

# 도로 구조물 적용을 위한 $TiO_2$ 콘크리트의 장기공용성에 대한 실험적 연구

이준희\* · 김영규\*\* · 이승우\*\*\*

Lee, Jun Hee\*, Kim, Young Kyu\*\*, Lee, Seung Woo\*\*\*

## Experimental Study on the Long-term Performance of $TiO_2$ Concrete for Road Structures

### ABSTRACT

In the area of high traffic volume, such as expressway across large cities, the amount of nitrogen oxides ( $NO_x$ ) emitted into the atmosphere as air pollution can be significant since  $NO_x$  gases are the major cause of smog and acid rain. Recently, the importance of  $NO_x$  removal has arisen in the world. Titanium dioxide ( $TiO_2$ ), that is one of photocatalytic reaction material, is very efficient for removing  $NO_x$ . Therefore, application of  $TiO_2$  concrete is a good alternative in order to remove  $NO_x$  which is a main cause of air pollution. This experimental study aimed to evaluate the long-term performance of  $TiO_2$  concrete such as  $NO_x$  removal efficiency due to performance period and environmental resistance for application of road structures. It was found that the  $TiO_2$  is reasonable applicable on the road structure because  $TiO_2$  concrete has a long-term performance.

**Key words :** Titanium Dioxide ( $TiO_2$ ), Nitrogen Oxide ( $NO_x$ ), Long-term performance, Environmental load resistance

### 초 록

대도시와 인접한 고속도로와 같이 교통량이 많은 경우 스모그와 산성비의 주요 원인이 되는 많은 양의 질소산화물이 발생하여 대기오염이 심각한 상황이다. 이에 최근 들어 전 세계적으로 질소산화물 제거의 중요성이 부각되고 있다.  $TiO_2$ 는 광촉매 소재의 하나로써 질소산화물 제거에 매우 효과적이므로 대기오염의 주요 원인인 질소산화물을 제거하기 위하여  $TiO_2$  콘크리트를 도로 구조물에 적용하는 방안이 있다. 이에 본 실험적 연구에서는  $TiO_2$  콘크리트의 현장 적용을 위하여 공용에 따른 질소산화물 제거 효율변화와 함께 환경 하중 저항성을 평가하였다. 이로 인해  $TiO_2$  콘크리트의 장기적인 기능성 유지가 확인되었으며, 인접 도로 구조물에 적용이 타당할 것으로 판단된다.

**검색어 :** 이산화티타늄( $TiO_2$ ), 질소산화물( $NO_x$ ), 장기 기능성, 환경 하중 저항성

## 1. 서론

영국 가디언지에 따르면 세계보건기구(WHO)의 조사 결과 매년 전 세계에서 약 134만 명이 대기 오염으로 인해 조기 사망하고 있으며, 이는 대부분 공업화 과정이 매우 빠르거나 교통 운수 및 발전 과정에서 발생하는 이산화탄소와 자동차 배기가스가 주된 원인이다 (Guardian, 2011). Fig. 1(a) 국내의 대기오염물질 배출현황을, Fig. 1(b)는 산림을 제외한 국토 면적당 대기오염물질 배출량을 나타낸 것으로 도심 지역에서 도로이동오염원의 구성 성분인 질소산화물( $NO_x$ )이 차지하는 비율이 가장 높은 것을 확인할 수 있다(Ministry of Environment, 2011). 자동차 등의 도로이동오염원과 사업용 보일러 및 발전설비와 같은 고정원에서 배출되는 질소산화물( $NO_x$ )은

\* 정희원 · 강릉원주대학교 토목공학과 석사과정 (Gangneung-Wonju National University · wlrrurxk\_@naver.com)

\*\* 강릉원주대학교 방재연구소 전임연구원, 공학박사 (Gangneung-Wonju National University · kingdom1980@nate.com)

\*\*\* 정희원 · 교신저자 · 강릉원주대학교 토목공학과 교수 (Corresponding Author · Gangneung-Wonju National University · swl@gwnu.ac.kr)

