

친환경 도로포장용 투수콘크리트의 제조와 이를 이용한 도로포장시스템의 수질정화특성

홍 중 현 · 김 문 훈 · 양 철 신*
탐라대학교 토목환경공학과, *제주도 보건환경연구원
(2006년 6월 23일 접수; 2006년 11월 7일 채택)

Development of Environmentally Favorable Porous Concrete and Water Purification Characteristics by the Pavement System

Chong-Hyun Hong, Moon-Hoon Kim and Churl-Shin Yang*

Department of Civil & Environmental Engineering, Tamna University, Seogwipo 697-340, Korea
*Jeju Institute of Public Health & Environmental Research, Jeju 690-815, Korea
(Manuscript received 23 June, 2006; accepted 7 November, 2006)

Stormwater pollution is a major problem in urban areas. Pollutants like heavy metals and harmful chemicals in the runoff can endanger soil and ground water, when they are not sufficiently removed during infiltration. Strength and infiltration capacity of porous concrete are the major problems that must be considered if permeable pavement system are demanded to be used in a drive way application. In this study, a series of compacted porous concrete mixtures and the system of pavement are tested for the physical characteristics like compressive strength, flexural strength, unit weight, porosity, water permeability, and the purification capacity of contaminated water. The test results obtained indicate that the strength and infiltration capacity of porous concrete are strongly related to its matrix proportion and compaction energy and providing adequate filter layers underneath pavement surface course is one of the most important design considerations of permeable pavement system for pollution retention purpose.

Key Words : Porous concrete, Permeable pavement system, Filter layer, Compaction energy, Pollution retention

1. 서 론

종래의 보통 콘크리트 도로와 아스팔트 콘크리트 도로는 불투성 포장으로서 우수는 표면을 통해 배수구로 일시에 유출되어 도심지내 지하 생태계와 지하수 유입에 장애 요인으로 지적되고 있다. 대안으로 우수가 지하로 침투할 수 있는 투수성 도로 포장이 제시되어, 보도, 자전거도로, 주차장 등을 중심으로 적용이 확대되고 있다. 투수성 도로 포장의 장점은, 우수를 지하로 침투시켜 지하수 유입에 도움을 주고 지하 생태계를 유지시키며, 도로

표면 요철에 의한 미끄럼 저항이 높아 우천시 차량의 미끄럼 방지에 따른 교통사고 예방에 기여하며, 자동차 주행시 타이어에 의해 발생하는 에어펌핑 소음을 감소하는 효과가 있고, 표면 공극이 많기 때문에 포장부의 축열용량이 적고 방열이 쉬운 구조로서 주변 지역의 온난화 방지에 도움이 된다. 그리고, 요철에 의한 자연스런 느낌의 미적효과가 있다¹⁾. 반면에 투수성 도로 포장의 단점으로는, 건조수축 과다로 균열이 쉽게 발생하고, 10% 이상의 높은 공극률 형성에 따른 강도저하로 인해 보행도로 위주로 적용되고, 시공 능력에 따라 강도와 투수율 변동이 크며, 가격이 상대적으로 비싸다. 특히, 농약 살포지역과 제조업 및 중공업 지역 등 지하수 오염이 예상되는 일부 지역에서는 우수 침투에 의한 지하수 오염 가능성에 대하여 보고되어 투

Corresponding Author : Chong-Hyun Hong, Department of Civil & Environmental Engineering, Tamna University, Seogwipo 697-340, Korea
Phone: +82-64-735-2115
E-mail: jhhong@tnu.ac.kr

수성 도로 포장의 적용이 제한되어야 한다는 연구 발표도 있다^{2,3}). 종래의 투수 콘크리트 포장 관련 연구는 폴리머⁴), 실리카흙⁵), 섬유⁶)와 같은 혼화재를 사용한 강도 보강 연구, 장기 내구성 연구⁷), 골재의 입도 조정 및 입형 개선을 통한 투수율 증진 연구⁸), 그리고, 수문학적 측면에서 투수효과⁹)에 대한 연구가 다양하게 수행되었으나, 오염된 우수가 지하로 스며드는 경우의 수질 정화 관련 연구는 아직 전무한 편이다. 뿐만아니라, 투수 콘크리트의 제조 및 시공방법¹⁰)을 동시에 고려한 연구도 시급한 실정이다. 즉, 도로포장용 투수 콘크리트의 제조법과 시공법에 대한 공인기준이 없기 때문에, 일선 현장에서는 결합재의 사용범위, 다짐정도, 그리고 다짐방법에 대한 고려 없이 시공되고 있다. 중차량의 통행을 목적으로 투수성 도로포장이 시공되는 경우, 강도를 우선하다 보면, 결합재의 량이 많아지고, 과도한 다짐이 수행되며, 따라서 투수율이 현저히 낮아진다. 반면에 충분한 투수율을 확보하기 위해 결합재의 량을 줄이고, 다짐이 낮아지면, 강도 확보가 어려워 콘크리트 포장의 균열발생과 내구성에 문제가 있게 된다. 즉, 강도와 투수율을 동시에 만족할 수 있는 제조법과 시공법에 대한 표준시방서의 제정이 시급한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 친환경 도로 포장용 투수 콘크리트 제조시 강도증진을 목적으로 실리카흙을 혼화재로 사용하고, 다짐에너지와 결합재의 량에 따라 강도, 단위중량, 투수율, 공극률 등의 물리적 특성을 파악하여 투수 콘크리트의 제조방법과 투수성 도로 포장의 시공기준에 대하여 연구하였으며, 중금속과 농약이 함유된 오염수가 지하로 침투하는 경우를 대비하여, 본 연구에서 제시하는 기능성 필터층을 추가 조성하여 투수 포장 시스템의 수질정화능력에 대하여 실험적 연구를 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료

