

이산화티탄 광촉매 환기장치의 오염물질 저감 실험

Experiment on Reduction of Pollutants in Titanium Dioxide Photocatalytic Ventilation System

송용우*

Yong Woo Song*

Abstract

In this study, titanium dioxide photocatalyst was applied to the ventilation system to reduce particulate matter and nitrogen oxides (NO_x), which are representative indoor harmful substances. A reaction device capable of installing an ultraviolet lamp was designed and manufactured so that the pollutant decomposition effect of the titanium dioxide photocatalyst identified through previous studies could be applied indoors. The reaction device was used on the indoor ventilation system and applied to the Mock-Up test. As a result of the Mock-up test, the NO_x reduction performance according to the change in air volume once per hour and five times per hour was confirmed. As a result, it was confirmed that as the number of ventilation increases, the NO_x reduction time decreases proportionally, and the reduction performance increases.

Keywords : TiO₂ Photocatalyst, NO_x, UV Lamp, Ventilation System, Mock-Up Test

1. 서 론

우리나라 초미세먼지(PM_{2.5})는 2015년부터 2018년까지 “나쁨” 농도(36~75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)가 연간 50~60일 정도 발생하고 있으며, 주로 1~3월, 11~12월에 발생하고 있다. 또한, WHO(2016)에 따르면 그 농도는 연평균 46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 해외 주요 국가 도시와 비교(도쿄: 28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 파리: 28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 워싱턴 DC: 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 하였을 때 2배 이상 높은 수준을 나타내고 있다. Park(2010)에 따르면, 초미세먼지(PM_{2.5})의 경우 입자의 크기가 매우 작아 사람이 흡입하면 폐 질환 등의 호흡기 질환을 유발할 수 있으며, 심할 경우 뇌 질환까지도 유발할 수 있는 것으로 알려져 있다.

이러한 초미세먼지 발생 원인은 다양하지만, Song et al.(2020)과 Kim et al.(2019)에 따르면, 도심지에서는 질소산화물(NO_x)과 황산화물(SO_x) 등의 물질이 대기 중에 존재하는 다른 이온물질과 결합하여 발현되는 것으로 나타난다. IQAir(2019)에 따르면 최근 도심지 건물에서 사람이 거주하는 시간은 일과 중 80% 이상을 차지하고 있어 질소산화물(NO_x)과 황산화물(SO_x)이 실내로 유입 시 재실자의 건강에 악영향을 줄 수 있다.

이처럼 대기 환경과 실내 공기 환경에 모두 악영향을 미치는 질소산화물(NO_x)과 황산화물(SO_x) 물질을 저감시키는 방법으로 이산화티탄(TiO₂) 광촉매가 존재하고 있으며, 해당 물질의 경우 자외선과

*중앙대학교 건축학부 박사 후 연구원(yongma0930@naver.com)

광화학반응을 통해 질소산화물(NOx)또는 황산화물(SOx)를 흡착하여 제거하는 성질을 갖고 있다 (Kitano et al., 2007; Jang, 2016). 하지만, 자외선의 실내 적용 한계로 인해 실내 적용 방안이 필수적이다.

따라서, 본 논문은 오염물질의 실내 유입 차단과 함께 실내로 유입된 오염물질 저감 효과를 함께 얻을 수 있도록 이산화티탄(TiO₂) 광촉매 실내 적용 방안을 마련하고 이를 실내 공기 순환과 청정에 활용되는 환기장치에 결합하여 실물모형(Mock-Up) 환기 회수에 따른 질소산화물(NOx) 저감 효과를 확인하고자 하였다.

2. 선행연구 검토

2.1 이산화티탄(TiO₂) 광촉매 공기 정화 효과

이산화티탄(TiO₂) 광촉매는 방오, 공기 정화, 항균, 탈취, 정수의 5가지 효과를 갖고 있다. 그중 본 연구에서는 이산화티탄(TiO₂) 광촉매의 공기 정화 효과를 활용하고자 하였으며, 해당 공기 정화 효과는 이산화티탄(TiO₂) 광촉매와 자외선의 광화학반응을 통해 얻을 수 있다. Ballari et al.(2010)와 Shayegan et al.(2018)에 언급된 해당 이산화티탄(TiO₂) 광촉매의 공기 정화 효과에 대한 반응식은 식 (1)과 같으며, 이를 도식화한 Fig. 1과 같다.

