

기술자료

# 광촉매 제품의 NO<sub>x</sub> 저감 성능 현장 평가 사례 고찰

## A Study on the Evaluation Method of NO<sub>x</sub> Removal Performance of Photocatalyst in Field

전혜준, 차진선<sup>1)</sup>, 윤성진, 이주형, 송민영\*

서울기술연구원 기후환경연구실, <sup>1)</sup>한국산업기술시험원 재료기술센터

Haejoon Chun, Jin Sun Cha<sup>1)</sup>, Seongjin Yun, Joohyoung Lee, Min Young Song\*

Department of Climate & Environmental Research, Seoul Institute of Technology, Seoul, Republic of Korea

<sup>1)</sup>Material Technology Center, Korea Testing Laboratory, Seoul, Republic of Korea

접수일 2021년 1월 12일  
수정일 2021년 2월 26일  
채택일 2021년 3월 31일

Received 12 January 2021  
Revised 26 February 2021  
Accepted 31 March 2021

\*Corresponding author  
Tel : +82-(0)2-6912-0936  
E-mail : mysong@sit.re.kr

**Abstract** The objective of this study is to review the evaluation method for NO<sub>x</sub> removal performance of photocatalytic products under ambient air condition. We analyze the methods for evaluating the status of NO<sub>x</sub> removal performance and consider further improvement plans. Previous researches on evaluation of photocatalytic products were collected through a literature review of public reports and research articles. We mainly focused on the photocatalytic product applications in field, and measurement method of NO<sub>x</sub> reduction under ambient air condition. Until today, the criteria for the verification of the NO<sub>x</sub> removal performance of the photocatalyst under ambient air condition are currently unclear, so there are various methods were used for evaluate the NO<sub>x</sub> removal efficiency. We classified three main methods for assessing the NO<sub>x</sub> removal performance of photocatalysts: (1) Direct evaluation method, (2) Indirect evaluation method, (3) Laboratory evaluation method. However, NO<sub>x</sub> reduction efficiency measured in field were highly variable and consideration of various environmental conditions, such as weather conditions and traffic are limited. Therefore, to set an appropriate evaluation method for the assessment of photocatalytic performance of NO<sub>x</sub> removal efficiency, efforts to reflect actual ambient air condition affecting photocatalytic performance and the deriving improvements are necessary.

**Key words:** NO<sub>x</sub> reduction, NO<sub>x</sub> removal efficiency, Photocatalyst, Photocatalytic products, Photocatalytic reaction

### 1. 서 론

광촉매 기술은 빛 에너지를 이용하여 화학반응을 촉진시켜 대기 중 오염물질을 제거하는 기술을 일컫는다. 광촉매 물질이 빛을 받아 생성된 전자와 정공은 산소나 물과 반응하여 슈퍼옥사이드(O<sub>2</sub><sup>-</sup>)나 하이드록실라디칼(OH·)을 생성하고, 생성된 하이드록실라디칼은 강력한 산화력으로 대기 중 각종 유기화합물을 탄소와 물로 분해하여 향균 및 탈취 등의 기능을 한다(Jeong *et al.*, 2010). 1972년 일본 후지시마(Fuji-shima)와 혼다(Honda)가 이산화티타늄(TiO<sub>2</sub>)을 이용하여 물이 수소와 산소로 분해되는 현상을 발견한

이후, 많은 연구자들에 의해 광촉매 기술에 대한 연구가 확대되어 왔고, 광촉매 재료 응용 및 광촉매 시장도 매년 성장했다(Ryu and Park, 2009). 광촉매 기술의 발달과 광촉매 재료 사용 범위가 확대됨에 따라 공기정화, 대기정화, 수질정화, 실내정화, 향균, 방오, 자외선 차단 등의 응용을 통한 광촉매 제품에 대한 관심도 높아지고 있다. 일반적으로 광촉매 기술은 질소산화물(NO<sub>x</sub>), 황산화물(SO<sub>x</sub>), 휘발성유기화합물(VOCs) 등 가스상 오염물질을 분해하여 초미세먼지 생성에 영향을 주는 오염물질을 사전에 제거하여 2차 미세먼지 생성 억제에 도움이 된다. 최근 이러한 광촉매 기술의 장점을 응용

하여 도로 및 도로시설물, 건축자재, 의료시설, 공기조화기기 등 다양한 분야에서 적용되고 있다. 도로 및 도로시설물에 광촉매 기술을 적용하는 경우 자동차에서 배출되는 유해가스 일부를 흡착 및 분해하여 대기오염 방지에 효과적일 것이며, 특히 도로시설물의 경우 비표면적이 넓으므로 광촉매 효율을 극대화할 수 있다는 장점이 있다(Kim *et al.*, 2014). 이에 이탈리아, 독일 등의 국가에서 대기오염물질 제거를 위하여 도로시설물에 광촉매 소재를 적용하고 있으며(Wang *et al.*, 2017; Bocci *et al.*, 2016; Chen and Chu, 2011) 시멘트의 일부를 치환하여 배합하는 방식으로 블록포장을 건설(Boonen and Beeldens, 2014)하는 사례가 늘고 있다.

한편 국내의 경우 광촉매 소재를 일부 시설물에 코팅하여 오염물질의 분해효과를 측정하는 기초연구가 대부분이며, 다양한 적용방안에 대한 검토와 NO<sub>x</sub> 제거효율에 관한 연구는 부족한 상황이다(Kim *et al.*, 2014). 또한 광촉매 제품의 성능검증에 대한 요구는 증가하지만, 현장 적용된 광촉매 제품의 NO<sub>x</sub> 분해 및 저감 성능을 정량적으로 분석할 수 있는 평가 방법이 부재하여 그 성능을 과학적이고 정량적인 방법으로 분석한 사례가 부족한 실정이었다(Kim *et al.*, 2020). 현재 미세먼지 전구물질인 NO<sub>x</sub>를 제거하고 친환경적 역할로 각광받는 광촉매 제품이 시범 시공되어 대기 중 NO<sub>x</sub> 저감 성능검증에 대한 요구가 증가하는 추세이지만, 이에 대한 명확한 평가 방법이 존재하지 않아 객관적 평가가 이루어지지 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 실제 광촉매 기술이 적용된 도로 및 도로시설물, 건축용 내/외자재를 포함한 다양한 광촉매 제품을 대상으로 수행된 NO<sub>x</sub> 저감 성능 평가 방법에 대해 폭넓게 분석하고, 객관적 성능검증을 위한 평가 방법 마련의 필수조건들에 대해 논하고자 한다.

## 2. 대상 및 방법

광촉매 기술과 관련하여 현재 상용화된 제품을 분류하고, 대기정화를 목적으로 한 광촉매 제품 현장 적

용 사례를 간단히 정리하였다. 또한 현재 다양하게 존재하는 현장 적용 광촉매 제품의 성능 평가 방법과 연구결과를 정리하였다. 광촉매 제품의 NO<sub>x</sub> 저감 성능 평가에 관한 국내외 연구결과는 2020년 12월 기준으로 현재까지 발간되어 Scopus와 Google 학술 검색 웹상에 등록된 연구논문을 대상으로 하였으며, 검색어는 “Photocatalyst”, “Photocatalytic reaction”, “Photocatalytic products”, “NO<sub>x</sub> removal efficiency”, “NO<sub>x</sub> reduction” 등을 조합하여 검색하였다. 특히 연구논문은 현장에서의 광촉매 제품 성능 평가를 위한 다양한 방법론에 중점을 두고 각 내용을 정리하였다.