본 연구에 사용된 투수 콘크리트는 시멘트, 혼화재, 고성능 AE 감수제(air-entraining and water-reducing agent), 굵은 골재로 제조된다. 시멘트는 Table 1과 같은 국내 S사의 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였고, 혼화재는 Table 2와 같은 물리적 특성의 실리카흙을 사용하였다. 실리카흙은 시멘트 비표면적의 50~80배에 이르는 초미립 분말로 시멘트 입자사이의 공극을 충전하여 Micro filler 효과와 포졸란 효과를 유발하여 시멘트 페이스트의 단기 강도 및 장기 강도를 높이는 역할을 한다. 뿐만아니라 물-시멘트비가 낮은 경우 시멘트 페이스트의 점도를 높여서 투수 콘크리트의 높은 공극을 유

지시키는 역할을 한다. 고성능 AE 감수제는 Table 3과 같은 특성을 갖는 나프탈렌 설폰산염 고축합물계를 사용하였다. 굵은골재는 Table 4 및 5와 같은 제주도 제주시 애월읍에서 생산된 현무암 계열의 쇄석골재로 최대치수 13 mm의 78호 골재를 사용하였고, 골재의 입형과 강도가 우수한 골재를 선별 사용하였다. 필터층에는 유해물질의 흡착 용도로 스코리아(scoria)와 활성탄을 사용하였다. 스코리아는 우리나라 제주도에 방대한 량이 매장되어있는 다공성이면서 적절한 강도를 지니고 있으며, 특히 가격이 저렴한 재료로서 이의 물리적 특성을 Table 7에 나타내었다¹¹). 또한 본 연구에서 사용된 활성탄의 물리적 특성은 Table 8에 나타내었다. 활성탄은 세공(micropore)이 잘 발달되어 유해물질의 흡착능력이 매우 우수한 장점이 있으나, 가격이 높은 단점이 있으므로¹²), 본 연구에서는 경제성을 고려하여 스코리아와 활성탄을 혼합하여 사용하였다.

2.2. 실험방법

배합설계는 Table 9에 요약하였다. 사전에 수차례 예비실험 한 결과, 골재와 결합재의 혼합비율을

Table 1. Physical properties of cement

Specific gravity	Blaine (cm ² /g)	Stability (%)	Setting time (hr:min)		Compressive strength(MPa)		
			Ini.	Fin.	3 days	7 days	28 days
3.15	3,245	0.12	3:50	5:40	245	309	416

Table 2. Physical properties of silica fume

Specific gravity	Bulk loose density(kg/m ³)	Specific surface area (cm ² /g)	Fineness (ave.dia)(μ m)
2.2	250-300	200,000	0.1-1

Table 3. Properties of high performance AE water reducing agent

Type	Color	Main component	Specific gravity
Liquid	Dark brown	Naphtalene sulphonate	1.2±0.02

Table 4. Gradation of coarse aggregate

Test item	Percent passing(%)						Fineness modulus
	20 mm	13 mm	10 mm	5 mm	2.5 mm	1.2 mm	
Crushed stone	100.0	100.0	68.0	17.1	5.3	2.3	6.07

Table 5. Physical properties of coarse aggregate

Test items	Particle density (g/cm ³)	Water absorption (%)	Soundness index (%)	Passing of 0.08mm sieve (%)	Solid content (%)	LA abrasion index (%)	Bulk density (kg/L)
Crushed stone	2.79	1.87	2.70	0.30	57.2	27.8	1.675

Table 6. Gradation of scoria fine aggregate

Test item	Percent passing(%)					Fineness modulus
	10 mm	5 mm	1.2 mm	0.3 mm	0.15 mm	
Scoria	100	88	44	22	11	3.37

Table 7. Physical properties of scoria fine aggregate

Test items	Particle density (g/cm ³)	Water absorption (%)	Soundness index (%)	Passing of 0.08mm sieve (%)	Unit weight (kg/L)	Solid content (%)
Scoria	2.05	9.16	7.4	0.7	0.78	41.5

Table 8. Physical properties of activated carbon

Test items	Particle size (%)	Moisture (%)	Bulk density (g/ml)	Hardness number (%)	Iodine number (mg/g)
Activated carbon	97.2	3.2	0.43	96.7	1,120

