



미생물토양시트를 충전한 도로포장용 다공성 콘크리트의 제조 및 수질정화특성

Preparation and Water Quality Purification of Permeable Concrete Pavement Filled with Microbial-Soil Sheet

강영현^{1*} · 황필기¹ · 강선홍²

Young-Heoun Kang^{1*} · Pil-Gi Hwang¹ · Seon-Hong Kang²

1 녹스코리아(주), 2 광운대학교 환경공학과

(2009년 10월 15일 접수, 2009년 10월27일 채택)

Abstract

This study was performed to investigate the physical characteristics like compressive strength, permeability, porosity and the water quality removal characteristics of permeable concrete pavement filled with microbial-soil sheet to remove SS, organic matter and nutrients in artificial rainfall. As a result, it can show the removal efficiency is SS 90~95%, COD 85~93%, BOD 80~83%, T-N 61~75%, T-P 71~78% on WAPS I (W1) and WAPS II (W2). Therefore, permeable concrete pavement filled with microbial-soil sheet shows higher removal efficiency(SS 10%, organic matter and nutrients 30%) than a conventional porous concrete(W3). By filling microbial-soil sheet to permeable concrete pavement, we confirm that the function and efficiency are improved significantly and that a naturally-friendly facility can be developed and applied to treat non-point sources.

Key words : Permeable Concrete Pavement, Microbial Adsorbent Layer, Removal ratio

주제어 : 투수성 콘크리트 포장, 미생물 흡착층, 제거효율

1. 서론

기존의 도로포장은 노상의 지지력을 확보하고자 하는 도로의 안정성을 우선적으로 지향하는 이유로 대부분이 아스팔트 콘크리트나 콘크리트 포장이 주를 이루고 있다. 그러나 지상과 지하생태환경의 단절로 인해 포장하부의 토양생태계 및 지하수 유입의 장애요인으로 지적되고 있다. 강우 시 자연상태의 지반에서는 약 40%의 증발산과 50%의 지반침투, 그리고 10%만이 지표면을 따라 유출되지만 불투수성 콘크리트 포장은 10%만이 지반으로의 침투가 이루어지며 50%이상은 지표면을 따라 유출되어 지하수자원의 부족 현

상을 초래하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 지반과의 충분한 투수성과 통기성을 확보하여 지반 생태계와 도로포장과의 생태적 단절을 최소화하는 투수성 도로 포장이 대두되고 있으며 보도, 자전거도로, 주차장 등을 중심으로 시공실적이 증가하고 있다. 이러한 투수성 도로는 빗물을 지하로 침투시켜 지하수자원을 풍부하게 하고, 도로 표면 요철구조에 의한 미끄럼 저항이 높아 우천시 차량사고 예방에 기여하고, 자동차 주행시 타이어에 의해 발생하는 소음저감효과와 포장부의 축열작용이 적다는 장점을 가지고 있다. 종래의 투수성 콘크리트 포장 관련 연구는 주로 토목공학적인 측면이 대부분을 차지하고 있으며, 최근 수질

* Corresponding author Tel:+82-2-504-5892, Fax:+82-2-504-5894, E-mail: ka9838@naver.com(Kang, Y.H.)

Table 1. Physical characteristics and chemical composition of portland cement

비중	비표면적 (cm ² /g)	함량(%)												
		강열감량	불용잔물	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅
3.13	3.30	0.6	0.1	63.8	22.1	5.0	3.0	2.0	1.6	0.54	0.35	0.30	0.13	0.11

Table 2. Physical characteristics of rock aggregate

입경(mm)	비중(20℃)	밀도(kg/cm ³)	흡수율(%)	실적율(%)
5~10	2.5	1,438	0.9	55.3
20~40	2.5	1,870	0.9	60.6

Table 3. Characteristics of epoxy hardener

항목	YD-128
EEW(g/eq)	184~190
점도(cps, 25℃)	11,500~13,500
Hy-Cl(wt.%)	최대 0.05
비중(20℃)	1.17
색상	최대 0.5

Table 4. Chemical composition of hwangto

성분	강열감량	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	기타
함량(%)	3.0	77.7	1.8	12.6	7.9

Table 5. Chemical composition of black shale

성분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	기타
함량(%)	54.7	24.7	1.2	6.9	0.93	0.22	2.6	5.7

환경측면에서의 접근을 시도하는 연구결과들이 있으나 소수성 유기물과 중금속제거에 제한되어 있다(민지은 외, 2004).