## 3. 연구결과 및 고찰

### 3.1 광촉매 제품 및 현장 적용

#### 3.1.1 광촉매 제품 종류

광촉매 기술은 환경, 에너지 측면에서 대표적인 미래기술로 기술적 발전에 따라 수요가 급증하고 있다. 현재 광촉매 기술은 화장품, 햇빛 차단 크림 등 생활 제품과 코팅, 프린트 잉크, 플라스틱, 포장재 등 산업 제품 그리고 자연 세척 유리, 항박테리아 처리, 공기정화, 하수처리 등 화학제품 등에서 활용되고 있다. 특히 대표적인 광촉매 재료인 이산화티타늄(TiO<sub>2</sub>)은 유해물질을 산화 분해하는 기능을 이용하여 환경정화(환경오염을 제거, 항균, 탈취)를 위해 활용되거나, 초친수성 기능을 응용하여 셀프클리닝 효과가 있는 유리와 타일, 청소기, 공기청정기, 냉장고, 도로 포장, 커튼, 벽지 등 다양한 제품에 적용되고 있다.

대기 중 오염물질 분해를 위해 대기정화를 목적으로 광촉매 제품은 도로 및 도로시설물, 건축 외장형 자재에 활발하게 적용되고 있으며, 도로의 경우 광촉매 콘크리트 포장, 광촉매 코팅제 적용기술이 활용되고, 도로시설물의 경우 광촉매 보도블록, 광촉매 방음 및 흡음판, 지하 및 터널 구조물에 대한 광촉매 적용 기술 등이 활용된다. 건축 외장형 자재의 경우 광촉매 본래의 기능인 방오 효과 등을 포함하여 광촉매 페인

트, 건물 외장의 광촉매 코팅 기술 등에 적용 및 활용되고 있다.

### 3.1.2 광촉매 제품 현장 적용

도로 및 도로시설물에 광촉매 소재를 적용하기 위한 연구는 이탈리아(Bocci *et al.*, 2016; Guerrini, 2012; Active, 2009), 벨기에(Gallus *et al.*, 2015; Boonen and Beeldens, 2014; Beeldens, 2008), 미국(Hassan *et al.*, 2013; Sikkema, 2013) 등을 중심으로 1990년대부터 활발하게 진행되었다.

이탈리아 Bergamo의 Borgo Palazzo 거리에 약 500 m 길이, 7,000 m<sup>2</sup>의 규모로 광촉매 도로를 포장하였으며, 일반 도로와 비교하였을 때 광촉매 도로 포장 지점에서 NO<sub>x</sub> 농도가 20~30% 감소하는 것으로 보고된 바 있다(Active, 2009).

프랑스에서는 Vanves의 Rue Jean Bleuzen 거리에 300 m 길이로 일반 콘크리트 위에 광촉매 콘크리트를 포장하였고, 거리 옆 통행 보도에는 광촉매 보도블록을 총 6,000 m<sup>2</sup> 면적으로 포장하였다. 그 결과 NO<sub>x</sub> 농도가 기존과 비교하여 20% 이상 감소하였다(Active, 2009).

지하 및 터널의 오염물질 저감을 위하여 벨기에 Brussel의 Leopold II 터널의 벽과 천장(길이 160 m, 총 면적 약 2,700 m<sup>2</sup>)에 광촉매 코팅 작업을 진행하였으나, 광촉매 작용으로 인한 터널 내부 NO<sub>x</sub> 농도는 뚜렷한 감소를 나타내지 않았다(Gallus *et al.*, 2015). 이탈리아에서는 로마 터널 9,000 m<sup>2</sup> 면적을 대상으로 광촉매를 적용한 페인트 공사를 시행하였고, 터널 중앙에서의 NO<sub>x</sub> 저감효율은 약 23%였다(Guerrini, 2012). 이외 광촉매 제품 현장 적용 사례를 표 1에 정리하였다.

현재 현장 적용된 광촉매 제품에 대한 NO<sub>x</sub> 제거 성능 평가 방법은 규격화나 표준화가 이루어지지 않아 다양한 방법으로 평가가 이루어지고 있다. 광촉매의 NO<sub>x</sub> 제거 성능 평가를 위한 방법은 현장 직접 평가 방법, 현장 간접 평가 방법, 실험실 평가 방법으로 크게 총 세 가지로 분류할 수 있다. (1) 현장 직접 평가 방법의 경우 측정 및 분석기를 이용하여 현장에서 직접 NO<sub>x</sub> 저감효율을 측정하는 방법을 의미하고, (2) 현장

간접 평가 방법의 경우 현장에서 채취한 시험편 및 시료의 표면 성분 분석이나 질산염 측정 등을 통하여 간접적으로 NO<sub>x</sub> 저감량을 평가하는 방법이다. (3) 실험실 평가의 경우 특정 규격에 의거하여 광 반응기(챔버)와 일정 크기의 광촉매 제품 시험편을 이용한 제거 효율 및 성능 평가가 이루어진다. 현장 적용 광촉매 제품의 NO<sub>x</sub> 저감효율을 직접, 간접, 실험실 방법을 통해 평가한 사례와 연구내용을 순차적으로 정리하였다.

## 3.2 현장 직접 평가 사례

### 3.2.1 NO<sub>x</sub> 농도 측정기 이용

벨기에 Antwerp 지역의 연구에서는 NO<sub>x</sub> 농도 측정기를 이용하여 주차구역 현장에서 대기 중 NO<sub>x</sub> 농도를 측정하여 광촉매 제품의 NO<sub>x</sub> 저감 성능을 평가하였다(Beeldens, 2008). 2004~2005년 벨기에 Antwerp 지역의 주차구역(parking lane)에 광촉매 보도블록(paving blocks) 포장이 이루어졌다. 광촉매 보도블록의 규모는 총 10,000 m<sup>2</sup>였으며, 보도블록은 상단부에 광촉매 재료인 아나타제(Anatase)형 TiO<sub>2</sub> 혼합콘크리트가 5~6 mm 두께를 형성하고 있었다. 도로 총 폭은 60 m, 광촉매 보도블록 포장 구역은 2×4.5 m였다. 광촉매 보도블록과 일반 보도블록 간의 농도 비교를 위해 2006년 6월 9일, 3개 지점에서 각각 현장 측정이 이루어졌다. 3개 지점 중 두 지점은 광촉매 보도블록, 다른 한 지점은 비교 대상으로 일반 콘크리트 포장 블록으로 이루어졌다. 현장 측정은 지점당 1시간에 걸쳐 이루어졌으며, 도로 표면 5 cm 위에서 NO<sub>x</sub> 농도를 측정하였다. 시간당 차량 대수, 온습도, 조도를 포함한 각 지점의 세부 조건과 현장 측정 결과는 표 2와 같다. 1시간에 걸쳐 광촉매 보도블록의 표면 위 5 cm 떨어진 곳에서 대기 중 NO<sub>x</sub> 농도를 측정한 결과, 광촉매 보도블록 두 지점은 각각 약 0~0.05 ppm, 0.01~0.14 ppm의 농도 수준을 나타냈고, 일반 보도블록은 약 0.01~0.08 ppm의 농도 수준을 나타냈다. 일반 보도블록에서의 NO<sub>x</sub> 농도가 대체적으로 광촉매 보도블록보다 높았으나, (c) 광촉매 보도블록에서 0.14 ppm의 피크 값을 기록하는 시간대가 존재했다. 또한, (c) 광촉