변수로 두고, 혼화제로 사용된 실리카흙은 결합재의 5% 비율, 고성능 AE 감수제는 시멘트의 1% 비율, 그리고 물-결합재비는 25%에서 배합비를 결정하고 실험을 수행하였다. 비빔은 100 ℓ 강제식 팬타입 믹서(동아시아기계, DA-305)를 이용하여 시멘트, 실리카흙, 및 굵은골재를 넣고 건비빔을 30초간 행한 후, 고성능 AE 감수제가 혼합된 물을 첨가하여 1분 30초간 비빔을 행한 후 토출하였다. 압축강도, 휨강도, 투수시험, 공극률, 단위중량을 시험하기 위한 공시체 제조는 Table 10과 같은 다짐방법을 사용하였다. 휨강도 시험용 공시체 제조의 경우는 Table 11과 같은 다짐방법을 사용하였다. 원주형 공시체의 경우, 2.5 kg의 램머를 30 cm 높이에서 자유낙하하여 생콘크리트 다짐회수에 따라 해당하는 다짐에너지를 계산하였다. 빔 타입 공시체의 경우, 원주형 공시체와 동일한 다짐에너지를 유지하기 위해 다짐회

수를 조절하여 공시체를 제조하였다. 공시체의 양생은 온도 20±2°C, 습도 50±10%의 실험실 조건하에서 비닐을 이용한 기건양생을 하였다. 양생 28일 후 강도, 투수시험, 및 수질정화시험을 수행하였다.

압축강도, 휨강도 그리고 투수계수 시험은 KS F 2405 콘크리트의 압축강도 시험 방법, KS F 2408 콘크리트의 휨강도 시험 방법과 KS F 2385 투수성 아스팔트 혼합물의 투수시험방법에 따라 시험하였다. 공극률 시험은 JCI 기준에 따라 Φ100×200인 시험체를 재령 28일에 식(1)으로 산출하였다.

$$P_o = \left\{ 1 - \frac{W_2 - W_1}{V} \right\} \times 100 \quad (1)$$

여기서 P_o = 투수 콘크리트의 공극률(%), W_1 = 공시체의 수중중량(g), W_2 = 24시간 방치 후 기건중량(g), V = 시험체의 용적(cm³)이다.

Table 9. Mixture proportion details

Mix No.	Aggregate-binder ratio(weight)	Aggregate (kg/m ³)	Cement (kg/m ³)	Silica fume (kg/m ³)	Admixture (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	Water-binder ratio (%)
1	4 : 1	1675	397	21	3.97	105	25
2	5 : 1	1675	318	17	3.18	84	25
3	6 : 1	1675	265	14	2.65	70	25
4	7 : 1	1675	227	12	2.27	60	25

Table 10. Compaction levels for cylindrical specimens

Compaction levels	Compaction energy (cm-kgf/cm ³)	Number of blows	Rammer application	Mold specimen (cm)
1	0.72	3 layers, 5 blows/layer	weight 2.5 kg, height 30 cm	cylinder 10*20
2	1.43	3 layers, 10 blows/layer	weight 2.5 kg, height 30 cm	cylinder 10*20
3	2.15	3 layers, 15 blows/layer	weight 2.5 kg, height 30 cm	cylinder 10*20
4	3.58	3 layers, 25 blows/layer	weight 2.5 kg, height 30 cm	cylinder 10*20

Table 11. Compaction levels for beam-shaped specimens

Compaction levels	Compaction energy (cm-kgf/cm ³)	Number of blows	Rammer application	Mold specimen (cm)
1	0.72	2 layers, 59 blows/layer	weight 2.5 kg, height 30 cm	beam 15*15*55
2	1.43	2 layers, 118 blows/layer	weight 2.5 kg, height 30 cm	beam 15*15*55
3	2.15	2 layers, 177 blows/layer	weight 2.5 kg, height 30 cm	beam 15*15*55
4	3.58	2 layers, 295 blows/layer	weight 2.5 kg, height 30 cm	beam 15*15*55

수질정화실험은 Fig. 1과 같은 투수 콘크리트 포장 단면을 제조하여 수행하였다. 제조방법은 내경 100 mm의 PVC 상수도 파이프를 사용하여, 저면에 천(cloth)을 설치하고, 8-30 mesh의 활성탄을 3 cm 두께로 포설하고, 스코리아 잔골재를 5 cm 두께로 포설한 후, Table 10의 다짐레벨 2의 조건으로 다져서 흡착능력을 발휘하는 필터층을 조성하였다. 필터층 상부에 보조기층용 혼합골재를 15 cm 두께로 포설하고 다짐레벨 4의 조건으로 다진 후, Table 9의 배합비 3의 조건으로 투수 콘크리트를 제조한 후, Table 10의 다짐레벨 3의 조건으로 다진 후 28일간 양생하여 수질정화 시험용 투수성 도로 포장 단면을 제조하였다. 수질정화실험의 분체에 의한 예비시험에 사용된 농약은 Dr. Ehrenstofer사 제품인 Tebuconazole(TBC) 표준품이었고, Column 흡착시험에 사용하였던 농약 수용액은 저농도인 2 ppm 용액과 고농도인 20 ppm 용액을 각각 10 ℓ로 제조하기 위해 동부한농의 호리큐어(유효성분 Tebuconazole 25% 제품)유제를 1,000 ppm으로 희석제조하여 Dr. Ehrenstofer사 제품의 표준용액으로

