

## 광촉매와 UVA에 의한 실내 부유 미생물 (*E. coli* 및 *Bacillus subtilis* sp.) 살균 제거 연구

윤영한<sup>1\*</sup>, 남숙현<sup>1</sup>, 주진철<sup>1</sup>, 안호상<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>한국건설기술연구원 수자원환경연구본부 환경연구실

### Photocatalytic disinfection of indoor suspended microorganisms (*Escherichia coli* and *Bacillus subtilis* spore) with ultraviolet light

Young H. Yoon<sup>1\*</sup>, Sook-Hyun Nam<sup>1</sup>, Jin-Chul Joo<sup>1</sup> and Ho-Sang Ahn<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Environmental Engineering Research Division, Korea Institute of Construction & Technology

**요약** 실내 공기 오염물질의 제어를 통하여 공기질을 개선시킬 수 있는 요소기술의 개발을 위하여 미세부유먼지 제거 방법을 도출하고자 하였다. 미세부유먼지 중에는 분진과 같은 무기물과 박테리아와 같은 작은 유기물도 포함되어 있어 이들의 동시 제거를 위한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 광촉매 및 UVA에 의한 미세부유먼지 중 미생물 제거 기술의 개발을 위하여 여러 종류의 광촉매에 대한 미생물 살균율을 조사하였다. 이를 위하여 3가지 종류의 광촉매(ZnO, TiO<sub>2</sub>, ZnO/Laponite ball)와 최소한의 UVA 자외선 조사량 3 ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )을 이용하여 실내 공기 부유미생물의 지표로 사용되는 Gram 양성균인 *E. Coli*와 Gram 음성균인 *Bacillus subtilis* sp.에 대하여 살균실험을 진행하였다. 실험결과, 최소한의 UVA 자외선 조사량에서도 광촉매제와 함께 두 시간 정도 반응하였을 때 *E-Coli*의 경우 세 가지 광촉매제 모두에서 80 % 이상 사멸 되는 것으로 나타났으며, UVA 단독 사용보다는 약 30 % 높은 사멸률을 보였다. 광촉매제 중에는 ZnO/Laponite ball 복합체의 경우에 TiO<sub>2</sub>와 동등한 살균력이 있는 것으로 나타났다. 하지만, 포자상태에서 강한 외벽을 가지고 있는 *B. subtilis* sp.의 경우는 낮은 자외선 조사량으로는 살균효과가 저하되기 때문에 살균율을 높일 수 있는 최적의 촉매제 종류와 첨가량 및 자외선 조사량을 찾아야 할 것으로 판단된다.

**Abstract** New control methods are proposed for indoor air quality by removing fine airborne dust-particles. As suspended fine dust-particles contain inorganic dust as well as fine organic bacteria, studies for simultaneous control of these contaminants are required. In this study, photocatalytic disinfection of indoor suspended microorganisms such as *E. coli* and *Bacillus subtilis* is performed by three types of photocatalysts with UVA irradiation. The UVA irradiation strength was controlled to the minimum 3  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ , and ZnO, TiO<sub>2</sub>, and ZnO/Laponite ball were used as the catalysts. The results indicate that *E. coli* was removed over 80 % after about 2 hours of reaction with UVA and all three types of photocatalysts, whereas only with UVA, around 50 % *E. coli* removal was obtained. Among the catalysts, ZnO/Laponite composite ball was found to have similar sterilizing capacity to TiO<sub>2</sub>. However, in case of *B. subtilis*, which has thick cell wall in its spore state, disinfection was not effective under the low UVA irradiation condition, even with the catalysts. Further studies need to figure out the optimal UVA irradiation ranges as well as photocatalysts doses to control airborne dust, to provide healthy clean air environment.

**Key Words** : Photocatalytic inactivation, TiO<sub>2</sub>, ZnO, *Bacillus subtilis* spore, *Escherichia coli*, UV

본 논문은 한국건설기술연구원의 주요사업(유전영동, 정전기력 기반의 먼지차폐 원천기술 개발, 2013-0134)의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

\*Corresponding Author : Young H. Yoon(Korea Institute of Construction & Technology)

Tel: +82-31-9100-397 email: yoyoon74@kict.re.kr

Received October 23, 2013

Revised (1st December 5, 2013, 2nd January 16, 2014, 3rd January 27, 2014)