**Table 1.** Application cases of photocatalytic product in field.

No.	Location	Site	Application type	NO <sub>x</sub> Conversion	Measurement conditions			Reference
					R.H.	Temp.	Vehicles/time	
#1	Aachen, Germany	Highway	Photocatalytic coating asphalt pavement	40%	60%	25~30°C	-	Wang <i>et al.</i> (2017)
#2	Loreto (Ancona), Italy	Highway	Photocatalytic cement pavement	41% (1 days) 26% (46 days) 1.76% (527 days)	Rainy days (25~69%)	7~16°C	19,300/daily	Bocci <i>et al.</i> (2016)
#3	Zhonghe, Taiwan	Highway	Photocatalytic coating	24~12%	-	-	-	Chen & Chu (2011)
#4	Louisiana, USA	Street	Photocatalytic asphalt, concrete pavement	≈ 30~70%	-	-	-	Hassan <i>et al.</i> (2013)
#5	Hengelo, Netherlands	Street	Photocatalytic coating	19% higher than control site	76%	10°C	110 ± 4/hour	Ballari & Brouwers (2013)
#6	Copenhagen, Denmark	Street	Photocatalytic coating	22% (in summer) 45% (Max)	Rainy days (≥ 50%) ≥ 10%	-	-	Folli <i>et al.</i> (2015)
#7	Wijnegem, Belgium	Street	Photocatalytic concrete pavement	27% (after 5 months) 48% (after 5 months) 34% (after 17 months) 20% (after 17 months, UV-lamp)	49% 52% 47% 48%	-	-	Boonen & Beeldens (2014)
#8	Lier, Belgium	Street	Photocatalytic cement pavement	12% 14% (UV-lamp)	53% 50%	-	-	Boonen & Beeldens (2014)
#9	Bergamo, Italy	Street	Photocatalytic paving blocks	26% (at 30 cm height) 18% (at 180 cm height)	-	-	-	Active (2009)
#10	Vanves, France	Street	Photocatalytic concrete pavement	20%	-	-	13,000/daily	Active (2009)
#11	Brussels, Belgium	Tunnel	Photocatalytic coating	≤ 2%	70~90%	Winter, January	-	Gallus <i>et al.</i> (2015)
#12	Rome, Italy	Tunnel	Photocatalytic paint coating	23%	15~40%	23~32°C	1,100/hour	Guerrini (2012)
#13	Guerville, France	Building	Photocatalytic cement pavement	37~82%	-	-	-	Maggos <i>et al.</i> (2008)
#14	Antwerp, Belgium	Parking lane	Photocatalytic paving blocks	20%	25~33%	25~32°C	1,332~1,620/hour	Beeldens (2008)

**Table 2.** Parameters of the measurement and NO<sub>x</sub> concentration of Antwerp (Beeldens, 2008).

	(a) Photocatalytic paving blocks	(b) Paving blocks (control)	(c) Photocatalytic paving blocks
NO <sub>x</sub> concentration	0~0.05 ppm	0.01~0.08 ppm	0.01~0.14 ppm
Relative humidity	33%	30%	25%
Temperature	25°C	26.6°C	32.4°C
Light intensity	12 W/m <sup>2</sup>	17 W/m <sup>2</sup>	25 W/m <sup>2</sup>
Vehicles/hour	1,332	1,494	1,620
Measurement time	10:32~11:32	11:41~12:41	14:10~15:10

**Table 3.** Average NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> ratio for all three campaigns (Gallus *et al.*, 2015).

Campaign	All data	Lamps on
(a) June 2011 (Pre-campaign)	$(3.08 \pm 0.06) \times 10^{-3}$	-
(b) September 2011 (TX)	$(3.20 \pm 0.04) \times 10^{-3}$	$(3.14 \pm 0.06) \times 10^{-3}$
(c) January 2013 (TX Boosted)	$(3.09 \pm 0.04) \times 10^{-3}$	$(3.10 \pm 0.05) \times 10^{-3}$

**Table 4.** Average NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> ratio from both sites for the two campaigns with photocatalytically active tunnel surfaces and with lamps on (Gallus *et al.*, 2015).

Campaign	Site 1 (upwind)	Site 2 (downwind)
(b) September 2011 (TX)	$(3.03 \pm 0.06) \times 10^{-3}$	$(3.14 \pm 0.07) \times 10^{-3}$
(c) January 2013 (TX Boosted)	$(3.18 \pm 0.08) \times 10^{-3}$	$(3.10 \pm 0.05) \times 10^{-3}$

매 보도블록 상대습도 조건이 (a) 광촉매 보도블록보다 낮음에도 불구하고 더 높은 NO<sub>x</sub> 농도를 기록했다. 현장 측정이 1시간이라는 짧은 시간에 이루어졌고, 각 측정 지점마다 온습도, 조도, 차량 대수를 포함한 여러 변수들의 영향이 있었기 때문에 정확한 NO<sub>x</sub> 저감률을 평가하기에는 한계가 있었다.

벨기에의 Brussel 지역에서는 터널 내부에서 광촉매 코팅 적용 전, 후에 따른 NO<sub>x</sub> 저감효율을 평가하였다 (Gallus *et al.*, 2015). 2011년 6월~2013년 1월 벨기에 Brussel 지역 Leopold II 터널의 벽과 천장(길이 160 m, 총면적 약 2,700 m<sup>2</sup>)에 두 종류의 다른 광촉매 시멘트 물질을 적용하였다. 2011년 70 m 구간의 벽과 천장에 광촉매 활성 모르타르를 코팅한 데 이어 2013년 1월에는 160 m(총면적 약 2,700 m<sup>2</sup>)까지 그 구간을 확장했다. 광촉매 반응은 자외선(UV, Ultraviolet rays, 파장 315~420 nm) 조명으로 조사해 활성화하였다. 광촉매 코팅에 따른 NO<sub>x</sub> 저감효율은 (1) 광촉매 코팅 전후 모

**Table 5.** Average NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> ratio at the downwind site 2 with lamps on or off for the campaign in January 2013 (Gallus *et al.*, 2015).

Data used	Lamps off	Lamps on
All data	$(3.09 \pm 0.06) \times 10^{-3}$	$(3.10 \pm 0.05) \times 10^{-3}$
Low WS (< 2 m/s)	$(3.25 \pm 0.10) \times 10^{-3}$	$(3.23 \pm 0.12) \times 10^{-3}$
High WS (> 2 m/s)	$(2.99 \pm 0.11) \times 10^{-3}$	$(2.95 \pm 0.15) \times 10^{-3}$

니터링(표 3), (2) 상향(upwind)/하향(downwind) 지점에서 모니터링(표 4), (3) 하향 지점에서 자외선 조명 가동/비가동 시 모니터링(표 5) 등 총 세 부분으로 나누어 평가되었다. 오염물질 수준은 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 대비 오염물질의 농도로 나타내어 평가되었다(오염물질/CO<sub>2</sub>). 측정은 총 3회에 걸쳐 이루어졌다(2011년 6월, 2011년 9월, 2013년 1월). 가스상 물질 측정 지점은 측정1 지점(상향방향)과 측정2 지점(하향방향) 두 군데이며, 2011년 6월과 9월에 천장 아래 각 33 cm, 20 cm 위치에서, 2013년 1월에는 천장 아래 각



34 cm, 44 cm 위치에서 측정되었다. 오염물질 농도 측정을 위한 샘플링 라인은 길이 7 m, 내경은 0.95 cm이며 PTFE (Polytetrafluoroethylene) 소재로 만들어졌다. 샘플링 라인은 제어실(control room)에서 여러 갈래의 유리관으로 연결되며 유리관에는 펌프가 연결된다. 2011년 현장 측정에서는 광촉매 적용 후 뚜렷한 NO<sub>x</sub> 저감 효과를 확인할 수 없었다. 연구자들은 몇 가지 문제점을 지적하였는데, 첫 번째로 기존 광촉매 적용 구간을 90 m로 계획했지만 70 m 길이의 터널 구간에서만 코팅이 적용되었다. 두 번째로 조도는 기존에 자외선-A (UV-A) 광원으로 1.6 W/m<sup>2</sup>의 세기로 조사할 예정이었지만 실제로는 0.6 W/m<sup>2</sup> 수준이었다. 따라서 2013년에는 터널의 광촉매 코팅 적용 구간 길이를 70 m에서 160 m로 늘리고, 광원의 세기도 더 높여 4 W/m<sup>2</sup>를 목표로 하였다. 또한 기존 제품(TX)보다 활성화가 더 잘 일어나는 코팅 제품(TX-Boosted)을 사용하였다. 주요 모니터링 결과는 다음과 같다. 광촉매 코팅 전 본래의 터널 오염물질 농도와 코팅한 이후의 NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> 비율을 비교하였다. 세 경우에서 (a) 코팅 전, (b) 70 m 구간 광촉매 코팅 후, (c) 160 m 구간 광촉매 코팅 후 NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub>의 비율은 거의 비슷했으며 광촉매 작용에 따른 유의미한 농도 변화는 나타나지 않았다.

