 유입된 본 실험의 경우 1차 반응속도를 따르지 못하고 반응속도가 감소한 것으로 판단된다. 이의 결과로 광촉매 반응을 이용한 기체상 오염물질 처리의 경우, 높은 농도의

기체상 오염물질보다는 낮은 농도의 기체상 오염물질에 대하여 광촉매 시스템을 적용하는 것이 좋다고 판단된다.

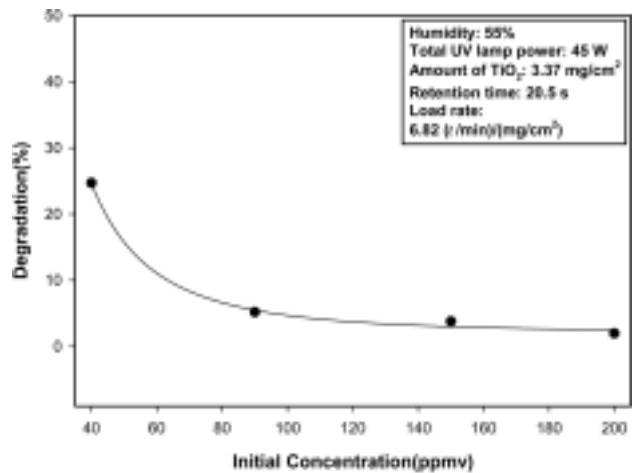


Fig. 4. The effect of initial benzene concentration on the degradation of benzene by UV/TiO₂ process.

3.2. 농도 경계층 두께에 따른 영향

TiO₂를 코팅한 스테인레스 격자망을 부착한 평판에 형성되는 이론적인 농도 경계층 두께가 benzene 제거효율에 미치는 영향을 조사하기 위해 유속을 변화시켰다. 이때 반응장치 출구 끝에 형성되는 이론적인 농도 경계층의 최대 두께는 유속에 따라 1.63에서 7.28 cm까지 증가한다. 이론적인 농도 경계층 두께에 따른 결과를 Fig. 5에 정리하였는데, 평판에서의 유속이 감소함에 따라, 즉 동역학적 경계층과 농도 경계층의 관계에 따른 농도 경계층 두께가 증가함에 따라 benzene에 대한 제거효율이 증가하는 것을 볼 수 있다. 여기서, 표면 속도 0.1 m/s 이상의 경우 제거효율의 변화가 작게 나타나는데 이는 반응기 내부의 상대적으로 빠른 유속으로 인해 처리대상 물질이 평판에 형성된 농도 경계층 내로 충분히 확산하지 못했기 때문이고, 두 평판 사이의 총 공간에서 농도 경계층이 차지하는 영역이 상대적으로 작았기 때문이라고 사료된다. 이 결과는 유속이 빨라지면 제거효율이 떨어지는 다른 연구들과 유사한 결과를 보여 준다.^{5,19)} 이와 같은 결과는 유속이 빨라짐에 따라 평판에 형성되는 농도 경계층의 두께가 감소하는 것에 대한 영향으로 볼 수 있는데, 즉 촉매와 접촉할 가능성을 가진 공간이 줄어들었기 때문이라고 생각된다. 여기서, 이론적인 농도 경계층이 반응기내에서 차지하는 부피를 계산하여 구한 이론적인 제거효율과 실제 반응에서의 제거효율 간의 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 이것은 첫째 오염물질이 반응부로 유입되기 전에 건조 공기와 benzene 두 물질이 충분히 혼합되지 않은 것에 대한 영향, 둘째 오염물질이 평판에 형성된 농도 경계층내로 짧은 시간 내에 확산되지 못한 영향, 셋째 이론적으로 계산된 확산영역의 모든 물질이 100% 처리된다는 가정 하에서 수행되었기 때문이라고 생각된다. 또한 이론적인 농도 경계층 두께가 실제 반응에서 일어날 수 있는 여러 가지 상황에 대한 고려 없이 단순히 동역학적 경계층의 두께와 Sc의 관계에 의해서만 계산되었기 때문에 반응기내의 모든 현상을 정확하게 반영하지 못한 결과라고 사료된다.