이에 본 연구에서는 기존의 일반화된 투수성 포장에 미생물 중균액을 식중환 황토와 블랙세일을 혼합한 미생물토양시트를 충전함으로써 물리/화학적 흡착과 미생물의 생물학적 처리작용을 통해 수질정화능을 증대시킨 기능성 투수성 포장체의 제조와 자연형 비점오염저감시설 중 유공포장로의 적용성을 타진하는데 그 목적이 있다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 실험재료

투수성 콘크리트 제조에 사용된 소재로는 시멘트, 고성능 AE 감수제, 에폭시, 경화제, 조립 및 세립 골재를 사용하였

다. 각각의 소재특성은 Table 1~3에 나타내었다.

노면에 노출되는 상부 투수성 콘크리트층에는 바인더로서 각각 시멘트와 에폭시를 사용하였다. 황토와 블랙 세일의 특성을 Table 4와 Table 5에 나타내었다.

수질정화실험에 사용한 원수는 과천시 환경사업소 유입수와 약품을 일정량 물에 혼합하였으며, SS농도를 높이기 위해 적당량의 흙을 투입하여 인공원수를 제조하였다.

2.2 실험장치

수질정화실험용 수조는 철제로 제작하였으며 수위 및 유체흐름 등을 관찰하기 위해 전면부는 모두 아크릴판으로 하였다. 수조의 유효크기는 W300×L1,00×H400이며 원수 저류용으로 600L P.E. 물탱크를 사용하였다. 원수를 수조로 이송하기 위해 60L/min 용량의 급수펌프를 사용하였으며 급수량을 적정하게 조절하도록 토출측 배관에 바이패스

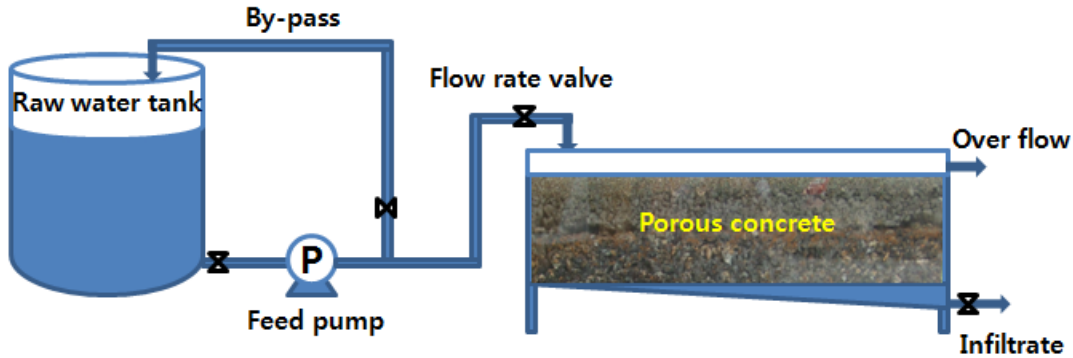


Fig. 1. Schematic diagram of experimental facility

라인을 설치했다. 침투속도 조절 및 침투수 채수를 위해 하부측면에 샘플링 포트를 구성하여 밸브로 조절할 수 있도록 하였다(Fig. 1).

2.3 실험방법

2.3.1 품질시험

수질정화용 투수성 콘크리트의 품질시험을 위해 공시체를 제작하여 압축강도, 투수계수, 공극율을 측정하였다. 압축강도는 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법)에 준하여 실시하였고, 투수계수는 일본콘크리트공학협회 “다공성 콘크리트의 투수계수 시험방법(안)”에 준하여 측정하였다(한국표준협회, 2001).