광촉매 활성화에 따른 오염물질 저감 효과를 알아보기 위해, 자외선 조명을 켜고 끄는 때의 측정1 지점(상향방향)과 측정2 지점(하향방향)의 측정 결과를 비교하였다. 두 지점에서 NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> 비율을 확인한 결과 측정 지점에 따른 유의미한 농도 차이는 나타나지 않았으며, 측정2 지점(하향방향)에서 2011년  $3.14 \pm 0.07$ 이었던 값이  $3.10 \pm 0.05$ 로 약간 감소하는 경향을 보였지만, 감소량이 매우 적은 수준이었다.

2013년 측정2 지점(하향방향)에서 자외선 조명 꺼짐(광촉매 비활성화)과 켜짐(광촉매 활성화)에 따라 오염물질 농도를 측정하였다. 2013년 측정에서는 터널 구간이 길고, 자외선 강도도 높게 하여 광촉매 효과가 가장 잘 나타날 것으로 예상되었다. 따라서 이번 측정에서는 풍속 세기도 함께 고려하였다. 광촉매 활성 및 비활성 조건과 풍속에 따른 NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> 비율을

비교했을 때, 풍속 세기가 강하고 (>2 m/sec) 자외선 조명이 켜진 경우 NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> 비율이 가장 낮았다.

이 결과를 두고 연구자들은 다음과 같은 원인들을 분석했다. (1) 광촉매 코팅에 따른 광촉매 활성화 작용이 터널 구간 내 오염물질 농도에 미치는 영향을 알아본 결과 뚜렷한 감소 효과를 나타내지 않았으며, NO<sub>x</sub>의 감소는 약 2% 미만이었다. 이는 Leopold 2 터널 내부에서 심각한 광촉매 비활성화가 관찰되었는데 그 이유로는 조명 세기, 터널 내 오염, 상대습도, 바람 세기 등을 이유로 설명했다. (2) 조명 측면에서 자외선 조명이 2 W/m<sup>2</sup>로 목표 세기인 4 W/m<sup>2</sup>보다 낮았고, 오염된 터널 환경 내에서 적절한 광촉매 반응의 활성도가 이루어지기에는 너무 낮은 수준이었다. 풍속 측면에서는 터널 내부의 풍속이 강했기 때문에(최대 3 m/s) 오염물질을 터널 벽 혹은 천장에 흡착시키는 과정에 어려움이 있었다. 습도 측면에서는 2013년 1월 터널 내부는 춥고 습한 상태였고, 상대습도는 70~90%에 달해 광촉매의 활성도가 이루어지기 어려웠다. (3) 이들 변수의 문제점이 복합적으로 작용하여 Leopold 2 터널 내부의 광촉매 반응이 활발하게 이루어지지 않았고, 이론적 감소 기대치에 비해 1/10 수준이었다.

프랑스 Guerville 지역에서는 건축재료의 광촉매 성능을 평가하기 위하여 인공 거리를 조성하여 실제 환경 모사 조건에서 광촉매 저감효율을 평가하는 연구를 진행하였다(Maggos *et al.*, 2008). 컨테이너로 만든 4개의 연속 평행 건물을 사용하여 1:5의 크기로 3개의 협곡 거리를 세웠다. TiO<sub>2</sub> 함유 혼합 모르타르 패널을 20 m 인공벽에 설치하고, 다른 쪽에는 TiO<sub>2</sub>가 함유되어 있지 않은 동일한 재질의 패널을 설치하였다. 현장에 모니터링 시스템을 구축하고 해당 조건에서 광촉매 재료에 따른 NO<sub>x</sub> 제거 효율은 각 사이트에서의 NO<sub>x</sub> 농도 차이로 평가하였다. 길이 19.2 m, 직경 50 mm의 폐쇄형, 천공 파이프 분배기에 연결된 가스 배출원이 협곡을 따라 중앙에 설치되었으며, 가스 배출의 균일한 분포를 위해 구멍의 수와 직경을 선택(구멍 14개, 직경 5 mm)하였고, 가스 조성 및 속도 측정을 위해 파이프 앞부분과 가운데에 직경 12 mm의 구멍 2개

를 뚫었다. 휴대용 가스 분석기로 파이프 중간 구멍에서 NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>를 측정하고 휴대용 가스크로마토그래피로 벤젠 및 총휘발성유기화합물(TVOC, Total Volatile Organic Compounds)을 측정하였다. 양쪽 협곡 중심부에서 NO<sub>x</sub> 농도를 연속적으로 측정하였고, 배경 농도는 컨테이너 상부에서 측정하였으며, 풍향(WD), 풍속(WS), 온도(T), 상대습도(RH), 태양광강도 등 기상 변수도 측정하였다. 측정 기간은 2004년 7월 9일~9월 3일(TiO<sub>2</sub> 협곡: 7월 9일~8월 23일, 기준 협곡: 8월 23일~9월 3일), 동일 조건 형성을 위해 2차 측정 기간에는 북쪽 건물을 남쪽으로 이동시켜 형상을 변경하였다. NO<sub>x</sub> 농도 측정 결과는 다음과 같다. 각 측정 지점에서 NO<sub>x</sub> 농도에 영향을 미치는 풍속은 벽의 방향과 풍향(wind direction)에 따라 차이가 나타났다. 바람 권역(wind sector)과 NO<sub>x</sub> 농도 영향 관계를 확인한 결과, 두 변수 간에 유의미한 상관관계가 나타나지 않았다. 동일 권역에서 오른쪽 벽에서의 NO<sub>x</sub> 농도와 풍속이 음(-)의 상관관계를 보였으나 왼쪽 벽의 NO<sub>x</sub>에는 영향을 미치지 않은 것으로 확인되어 권역의 차이가 NO<sub>x</sub> 농도에 유의미한 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다. 이러한 결과를 바탕으로 NO<sub>x</sub> 저감효율의 차이는 오염원 배출량, 풍향, 벽 방향의 차이에 기인한 것으로 판단하였다.

### 3.2.2 이동형 광 반응기 이용

벨기에 Wijnegem 지역의 연구에서는 이동형 광 반응기를 이용하여 대기 중 NO<sub>x</sub> 농도를 측정하여 광촉매 제품의 NO<sub>x</sub> 저감 성능을 평가하였다(Boonen and

Beeldens, 2014). 2011년 3월 15~18일 광촉매 도로 포장 시행하였고, 이동형 광 반응기를 이용하여 도로 포장 표면에 NO<sub>x</sub> 저감효율을 평가하였다. 광촉매 도로 포장이 진행된 서로 다른 세 지점((a) point 1, (b) point 2, (c) point 3)을 대상으로 시간의 경과에 따른 NO<sub>x</sub> 농도를 측정하여 광촉매 콘크리트 포장의 특성 평가가 가능하도록 했다. 이동형 광 반응기는 plexiglas frame으로 구성되어 있으며, 콘크리트 포장 표면을 자외선 투과가 가능한 반응기로 덮어 즉각적으로 효율을 측정하는 방식이었다. 이동형 광 반응기의 조건은 NO 1 ppm, 상대습도 50%, 가스 유량 3 L/min 조건으로 설정하였고, 표면적은 700×300 mm<sup>2</sup>이며 광원으로는 가변의 햇빛이 사용된다. 표 6의 (a) point 1, (b) point 2는 광촉매 콘크리트 포장 5개월 후의 NO<sub>x</sub> 농도 변화 측정 결과이다. (a) point 1의 경우 상대습도가 50.8%일 때 NO<sub>x</sub> 저감률이 25%, 상대습도가 48%일 때 NO<sub>x</sub> 저감률이 28%로, 상대습도가 낮은 경우에서 NO<sub>x</sub> 저감률이 더 높게 나타났지만, (b) point 2의 경우는 두 번의 측정치 중, 상대습도가 낮을 때 NO<sub>x</sub> 저감률이 더 낮게 나타났다. (c) point 3에서는 10 W/m<sup>2</sup>의 자외선 조명과 자연광에서의 NO<sub>x</sub> 농도 비교 결과를 확인할 수 있다. 비교 결과 자외선 조명보다 자연광 조사 시 NO<sub>x</sub> 저감효율이 다소 높게 측정되었다. 이는 TiO<sub>2</sub>가 가시광 영역에서도 활성이 있거나 짧은 자외선 파장대(UV-B, UV-C)에서 활성화되었기 때문으로 판단할 수 있다. 이 연구를 통해 상대습도, 광원의 종류, 광원의 세기 등이 광촉매 활성에 영향을 미치는 주요 인자이며 콘크리트 혼합 제품인 양생제(Curing

