

18CTA
P-C132
363-02

포장 공극, 폐색 입자 고려 투수성 포장 시스템의 침투 지속성 실험적 평가 기법 개발

최
종
보
고
서

2019

국
토
교
통
과
학
기
술
진
흥
원

보안 과제(), 일반 과제(o) / 공개(o), 비공개()발간등록번호()
국토교통기술촉진연구사업 제2차 년도 최종보고서

R&D / 18CTAP-C132363-02

포장 공극, 폐색 입자 고려 투수성 포장 시스템의 침투 지속성 실험적 평가 기법 개발 최종보고서

2019. 03.

주관연구기관 / 부산대학교 산학협력단
협동연구기관 / (주)에스비비
협동연구기관 / (주)더지엘

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘포장공극, 폐색 입자 고려 투수성 포장 시스템의 침투 지속성 실험적 평가 기법 개발’(연구개발 기간 : 2017. 06. 30 ~ 2018. 12. 31) 과제의 최종보고서를 제출합니다.

2019. 03.

주관연구기관명 : 부산대학교 산학협력단	(대표자)	윤 석 영	(인)
협동연구기관명 : (주)에스비비	(대표자)	이 태 형	(인)
협동연구기관명 : (주)더지엘	(대표자)	이 성 우	(인)

주관연구기관책임자: 안재훈

참여기관책임자: 이태형, 이성우

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘포장공극, 폐색 입자 고려 투수성 포장 시스템의 침투 지속성 실험적 평가 기법 개발’(연구
개발 기간 : 2017. 06. 30 ~ 2018. 12. 31) 과제의 최종보고서를 제출합니다.

2019 . 03 .

주관연구기관명 : 부산대학교 산학협력단 (대표자) 윤 석 영 (인)

협동연구기관명 : (주)에스비비 (대표자) 이 태 형 (인)

협동연구기관명 : (주)더지엘 (대표자) 이 성 우 (인)

주관연구기관책임자: 안재훈

참여기관책임자: 이태형, 이성우

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘포장공극, 폐색 입자 고려 투수성 포장 시스템의 침투 지속성 실험적 평가 기법 개발’(연구
개발 기간 : 2017. 06. 30 ~ 2018. 12. 31) 과제의 최종보고서를 제출합니다.

2019 . 03 .

주관연구기관명 : 부산대학교 산학협력단 (대표자)	윤 석 영 (인)
협동연구기관명 : (주)에스비비 (대표자)	이 태 형 (인)
협동연구기관명 : (주)더지엘 (대표자)	이 성 우 (인)



주관연구기관책임자: 안재훈
참여기관책임자: 이태형, 이성우

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	18CTAP-C13 2363-02	해당 단계 연구 기간	2017.06.30 - 2018. 12. 31	단계구분	1단계/ 1단계
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	창의도전연구			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	포장 공극, 폐색 입자 고려 투수성 포장 시스템의 침투 지속성 실험적 평가 기법 개발			
연구책임자	안재훈	해당단계 참여연구원 수	총: 34 명 내부: 28 명 외부: 6 명	해당단계 연구비	정부:370,000천원 기업:126,000천원 정부 외: 천원 계:496,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 34 명 내부: 28 명 외부: 6 명	총 연구비	정부:370,000천원 기업:126,000천원 정부 외: 천원 계:496,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	부산대학교 산학협력단			참여기업명: (주)에스비비, (주)더지엘	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과 의 보안등급 및 사유	보안등급 분류	보안	일반
	결정 사유	공통관리규정 제24조의 4항에 따른 검토 결과, 본 과제는 보안과제로 분류되어야 할 사유가 존재하지 않음	

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기 탁 번호											

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

- 투수성 포장의 투수성과 입자 폐색에 의해 감소하는 투수성을 평가하기 위해 폐색을 고려한 투수성 포장 및 하부재료 투수특성 평가장비 및 시험절차를 개발. 강우 시 투수성 포장재로 흘러 들어가는 비점오염 물질에 의한 폐색을 모사하기 위한 부유물 교반 시스템을 개발. 포장에서의 수평방향 우수침투 발생 시 투수성을 평가할 수 있는 장비와 절차를 개발하고, 기존 표면침투율 측정시험의 편의성 개선을 위한 시험장비와 절차를 개발. 투수성 포장 하부층의 역학적 성능을 검증하기 위한 현장시험을 수행하고, 하부층 품질관리에 대한 연구를 성공적으로 수행.
- 폐색입자 혹은 부유물의 투입으로 인한 투수성 포장의 침투성능 변화를 해석하기 위한 모델을 실험적 연구결과에 적용. 다공성 포장 미세 구조물의 2차원 이미지로부터 3차원 이미지를 생성하기 위한 적대적 네트워크 기반의 삼차원 모델 생성기를 개발.
- 폴리우레탄 바인더 기반의 공극률이 30%이상으로 공극 막힘 현상에 대한 저항성이 우수한 투수성 콘크리트의 배합과 제품을 개발. 3층의 블록단면 구조를 바탕으로 하여 우수한 휨강도와 침투성능을 확보하는 흙콘크리트 기반 투수블록의 배합과 제품을 개발.

요약문

연구의 목적 및 내용	침투성과 안정성을 만족시키는 투수성 포장 시스템의 개발의 중요성은 매우 높으며, 이에 따라 다음과 같은 기술의 개발을 목표로 연구를 수행함. • 포장 공극, 폐색 입자 고려 투수성 포장의 침투 지속성 평가 기법 • 포장 공극, 폐색 입자 고려 투수성 포장의 침투 지속성 예측 기법 • 공극 폐색이 적고 구조적으로 안정한 투수성 콘크리트				
연구개발성과	• 포장 공극, 폐색 입자 고려 투수성 포장의 침투 지속성 평가 기법 - 투수성 포장의 공극을 고려한 투수성능과 입자 폐색에 의해 감소하는 투수성능을 평가하기 위한 평가장비 및 시험절차를 개발하고, 이를 바탕으로 다양한 투수성 포장의 침투 지속성을 평가함. • 포장 공극, 폐색 입자 고려 투수성 포장의 침투 지속성 예측 기법 - 투수성 포장 내 입자 폐색의 거동에 대한 수치해석 기법 개발함. - 투수성 포장 공극구조 이미지 생성 및 가상 시료 분석 기법 개발함. • 공극 폐색이 적고 구조적으로 안정한 투수성 콘크리트 - 공극 폐색이 적고 구조적으로 안정한 폴리우레탄 바인더를 사용한 투수성 콘크리트, 투수성 흙 콘크리트를 개발하고 성능을 평가함.				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	•기술적 측면 - 투수성 포장 성능평가 기법 개발을 통해 투수성 포장에서 문제가 되는 재료의 내구성, 공극 막힘으로 인한 투수성 저하, 우수 침투 등으로 인한 지지력 저하에 대한 평가를 할 수 있는 계기를 마련하여 궁극적으로 효율적인 투수성 포장 설계 및 유지보수를 가능하게 함. • 사회적 측면 - 기후변화 적용 전술의 하나로 도시 열섬현상 저감을 통한 전력 수요량 절감, 녹색공간 확보 및 지역환경개선을 통한 지역주민의 삶의 질 향상, 경관적 가치 창출을 통한 파생적 경제적 효과 달성, 방재산업 일자리 창출 및 경제 활성화 및 건설 및 건축 비용절감을 통한 개발의 지속가능성 담보. • 경제적 측면 - 투수성 도로·교통시설의 안정성, 효율성 및 경제성 확보를 통한 녹색산업 및 일자리 창출에 기여하며 유관 산업과의 연계 성장을 통한 신성장 동력 확보.				
국문핵심어 (5개 이내)	투수성 포장	침투 성능	공극 폐색	성능 평가	예측 모형
영문핵심어 (5개 이내)	Permeable Pavement	Infiltration Performance	Pore Clogging	Performance Evaluation	Prediction Model

목 차

제 1장 연구개발과제의 개요	1
1. 연구개발 목적	1
2. 연구개발의 필요성	2
3. 연구개발 목표 및 결과	3
제 2장 국내외 기술 개발 현황	4
1. 국내외 연구동향	4
2. 국내외 산업동향	4
제 3장 연구수행내용 및 성과	5
1. 포장 공극, 폐색 입자 고려 투수성 포장 시스템의 침투 지속성 실험적 평가 기법 개발 및 표준화	5
2. 포장 공극, 폐색 입자 고려 투수성 포장 시스템의 침투 지속성 시뮬레이션 기법 개발	50
3. 공극 폐색이 적고 구조적으로 안정한 투수성 포장재 개발	61
제 4장 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	86
1. 목표 달성도	86
2. 관련 분야 기여도	87
제 5장 연구개발성과의 활용 계획 등	89

