

논문

대형 스모그 챔버를 이용한 TiO₂의 NO 저감 효능 평가

Assessment of NO Reduction using TiO₂ in Large-Scale Smog Chamber

김문수, 박태현¹⁾, 이종원²⁾, 이상혁²⁾, 송명기, 박정준³⁾,
배민석, 이태형¹⁾, 박희문^{2),*}

국립목포대학교 환경공학과, ¹⁾한국외국어대학교 환경학과,
²⁾한국건설기술연구원 도로교통연구본부, ³⁾한국건설기술연구원 구조연구본부

Moonsu Kim, Taehyun Park¹⁾, Jong Won Lee²⁾, Sang Hyuk Lee²⁾,
Myoungki Song, Jungjun Park³⁾, Min-Suk Bae, Taehyoung Lee¹⁾,
Hee Mun Park^{2),*}

Department of Environmental Engineering, Mokpo National University, Muan, Republic of Korea

¹⁾Department of Environment Engineering, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea

²⁾Department of Highway & Transportation Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Gyeonggi-do, Republic of Korea

³⁾Department of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Gyeonggi-do, Republic of Korea

접수일 2021년 11월 17일
수정일 2021년 12월 6일
채택일 2021년 12월 7일

Received 17 November 2021
Revised 6 December 2021
Accepted 7 December 2021

*Corresponding author
Tel : +82-(0)31-910-0323
E-mail : hpark@kict.re.kr

Abstract A large-scale environment chamber was built to test the efficiency of NO reduction to apply the real-road systems using TiO₂, which is a relatively inexpensive and easy to handle material in the past 20 years. In general, TiO₂ is a semiconductor material with a band gap of 3.2 eV, corresponding to a wavelength of 390 nm. Three types (i.e., power, black, white block) of TiO₂ were tested to investigate NO reduction. As a result, power TiO₂ was shown for the best NO reduction up to 72% (overall average of 40.8% at 120 min.) rather than white (23.0%) and black block (15.8%) impregnated by TiO₂. For an implication, the inorganic secondary products under the condition of reactive oxygen species from TiO₂ should be considered for a further study.

Key words: Environment chamber, Smog chamber, TiO₂

1. 배경

최근 국내외적으로 대기오염 발생 및 저감 측정에서 스모그 챔버의 주연구 주제로 차량발생 오염성분에 대한 TiO₂ 저감기술이 진행되고 있다(Babar *et al.*, 2016; Carter *et al.*, 2005; Akimoto *et al.*, 1979). TiO₂은 비교적 저렴하고 인체에 독성이 없으며, 취급이 용이하기 때문에 여러 분야에서 이용되고 있다(Kamat, 2011). 최근, 태양 전지에서 TiO₂ 활용, 환경적으로 여러 코팅제로 활용되고 있다(Kasanen *et al.*, 2009;

Zhang *et al.*, 2005; Dutta *et al.*, 1999; Birkefeld *et al.*, 1992). TiO₂는 390 nm의 파장에서 3.2 eV의 에너지갭(gap)을 나타내며, anatase, rutile, brookite의 세 가지 주성분으로 이루어진 반도체물질이다. 이 중, anatase가 가장 높은 광촉매 활성을 나타내는 것으로 알려져 있다(Fang *et al.*, 2011; Augustynski 1993). 선행 연구에 따르면 TiO₂는 광화학 촉매 반응에 의해 대기 중으로 발생하는 NOx 및 VOCs를 N₂ 및 CO₂로 산출하며, 일부 NOx는 질산염 형태로 흡착한다(Chen *et al.*, 2012). 간략히, 에너지갭 이상의 파장에 의해 전자-정

공 쌍이 생성된다. 이후, 입자 표면으로 이동된 전자와 정공은 산화 환원 반응을 일으킨다. 광 생성된 전자 및 정공은 H₂O 및 O₂와 반응하여 활성산소종(reactive oxygen species, ROS)을 형성한다(식 1~3) (Shiraiwa *et al.*, 2011; Tatsuma *et al.*, 1999).



위 반응과 같이, 광촉매 반응은 생성 ROS에 의해 시작된다. 최근 연구에 따르면 생성된 ROS는 TiO₂ 표면에서 멀리 확산되어, 여러 반응을 일으키는 것으로 알려져 있다. 최근 연구에 따르면, 유기가스 성분은 TiO₂에서 발생된 ROS에 의해, 충돌 거리는 최대 2.2 mm에서, 최종적으로 CO₂로 광산화되는 것으로 보고하였다(Bahrini *et al.*, 2010; Thiebaud *et al.*, 2010).

이에, 국내에서도 최근 대형 스모그 챔버를 설립하고, TiO₂ 코팅기술을 도로에 접목하고자, 실증실험을 진행하였다. 즉, 스모그 챔버에 차량 배기가스를 주입한 후 실험군에는 TiO₂의 광촉매 반응을 일으키고, 대조군에는 차량 배기가스의 농도를 측정하는 것으로 설계하였다. 본 연구에서는 실험군과 대조군의 NO_x 농도를 기준으로 TiO₂의 NO_x의 저감을 평가함을 목적으로 하였다. 이러한 연구는 대기환경을 개선하기 위한 차량 운행 도로를 개선하는 것으로서 직접적인 대기오염을 저감시킬 수 있을 것으로 기대한다. 또한 국내에 설치된 스모그 챔버는 향후 초미세먼지의 생성 과정뿐만 아니라 미세먼지 저감을 위한 다양한 소재, 제품 등의 평가에 적용할 수 있다.