2차 정량을 하여 각각 고농도와 저농도 수용액을 제조하였다. 중금속의 Pb와 Cd의 시험용액은 Spectrosol BDH Labatory Supplies사 제품의 1,000 ppm 표준용액을 각각 희석하여 사용하였고, Zn시험용액은 화광순약공업사의 Zn 1,000 ppm 표준용액을 각각 희석하여 시험용액으로 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 강도 및 투수특성

Fig. 2는 골재-결합재 비와 다짐에너지에 따른 투수 콘크리트의 압축강도를 나타낸 그래프이다. 골재-결합재 비가 (4:1) > (5:1) > (6:1) > (7:1) 순으로 압축강도가 높아지고, 다짐에너지가 3.58 > 2.15 > 1.43 > 0.72 (cm-kgf/cm³) 순으로 압축강도가 높아짐을 알 수 있다. 즉, 골재-결합재의 비가 동일하더라도 다짐에너지를 달리하면 압축강도가 큰 폭으로 변동한다는 것을 알 수 있다. Fig. 3의 휨강도 시험에서도 압축강도 시험과 동일한 결과가 나타났다. Fig. 4는 투수 콘크리트의 단위중량과 압축강도와의 관계에 대한 그래프이다. 다짐에 의한 단면의 밀실도에 의해 단위중량이 변화하고, 그에 따라 압축강도도 변화하는데, 단위중량이 증가할수록 압축강도 또한 증가한다. Fig. 5는 단위중량에 따른 공극률을 나타낸 것이다. 즉, 다짐이 증가할수록, 단위중량이 높아지고 따라서 공극률이 낮아지는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 다짐에너지, 골재-결합재비, 그리고 공극률의 관계를 나타낸 그래프로서 A는 골재, B는 결합재를 의미한다. 다짐에너지가 증가할수록 공극률이 감소하고, 동일한 다짐에너지를 적용할 경우 골재-결합재 비가 증가할수록 공극률 또한 증가함을 알 수 있다. Fig. 7은 단위중량과 투수계수의 관계를, Fig. 8은 공극률과 투수계

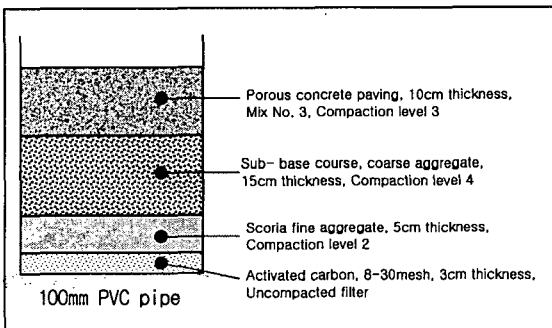


Fig. 1. Cross-section of permeable pavement.

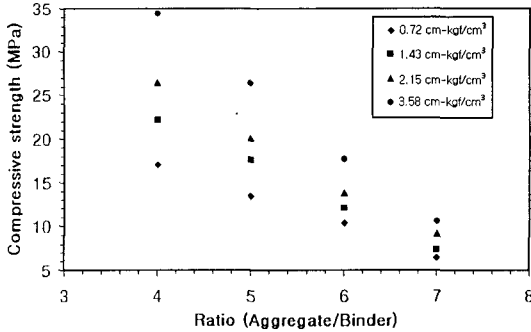


Fig. 2. 28-day sealed compressive strength versus ratio of aggregate to binder.

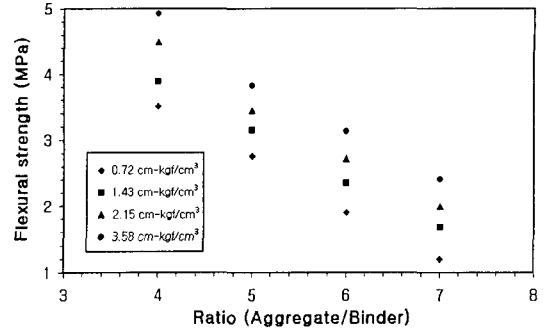


Fig. 3. 28-day flexural strength versus ratio of aggregate to binder.

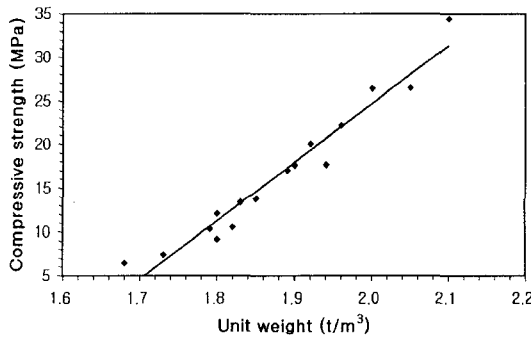


Fig. 4. 28-day sealed compressive strength versus unit weight.