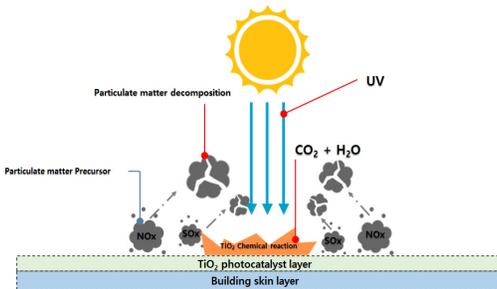
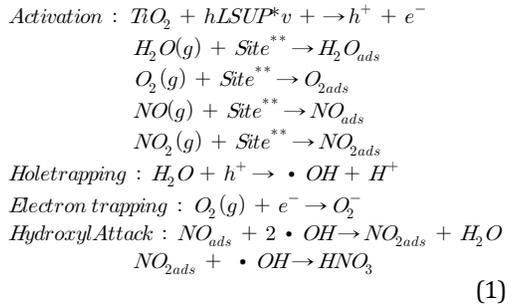


Fig. 1. Conceptual Diagram of TiO₂ Photocatalytic Reaction



식 (1)과 Fig. 1에 나타난 바와 같이 이산화티탄(TiO₂) 광촉매는 자외선과 광화학반응을 발생시켜 강력한 산화반응을 갖고 있는 수산화라디칼(·OH), 슈퍼옥사이드(O₂⁻)를 표면에 생성시키고 해당 표면에 접촉되는 오염물질을 흡착 또는 분해하여 오염물질을 제거하는 성질을 갖고 있다.

2.2 이산화티탄(TiO₂) 광촉매를 활용한 선행 연구 검토

이산화티탄(TiO₂) 광촉매를 사용한 기존 연구는 광촉매를 건축자재에 적용한 연구가 주로 이루어졌다. Luna et al.(2019)은 이산화티탄(TiO₂) 광촉매가 혼합된 Au-TiO₂/SiO₂코팅제를 건물에 적용하여 메틸렌블루 실험 방법을 통해 방오성능을 확인하였다. 또한, Nuño et al.(2015)은 광촉매를 나노화하여 코팅제에 혼합하여 이산화황(SO₂)과 반응 여부를 확인하였다. Janus et al.(2019)은 광촉매를 콘크리트에 적용하여, 대장균의 불활성화가 높아짐을 확인하여 항균 효과를 확인하였다. Guerrini et al.(2012)는 광촉매를 시멘트에 혼합하여 포장 블록, 아스팔트 및 콘크리트 도로에 적용할 경우 대기 공기 질 개선 효과를 얻을 수 있음을 확인하였다. Ao and Lee (2005)은 광촉매를 혼합하여, P25 광촉매와 일산화질소(NO), 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠 제거효율 비교를 하였다. 해당 연구는 X선 회절 분석법(XRD 분석)을 통해 습도가 높을수록 전체 오염물질 저감 성능에 영향을 미치는 것을 확인하였다. Hwang et al.(2011)은 공조시스템(HVAC) 덕트 내부에 삽입될 수 있는

광촉매 코팅 모듈을 원형, 마름모 기동형 등 형상으로 적용하였을 경우 전산유체역학분석(CFD 분석)을 통해 압력 변화 측면 연구를 진행하였다.

이처럼 이산화티탄(TiO₂) 광촉매 활용 선행 연구 검토를 통해 확인된 내용은 다음과 같다. 첫 번째로, 건축자재에 적용된 연구가 주로 이루어졌으며, 자외선 획득이 용이한 외부 환경에서 이루어진 것을 확인하였다. 두 번째로, 광촉매 특성인 표면에 산화력을 가진 물질 생성 효과를 극대화하고자 코팅제를 이용한 방식이 주로 이루어졌다. 마지막으로 이산화티탄(TiO₂) 광촉매의 특성을 검증하는 연구가 주로 이루어졌다. 해당 선행연구 고찰을 통하여 코팅제의 활용, 실내 환경에 효과적인 적용이 가능한 환기장치에 관한 연구는 부족한 것을 확인하였다.