2. 연구 방법

2.1 대형 스모그 챔버

본 연구는 경기도 연천군 연천읍 옥산리에 위치한 한국건설기술연구원 SOC 실증연구센터(위도:

38.114, 경도: 127.087)에 위치한 약 1,163 m³ 부피의 대형 스모그 챔버를 이용하여 실증실험을 수행하였다. 길이 22 m, 폭 12 m, 높이 6 m의 터널 모양의 내부의 외벽 손실을 최소화하기 위한 대형 챔버로, 밀폐형으로 설계되었다. 챔버 외벽은 벽과 내부에서의 반응과 빛의 투과성을 고려해 반응성이 거의 일어나지 않고 빛을 최대한 투과할 수 있는 Ethylene Tetra Fluoro Ethylene (ETFE) 막을 이용하였다. 챔버는 중간 차단막에 의해, 오른쪽에는 TiO₂가 투여된 실험군과 TiO₂ 등이 전혀 투여되지 않은 대조군으로 분할되어 운영되었다. 챔버 내부로부터 별도 설치된 컨테이너 연구동(3 m×9 m)까지 테프론 관을 설치하여, 챔버 내 반응 가스를 분석하였다. 균일한 온습도 분포 유지를 위한 16개 온습도 센서 설치 및 모니터링하였으며, 미세먼지 및 전구물질의 균질성 확보를 위해 4대의 대형팬에 의한 공기순환장비를 설치하였다. 또한, 챔버 내 고온상승을 방지하기 위해서 4대의 대형에어콘을 설치하여 항온, 항습 상태에서 운영하였다.

2.2 측정 방법

본 연구에서는 TiO₂의 차량 배기 가스 중 NO의 저감효율을 분석하고자, 경유, 휘발유 차량 총 2대의 배기가스를 챔버 외부에서 알루미늄 주름관을 통해 실험군과 대조군을 동시에 직접 주입하였다(그림 1). 배기가스 주입은 NO_x의 농도가 약 800 ppb가 될 때까지 주입하여, 이후 엔진을 정지한 상태에서 TiO₂에 의한 농도 감소를 실험군과 대조군에서 동시 분석하였다.

2.2.1 수농도측정

실시간 Scanning Mobility Particle Sizer Spectrometer (SMPS)를 이용하여 입경별 수농도를 측정하였다. SMPS는 입경별로 분리된 분진을 별도 수농도 측정기로 분석하는 원리로, 크게 Electrostatic Classifier (ESC) (Model 3082, TSI Inc., USA), Differential Mobility Analyzer (DMA) (Model 3081, TSI Inc., USA), Condensation Particle Counter (CPC) (Model 3789, TSI Inc., USA), 3부분으로 이루어져 있다. DMA에서 분리

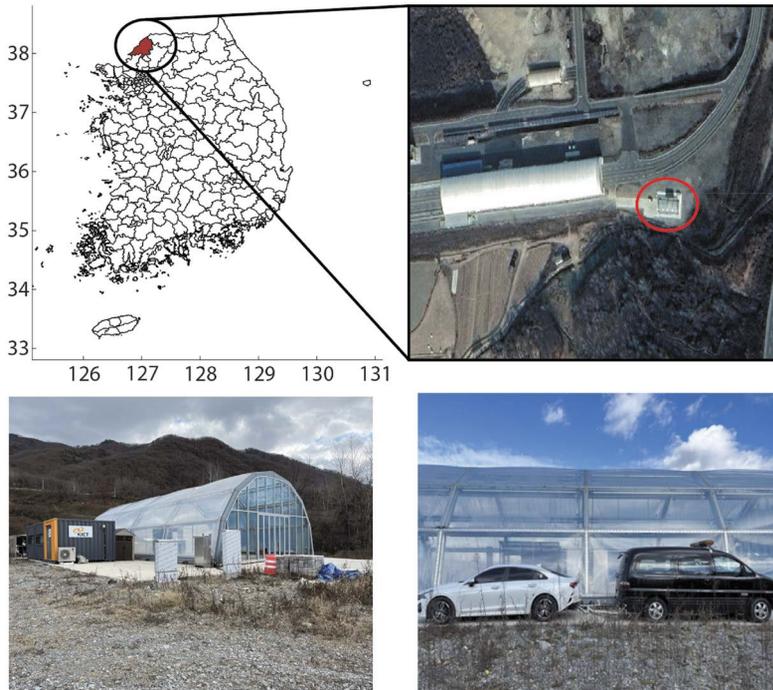


Fig. 1. Sampling location for TiO_2 empirical experiment in large scale chamber.

된 나노 크기의 단분산 입자는 CPC 내부에서 물을 이용하여 입자의 크기를 성장시켜서 측정하는 원리로, 성장 분진을 최대 $10,000 \text{ \#}/\text{cm}^3$ 내에서 레이저 다이오드(laser diode)에 의해 수능도를 측정한다. 본 연구에서는, 입경분포 10.9 nm에서 495.8 nm까지 총 107채널로 분석하였다. 매트랩 프로그램에 의해 최종 수능도를 산출하였다.