Accepted February 5, 2014

## 1. 서론

실내공기는 한정된 공간 속에서 인위적인 설비를 통하여 오염된 공기를 계속적으로 순환·배출하여야 하는데, 환기시설을 가동하지 않고 있거나 아예 설비 자체가 없이 밀폐된 공간을 유지함으로써 오염물질이 오랫동안 정체되어 오염정도는 매우 크다고 할 수 있고 이러한 실내 공기를 오염시키는 물질은 매우 다양하며, 휘발성 유기화합물, 포름알데히드, 총부유세균, 미세먼지, 라돈, 석면, 이산화질소, 이산화탄소, 오존 등이 대표적인 물질이다 [1]. 실내공기 오염은 특히 볼특정 다수인이 많이 모이는 다중이용시설과 신축 공동주택 등에서 집중적으로 발생하고 있다[2]. 이 중 박테리아 및 곰팡이는 그 특성들로 인하여 인체에서 알레르기성 질환의 원인이 되기도 하며, 호흡기 질환 등에 위험한 영향을 준다[3]. 일반적으로 알콜이나 염소계 소독제로는 포자를 형성하는 있는 박테리아의 경우 잘 제거되지 않는다[4]. 환경부가 2011년도 전국 다중이용시설 및 신축 공동 주택 관리점검 실태발표조사 보도 자료에 의하면(2012년 9월 5일자) 어린이집이 전체 오염도 검사 시설 1,207개소의 146개소(12.1%)에서 유지기준을 초과했으며, 의료기관은 671개소의 14개소(2.1%)에서 유지기준을 초과한 것으로 나타났는데, 초과사유로는 총 부유세균 유지기준 800 CFU/m<sup>3</sup>를 초과한 곳이 유지기준 초과시설 174 개소 가운데 156 개소로 가장 많은 것으로 나타났다. 최근 들어서는 총부유세균 외에 곰팡이와 관련된 미생물 오염이 국내에서 심각한 수준임을 알 수 있으며, 재실자의 건강한 실내 환경을 위해, 새집증후군 관련 화학 오염물질의 저감 방안뿐만 아니라, 박테리아 및 곰팡이 등 생물학적 오염에 대한 실태 조사 및 이를 제거하기 위한 기술개발이 필요한 실정이다.

광촉매 기술은 오염물 제거, 공기정화, 수질정화 효과가 있는데 강력한 산화작용에 의해 살균효과가 큰 방법이다. 광촉매에 UV가 조사되면 반도체(Semiconductor)인 광촉매물질 표면에서 광여기(Photo excitation)가 발생한다. UV와 광촉매를 이용한 미생물 살균법은 기존의 산화제보다 월등한 산화력을 가지는 OH· 라디칼을 생성하여 오염물을 제거하는 방법으로 광촉매는 빛의 파장이 380 nm이하의 자외선에서 빛을 흡수하여 효과가 나타나는데, 적은 에너지를 가지고도 오존의 20배에 달하는 살균력을 가지고 있어 에너지를 절감할 수 있는 장점을 가지고 있다[5]. 광촉매 TiO<sub>2</sub>는 실내의 형광등에 1 cm<sup>2</sup>의 해당하는 자외선 강도 1 μW의 에너지로도 항균기능을 충분히 얻을 수 있는 것으로 보고되고 있다[6]. 또한, ACGIH(American Conference of Governmental Industrial Hygienists)에 의하면 UVA를 자외선으로 사용할 경우 안

전한 실내적용을 위해서는 UVA 강도를 10 W/m<sup>2</sup> 보다 적어야 한다고 보고하고 있다[7].

광촉매 중 ZnO는 기존 TiO<sub>2</sub> 광촉매 대비, 광촉매 자체의 반응성은 상대적으로 떨어지는 편이나, 경제성이나 현장적용성이 뛰어나며, 유기계 오염물질의 광분해에 널리 적용가능하며, 최근에는 수질정화, 공기정화 및 미생물 살균에도 널리 활용하고 있다[8-10].