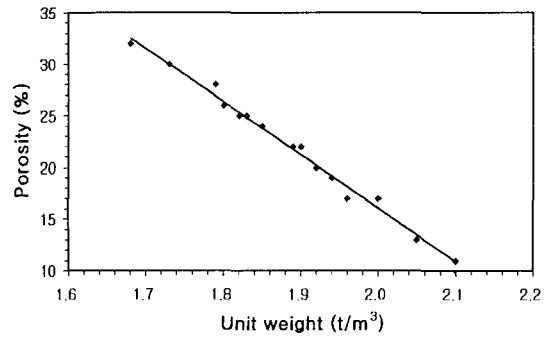


Fig. 5. 28-day porosity versus unit weight.

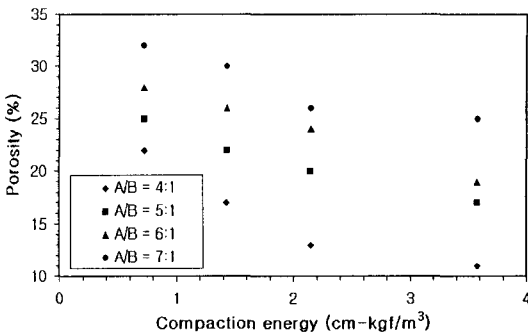


Fig. 6. 28-day porosity versus compaction energy.

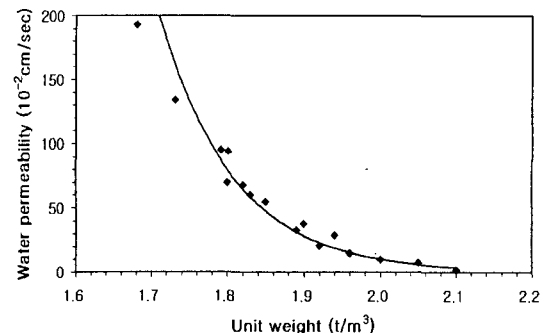


Fig. 7. 28-day water permeability versus unit weight.

수의 관계를 나타낸 그래프이다. 또한, Fig. 9는 압축강도와 투수계수의 관계를 나타낸 그래프이다. 공극률이 증가하면 투수계수는 지수 스케일로 증가하고, 단위중량이 증가하면 투수계수는 지수 스케일로 감소하며, 압축강도가 증가할수록 투수계수가 지수 스케일로 감소함을 알 수 있다. 실험결과로부터 투수 콘크리트의 강도, 단위중량, 그리고 투수율은 골재-결합재비와 다짐에너지에 따라 결정되는 것으로 판단된다. 한편, 투수 콘크리트가 도로포장에 적용되는 경우, 강도를 기준하는 경우 압축강도는 18 MPa 이상 그리고 휨강도는 3 MPa 이상 발휘하고 투수율은 최소 0.1 cm/sec 이상을 발휘하는

것이 바람직하다. 따라서, 투수 콘크리트 제조에 사용되는 골재-결합재의 비는 4~5 범위이고, 투수성 도로포장 시공의 경우 다짐에너지는 1.43~3.58 cm-kgf/cm³ 로 다짐을 실시하여야 하며, 경화된 투수 콘크리트의 단위중량은 1.9 t/m³ 이상이며, 공극률은 10~20%가 적당한 것으로 판단된다.

3.2. 수질정화시험

투수성 도로 포장 재질의 유해물질 흡착성능을 확인하기 위하여 시험재료의 분체에 의한 예비시험을 수행하였다. 시험분석 할 대상으로 중금속 3종(Pb, Zn, Cd)과 농약 1종(Tebuconazole; TBC)을

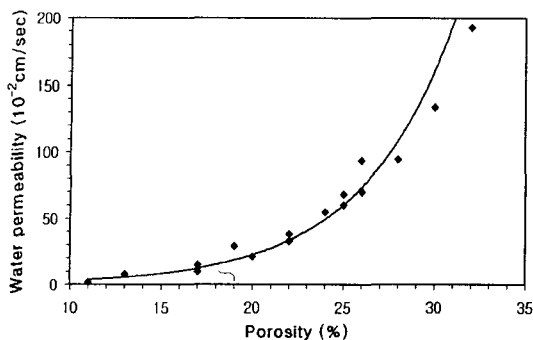


Fig. 8. 28-day water permeability versus porosity.

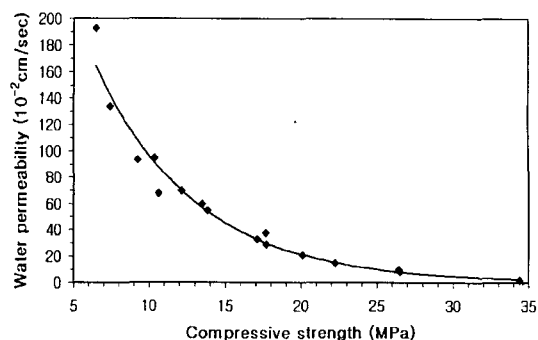


Fig. 9. 28-day water permeability versus compressive strength.