2.2.2 가스상 전구성분 분석

챔버 내의 NO_x 를 측정하기 위해 2대의 실시간 장비(Teledyne API T200, 42iQ Thermoscientific, USA)를 사용했다. 이 기기는 화학발광 측정법을 사용하여 NO_x 의 농도를 산출한다. 시료 가스의 NO 를 기기 내부의 O_3 발생기에서 생성된 O_3 과 반응시켜 NO_2 를 생성할 때 발생하는 화학발광의 강도를 측정하여 농도를 산출한다. 챔버 내의 O_3 은 실시간 장비(Teledyne API T400, 49iQ Thermoscientific, USA)를 사용하였

다. O_3 은 자외선 흡수법을 사용하여 농도를 산출하는데 O_3 분자에 흡수되는 254 nm의 자외선 광원을 이용하여 UV 검출기에 의해 농도를 산출한다. 모든 장비는 분석 전 바탕값 및 교정진행 후 5% 이내의 정확도 내에서 측정을 진행하였다.

2.2.3 HR-ToF-AMS

실증 챔버 내 극미세먼지($\text{PM}_{1.0}$)의 화학적 성분(NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ 등)을 분석하고자 High Resolution-Time of Flight-Aerosol Mass Spectrometer (HR-ToF-AMS)를 이용하였다(Park *et al.*, 2020; Jimenez *et al.*, 2003; Jayne *et al.*, 2000). 간략히, HR-ToF-AMS는 대기 중 시료를 직경 100 μm pinhole을 통해 약 0.1 L/min으로 포집하고, 공기역학적 렌즈를 통해 생성된 particle beam을 표면의 온도가 600°C로 유지되는 기화기에 충돌시켜 내화성이 낮은 미세입자(Non-Refractory PM)를 기화시켜 질량 파편을 분석한다.

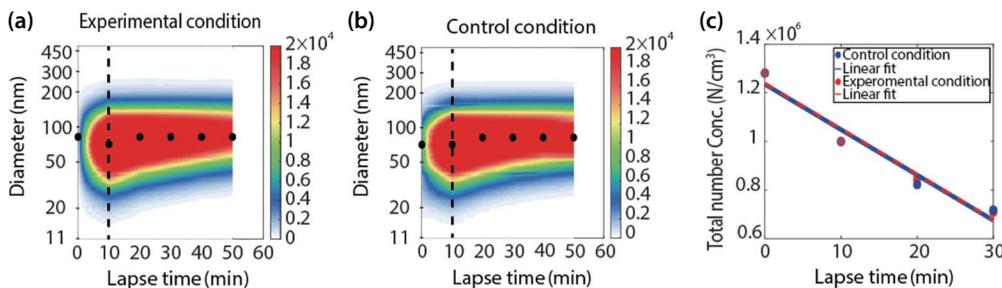


Fig. 2. (a) Size number concentration in experimental condition, (b) control condition and (c) time series of total number concentration for experimental condition and control condition of large scale chamber using SMPS.

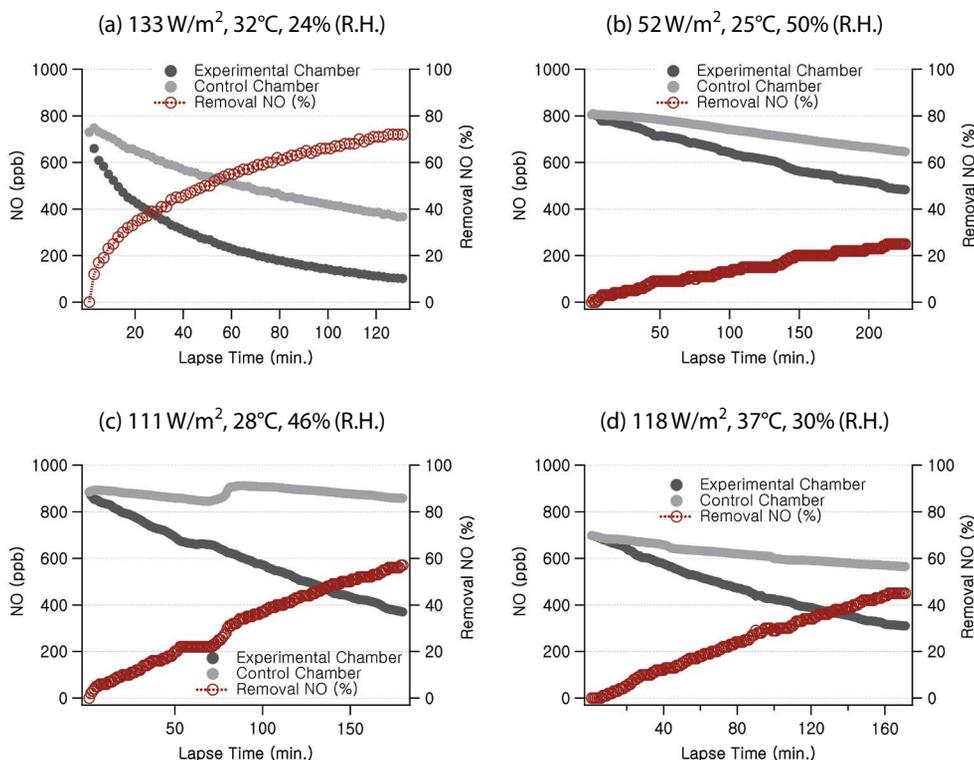


Fig. 3. NO reduction using powder TiO₂ 400 g in large-scale smog chamber [(a) 133 W/m², 32°C, 24% (R.H.), (b) 52 W/m², 25°C, 50% (R.H.), (c) 111 W/m², 28°C, 46% (R.H.), (d) 118 W/m², 37°C, 30% (R.H.)].