Received January 20, 2015/ revised March 5, 2015/ accepted March 20, 2015

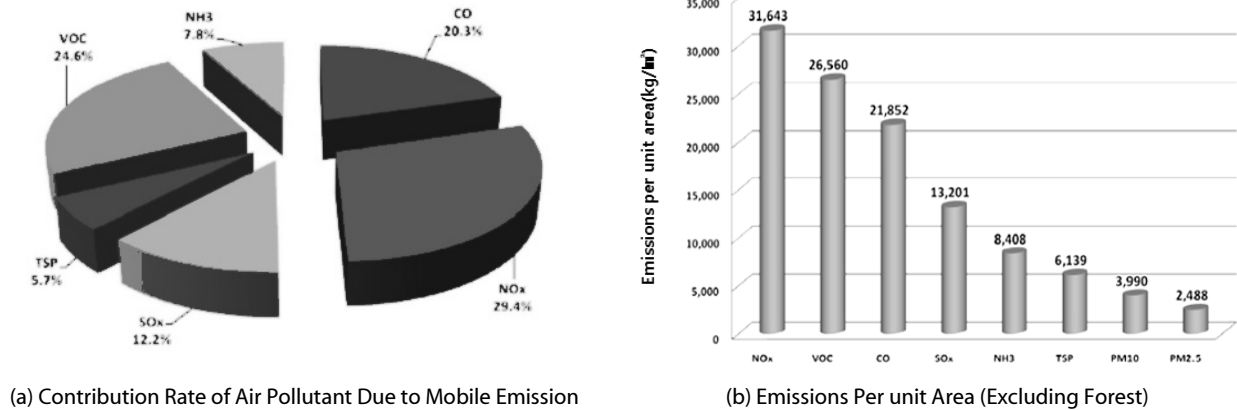


Fig. 1. Contribution Rate of Air Pollutant Due to Mobile Emission (Ministry of Environment, 2011)

유해한 대기오염물질이며, 대도시 지역에서는 자동차 배기가스에 의한 NO<sub>x</sub> 오염이 심각한 상황으로 호흡기계의 질환, 광화학 스모그 및 산성비의 원인이 되는 가스성분이다(Kim, 2000). 따라서 NO<sub>x</sub>에 의한 대기오염을 감소시키기 위한 방안이 사회적으로 요구되고 있는 실정이다.

NO<sub>x</sub>에 의한 대기오염을 정화 할 수 있는 방안으로는 이산화티탄(TiO<sub>2</sub>)의 광촉매 작용을 이용한 NO<sub>x</sub>의 정화 및 무해화를 들 수 있으며, 광촉매가 태양에너지와 반응하여 질소산화물, 유기염소 화합물 등에 의한 대기의 오염물질을 흡착하여 제거하는 원리를 이용하는 것이다. 이러한 원리를 도로구조물에 도입할 경우 자동차에서 배출되는 유해가스를 직접적으로 흡착/제거하여 대기오염방지에 상당히 효과적일 것으로 판단되며, 특히 도로구조물의 경우 비표면적이 매우 넓으므로 광촉매 효율을 극대화 할 수 있다. 그러나 국내의 경우 광촉매 소재를 일부 구조물에 코팅하여 오염물 분해효과를 검증하는 기초연구가 진행되었을 뿐 다양한 적용방안에 대한 검토와 NO<sub>x</sub> 제거효율에 관한 연구는 전무한 상황이다. 최근, Hong and Lee(2013)의 연구에서는 TiO<sub>2</sub> 광촉매 소재를 콘크리트 도로구조물에 효율적으로 적용하기 위한 기초 연구를 진행하였다. 다양한 광촉매 소재를 사용하여 시멘트의 일부로 치환하는 배합방법, 양생제를 이용하는 코팅방법 및 표면침투제를 이용하는 침투방법에 대하여 전계방사형 주사전자현미경(SEM/EDS)을 사용하여 TiO<sub>2</sub>의 분포도 및 침투깊이를 분석하였다. 치환배합을 통한 EDS 분석결과 시편의 전단면에서 티타늄이 검출되었으나 기본적으로 많은 양의 광촉매를 소비하고 있으며, 내부 광촉매의 경우 배기가스와 접촉하지 못하므로 효율성이 떨어지는 것을 확인하였다. 액상형 실리케이트계 표면침투제를 적용한 경우 침투 깊이가 증가할수록 질량비/사용량이 감소하였고, 최대 침투깊이는 2.33mm를 나타내었으며 표면에 다량의 TiO<sub>2</sub>가 존재하여 광촉매 반응에 따른 NO<sub>x</sub> 제거효과가 우수할 것으로 판단하였다. Kim and Lee(2014)의

연구에서는 대기오염물질을 제거하기 위한 도로구조물의 적용이 가능한 TiO<sub>2</sub> 콘크리트 재료적 특성 및 NO<sub>x</sub> 제거 효율을 평가하였다. 그 결과 TiO<sub>2</sub> 치환배합의 경우 치환량을 시멘트의 0, 3, 5 및 7%로 증가 시 NO<sub>x</sub> 제거효율은 0, 11, 19 및 25%로 증가였으며, 실리케이트계 표면침투제와 TiO<sub>2</sub> 소재를 8대 2로 혼합하여 굳은 콘크리트 표면에 침투시킨 경우 300, 500, 및 700g/m<sup>2</sup>의 침투량 변화에 따른 NO<sub>x</sub> 제거효율은 50%내외로 매우 우수하였다. 치환배합에 따른 TiO<sub>2</sub>의 치환량 증가에 따라 압축강도 및 휨강도가 감소하는 경향을 나타냈으나 설계기준강도를 크게 상회하여 나타났다. 그러나 앞선 연구들에서는 TiO<sub>2</sub> 콘크리트의 기능적 성능의 장기간 유지 검토와 TiO<sub>2</sub> 콘크리트의 도로구조물 적용 시 환경의 영향에 따른 재료적 내구성 저하의 분석이 이루어지지 않았다. 따라서 현장 적용을 위해 기존 연구들에서 NO<sub>x</sub> 제거 효율이 우수한 것으로 확인된 시편에 대해 TiO<sub>2</sub> 콘크리트의 장기간 태양광 노출 후 NO<sub>x</sub> 제거 효율 평가와 동결융해 및 세제제 시험 등의 환경 저항성 시험을 실시하여 광촉매 콘크리트의 장기 공용성에 대한 분석을 진행하고자 한다.