전공극율과 연속공극율의 측정은 일본콘크리트공학협회의 “다공성 콘크리트의 공극율 시험방법(안)” 중 용적법에 준하여 산출하였다(日本コンクリート工学協会, 1995).

품질시험을 위한 공시체 제작을 위해 보통 포틀랜드 시멘트 페이스트의 플로우값을 $150 \pm 7\%$ 로 조정하였고, 일본콘크

리트공학협회(JCI)의 “다공성 콘크리트의 공시체 제작법”에 따라 시멘트 페이스트를 몰탈믹서로 2~3분간 비빔한 후 골재와 시멘트 페이스트를 재투입하여 3~5분간 혼합하였다. 압축강도시험용은 $\varnothing 100 \times 200\text{mm}$, 투수시험 및 공극율시험용은 $\varnothing 75 \times 150\text{mm}$ 크기의 몰드에 채우고 다져서 성형한 후 2일 습윤양생(온도 20°C , 습도 80%), 26일 수중양생(수온 20°C)을 실시하여 공시체를 제작하였다.

2.3.2 수질정화실험

수질정화시험체로 사용한 도로포장의 구조는 모두 3가지 타입(WAPS I, WAPS II, 기존 투수성 콘크리트 포장)으로 구성하였으며, 기본적으로 현장에서 실시하는 시공방법과 동일하게 구성하였다(Table 6).

양생방법과 기간은 공시체 제작과 동일하며 미생물에 대한 시멘트의 고알칼리 영향을 억제하기 위해 WAPS I과 WAPS II에 충전 될 투수성 콘크리트는 재령 7일에 인산이 암모늄($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$) 15% 용액으로 24시간 침적하여 중

Table 6. Formation of porous pavement for water quality purification

구성요소 \ 포장체	WAPS I (W1)	WAPS II (W2)	일반 포장 (W3)	비고		
				입경	두께	소재
세립투수콘크리트	○	○	○	3mm(WAPS I) / 5~10mm(WAPS II)	30mm / 20mm	콩자갈(WAPS I) / 쇄석(WAPS II)
조립투수콘크리트	○	○	○	25~40mm	60mm	쇄석
미생물+황토+블랙 세일 분말혼합체	○	○	×	-	10mm	-
보조기층	○	○	○	20~40mm	100mm	쇄석
기층	×	×	×	-	-	-

※바인더: WAPS I의 세립투수콘크리트만 에폭시, 나머지는 시멘트풀 사용.

Table 7. Water analysis items and methods

분석항목	분석방법
수온	Mercury thermometer
pH	pH meter(HI8424-HANA)
DO	DO meter(DO-5511)
SS	Vacuum Filtration(Glass Fiber Filter, GF/C)
BOD ₅	Azide Modification
COD _{Mn}	Closed Reflux, Titrimetric Method
T-N	Ultraviolet Spectrophotometric Method
T-P	Ascorbic Acid Method

화처리를 하였다. 인산이암모늄은 약산으로 시멘트 중의 알칼리를 중화하고 생성된 인산염은 난용성이기 때문에 알칼리의 용출을 억제할 수 있다.

원수유입량은 국내 강우사상의 영향을 고려하여 강우강도 30~210mm/hr의 범위로 하였으며 하부 침투속도는 20~200mm/hr로 조절하였다. 실험시간은 4시간, 그리고 채수는 30분 간격으로 실시하였다.