3. 결 과

3. 1 대형 챔버 성능 평가

실험군과 대조군의 외벽흡착 및 자연 침강 등에 의한 감소율을 분석하고자, 차량 배기가스를 주입 후 시

간에 따른 수농도 감소량을 측정하였다. 그림 2(a)는 실험군에서 TiO₂를 주입하지 않은 조건에서, SMPS에 의한 입경별 수농도를 나타낸 것이며, 그림 2(b)는 대조군에서 동일 조건에 의한 입경별 수농도를 나타낸 것이다. 중간 검정점은 측정 입경의 최빈값(mode)을

나타낸 것이다. 실험군과 대조군 모두에서 최빈값은 약 85 nm로 동일하게 측정되었다. 또한, 외벽 흡착 및 자연 침강 등에 의해 감소되는 감소율을 분석한 결과, 그림 2(c)에서와 같이 초기의 총수농도 $1.2 \times 10^6 \text{ \#/cm}^3$ 농도에서 오차범위 내에서 동일하게 감소되었다. 이는 실험군과 대조군의 자연 감소율이 동일함을 나타내며, 향후, 실험군과 대조군의 감소율의 차이가 주어진 조건 환경하에서 감소율을 나타내는 것을 의미한다.

3.2 분말형 TiO₂에 의한 NO 감소율

실대형 실증 인프라 활용을 위한 도로변 전구물질 제거 기술 성능을 검증하고자 실험군에 분말가루 형태의 TiO₂ 400 g을 바닥에 투여한 후, 차량배기가스를 주입하여 NO 농도가 약 800 ppb 정도까지 상승시킨

후, 주입을 멈춘 상태에서 NO 감소율을 측정하였다. 실험은 자연 태양광을 이용한 총 4차에 걸쳐 진행되었으며, 1차부터 4차까지의 광량은 133, 52, 111, 118 W/m²으로 측정되었다. NO 감소율은 TiO₂가 없는 대조군 챔버의 NO 농도와 상대 비교하는 것으로 계산되었다. 분말형 TiO₂에 대한 NO 감소율을 그림 3에 나타내었다. 그림에서와 같이 분말 형태의 TiO₂는 대기 중 NO를 최대 72%, 최소 25% 감소시키는 것으로 분석되었으며, 분말형 TiO₂에 의한 대기 중 NO 감소율은 실험 조건의 광량 및 상대습도에 영향을 받는 것으로 나타났다. 즉, 광량을 기준으로 NO의 저감율을 살펴보면, 133 W/m²에서 72%, 118 W/m²에서 45%, 52 W/m²에서 25%의 NO가 저감되어 광량이 강할수록 대기 중 NO 저감율을 높아졌으며, 유사 온도(25°C 및 28°C) 및 유사 상대습도(50% R.H. 및 46% R.H.)에

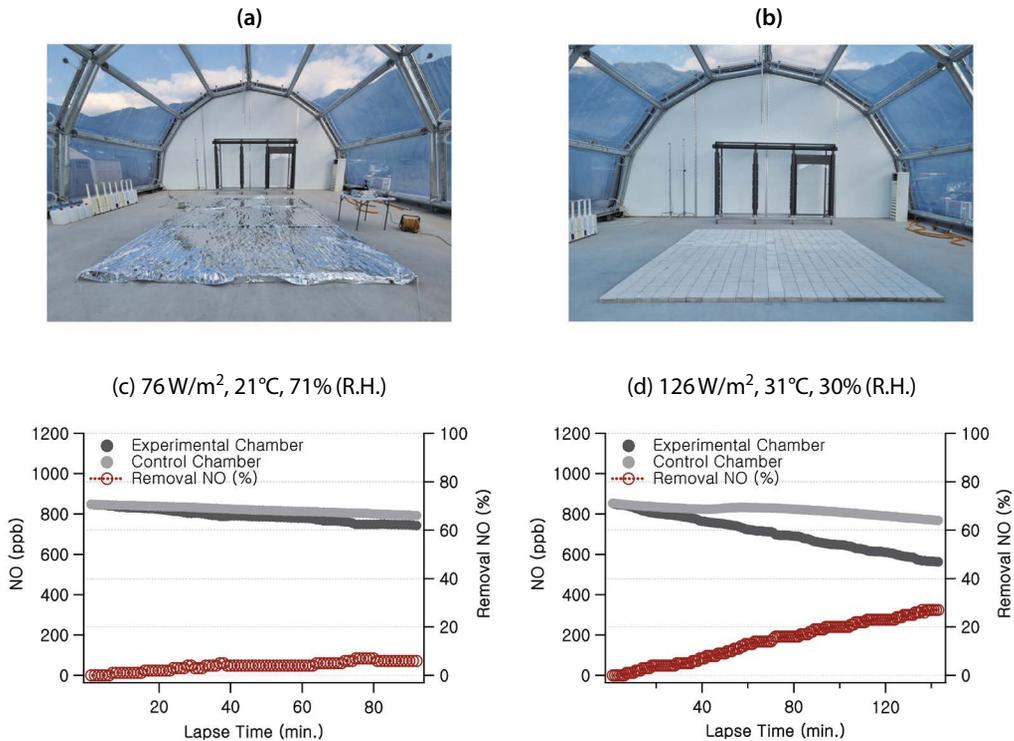


Fig. 4. NO reduction using TiO₂ impregnated white block in large-scale smog chamber [(a), (b) experimental pictures, (c) 76 W/m², 21°C, 71% (R.H.), (d) 126 W/m², 31°C, 30% (R.H.)].