제 1장 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

- 도시지역의 도로 및 단지계획은 인간의 편의를 제공하기 위하여 자연상태의 공간을 다양한 구조물로 구축하는 과정을 의미하며, 도시공간에서 약 30% 정도는 강우시 물의 침투가 전혀 발생되지 않는 불투수성 도로로 구성되어 있어 다양한 환경수리학적 문제를 나타내고 있음. 이로 인한, 홍수피해, 자연 물순환 차단, 열섬현상, 대기오염물질 증가, 차량 통행등으로 인한 소음공해 등의 피해는 더욱더 증가할 예정임.
 - 이에 따라 도로, 주차장, 인도 등의 교통시설에서 도시침수저감, 오염저감 및 열섬현상 저감을 위하여 투수성 포장재료의 개발, 기후 및 지역 특성에 적합한 투수성 포장 시스템의 설치가 요구됨.
 - 현재 우리나라에서 투수성 포장은 주로 보도, 산책로, 주차장 등 차량 하중이 없거나 적은 지역에 적용되고 있음. 하지만 국내·외 유지관리 관련 기준 제정 노력에도 불구하고, 장기적으로 투수성 포장 시스템의 공극이 폐색됨에 따라 발생하는 투수성능 저감을 모의하기 위한 해석, 예측 모델의 개발에 대한 연구는 미흡한 실정임.
 - 상기 언급한 배경 및 이유로 인해, 포장 공극과 폐색 입자의 특성을 고려한 투수성 포장 시스템의 개발의 중요성은 매우 높으며 이를 현실화하기 위해서는, 폐색 현상을 고려한 침투 성능 평가와 검증 방안의 표준화 및 시뮬레이션 기법 개발, 그리고 이를 바탕으로 한 새로운 제품이 개발이 필수적임. 이에 따라 다음과 같은 기술의 개발을 목표로 연구를 제안함.
- 포장 공극, 폐색 입자 고려 투수성 포장 시스템의 침투 지속성 실험적 평가 기법 개발
 - 포장 공극, 폐색 입자 고려 투수성 포장 시스템의 침투 지속성 시뮬레이션 기법 개발
 - 공극 폐색이 적고 구조적으로 안정한 투수성 포장재 개발



<포장 공극과 폐색 입자의 특성을 고려한 투수성 포장 시스템>

2. 연구개발의 필요성

○ 기술적 측면

- 투수성 도로 포장 기술의 개발과 적용은 시험포장을 통한 검증이 필요하며 국가기반 시설로서 대부분 지자체 혹은 공기업에서 관리하고 있어 정부의 정책적 지원을 통해 연구의 진행과 연구 결과의 활용이 가능함.
- 공극 폐색을 고려한 투수성 포장 시뮬레이션 기법 개발은 데이터를 확보하기 위한 투수성 재료의 배합, 바인더의 종류 및 시료의 강도 등에 대한 연구는 홍수재난 및 교통사고재난의 저감을 위한 매우 중요한 원천기술임.

○ 경제산업적 측면

- 2000년대 들어 연평균 약 2조 이상 규모의 기상재해가 발생하고 있으며, 기후변화에 의해 2080년에는 현재의 3배까지 피해규모가 커질 것으로 예측됨. 전체 자연재해의 약 90%가 태풍 및 집중호우에 의한 수재해임. 특히, 도시지역의 피해가 전체의 90%를 차지하고 있음을 감안할 때, 도시지역에 최적사양의 투수성 포장 수문 시스템을 설치하여 극한강우 재해에 따른 경제적인 손실을 크게 절감할 수 있음.
- 도심지 자연물순환 흐름의 개념하에 토지이용 상황을 적절히 반영할 수 있고, 투수성 포장 시스템의 융합적, 종합적인 사용에 따른 합리적이고 효율적인 자연재해 대책 수립을 통한 사회 간접비용의 절감효과가 나타날 수 있을 것으로 기대됨.

○ 사회문화적 측면

- 2010년 9월 서울의 집중호우로 인해 약 1만여 명의 이재민과 1만여 개소의 건물이 침수되는 등 큰 피해가 발생하였고, 2009년 7월 부산에서도 6시간동안 320 mm의 폭우가 내려 여러 지역이 침수 피해가 발생함. 본 과제에서 도출하고자 하는 극한강도 재난대응 포장 수문 시스템 적용을 통해 자연재해에 대한 보다 안전한 환경을 구축에 기여하며, 궁극적으로 국민의 안전과 재산을 보호 하는데 크게 이바지 할 수 있음.
- 도심지 침수 예방 및 복구 대책기술의 하나로 활용이 가능하므로 피해 복구비 절감에 기여할 수 있으며, 도심 침수로 인한 교통 및 사회 전반의 원활한 기능 소통에 기여할 것으로 판단됨.

○ 정부지원의 필요성

- 2013년 서울시 “건강한 물순환 도시 조성 종합계획”에 의하면, 보도 노후구간 정비 및 신규 포장 시 투수포장을 우선적으로 적용하기로 하고, 폭 8 m이하 차량통행 이면도로도 단계적으로 투수성 포장을 추진하고 있고, 투수블록포장 시범사업을 통해서 현장 모니터링을 통한 문제점 보완에 노력하고 있음. 향후 서울시 지역이외에도 전국 광역시 위주로 유사한 시도가 필요하며 실효성을 거두기 위한 체계적인 지원 시스템 마련이 시급함.

3. 연구개발 목표 및 결과

- 포장 공극, 폐색 입자 고려 투수성 포장의 침투 지속성 평가 기법
 - 폐색을 고려한 소단면 투수성 포장과 하부재료 투수특성 평가장비 및 시험절차
 - 폐색을 고려한 대단면 투수성 포장 투수특성 평가장비 및 시험절차
 - LID 부유물 폐색시험 평가 시스템
 - 폐색입자에 따른 여러 배합의 투수성 콘크리트 포장재 폐색특성
 - 동수경사가 조절 가능한 다공성 포장 수평방향 투수계수 측정장치 및 이를 이용한 측정 방법
 - 현장 투수성 포장재의 효율적인 표면침투율 측정장치
 - 평판재하시험을 통한 투수성 기층 재료의 다짐정도에 따른 강성변화
- 포장 공극, 폐색 입자 고려 투수성 포장의 침투 지속성 예측 기법
 - 물리적 모델 기반 지반 내 세립토 유동에 대한 수치해석적 예측 기법
 - 이미지 기반 공극 분석기 및 가상 기료 분석기
- 공극 폐색이 적고 구조적으로 안정한 투수성 콘크리트
 - 공극 폐색이 적고 구조적으로 안정한 투수성 폴리우레탄 포장재의 개발
 - 공극 폐색이 적고 구조적으로 안정한 투수성 흙 콘크리트의 개발

제 2장 국내외 기술 개발 현황

1. 국내외 연구동향

- 현재 LID 기반 도로·교통시설의 수문학적 설계 중 투수성 포장의 설계치로 가장 주요한 인자는 공극률이며(Tennis 등, 2004; Leming 등, 2007; ACI, 2010), 포장 재료의 공극률은 포화시 및 건조시 무게를 측정하는 것으로 산정할 수 있으며 이에 대한 연구가 Montes 등(2005), Neithalath 등(2006), Ahn 등(2012), 안재훈 등(2013)에 의해 진행되었음.
- 포장재료의 포화투수계수는 실내 정수위 혹은 변수위 시험을 통해 산정할 수 있으며(McCain, 2009; 이윤석, 2013), X-Ray CT 해석을 통한 투수계수의 예측도 최근 연구된바 있음(Piller, 2009). 또한, Klenzendorf 등(2010)은 실제 배수조건과 유사하게 2차원적 투수의 영향을 고려한 포장체의 침투특성을 산정하였음.
- 세굴방지 필터 설계를 위해 지반 분야 폐색모델이 개발됨(Reddi et al., 1997, 2000, 2005). 이 모델은 그라우트(Kim et al., 2009) 및 슬러리 주입(이 등, 2013) 침투 거동, 투수성 포장 폐색 모델링(Deo, 2010)에 적용되는 등 지반공학관련 폐색현상 규명에 적용되었음.
- 다공 스케일에서 부유물을 포함한 유체의 흐름 및 폐색을 모델링 할 수 있는 네트워크 모델이 수리지질분야에서 개발됨(Kim et al., 2009; Raoof, 2011, 2013; Blunt, 2013).
- 물리적 모형 기반 공극 폐색 모델링 기법은 단순 모델(Blazejewski et al., 1997), 등가 투수계수모델(Wang et al., 2012), 확률 기반 모델(Reddi et al., 2000; 2005)이 개발됨.

2. 국내외 산업동향

- 투수성 블록의 경우에는 선진국에서 높은 수준의 투수성 보도블록 관련 기술을 보유하고 있으며, 일부 국가는 투수성 보도블록의 사용을 법제화해 사용범위를 크게 확대하고 있음. 독일은 1960년대 일반 블록을 투수성 보도블록으로 교체하기 시작했으며 2010년까지 전국 도시노면의 90%를 투수성 노면으로 교체할 것을 계획하였음. 일본은 1980년대 정부가 주도해 투수성 아스팔트와 콘크리트를 혼합한 건축자재를 개발, 광범위하게 사용함.
- 국내 투수 블록은 2차 가공 및 특수 혼합재의 사용으로 인한 일반 블록에 비한 높은 가격과 공극 막힘 현상으로 인한 짧은 수명, 주기적인 공극 청소를 위한 유지관비비용 때문에 현장 설치에 제한을 받고 있음. 투수 블록 업체들은 공극 막힘 현상 방지 개발이나 유지 관리 기술보다는 디자인 요소를 강화하는 방향으로 개발 되고 있음.
- 이러한 문제를 해결하기 위하여 서울시에서는 2012년부터 투수성 포장재 시공전 투수성 블록에 대한 투수력의 지속성을 평가하는 ‘투수 지속성 인증제’를 실시하여 투수성 포장 제품 선별 사용하고 있음.

제 3장 연구수행내용 및 성과

1. 포장 공극, 폐색 입자 고려 투수성 포장 시스템의 침투 지속성 실험적 평가 기법 개발 및 표준화

가. 폐색을 고려한 소단면 투수성 포장과 하부재료 투수특성 평가장비 및 시험 절차의 개발

(1) 개발 시험절차

- 투수성 포장의 유출속도와 동수경사에 대한 비선형성과, 침투 시 포장의 연속적인 폐색 현상을 관찰하기 위하여 시험절차를 제안하였음. 아래 그림은 소단면 투수성 포장 및 하부층 투수성능 평가 장비의 전경을, 나타냄.



