

Research Paper

# 코팅된 제올라이트 비드를 이용한 콘크리트 투수블록의 대기전구물질 제거율 평가

## Air Pollutant Removal Rates of Concrete Permeable Blocks Produced with Coated Zeolite Beads

박준서<sup>1</sup> · 양근혁<sup>2\*</sup>

Park, Jun-Seo<sup>1</sup> · Yang, Keun-Hyeok<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Doctor's Course, Department of Architectural Engineering, Graduate School, Kyonggi University, Yeongtong-Gu, Suwon, 16227, Korea

<sup>2</sup>Professor, Department of Architectural Engineering, Kyonggi University, Yeongtong-Gu, Suwon, 16227, Korea

\*Corresponding author

Yang, Keun-Hyeok  
Tel : 82-31-249-9703  
E-mail : yangkh@kgu.ac.kr

ABSTRACT

The objective of this study is to examine the removal rate of air pollutants, specifically sulfur oxides (SO<sub>x</sub>) and nitrogen oxides(NO<sub>x</sub>), using concrete permeable blocks containing zeolite beads coated with materials capable of eliminating these pollutants. Titanium dioxide(TiO<sub>2</sub>) powder and coconut shell powder were utilized for the removal of SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub> and were applied as coatings on the zeolite beads. Concrete permeable block specimens embedded with the coated zeolite beads were produced using an actual factory production line. Test results demonstrated that the concrete permeable block containing zeolite beads coated with coconut shell powder in the surface layer achieved SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub> removal rates of 12.5% and 99%, respectively, exhibiting superior performance compared to other blocks. Additionally, the flexural strength and slip resistance were 5.3MPa and 65BPN or higher, respectively, satisfying the requirements specified in KS F 4419 and KS F 4561. Conversely, the permeability coefficient exhibited low permeability, with grades 2 and 3 before and after contaminant pollution, according to the standard for 'design, construction, and maintenance of pavement using permeable block'. In conclusion, incorporating zeolite beads coated with coconut shell powder in the surface layer enables simultaneous removal of SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub>, irrespective of ultraviolet rays, while maintaining adequate flexural strength and slip resistance. However, the permeability is significantly reduced, necessitating further improvements.

**Keywords** : air pollutant, concrete permeable block, zeolite bead, coating

## 1. 서론

대기전구물질(황산화물 또는 질소산화물)은 2차 미세먼지이면서 세계보건기구(world health organization, WHO)에서 지정한 1급 발암물질이다[1]. 따라서 전 산업분야에서 1급 발암물질인 황산화물(sulfur oxide, SO<sub>x</sub>)과 질소산화물(nitrogen oxide, NO<sub>x</sub>)을 제거하기 위한 다양한 분해 또는 흡착 기술이 개발되고 있다[2-5]. 특히 건설산업에서는 외부에 설치되는 블록류에 대기전구물질의 제거기능이 부여된 기능성 콘크리트 투수블록 제품들이 개발되고 있다[6-8]. Jung et al.[6]은 블록 상부 표면에 이산화티타늄(titanium oxide, TiO<sub>2</sub>)을 코팅하여 NO<sub>x</sub>를 최대 30%까지 제거할 수 있는 미세먼지 저감형 콘크리트 투수블록을 제조하였다. 또한 Lee[7]는 콘크리트 투수블록에서 최적의 TiO<sub>2</sub>의 코팅량이 15~20%임을 보고하였으며, 코팅된 블록에서 최대 34.9%까지 NO<sub>x</sub>를 제거할 수 있음을 보였다. Lee et al.[8]은 0.2~2.2μm의 입자크기를 갖는 TiO<sub>2</sub>가 NO<sub>x</sub>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

의 제거율을 극대화시킬 수 있음을 보였다. 하지만, 콘크리트 투수블록에서  $TiO_2$ 를 이용한 상부표면의 코팅은 도보에 의해 손상되므로 장기적으로  $NO_x$ 를 제거하는데에 한계가 있다[9]. 특히  $TiO_2$ 는 친수성이므로 우천 이후  $NO_x$ 의 제거성능이 급격히 저하된다. 결과적으로 현 시점에서  $NO_x$ 를 외부환경에서 안정적으로 제거할 수 있는 제품은 없는 실정이다[10].

이러한 코팅에 의한 문제점을 보완하기 위해서 최근에는  $TiO_2$  분말을 기층에 첨가한 콘크리트 투수블록이 개발되었다[11,12]. 기층에  $TiO_2$  분말의 투입은 표면 코팅 보다  $NO_x$ 의 제거성능이 저하되지만, 장기적인 환경에서 그 제거효과를 기대할 수 있다. Sim and Yang[11]은  $TiO_2$  분말을 기층에 투입한 콘크리트 투수블록의  $NO_x$ 의 제거성능이 9~17%임을 보였다. 특히 Yang and Mun[12]은  $TiO_2$  분말이 임베디드된 상태에서 콘크리트 투수블록의  $NO_x$ 의 제거성능이 세정 후에도 비슷한 수준의 성능이 유지됨을 보였다. 하지만  $TiO_2$  분말은 콘크리트 배합에서 분산성이 부족하기 때문에 실질적인 제거성능을 발휘하기 위해서 과다한 투입량이 요구된다. 또한  $TiO_2$ 는 강한 자외선(ultraviolet ray, UV)이 있는 환경에서만  $NO_x$ 를 분해할 수 있어 우천시 또는 저녁에는  $NO_x$ 의 제거효과를 기대할 수 없다[13]. 게다가 콘크리트 투수블록에서 미세먼지의 약 30%를 차지하는  $SO_x$  제거에 관련된 기술개발도 미미한 실정이다. 결과적으로 UV가 없는 환경에서도  $NO_x$  뿐만 아니라  $SO_x$ 도 동시에 제거할 수 있는 콘크리트 투수블록에 대한 기술개발이 요구된다.

최근에는  $TiO_2$ 를 이용한  $NO_x$  제거의 한계를 극복하기 위해서 물리적 흡착이 가능한 소재들을 이용한 제품들이 개발되고 있다[12,14]. Yang et al.[14]은 5~10 $\mu m$  수준의 나노급의 공극구조를 갖는 야자각 분말이  $NO_x$ 를 제거하는데 효과적인 소재임을 검증하였으며, 이를 이용하여 코팅된 섬유질 소재에서 약 16%의  $NO_x$  제거율을 확보할 수 있음을 보였다. 특히 Yang and Mun[12]은 야자각 분말로 코팅된 다공성 골재(전체 체적 대비 5%)를 이용하여 제조된 투수블록에서 압축강도, 휨강도 및 투수계수의 성능이 저하되지 않으면서 약 15% 수준의  $NO_x$  제거율을 확보할 수 있음을 보였다. 이와 같이 야자각 분말은  $TiO_2$  분말과 비슷한 수준의  $NO_x$  제거율 확보가 가능하고 특히 UV가 없는 환경에서도  $NO_x$ 를 제거할 수 있는 대기전구물질 저감 재료로 기대된다.