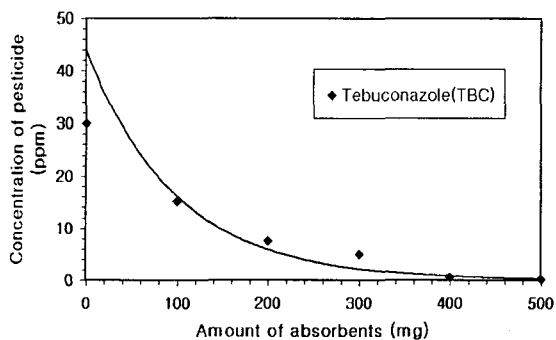


Fig. 10. Equilibrated concentration of tebuconazole depended on the amount of absorbents.

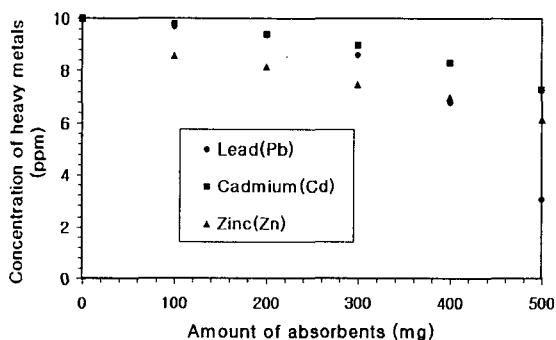


Fig. 11. Equilibrated concentration of heavy metals depended on the amount of absorbents.

사용하였고, 예비시험에 사용할 흡착재료는 투수 콘크리트, 보조기층, 필터층을 각각 No.100 체에 통과되도록 미분쇄하여 시험 하였고, 본 시험에서는 Fig. 1의 포장 구성 단면과 동일하게 각 층 단면의 체적백분율로 혼합한 시험 재료를 실제 포장 구조와 동일한 조건으로 조제하여 시험하였다. 분체를 이용한 예비 흡착 시험에서는 흡착재료의 량을 각각 달리하여 농약과 중금속 수용액의 잔류 농도를 분석하였다. 농약은 Tebuconazole 30 ppm과 중금속 용액의 경우는 Pb, Cd, Zn이 각각 10 ppm 이 되도록 하여 흡착재료를 100 mg, 200 mg, 300 mg, 400 mg, 500 mg을 정취하여 각각 50 mL 원심관에 넣고 농약과 중금속 혼합 수용액을 각각 40 mL를 가하여 48시간동안 Shaking water bath (Sangwoo, SW-90MW)에서 30°C, 170 rpm으로 shaking하여 평형에 도달하게 한 후 2500 rpm으로 5분 동안 원심분리하여 최상부의 활성탄 분말을 제거하여 상징액 20 mL를 분취하여 중금속과 농약을 분석하였다. 농약시험은 Varian 4000 GC/MS (USA)를 이용하여 Solid Phase Microextraction (SPME) 방식으로 분석하였으며, 최소 검출농도가 10 ppb 미만이 되도록 하였다. 중금속 성분인 Pb, Cd, Zn은 Perkin Elmer ICP Mass Spectrometer

(ELAN DRC-e)를 이용하여 정량하였고, 정량한계가 각각 1 ppb 미만이 되는 조건으로 분석하였다. 흡착재료의 첨가량에 따른 용액 평형농도를 고려해보면 농약을 포함한 3종의 중금속 성분들이 반비례 관계를 보이고 있으며 흡착재료에 의한 흡착 효과가 뚜렷이 나타났다. 또한, 중금속별 흡착되는 정도의 효과는 Zn>Pb>Cd 순서로 조사되었고 3개 중금속 공히 흡착이 매우 양호한 것으로 나타났다.

예비시험의 결과를 바탕으로, Fig. 1과 같은 투수성 도로 포장 단면으로 실제 포장 단면과 유사한 모의 Column을 제조한 후, 수질정화능력을 시험하였다. 시험에 앞서 다른 유출 성분들의 영향을 배제하기 위하여 수차례 Column 내의 시료를 세척하여 24시간 방치한 후, 강수량을 모사하기 위하여 강우강도 100 mm/hr를 기준하여 Column 표면적으로 환산하여 강수량 785 ml/hr가 되도록 주입량을 조절하고, 시료는 High Level과 Low Level의 pilot scale sample을 조제하였다. Column내에 시험용액을 도입할 때는 편향류 등을 배제하기 위하여 탈지면(cotton)으로 상부층을 덮어서 일정한 속도로 유출되도록 cock valve로 유량을 조절하면서 유출시켰다. Column을 이용한 연속 흡착시험에서는 흐름의 방향이 중력방향이므로 미세한 유동흐

름의 통로가 단로(short circuit)될 수 있으나, 현장에서 도로포장 시공되는 조건과 유사하게 모사하기 위하여 상향류 방식을 배제하고 하향류 방식을 채택하였다. High level은 중금속(Pb, Zn, Cd) 각각 5 ppm, 농약(TBC) 20 ppm의 수용액 10 ℓ를 조제하였고, Low level은 동일한 3종의 중금속이 각각 1 ppm과 농약이 2 ppm인 수용액 10 ℓ를 조제하여 각각을 Column에 도입하는 수용액으로 사용하였다. 조제한 수용액들을 연속적으로 2개의 Column 내에 균일하게 공급하면서 머무름 시간을 일정하게 유지시키면서 각 시간대별로 용출액을 채수하였다. 두 개의 Column에서 각기 유출하는 순서별로 H1~H10, L1~L10의 분획으로 나누었으며, 각 10 ℓ를 각 10개의 분획으로 유출시킨 결과의 1 ℓ별 분획들을 모두 회수하여 각각 중금속과 농약을 분석하여 결과를 Table 12에 나타내었다.