## 2. 광촉매 콘크리트의 특성

### 2.1 광촉매 콘크리트의 NO<sub>x</sub> 제거 원리

광촉매 소재는 빛 에너지를 흡수해서 화학반응을 촉진시키는 촉매를 가리킨다. 광촉매의 특성을 나타내는 물질로는 ZnO, CdS, TiO<sub>2</sub>, SnO<sub>2</sub>, WO<sub>3</sub> 등과 Perovskite형 복합 금속화합물(SrTiO<sub>3</sub>)등을 들 수 있으며, 각 촉매마다의 유기물 분해 능력에는 큰 차이가 있으나 실제 광촉매 반응에 사용할 수 있는 반도체 물질은 우선 광학적으로 광부식이 없고 활성이 있어야 한다. 광촉매로 사용하고 있는 대표적인 물질은 이산화티탄(TiO<sub>2</sub>)으로, 내마모성, 내구성이 우수하며 그 자체로 안전/무독물질로 폐기 시에도 2차 공해에 대한

염려가 없다. 또한 자원이 풍부하며 가격이 저렴하여 가장 많이 사용되고 있다. TiO<sub>2</sub>의 경우 아나타제(anatase), 루틸(rutile) 및 브루카이트(brookite)의 3가지 종류가 있으며, 브루카이트형은 광촉매 효과가 거의 없는 것으로 알려져 공업적으로 사용되지 않고 있다. 아나타제의 경우 백색안료로 광촉매 활성이 크며 900℃ 이상의 고온에서 루틸형으로 변화한다. 루틸형은 백색안료로 공업적으로 폭넓게 사용되고 있으며 광촉매 효과 및 착색력이 우수하다.

Fig. 2는 TiO<sub>2</sub>의 광촉매 유기물 분해기구를 도시한 것이다. TiO<sub>2</sub> 반도체에 일정한 영역의 에너지(3.2eV 이상, 388nm 이하의 파장)가 가해지면 전자가 가전자대(valence band)에서 전도대(conduction band)로 여기게 된다. 이때 전도대(conduction band)에는 전자(e<sup>-</sup>)들이 형성되게 되고 가전자대(valence band)에는 정공(h<sup>+</sup>)이 형성되게 된다. 이렇게 형성된 전자와 정공은 강한 산화 또는 환원작용에 의해 유해물질을 분리시키는 등 다양한

반응을 일으키게 된다. 촉매 산화티탄에 빛이 닿아 발생한 전자(e<sup>-</sup>)와 정공(h<sup>+</sup>)은 각각 공기중의 O<sub>2</sub> 및 H<sub>2</sub>O와 반응을 일으켜, 산화티탄 표면에 슈퍼옥사이드음이온(O<sub>2</sub><sup>-</sup>), 수산라디칼(OH<sup>-</sup>) 2종의 활성 산소를 생성한다. 특히, 수산라디칼은 높은 산화, 환원 전위를 가지고 있기 때문에 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, 휘발성유기화합물(VOCs) 및 각종 악취 정화에 탁월하고, 축산폐수, 오수, 공장폐수의 BOD, 색도 및 난분해성 오염물질, 환경호르몬 등을 완벽히 제거할 수 있을 뿐만 아니라, 병원성대장균, 황색포도구균, O-157 등 각종 병원균과 박테리아를 99%이상 살균하는 등 대상물질을 산화시키는 능력을 갖고 있다(Ballari et al., 2010).

### 2.2 TiO<sub>2</sub> 콘크리트의 적용 방안 검토

Hong and Lee(2013)의 연구에 따르면 광촉매 소재를 콘크리트 도로구조물에 효율적으로 적용하기 위하여 시멘트의 일부를 치환하는 배합방법, 수성 양생제를 TiO<sub>2</sub>와 혼합하여 콘크리트 표면을 코팅하는 방법 및 유기계 표면침투제와 TiO<sub>2</sub>를 혼합하여 콘크리트 표면에 침투시키는 방법을 검토하였으며, TiO<sub>2</sub> 소재가 콘크리트 표면 3mm내에서 표면에 가까울수록 많은 분포를 보이는 것이 대기 중 NO<sub>x</sub> 제거를 위한 최적의 분포라고 판단하여 전계방사형 주사전자현미경(SEM/EDS)을 사용하여 TiO<sub>2</sub>의 분포도 및 침투깊이를 분석하였다.