이 연구에서는  $SO_x$  및  $NO_x$ 을 제거할 수 있는 소재를 코팅한 제올라이트 비드를 이용하여 제조된 콘크리트 투수블록의 대기전구물질의 제거율을 평가하는데에 있다.  $SO_x$ 와  $NO_x$ 를 제거하기 위해서 사용된 소재는  $TiO_2$  분말과 야자각 분말이며, 이 두 소재를 제올라이트 비드에 코팅하였다. 코팅방법은 Yang et al.[14]에 의해 제시된 침지법을 이용하였다.  $TiO_2$ 와 야자각 분말로 코팅된 제올라이트 비드는 블록 배합공정에 투입되어 콘크리트 투수블록을 제작하였는데, 이때 실제 공장생산라인을 이용하였다. 주요 변수는 표층에 투입되는 제올라이트 비드에 코팅된 소재의 종류와 각 표층 및 기층에서 전체 골재 체적 대비 제올라이트 비드의 치환율이다. 제조된 콘크리트 투수블록은 ISO 22197-1[15] 기준에 따라 수정하여 제작된 측정기기[16]로부터 대기전구물질의 제거율을 평가하였으며, 휨강도, 전 공극률, 미끄럼저항성 및 헐집물의 도포 전·후의 투수계수를 측정하였다. 이 결과값들은 KS F 4419[17]와 KS F 4561[18] 그리고 서울특별시 투수블록포장 설계, 시공 및 유지관리 기준[19]에서 제시하고 있는 성능값과 비교하였다. 최종적으로 위의 기준들[15,17-19]을 만족하면서  $SO_x$ 와  $NO_x$ 를 동시에 제거할 수 있는 콘크리트 투수블록을 제조할 수 있는 배합방법을 제시하였다.

## 2. 실험상세

### 2.1 소재의 코팅방법

소재의 코팅은 Yang et al.[14]에 의해 제시된 침지법을 이용하였다. Figure 1에 나타난 바와 같이 침지법은 정제수와 접착제가 희석된 용액에 코팅 소재를 분산시킨 후 제올라이트 비드를 일정시간동안 용액에 침지하는 방식이다. 접착제는 코팅 소재인  $TiO_2$ 와 야자각 분말이 제올라이트 비드 표면에 잘 부착하도록 하며, 정제수는 점성이 높은 접착제에 의한 코팅 소재의 뭉침현상[20]을 방지하고 유동성을 확보하기 위한 희석액 역할을 한다. Lim et al.[21]의 연구결과에 따라 희석액과 접착

제인 레진의 혼합비율은 9.18:0.82의 중량비로 결정하였다. 희석액은 정제수와 레진과의 3분간 혼합한 후, 코팅 소재를 투입하여 5분간 혼합한다. 이때 제올라이트 비드를 30분 동안 침지시킨 후 그늘 환경(온도  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$  및 습도  $60\pm 5\%$ )에서 건조시킨다.

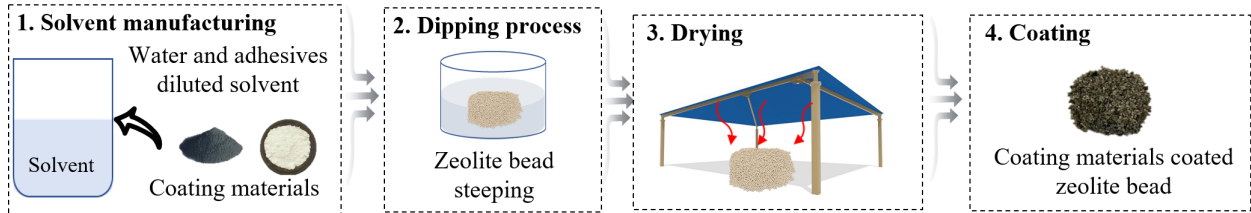


Figure 1. Coating procedures

## 2.2 배합상세 및 주요변수

Table 1에는 주요변수별 배합상세를 나타내었다. 일반적으로 콘크리트 투수블록은 기층과 표층의 2개층으로 구분되며, 각 층의 역할이 다르다[22]. 기층은 우천시 상부의 빗물을 투과시키는 투수성과 블록 상부의 하중을 견딜 수 있는 충분한 휨강도가 요구된다[23]. 기층은 KS F 4419[17]에서 제시하고 있는 투수성을 확보하기 위해서 입도가 비교적 큰 크기 5mm의 부순 잔골재를 사용하고, 충분한 휨강도 발현을 위해  $400\text{kg/m}^3$  이상의 단위 시멘트량을 사용한다. 반면 표층은 상부에 노출되는 부분으로서 투수성과 휨강도 보다는 미관에 중점을 둔다. 이에 따라 표층은 입도가 비교적 작은 2~4mm의 규사와 다양한 색을 발현시킬 수 있는 안료를 사용한다. 이러한 콘크리트 투수블록의 표층과 기층의 역할을 고려하여 배합상세를 결정하였다. 표층 및 기층에서 물-시멘트비( $W/C$ )는 각각 0.23 및 0.40이며, 골재-시멘트비( $S/C$ )는 각각 4.38 및 3.65로 설정하였다.

Table 1. Mixture proportions of concrete permeable blocks

Specimens	Layer	$W/C$	$S/C$	Unit contents( $\text{kg/m}^3$ )						
				Water	Cement	Silica sand	Crushed granules	Zeolite bead	Zeolite bead coated with $\text{TiO}_2$	Zeolite bead coated with coconut shell activated carbon
N_0_0	Surface	0.23	4.38	101	441	1,933	-	-	-	-
	Base	0.40	3.65	196	489	-	1,784	-	-	-
N_0_5	Surface	0.23	4.38	101	441	1,933	-	-	-	-
	Base	0.40	3.65	180	451	-	1,562	82	-	-
N_2.5_2.5	Surface	0.23	4.38	97	422	1,804	-	46	-	-
	Base	0.40	3.65	186	465	-	1,679	42	-	-
N_5_5	Surface	0.23	4.38	93	405	1,686	-	89	-	-
	Base	0.40	3.65	180	451	-	1,562	82	-	-
T_5_5	Surface	0.23	4.38	99	432	1,796	-	-	95	-
	Base	0.40	3.65	180	451	-	1,562	82	-	-
C_5_5	Surface	0.23	4.38	98	425	1,769	-	-	-	92
	Base	0.40	3.65	180	451	-	1,562	82	-	-

$W/C$  = water-to-cement ratio by weight,  $S/C$  = total aggregate-to-cement ratio by weight

주요변수는 표층에 투입되는 제올라이트 비드에 코팅된 소재의 종류와 표층 및 기층에서 전체 골재 체적대비 제올라이트 비드의 치환율( $R_2$ )이다. 표층에 투입되는 제올라이트 비드에 코팅된 소재는  $TiO_2$ 와 야자각 분말로 선정하였으며, 각 표층 및 기층에서  $R_2$ 의 값은 2.5%와 5%로 변화하였다. 선정된  $R_2$ 는 야자각 분말로 코팅된 다공성 골재(전체 체적 대비 5%)를 이용하여 제조된 투수블록에서 압축강도, 휨강도 및 투수계수의 성능이 저하되지 않으면서 약 15% 수준의  $NO_x$  제거율을 확보할 수 있음을 검증한 Yang and Mun[12]의 실험결과를 반영하였다. 실험체명에서 첫 번째 알파벳은 코팅에 사용된 소재의 종류(N=코팅소재 없음, T= $TiO_2$  분말, C =야자각 분말)를, 두 번째 및 세 번째 숫자는 각각 표층 및 기층에 투입되는  $R_2$ 를 나타낸다. 예를 들어 C\_5\_5 실험체는 표층 및 기층에 투입되는  $R_2$ 는 각각 5% 및 5%이며, 표층에 투입되는 제올라이트 비드는 야자각 분말 소재로 코팅되었음을 의미한다.