대부분의 광촉매에 의한 미생물 비활성화에 대한 연구는 높은 자외선 강도 범위 10~50 W/m<sup>2</sup>에서 이루어져 있으나[11,12,13]. 낮은 자외선 강도에 대한 연구 결과는 수행되지 않았다. 하지만, 에너지 절감형 살균을 위해서 미생물을 비활성화할 수 있는 최소 자외선 강도를 도출해 낼 필요가 있다. 따라서, 본 연구의 주요 목적은 실내공기 중 부유미생물의 제거를 위해 최소 자외선 강도에서 다양한 광촉매 ZnO, TiO<sub>2</sub> 및 성형된 광촉매 복합체의 대장균(*E. coli*) 및 바실러스 포자(*Bacillus subtilis* spore)의 살균 효과를 평가하며, 살균 공정개발의 기초자료로 활용하고자 한다. 박테리아 중 Gram(+) 균은 *B. subtilis*이 대표적 미생물이며 Gram(-) 균은 *E. coli*와 *P. fluorescens*가 대표적 미생물로 알려져 있으며, 바실러스 포자(*Bacillus subtilis* spore)는 지표 미생물(Indicator microorganism)로 알려져 있는 미생물로, 포자(Spore)를 형성하기 때문에 대부분의 소독방법에 강한 내성을 나타내고, 살균연구에 효과적인 대용미생물(Surrogate microorganism)이다[14,15].

## 2. 본론

### 2.1 실험방법

#### 2.1.1 광촉매 준비

실험에 사용한 Nano-ZnO Powder는 중국의 Nabond사의 제품을 사용하였으며, 평균 입경이 30 nm이다. ZnO는 상온에서 UV나 청색의 빛을 발광하는 발광 소자와 불순물 첨가에 의해 향상되는 전기적 특성을 가지고 있어 많은 관심과 주목을 받아오고 있는 물질이다[16]. ZnO/Laponite 복합체는 Laponite RD(Rockwood Additives Ltd. U. K.)을 사용하였으며, ZnO와 성형하여 복합체 Ball을 제작하였으며, 평균크기는 약 3 mm 이다.

ZnO/Laponite ball은 Laponite와 물의 비율을 1:10(중량비)으로 하여 5분간 교반한 후 상온에서 건조하여 Gel 상태로 Laponite를 만들었다. Gel 형태의 Laponite에 Nano-ZnO Powder를 혼합하여 고분자 증점제를 수량 첨가하여 다시 교반한 후, 반죽이 된 시료를 제환기를 통해 ball을 성형하고, 성형된 볼을 다시 당의기에 넣어서 10분

간 작동한 후 48시간 자연 건조시켰다. TiO<sub>2</sub>는 Degussa P25 TiO<sub>2</sub>를 사용하였으며, 비표면적은 50±15 m<sup>2</sup>/g이다. Nano-ZnO과 TiO<sub>2</sub>는 1 g/L로 혼합하여 사용하였다.

[Table 1] Physicochemical characteristics of ZnO

Nano-ZnO	
Purity	99.7 %
Mean Diameter r(nm)	30
Specific Surface(m <sup>2</sup> /g)	> 90
Dry Loss(%)	< 0.3
Combustion Loss(%)	< 0.2
Pb(%)	≤ 0.037
M (%)	≤ 0.0001
Cu (%)	≤ 0.0002

[Table 2] Physicochemical characteristics of Laponite

Physical Composition		Chemical Composition (Dry Basis)(%)	
Powder Color	White	SiO <sub>2</sub>	59.9
Density	1,000 kg/m <sup>3</sup>	MgO	27.5
Surface Area(BET)	370 m <sup>2</sup> /g	Li <sub>2</sub> O	0.8
pH (2 wt% Suspension)	9.8	Na <sub>2</sub> O	2.8
		LOI	8.2

2.1.2 미생물 배양 및 분석

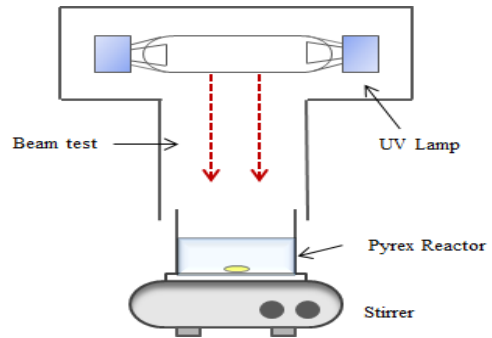
실험에 사용한 *E. coli*(ATCC 15597)는 Nutrient broth와 Nutrient agar를 사용하였으며, Tryptic soy broth에 접종하여 37 °C에서 24 hr 1차 배양 후 2차 배양을 거쳐 PBS(Phosphate buffer saline)로 현탁시켜 원심분리 후 실험 배양액으로 사용하였다.