3. Mock-Up 실험 방법 및 개요

3.1 이산화티탄(TiO₂) 광촉매 코팅제 적용 반응장치 제작

이산화티탄(TiO₂) 광촉매 코팅제의 실내 적용을 위해 자외선램프 활용이 가능한 반응장치를 제작하였다. 해당 장치는 기존 환기장치와 결합을 할 수 있는 구조로 설계되었다. 설계된 반응장치 모식도와 도면은 Fig. 2, Fig. 3과 같다.

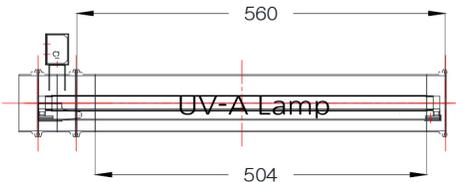


Fig. 2. Reactor Section

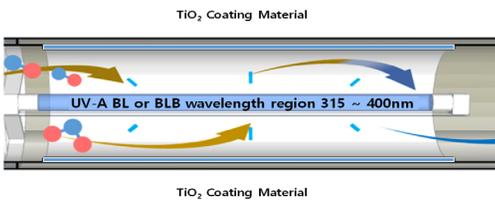


Fig. 3. Schematic Diagram of the Reactor

3.2 Mock-Up 실험 조건 및 개요

앞서 제작된 이산화티탄(TiO₂) 광촉매 코팅제 적용 반응장치를 환기장치에 결합하고 이를 활용한 실험물모형(Mock-Up) 실험 개요와 계통은 Table 1 및 Fig. 4, Fig. 5와 같다.

실험물모형(Mock-Up)을 활용하여 해당 실험물모형(Mock-Up)을 1회, 5회 환기되는 환기 횟수별 NO_x

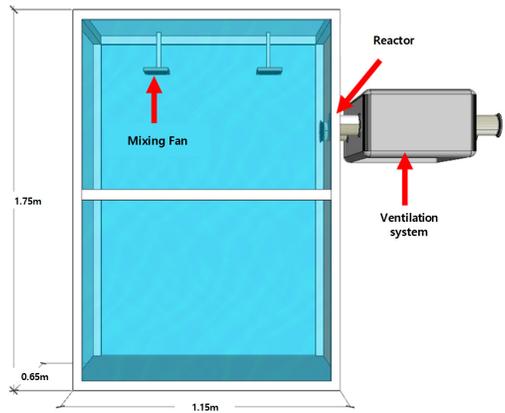


Fig. 4. Mock-Up Schematic Diagram

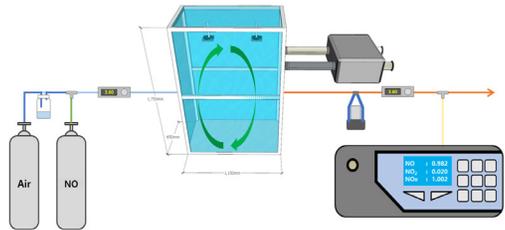


Fig. 5. Mock-Up Experimental Schematic

Table 1. Mock-Up Overview

Size (W × H × D) (m)	0.65 × 1.15 × 1.75
UV Irradiance	20 W/m ²
Temperature	25 ± 2.5°C
Humidity	50% ± 10%
Measurement Gas	Mixed NO & Air
Gas Concentration	1.00 ppm ± 10%
Measurement Interval	1 min
Number of Experiments	3 times

저감을 확인하고자 하였다. 적용된 환기 횟수는 시간당 0.5회를 적용하고자 하였으나, 환기장치 풍량 조절의 한계로 시간당 1회, 5회의 환기 횟수를 적용하였다. 5회전의 경우 실물모형(Mock-Up)을 순환하는 환기 횟수를 증가에 따라 저감 성능 변화 추이를 확인하고 환기 횟수 증가 폭이 낮음에 따라 발생할 수 있는 오차를 줄이고자 높은 환기 횟수로 적용하였다. 해당 환기 횟수 산정은 환기가 이루어지는 덕트 풍속으로 산정하여 적용하였다. 산출된 환기 횟수에 따른 풍속은 Table 2와 같다.

실험은 일반공기(Air)와 일산화질소(NO) 가스를 일정 비율로 혼합하여 실물모형(Mock-Up) 내부에 실험 종료까지 지속해서 주입하였다. 지속적인 주입에 따라 저감 농도와 저감률은 실험 시작 농도에서 최저 농도 값의 차이를 이용하여 산정하였다.