## 2.3 사용재료

Table 2에는 코팅소재 및 제올라이트 비드의 물리적 특성을 나타내었다. 코팅소재인  $TiO_2$  분말의 크기는 0.2~2.6 $\mu m$ 이며, 밀도는 4.26g/cm<sup>3</sup>이다. 야자각 분말은 활성탄 제품으로서 크기가 0.2~0.6mm이면서 밀도가 1.18g/cm<sup>3</sup>이다. 코팅을 위해 사용된 접착제는 밀도가 1.83g/cm<sup>3</sup>이면서 경도가 83 Shore D인 에폭시 수지의 제품을 사용하였다. 제올라이트 비드는 밀도가 0.94g/cm<sup>3</sup>이면서 크기가 2.5~5.0mm인 4 암스트롱의 제품을 사용하였다. 배합에서 결합재는 밀도 및 분말도가 각각 3.14g/cm<sup>3</sup> 및 3,260cm<sup>2</sup>/g인 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 골재로서 사용된 부순 잔골재 및 모래는 밀도가 각각 2.64g/cm<sup>3</sup> 및 2.60g/cm<sup>3</sup>이었으며, 조립률이 각각 2.84 및 3.02이었다. 기층에 사용된 안료는 D사의 산화철을 주성분으로 하는 흑색의 무기계 제품을 사용하였다.

**Table 2.** Physical properties

Type	Particle size( $\mu m$ )	Density(g/cm <sup>3</sup> )	Fineness(cm <sup>2</sup> /g)
Coconut shell activated carbon	200~600	1.18	1,130
$TiO_2$	0.2~2.6	4.26	79,000
Zeolite bead	2,500~5,000	0.94	-

## 2.4 블록제조 및 측정상세

Figure 2에는 C사의 실제 공장생산라인을 이용하여 제올라이트 비드가 투입된 콘크리트 투수블록의 제조방법을 나타내었다. 콘크리트 투수블록 제조를 위해서 재료들의 혼합은 표층과 기층에서 1.5m<sup>3</sup> 용량의 샤프트 믹서기를 이용하였다. 기층 배합에서는 시멘트, 부순 잔골재 및 모래를 투입하여 건비빔 한 후 제올라이트 비드를 마지막으로 넣어 2분 동안 건비빔하였으며, 이후 배합수를 투입한 후 최종적으로 2분 동안 습비빔하였다. 표층 배합에서는 안료의 투입을 제외한 나머지 재료들의 투입순서 및 혼합시간을 기층의 배합과 동일하게 하였다. 기층 배합에서 습비빔된 재료들은 1,000mm×1,000mm×1,000mm의 전체 크기를 갖는 몰드(25개의 콘크리트 투수블록의 제조)에 일정량을 타설한 후 진동가압을 수행하였고, 이후 그 위에 표층배합에서 습비빔된 재료들을 타설하여 한번 더 진동가압을 수행하였다. 제조된 직후 콘크리트 투수블록은 온도 60°C 및 습도 60%에서 4시간동안 양생한 이후 온도 20±2°C에서 표준양생하였다. Figure 3에 나타낸 바와 같이 실제 공장 생산라인을 이용하여 제조된 콘크리트 투수블록의 크기는 200mm×200mm×60mm이며, 기층 및 표층의 두께는 각각 50mm 및 10mm이었다.