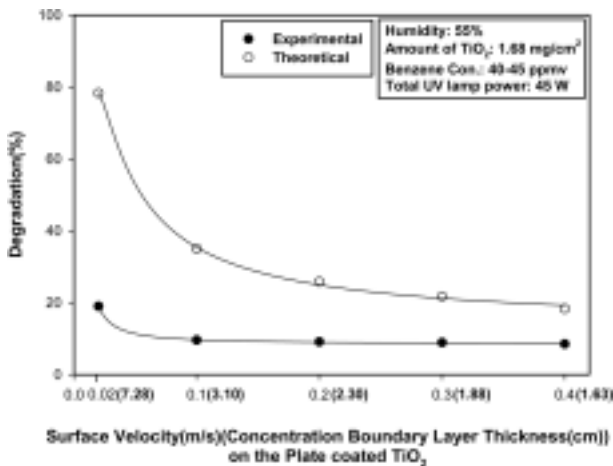


Fig. 5. The effect of boundary layer thickness on the degradation of benzene by UV/TiO₂ process.

따라서 위의 결과로 볼 때, 반응기 내로 통과하는 유속을 줄여 줌으로써 평판에 형성되는 농도 경계층의 두께를 증가시켜 실제 광분해에 사용되는 반응기 내의 유효 공간 (effective volume)을 증가시켜 광촉매 반응의 효율을 증가시킬 수 있다고 판단된다.

3.3. 광원의 세기에 따른 영향

광원의 세기에 따른 영향은 Fig. 6에서 보듯이 실험범위 안에서는 램프의 개수가 증가함, 즉 광원의 세기가 증가함(15, 30, 45 W)에 따라서 benzene 제거효율이 증가하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 UV light intensity를 직접 측정하지는 않았지만 선 연구¹⁹⁾에서 사용했던 UV 램프와 동일한 것(UV-C type)을 동일한 거리(5 cm)에서 사용하였기 때문에 UV 램프 하나의 경우 최대 파장 250 nm에서 2.83 mW/cm²인 것을 알 수 있다. 이 결과는 몇몇의 선 연구^{20~22)}에서와 유사한 결과를 보였는데, UV light intensity에 따른 반응 차수는 많은 유기화합물의 경우 비균일계 광촉매 반응에 대하여 0.5~1.0이었다고 보고되었다. 20.4 mW/cm² 이하의 intensity를 적용한 toluene의 분해율은 선형을 나타냈으며,²⁰⁾ Choi²¹⁾ 등은 낮은 강도 하에서 acetone의 분해는 UV 빛에 선형적인 영향을 받는다고 보고 하였으며, Kim과 Hong²²⁾은 2.0 mW/cm² 이하의 intensity에서 수행한 toluene, acetone, methanol 과 trichloroethylene의 광분해의 반응 차수가 UV light intensity에 따라 모두 1차였지만 2.0 mW/cm² 이상의 UV light intensity일 때의 실험에서는 앞의 경우보다 더 낮은 차수를 나타내었다고 언급하였다. 이런 결과에 대한 일반적인 설명은 지나치게 강한 UV light intensity는 전자쌍 형성 속도와 전자 전달 속도의 증가보다 전자와 정공의 재결합 속도를 더 빨리 증가시켜 전체적인 광효율을 감소시킨다고 할 수 있다.^{13,14)} 그러므로 공기 정화 시스템 운영 시 필요이상의 UV light intensity를 조사하는 것은 오히려 전체적인 광효율을 감소시키기 때문에 적절한 세기의 광을 조사해야한다고 판단된다.