**Table 6.** Parameters of the measurement and NO<sub>x</sub> reduction of Wijnegem (Boonen and Beeldens, 2014).

	(a) Point 1		(b) Point 2		(c) Point 3	
	5 months after		5 months after		17 months after	
NO <sub>x</sub> conc.	0.738 ppm	0.718 ppm	0.438 ppm	0.557 ppm	0.85 ppm	0.438 ppm
NO <sub>x</sub> reduction	25%	28%	54%	42%	20%	34%
Relative humidity	50.8%	48%	52.6%	51.5%	48%	46.8%
Light type	Sun light	Sun light	Sun light	Sun light	UV-A	Sun light
Light intensity	10.0 W/m <sup>2</sup>	10.0 W/m <sup>2</sup>	6.0 W/m <sup>2</sup>	5.9 W/m <sup>2</sup>	10.0 W/m <sup>2</sup>	7.9 W/m <sup>2</sup>
Curing	Without curing compound		With curing compound		Without curing compound	

compound)의 사용 여부에 따라서도 광촉매 활성이 달라지는 것을 확인할 수 있다.

### 3.2.3 Sampling pipe 이용

미국 Louisiana 지역의 연구에서는 직접측정법과 간접측정법으로 광촉매 콘크리트 포장 후의 NO<sub>x</sub> 저감효율을 평가하였다(Hassan *et al.*, 2013). 2010년 12월 20일 미국 Louisiana State University 캠퍼스 내부 콘크리트에 광촉매 스프레이 코팅 작업을 진행하였다. 직접측정법으로 NO<sub>x</sub> 농도를 확인하기 위해 파이프를 광촉매 스프레이 코팅 부분에 위치시킨 후 그 농도를 측정하였다. NO<sub>x</sub> 농도 측정을 위한 분석기는 포장 도로 중간 차로의 스테인리스강(stainless steel) 천공 파이프에 연결되어 광촉매 포장 부분의 농도를 측정하였다. 직접측정법으로 NO 농도를 확인한 결과, TiO<sub>2</sub> 적용 전과 후로 나누어 약 8일간 측정 데이터를 비교하였으며 그 결과는 표 7에 나타났다. 그 결과, TiO<sub>2</sub>로 표면 코팅을 적용한 후 즉각적으로 NO 농도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 풍속, 차량 형태, 습도, 온도 등 현장의 다양한 변수에 영향을 받아 요일별 측정 결과값의 편차가 크게 나타났다.

## 3.3 현장 간접 평가 사례

### 3.3.1 Passive sampler 이용

미국 Missouri주의 연구에서는 광촉매 도로 포장에 이루어진 고속도로의 방음벽에 passive sampler를 설치하여 NO<sub>x</sub>의 농도 변화를 확인했다(Sikkema, 2013). Missouri주 Chesterfield에 위치한 길이 1,500 ft(약 457 m), 너비 38 ft(약 11 m)의 고속도로 면적 57,000 ft<sup>2</sup>(약 5,300 m<sup>2</sup>)에 광촉매 도로를 포장하였다. 측풍(cross wind) 영향에 따른 NO<sub>x</sub> 희석을 완화하기 위하여 벽면에 방음벽을 설치하였고, 방음벽에 수동 채취기(passive sampler)를 부착하였다. NO 및 NO<sub>x</sub> 배경 농도 모니터링을 위한 수동 채취기는 대기 중 오염물질이 샘플러 본체 내의 종이 디스크에 흡착되고 산화제 및 TEA(triethanolamine)로 코팅되어 있는 디스크는 NO<sub>x</sub>를 포집한다. 이후 물에 용해시켜 아질산염(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)을 분석하였다. 측정 위치(높이)에 따른 NO<sub>x</sub> 저감 효과를 알아보기 위하여, 12 inch(약 30 cm) 위에 3개, 40 inch(약 100 cm) 위에 3개의 샘플러를 설치하였다. 약 30 cm 높이에서의 NO<sub>x</sub> 및 NO 평균 농도 결과값을 보면(표 8), #1를 제외한 #2~#6에서 모두 광촉매 포장

**Table 7.** Parameters of the measurement and NO<sub>x</sub> reduction of Louisiana (Hassan *et al.*, 2013).

	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5	Day 6	Day 7	Day 8
NO concentration before coating (ppb)	15	10	7	22	26	38	32	33
NO concentration after coating (ppb)	5	5	2	3	4	7	7	6
NO <sub>x</sub> reduction (%)	66.7	50.0	71.4	86.4	84.6	81.6	78.1	81.8

**Table 8.** NO<sub>x</sub> concentration of passive samplers in photocatalytic and control test sections (above 30 cm) (Sikkema, 2013).

Period	Photocatalytic			Control		
	NO <sub>x</sub> conc. (ppbv)	NO conc. (ppbv)	Num. obs.	NO <sub>x</sub> conc. (ppbv)	NO conc. (ppbv)	Num. obs.
#1 May 14~June 14, 2012	7.9±0.57	0.92	2	9.9±1.0	5.5	3
#2 June 14~July 13, 2012	14±0.88	6	3	2.1±1.2	1.8	2
#3 July 13~Aug 1, 2012	32±0.18	20	9	28±1.1	17	7
#4 Aug 1~Aug 14, 2012	32±0.21	20	9	28±1.1	17	7
#5 Aug 14~Sep 18, 2012	17±3.6	3	5	17±1.6	4.8	9
#6 Sep 18~Oct 10, 2012	37±3.3	16	8	32±1.8	14	9



**Table 9.** NO<sub>x</sub> concentration of passive samplers in photocatalytic and control test sections (above 100 cm) (Sikkema, 2013).

Period	Photocatalytic			Control		
	NO <sub>x</sub> conc. (ppbv)	NO conc. (ppbv)	Num. obs.	NO <sub>x</sub> conc. (ppbv)	NO conc. (ppbv)	Num. obs.
#1 July 13~Aug 1, 2012	25 ± 1.3	13	9	27 ± 2.6	16	6
#2 Aug 1~Aug 14, 2012	32 ± 0.42	19	9	28 ± 1.3	17	6
#3 Aug 14~Sep 18, 2012	17 ± 1.5	6.5	8	17 ± 2.1	5.2	9
#4 Sep 18~Oct 10, 2012	35 ± 4.6	15	9	35 ± 1.8	15	9

**Table 10.** Nitrate concentration (mg/L) of treated/untreated section and NO removed concentration (Hassan *et al.*, 2013).