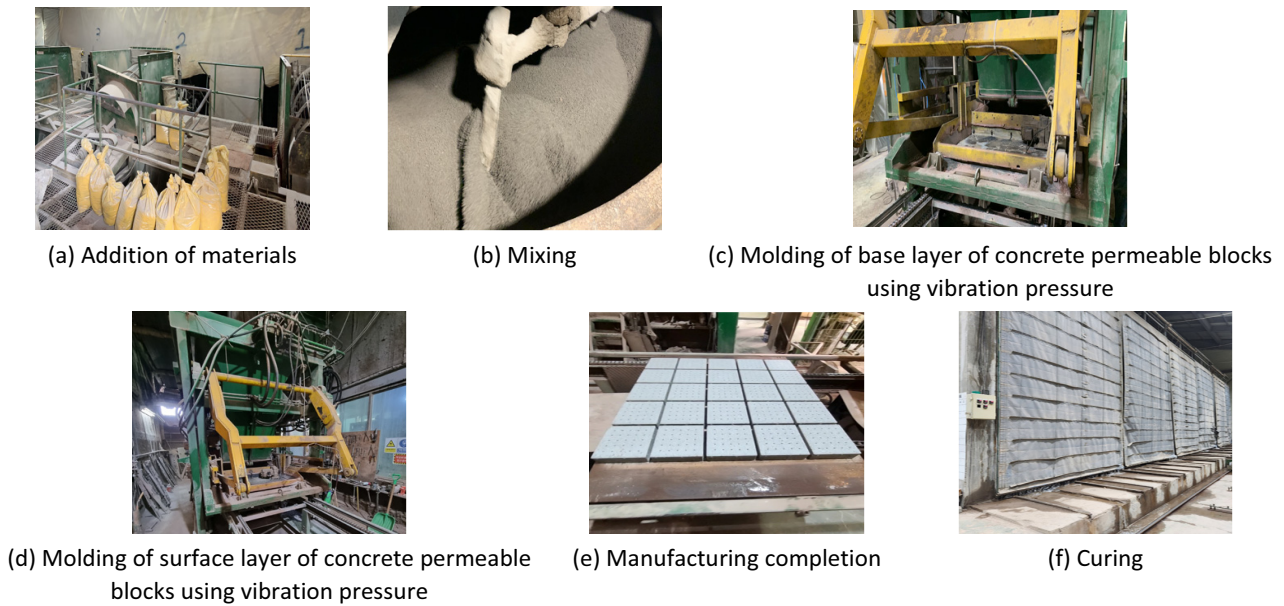


Figure 2. Manufacturing procedures of concrete permeable blocks

콘크리트 투수블록의 휨강도 및 헐잡물의 도포 전·후의 투수계수는 서울특별시에서 제시하고 있는 투수블록의 포장, 시공, 설계 및 유지관리 기준[19]에 준하여 측정하였다. 전 공극률은 일본콘크리트공학협회 에코콘크리트 연구위원회의 포러스 콘크리트의 공극률 시험방법 중 용적법을 이용하여 측정하였다[24]. 용적법은 공시체의 수중중량과 24시간 기중 방치후의 기중중량을 이용하여 산정하는 방식(전 공극률 =  $(1 - (W_2 - W_1) / V_1) \times 100$ , 여기서,  $W_2$ 는 24시간 기중 방치후의 기중중량을,  $W_1$ 은 공시체의 수중중량을,  $V_1$ 은 공시체의 용적을 의미한다.)이다. 미끄럼저항성은 영국식 미끄럼 저항 시험기를 이용하여 노면을 마찰시켜 발생하는 에너지 손실량을 측정하는 KS F 4561[18]에서 제시된 노면의 미끄럼저항성 시험방법에 준하여 측정하였다. 특히  $SO_x$  및  $NO_x$ 의 제거율은 Figure 4에 나타낸 바와 같이 ISO 22197-1[15]의 기준에 준용하여(주인 비지블에 의해 제작된 가스저감 측정장비[16]를 이용하여 측정하였다. 이 장비는 가스 주입구와 배출구를 갖는 챔버와 가스의 주입량 및 속도를 제어하는 가스흐름제어기 그리고 가스량을 측정하는 가스분석기로 구성된다. 콘크리트 투수블록의 측정방법은 다음과 같다; 1) 챔버 내부 시편이 없는 상태에서  $SO_x$  또는  $NO_x$ 의 가스를 주입하고 챔버 내부의 가스 농도가 1ppm을 유지시킬 수 있는 주입량을 결정한다; 2) 140mm×75mm×60mm의 크기로 절단된 콘크리트 투수블록을 챔버에 넣은 후 1)번에서 결정된 주입량으로  $NO_x$  또는  $SO_x$  가스를 주입한다; 3) 가스량 분석기에서 시간에 따른  $NO_x$  또는  $SO_x$ 의 농도를 측정한다; 4) 시간에 따라 측정된  $NO_x$  또는  $SO_x$  가스의 농도는 식 (1)을 이용하여 제거율( $R$ )을 산정한다(Figure 4(a)).



Figure 3. Concrete permeable blocks using real manufacturing procedure

$$R = \frac{B}{A} \times 100 \quad (1)$$

여기서,  $A$ 는 가스가 1ppm으로 유지될 때의 면적(유지 시간  $\times$  1 ppm)을,  $B$ 의 면적은 시료에 의해 제거된  $\text{NO}_x$  또는  $\text{SO}_x$  가스의 양을 의미한다.  $\text{TiO}_2$ 는 UV가 있는 환경에서 광촉매로  $\text{NO}_x$ 를 분해할 수 있기 때문에  $\text{TiO}_2$ 로 코팅된 제올라이트 비드를 이용하여 제조된 투수블록은 UV가 설치된 챔버 내부에서  $\text{NO}_x$  농도의 변화를 측정하였다. T\_5\_5 시편에서  $\text{NO}_x$ 의 제거율은 ISO 22197-1[15]의 기준에 준용하여 (주)인비지블에 의해 제작된 장치를[16] 이용하여 측정하였다. 측정방법은 다음과 같다; 1) 140mm $\times$ 75mm $\times$ 60mm의 크기로 절단된 콘크리트 투수블록을 챔버에 넣은 후  $\text{NO}_x$ 의 가스를 주입하여 1ppm을 3시간 동안 유지시킨다; 2) 10W/m<sup>3</sup>의 세기를 갖는 UV 램프를 6시간동안 작동시킨다; 3) 가스량 분석기에서 시간에 따른  $\text{NO}_x$ 의 농도를 측정한다; 4) UV램프를 3시간동안 중지시킨다; 5) 시간에 따라 측정된  $\text{NO}_x$ 의 농도는 다음의 식을 이용하여 제거율 ( $R$ )을 산정한다(Figure 4(b)).

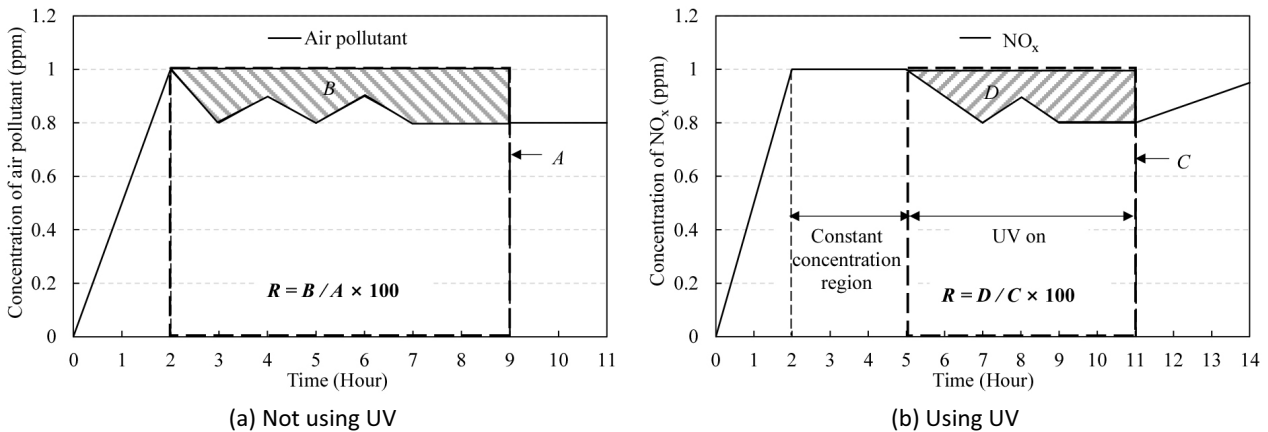


Figure 4. Evaluation method according to whether UV is used or not

$$R = \frac{D}{C} \times 100 \tag{2}$$

여기서,  $C$ 는 UV 램프가 작동되는 시간동안 가스가 1ppm으로 유지될 때의 면적(유지 시간 $\times$ 1ppm)을,  $D$ 의 면적은 시료에 의해 제거된  $\text{NO}_x$  가스의 양을 의미한다.

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 $\text{SO}_x$ 제거율

Figure 5에는 콘크리트 투수블록 시편에서 측정된 시간에 따른  $\text{SO}_x$ 의 농도변화를 나타내었다. 제올라이트 비드가 첨가되지 않은 콘크리트 투수블록 시편인 N\_0\_0에서  $\text{SO}_x$ 의 농도는 시간이 증가함에 따라 급격히 증가하여 1시간만에 1ppm에도 달하였다. 반면 제올라이트 비드가 첨가된 콘크리트 투수블록 시편에서는 시간에 따른 농도 증가율이 제올라이트 비드가 첨가되지 않은 콘크리트 투수블록 시편보다 현저하게 감소하였다. 이 경향에 대한 표층에 투입된 제올라이트 비드의 코팅 소재에 미치는 영향은 미미하였다.  $\text{TiO}_2$  분말 및 야자각 분말로 코팅된 제올라이트 비드로 제조된 시편인 T\_5\_5와 C\_5\_5의  $R$ 은 각각 99.2% 및 99.0%이었는데, 코팅되지 않은 제올라이트 비드로 제조된 시편인 N\_5\_5와 N\_0\_5에서도 각각 99.4% 및 99.1%로 비슷한 수준에 있었다. 반면,  $R_2$ 가 표층과 기층에서 모두 2.5%인 시편(N\_2.5\_2.5)의  $R$ 은 98.2%로서  $R_2$ 가 5%

인 시편들 보다 다소 낮았다. 결과적으로 콘크리트 투수블록은 코팅소재에 관계없이 제올라이트 비드를 표층 및 기층에 모두 2.5% 이상 첨가하거나 기층에만 5%를 첨가할 때에 98% 이상의 SO<sub>x</sub>의 제거율을 확보할 수 있다.