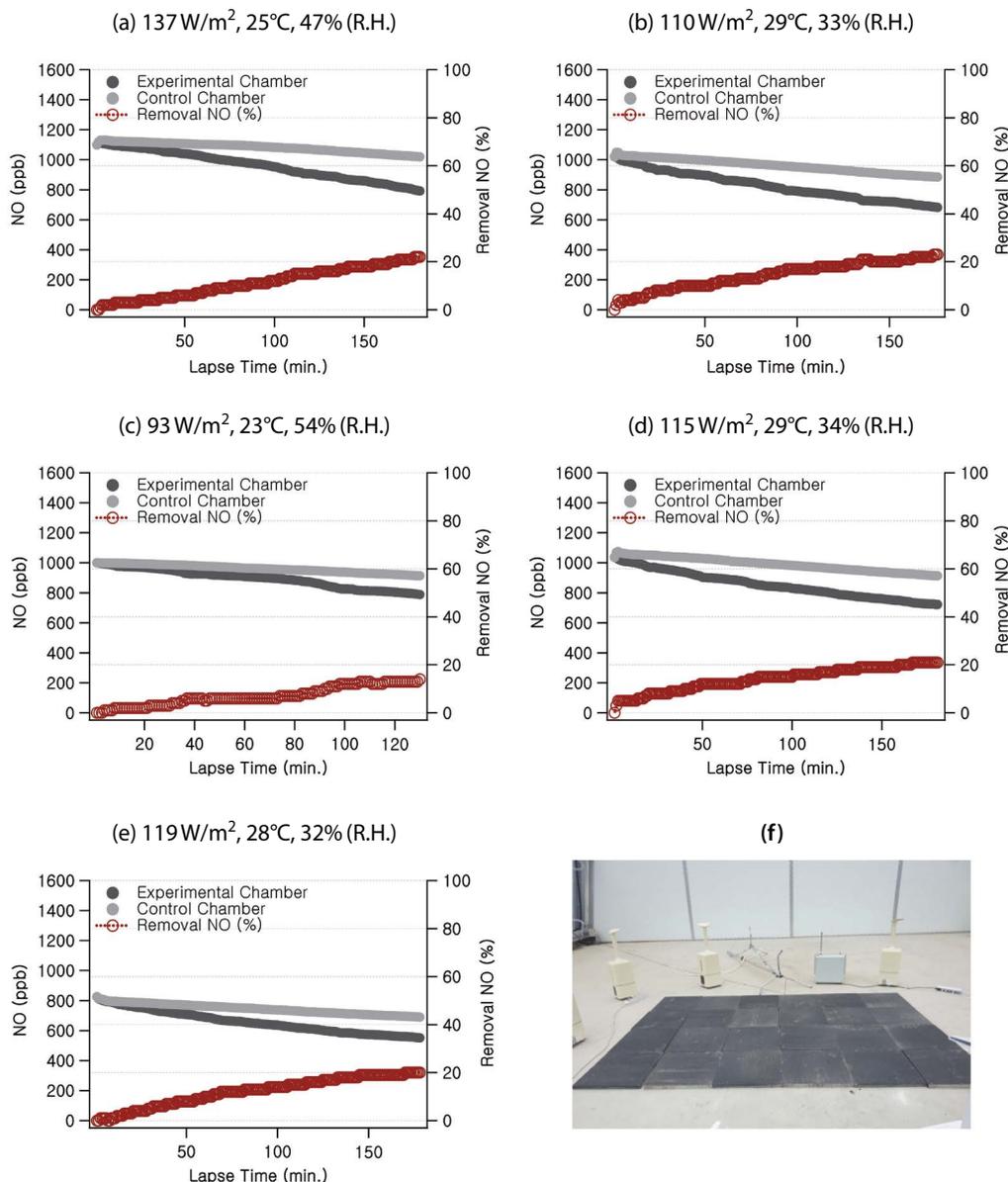


Fig. 5. NO reduction using TiO₂ impregnated black block in large-scale smog chamber [(a) 137 W/m², 25°C, 47% (R.H.), (b) 110 W/m², 29°C, 33% (R.H.), (c) 93 W/m², 23°C, 54% (R.H.), (d) 115 W/m², 29°C, 34% (R.H.), (e) 119 W/m², 28°C, 32% (R.H.)].

서 광량이 52 W/m²에서 111 W/m²으로 약 2.13배 증가할 때 NO의 제거율은 25%에서 57%로 2.28배 증가한 것으로 분석되었다. 이를 바탕으로 광량과 NO 저감율은 높은 상관관계를 나타내었다. 더 나아가, 상대습도의 영향을 확인한 결과 유사 광량인 111 W/m² 및

118 W/m² 광량에서 상대습도 46%일 때 NO 제거율은 57%, 상대습도 30%일 때 NO 제거율은 45%로 나타났다으며, 세부적으로 온도가 1.53배 증가할 때 NO 저감율은 1.27배 증가한 것으로 분석되었다. 실험 조건에 따른 온도의 영향이 있을 것으로 판단되지만, 위

결과로부터 NO 저감율은 상대습도와 비례적인 관계일 것으로 판단된다. 이는, 앞서 설명한 바와 같이, TiO₂에 의한 ROS 생성율이 상대적으로 높은 습도에서 많이 발생하는 것으로 분석된다. 결론적으로 분말형 TiO₂는 광량과 상대습도가 높을수록 대기 중 NO 제거율이 높아지며, 이 중 광량은 NO 제거율과 가장 높은 상관관계를 나타내었다.