Column에 의한 흡착시험 결과 Pb, Zn, Cd가 각각 1 ppm인 저농도(L) 수용액의 유출수는 3종의 중금속이 전혀 유출되지 않았다. 한편 농약(TBC)에 대한 최고 유출 농도는 0.01 ppm으로 0.5% 농도 레벨의 유출이 L3와 L7분획에서 확인되었다. 이

같은 Column내에 도입된 농약의 전체량 20 mg (2.0 ppm × 10 ℓ)에 대한 유출량 0.02 mg (0.01 ppm × 1.0 L × 2 fraction)이 되기 때문에 99.9%가 Column에 흡착되었음을 보여주었다.

고농도(H) 수용액에 대한 Column 흡착시험 결과에서는 Pb, Zn, Cd의 경우 각각 5 ppm이었고, 개별 수용액이 아닌 혼합 수용액에 기인한 흡착재료의 경쟁흡착작용이 예상됨에도 불구하고 모든 분획에서 유출되지 않아, 이들 중금속에 대한 흡착능력이 높은 것으로 확인되었다. 농약(TBC) 20 ppm 수용액에 의한 흡착 형태는 농도 기준으로 최고수준이 0.3% 레벨인 0.59 ppm 수용액의 유출이 있었고, 도입한 농약성분 200 mg (20 ppm × 10 ℓ)에 대한 유출량은 2.02 mg이므로 99.0%가 Column내에 흡착되었음을 보여주었다. 탈착에 따른 유출 순서는 흡착재료에 대한 피흡착 물질의 포화점이 아닌 중간 유출지점에서 상대적으로 높게 나타난다는 점이다. 이 사실은 농약 성분의 유출이 흡착 사이트의 포화에 기인한 것이 아니라, 연속 유출당시에 발생되는 어떤 단로에 의하여 성분과 흡착재료 간에 서로 접근이 이루어지지 않았거나, 불평형적인 상태에서 농약의 유출이 일어나는 것을 보여주고 있다. 따라서 유출 속도를 줄여나가면 전형적인 용출 특성이 나타날 것으로 보인다. 필터층의 흡착재료는 농약성분은 200 mg을 도입하여도 99%이상을 흡착하였고, 또한 중금속의 경우 Pb, Zn, Cd 각각 5.0 mg을 완벽하게 흡착하기 때문에 생활 환경적 측면이나 비점오염원들에 의한 오염부하보다도 매우 많은 양이 흡착되는 것으로 판단되므로 실용단계에서는 활성탄 함량을 감소시켜 경제적 시공을 위한 한계 흡착실험의 파과점(90% 제거율)값들을 산정할 필요가 있는 것으로 판단된다. 한편, 다른 문헌과의^{13,14)} 비교를 위해 실험실이 아닌 실제 PILOT규모와, 흐름은 비상향류방식과 유속을 강우강도로 실험한 조건에서 나온 자료를 찾아볼 수 없어서 흡착재료 종류별로 단위무게에 대한 흡착물질량들을 병행하여 비교 조사할 수 없는 점에서 후속 연구가 필요한 것으로 판단된다.

Table 12. The concentration of heavy metals and pesticide in column effluent(unit : ppm)

Sequential stages	TBC	Cd	Pb	Zn
H1	0.01	0.00	0.00	0.00
H2	0.03	0.00	0.00	0.00
H3	0.02	0.00	0.00	0.00
H4	0.05	0.00	0.00	0.00
H5	0.08	0.00	0.00	0.00
H6	0.59	0.00	0.00	0.00
H7	0.57	0.00	0.00	0.00
H8	0.36	0.00	0.00	0.00
H9	0.19	0.00	0.00	0.00
H10	0.12	0.00	0.00	0.00
H-Reference	20.00	5.00	5.00	5.00
L1	0.00	0.00	0.00	0.00
L2	0.00	0.00	0.00	0.00
L3	0.01	0.00	0.00	0.00
L4	0.00	0.00	0.00	0.00
L5	0.00	0.00	0.00	0.00
L6	0.00	0.00	0.00	0.00
L7	0.01	0.00	0.00	0.00
L8	0.00	0.00	0.00	0.00
L9	0.00	0.00	0.00	0.00
L10	0.00	0.00	0.00	0.00
L-Reference	2.00	1.00	1.00	1.00

* H-High level, L-Low level, i(1~10)-sequential order of effluent volume

4. 결 론

본 연구에서는 친환경 도로포장 구성에 적용할 목적으로, 투수 콘크리트의 압축강도, 휨강도, 단위중량, 투수계수 및 포장 시스템의 수질정화 기능에 대한 실험적 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 투수성 도로 포장 시공시에 높은 투수성을 유지하면서, 강도가 높은 투수 콘크리트의 제조 및 시공이 중요한데, 본 연구에서 제시하는 적절한 골

재-결합재비와 다짐에너지를 이용하면, 투수성과 강도를 동시에 만족할 수 있는 투수성 도로 포장 가능성이 가능하다.