### 3.2 NO<sub>x</sub> 제거율

Figure 6과 7에는 콘크리트 투수블록 시편에서 측정된 시간에 따른 NO<sub>x</sub>의 농도변화를 나타내었다. 시간에 따른 SO<sub>x</sub>의 농도변화의 경향과 동일하게 제올라이트 비드가 첨가되지 않은 콘크리트 투수블록 시편인 N\_0\_0에서도 시간이 증가함에 따른 NO<sub>x</sub>의 농도가 급격하게 증가하여 50분만에 1ppm에 도달하였다. 이러한 경향은 코팅되지 않은 제올라이트 비드가 첨가된 콘크리트 투수블록 시편들(N\_2.5\_2.5, N\_5\_5 및 N\_0\_5)에서도 비슷하였다. 즉 TiO<sub>2</sub> 분말 또는 야자각 분말로 코팅되지 않은 제올라이트 비드가 첨가된 콘크리트 투수블록 시편의 NO<sub>x</sub>의 R은 0%이었다. 반면 야자각 분말로 코팅된 제올라이트 비드가 첨가된 시편인 C\_5\_5에서 시간에 따른 NO<sub>x</sub> 농도의 증가율은 가장 낮았는데, 이 시편의 R은 12.5%이었다. 또한 Figure 7에 나타난 바와 같이 TiO<sub>2</sub> 분말로 코팅된 제올라이트가 첨가된 콘크리트 투수블록 시편의 R은 11.8%이었다. 결과적으로 콘크리트 투수블록은 TiO<sub>2</sub> 분말 또는 야자각 분말을 코팅한 제올라이트 비드를 5% 첨가할 때에 약 12%의 NO<sub>x</sub>의 제거율을 확보할 수 있다.

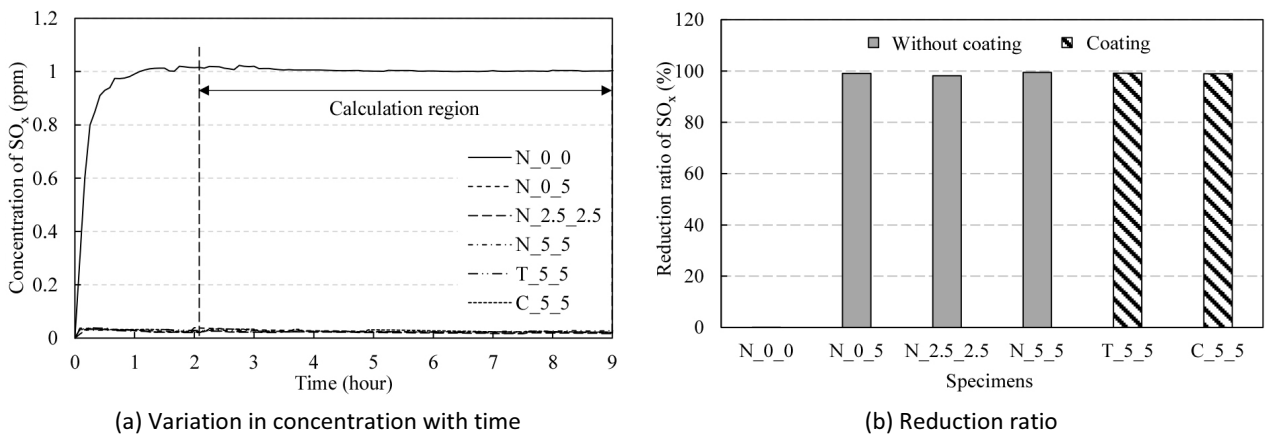


Figure 5. SO<sub>x</sub> removal rate

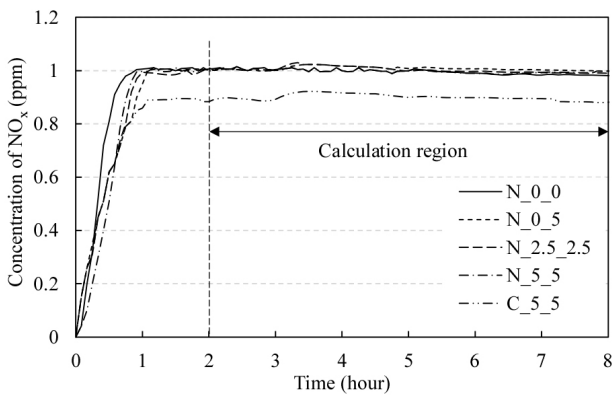


Figure 6. NO<sub>x</sub> removal rate(not using UV)

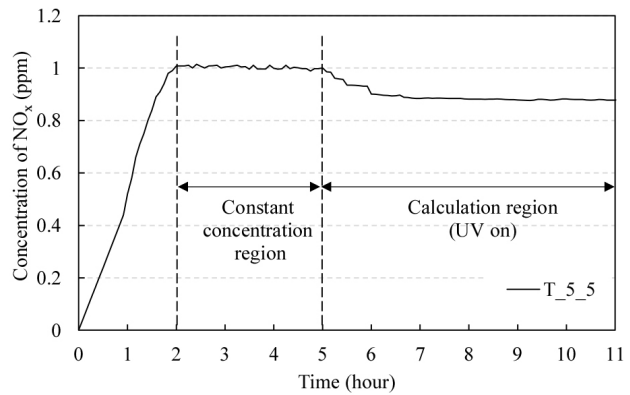


Figure 7. NO<sub>x</sub> removal rate(using UV)

### 3.3 전 공극률

Figure 8에는 콘크리트 투수블록 시편의 전 공극률을 나타내었다. 제올라이트 비드가 첨가되지 않은 콘크리트 투수블록 시편인 N\_0\_0의 전 공극률은 21%로서 일반적으로 사용하고 있는 콘크리트 투수블록에서 얻어진 값(평균15%)[25]보다 높았다. 반면 제올라이트 비드가 첨가된 콘크리트 투수블록 시편들(N\_2.5\_2.5, N\_5\_5 및 N\_0\_5)의 전 공극률은 13%~16%로 제올라이트 비드가 첨가되지 않은 N\_0\_0의 시편 보다 평균 34% 낮았다. 특히 전 공극률은 제올라이트 비드가 많이 첨가된 콘크리트 투수블록 시편에서 더 낮았다. 제올라이트 비드가 2.5% 첨가된 시편인 N\_2.5\_2.5의 전 공극률은 16%로서 5% 첨가된 시편에서 얻어진 전 공극률(13%~14%) 보다 약 1.2배 높았다. 이는 구형의 제올라이트 비드가 입형이 고르지 않은 부순 잔골재 보다 콘크리트 투수블록 내의 공극을 메우는데 용이하기 때문이다[12]. 특히 TiO<sub>2</sub> 분말과 야자각 분말로 코팅된 제올라이트 비드가 첨가된 콘크리트 투수블록의 전 공극률(T\_5\_5와 C\_5\_5)은 평균 12.5%로 가장 낮은 값을 보였다. 이러한 이유는 코팅에 의해 제올라이트 비드의 표면에 막이 형성되어 내부의 공극이 전 공극률에 미치는 영향이 감소되었기 때문이다[8].