그림 1.가.1 소단면 투수성 포장 및 하부층 투수성능 평가 장비

- 상기 시험장비를 바탕으로 투수성 포장재의 투수특성에 대한 다음과 같은 시험절차를 제안하였음.
 - 시료 준비 및 셋업
 - 다짐 혹은 코아링을 통해 직경 150 mm인 실린더 모양의 시료를 준비. 시료의 높이는 100 mm에서 150 mm가 적절한 것으로 판단됨.



그림 1.가.2 시료 준비

- 시료와 시료 몰드, 몰드 상하부의 플렌지를 조립. 이 때, 시료와 시료 몰드 사이에 틈이 없이 긴밀함을 유지하도록 고무 등의 채움재를 사용. 플렌지는 시료 몰드를 몰드 상하부의 장치부와 연결하는데 사용됨.



그림 3 투수성능 시험기 조립 상태

- 변수두 시험
 - 변수두 프레임을 사용하여 시험장치 셋업.
 - 유출 수조의 높이를 조절하여 동수경사가 $i=0$ 이 되는 시료 상부의 수위를 설정.
 - 유출 밸브를 잠그고, 변수두 시험에 사용할 최대 동수경사가 되도록 변수두 프레임에 물을 채움. 예시로 보일 시험결과는 최대 동수경사가 $i=2$ 되도록 설정하고 시험을 수행하였음.
 - 유출 밸브를 열어 변수두 프레임의 물을 침투시키면서, 변수두 프레임 내의 수위를 수압 센서로부터 기록.
 - 필요에 따라, 변수두 시험을 반복.
- 정수두 및 폐색 시험
 - 유출 수조의 높이를 조절하여 정수두 및 폐색 시험에 필요한 동수경사 조건을 설정. 예시로 보일 시험에서는 동수경사 $i=1$ 을 설정하였음.
 - 물을 침투시키고, 측정 수조의 수압 센서를 통해 침투수가 정상류에 이르는 시점을 지날 때까지 유량 계측.
 - 설정된 동수경사 하에서 침투를 유지하며, 단계별 폐색 입자를 투하. 본 논문에서는 5g의 단계별 폐색입자를 설정하고 사용하였음. 침투수가 정상류에 이르는 시점을 지날 때까지 유량 계측을 계속함.
 - 더 이상 유출 속도가 변하지 않을 때까지 단계별 폐색 입자 적용 및 유량 계측을 반복.

(2) 투수성 포장재의 투수특성 평가 사례

○ 제안한 시험장비 및 시험절차를 바탕으로 두 종류의 투수성 포장재에 대한 투수시험을 수행하였으며, 그 세부사항은 아래와 같음.

- 시료 및 폐색 입자
 - 총 시험 시료는 2개이며, 첫 번째 시료는 최대입경 8 mm의 개립도 골재에 폴리우레탄 바인더 함유율 5%를 배합함. 두 번째 시료는 최대입경 10 mm의 개립도 골재에

폴리우레탄 바인더 함유율 5%를 배합함.

- 폐색입자는 아래 그림에 나타난 바와 같이, 도로청소차량 수집 입자 분석결과인 서울시 협잡물 입도(Seoul Metropolitan City, 2013)를 기준으로 시중에서 구입 가능한 규사(Silica Sand)를 바탕으로 입도를 조정하여 사용함.

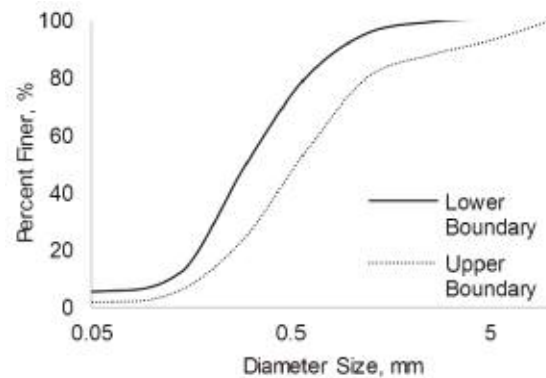


그림 1.가.4 서울시 기준 협잡물 입도 분포
(Seoul Metropolitan City, 2013)

- 투수성 포장재 투수특성 시험조건 - 폐색 전 투수특성
 - 폐색 전 투수특성 평가는 제안한 변수두 시험을 바탕으로 실시함.
 - 두 시료(8 mm 골재, 10 mm 골재 시료) 모두 시료를 최대 동수경사 $i=2$ 에서 유출 밸브를 개방하여 수위 및 동수경사를 떨어뜨리며 수압, 즉 시료 상부의 수위를 계측함.
 - 이러한 변수두 시험을 두 시료에 대해 5회 반복하여 수행함.
- 투수성 포장재 투수특성 시험조건 - 폐색 후 투수특성
 - 폐색시험은 제안한 정수두 및 폐색 시험절차를 바탕으로 두 포장재 시료에 대해 시험을 수행함.
 - 폐색입자는 앞서 보인 서울시 기준(Seoul Metropolitan City, 2013)의 폐색입자를 사용.
 - 동수경사 $i=1$ 을 설정 한 후, 초기 폐색되지 않은 시료의 유출 속도 계측 후, 매 단계마다 5 g(단위면적당 입자 283 g/m²)의 폐색 입자를 적용.
 - 포장재 공극으로 더 이상 폐색 입자가 침투하지 않고 표면에 쌓이기 시작하는 시점까지 시험을 계속 진행함.
- 시험 결과 및 분석 - 폐색 전 투수특성
 - 폐색 전 투수특성 평가 결과는 아래 그림에 주어져 있음. 두 그림에 나타난 유출 속도와 동수경사의 관계는 Fwa et al.(1998)와 Fwa et al.(1999)에 의해 보고된 것처럼 직선형이 아닌 곡선에 가까움.

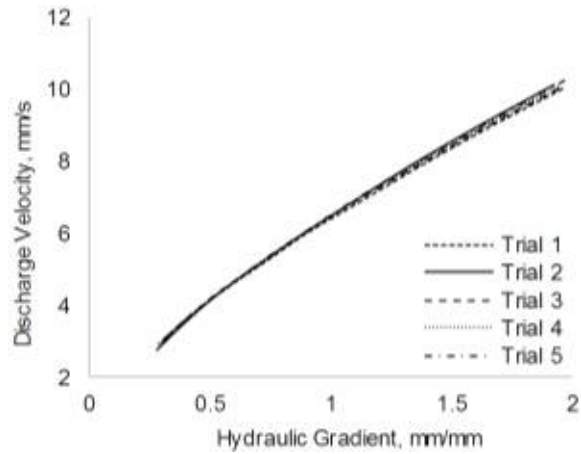


그림 1.가.5 8-mm 골재 시료의 변수두 시험 결과

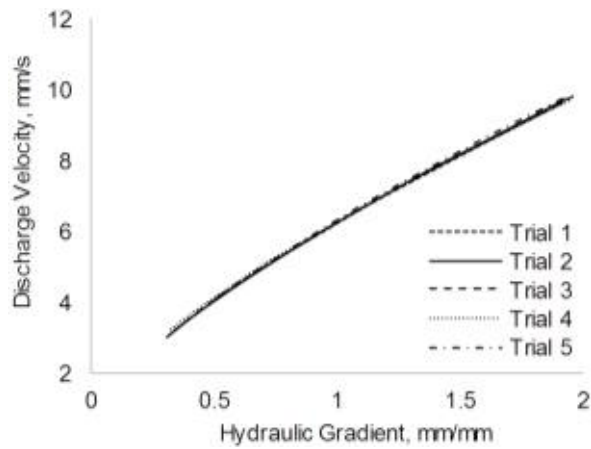


그림 1.가.6 10-mm 골재 시료의 변수두 시험 결과

- 본 유출 속도와 동수경사의 관계 바탕으로 계수 n 과 k 를 산정하였으며, 평균적 결과는 다음과 같음.

표 1.가.1 폐색 전 투수특성 평가 결과

시료	계수	
	k	n
8 mm 골재	5.35	0.612
10 mm 골재	6.92	0.624

- 여기서 구한 계수 n 은 Fwa et al.(1998), Fwa et al.(1999)이 실험적으로 산정한 투수성 기층과 포장재의 계수 $n \approx 0.7$ 과 근사함을 알 수 있음.

○ 시험 결과 및 분석 - 폐색 후 투수특성

- 최대입경 8 mm 개립도 골재를 사용한 폴리우레탄 시료의 경우, 초기에 동수경사 $i=1$ 하에서, $v=5.28\text{mm/s}$ 의 유출속도를 가지며, 유출 속도는 폐색 입자 10 g(단위면적당 입자 566 g/m^2)이 적용될 때까지 급격하게 줄어들다가($v=2.57\text{ mm/s}$), 이 후 폐색 입자 30 g(단위면적당 입자 $1,699\text{ g/m}^2$)을 적용한 이후에는 더 이상 포장 상부의 공극에 폐색되지 않고 표면에 폐색 입자가 쌓이는 것을 육안으로 확인하였음.
- 최대입경 10 mm 개립도 골재를 배합한 시료의 경우에는, 초기 $v=2.57\text{ mm/s}$ 의 유출 속도에서 시작하여, 폐색 입자가 10 g(단위면적당 입자 566 g/m^2) 적용된 후에는 유출 속도 $v=3.31$ 로 줄어들고, 폐색 입자 40 g(단위면적당 입자 $2,265\text{ g/m}^2$)을 적용한 후에는 더 이상 포장 상부의 공극에 폐색이 되지 않는 것을 확인하였음.