Fig. 3(a)에서 치환배합을 통한 EDS 분석결과 시편의 전단면에서 티타늄이 검출되었으나 기본적으로 많은 양의 광촉매를 소비하고 있으며, 내부 광촉매는 배기가스와 접촉하지 못하므로 효율성이 떨어지는 것을 확인하였다. Fig. 3(b)는 액상형 실리케이트계 표면

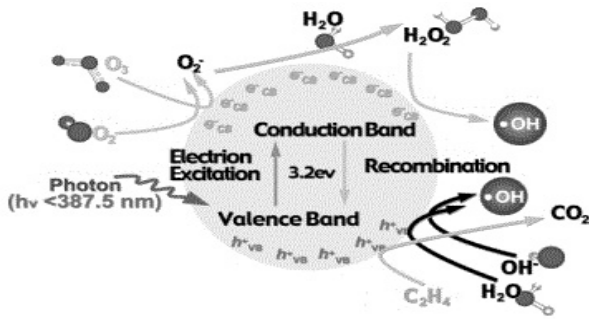


Fig. 2. Photocatalytic Reaction

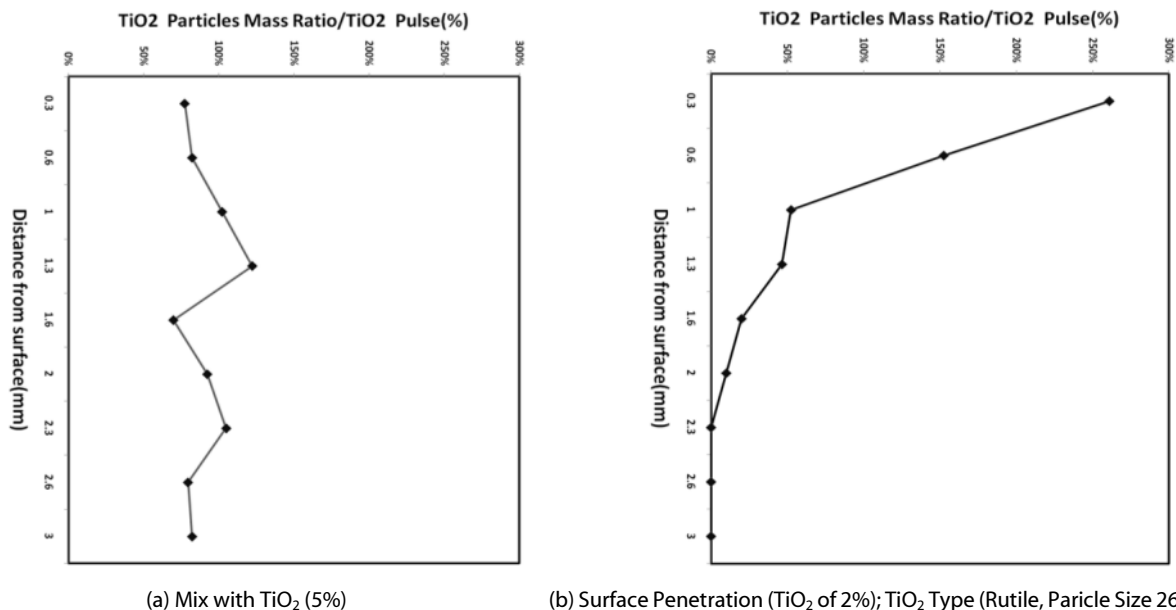


Fig. 3. SEM/EDS Analysis Results Due to TiO<sub>2</sub> Application Method (Hong et al., 2013)

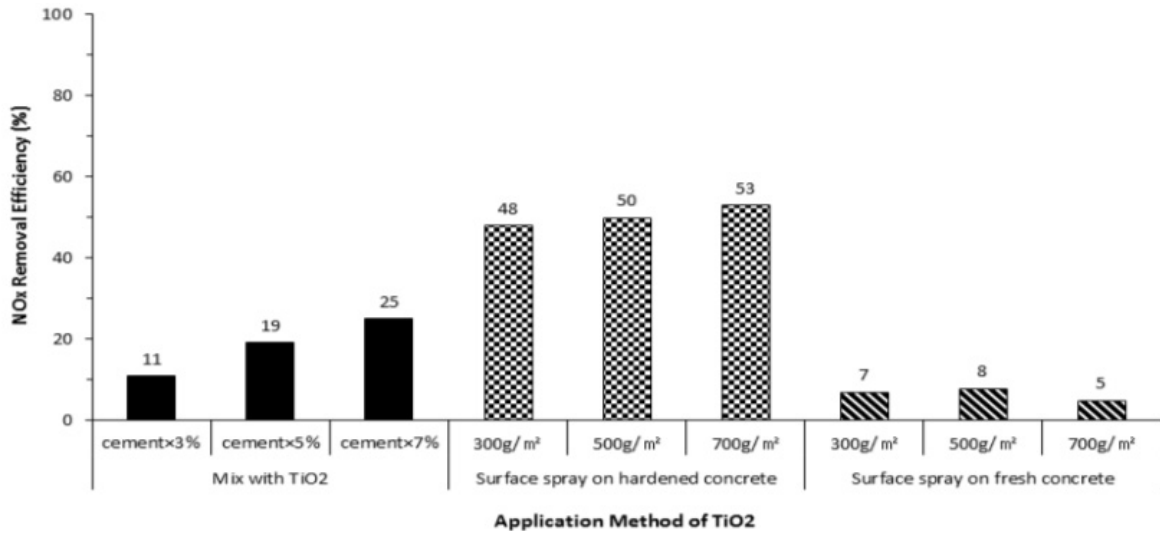


Fig. 4. NOx Removal Efficiency Due to Application Method of TiO<sub>2</sub> (Kim et al., 2014)