2) 투수성 도로 포장용 목적으로 한 투수 콘크리트의 제조와 시공에 있어서, 투수 콘크리트의 강도와 투수율을 고려할 때, 제조법에서 골재-결합재의 비는 4~5 범위이고, 시공법에서 다짐에너지는 1.43~3.58 cm-kgf/cm³ 범위인 것으로 판단되며, 골재-결합재비와 다짐에너지 기준을 표준시방서 기준으로 정하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

3) 투수성 도로 포장에 투수성과 강도를 만족하더라도 중금속이나 농약 등과 같은 유해물질을 정화과정 없이 지하로 투과시키는 경우 지하수 오염이 예상된다. 따라서, 본 연구에서는 투수 콘크리트 층의 하부에 기능성 흡착 필터층을 설치하여 흡착에 의한 유해물질을 효과적으로 제거할 수 있도록 하였다. 연구결과, 강우강도 조건을 고려한 그리고 강우 초기 비점오염원 관리에 충분한 걸보기 체적의 5배 이상에 해당되는 200 ppm의 농약은 99.0% 이상 흡착되고, 5 ppm의 중금속 성분들은 완전하게 흡착되어 특정 오염물질을 흡착 제거하였다. 따라서, 본 연구를 통해 제시되는 투수포장 시스템은 도심지의 상업지구와 공업지구에서도 적용이 가능한 기술적 해결책을 제시하였다.

4) 필터층에 사용된 흡착재료의 종류, 사용량, 경제성, 그리고 시공법에 대한 거시적 연구와 흡착 매카니즘에 대한 미시적 연구가 추가 수행될 필요가 있으며, 향후, 실제 도심지에 시공되었을 때, 오염물질의 저감효율에 대한 실측 모니터링 연구가 필요한 것으로 사료된다.

참고 문헌

- 1) 유인근, 이수형, 이승호, 2005, 배수성 포장의 환경 효과, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 3840-3843.
- 2) Pitt, R., S. Clark and R. Field, 1999, Groundwater contamination potential from stormwater infiltration practices, The Journal of Urban Water, 1, 217-236.
- 3) Francis, J. V. and H. S. Chiew, 2002, Experimental study of pollutant accumulation on an urban road surface, The Journal of Urban Water, 4, 379-389.
- 4) 이윤수, 주명기, 2002, 투수성 폴리머 시멘트 콘크리트의 기공적 성질, 한국콘크리트학회 논문집, 14(3), 402-408.
- 5) 백용관, 김재환, 유범재, 강석표, 박선규, 김무한, 2000, 포러스 콘크리트의 강도증진에 미치는 이온공극을 및 실리카흙 대체율의 영향에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 학술발표회 논문집, 20(1), 275-278.
- 6) 조광연, 권혁준, 2002, 섬유보강 포러스 콘크리트의 물리 역학적 특성에 관한 실험적 연구, 공주영상정보대학 논문집, 403-413.
- 7) Pindado, M. A., A. Aguado and A. Josa, 1999, Fatigue behavior of polymer-modified porous concretes, The Journal of Cement and Concrete Research, 29, 1077-1083.
- 8) 삼기건설산업주식회사, 1998, 단입도 투수 콘크리트 비차도용 포장 시공법, 건설교통부 신기술지정, 139, 110pp.
- 9) Schluter, W. and C. Jefferies, 2002, Modelling the outflow from a porous pavement, The Journal of Urban Water, 4, 245-253.
- 10) 홍종현, 김문훈, 류성필, 정광욱, 2006, 굵은골재 최대치수 40 mm 투수 콘크리트의 물리적 특성과 질소산화물 제거에 관한 연구, 한국환경과학회 논문집, 15(5), 431-438.
- 11) 현성수, 1999, 제주 스코리아로부터 합성된 제올라이트를 이용한 폐수 중 중금속 제거에 관한 연구, 제주대학교 대학원 환경공학과 석사학위논문, 53-64.
- 12) 박영태, 1999, 신관 활성탄-기초와 응용, 도서출판 동화기술, 107-151.
- 13) 김길성, 2000, 천연 및 합성 제올라이트의 농약 흡·탈착 특성, 제주대학교 대학원 환경공학과 석사학위논문, 25-36.
- 14) Beltran, J., F. J. Lopez and F. Hernandez, 2000, Solid-phase microextraction in pesticide residue analysis, Journal of Chromatography, A(885), 389-404.