	Nitrate concentration (mg/L), NO removed (ppm)						
	1	2	3	4	5	6	7
Treated section (mg/L)	0.06	0.06	0.08	0.16	0.16	0.16	0.17
Untreated section (mg/L)	0.02	0.03	0	0.01	0.01	0.01	0
NO removed (ppm)	0.02	0.025	0.03	0.06	0.06	0.06	0.07

지역의 NO<sub>x</sub> 농도값이 더 높게 측정되었으며, NO 농도의 경우에도 #1, #5를 제외한 나머지의 경우에 광촉매 포장 지역에서 고농도 현상을 보였다. 약 100 cm 높이에서의 NO<sub>x</sub> 평균 농도(표 9)는 #2, #4에서 광촉매 포장 지역의 농도가 비포장 지역에 비해 높게 나타났으며, NO의 평균 농도는 #2, #3의 경우에 광촉매 포장 지역의 농도가 비포장 지역에 비해 높게 나타났다. 약 30 cm, 약 100 cm 높이에서의 전체 평균 NO<sub>x</sub> 농도는 각각 23.3 ppb, 27.3 ppb로 측정 위치에 따른 농도 차이는 크게 나지 않는 수준이었다.

### 3.3.2 표면 부산물 분석

미국 Louisiana 지역의 연구에서는 광 분해 과정에서 생성된 부산물을 측정하여 간접적으로 평가하는 방법을 적용하여 도로 표면의 질산염 농도를 분석하였다(Hassan *et al.*, 2013). 질산염의 농도는 총 6개 지점에서 측정하였으며 코팅 위치 3곳, 코팅되지 않은 위치 3곳으로 지정하였다. 포장 표면에 축적된 질산염은 탈 이온수(DI)에 용해시켜 측정하였다. 질산염 채취(sampling)를 위해 100 × 150 mm 직사각형 목재 장치의 밀봉된 개구부에 40 m의 탈 이온수를 붓고 5 분 후 주사기를 통해 용액을 수집한 후 폴리에틸렌 병

의 0.45 μm 필터를 통해 여과하였다. 7일간의 간접측정을 통해 측정된 질산염 농도와 계산식을 통한 NO 농도 환산 결과는 표 10과 같다. TiO<sub>2</sub> 코팅처리 구역에서의 NO 저감 효과를 뚜렷하게 확인할 수 있다. 광촉매 반응은 처음 4일간 매우 활성화된 후 NO<sub>x</sub>의 분해 속도가 약간 감소하는 것으로 나타났다. 이는 광촉매 표면에 질산염이 축적되어 활성 부위가 감소하였기 때문인 것으로 판단된다.

$$V_{contaminant} = \frac{Mass_{contaminant}}{M \cdot W_{contaminant}} \times 8.3144 \times T_{air} \times \frac{1}{P_{air}} \quad (1-1)$$

$V_{contaminant}$ : Volume of contaminant (L)

$Mass_{contaminant}$ : Mass of contaminant (g), (mol → g)

$T_{air}$ ,  $P_{air}$ : Temperature (K) and Pressure (kPa) of air

## 3.4 실험실 평가 사례

### 3.4.1 광 반응기 및 내구성 실험 장치 이용

독일 Aachen 지역의 연구에서는 광촉매의 NO<sub>x</sub> 성능을 평가하는 규격인 ISO (International Standard Organization) 22197-1 시험법에 따라 광 반응기를 이용, 내구성 평가를 위한 실험장치를 이용하여 광촉매

아스팔트의 NO<sub>x</sub> 저감 성능을 평가했다(Wang *et al.*, 2017). 입자 크기가 15 nm이고 표면적은 90 m<sup>2</sup>/g인 아나타제형 TiO<sub>2</sub> 입자가 포함된 골재를 표면 코팅 방법과 필링 방법 등 두 가지 서로 다른 공정을 통하여 준비했다. 코팅 방법은 골재 표면에 TiO<sub>2</sub>를 코팅하는 방법으로, 드럼통에서 골재, 시멘트, 물 그리고 4 M% TiO<sub>2</sub>가 함께 회전하면서 골재 표면이 TiO<sub>2</sub>로 코팅되는 과정을 거쳤다. 필링 방법은 골재 기공에 TiO<sub>2</sub>가 침투되어 채워지는 방법으로, 기공 비율이 약 25%인 다공성 현무암이 사용되었다. 코팅 방법과 필링 방법을 통하여 준비된 TiO<sub>2</sub> 변형 골재를 도로 위의 에폭시에 결합하였으며 결합 과정에서 포장 기계와 롤러를 사용하였다. 아스팔트 도로 표면은 우선 에폭시 레진으로 코팅한 후, 2~5 mm 크기의 TiO<sub>2</sub> 변형 골재를 그 위에 도포하였다. 도로에 적용되는 광촉매 골재이기 때문에 타이어 아래에서 건디는 내구성 평가가 필요하며, 내구성 평가는 실험실 내 내구성 평가 실험 장치를 이용하여 진행되었다. 실험에 사용되는 타이어는 직경이 225 mm였으며 시험편 위에 타이어가 하중을 가하며 지나가는 방식으로 실험이 진행되었다. 타이어에 가해지는 압력은 0.2 MPa이고, 무게는 200 kg이었다. 실험은 총 300분간 진행되었다. 내구성 평가 전, 후의 NO<sub>x</sub> 저감효율 평가는 ISO 22197-1 규격의 광 반응기를 이용하여 진행되었다. 실험 결과를 살펴보면 내구성 평가 실험 전, 코팅 방법과 필링 방법 두 경우 모두 약 40% 수준의 저감효율을 나타냈다. 그러나 내구성 평가 실험 후, 저감효율이 급격히 낮아져 코팅 방법에서 약 10%, 필링 방법에서 약 15% 수준의 저감효율을 나타냈다.

### 3.4.2 광 반응기 이용

이탈리아 Loreto 지역의 연구에서는 Italian standard 11247 방법에서 사용되는 광 반응기와 시험편을 이용하여 고속도로에 적용된 광촉매 제품의 NO<sub>x</sub> 저감 성능을 평가했다(Bocci *et al.*, 2016). 광촉매 제품이 적용된 도로 표면 상단층은 다공성 아스팔트 콘크리트로 Bitumen이 4.8% 함유되어 있다. 광촉매 제품은 총 두 가지 방식으로 적용되었는데, 첫 번째는 서로 다른 제품 A, B를 사용하여 TiO<sub>2</sub>가 함유된 이물질 형태의 스프레이를 분사하는 방식이고 두 번째 방식은 또 다른 제품 C를 사용하여 TiO<sub>2</sub>가 함유된 시멘트 모르타르를 붓는 방식이다. 실험 기간 중 도로를 통과한 차량 대수를 세었으며, 그 결과 하루에 통행하는 차량 대수는 약 19,300대였다. 그 외 측정 기간 사이의 기상 조건은 표 11과 같다. 광촉매 제품의 저감효율 평가는 제품 적용 1, 17, 46, 88, 218, 527일 후에 각각 진행되었으며, NO<sub>x</sub> 저감 성능을 평가하는 Italian standard 11247 방법에서 사용되는 유리챔버로 구성된 광 반응기를 활용하였고, 시험편은 반응기 바닥 쪽에 위치한다. 실험조건으로 반응기 내부에 노출된 표면적이 69.4 cm<sup>2</sup>, 자외선 램프의 파장은 300~400 nm, 평균 조도는 25 ± 1 W/m<sup>2</sup>이다. 암조건에서 일정한 농도인 C0를 측정하고, 광조사 조건에서의 농도인 C1을 기록한다. C0과 C1의 차이를 이용하여 NO 저감률을 구하고, 오염물질 농도와 조도에서 일정한 α 상수값인 10.4 mg/m<sup>3</sup>h를 이용하여 시간당, 표면당 NO 저감량을 구하였다.