3.3 TiO₂ 코팅 흰색 블록에 의한 NO 감소율

분말형 TiO₂에 의한 NO 제거는 광량에 따라 변이는 있지만, 상당히 높은 제거율을 나타냈었다. 하지만, 분말형 TiO₂를 실도로에 적용시키기에는 한계가 크므로, 실적용 가능한 블록 형태를 제작하여 NO 감소율을 실험하였다. 간략히, 블록은 Green Sludge Technology (GST) 광촉매 숏크리트로, 건축물 등 도로변 주변 벽면에 적용 목적으로 제작되었다. 시멘트 대비 GST 광촉매 혼입량을 15% 적용하여, 전체적인 색은 밝은 회색 계열(흰색 블록)을 나타내었다. 최종적인 적용량은 내부 강도 등을 고려하여, 광촉매 숏크리트 2 kg/m²로 제작되었다.

TiO₂가 도포된 흰색 블록의 NO 저감 실험 결과를 그림 4에 나타내었다. 측정 전 알루미늄 차단막으로 빛을 차단시킨 후, 측정 시작 직후 차단막을 제거하여 실험을 진행하였다. 그림에서와 같이 흰색 블록에 의한 NO 저감율은 76 W/m² (71% R.H.)에서 7%, 126 W/m² (30% R.H.)에서 27%를 나타냈다. 분말형 TiO₂의 결과에서 도출된 광량과 상대습도의 영향을 고려할 경우 76 W/m² (71% R.H.)의 조건이 126 W/m² (30% R.H.)보다 낮은 NO 제거율을 나타냈다. 이는 흰색 블록은 상대습도에 대한 영향보다 광량에 큰 영향을 받으며, ROS 생성율이 분말형보다는 적게 발생하는 것으로 분석된다.

3.4 TiO₂ 코팅 검정 블록에 의한 NO 감소율

실도로에 설치 적용하기 위해서 검정색 계열의 검정 블록을 제작하여 실험하였다. 간략히, GST 광촉매 도로코팅 재료를 이용하여, 표면에 스프레이 방식 적

용하였다. 총 부피 대비 GST 광촉매 혼입량을 10% 적용하였으며, 광촉매 코팅재료 적용량을 1 kg/m²로 제작하였다. TiO₂가 도포된 검정 블록의 NO 저감 실험 결과를 그림 5에 나타내었다. 그림에서와 같이 검정 블록은 실험 조건에 따라 14~23%의 NO 저감율을 나타내었다. 저감율은 93 W/m² (54% R.H.)에서 최소 저감율인 14%를 나타내었으며, 이외 100 W/m² (32~47% R.H.) 이상의 광량에서는 모두 20% 이상의 NO 저감율을 나타내었다. 20% 이상의 NO 저감을 나타낸 실험 조건을 살펴보면 광량 및 상대습도의 변화가 저감율에 큰 영향을 미치지 않았다. 이는, 검정 블록은 분말형 TiO₂ 및 흰색 블록과 다르게 광량과 상대습도의 영향을 적게 받으며, 검정 블록은 일정 조건을 만족할 경우 NO 저감율이 20~25%로 일정하게 나타날 것으로 판단한다. 다만 검정 블록이 20% 이상의 NO를 저감시키는 조건을 확인하기 위해서는 추가적인 실험이 필요하다.

그림 6은 본 연구에서 실험한 3가지 종류의 TiO₂에 대한 최종 NO 제거 효율을 나타낸 것이다. 본 결과를 직접 비교하고자 실험 시작 후 120분에 대한 제거 효율을 계산하였다. 그 결과 분말형, 흰색, 검정 블록에 대한 NO 제거 효율은 각각 40.8%, 23.0%, 15.8%로 분말형에서 가장 높은 효율을 나타냈다. 이는 앞서 설명한 표면적, 광량 등이 크게 영향을 미쳤을 것으로

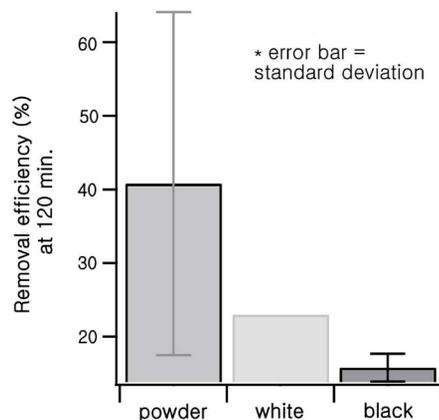


Fig. 6. Overall average of removal efficiency for TiO₂ types.