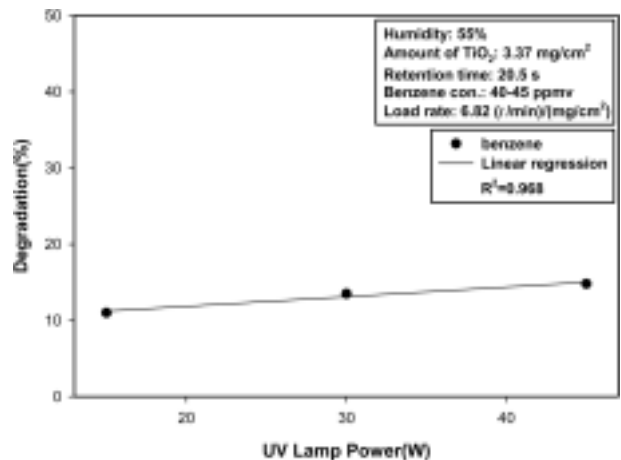


Fig. 6. The effect of UV light intensity on the degradation of benzene by UV/TiO₂ process.

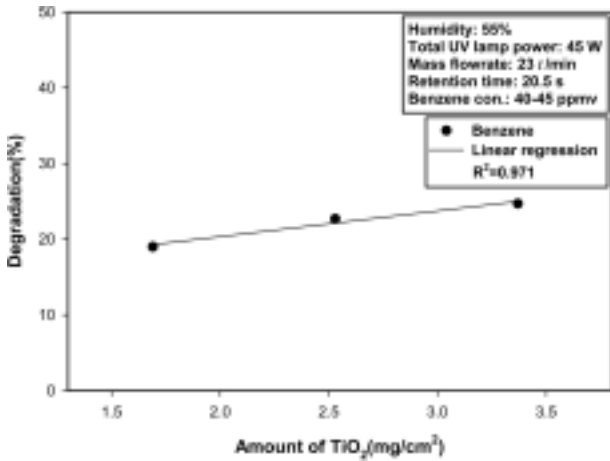


Fig. 7. The effect of amount of photocatalyst on the degradation of benzene by UV/TiO₂ process.

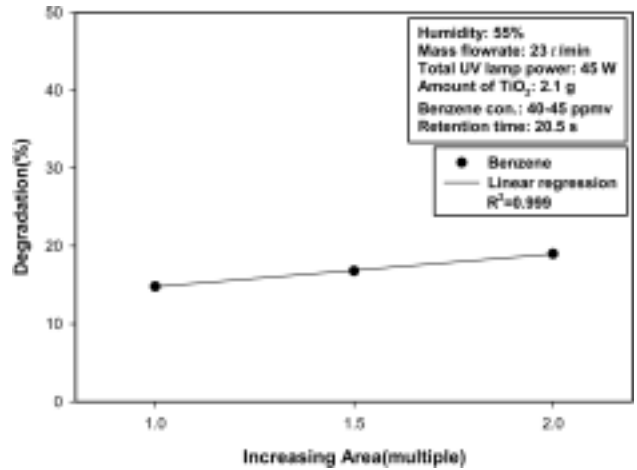


Fig. 8. The effect of TiO₂ coated area on the degradation of benzene by UV/TiO₂ process.

3.4. 코팅한 촉매의 양에 따른 영향

코팅한 촉매의 양에 따른 benzene의 광분해 특성은 스테인레스 격자망에 코팅한 광촉매의 양을 변화시켜 실험한 결과로 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 보듯이 실험범위 안에서 오염물질 제거효율은 코팅한 광촉매의 양이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 일반적으로 광촉매를 이용한 공정에서는 사용된 광촉매의 양이 증가함에 따라 제거효율이 증가한다고 알려져 있다. 하지만, 다른 연구^{2,22)}들로 부터 알 수 있듯이 TiO₂의 코팅의 두께가 어느 정도 증가하고, 촉매의 양이 어느 정도 증가하면 오염물질의 제거효율이 증가하지 않게 된다. 이것은 일정 수준 이상으로 광촉매를 사용하였을 경우 이미 반응에 필요한 촉매가 충분히 존재하기 때문이고, 지나치게 많은 양의 촉매를 코팅하게 되면 코팅된 두께로 인해 광에너지의 흡수와 투과를 방해하여 그 이상의 광촉매 활성을 나타내지 않게 되기 때문이라고 보고하였다.²⁾ 하지만 본 연구에서는 코팅한 양에 따라 제거효율이 증가함을 알 수 있었다. 이는 본 실험에서의 짧은 체류시간으로 오염물질이 촉매가 가지는 충분한 활성점과 촉매의 코팅 두께에 대한 영향을 적게 받은 것이라고 사료된다. 따라서 공기 정화 시스템 운전 조건을 결정할 때 적절한 광촉매의 양을 결정해 줌으로써 필요 이상의 광촉매를 소모하는 것을 막을 수 있다고 사료된다.