*Bacillus subtilis* sp. (ATCC 6633)은 냉동보관된 *B. subtilis* sp. 용액에서 백금이를 사용해 Nutrient broth(Difco Co., USA)에 접종(inoculated) 후 37 °C에서 배양하여 1/10 Nutrient agar에 도포한 후 5~6일 동안 배양하여 집락(Induced sporulation)을 회수해 현탁액(Suspended in PBS)을 세척작업(Cleaned)을 거쳐 80 °C에서 15분간 열처리(Heat treated)하여 실험에 사용하였으며, Spread plate method 방법으로 정량하였다[17]. pH 조절은 인산 완충 용액을 사용하였으며, 실험에 사용된 유리초자(Glassware)는 121 °C에서 15분 동안 멸균(Autoclave)하여 사용하였다.

2.1.3 실험 장치

자외선은 100 nm~400 nm의 파장을 가지고 있는 빛을 의미하는 것으로 파장에 따라 UVA, UVB, UVC 및 Vacuum UV로 나뉘게 된다. 본 연구에서 사용한 광원은 UVA 영역의 UV lamp(Pen-Ray ultraviolet lamp, 365 nm)

를 사용하여, Collimated-beam UV system으로 빛이 수직으로 내려오게 조절하였다. UV 소독에서 반응기는 Pyrex deep petri-dish(50 mL, 6-by 3 cm)를 사용하였고 Magnetic stirrer를 사용하여 교반하였으며, Fig. 1과 같다. 빛의 세기(Light intensity)는 UV 365 nm Detector(UVX radiometer, UVP Co.)를 사용하여 측정하였으며 반응기와 램프 사이의 거리를 3~6 μW/cm<sup>2</sup>로 조절하였다.



[Fig. 1] UV experimental equipment

2.1.4 실험 방법

UVA/광촉매에 의한 미생물 살균 실험을 위해 Pyrex deep petri-dish에 제조된 3차 초순수를 pH 7로 조정 한 후 온도 25 °C에서 실험하였다. pH를 7로 조정 한 초순수에 미생물 *E. coli* 및 *B. subtilis* sp.를 주입하였으며, 이때 미생물 초기 농도는 10<sup>6</sup>~10<sup>7</sup> CFU/mL로 유지하였다. 여기에 Nano-ZnO 및 TiO<sub>2</sub>는 100 mg/L로 주입하였으며, ZnO/Laponite ball은 0.1 g/L로 각각 주입하였다. 여기에 UVA를 최소 자외선 조사량 3 μW/cm<sup>2</sup>로 조정하고, 반응시간을 2시간까지 증가시키면서 미생물 수를 측정하였다. 동시에 동일한 조건에서 자외선을 조사하지 않는 Dark 상태에서도 광촉매 3가지를 동일한 농도로 주입한 후 반응시간을 2시간까지 증가시키면서 관찰하였다. 자외선 강도(IT, mJ/cm<sup>2</sup>)는 자외선 조사량(μW/cm<sup>2</sup>)과 반응시간(sec)의 곱으로 계산된다. 실험조건을 정리하면 Table 3과 같다. 본 연구에서 미생물 수의 측정은 재현성을 높이기 위하여 3회 반복하여 개수하였으며 평균값을 사용하였다.

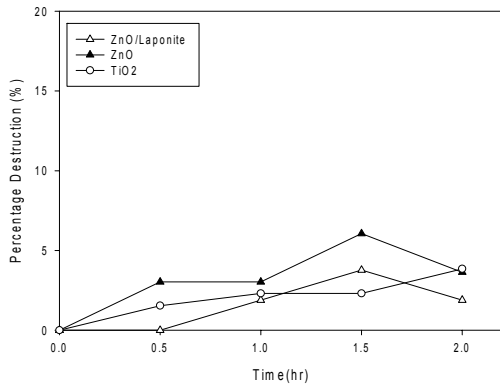
[Table 3] Experiment conditions

No.	with UVA	without UVA
1	Only UVA	-
2	ZnO + UVA	ZnO
3	TiO <sub>2</sub> + UVA	TiO <sub>2</sub>
4	ZnO/Laponite ball + UVA	ZnO/Laponite ball