Table 2. Calculated Wind Speed According to the Number of Ventilation

Number of Ventilation	Wind Speed (m/s)
One turn per Hour	0.046 m/s
Five turns per Hour	0.23 m/s

4. Mock-Up 실험 결과

4.1 환기 횟수 1회 실험 결과

설계 및 제작된 반응장치를 환기장치와 결합하여 실물모형(Mock-Up)을 통한 질소산화물(NOx) 저감 실험을 하였다. 실물모형(Mock-Up) 체적을 시간당 1회 환기하였을 경우 질소산화물(NOx) 저감 결과는 Fig. 6 및 Table 3과 같다.

실물모형(Mock-Up)의 체적을 시간당 1회 환기하는 풍량을 적용한 실험 결과 광축매 환기장치를 통하여 약 5시간 30분 경과 후 질소산화물(NOx) 농도가 44.25%(0.432ppm)으로 저감되어 해당 농도 수준을 유지하는 것으로 나타났다.

Table 3. Mock-Up Test Result - 1 (Once per Hour Ventilation)

Contents	Values
Start Concentration (ppm)	1.008
Minium Concentration (ppm)	0.562
Reduction Concentration (ppm)	0.432
Reduction Rate (%)	44.25
Time to Reach Minimum Concentration (min)	330

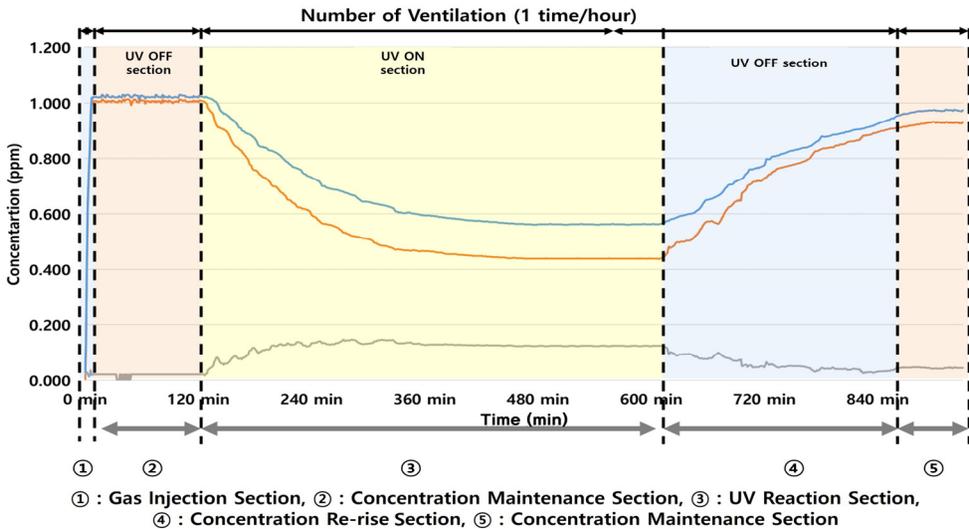


Fig. 6. Concentration Reduction Experiment Result Applied Once per Hour of Ventilation

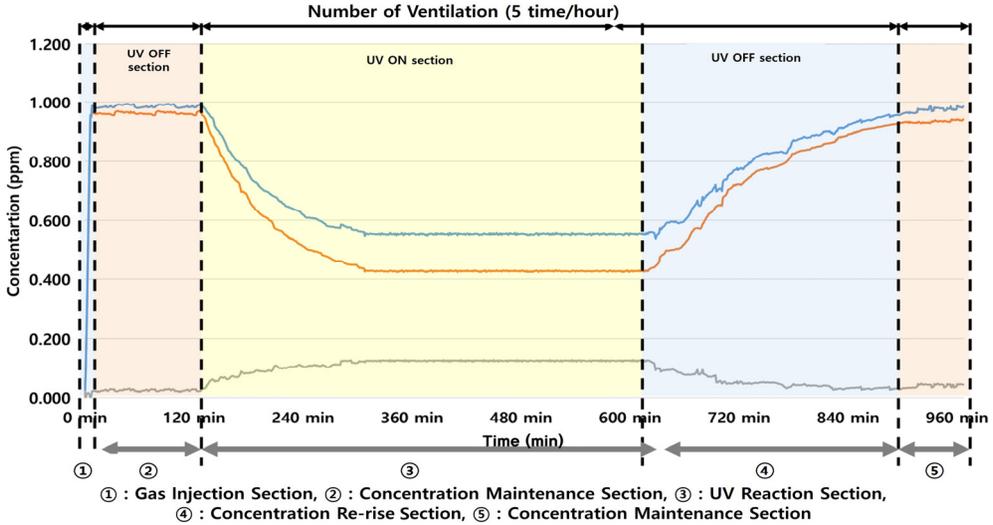


Fig. 7. Concentration Reduction Experiment Results Applied 5 Times per Hour of Ventilation