3.5. 광촉매 코팅 면적에 따른 영향

촉매를 코팅한 면적에 따른 benzene의 광분해 특성은 일정량의 광촉매를 코팅 면적을 변화시키면서 실험한 결과로 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 보듯이 동일한 양의 광촉매를 사용하였을 경우 코팅한 면적을 증가시킬수록 benzene 제거효율이 증가함을 확인할 수 있었다. 이때, 실제 코팅한 단위면적당, 단위 무게당 촉매가 받는 부하는 6.82(L/min)/(mg/cm²)에서 13.65(L/min)/(mg/cm²)까지 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 동일한 양의 광촉매를 사용

하였을 경우, 광촉매를 넓은 면적에 얇은 두께로 코팅해 줌으로써 오염물질이 광촉매와 접촉할 수 있는 가능성을 증가시킬 수 있고, 코팅된 입자들의 간섭효과를 줄여 광에너지를 더 효과적으로 흡수하여 광촉매를 충분히 활성화할 수 있기 때문에 오염물질이 더 잘 분해될 수 있었다고 판단된다. 또한, 이 실험에서 광촉매 코팅량은 오염물질 부하 증가에 따른 영향을 받지 않을 만큼 충분히 스테인레스 격자망에 코팅되어 있었기 때문이라고 판단된다. 따라서 TiO₂ 광촉매를 이용한 공기 정화 시스템을 제작할 경우 동일한 조건(촉매량, UV light intensity, 체류시간)에서 광촉매를 코팅하는 면적을 넓혀줌으로써 더 효과적으로 처리대상 물질을 처리할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 UV/TiO₂ 광촉매 반응을 이용한 공기 정화 시스템의 운전 조건에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해 자체 제작한 UV/TiO₂ 반응기를 이용하여 benzene의 처리에서 benzene의 처리효율에 미치는 인자와 반응기의 운전조건을 도출하기 위한 기초실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 유입되는 benzene 농도가 증가함에 따라 제거효율이 감소하는 것을 바탕으로 광분해 반응을 이용한 기체상 오염물질 처리의 경우 고농도의 기체상 오염물질 보다는 저농도의 기체상 오염물질을 보다 효율적으로 분해, 처리할 수 있다고 판단된다. 이는 실내 대부분의 오염물질이 저농도 존재하기 때문에 공기 정화 시스템을 실내 환경에 적용할 수 있는 가능성을 충분히 제시한다고 판단된다.
- 2) 평판에 형성되는 농도 경계층의 두께가 두꺼워질수록 benzene 제거효율이 증가하였고, TiO₂를 여기시키기 위해 조사한 UV 램프의 개수를 증가할수록, 즉 조사되는 UV light intensity가 증가할수록 benzene 제거효율이 증가하였

다. 이는 공기 정화 시스템 운전 시 평판에서의 유속 조절을 통하여 평판에 형성되는 경계층의 두께를 증가시켜 더 효과적으로 오염물질을 제거할 수 있다고 판단된다. 또한 과도한 세기의 UV 빛을 조사하면 오히려 전체적인 광분해 효율은 낮아지지만, 본 연구에서는 UV 세기에 따라 분해율도 증가됨을 알 수 있었다. 이는 공기 정화 시스템 운전 시 평판에서의 유속과 광촉매에 조사해야 할 광의 세기를 결정해 줄 수 있는 좋은 자료가 될 수 있다고 판단된다.