실험에 사용된 인공원수와 처리수의 수질분석은 수질오염공정시험법(환경부, 2007)에 준하여 이루어 졌으며 수질분석항목으로는 수온, pH, DO, SS, BOD, COD_{Mn}, T-N, T-P를 기준으로 하였다. Table 7에 수질항목별 분석방법을 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 압축강도

WAPS I의 표층용 투수성 콘크리트로는 자연석, 에폭시 및 경화제를 무게비로 33.3 : 1.1 : 1의 비율로 배합한 것을 대상으로 하였다. 자연석 3mm를 사용하였을 때 압축강도는 350kgf/cm²로 나타났다. 기타 세립 및 조립 투수성 콘크리트는 시멘트 대 골재비를 1 : 5.7로 배합하였으며 골재크기에 따른 압축강도의 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 골재 5~10mm와 25~40mm의 크기로 제작된 투수성 콘크리트의 재령 7일째의 압축강도는 각각 92kgf/cm²와 97kgf/cm²로 유사하게 나타났으나 재령 28일의 경우는 각각 123kgf/cm²와 115kgf/cm²으로 확인되었다(Fig. 2). 이는 골재입도가 작을수록 골재와 결합체간의 접촉면적이 증가하여 압축강도가 향상되는 것으로 사료된다.

3.2 투수계수

Fig. 3은 골재크기에 따른 투수계수를 나타내고 있다. 실험에 사용된 투수성 콘크리트의 투수계수는 1.30~4.90cm/s

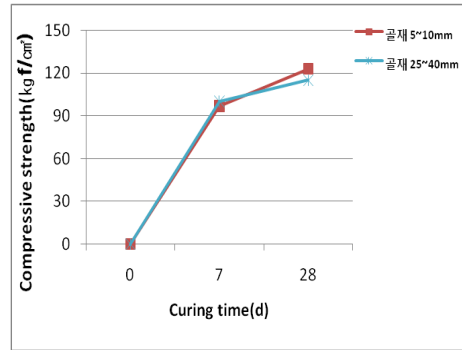


Fig. 2. Variation of compressive strength as a function of aggregate size and curing time

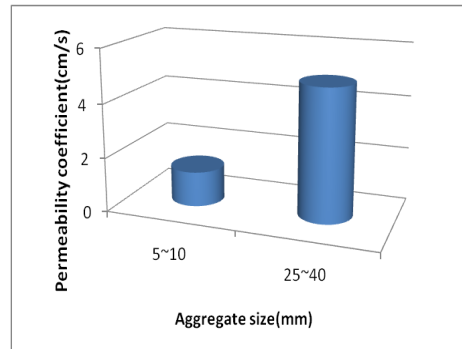


Fig. 3. Permeability coefficient as a function of aggregate size

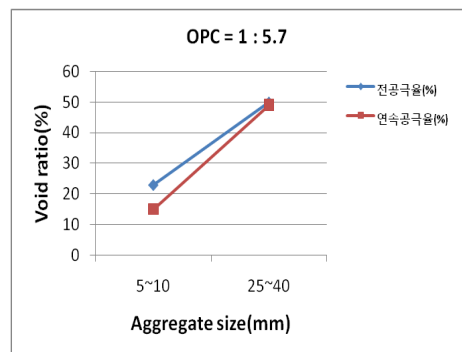


Fig. 4. Void ratio as a function of aggregate size

로 나타났다. 또한 자연석을 이용한 표층용 투수성 콘크리트의 투수계수는 2.7cm/s로 확인되었다. 따라서 자체 제작한 투수성 콘크리트는 다공성콘크리트의 투수계수 규정치인 0.1cm/s를 상회하는 것으로 나타났다.

3.3 전공극율 및 연속공극률

Fig. 4는 골재크기에 따른 전공극율과 연속공극율의 경향을 보여주고 있으며 골재크기가 커짐에 따라 모두 증가하는 것으로 나타났다. 25~40mm 골재의 경우 전공극율과 연속공

극울간의 차이가 거의 없는 것으로 나타나 공극이 유효한 상태로 존재하게 된다. 또한 자연석(3mm)을 이용한 표층용 투수성 콘크리트의 공극율은 약 15%로 확인되었다.