Table 4. Mock-Up Test Result - 2 (Five Times Hour Ventilation)

Contents	Values
Start Concentration (ppm)	0.986
Minium Concentration (ppm)	0.548
Reduction Concentration (ppm)	0.483
Reduction Rate (%)	44.42
Time to Reach Minimum Concentration (min)	70

4.2 환기 횟수 5회 실험 결과

시간당 실물모형(Mock-Up) 체적을 5회 순환하는 환기 풍량으로 증가시켜 질소산화물(NOx) 저감 성능 변화를 확인하였다. 이를 통해 실내 공기 순환이 증가할수록 질소산화물(NOx) 농도 저감 수준 변화를 확인하고자 하였으며, 실험 결과는 Fig. 7 및 Table 4와 같다.

실물모형(Mock-Up)의 체적을 시간당 5회 환기하는 풍량을 적용한 실험 결과 광촉매 환기장치를 통하여 70분 경과 후 질소산화물(NOx) 농도가 44.42% (0.483ppm)으로 저감되어 해당 농도 수준을 유지하는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구는 초미세먼지 원인 물질이며, 재실자 건강에 유해한 오염물질인 질소산화물(NOx)을 저감하고자 한 연구이다. 이를 위해 이산화티탄(TiO₂) 광촉매를 환기장치에 적용하여 실물모형(Mock-Up) 실험을 통해 그 효과를 확인하고자 하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 이산화티탄(TiO₂) 광촉매는 자외선과 광화학반응을 통하여 강력한 산화력을 갖고 있는 수산화 라디칼(\cdot OH), 슈퍼옥사이드(O₂⁻)를 생성시켜 오염 물질을 제거할 수 있다. 다만, 자외선은 실내 적용에 한계가 존재하여 본 연구에서는 자외선을 실내로 적용시킬 수 있는 반응장치를 설계 및 제작하였다.

둘째, 제작된 반응장치를 환기장치에 결합하여 실물모형(Mock-Up)을 통해 질소산화물(NOx) 저감 성능을 확인하였다. 환기 횟수 1회 적용 시 330분이 경과하면 최저 농도에 도달하였으며, 환기 횟수 5회를 적용하면 70분에 최저 농도에 도달하였다.

셋째, 환기 횟수 증가에 따라 오염물질 저감 시간은 비례하여 감소하는 것으로 나타났다. 이는 실물

모형(Mock-Up)을 순환하며 반응장치에 적용된 이산화티탄 광촉매와 오염물질의 접촉이 증가하여 얻을 수 있는 효과로 판단된다.

본 연구를 통해 이산화티탄(TiO₂) 광촉매 실내 적용 방안을 마련하였으며, 해당 방안을 활용한 오염물질 저감 효과를 확인하였다. 다만, 실험에 적용된 환기장치 풍량 조절의 한계로 실제 적용되는 환기 횟수에 따른 오염물질 저감 효과는 추가적인 실험을 통해 확인될 필요가 있다. 본 연구 결과가 향후 실내 오염물질 저감에 있어 이산화티탄 광촉매를 환기장치와 실내 마감 자재 등에 적용할 수 있는 기초 연구로 활용되기를 기대한다.