3) 동일한 면적에 코팅한 광촉매의 양을 증가시켰을 경우와 동일한 양의 광촉매를 면적을 증가시켜 코팅하였을 경우 둘 모두의 경우에서 benzene 제거효율이 증가하였다. 이는 스테인레스 격자망에 코팅되는 광촉매의 양이 증가할수록 TiO₂ 단위량에 대한 전체적인 처리대상 오염물질의 부하율이 낮아지기 때문인 것으로 판단되고, 또한 동일한 양의 광촉매를 넓게 펼쳐 얇은 두께로 코팅한 경우에는 TiO₂ 입자가 가지는 비표면적이 여러 겹으로 쌓였을 경우 다른 TiO₂ 입자들에 의해 간섭되는 비표면적의 영향이 작기 때문에 광촉매와 오염물질 간의 접촉 빈도를 증가시키고, 광에너지 흡수에서도 다른 입자의 간섭 없이 충분히 광촉매가 활성화되어 실제 오염물질의 광분해가 더 유리했기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 UV/TiO₂를 이용하는 공기 정화 시스템 운전 시 충분한 양의 광촉매를 코팅하는 것도 필요하지만, 그와 더불어 동일한 양이라도 광촉매를 코팅하는 면적을 증가시켜 광촉매와 오염물질이 접촉할 수 있는 기회를 늘려주는 것이 오염물질을 효과적으로 제거할 수 있는 좋은 방법이 될 수 있다고 판단된다.

4) 본 연구의 실험결과 각 항목별로 조사된 제거율 차이가 대부분 10% 미만이며, 체류시간이 20.5 s인데 반하여 VOCs 제거율이 대부분 30% 미만으로 나타났다. 절대적인 제거효율측면에서 취약성이 있으나 이는 현재 개발되고 있는 광촉매적용 공기 정화 시스템의 공통적인 사항이며 본 실험 연구에서 얻어진 연구 결과는 향후 광촉매의 기초적인 성능의 개선효과와 관계없이 시스템 운영적 측면에서 의미 있는 자료를 제공해 주는 것이기 때문에 실내 공기질 개선 시스템의 운전요소 검토측면에서 중요한 의미가 있다고 판단한다.

본 연구를 통하여 실내 공기 중 저농도의 VOCs를 대상으로 UV/TiO₂ 반응을 이용한 공기 정화 시스템을 설계하여 운전할 경우 운전 조건을 조절함으로써 시스템을 유용하게 적용할 수 있는 자료를 제시했다고 판단된다.

사 사

이 논문은 2006학년도 영남대학교 학술연구조성지원에 의한 것임.