3.4 수질정화실험

3.4.1 pH 및 DO 고찰

수질정화실험기간 사용한 유입원수의 성상은 **Table 8**과 같다. 시멘트 페이스트를 이용하여 제작한 투수성 콘크리트의 pH 영향을 저감하고자 WAPS I (W1)과 WAPS II (W2)에 충전된 투수성 콘크리트는 재령 7일에 인산이암모늄((NH₄)₂HPO₄) 15% 용액으로 24시간 침적하여 중화처리를 하였다. 중화처리한 투수성 콘크리트의 pH는 8.9~9.5의 약알칼리성을 나타내었으며 실험 중의 pH는 7~9범위를 유지하여 미생물의 생물학적 활동에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다. 반면 pH 중화처리를 하지 않은 기존 투수성 콘크리트 포장(W3)은 유입수의 pH와는 상관없이 pH 11대로 측정되었다.

*Bacillus subtilis*를 종균한 포장체 WAPS I 과 WAPS II 그리고 종균하지 않은 기존 투수성 콘크리트 포장에서의 미생물 활동을 가능하기 위해 용존산소농도의 변화량을 측정하였다. 원수의 DO가 8.6mg/L일 때 미생물을 종균한 WAPS I 과 WAPS II에서는 모든 강우강도에서 약 0.6~2.1mg/L의 용존산소 소모양상을 보였으며, 특히 침투속도가 20mm/hr의 경우, 반응조내에서의 체류시간이 상대적으로 증가하여 미생물에 의한 대사작용이 뚜렷하였음을 확인할 수 있었으나 미생물을 종균하지 않은 기존 투수성 콘크리트 포장에서는 침투속도가 20mm/hr 이외의 조건에서는 DO농도가 증가하는 양상을 나타냈다. 또한, 침투속도가 증가할수록 DO농도가 증가하여 미생물이 충분한 대사작용에 필요한 체류시간이 짧은 것으로 나타났다.

Table 8. Characteristics of Influent for water quality purification experiment

항목	유입수 농도
수온(°C)	20.7~27.3(23.6)
pH	6.7~7.6(7.09)
DO(mg/L)	7.8~8.8(8.3)
SS(mg/L)	109~125(115)
BOD ₅ (mg/L)	37~53(43)
COD _{Mn} (mg/L)	46~55(51.5)
T-N(mg/L)	10.1~16.8(13.2)
T-P(mg/L)	2.01~3.93(3.41)

3.4.2 SS 및 유기물질 제거효율 고찰

침투시간에 따른 SS 제거효율은 침투속도가 증가할수록 다소 감소하는 경향을 보였으며, 포장체 종류에 따른 제거효율면에서는 미생물토양시트를 충전한 WAPS I (W1)과 WAPS II (W2)가 기존 투수성 콘크리트 포장(W3) 보다 약 5~10%정도 높은 것으로 확인되었다. 이는 미생물토양층 자체가 물리적인 흡착-여과필터의 기능을 함으로써 제거효율 증대에 기여한 것으로 사료된다. 침투속도 20mm/hr을 기준으로 했을 때, SS 제거효율을 정리하면 WAPS I 과 WAPS II는 90~95%, 기존 투수성 콘크리트 포장은 82~85%를 보이고 있다.

강우강도와 침투속도에 따른 포장체별 COD 및 BOD 제거효율 패턴도 침투속도가 증가함에 따라 감소하였으며, 미생물토양시트가 충전되지 않은 기존 투수성 콘크리트 포장의 경우 제거효율이 현저히 저하되는 것으로 나타났다. 침투속도 20mm/hr을 기준으로 했을 때, COD 제거효율은 WAPS I (W1)이 90~93%, WAPS II (W2)가 85~92% 그리고 기존 투수성 콘크리트 포장(W3)은 62~67%로 측정되었다. 또한 BOD의 경우도 WAPS I 과 WAPS II가 80~83%, 기존 투수성 콘크리트 포장은 훨씬 낮은 50% 정도의 제거효율을 나타내었다. 이와 같은 현상은 보조기층 상부에 충전된 황토, 블랙세일의 유기물 흡착과 투입된 종균 미생물의 생물학적 산화/분해에 의한 것으로 사료되며 다공성 콘크리트와 골재로 사용된 쇄석 또한 미생물이 서식할 수 있는 담체로서의 역할을 충분히 하기 때문으로 판단된다. 강우강도 및 침투속도에 따른 포장체별 BOD 제거효율을 **Fig. 5**에 나타내었다.