참고문헌

1. Ao, C. H. and S. C. Lee (2005), "Indoor Air Purification by Photocatalyst TiO₂ Immobilized on an Activated Carbon Filter Installed in an Air Cleaner", *Chemical Engineering Science*, 60(1): 103~109.
2. Ballari, M. M., M. Hunger, G. Hüsken and H. J. H. Brouwers (2010), "NO_x Photocatalytic Degradation Employing Concrete Pavement Containing Titanium Dioxide", *Appl. Catal. B*, 95: 245~254.
3. Guerrini, G. L., A. Beeldens, M. Crispino, G. D'Ambrosio and S. Vismara (2012), "Environmental Benefits of Innovative Photocatalytic Cementitious Road Materials", *In Proceedings of the 10th International Conference on Concrete Pavements*, Quebec City, QC, Canada, pp. 8~12.
4. Hwang, K. I., J. H. Koo, D. H. Kim, H. I. Lee and Y. G. Choi (2011), "A Numerical Analysis of the Pressure Drop according to the Shape of TiO₂ Photocatalyst-coated Module in a HV A C D uct", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 35(8): 1055~1062 (in Korean).
5. IQAir (2019), "2019 WORLD AIR QUALITY REPORT (Region&City PM2.5 Ranking)".
6. Jang, Y. K. (2016), "The Current Status and Problems of Particulate Matter Pollution", *Environmental Opinion Conference*, 58: 4~13 (in Korean).
7. Janus, M., E. Kusiak-Nejman, P. Rokicka-Konieczna, A. Markowska-Szczupak, K. Zajac and A. W. Morawski (2019), "Bacterial Inactivation on Concrete Plates Loaded with Modified TiO₂ Photocatalysts under Visible Light Irradiation", *Molecules*, 24(17): 3026.
8. Kim, H., J. J. Park and J. Kwark (2019), "Development of Construction Materials and Application Technologies for Particulate Matter Reduction Using Photocatalytic Materials", *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, 67(8): 87~89 (in Korean).
9. Kitano, M., M. Matsuoka, M. Ueshima and M. Anpo (2007), "Recent Developments in Titanium Oxide-based Photocatalysts", *Appl. Catal., A*, 325: 1~14.
10. Luna, M., M. J. Mosquera, H. Vidal and J. M. Gatica (2019), "Au-TiO₂/SiO₂ Photocatalysts for Building Materials: Self-Cleaning and De-Polluting Performance", *Building and Environment*, 164: 106347.
11. Nuño, M., G. L. Pesce, C. R. Bowen, P. Xenophontos and R. J. Ball (2015), "Environmental Performance of Nano-Structured Ca(OH)₂/TiO₂ Photocatalytic Coatings for Buildings", *Building and Environment*, 92: 734~742.
12. Park, J. H. (2010), "A Study on the Field Survey of the IAQ in the Child Care Center", Master's degree thesis, The Graduate School of Chung-Ang University (in Korean).
13. Shayegan, Z., C. S. Lee and F. Haghighat (2018), "TiO₂ Photocatalyst for Removal of Volatile Organic Compounds in Gas Phase-A Review", *Chemical Engineering Journal*, 334: 2408~2439.
14. Song, Y. W., M. Y. Kim, M. H. Chung, Y. K. Yang and J. C. Park (2020), "NO_x-Reduction Performance Test for TiO₂ Paint", *Molecules*, 25(18): 4087.
15. World Health Organization (2016), "Global Urban Ambient Air Pollution Database".

요 약

본 연구는 대표적인 미세먼지와 실내유해물질인 질소산화물의 저감을 위해 이산화티탄 광촉매를 환기장치에 적용한 것으로 그 내용은 다음과 같다. 기존 연구는 실내에 자외선 적용의 한계로 인해 주로 건축자재에 광촉매 혼입을 통해 실외 자재를 대상으로 진행되었다. 자외선 실내 적용 한계를 극복하고자 기존 선행연구를 통해 확인된 이산화티탄 광촉매의 오염물질 분해 효과를 실내에 적용이 가능하도록 자외선램프의 설치가 가능한 반응장치를 설계 및 제작하였다. 해당 반응장치를 실내 환기장치에 적용하여 Mock-Up에 적용하였다. Mock-Up 실험은 그 체적을 시간당 1회, 5회 환기하는 풍량을 변화시켜 NOx 저감 성능을 확인하였다. 그 결과, 환기 풍량이 증가함에 따라 NOx 저감 시간이 비례하여 감소되어 그 성능이 증가하는 것을 확인하였다. 해당 연구를 통해 오염물질 저감 효과를 가진 이산화티탄 광촉매의 실내 활용 방안과 그 성능을 확인할 수 있는 기초적인 연구 결과를 도출하였다.

주제어 : 이산화티탄 광촉매, 질소산화물, 자외선, 환기장치, 실물 실험