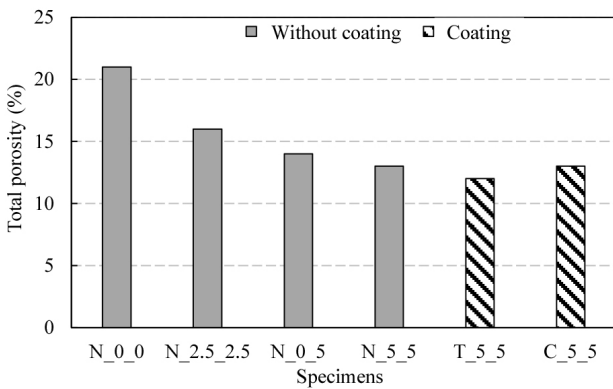


Figure 8. Total porosity

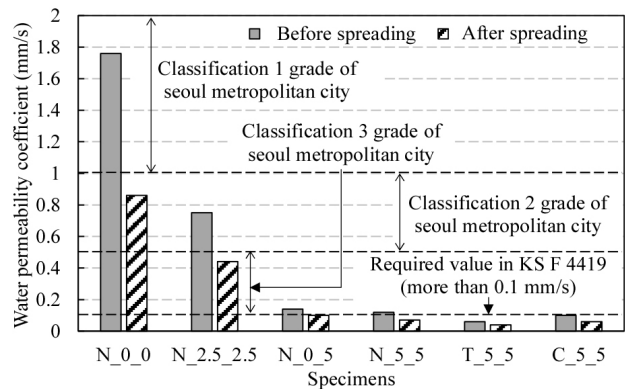


Figure 9. Water permeability coefficient

### 3.4 협잡물 오염 전·후의 투수계수

일반적으로 콘크리트 투수블록의 투수계수는 공극률에 미치는 영향이 현저하다[24]. 따라서 콘크리트 투수블록의 투수계수는 이전의 절에서 분석된 전 공극률과의 관계를 중점적으로 분석하였다. Figure 9에 나타난 바와 같이 콘크리트 투수블록 시편의 투수계수는 전 공극률이 증가함에 따라 증가하였는데, 전 공극률이 가장 높은 N\_0\_0의 시편(제올라이트 비드가 첨가되지 않은 콘크리트 투수블록)에서 1.76mm/s로 가장 높았다. 특히 전 공극률이 가장 낮은 시편인 T\_5\_5와 C\_5\_5(TiO<sub>2</sub> 분말과 야자각 분말로 코팅된 제올라이트 비드가 첨가된 콘크리트 투수블록)의 투수계수는 각각 0.06mm/s 및 0.10mm/s로 다른 시편들 보다 낮은 값을 보였다. 이 값들은 협잡물의 오염에 의해 현저한 영향을 받았다. 협잡물 오염 후의 콘크리트 투수블록의 투수계수도 전 공극률이 증가함에 따라 증가하였지만, 그 증가 기울기는 오염 전의 시편에서 측정된 투수계수보다 작았다. 결과적으로 협잡물의 오염 후 투수블록 시편의 투수계수는 전반적으로 오염 전의 시편 보다 낮았는데, 그 낮음의 정도는 전 공극률이 증가할수록 현저하였다. 전 공극률이 가장 높은 시편인 N\_0\_0에서 오염 후의 투수계수는 0.86mm/s로서 오염전의 시편 보다 약 51% 낮았다. 반면, 전 공극률이 가장 낮은 시편인 T\_5\_5와 C\_5\_5에서 오염 후의 투수계수는 0.04mm/s 및 0.06mm/s로서 오염전의 시편 보다 각각 33% 및 40% 낮았다.

한편, 전 공극률이 13% 이상인 협잡물 오염전의 콘크리트 투수블록의 투수계수는 KS F 4419[17]에서 제시하고 있는 투수



계수를 만족하였다. 서울특별시의 투수블록포장 설계, 시공 및 유지관리 기준[19]에서 제시하고 있는 투수지속성 등급을 기준으로 전 공극률이 13~14%인 시편에서 3등급으로, 16%인 시편에서 2등급으로, 그리고 21%인 시편에서 1등급으로 평가될 수 있었다. 이에 반해 협잡물 오염후의 콘크리트 투수블록의 투수계수는 전 공극률이 14% 이상에서 KS F 4419[17]에서 제시하고 있는 투수계수를 만족하였다. 또한 서울특별시의 투수블록포장 설계, 시공 및 유지관리 기준[19]에서 제시하고 있는 투수지속성 등급을 기준으로 전 공극률이 14~16%인 시편에서 3등급으로, 그리고 21%인 시편에서 2등급으로 평가될 수 있었다.

### 3.5 휨강도

Figure 10에는 콘크리트 투수블록 시편의 휨강도를 나타내었다. 제올라이트 비드가 첨가된 콘크리트 투수블록 시편의 휨강도는 5.3~5.5MPa로서 제올라이트 비드가 첨가되지 않은 시편 보다 다소 낮았다. 이에 대한 코팅 소재의 영향은 미미하였다. 한편, 이 값들은 KS F 4419[17]와 서울특별시의 투수블록포장 설계, 시공 및 유지관리 기준[19]에서 제시하고 있는 값인 4MPa와 5MPa 보다 각각 평균 1.36배 및 1.08배 높았다. 이로부터 제올라이트 비드가 첨가되더라도 콘크리트 투수블록에서 KS F 4419[17]와 서울특별시의 투수블록포장 설계, 시공 및 유지관리 기준[19]을 만족할 수 있는 충분한 휨 강도를 확보할 수 있음을 확인하였다.

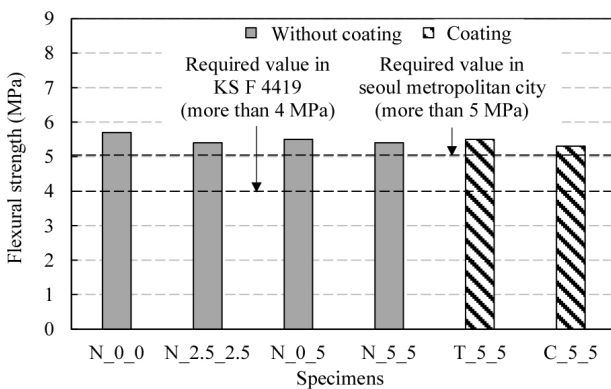


Figure 10. Flexural strengths

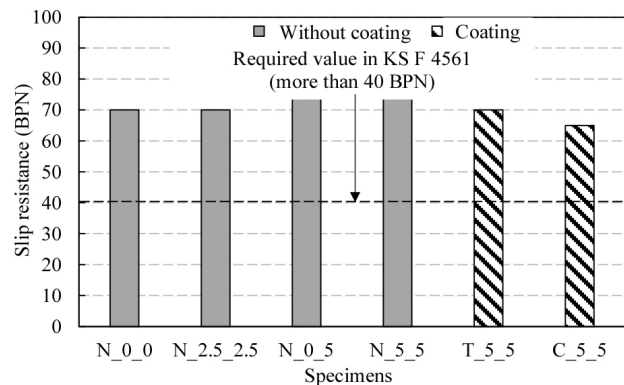


Figure 11. Slip resistance

### 3.6 미끄럼저항성

Figure 11에는 콘크리트 투수블록 시편의 미끄럼저항성을 나타내었다. 콘크리트 투수블록 시편의 미끄럼저항성은 65~75BPN이었는데, 이에 대한 제올라이트에 코팅된 소재의 종류와 제올라이트 비드 치환율의 영향은 미미하였다. 이들 값들은 KS F 4561[18]의 기준 보다 평균 1.75배 높았다. 이로부터 표층에 5% 수준의 제올라이트 비드가 첨가되더라도 충분한 미끄럼저항성을 확보할 수 있음을 확인하였다.