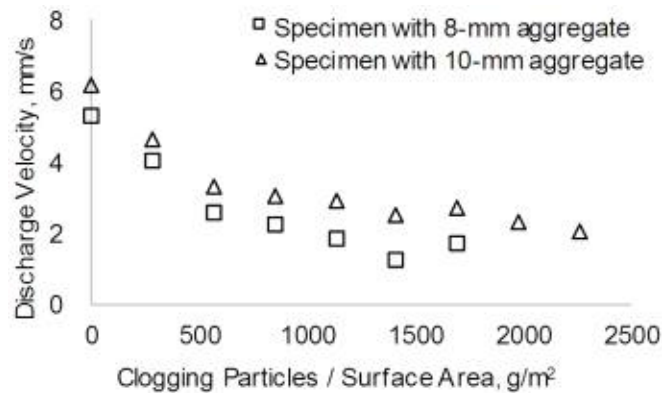


그림 1.가.7 정수두 및 폐색시험 결과

나. 폐색을 고려한 대단면 투수성 포장 투수특성 평가장비 및 시험절차의 개발

(1) 개발 시험 절차

○ 상기 시험장비를 바탕으로 투수시험을 수행하며, 세부사항은 다음과 같음.

- 시료 준비
 - 유공 강판을 시료 몰드 위에 놓음.
 - 시료 몰드 주변을 따라 고무 라이닝제를 배치.
 - 추가 고무 라이닝제와 실리콘을 사용하여 시료 몰드 주변을 밀봉.
 - 시료 몰드에 있는 유공 강판 위에 시료를 설치함. 받침안정층 등의 모래 시료를 설치할 경우 지오텍스타일 등을 사용하여 모래가 유공 강판 아래로 흘러내려가지 않도록 할 수 있음.



그림 1.나.1 시료설치 장면

- 시료가 설치된 시료 몰드 위에 고무 가스켓을 놓음.
- 고무 가스켓 위에 정수두 헤드프레임을 설치. 주위의 볼트를 조여 시료 몰드와 정수두 헤드 프레임을 단단히 고정하여 물이 누설되지 않도록 밀폐.



그림 1.나.2 헤드프레임 설치

- 투수성능 시험기의 조립
 - 유출수 탱크 하단의 수평 조절나사를 통해 수평을 맞춤.
 - 시료 몰드를 시료 몰드 거치 프레임에 놓음.



그림 1.나.3 수평 조절 및 시료 몰드 거치

- 유출수 탱크의 유출구 가까이에 유출수 측정 탱크를 위치시킴.
- 유출수 탱크의 유출구에 물이 닿을 때까지 물을 채움.
- 데이터 수집장치(DAQ) 설치
 - 정수두 시험을 위해 수압센서를 유출수 측정 탱크에 부착.
 - DAQ 장치와 컴퓨터와 수압센서를 서로 연결.
- 정수두 시험
 - 급수 장치를 유입 밸브에 연결.
 - 유출 밸브에 호스를 연결.
 - 유입 밸브와 유출 밸브를 모두 개방.



그림 1.나.4 정수두 시험을 위한 호스 및 밸브 연결

- 도르래를 이용하여 시료 몰드를 적절한 높이에 위치시킴.
- 수위가 평형을 유지할 때까지 물이 시료를 침투하여 흐르도록 함(즉, 상류 수위와 하류 수위의 변화가 없음). 상류와 하류 수위를 기록.
- DAQ 장치를 사용하여 시험기간 동안의 유량을 기록.
- 도르래를 사용하여 동수경사를 바꾸고, 다시 수위가 평형을 유지할 때까지 물이 시료를 침투하여 흐르도록 하고, DAQ 장치를 사용하여 시험기간 동안의 유량을 기록.
- 폐색입자 투입
 - 브리시를 사용하여 폐색입자를 폐색 입자 투하장치에 균일하게 퍼트림.
 - 폐색 입자 투하장치를 정수두 헤드프레임의 상부에 거치.

- 폐색 입자 투하장치 중앙에 있는 판을 당겨서 폐색입자를 시료에 투하.



그림 1.나.5 입자 투하장치를 통한 폐색입자 투하

- 폐색 시험
 - 정수두 시험 과정을 따라 동수경사가 대략 1.0이 되도록 정수두 시험을 설정.
 - 수압센서의 측정을 시작.
 - 앞서 설명된 폐색입자 투입방법에 따라 시료에 폐색입자 투하.
 - 줄눈을 따라 입자를 솔질.
 - 10분후에 폐색입자 투하와 입자 솔질을 같은 방법으로 반복.
 - 투수성의 변화가 없어지거나 시료의 공극이 투하한 폐색입자에 의해 완전히 폐색될 때까지 폐색입자 투하 반복.

(2) 블록 포장 시험 사례

○ 시험 대상 제원

- 받침안정층 : 시험 시에는 받침안정층 두께 30 mm를 적용하였으며, 사용된 받침안정층 모래의 입도분포는 아래의 그림과 같음.

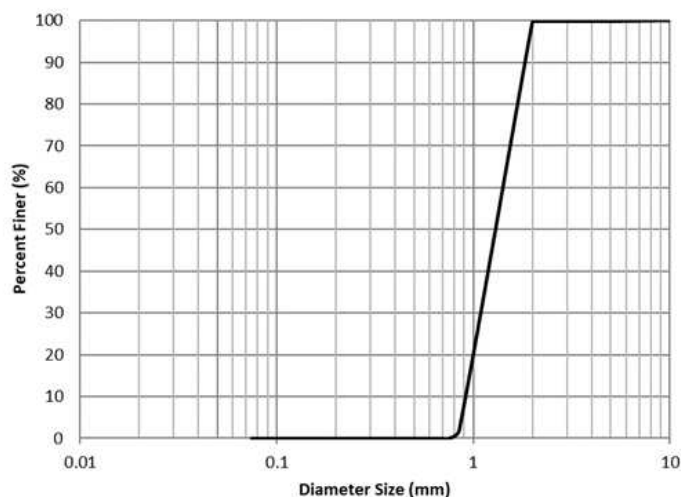


그림 1.나.6 시험에 사용된 받침안정층 모래의 입도분포

- 석재 블록 규격 : 200x200 mm
- 줄눈 간격 : 약 5 mm

○ 시험 상세

- 시험은 두 파트로 구성됨.
- 첫 번째 파트는 투수성 포장 시스템의 초기 투수성능을 평가하는 단순 정수두 투수성능 평가시험으로, 최소 5회(각각 5회 이상)의 시험을 실시함.
- 두 번째 파트는 폐색입자를 점진적으로 추가 투하하며 진행되는 폐색 투수성능 평가시험으로, 폐색에 의한 투수계수의 감소를 평가하기 위해 투수 블록 시스템 표면에 건조 모래입자를 폐색 입자 투하장치를 사용하여 균일하게 투하함.
- 시험에 사용된 폐색입자의 양은 도로분진청소차량에서 수집한 미립자의 양을 기준으로 설정함. 차선의 폭을 고려할 때, 5년 동안의 입자농도는 0.06 g/cm²임. 1년 동안의 폐색에 해당하는 폐색입자인 20g의 규사를 시험 시료에 투하하였음.
- 폐색입자가 침전되고 솔질을 하기 까지 충분한 시간이 필요하므로, 다음 해에 해당하는 입자를 투하하기 전에 10분의 시간간격을 두고 입자를 투하하였음.
- 아래 표에 나타낸 바와 같이 서로 다른 입경을 가진 폐색입자가 폐색 투수성능 평가시험에 사용되었음.

표 1.나.1 투수 블록포장 시스템과 투하된 협잡물 시료

투수 블록포장 시스템	협잡물 시료	폐색입자의 평균 입경 d ₅₀ (mm)
PBS1	규사 8호	0.14
PBS2	규사 7호	0.21
PBS3	서울시 기준	0.30

- 시험시료에 투하한 폐색입자의 입도분포는 아래 그림에 나타내었음.

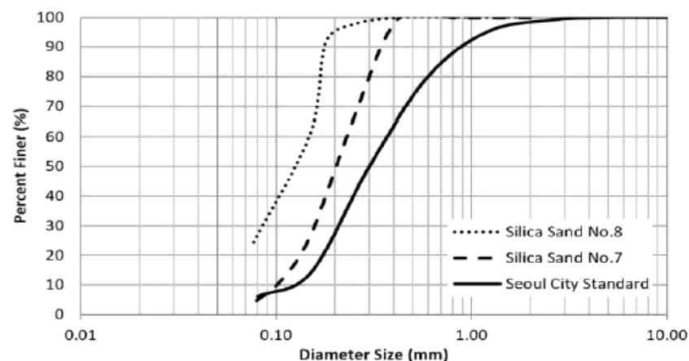


그림 1.나.7 협잡물 시료의 입도분포

- PBS3의 시험에서는, 서울시의 도로분진청소차량에서 수집한 도로퇴적물을 분석하여 이에 해당하는 입도를 가진 폐색입자를 사용함.

○ 초기 투수계수(k_0)

- 받침안정층 모래와 투수 블록 시스템 시험 시료의 초기 투수계수(k_0)를 평가하였음.
- 다공성 재료를 통과하는 물의 흐름이 층류임을 확인하기 위해 받침안정층 모래에 대해 첫 번째 시험을 실시하였음. 0.5, 1.0, 1.5, 2.0의 동수경사에서 총 8회의 정수두 시험을 수행하였음.
- 수압센서로부터 측정된 원시 데이터의 예를 아래 그림에 나타내었음. 이때 데이터 수집장치(DAQ)는 초당 10개의 데이터를 수집하도록 설정하였음.