현장 측정 결과는 표 12에서 확인할 수 있다. 광촉매 적용 1일 후에는 이물질 형태의 스프레이 분사 방식인 제품 A와 제품 B를 사용한 경우 저감률이 40%

**Table 11.** Parameters of the measurement of Loreto (Wang *et al.*, 2017).

Interval no.	No. of rainy days	Percent of rainy days (%)	Mean temp (°C)
1 (between 1st and 2nd sampling)	7 on 17	41	16.4
2 (between 2nd and 3rd sampling)	16 on 29	55	13.3
3 (between 3rd and 4th sampling)	29 on 42	69	7.4
4 (between 4th and 5th sampling)	47 on 130	36	9.3
5 (between 5th and 6th sampling)	78 on 309	25	14.7

**Table 12.** NO<sub>x</sub> removal efficiency of Loreto (Wang *et al.*, 2017).

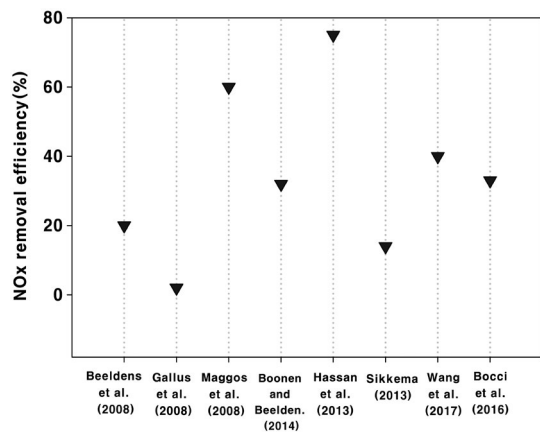
t (days)	Product A		Product B		Product C	
	$\eta$ NO <sub>mean</sub> (%)	SD	$\eta$ NO <sub>mean</sub> (%)	SD	$\eta$ NO <sub>mean</sub> (%)	SD
1	38.44	2.92	40.61	3.35	23.27	2.53
17	22.38	2.45	28.72	2.66	1.9	0.16
46	18.76	1.7	25.93	3.13	0.44	0.15
88	7.6	0.49	4.21	0.54	1.01	0.21
218	6.59	0.3	1.91	0.08	2.72	0.29
527	1.77	0.11	1.76	0.11	0.49	0.09

가까이 되었으며, 시멘트 모르타르 적용 방식인 제품 C는 저감률이 25% 정도였다.

### 3.5 광촉매 제품 현장 성능 평가 고찰

그림 1은 현재까지 수행된 연구를 바탕으로 현장 적용 제품의 평균적인 광촉매 NO<sub>x</sub> 저감효율 측정 결과를 정리하였다. 광촉매 제품의 종류와 현장 측정 당시 외기 조건의 차이가 존재하기는 하지만, 연구 결과를 종합한 결과 광촉매 제품의 성능 측정값이 큰 폭으로 차이를 보였다.

광촉매 제품 적용 후에 NO<sub>x</sub> 저감효율이 약 80%로 높게 측정된 경우도 있었지만 (Hassan *et al.*, 2013), NO<sub>x</sub> 저감 성능이 거의 나타나지 않은 경우도 존재했다. 광촉매 제품의 도로 포장 후 NO<sub>x</sub> 저감 성능이 나타나지 않은 이유에 대하여 연구자들은 (1) 콘크리트 표면의 Ca(OH)<sub>2</sub>가 대기 중의 CO<sub>2</sub>와 반응하여 CaCO<sub>3</sub>를 형성, TiO<sub>2</sub> 및 광촉매 활성 부위를 덮었기 때문, (2) 성능 평가 해당 지역의 상대습도가 약 70%로 높아 오염물질의 산화력이 감소, (3) 차량 통행에 따른 오염물질 배출의 영향, (4) 도로의 기존 오염물질의 영향, (5) 콘크리트 혼합물 교반 시 과도한 진동으로 밀도가 높은 TiO<sub>2</sub> 침전 등의 영향인 것으로 판단했다 (Sikkema, 2013). 터널에 광촉매 코팅을 적용한 후 NO<sub>x</sub>의 감소가 2% 미만이었던 한 연구에서, 광촉매에 따른 오염물질 제거 성능이 발휘되기 위해서 (1) 먼지 흡착을 최소화하는 낮은 표면의 거친 기판 사용, (2) 10 W/m<sup>2</sup> 정도의 높은 자외선 조명 세기 유지, (3) 광촉매 활성 표면적을 높게 유지, (4) 오염물질의 반응 시간 증가를

**Fig. 1.** Results of NO<sub>x</sub> removal efficiency in previous studies.

위한 약한 세기의 풍속 유지, (5) 낮은 상대습도 (60% 이하) 등의 필요 조건을 충족해야 한다고 설명했다 (Gallus *et al.*, 2015).

위의 연구 결과를 통해 알 수 있듯이 촉매 활성이 제대로 이루어지고, 오염물질 저감 성능을 정확하게 평가하기 위해서는 현장 외기 조건에서 광촉매 활성에 영향을 주는 인자들에 대한 고려가 필수적이다. 광촉매 제품의 NO<sub>x</sub> 저감 효과는 촉매 자체의 종류, 결정 상태, 비표면적, 기공크기, 입자 크기 등 광촉매의 특성에 따라 달라질 수 있다. 또한 측정 당시 영향을 주는 조건으로는 날씨, 외기온도, 상대습도, 광원 종류·세기·파장, NO<sub>x</sub> 초기농도 등 다양한 요인에 따라 다르게 나타날 수 있으며 이러한 영향인자 간의 상호작용에 의해 광촉매의 오염물질 저감효율이 달라지기도 한다. 광촉매 종류, 적용량, 외기 조건 등의 조건이 모

두 동일하다고 하더라도 광촉매 적용 공간의 밀폐 여부, 측정 거리 및 위치 등에 따라 성능 차이가 크게 나타날 수 있다. 객관적인 광촉매 성능 평가 방법을 마련하기 위해서는 실제 광촉매를 적용하는 환경에서의 변수들을 파악하고, 이러한 변수들의 변화에 따른 활성도 예측이 가능해야 한다. 또한 현재의 성능 평가 방법은 모두 제각각이고 통일되지 않아 정확한 성능을 나타냈다고 판단하기 어려운 경우가 대부분이고, 획일화되지 않은 방법으로 특정 일자 및 시간에서만 측정이 이루어지기 때문에 측정 효율값이 광촉매 제품의 전체 성능을 대표하기에 한계가 있다.

따라서 광촉매 성능 평가 연구는 실험실 단위부터 실증 현장까지 성능 평가 방법에 대한 일관된 프로토콜 확립이 중요하고, 정확한 광촉매 제품의 성능 평가를 위해 광촉매 성능에 영향을 미치는 영향인자들을 분석하고, 실제 대기환경 조건의 특성을 반영하여 객관적이고 과학적인 오염물질 저감 성능 평가 방법을 마련하기 위한 연구가 필요하다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 현재까지 광촉매 제품 적용 후, 대기 중 NO<sub>x</sub> 저감 성능의 평가를 위한 방법을 분류하고 관련 연구 사례를 종합적으로 정리하였다. 여러 연구에서 광촉매의 NO<sub>x</sub> 저감효율을 파악하기 위해 현장에서 직접 또는 간접 방법으로 대기 중 NO<sub>x</sub> 저감량을 측정하였지만 현장 평가와 관련한 규격화 및 표준화된 시험법이 존재하지 않아 평가 방법이 제각각이고 통일되지 않았다. 광촉매 제품이 적용되는 현장은 온도, 광원 종류 및 세기, 상대습도, 유량, 유속 등을 포함하여 광촉매 성능에 영향을 미치는 변수들이 다양하게 존재한다. 이러한 이유로 많은 연구 사례들에서 광반응에 대한 일관적인 경향성을 찾기가 어려웠다. 광원의 종류에 따라 NO 저감률이 20~34% 범위로 차이가 나고(Boonen and Beeldens, 2014), 내구성이 감소함에 따라 40%에서 15% 수준으로 NO 저감률이 감소

하기도 했으며(Wang *et al.*, 2017), 습도가 높고 온도가 낮아 NO<sub>x</sub> 저감률이 거의 나타나지 않은 경우도 있었다(Gallus *et al.*, 2015). 실험실 평가의 경우 광반응기와 광촉매 제품 시험편을 이용하여 제거효율 및 성능 평가가 이루어졌다. 실험이 진행되는 동안 NO<sub>x</sub> 초기농도, 온도, 습도, 광원 종류 및 강도, 가스 농도 및 유량 등이 일정 수준으로 유지되기 때문에 재현성 있는 결과 도출이 가능하다. 하지만 다양한 변수가 존재하고 변동성이 강한 현장 영향인자들의 특성을 반영하지 못하여 실제 제거 효율을 잘 평가했다고 판단하기에 한계가 있다.