침투제를 이용한 TiO<sub>2</sub> 표면침투를 나타낸 것으로, 표면으로부터 0.33mm 깊이에서 261%의 높은 질량비/사용량의 TiO<sub>2</sub>가 검출되었으며 깊이가 증가할수록 질량비/사용량이 감소하였다. 최대 침투 깊이는 2.33mm를 나타내어 콘크리트 도로구조물에 적용 시 마모에 의한 장기 공용성을 확보할 수 있으며, 표면에 많은 양의 TiO<sub>2</sub>가 존재하여 대기에 충분히 접촉할 수 있기에 광촉매 반응에 따른 NOx 제거효과가 우수할 것으로 판단하였다.

Fig. 4는 Kim and Lee(2014)의 연구에서 NOx 제거 효율을 평가한 결과이다. 다양한 적용 방법에 따른 TiO<sub>2</sub> 콘크리트의 광촉매 반응이 발생한 시점부터 일정시간 경과 후 안정화를 이루는 시점의 NOx 농도를 사용하여 NOx 제거효율을 평가하였다. 치환배합의 경우 TiO<sub>2</sub> 치환량이 시멘트의 3, 5 및 7%로 증가 시 NOx 제거 효율은 11, 19 및 25%로 증가하였으며, 실리콘계 표면침투제와 TiO<sub>2</sub> 소재를 8대2로 혼합하여 굳은 콘크리트 표면에 침투시킨 경우 300, 500 및 700g/m<sup>2</sup>의 살포량 변화에 따른 NOx 제거효율은 50% 내외로 매우 우수하였다. 이는 치환배합과 비교하여 TiO<sub>2</sub> 소재를 최대 1/10정도 적용한 반면 2배 이상의 NOx 제거효율을 확보하였다. 이를 통하여 TiO<sub>2</sub> 소재의 도로구조물 적용 시 차량하중에 의한 직접적인 마모가 발생하지 않는 콘크리트 중앙분리대, 측구 및 길어깨 집수경의 경우 TiO<sub>2</sub> 소재와 실리콘계 표면침투제를 혼합하여 표면 침투 시 NOx 제거를 위한 적용성이 우수할 것으로 판단된다. 하지만 굳지 않은 콘크리트에 대해 300, 500 및 700g/m<sup>2</sup>의 침투량 변화에 따른 NOx 제거효율이 매우 저조하여 현장적용이 용이 하지 못할 것으로 판단되었다.

이와 같은 결과를 이용하여 본 연구에서는 모든 시편이 50%내외의 우수한 NOx 제거 효율을 나타낸 굳은 콘크리트에 표면 침투시킨

유형을 선정하였고, 이 중에서 세 시편의 NOx 제거 효율의 평균값 50%에 부합하는 TiO<sub>2</sub> 농도 500g/m<sup>2</sup>의 시편에 초점을 맞춰 본 연구를 진행하였다. 최초의 NOx 제거 효율 측정 이후 약 6개월 동안 태양광에 노출시킨 상태를 유지한 이후 시편을 회수하여 NOx 제거 평가 시스템으로 효율 평가를 실시하였다. 환경 하중 저항성 시험은 비교시편 이외에 치환배합에서 NOx 제거 효율이 15%이상이고 치환량 증가에 따른 콘크리트 단가 상승과 강도저하의 소지로 인해 치환량 5%의 시편을 포함하여 본 연구를 진행하였다.

### 3. 장기 지속성 및 내구성 검토방안

#### 3.1 NOx 제거 효율 검토 방안

장기간 대기에 노출시킨 시편에 대한 NOx 제거 효율 평가를 위한 방법으로써 최초의 측정 방법 및 조건을 동일하게 실시하였다. Fig. 5는 ISO 22197-1(2007) “Test method for air-purification performance of semiconducting photocatalytic materials-Part 1: Removal of Nitric Oxide” 규정을 준수하여 광촉매 콘크리트의 NOx 제거 평가시스템을 구축한 것이다. NOx 제거효율 평가 시스템은 물을 통과하는 액화 공기와 액화 질소를 혼합하므로 NOx 농도를 실험자가 유동적으로 조정할 수 있으며, 일부 NOx를 gas photoreactor로 흘려보내 실험을 진행하였다. 일반적으로 지표면에 도달하는 자외선은 290~380nm의 파장을 나타내므로 이와 유사한 315~400nm의 파장을 갖는 UV-A 램프를 NOx 제거 평가 시스템에 사용하였으며, 조명용 형광 램프와 같은 유리를 사용하여 일부 가시광선도 방사되게 하였다. 또한 도로변 지역 NO의 농도의 경우 평균 170ppb, 최고 854ppb가 발생하여 일반지역에 비해