## 2.2 결과 및 고찰

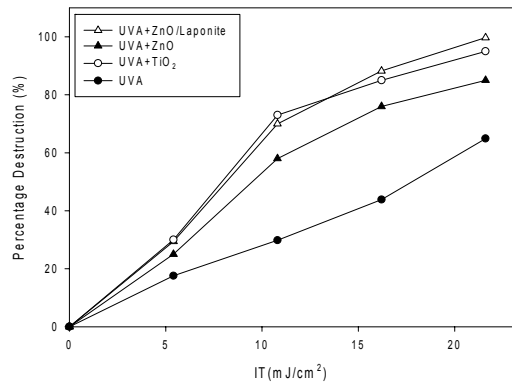
### 2.2.1 *E. coli* 살균 테스트

Fig. 2는 Dark 상태에서 미생물 *E. coli*에 3가지 종류의 촉매제를 주입 후 반응시간을 2시간까지 증가시키면서 광촉매의 종류에 따라 테스트한 결과이다. UVA를 조사하지 않은 Dark 상태에서는 3가지 촉매제 모두 사멸률이 약 5% 이내로 빛이 없는 상태에서는 거의 반응이 없는 것으로 나타났다.



[Fig. 2] Comparison of Dark destruction of *E. Coli*

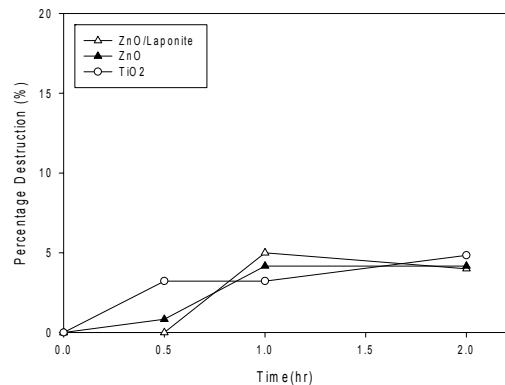
Fig. 3은 UVA와 3가지 광촉매 유무에 따른 *E. coli*를 테스트한 결과이다. UVA 단독 조사조건에서 *E. coli*는 자외선 강도(IT) 22 mJ/cm<sup>2</sup>에서 65.0%로 감소하였다. 자외선 강도 IT 22 mJ/cm<sup>2</sup>에서 광촉매 별 *E. coli* 사멸률은 ZnO/Laponite ball + UVA에서 99.7%, TiO<sub>2</sub> + UVA에서 95% 및 ZnO + UVA에서 85.0% 순으로 나타났다. 실험 결과 *E. coli*의 살균을 위한 경우 촉매제 ZnO/Laponite ball의 효율이 가장 효율이 우수 할 것으로 기대되었던 TiO<sub>2</sub> 촉매제 만큼 살균력이 우수한 것으로 나타났다. 따라서, TiO<sub>2</sub> 대신에 성형한 ZnO/Laponite ball을 미생물 *E. coli*을 위한 살균용으로 충분히 활용 가능할 수 있을 것으로 기대된다. 본 실험의 경우는 최소 자외선 강도 3 μW/cm<sup>2</sup>에서 실시한 결과이기 때문에 자외선 강도를 증가시키거나 광촉매제의 양을 증가시킨다면 더 짧은 시간에 *E. coli*를 사멸시킬 수 있을 것으로 판단되며, UVA의 에너지 절약 및 실내적용을 위해서는 광촉매제의 양을 증가시키면 충분히 효과가 있을 것으로 판단된다.



[Fig. 3] Comparison of Photocatalytic destruction of *E. Coli*

### 2.2.2 *Bacillus subtilis* sp. 살균 테스트

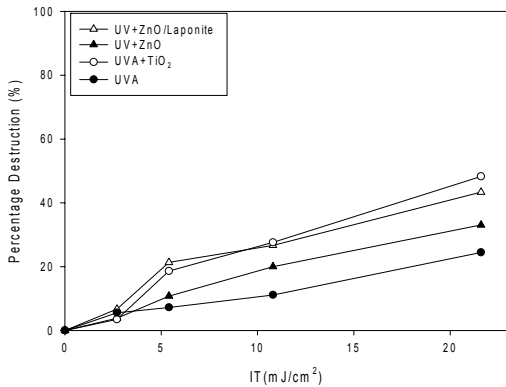
Fig. 4는 Dark 상태에서 미생물 *B. subtilis* sp.에 3가지 종류의 촉매제를 주입 후 반응시간을 2시간까지 증가시키면서 광촉매의 종류에 따라 살균 테스트한 결과이다. UVA를 조사하지 않은 Dark 상태에서는 3가지 촉매제 모두 사멸률이 약 5% 이내로 빛이 없는 상태에서는 거의 제거가 안 되는 것으로 관찰되어 빛이 없는 상태에서는 효율이 없는 것으로 나타났다.