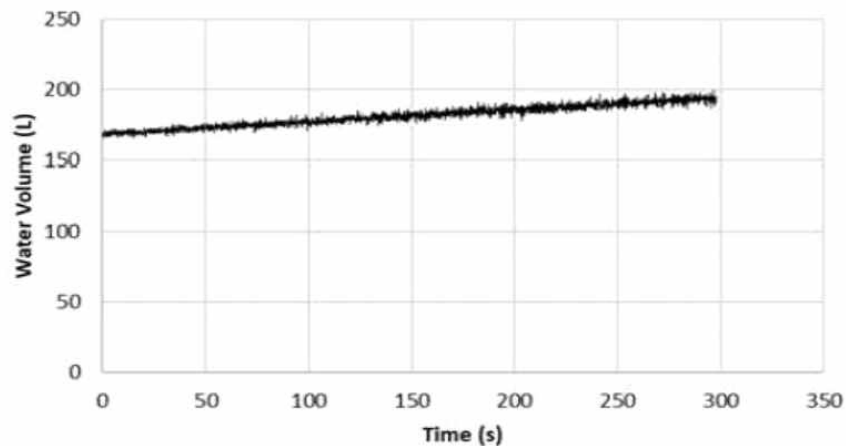


그림 1.나.8 PBS1 시료의 시간에 따른 누적유출유량($i=1.0$)

○ 폐색에 따른 투수계수의 감소

- 아래 3가지 그림은 투하한 각 폐색입자 종류에서, 폐색입자 투하량 증가에 따른 투수계수 감소를 나타낸 그래프임.

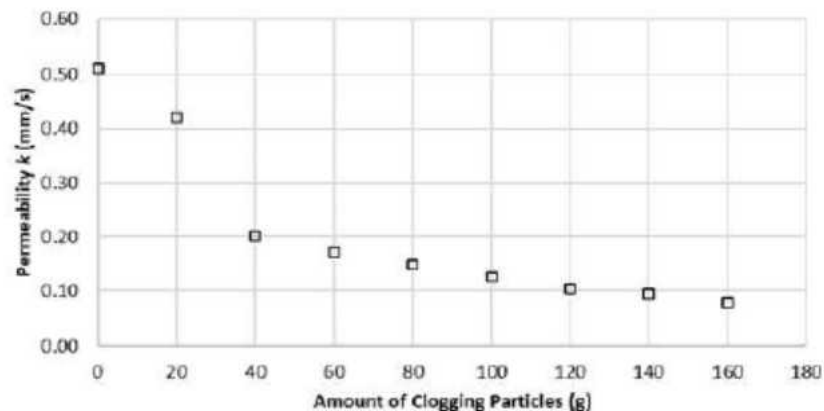


그림 1.나.9 누적 폐색입자(규사 8호) 투하에 따른 투수계수 감소

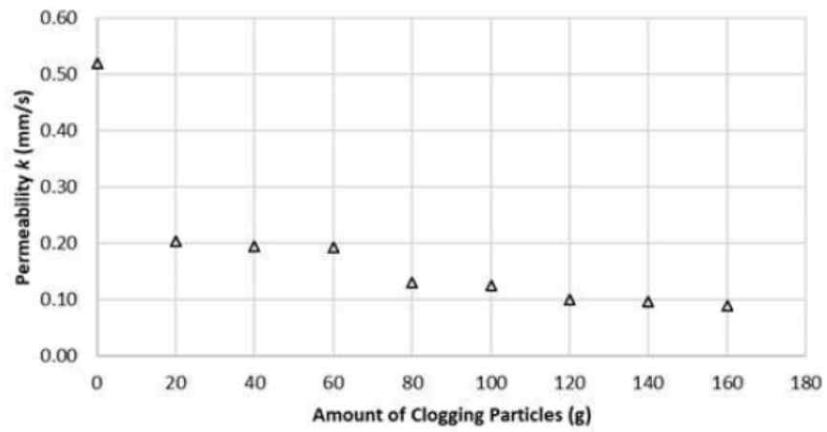


그림 1.나.10 누적 폐색입자(규사 7호) 투하에 따른 투수계수 감소

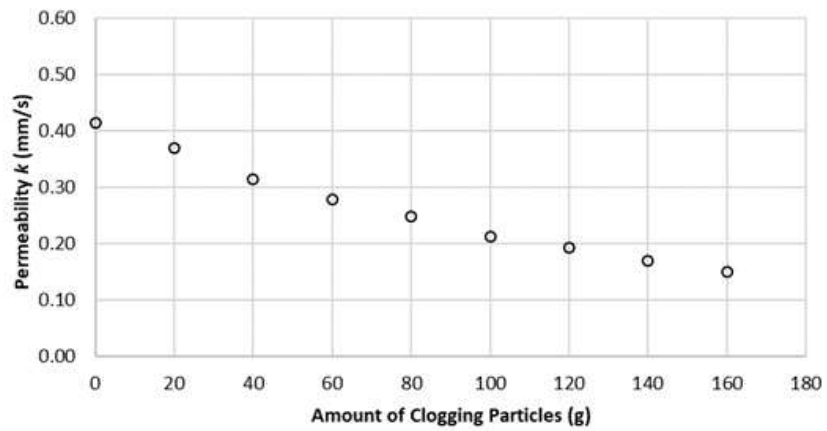


그림 1.나.11 누적 폐색입자(서울시 기준) 투하에 따른 투수계수 감소

- 아래 그림은 시험결과로 나타난 투하한 폐색입자의 양(1년에 해당하는 등가 폐색입자 투하량)과 초기 투수계수(k_0)에 의해 표준화된 투수계수간의 관계를 나타낸 그래프임.

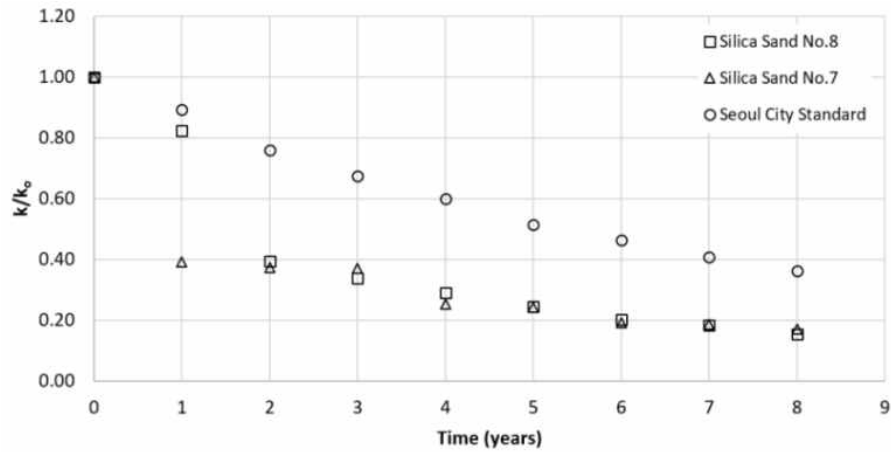


그림 1.나.12 폐색에 따른 투수계수의 감소 결과 요약*

*주 : 서울시 기준에 따르면 1년간의 협잡물량은 20.4 g에 해당한다

- 본 장비는 투수성 포장체의 수리학적 특성인 유출속도, 투수계수, 투수지속성 등을 평가할 수 있으며, 기존 장비는 소규모 시료에 대해서만 적용가능 하지만, 본 장비는 대규모 시료에 대해서도 적용이 가능함.
- 개발한 장비 및 절차를 바탕으로 평가된 투수 블록의 투수특성 결과를 보임.
- 평가 결과 모든 시험 시료에 대해 초기 투수계수가 유사한 값을 보였으며, 협잡물에 의한 공극 폐색을 모의한 결과 기존 문헌에서 입증된 경향과 유사한 투수성능 감소를 보였음.
- 이를 토대로, 본 연구를 통해 제안한 ‘투수성 포장 투수특성 평가장비 및 시험절차’는 투수성 포장 재료의 투수성능을 신뢰도 있게 평가할 수 있는 장치인 것으로 판단함.

다. LID 부유물 폐색시험 평가 시스템

(1) 개요

- 강우 시 투수성 포장재로 흘러 들어가는 비점오염물질 중 입자상 물질은 포장체 내부 공극을 막아 폐색현상이 발생할 수 있기 때문에 투수성 포장시스템은 투수지속성을 검증할 필요가 있음.
- 이를 실험실 환경에서 평가하기 위하여 폐색 입자와 청수를 혼합하여 지속적인 시험수 제조 및 공급을 위한 교반장치, 교반장치로부터 분사되는 시험수를 내부에 마련 투수포장시료에 투수시켜 폐색 성능시험을 수행하는 투수포장시료부 그리고 투수성능이 측정되는 측정조를 개발
- 부유물 폐색시험 평가시스템은 투수포장시료의 투수계수 저하 양상을 시계열로 평가하여 투수성능 저감추세, 누적 고형물 부하량, TSS제거효율 분석이 가능한 것이 특징임.

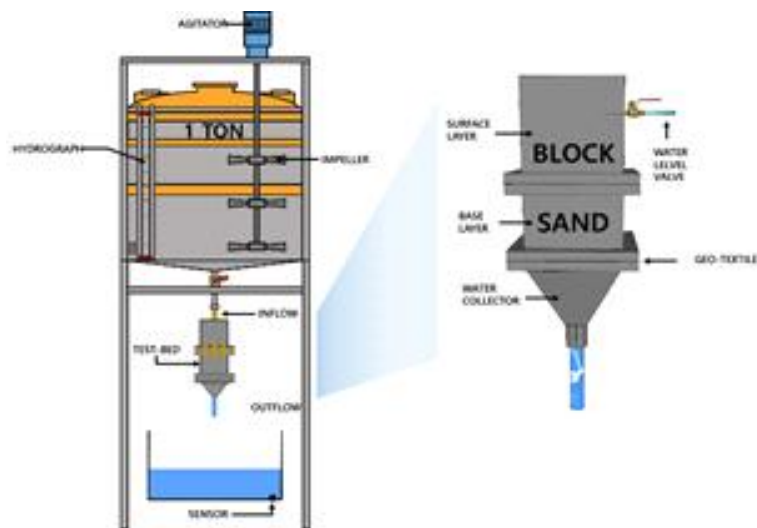


그림 1.다.1 LID 부유물 폐색시험 평가시스템

(2) 개발 시험장비 구성

○ 그림은 개발된 LID 부유물 폐색시험 평가시스템의 전경사진임.