(a) NOx Removal Efficiency Tester



(b) Synthetic Air and NO Source (NO 30ppm/N<sub>2</sub>)

Fig. 5. NOx Analyzing System (Kim et al., 2014)

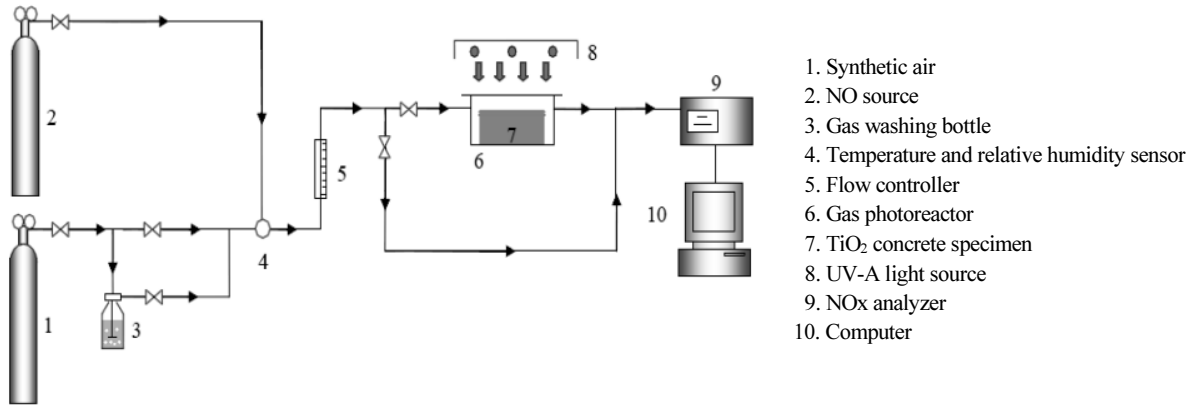


Fig. 6. Schematic Representation of the Experimental Setup (Kim et al., 2014)

2.5배 이상 높으며, 출퇴근 차량이 증가하는 시점에서 최대치를 나타낸다. 따라서 NOx 제거효율 측정 시 ISO 22197-1에 따라 도로지역의 NO 최고 농도와 유사하게 1,000ppb로 고정하였다 (Kim and Lee, 2014).

### 3.2 재료적 내구성 검토 방안

동결기 실제 현장에서의 TiO<sub>2</sub> 콘크리트의 구조적 성능 유지를 분석하기 위해 동결융해 및 제설제 저항성 시험을 실시하였다. 동결융해 시험에 사용한 콘크리트는 KS F 2456에 따라 기중 동결 후 수증융해 방법(B법)으로 1사이클 당 2시간 50분으로 진행하였다. 공시체는 100×100×400mm의 각주형 공시체를 사용하였

으며, 비교시편인 일반 콘크리트 배합을 비교대상으로 TiO<sub>2</sub> 치환량 5%의 TiO<sub>2</sub> 콘크리트를 사용하여 30사이클마다 상대동탄성계수를 측정하였다.

제설제 저항성 시험의 경우 ASTM C 672에 의거하여 실시하였고, 시편은 300×300×100mm의 공시체로써 비교시편과 5%의 TiO<sub>2</sub> 치환 배합 시편, 굳은 콘크리트의 표면에 TiO<sub>2</sub> 분말 500g/m<sup>2</sup>을 칩투시킨 시편으로 나누어 시험을 수행하였다. 시험에 사용된 용액은 염화칼슘을 증류수 100mL당 4g의 비율로 제조하여 시편 위에 일정 수위를 유지시켰으며, 사이클은 17시간 동결과 7시간동안 습윤 상태의 융해로 실시하였다. 제설에 대한 저항성은 5, 10, 15, 25, 50 사이클마다 Table 1의 기준에 따라 표면 박리(Mass



Fig. 7. Freezing and Thawing Tester

Table 1. Ratings of Surface Condition According to the Visual Observation (ASTM C 672)

Division	Surface Condition
0	No scaling
1	Very slight scaling (3mm depth max no coarse aggregate visible)
2	Slight to moderate scaling
3	Moderate scaling (some coarse aggregate visible)
4	Moderate to severe scaling
5	Severe scaling (coarse aggregate visible over entire surface)

of scaled off particles) 저항성을 시편의 중량 손실량으로 측정하였다.

#### 4. 광촉매 콘크리트의 장기 공용성 분석

##### 4.1 장기간 태양광 노출에 따른 NO<sub>x</sub> 제거 효율 평가

실제 현장에서 환경의 영향을 받아 장기 노출이후에도 TiO<sub>2</sub> 콘크리트의 기능적 측면에서의 성능을 분석하기 위해 유효성 평가를 실시하였다. Fig. 8은 최초 굳은 콘크리트 표면에 TiO<sub>2</sub> 농도 500g/m<sup>3</sup>을 침투시킨 시편의 NO<sub>x</sub> 제거 효율 평가 결과와 장기간 태양광 노출 이후 측정된 NO<sub>x</sub> 제거 효율을 비교한 결과이다.