3.4.3 영양염류 제거효율 고찰

침투속도 20mm/hr에서 T-N 제거효율은 WAPS I (W1)과 WAPS II (W2)가 60~75%, 기존 투수성 콘크리트 포장(W3)은 약 45~60% 정도의 제거효율을 나타내었다(**Fig. 6**). 질소성분의 경우는 흡착제에 의한 제거보다는 미생물의 대사작용에 의해 대부분 분해된다.

T-P의 제거효율 또한 WAPS I 과 WAPS II가 70~78%로 나타났으며, 기존 투수성 콘크리트 포장은 50~62%의 제거효율을 보였다(**Fig. 7**). T-P의 제거는 주로 미생물토양시트를 구성하는 황토와 블랙세일의 흡착에 의해 제거되는 것으로 판단되며, 이 외에 미생물체 유기물로 의 전환에 의한 것과 유리되는 무기인산염 즉, PO₄³⁻-P이 투수성 콘크리트에서 유리되는 철, 칼슘, 마그네슘과 같은 양이온과 반응하여 난용성 염을 형성하기 때문인 것으로 사료된다.

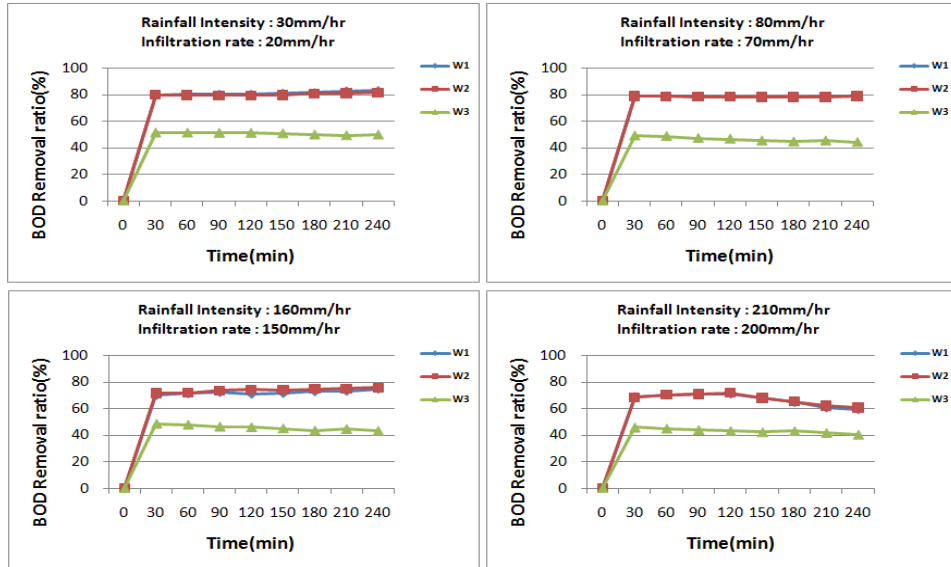


Fig. 5. Variation of BOD as a function of rainfall intensity and infiltration rate