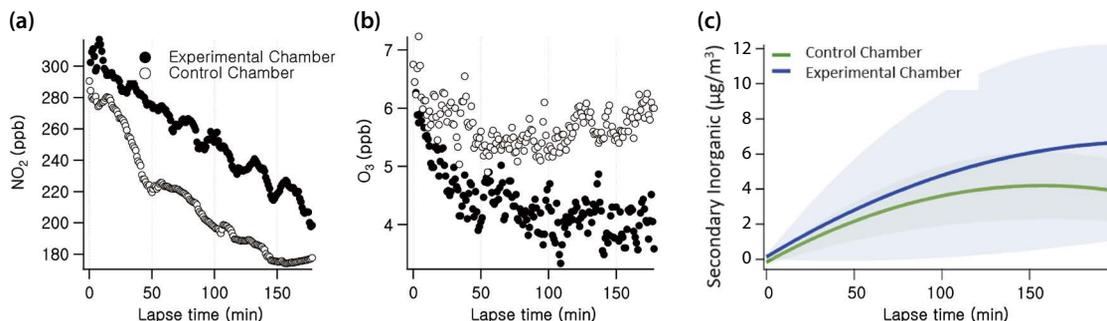


Fig. 7. (a) NO₂, (b) O₃ reductions, and (c) inorganic formation using powder TiO₂ 400 g in large-scale smog chamber.

판단한다.

3.5 2차 미세먼지 생성 잠재력

그림 7은 분말형 TiO₂에 의한 NO 감소율 실험 중 3차 실험을 나타낸 것이다. 앞서 설명한 바와 같이 NO의 경우 대조군 대비 57%의 높은 감소율을 나타냈다. 하지만, NO₂의 경우 그림 7에서 나타내듯이 실험군에서 대조군 대비 상대적으로 높은 농도를 유지하면서 감소현상이 나타났다. 또한, 오존의 경우 실험군에서 낮은 농도를 유지하면서 감소현상이 나타났다. 이는, NO₂의 경우 일부 제거되지 않은 NO가 TiO₂에 생성된 ROS에 의해 NO₂를 생성시키며, 생성된 NO₂가 다시, 발생 ROS에 의해 NO₃⁻로 최종 변환되는 가능성이 있다. HR-ToF-AMS를 이용하여 실험군 및 대조군의 NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺을 분석하여, 그림 7(c)에 나타났다. 실험군의 증가율이 대조군보다 상대적으로 높게 나타났으며, 이는 상대 이온성분의 증가가 통계적으로 유의하게 높게 분석되었다. 이는 앞서 설명한 ROS에 의한 NO₃⁻로 변환 가능성을 직접 설명한다. 또한, 실험군 챔버에서 상대적으로 낮은 농도 NO가 O₃와 재반응에 의해 NO₂로 전환될 가능성이 낮기 때문에, O₃의 경우 실험군은 낮은 농도를 나타내는 것으로 판단된다. 즉, TiO₂에 생성된 ROS가 NO를 NO₂로 1차 변환시키고 최종적으로 NO₃⁻를 생성시킬 가능성이 있다. 이에 대한 추가적 연구를 통해 상관성 분석을 진행할 예정이다.

4. 결 론

본 연구는 도로변 유동인구 밀집지역에 상시적 미세먼지 저감기술을 적용하고자, 현장 적용성 등을 고려한 TiO₂ 저감기술의 실효성을 검증하였다. 분말 형태의 TiO₂는 대기 중 NO를 최대 72%, 최소 25% 감소시키는 것으로 분석되었으며, 분말형 TiO₂에 의한 대기 중 NO 감소율은 실험 조건의 광량 및 상대습도에 영향을 받는 것으로 나타났다. 흰색 블록에 의한 NO 저감율은 76 W/m² (71% R.H.)에서 7%, 126 W/m² (30% R.H.)에서 27%를 나타냈다. 검정 블록은 실험 조건에 따라 14~23%의 NO 저감율을 나타내었다. 저감율은 93 W/m² (54% R.H.)에서 최소 저감율인 14%를 나타내었으며, 이외 100 W/m² (32~47% R.H.) 이상의 광량에서는 모두 20% 이상의 NO 저감율을 나타내었다. 최종적으로 저감율은 분말 형태의 TiO₂가 최대 값을 나타냈으며, 흰색 및 검정 블록의 경우 주위 환경에 따라 약간의 차이가 있지만 비슷한 수준의 저감율을 나타냈다. 또한, TiO₂에 생성된 ROS가 NO를 NO₂로 1차 변환시키고 최종적으로 NO₃⁻를 생성시킬 가능성이 있는 것으로 판단되어 이에 대한 추가 연구를 진행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 “도로변 유동인구

밀집지역 미세먼지 저감 및 실증 기술 개발”의 연구를 통해 수행되었습니다. 또한, 국가연구시설 장비진흥센터의 연구장비 지원(2019R1A6C1020041) 및 한국연구재단(2020M3G1A115000)의 지원을 받아 수행하였습니다.