두 시편 모두 광촉매 반응으로 인하여 UV램프 점등 이후 10분 내외로 NO<sub>x</sub> 농도의 최소값을 나타내었다. 최초의 NO<sub>x</sub> 제거효율 평가 값은 안정화 단계에서 0.50ppm으로 약 50%의 제거 효율을 나타내 매우 우수한 것으로 평가되었으며, 장기 노출 이후 재측정된 값은 안정화 단계에서 0.54ppm으로 약 46%의 제거 효율로 약간의 감소가 있었다. 그러나 최초의 측정값과 유사한 제거 효율이 지속되어 장기적 기능성 유지가 가능한 것을 확인하였다.

##### 4.2 동결융해 및 제설제 저항성 시험

두 개의 시편을 분석한 결과는 Fig. 9와 같으며, 초기 30사이클에

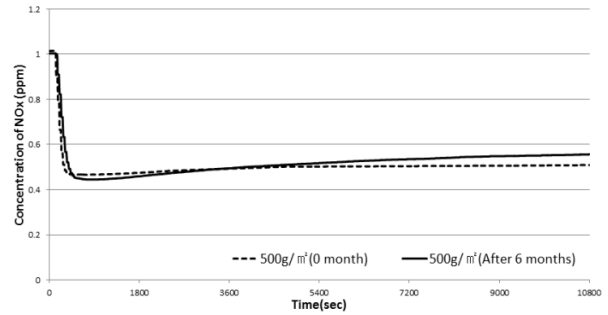


Fig. 8. Comparison of NO<sub>x</sub> Concentration Due to Performance Period of Surface Spray of TiO<sub>2</sub> on Hardened Concrete

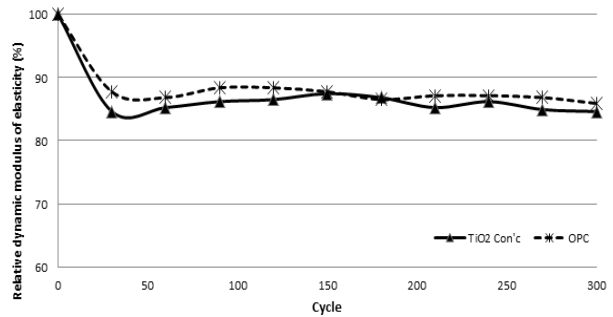


Fig. 9. Relative Dynamic Modulus of Elasticity of According to Thefreezing-Thawing Test

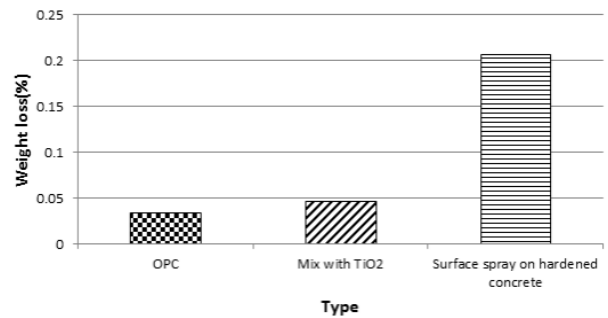
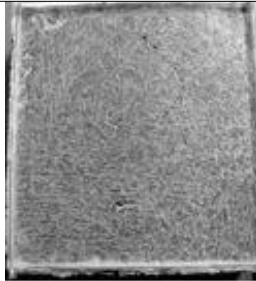
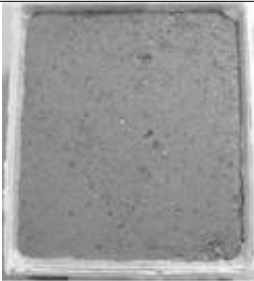


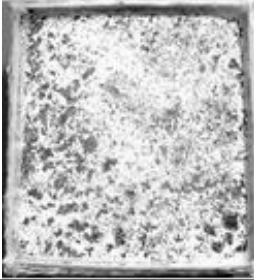



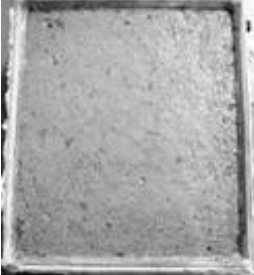


Fig. 10. Weight Reduction Rate After Surface Resistance Test of 50cycles

서는 상대동탄성계수가 비교 시편 12%, TiO<sub>2</sub> 콘크리트는 16% 정도의 감소폭을 보였으나, 120사이클부터 300사이클까지 두 시편이 근사한 값으로 상대동탄성계수가 KS F 2456 기준에 의거 80% 이상을 상회하는 결과를 나타내었다. 이는 TiO<sub>2</sub>가 적용된 콘크리트입에 불구하고 내구성을 판별하기 위한 동결융해 시험에서는 비교시편과 유사한 내구성을 나타내어 TiO<sub>2</sub> 콘크리트가 내동해성이 우수한 것으로 확인되었다.