[Fig. 4] Comparison of Dark destruction of *B. subtilis* sp.

Fig. 5는 UVA와 3가지 광촉매 유무에 따라 *B. subtilis* sp.를 테스트한 결과이다. UVA 단독 조사조건에서 *B. subtilis* sp.는 자외선 강도(IT) 22 mJ/cm<sup>2</sup>에서 24.4%로 감소하였다. 자외선 강도 22 mJ/cm<sup>2</sup>에서 광촉매 별 *B. subtilis* sp. 사멸률은 ZnO/Laponite ball + UVA에서 43.3%, TiO<sub>2</sub> + UVA에서 48.3% 및 ZnO + UVA에서 33.1% 순으로 나타났다. 실험결과 *B. subtilis* sp.의 살균을 위한 경우 광촉매제 효율을 비교했을 때 ZnO/Laponite ball

의 효율은 TiO<sub>2</sub> 촉매제만큼 살균 효과가 있는 것으로 나타났다. 그러나, Fig. 2의 *E. coli*의 살균 테스트와 비교한 결과 *E. coli*에 비해 약 40~50 % 정도 살균력이 저하되는 것으로 나타났다. 이는 *B. subtilis* sp.가 포자류나 원생동물과 같이 강한 외벽을 가지고 있어 큰 소독제 접촉시간을 가져야 제거되기 때문인 것으로 판단된다[14]. 따라서, 자외선 강도를 증가시키거나 광촉매제의 양을 증가시킨다면 더 짧은 시간에 *B. subtilis* sp.도 충분히 살균할 수 있을 것으로 판단된다.



[Fig. 5] Comparison of Photocatalytic destruction of *B. subtilis* sp.

일반적으로 광촉매 반응 메커니즘은 광촉매가 UV 에너지를 흡수하면 전위대(Conduction band, CB)가 전자(e-)가 전도되고, 균형대(Valance band, VB)에 양공(Hole, h+)이 생성되며, 뒤이어 반응성이 매우 큰 OH 라디칼 등의 반응성 물질이 생성된다. 일반적으로 UVC 영역대인 200~280 nm는 DNA와 단백질이 잘 흡수하는 파장으로 살균처리에 매우 효과적이다.[18]. 본 연구에서는 사용한 365 nm를 포함한 UVA 영역의 경우 이 파장의 빛을 DNA가 거의 흡수하지 못하기 때문에 Fig. 3 및 Fig. 5에서 보는 바와 같이 *E. coli*의 경우 사멸률이 60 % 이하이고, *B. subtilis* sp.의 경우 사멸률이 20 % 이하로 나타나고 있다. 하지만, TiO<sub>2</sub>, WO<sub>3</sub>, WS<sub>2</sub>, CdS, ZnO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 ZnS 등과 같은 광촉매 반응에서는 UVC 영역의 에너지를 흡수하여 반응성이 큰 OH 라디칼 등의 활성종이 생성되어, *E. coli* 및 *B. subtilis* sp.의 불활성화 반응에 관여하여 *E. coli*를 대상으로 ZnO/Laponite ball로 광반응을 시킨 경우 99 % 이상의 사멸률을 나타냈고, *B. subtilis* sp.의 경우 ZnO/Laponite ball로 광반응을 시킨 경우 40 % 이상의 사멸률로 단독 UVA 보다 2배 이상의 살균 효과가 보이도록 라디칼 반응이 기여한 것으로 분석된다.

또한, ZnO/Laponite ball를 이용한 광촉매 반응에서 *B.*

*subtilis* sp.의 사멸률이 UVA 단독 반응보다는 2배 이상 증가하였으나, *E. coli* 보다는 사멸률이 매우 낮아 이에 대한 촉매 개선이 필요할 것으로 분석되었다.