References

- Akimoto, H., Hoshino, M., Inoue, G., Sakamaki, F., Washida, N., Okuda, M. (1979) Design and characterization of the evacuable and bakable photochemical smog chamber, *Environmental Science & Technology*, 13(4), 471-475. <https://doi.org/10.1021/es60152a014>
- Augustynski, J. (1993) The role of the surface intermediates in the photoelectrochemical behaviour of anatase and rutile TiO₂, *Electrochimica Acta*, 38(1), 43-46. [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(93\)80008-N](https://doi.org/10.1016/0013-4686(93)80008-N)
- Babar, Z.B., Park, J.-H., Kang, J., Lim, H.-J. (2016) Characterization of a smog chamber for studying formation and physicochemical properties of secondary organic aerosol, *Aerosol and Air Quality Research*, 16(12), 3102-3113. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.10.0580>
- Bahrini, C., Parker, A., Schoemaeker, C., Fittschen, C. (2010) Direct detection of HO₂ radicals in the vicinity of TiO₂ photocatalytic surfaces using cw-CRDS, *Applied Catalysis B: Environmental*, 99(3-4), 413-419. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2010.06.040>
- Birkefeld, L.D., Azad, A.M., Akbar, S.A. (1992) Carbon monoxide and hydrogen detection by anatase modification of titanium dioxide, *Journal of the American Ceramic Society*, 75(11), 2964-2968.
- Carter, W.P., Cocker III, D.R., Fitz, D.R., Malkina, I.L., Bumiller, K., Sauer, C.G., Song, C. (2005) A new environmental chamber for evaluation of gas-phase chemical mechanisms and secondary aerosol formation, *Atmospheric Environment*, 39(40), 7768-7788. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.08.040>
- Chen, H., Nanayakkara, C.E., Grassian, V.H. (2012) Titanium dioxide photocatalysis in atmospheric chemistry, *Chemical reviews*, 112(11), 5919-5948. <https://doi.org/10.1021/cr3002092>
- Dutta, P.K., Ginwalla, A., Hogg, B., Patton, B.R., Chwieroth, B., Liang, Z., Gouma, P., Mills, M., Akbar, S. (1999) Interaction of carbon monoxide with anatase surfaces at high temperatures: optimization of a carbon monoxide sensor, *The Journal of Physical Chemistry B*, 103(21), 4412-4422. <https://doi.org/10.1021/jp9844718>
- Fang, W.Q., Gong, X.-Q., Yang, H.G. (2011) On the unusual properties of anatase TiO₂ exposed by highly reactive facets, *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2(7), 725-734. <https://doi.org/10.1021/jz200117r>
- Jayne, J.T., Leard, D.C., Zhang, X., Davidovits, P., Smith, K.A., Kolb, C.E., Worsnop, D.R. (2000) Development of an aerosol mass spectrometer for size and composition analysis of submicron particles, *Aerosol Science & Technology*, 33(1-2), 49-70. <https://doi.org/10.1080/027868200410840>
- Jimenez, J.L., Jayne, J.T., Shi, Q., Kolb, C.E., Worsnop, D.R., Yourshaw, I., Seinfeld, J.H., Flagan, R.C., Zhang, X., Smith, K.A., Morris, J.W., Davidovits, P. (2003) Ambient aerosol sampling using the aerodyne aerosol mass spectrometer, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D7). <https://doi.org/10.1029/2001JD001213>
- Kamat, P.V. (2011) Dominance of metal oxides in the era of nanotechnology, *The Journal of Physical Chemistry Letters* 2(7), 839-840. <https://doi.org/10.1021/jz2002953>
- Kasanen, J., Suvanto, M., Pakkanen, T.T. (2009) Self-cleaning, titanium dioxide based, multilayer coating fabricated on polymer and glass surfaces, *Journal of Applied Polymer Science*, 111(5), 2597-2606. <https://doi.org/10.1002/app.29295>
- Park, T., Choi, Y., Choi, J., Ahn, J., Park, J., Lee, Y., Ban, J., Park, G., Kang, S., Kim, K., Seo, B.-K., Kim, J., Park, S., Kim, H., Jeon, H., Lee, T. (2020) Aircraft measurements of physicochemical evolution of atmospheric aerosols in air pollution plumes over a megacity and suburban areas, *Aerosol and Air Quality Research*, 20(11), 2485-2494. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.12.0649>
- Shiraiwa, M., Sosedova, Y., Rouviere, A., Yang, H., Zhang, Y., Abbatt, J.P.D., Ammann, M., Pöschl, U. (2011) The role of long-lived reactive oxygen intermediates in the reaction of ozone with aerosol particles, *Nature chemistry*, 3(4), 291-295. <https://doi.org/10.1038/nchem.988>
- Tatsuma, T., Tachibana, S.I., Miwa, T., Tryk, D.A., Fujishima, A. (1999) Remote bleaching of methylene blue by UV-irradiated TiO₂ in the gas phase, *The Journal of Physical Chemistry B*, 103(38), 8033-8035. <https://doi.org/10.1021/jp9918297>
- Thiebaud, J., Thévenet, F., Fittschen, C. (2010) OH radicals and

H₂O₂ molecules in the gas phase near to TiO₂ surfaces, *The Journal of Physical Chemistry C*, 114(7), 3082-3088. <https://doi.org/10.1021/jp9102542>

Zhang, X.T., Sato, O., Taguchi, M., Einaga, Y., Murakami, T., Fujishima, A. (2005) Self-cleaning particle coating with antireflection properties, *Chemistry of Materials*, 17(3), 696-700. <https://doi.org/10.1021/cm0484201>

Authors Information

김문수 (국립목포대학교 환경공학과 석사연구원)

박태현 (한국외국어대학교 환경학과 연구교수)

이종원 (한국건설기술연구원 도로교통연구본부 박사후연구원)

이상혁 (한국건설기술연구원 도로교통연구본부 수석연구원)

송명기 (국립목포대학교 환경공학과 연구교수)

박정준 (한국건설기술연구원 구조연구본부 연구위원)

배민석 (국립목포대학교 환경공학과 교수)

이태형 (한국외국어대학교 환경학과 교수)

박희문 (한국건설기술연구원 도로교통연구본부 연구위원)