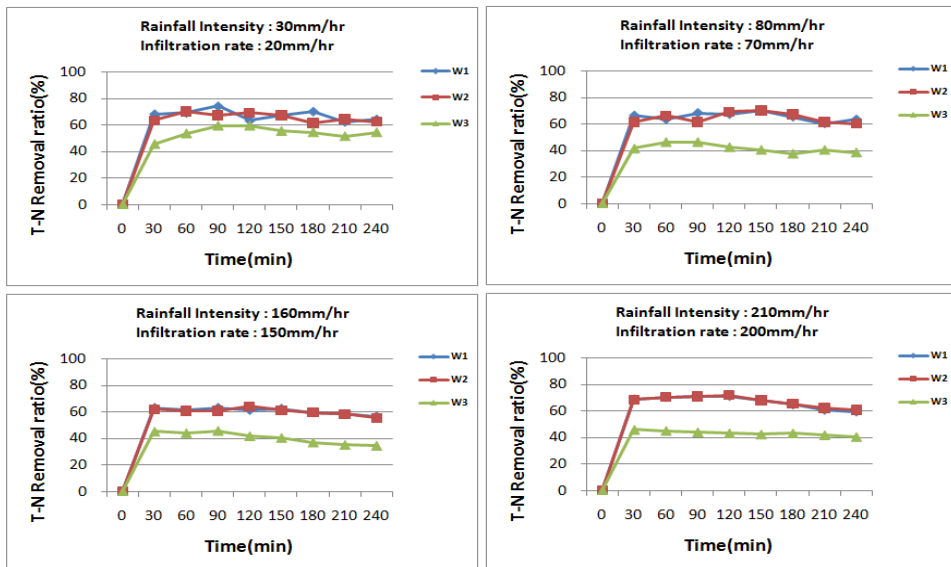


Fig. 6. Variation of T-N as a function of rainfall intensity and infiltration rate

4. 결론

본 연구에서는 수질정화기능을 부여한 투수성 콘크리트 포장을 이용하여 비점오염저감능력을 평가하였다. 이를 위해 투수성 콘크리트를 자체 제작하였으며 공시체의 압축강도, 투수계수 및 공극율 등을 측정하였으며, 수질정화기능을 부여하기 위해 미생물을 식중환 황토 및 블랙세일의 혼합분말체인 미생물토양시트를 충전한 후 실험적 연구를 수행하

였으며, 그에 대한 결론을 다음과 같이 도출할 수 있었다.

(1) 투수성 콘크리트 공시체의 기본적인 물성 확인 실험에서는 골재 5~10mm와 25~40mm의 크기로 제작된 투수성 콘크리트의 채령 7일제의 압축강도는 각각 92kgf/cm²와 97kgf/cm²로 유사하게 나타났으나 채령 28일제의 경우는 각각 123kgf/cm²와 115kgf/cm²로 확인되었으며, 이는 골재입도가 작을수록 골재와 결합재간의 접촉면적이 증가하여 압축강도가 향상되는 것으로 나타났다.