국내의 경우에도 광촉매 소재를 도로시설물에 코팅하여 오염물질 분해 효과를 검증하는 기초연구가 수행된 바 있으나, 실제적인 NO<sub>x</sub> 제거효율 검증에 관한 연구는 부족한 실정이다(Kim *et al.*, 2014). 국내외 광촉매 소재 시장의 규모는 지속적으로 성장할 것으로 전망되며, 광촉매 제품의 유통량이 증가함에 따라 대기 중 오염물질의 저감 성능 검증을 요구하는 사례가 증가하고 있다. 따라서 실제 외부환경에 광촉매 제품을 적용하는 경우 발생할 수 있는 다양한 영향인자에 대한 검토와 객관적 성능검증을 위한 방법론적 연구가 필요하다. 대기 중의 NO<sub>x</sub> 저감 성능 분석을 위해 외부환경에서 광촉매 제품의 NO<sub>x</sub> 저감 성능을 직접 측정하는 경우 실제 대기 조건이 반영되어 있고, 현장 내구성이 고려된 결과 도출이 가능하다. 그렇지만 현장의 기상 여건, 교통량 등 다양한 외부 영향과 환경적 조건은 변동성이 강해 결과의 신뢰성, 재현성 측면에 문제가 생기게 된다.

따라서 광촉매 제품의 NO<sub>x</sub> 제거 성능의 객관적 평가 방법 마련과 재현성, 신뢰성 높은 결과 도출을 위해서는 (1) 광촉매 성능에 영향을 미치는 영향인자에 대해 분석하고, (2) 기존 성능 평가 반응기의 검토를 통하여 문제점을 보완하고 개선점을 도출, (3) 성능 평가 반응기에서 실제 대기환경 조건 반영에 대한 고려가 필요하다. 또한 현장 특성에 따라 외기 조건의 변동성이 크고 광촉매 제품의 성능 측정 결과가 크게 차이날 수 있는 점을 고려하여 영향인자에 대한 가능

한 모든 활성을 예측하고, 객관적 평가방법 마련을 통하여 광촉매 제품의 성능 오차를 줄이려는 노력을 해야 한다.

## 감사의 글

본 연구는 서울기술연구원(과제번호: 2020-AE-002, 광촉매의 대기 중 NO<sub>x</sub> 제거 성능 평가방법 마련 연구)과 2021년도 서울특별시의 재원으로 수행된 연구(No. 2021-IN-01)입니다.

## References

- Active, T. (2009) The Photocatalytic Active Principle TECHNICAL REPORT. Italcementi Group.
- Ballari, M., Brouwers, H. (2013) Full scale demonstration of air-purifying pavement, *Journal of Hazardous Materials*, 254, 406-414. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.02.012>
- Beeldens, A. (2008) Air purification by pavement blocks: final results of the research at the BRRC. <https://lirias.kuleuven.be/retrieve/40247>
- Bocci, E., Riderelli, L., Fava, G., Bocci, M. (2016) Durability of NO oxidation effectiveness of pavement surfaces treated with photocatalytic titanium dioxide, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41(12), 4827-4833. <https://doi.org/10.1007/s13369-016-2168-5>
- Boonen, E., Beeldens, A. (2014) Recent photocatalytic applications for air purification in Belgium, *Coatings*, 4(3), 553-573. <https://doi.org/10.3390/coatings4030553>
- Chen, M., Chu, J.-W. (2011) NO<sub>x</sub> photocatalytic degradation on active concrete road surface—from experiment to real-scale application, *Journal of Cleaner Production*, 19(11), 1266-1272. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.03.001>
- Folli, A., Strøm, M., Madsen, T.P., Henriksen, T., Lang, J., Emenius, J., Klevebrant, T., Nilsson, A. (2015) Field study of air purifying paving elements containing TiO<sub>2</sub>, *Atmospheric Environment*, 107, 44-51. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.02.025>
- Fujishima, A., Honda, K. (1972) Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode, *Nature*, 238(5358), 37-38. <https://doi.org/10.1038/238037a0>
- Gallus, M., Akylas, V., Barmpas, F., Beeldens, A., Boonen, E., Boreave, A., Cazaunau, M., Chen, H., Daele, V., Doussin, J. (2015) Photocatalytic de-pollution in the Leopold II tunnel in Brussels: NO<sub>x</sub> abatement results, *Building and Environment*, 84, 125-133. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.10.032>
- Guerrini, G.L. (2012) Photocatalytic performances in a city tunnel in Rome: NO<sub>x</sub> monitoring results, *Construction and Building Materials*, 27(1), 165-175. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.065>
- Hassan, M., Mohammad, L.N., Asadi, S., Dylla, H., Cooper III, S. (2013) Sustainable photocatalytic asphalt pavements for mitigation of nitrogen oxide and sulfur dioxide vehicle emissions, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(3), 365-371. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000613](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000613)
- International Organization for Standardization (ISO) (2016) Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) - Test method for airpurification performance of semiconducting photocatalytic materials - Part 1: Removal of nitric oxide. <https://www.iso.org/standard/65454.html>
- Jeong, J.-H., Kim, S.-H., Lee, G.-H. (2010) Research Trends and Application of Photocatalytic Cement Concrete, *Korean Society of Road Engineers*, 12(2), 25-34.
- Kim, M.-Y., Kim, H.-G., Park, J.-C. (2020) Field Experimental Analysis of NO<sub>x</sub> Removal Efficiency of Photocatalytic Exterior Materials Reducing PM<sub>2.5</sub>, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 32(12), 585-592, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.6110/KJACR.2020.32.12.585>
- Kim, Y.-K., Hong, S.-B., Lee, K.-B., Lee, S.-W. (2014) Evaluation of NO<sub>x</sub> removal efficiency of photocatalytic concrete for road structure, *Korean Society of Road Engineers*, 16(5), 49-58, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.7855/JHE.2014.16.5.049>
- Maggos, T., Plassais, A., Bartzis, J., Vasilakos, C., Moussiopoulos, N., Bonafous, L. (2008) Photocatalytic degradation of NO<sub>x</sub> in a pilot street canyon configuration using TiO<sub>2</sub>-mortar panels, *Environmental Monitoring and Assessment*, 136(1), 35-44. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9722-2>
- Ryu, J.-H., Park, D.-S. (2009) Photocatalytic Technology and Research Trends, *Korea Institute of Materials Science*, 21(2), 84-97.
- Sikkema, J.K. (2013) Photocatalytic degradation of NO<sub>x</sub> by concrete pavement containing TiO<sub>2</sub>. <https://lib.driastate.edu/etd/13486>
- Wang, D., Leng, Z., Yu, H., Huben, M., Kollmann, J., Oeser, M. (2017)



Durability of epoxy-bonded TiO<sub>2</sub>-modified aggregate as a photocatalytic coating layer for asphalt pavement under vehicle tire polishing, *Wear*, 382, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.04.004>

### Authors Information

전혜준 (서울기술연구원 기후환경연구실 전임연구원)  
차진선 (한국산업기술시험원 재료기술센터 주임연구원)  
윤성진 (서울기술연구원 기후환경연구실 수석연구원)  
이주형 (서울기술연구원 기후환경연구실 전임연구원)  
송민영 (서울기술연구원 기후환경연구실 수석연구원)