그림 1.다.2 교반장치 전경

표 1.다.1 교반탱크 사양

1. PD-1000 (1m³-1110Φ*1800H. LLDPE)
2. LEVEL GAUGE (SIDE TYPE)
3. STEEL BAND & LADDER
4. AGITATOR (1HP. 60RPM - SUS 304)
5. A/G SUPPORT (E-75*40*5T - SS41)
6. TANK BASE SUPPORT (L=2000 - SS41) (E-750*40*5T - EPOXY)
7. CONTROL PANEL
8. INVERTER : 1.5KW
9. CONTROL BOX : SS STEEL

- 교반탱크는 최대 용량 1000L 이며 외부에서 파악이 가능하도록 피에조미터와 눈금자가 부착되어 있음.
- 교반탱크 내부의 Impeller는 ~400 rpm 까지 교반이 가능하며 폐색시료의 비중, 입경 등에 따라 목표농도에 부합하도록 최적화 하여 사용하여야 함.

(3) 투수지속성 및 TSS 제거효율 평가 사례

○ 개발한 시험장비 및 시험절차를 바탕으로 투수 골재에 대한 투수지속성 및 TSS제거효율을 평가를 수행하며, 세부사항은 다음과 같음.

- 오염수 제조
 - 시험 목적과 방법에 따라 인조규사의 입경을 체가름을 통해 조절.
 - 일정량의 청수를 채운 탱크에 목표농도만큼 계량한 규사 투입.
 - 시험 초반부터 끝까지 교반기를 가동해 well-mixed 상태 유지.

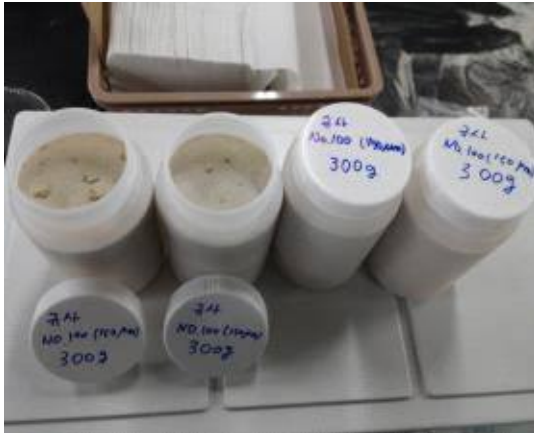


그림 1.다.3 강열감량 후 준비된 폐색 시료



그림 1.다.4 폐색시료 투입 및 교반

- 시료부 조립

- 시료부는 최하단의 집수부, 상단의 기층부, 최상단의 표층부로 구성하였음.
- 집수부와 기층부 사이에 토목섬유를 위치시키고 가스켓과 함께 단단히 조여 누수가 되지 않도록 결합함.
- 기층부에 모의하고자 하는 모래를 포설하고 표층부와 의 사이에 가스켓과 함께 단단히 조여 결합함.
- 표층부 내부에 시료를 위치시켜 몰드와 포장재 사이의 틈에 실리콘으로 메움.



그림 1.다.5 투수포장시료부 결합

- 평가방법

- 일정시간 간격으로 유입수와 유출수를 샘플링하여 수질오염공정기준에 따라 부유물질 분석을 시행하여 유입수폐색이 진행됨에 따른 TSS 저감효율을 분석하며 다음 식을 활용함.

$$\text{부유물질 (mg/L)} = (b - a) \times \frac{1,000}{V}$$

이 때, a : 시료 여과 전의 유리섬유여과지 무게(mg)

b : 시료 여과 후의 유리섬유여과지 무게(mg)

V : 시료의 양(mL)



그림 1.다.6 TSS 평가를 위한 여과장치



그림 1.다.7 GF/C 건조 과정

- 목표농도와 실제 유입농도는 상이하므로 시험체 내부에 유입된 폐색시료를 정량적으로 파악하기 위해 고형물부하량은 다음과 같은 공식을 활용함.

$$L = \frac{Q \times C \times T}{A}$$

(Q : 유입유량(m³/min), C: 유입농도(mg/L), T: 지속시간(min), A: 여재면적(m²))

○ 목표농도와 부합하는 유입 시험수의 TSS 농도 검증

- 시험수의 목표농도를 설정하고 가정하여 평가 할 수 있지만 이를 좀 더 정량화하기 위해 시험중 유입수를 샘플링하여 TSS 저감효율 및 고형물부하량을 산정 할 수 있음.
- 1000L 시험수에 입경 약 35 μ m 인조규사 300g을 투입하여 농도 300mg/L을 제조 하였을 때 다음 그림과 같은 유입수 농도가 확인됨.
- 3번의 시험결과 각각 평균 245.848, 329.725, 314.614 mg/L 농도가 확인되었으며 표준편차 27.578, 16.160, 30.104로 나타남.

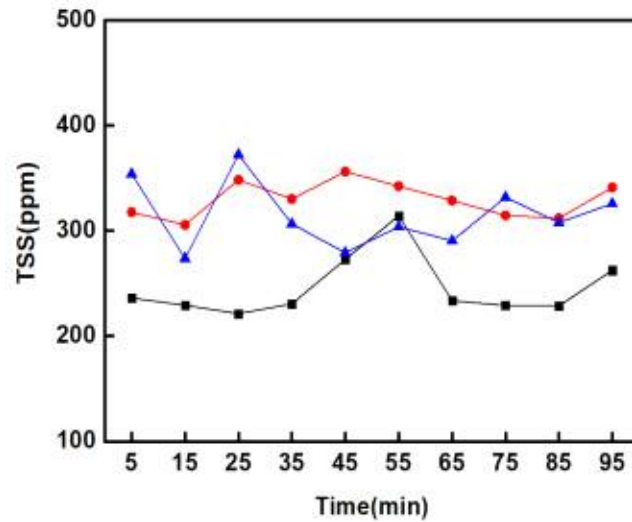


그림 1.다.8 300mg/L 유입 시험수의 실제 농도

○ 투수지속성 평가

- 동수경사 $i=1.19, 1.38, 1.57$ 3가지 경우에 대하여 각 폐색입자 농도 0, 100, 200, 300mg/L를 설정하고 총 12가지 경우에 대하여 투수지속성 저하 양상 및 TSS 저감효율에 대해 평가함.
- 폐색입자가 포함되어 있지 않은 청수실험시 투수포장체의 투수계수는 262.08 mm/s로 나타났고 1시간 실험 후 최종 투수계수는 각 농도별로 207.02, 158.82, 89.02 mm/s 로 저하됨을 알 수 있음. 이는 초기 투수대비 21.01, 39.40, 66.03% 저하됨.
- 100, 200, 300 ppm 농도에 대하여 단위면적으로 환산 시 유입된 고형물은 1시간 실험 진행시 각각 1.8, 3.1, 3.5 kg/m² 이 유입되었음.

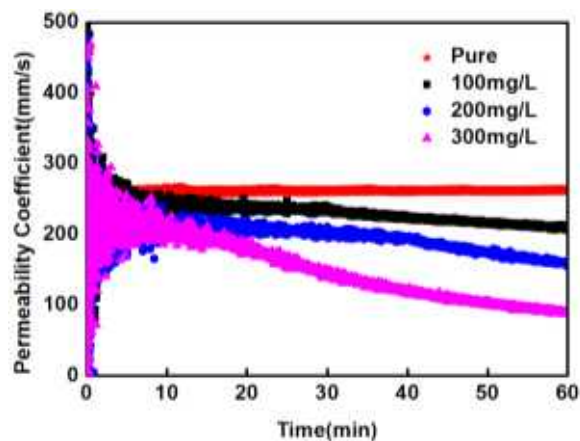


그림 1.다.9 시간에 따른 투수계수

○ TSS 저감효율 평가

- 일정 시간간격으로 유입수 및 유출수를 샘플링하여 TSS 시험을 진행한 결과는 다음 그림과 같음.
- $i=1.38$ 동수경사 조건일 때 3가지 농도에 대하여 대부분 80% 이상의 TSS 저감효율을 보이며 최대 약 97%까지 나타남.
- 편차가 크게 나타났으며 폐색이 진행 될수록 TSS 저감 효율은 더 커지는 경향을 알 수 있음.

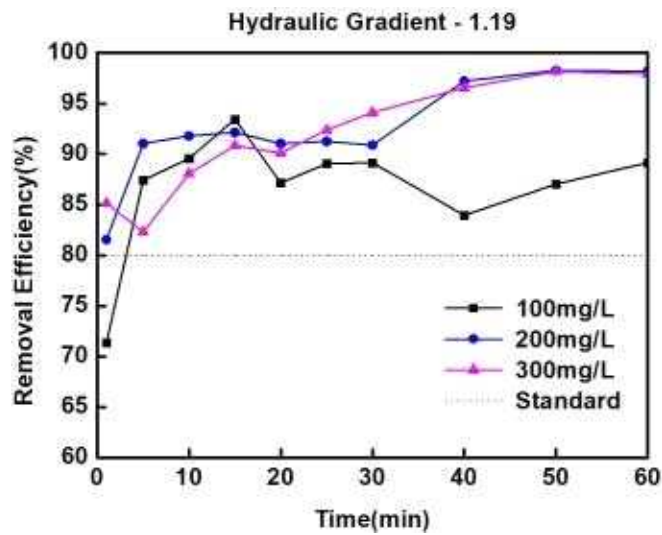


그림 1.다.10 동수경사 $i=1.38$ 일 때 TSS 저감 효율

라. 폐색입자에 따른 여러 배합의 투수성 콘크리트 포장재 폐색특성 평가

(1) 개요

- 본 연구의 목적은 폐색입자 종류에 따른 여러 배합의 투수성 콘크리트 포장재의 폐색특성을 평가하는 것임. 이를 위해 본 과제를 통해 개발한 투수 특성 평가 장치를 사용하여, 투하 폐색입자에 따른 여러 배합의 투수성 콘크리트 포장재의 투수성능 변화를 분석하였음.
- 세 가지 입도의 골재를 사용하여 배합한 투수성 콘크리트에 대해 네 가지의 입도의 폐색입자를 투하하여 투수성능 변화를 분석하였음.