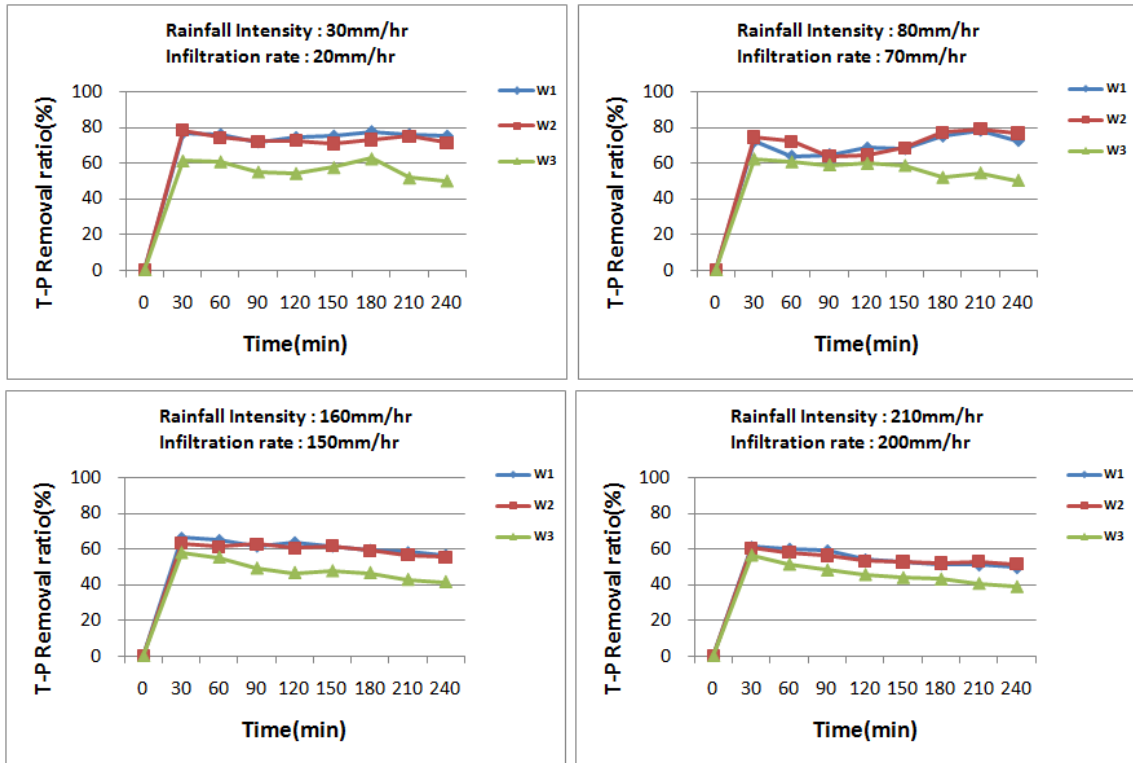


Fig. 7. Variation of T-P as a function of rainfall intensity and infiltration rate

(2) 공시체의 투수시험에 따른 투수계수의 변화는 골재 크기가 일정할 경우, 시멘트 대 골재비가 증가할수록 거의 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 실험결과 투수성 콘크리트의 투수계수는 1.30~4.90cm/s로 측정되어 다공성 콘크리트의 투수계수 규정치인 0.1cm/s를 상회하는 것으로 나타났다.

(3) 전공극율과 연속공극율을 측정한 결과, 골재 5~10mm는 각각 23%, 15% 그리고 골재 25~40mm는 50%, 49%인 것으로 확인되었다. 결국, 일정한 투수성을 확보하기 위해서는 사용하는 골재입도를 균일하게 하고 일정크기 이상의 골재를 사용하여 유효공극율(또는 연속공극율)을 높게 유지해야 한다.

(4) 미생물에 대한 pH 영향을 고려하여 WAPS I과 WAPS II는 중화처리를 하였으며, 실험강우강도 범위내에서 pH 7~9범위를 보여 미생물의 생물학적 활동에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단된다. 침투속도 20mm/hr을 기준으로 했을 때, SS 및 COD, BOD의 제거효율은 WAPS I과 WAPS II에서 약 80~95%를 보여 유기물 제거효율이 우수한 것으로 나타났다. 또한, 영양염류인 T-N과 T-P 제거효

율도 WAPS I과 WAPS II가 60~80%로 나타나 전반적으로 수질정화기능이 크게 향상되는 것으로 확인되었다.

(5) 본 실험적 연구를 통해 기존 투수성 콘크리트 시공시 미생물토양시트를 충전함으로써 투수성을 유지함과 동시에 수처리 효율이 우수한 자연형 비점오염원저감시설로서의 적용가능성을 확인하였다. 이로써 고부가가치의 투수성 콘크리트 포장을 현실화시킬 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 日本コンクリート工学協会 (1995), *エココンクリート 研究委員会報告書*, pp.15-80.
2. 민지은, 박재우 (2004), Black shale을 이용한 소수성 유기오염물질과 중금속의 동시제거 연구, *대한토목학회논문집*, 제24권 제6B호, pp.603-608.
3. 한국표준협회 (2001), *KS핸드북(콘크리트·레미콘)*, pp.110-868.
4. 환경부 (2007), *수질오염공정시험법*.