### 3. 결론

본 연구는 입자성 부유미생물에 의한 실내공기질 오염 방지 기술의 개발을 위하여 광촉매에 의한 미생물 사멸률을 조사하기 위한 목적으로 수행된 기초 연구로서, 3가지 종류의 광촉매를 이용하여 *E. coli* 및 *B. subtilis* sp. 대한 사멸률을 살펴보았다. 실내 공기중에는 수많은 미생물들이 부유해 있는데, 박테리아 중 Gram(+) 균은 *B. subtilis*이 대표적 미생물이며 Gram(-) 균은 *E. coli*가 대표적 미생물로 가상부유균에 관한 실험을 할 때 이 박테리아는 실내 공기 중의 전체 박테리아를 대표하여 국내 외적으로 널리 사용되어진다. 미생물 살균 실험으로서 가장 기초적인 방법으로는 초순수에 미생물을 주입하여 실험하는 방법으로 광촉매와 UVA에 대한 기초 실험 결과에 따라 미생물 사멸률이 확인되면 실내공기중에 부유하는 미생물도 광촉매와 UVA에 살균력이 있다고 판단되어 본 연구에서는 부유미생물의 실내공기오염 제어를 위한 기초 실험 데이터로 활용하기 위하여 수행하였다. 연구결과, 최소한의 UVA 자외선 조사량 3 μW/cm<sup>2</sup>에서도 2시간 정도 반응(IT 22 mJ/cm<sup>2</sup>)하면 *E. coli*의 경우 광촉매제 3가지 이상에서 80 % 이상 제거될 수 있는 것으로 나타났으며, UVA 단독 살균율 보다 약 30 % 이상 높게 나타났다. 또한, *B. subtilis* sp.의 경우는 자외선 조사량을 증가시키거나, 광촉매제의 양을 증가시키면 충분히 사멸시킬 수 있을 것으로 보이나, 강한 외벽을 가지고 있는 미생물을 살균할 경우 소독제 및 자외선 조사량이 증가하기 때문에, 안정성을 위해서는 최대 살균효과를 높일 수 있는 최적점을 찾아야한다. ZnO/Laponite ball 복합제의 경우 일반적으로 알려진 TiO<sub>2</sub>와 동등이상의 살균력이 있는 것으로 확인되었고, *E. coli*의 경우 99 % 이상 사멸이 가능하였다.

그러나, ZnO/Laponite ball를 이용한 광촉매 반응에서 *B. subtilis* sp.의 사멸률이 UVA 단독 반응보다는 2배 이상 증가하였으나, *E. coli* 보다는 사멸률이 매우 낮아 이에 대한 촉매 개선이 필요할 것으로 판단된다. 상기와 같은 다양한 형태로 제조가 가능한 광촉매를 활용한다면, 광촉매 응용기술은 다양한 분야에서 경제적으로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