### 3.7 실험결과에 기반한 콘크리트 투수블록의 제작방법 제시

3.1절과 3.2절에서 분석된 결과를 기반으로  $\text{SO}_x$ 와  $\text{NO}_x$ 를 동시에 제거할 수 있는 콘크리트 투수블록을 제조하기 위해서는 표층에서  $\text{TiO}_2$  분말 및 야자각 분말로 코팅된 제올라이트 비드의 첨가가 필요하다.  $\text{TiO}_2$  분말 및 야자각 분말로 코팅된 제올라이트 비드가 콘크리트 투수블록의 표층에만 임베디드 되어도 평균 99%의  $\text{SO}_x$  제거율과 평균 12.2%의  $\text{NO}_x$  제거율의 성능을 발휘할 수 있는 콘크리트 투수블록을 제조할 수 있다. 다만,  $\text{TiO}_2$ 는  $\text{NO}_x$ 의 분해를 위해 UV가 필요하므로 낮 시간

대에서만 그 제거능력이 발휘되는 단점이 있다. 따라서  $TiO_2$ 와 비슷한  $NO_x$ 의 제거율을 확보하면서도 UV가 필요하지 않은 야자각 분말로 코팅된 제올라이트 비드의 첨가가  $SO_x$ 와  $NO_x$ 를 동시에 제거하는데에 유리한 것으로 판단된다.

3.3~3.6절에서 분석된 결과를 기반으로 표층에서 야자각 분말로 코팅된 제올라이트 비드의 첨가는 KS F 4419[17]와 KS F 4561[18]에서 제시된 값을 만족하는 5.3MPa의 휨강도와 65BPN의 미끄럼저항성을 발휘할 수 있는 콘크리트 투수블록을 제조할 수 있다. 하지만, 이 재료의 첨가는 코팅에 의한 제올라이트 비드 표면의 막 형성으로 전 공극률을 감소시키고 이로 인해 투수계수가 급격히 낮아지는 단점이 있다. 특히, 서울특별시의 투수블록포장 설계, 시공 및 유지관리 기준[19]에서 제시하고 있는 투수지속성 등급을 기준으로 야자각 분말로 코팅된 제올라이트 비드가 첨가되는 콘크리트 투수블록은 협잡물 오염 전 및 후에 각각 3등급 및 4등급으로 평가되기 때문에 투수계수를 개선할 수 있는 방안이 필요하다. 이러한 고찰을 기반으로 Table 3에는  $SO_x$ 와  $NO_x$ 를 동시에 제거할 수 있는 콘크리트 투수블록 제작용 배합표를 나타내었다(Table 3).

**Table 3.** Optimal mixture proportions of concrete permeable blocks

Layer	W/C	S/C	Unit contents(kg/m <sup>3</sup> )					Zeolite bead coated with coconut shell activated carbon
			Water	Cement	Silica sand	Crushed aggregate	Zeolite bead	
Surface	0.23	4.38	98	425	1,769	-	-	92
Base	0.40	3.65	180	451	-	1,562	82	-

W/C = water-to-cement ratio by weight, S/C = total aggregate-to-cement ratio by weight

## 4. 결론

이 연구에서는 황산화물( $SO_x$ ) 및 질소산화물( $NO_x$ )을 제거할 수 있는 소재를 코팅한 제올라이트 비드를 이용하여 제조된 콘크리트 투수블록의 대기전구물질의 제거율을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 제올라이트 비드가 2.5% 이상 첨가된 콘크리트 투수블록의  $SO_x$  제거율은 코팅소재 또는 코팅여부에 관계없이 98% 이상이었다.
- 2)  $TiO_2$  분말 또는 야자각 분말로 코팅된 제올라이트 비드가 첨가된 콘크리트 투수블록의  $NO_x$  제거율은 각각 11.8% 및 12.5% 이었다.
- 3) 투수계수에 현저한 영향을 미치는 전 공극률은 제올라이트 비드의 첨가량이 가장 높은 투수블록(5%)에서 12~14%로 가장 낮은 값을 보였다.
- 4) 협잡물 오염전 콘크리트 투수블록의 투수계수는 가장 높은 전 공극률을 갖는 투수블록(21%)에서 1.76mm/s로 가장 높은 값을 보였으나, 전 공극률이 가장 낮은 투수블록( $TiO_2$  분말과 야자각 분말로 코팅된 제올라이트 비드가 첨가)의 투수계수는 각각 0.06mm/s 및 0.10mm/s로 가장 낮은 성능값을 보였다.
- 5)  $TiO_2$  분말과 야자각 분말로 코팅된 제올라이트 비드가 첨가된 콘크리트 투수블록의 투수계수는 협잡물 오염후 0.04mm/s 및 0.06mm/s로서 오염전 보다 각각 33% 및 40% 낮았다.
- 6) 콘크리트 투수블록의 휨 강도 및 미끄럼저항성은 코팅소재 또는 제올라이트 비드의 첨가량에 관계없이 KS기준에서 제시된 값을 만족하였다.
- 7) 실험결과를 기반으로 표층에서 야자각 분말로 코팅된 제올라이트 비드의 5% 첨가는 자외선이 없는 환경에서도  $SO_x$ 와  $NO_x$ 를 동시에 제거하면서 KS 기준에서 제시하고 있는 휨 강도 및 미끄럼저항성을 확보할 수 있는 콘크리트 투수블록의 제조가 가능함을 확인하였다.

## 요약

이 연구의 목적은 황산화물(SO<sub>x</sub>) 및 질소산화물(NO<sub>x</sub>)을 제거할 수 있는 소재를 코팅한 제올라이트 비드를 이용하여 제조된 콘크리트 투수블록의 대기전구물질의 제거율을 평가하는데 있다. 대기전구물질인 SO<sub>x</sub>와 NO<sub>x</sub>를 제거하기 위해서 사용된 소재는 이산화티타늄(TiO<sub>2</sub>) 분말과 야자각 분말이며, 이 두 소재를 제올라이트 비드에 코팅하였다. 시편은 실제 공장 생산라인을 이용하여 제올라이트 비드가 임베디드된 콘크리트 투수블록을 제작하였다. 실험결과 표층에서 야자각 분말로 코팅된 제올라이트 비드가 첨가된 콘크리트 투수블록의 SO<sub>x</sub>와 NO<sub>x</sub> 제거율은 각각 12.5% 및 99%로서 다른 블록보다도 우수한 성능을 발휘하였다. 또한, 휨 강도 및 미끄럼저항성은 각각 5.3MPa 및 65BPN 이상으로 KS F 4419 및 KS F 4561에서 제시된 값을 만족하였다. 반면, 투수계수는 서울특별시의 투수블록 포장 설계, 시공 및 유지관리 기준으로 헐잡물 오염 전후에 각각 3 및 4등급으로 낮은 투수성을 보였다. 결과적으로 표층에서 야자각 분말로 코팅된 제올라이트 비드의 첨가는 충분한 휨강도 및 미끄럼저항성을 확보하면서 자외선에 관계없이 SO<sub>x</sub>와 NO<sub>x</sub>를 동시에 제거할 수 있지만, 투수성이 낮으므로 이에 대한 보완이 필요하다.