참 고 문 헌

1. 허경욱, 양성봉, 이성화, 홍영기, 신수연, 강정훈, “광촉매

- 플라즈마 반응에 의한 몇가지 VOCs의 제거에 관한 연구,” 한국대기환경학회지, **16**(4), 373~380(2000).
2. 정기원, 이승범, 홍인권, “UV/TiO₂ 광촉매 공정을 이용한 BTX의 분해특성,” 공업화학, **13**(6), 524~530(2002).
3. 전보경, 최금찬, 서정민, “광촉매/광산화물을 이용한 VOCs 처리장치 개발,” 한국환경과학회지, **15**(9), 855~864(2006).
4. 이정우, 장혁상, “화염 합성에 의한 TiO₂ 제조와 VOCs 제거에 대한 적용 I : 화염 합성 TiO₂의 광촉매적 성질,” 대한환경공학회지, **24**(5), 889~900(2002).
5. 정상근, 배귀남, 정주영, 김신도, “흡착·광촉매 반응을 적용한 에어필터의 유해가스 제거 특성,” 한국실내환경학회지, **2**(2), 138~150(2006).
6. 장한권, 이정우, 장혁상, “예혼합화염 에어로졸 반응기에서 응집체의 형상 전개,” 공업화학, **39**(5), 563~572(2001).
7. Yamazaki, S., Fujinaga, N., and Araki, K., “Effect of sulfate ions for sol-gel synthesis of titania photocatalyst,” *Appl. Catal. A: General*, **210**, 97~102(2001).
8. Sano, T., Negishi, N., Uchino, K., Tanaka, J., Matsuzawa, S., and Takeuchi, K., “Photocatalytic degradation of gaseous acetaldehyde on TiO₂ with photodeposited metals and metal oxides,” *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, **160**, 93~98(2003).
9. Prandtl, L., Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung, In: Proc. 3rd Int. Math. Congress, Heidelberg, pp. 484~491(1904).
10. 배신철, 김병하, 김성훈, 조동현, 한규일, 한화택, 열전달 제6판, 사이텍미디어(2002).
11. Blasius, M., “Grenzschichten in Flüssigkeiten mit Kleiner Reibung,” *Z Math. Phys.*, **56**(1), (1908).
12. Incropera, F.P. and DeWitt, D.P., Introduction to Heat Transfer, John Wiley & Sons, Inc., 3rd Ed.(1996).
13. 최원용, “TiO₂ 광촉매 반응 연구,” 공업화학, **14**(8), 1011~1022(2003).
14. Wang, W., Chiang, L.W., and Ku, Y., “Decomposition of benzene in air streams by UV/TiO₂ process,” *J. Hazardous Materials*, **101**(2), 133~146(2003).
15. Jeong, J., Sekiguchi, K., Lee, W., and Sakamoto, K., “Photodegradation of gaseous volatile organic compounds (VOCs) using TiO₂ photoirradiated by an ozone-producing UV lamp: decomposition characteristics, identification of by-products and water-soluble organic intermediates,” *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, **169**, 279~287(2005).
16. Ao, C.H., Lee, S.C., Zou, S.C., and Mak, C.L., “Inhibition effect of SO₂ on NO_x and VOCs during the photodegradation of synchronous indoor air pollutants at parts per billion(ppb) level by TiO₂,” *Appl. Catal. B: Environ.*, **49**, 187~193(2004).
17. Ao, C.H., Lee, S.C., Mak, C.L., and Chan, L.Y., “Photodegradation of volatile organic compounds(VOCs) and NO for indoor air purification using TiO₂: promotion versus

- inhibition effect of NO,” *Appl. Catal. B: Environ.*, **42**, 119~129(2004).
18. Somorjai, G.A., *Chemistry in two dimensions ; Surfaces*, Cornell University Press Ithaca, U.S.A., 551(1981).
 19. 정상철, 김병훈, 조용익, 김선재, “CVD법 TiO₂ 광촉매를 이용한 에틸렌의 광촉매 분해,” *대한환경공학회지*, **24**(11), 1873~1879(2002).
 20. Hager, S. and Bauer, R., “Heterogeneous photocatalytic oxidation of organics for air purification by near UV irradiated titanium dioxide,” *Chemosphere*, **38**(7), 1549~1559(1999).
 21. Choi, W., Ko, J.Y., Park, H., and Chung, J.S., “Investigation of TiO₂-coated optical fibers for gas-phase photocatalytic oxidation of acetone,” *Appl. Catal. B: Environ.*, **31**, 209~220(2001).
 22. Kim, S.B. and Hong, S.C., “Kinetic study for photocatalytic degradation of volatile organic compounds in air using thin film TiO₂ photocatalyst,” *Appl. Catal. B: Environ.*, **35**, 305~315(2002).
 23. 박달근, 김범준, 이중기, 변동진, 윤운영, 이원재, 성준용, “공기중의 벤젠제거에 대한 산화티타늄 광촉매 반응특성,” *한국대기환경학회지*, **16**(4), 389~397(2000).