(2) 실험 재료

- 투수성 콘크리트(Permeable concrete, PC)
 - 3가지 종류 배합의 투수성 콘크리트 시편(PC A, PC B, PC C)이 사용되었음. 배합에 사용된 골재 입도 정보는 아래 표와 같고 바인더는 폴리우레탄이 사용됨. 시험에 사용된 시편은 원통형이며, 직경은 100 mm이고 높이는 150 mm 임.

표 1.라.1 3가지 투수 콘크리트 (PC A~C)의 배합에 사용된 골재 입도 정보

Specimen Designation	Percentage of Aggregates (%)		
	8-10 mm	5-8 mm	3-5 mm
PC A	100	0	0
PC B	0	100	0
PC C	0	0	100

- PC 시편의 공극특성은 아래와 같음.

표 1.라.2. PC 시편의 공극 특성

Specimen Designation	Norminal Maximum Aggregate Size (NMAAS) (mm)	Porosity (%)	Representative Pore Size (mm)
PC A	10	30.7	2.847
PC B	8	31.0	2.425
PC C	5	34.3	1.768

○ 폐색 입자 (Clogging particle, CP)

- 도로 퇴적물에 의한 투수성 콘크리트의 공극 폐색 효과를 모의하기 위해 규사(Silica sand)를 사용함.
- 폐색 모의를 위해 사용한 규사는 4가지 종류이며, 이는 3종류의 입도가 균등한 미립자 CP1(입경 구성 0.6–0.85 mm, 평균입경(D_{50}): 0.7); CP2(입경 구성 0.425–0.6 mm, 평균입경(D_{50}): 0.5); CP3(입경 구성 0.25–0.425 mm, 평균입경(D_{50}): 0.3); 그리고 서울시 폐색입자 입도분포를 따르는 입도가 불균등한 모래 CP4로 구성됨. 위 폐색입자 CP1~4의 입도에 대한 정보는 아래 그림에 나타내었음.
- 위 폐색입자의 크기와 입도분포는, 각 시편에 폐색된 입도가 균등한 폐색입자의 임계입자크기(폐색을 가장 잘 일으키는 입자 크기)의 평가와, 입도 분포가 폐색에 미치는 영향을 평가하기 위해 선택한 것임.

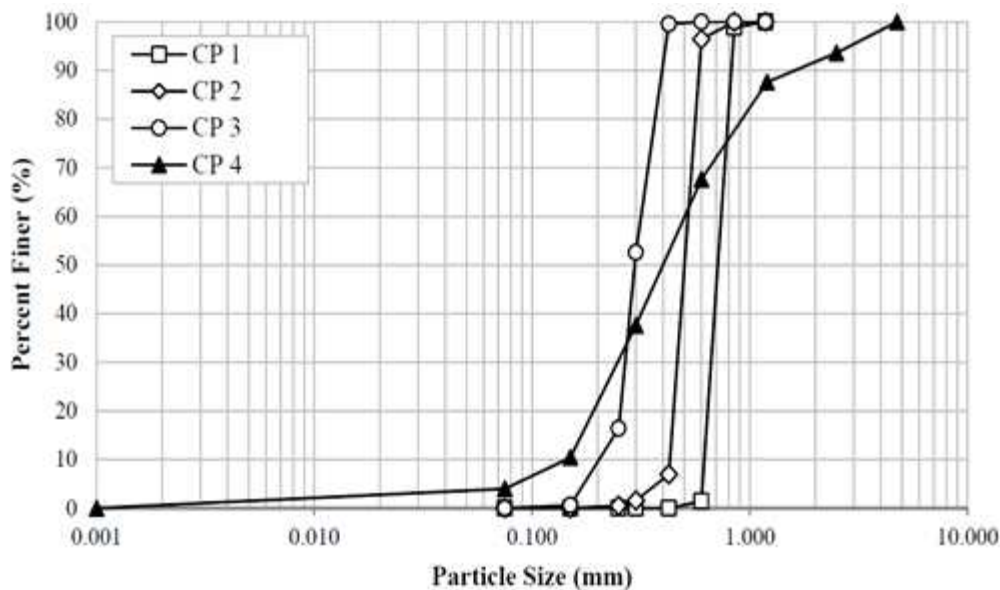


그림 1.라.1 시험에 사용된 폐색입자(CP1~4)의 입도분포

표 1.라.3. 폐색 입자의 입도 분포 특성

Clogging Particle	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4
$D_{10}(\text{mm})$	0.64	0.44	0.23	0.15
$D_{30}(\text{mm})$	0.69	0.48	0.27	0.25
$D_{60}(\text{mm})$	0.74	0.52	0.31	0.5
$D_{50}(\text{mm})$	0.7	0.5	0.3	0.4
C_u	1.16	1.18	1.35	3.33
C_c	1.01	1.01	1.02	0.83

(3) 시험절차 및 결과

- 자세한 내용은 본 보고서의 제 3장 - 1절 “포장 공극, 폐색 입자 고려 투수성 포장 시스템의 침투 지속성 실험적 평가 기법 개발 및 표준화” - 가. “폐색을 고려한 소단면 투수성 포장과 하부재료 투수특성 평가장비 및 시험절차의 개발”에 자세히 나타내었음.
- PC시편과 CP의 다양한 조합을 사용하여 총 12회의 실험을 수행하였으며, 이는 아래의 표에 나타나있음.

표 1.라.4 실험 계획

Experimental Code	Pervious Concrete Specimen	Clogging Particle
A1	PC A	CP 1
A2	PC A	CP 2
A3	PC A	CP 3
A4	PC A	CP 4
B1	PC B	CP 1
B2	PC B	CP 2
B3	PC B	CP 3
B4	PC B	CP 4
C1	PC C	CP 1
C2	PC C	CP 2
C3	PC C	CP 3
C4	PC C	CP 4

(4) 투수성 포장재의 투수특성 평가 결과

- 원리 및 결과값 분석
 - 폐색 전 PC시편의 초기 투수계수(k_0)는 본 보고서 제 3장 - 1절 - 가. 에 설명한 정수두 시험으로부터 결정함.
 - 시편 내부로 침투되는 물의 흐름 특성을 검증하기 위해, 아래 그래프에 나타낸 바와 같이 4가지 서로 다른 동수경사(hydraulic gradient, i)에 대해 유출속도를 측정하였음.
 - PC A1, PC B1 및 PC C1에 대해 검증시험을 수행한 결과, 아래 그림과 같이 v 와 i 의 관계가 비선형을 나타냄. 따라서 투수성 콘크리트 내부의 흐름은 층류가 아닌 것으로 판단함.

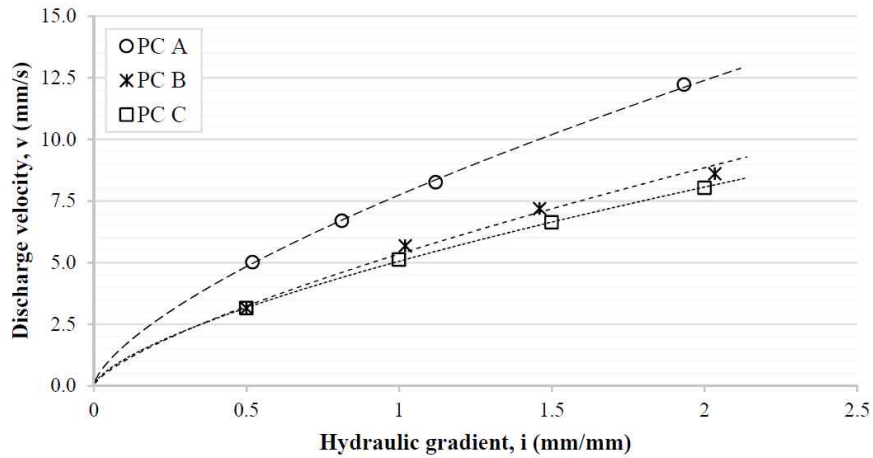


그림 1.라.2 동수경사와 유출속도의 관계

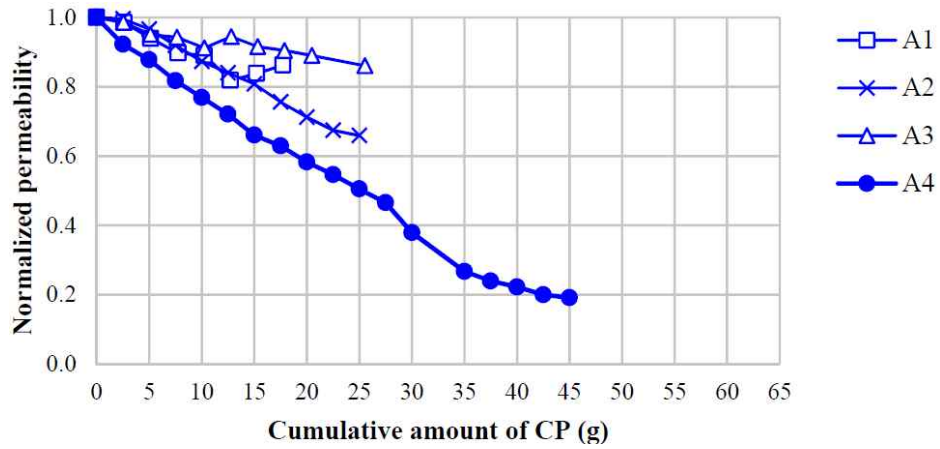
○ 투수계수(k)

- 폐색에 따른 투수성능 변화를 평가하기 위해 서로 다른 PC 시편에 폐색 입자를 일정 시간간격(사이클)으로 투하하였음. 각 폐색 사이클 종료 후 감소한 투수계수를 정규화하여 계산하고(아래 식 참조) 이를 통해 투수성능 감소를 평가함. 여기서 k_c 는 현재 폐색 사이클 종료 후 감소한 투수계수, k_0 는 PC 시편의 초기 투수계수임.