키워드 : 대기전구물질, 콘크리트 투수블록, 제올라이트 비드, 코팅


## Funding


Not applicable.

## Acknowledgement

This work was supported by the Technology development Program(S3302388) funded by the Ministry of SMEs and Startups(MSS, Korea).

## ORCID

Jun-Seo Park,  <http://orcid.org/0000-0003-4151-3868>

Keun-Hyeok Yang,  <http://orcid.org/0000-0001-5415-6455>

## References

1. Jiang K, Yu H, Chen L, Fang M, Azzi M, Cottrell A, Li K. An advanced, ammonia-based combined NO<sub>x</sub>/SO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> emission control process towards a low-cost, clean coal technology. *Applied Energy*. 2020 Feb;260:114316. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114316>
2. Kim BH, Kim JH. Simultaneous removal of NO<sub>x</sub> and dioxins by adsorbents/catalysts. *Journal of Korea Society of Waste Management*. 2008 Dec;25(8):683-9.
3. Choi YJ, Choi KJ, Lee CS, Hwang TS. Behaviour of acidic gases (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>) adsorption on aminated PP-g-AAc ultrafine fibrous ion exchanger. *Polymer-Korea*. 2009 Mar;33(1):72-8.
4. Kim SH, Kim BJ, Shin CH, Kim SJ. Theoretical investigation for the adsorption of various gases (CO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>) on the BN and AlN sheets. *Journal of the Korean Chemical Society*. 2017 Feb;61(1):16-24. <https://doi.org/10.5012/jkcs.2017.61.1.16>

5. Song YW. Experiment on reduction of pollutants in titanium dioxide photocatalytic ventilation system. *LHI Journal of Land, Housing, and Urban Affairs*. 2022 Jul;13(2):117-23. <https://doi.org/10.5804/LHIJ.2022.13.2.117>
6. Jung YW, Chang CH, Kim JK. Manufacture and characteristics of concrete sidewalk blocks using photocatalyst agent. *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*. 2019 Dec;7(4):423-30. <https://doi.org/10.14190/JRCR.2019.7.4.423>
7. Lee JU. Evaluation on the removing efficiency of atmospheric precursors of concrete permeable blocks embedding porous particles coated with photocatalyst [master's thesis]. [Suwon (Korea)]: Kyonggi University; 2021. 77 p.
8. Lee JU, Yang KH, Mun, JH. Evaluation of NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> removal capacities of foam concrete aggregates coated with TiO<sub>2</sub>. *Journal of the Architectural Institute of Korea*. 2020 Sep;36(9):195-201. <https://doi.org/10.5659/JAIK.2020.36.9.195>
9. Hong SJ, Lee SW. An experimental study for the construction of photocatalytic method concrete road structure. *International Journal of Highway Engineering*. 2013 Dec;15(6):1-9. <https://doi.org/10.7855/IJHE.2013.15.6.001>
10. Seo DW, Yun TS. Experimental study on capacity variation of paving materials with TiO<sub>2</sub> in wet condition. *Journal of the Korean Geotechnical Society*. 2016 May;32(5):49-55. <https://doi.org/10.7843/kgs.2016.32.5.49>
11. Sim JH, Yang KH. Evaluation of the nitrogen oxide (NO<sub>x</sub>) removal capacities of the permeable block according to the TiO<sub>2</sub>-mixing ratio. *Proceedings of the Korea Concrete Institute Conference*; 2021 Nov 3-5; Gyeong-ju, Korea. Seoul (Korea): the Korea Concrete Institute; 2021. p. 649-50.
12. Yang KH, Mun JH. Air pollutants removal rates of permeable blocks embedded with zeolites. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2022 Feb;34(1):3-11. <https://doi.org/10.4334/JKCI.2022.34.1.003>
13. Seo, DI. A study on the degradation reaction of dye with UV or visible light-TiO<sub>2</sub> [master's thesis]. [Seoul (Korea)]: The University of Seoul; 2016. 84 p.
14. Yang KH, Mun JH, Lee JU. Removal rates of NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, and fine dust particles in textile fabrics coated with zeolite and coconut Shell activated carbon. *Applied Sciences*. 2020 Nov;10(22):8010. <https://doi.org/10.3390/app10228010>
15. ISO 22197-1, Test Method for Air-Purification Performance of Semiconducting Photocatalytic Materials - Part 1: Removal of Nitric Oxide. Geneva (Switzerland): International Organization for Standardization; 2007.
16. Bong CK, Kim YG, Lee JH, Bong HK, Kim DS. Mutual comparison between two the real-time optical particle counter for measuring fine particles. *Journal of the Korean Society of Urban Environment*. 2015 Jun;15(3):219-26.
17. KS F 4419, Concrete interlocking block for sidewalk and road. Seoul (Korea): Korean Agency for Technology and Standards; 2022.
18. KS F 4561, Braille blocks for the visually impaired. Seoul (Korea): Korean Agency for Technology and Standards; 2021.
19. Seoul Metropolitan City. Standard for Design, Construction, and Maintenance of Pavement Using Permeable Block. Seoul (Korea): Metropolitan Government; 2013.
20. Zhang D, Jia D. Toughness and strength improvement of diglycidyl ether of bisphenol-A by low viscosity liquid hyperbranched epoxy resin. *Journal of Applied Polymer Science*. 2006 May;101(4):2504-11. <https://doi.org/10.1002/app.23760>
21. Lim TK, Lee JH, Mun JH, Yang KH, Ju SH, Jeong SM. Enhancing functionality of epoxy-TiO<sub>2</sub>-embedded high-strength lightweight aggregates. *Polymers*. 2020 Oct;12(10):2384-94. <https://doi.org/10.3390/polym12102384>
22. Choi YJ, Oh JH, Han SI, Ahn JH, Shin HS. Elastic modulus and layer coefficient of permeable block pavements based on plate load tests. *Journal of the Korean Geotechnical Society*. 2017 Dec;33(12):75-80. <https://doi.org/10.7843/kgs.2017.33.12.75>
23. Yoo BY, Lee WG, P SJ, Kim DY, Lee SS. Properties of permeable block using artificial permeable pipe and polymer powder VAE to improve permeability. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*. 2018 Oct;18(5):447-53. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2018.18.5.447>
24. Japan Concrete Institute. ECO Concrete Technical Committee Report. Tokyo (Japan): Japan Concrete Institute; 1995. 684 p.
25. Lee CH, Lee AR, Shin EC, Ryu BH. Experimental study on reducing effect for surface temperature of recycled synthetic-resin permeable block. *Journal of Korean Geosynthetics Society*. 2019 Mar;18(1):79-89. <https://doi.org/10.12814/jkgss.2019.18.1.079>