Fig. 10은 실험 시편 유형에 따른 제설제 시험 간 5, 10, 15, 25, 50 사이클마다 측정된 박리량을 종합하여 시편의 무게 변화를 감소율로 나타낸 그래프이다. Fig. 10에서 확인 가능하듯 박리로

Table 2. Change of Surface Condition Due to Scaling Resistance

	0Cycle	25Cycle	50Cycle	Surface condition
OPC				After 50Cycle (0, No scaling)
Surface spray on hardened concrete (500g/m <sup>2</sup> )				After 50Cycle (2, slight to moderate scaling)
Mix with TiO <sub>2</sub> (5%)				After 50Cycle (0, No scaling)

인한 무게 감소율이 비교시편과 치환배합 시편의 경우 0.05% 미만으로 극히 작은 것을 확인 할 수 있다. 그러나 굳은 콘크리트에 표면 칩투를 실시한 시편의 경우 0.2% 이상의 무게 감소율이 발생한 것을 확인하였다.

표면 박리 저항성 실험에 따른 시편들의 변화와 표면상태를 ASTM C 672 기준에 의하여 분석한 결과 Table 2와 같으며, 비교 시편의 경우 표면 상태가 양호하여 'No scaling'으로 확인되었으나 표면 칩투 방식의 경우 'slight to moderate scaling'으로 분석되었다. 이는 표면칩투 후 잔류되어 있는 TiO<sub>2</sub>의 일부가 박리된 것으로 제설제의 직접적인 영향을 받는 구간의 경우 치환 배합을 통한 TiO<sub>2</sub> 적용이 용이하나 제설제의 직접적인 영향을 받지 않는 구간에서 표면 칩투방식이 도로 구조물에 적용이 타당할 것으로 판단된다.

### 5. 결론

본 연구에서는 광촉매 콘크리트를 지연 상태의 태양광에 장기 노출한 뒤 측정된 NOx 제거 효율을 비교하고, 동결융해 및 제설제 시험

등의 환경 저항성 시험을 실시하여 광촉매 콘크리트의 장기 가능성과 재료적 내구성에 대하여 분석한 결과 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 굳은 콘크리트 표면에 TiO<sub>2</sub> 분말 500g/m<sup>2</sup>를 칩투시킨 시편의 경우, 최초의 NOx 제거 효율은 50%였으며 장기간 실외 거치 이후의 제거 효율은 46%로 유사한 수치가 측정되어 장기 가능성이 유지가 가능한 것을 확인하였다.
- (2) TiO<sub>2</sub> 콘크리트의 동결융해 시험한 결과, 두 시편의 상대동탄성 계수가 KS F 2456 기준인 80%를 상회하는 값을 보였으며, 이는 내구성 및 내동해성이 우수한 것으로 확인되었다.
- (3) 제설제 저항성 시험을 실시한 결과, 칩투식 TiO<sub>2</sub> 콘크리트의 경우 제설제의 영향에 의한 표면 박리의 발생 가능성으로 인해 제설제의 직접적인 영향이 적은 인접 도로구조물에 적용이 타당할 것으로 판단된다.

### 감사의글

본 연구는 “탄소중립형 도로 기술개발” 연구단을 통하여 지원된

국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 건설기술혁신사업에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## References

- Hong, S. J. and Lee, S. W. (2013). "An experimental study for the construction of photocatalytic method concrete road structure." *Korean Society of Road Engineers*, Vol. 15, No. 6, pp. 1-9.
- ISO 22197-1 (2007). *Test method for air-purification performance of semiconducting photocatalytic materials-Part 1: Removal of Nitric Oxide*, International Standard.
- Kim, H. J. (2000). "Development of materials to remove nitrogen compounds (NO<sub>x</sub>) of cement." *Conference of Cement Association*, 153, pp. 50-54.
- Kim, Y. K. and Lee, S. W. (2014). "Evaluation of NO<sub>x</sub> removal efficiency of photocatalytic concrete for road structure." *Korean Society of Road Engineers*, Vol. 16, No. 5, pp. 49-58.
- Ballari, M. M., Hunger, M., Hüsken, G. and Brouwers, H. J. H. (2010). "NO<sub>x</sub> photocatalytic degradation employing concrete pavement containing titanium dioxide." *Applied Catalysis B: Environmental*, Vol. 95, No. 3-4, pp. 245-254.
- Ministry of Environment (2011). *National Air Pollutants Emission 2011*, National Institute of Environmental Research, Ministry of Environment (in Korean).
- The guardian (2011). *Iran, India, Pakistan and Mongolia have most polluted cities in the world*, Available at: <http://www.theguardian.com/environment/2011/sep/26/iran-india-pakistan-mongolia-polluted-cities> (Accessed: December 12, 2014).