## References

- [1] H. N. Kundsén, U. D. Kjaer, P. A. Nielsen, and P. Wolkoof, "Sensory and chemical characterization of VOC emissions from building products impact of concentration and air velocity", *Atmos. Environ.*, Vol. 33, pp. 1217-1230, 1999.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00278-7](http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00278-7)
- [2] S. R. Won, J. Y. Lim, I. K. Shim, E. J. Kim, A. R. Choi, J. S. Han and W. S. Lee, "Characterization of PM2.5 and PM10 concentration distribution at public facilities in Korea", *Journal of Korean Society for Indoor Environment*, Vol. 9, No. 3, pp. 229-238, 2012.
- [3] H. Burge, "Bioaerosols: Prevalence and health effects in the indoor environment", *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, Vol. 86, No. 5, pp. 687-701, 1990.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0091-6749\(05\)80170-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0091-6749(05)80170-8)
- [4] J. L. Sagripanti and A. Bonifacino, "Bacterial spores survive treatment with commercial sterilants and disinfectants", *Appl. Environ. Microbiol.*, Vol. 65, No. 9, pp. 4255-4260, 1999.
- [5] D. F. Ollis, "Photocatalytic purification and remediation of contaminated Air and Water", *Chemistry 3*, pp. 405. 2000.
- [6] A. Fujishima, K. Hashimoto and T. Watanabe, *The mechanism of photocatalyst*, Nippon Jitsugyo Publishing, 2002.
- [7] C. Y. Lin and C. S. Li, "Inactivation of microorganisms on the photocatalytic surfaces in air", *Aerosol Science and Technology*, Vol. 37, pp. 939-946. 2003.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/02786820300900>
- [8] H. Yang, G. Li, Y. Gao and J. Fu, "Photocatalytic degradation kinetics and mechanism of environmental pharmaceuticals in aqueous suspension of TiO<sub>2</sub>: A case of sulfa drugs", *Catalysis Today*. Vol. 153, pp. 200-207, 2010.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cattod.2010.02.068>
- [9] H. L. Liu and T. C.-K. Yang, "Photocatalytic inactivation of *Escherichia coli* and *Lactobacillus helveticus* by ZnO and TiO<sub>2</sub> activated with ultraviolet light", *Process Biochemistry*, Vol. 39, pp. 475-481. 2003.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0032-9592\(03\)00084-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0032-9592(03)00084-0)
- [10] O. Seven, B. Dindar, S. Aydemir, D. Metin, M. A. Ozinel and S. Icli, "Solar photocatalytic disinfection of a group of bacteria and fungi aqueous suspensions with TiO<sub>2</sub>, ZnO and Sahara desert dust", *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, Vol. 165, pp. 103 - 107. 2004.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jphotochem.2004.03.005>
- [11] J. Zhao, V. Krishna, B. Hua, B. Moudgil and B. Koopman, "Effect of UVA irradiance on photocatalytic and UVA inactivation of *Bacillus cereus* spores", *J. of photochemistry and photobiology B; Biology*, Vol. 94, pp. 96-100. 2009.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2008.10.006>
- [12] A. Vohra, D. Y. Goswami, D. A. Deshpande and S. S. Block, "Enhanced photocatalytic disinfection of indoor air", *Applied Catalysis B: Environmental*, Vol. 65, pp. 57-65. 2006.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2005.10.025>
- [13] S. Sontakke, C. Mohan, J. Modak, and G. Madras, "Visible light photocatalytic inactivation of *Escherichia coli* with combustion synthesized TiO", *Chemical Engineering Journal* 189 - 190, Vol. 165 pp. 101-107. 2012.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2012.02.036>
- [14] M. Cho, J. H. Kim and J. Yoon, "Investigating synergism during sequential inactivation of *Bacillus subtilis* spores with several disinfectants", *Water Res.*, Vol. 40, pp. 2911-2920. 2006.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2006.05.042>
- [15] C. S. Cockell, P. Rettberg, G. Horneck, D. D. Wynn-Williams, K. Scherer and A. Gugg-Helminger, "Influence of ice and snow covers on the UV exposure of terrestrial microbial communities: dosimetric studies", *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, Vol. 68, pp. 23-32, 2002.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1011-1344\(02\)00327-5](http://dx.doi.org/10.1016/S1011-1344(02)00327-5)
- [16] Z. Fan, and J. G. Lu, "Zinc Oxide Nanostructures: Synthesis and Properties", *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 5, No. 10, pp. 1561-1573, 2005.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1166/jnn.2005.182>
- [17] American Public Health Association (APHA); American Water Works Association(AWWA); Water Environment Federation(WEF). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 1998*; 18th ed., American Public Health Association, Washington DC.
- [18] O. K. Dalrymple, E. Stefanakos, M. A. Trotz, D. Y. Goswami, "A review of the mechanisms and modeling of photocatalytic disinfection", *Applied Catalysis B: Environmental*, 98, pp. 27-38, 2010.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2010.05.001>

**윤 영 한**(Young Han Yoon)

[정회원]



- 2003년 2월 : 광주과학기술원 환경공학과 (공학석사)
- 2008년 2월 : 연세대학교 토목환경공학과 (박사수료)
- 2002년 12월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 환경연구실 수석연구원

<관심분야>

도시 물순환, 하수고도처리, 실내공기질관리

**안 호 상**(Hosang Ahn)

[정회원]



- 2007년 7월 : University of Florida (재료공학 석사)
- 2011년 12월 : Auburn University (재료공학 박사)
- 2012년 2월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원, 환경연구실 수석연구원

<관심분야>

실내공기질, 센서, 환경소재,

**남 숙 현**(Sook-Hyun Nam)

[정회원]



- 2000년 8월 : 고려대학교 환경공학(공학석사)
- 2000년 9월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 환경연구실 연구원

<관심분야>

고도정수처리, 소독부산물, 미생물

**주 진 철**(Jin Chul Joo)

[정회원]



- 2001년 2월 : 서울대학교 지구환경시스템공학부 (공학석사)
- 2007년 12월 : Colorado State University, USA (공학박사)
- 2007년 12월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 환경연구실 연구위원
- 2008년 3월 ~ 현재 : 과학기술연합대학원대학교 부교수

<관심분야>

토양지하수 오염 복원, 대기·수질관리