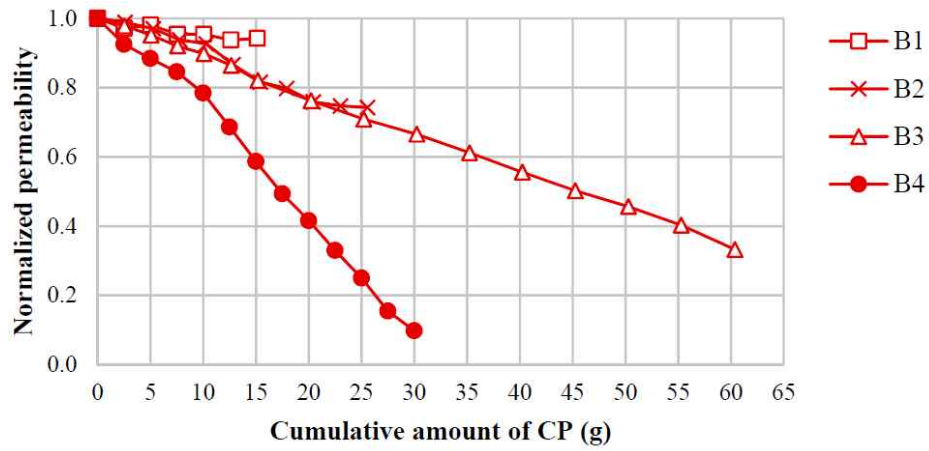
$$\text{Normalized Permeability} = \frac{k_c}{k_0}$$

○ 투수성 콘크리트 시편 종류(PC A, B, C)와 폐색 입자 종류(CP1~4)에 따른 투수성 콘크리트의 투수성능 감소.

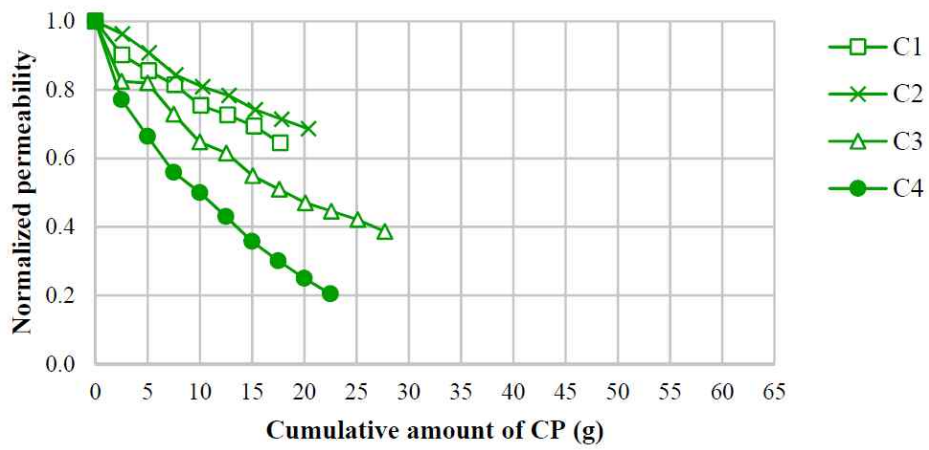
- 아래의 그림은 서로 다른 폐색입자(CP1~4) 투하에 따른, PC A, B, C 시편에서의 투수성능 감소를 나타냄. 평균입경(D_{50}) 0.7, 0.5, 0.3 mm를 가지는 CP1, CP2, CP3는 투수성 콘크리트의 폐색에 큰 영향을 주는 임계 입자 크기를 결정하기 위해 사용되었음. 임계입자의 크기는 최종 폐색 단계에 도달하기 전에 측정된 투수성능 감소 정도에 따라 평가됨.
- 평균 직경이 0.4 mm 인 입도가 불균등한 모래(CP 4)는 폐색 입자의 입도 분포가 폐색에 미치는 영향을 평가하기 위해 사용됨.



(a) PC A 결과



(b) PC B 결과



(c) PC C 결과

그림 1.라.3 폐색 모의를 통한 투수계수 감소 평가 결과

마. 동수경사가 조절 가능한 다공성 포장 수평방향 투수계수 측정장치 및 이를 이용한 측정방법

(1) 개요

- 도로의 지하구조를 고려할 때, 우수의 침투는 투수성 포장의 수직방향 뿐만 아니라 수평방향(종방향 또는 횡방향)으로도 발생함. 하지만 종래의 투수성 포장 투수성능 평가장치는 수직방향에 대해서만 개발된 상황. 본 연구를 통해 투수성 포장의 수평방향 침투성능을 평가할 수 있는 장비를 개발함.
- 본 장비는 동수경사의 조절이 가능하여, 투수성 포장체의 비선형 투수특성도 함께 평가 가능함.
- 본 장비는 기본적으로 사각형 샘플 크기 $300\text{mm} \times 150\text{mm} \times 50\text{mm}$ 및 $300 \times 300 \times 50\text{mm}$ 크기에 대해 시험 가능하도록 제작됨(경우에 따라 크기 조절가능).

(2) 시험 장비 설명

- 장치는 시편고정부, 수조부 및 수두 조절부의 세 부분으로 구성되며, 시편고정부를 수조 내부의 수두조절부 상부에 위치시킴으로서 조합됨.

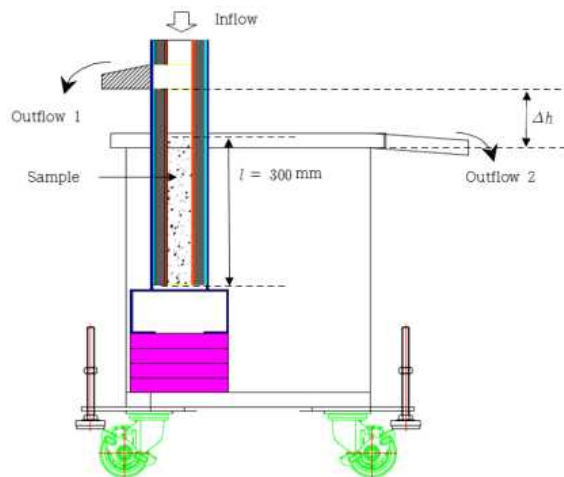


그림 1.마.1 시험장치의 구성

- 시편 고정부
 - 시편 고정부는 $300\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 및 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 크기의 시편을 고정할 수 있도록 두 가지 크기로 구성됨. 위 그림에서 보인 바와 같이 볼트 체결 등을 통하여 시편을 단단히 고정시킬 수 있으며, 시료와 고정부가 닿는 부분은 고무나 실리콘 재질 등의 수밀성을 유지할 수 있는 재료로 구성되어 재료와 시편 고정부 사이에서 누수가 발생되지 않도록 고안됨. 또한 부식에 강한 스테인레스 판을 사용하여 제작되었으며, 이 판은 시편 고정시 뒤틀림 등의 변형이 발생하지 않도록 충분한 두께를 확보하고 있음.

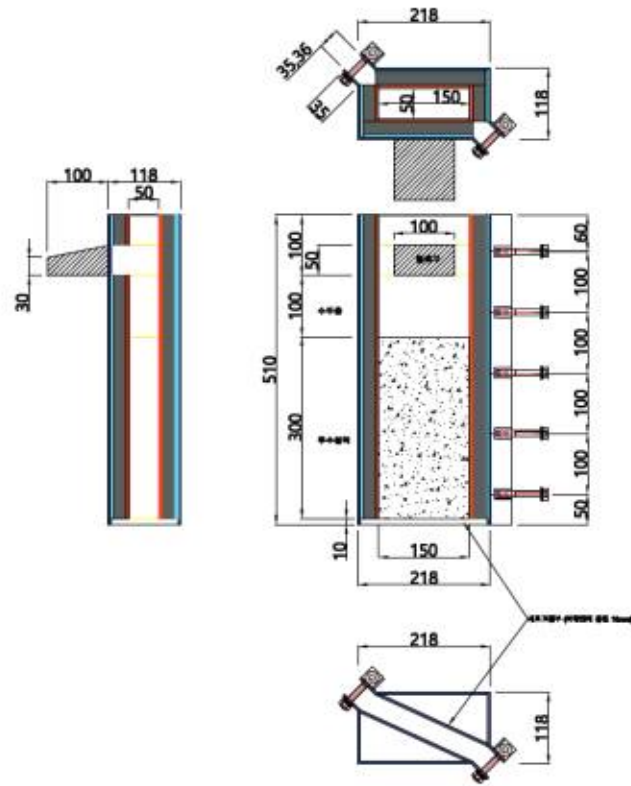


그림 1.마.2 시편 고정부 세부 사양

- 수조부

- 시험 시 물이 시편을 통해 흐르게 하면, 물은 시편을 침투하여 유출되어 수조에 모이게 됨. 유출된 물이 수조의 용량을 초과하면 유출구를 통해 물이 월류하고 이때의 유출량이 시료를 통과한 물의 양이 됨.
- 수조의 크기는 500 mm × 500 mm × 530 mm 이며, 시료를 포화시키는 역할을 함.
- 수조 내부에 수두 조절부의 부착을 위치시켜 동수경사를 조절함.

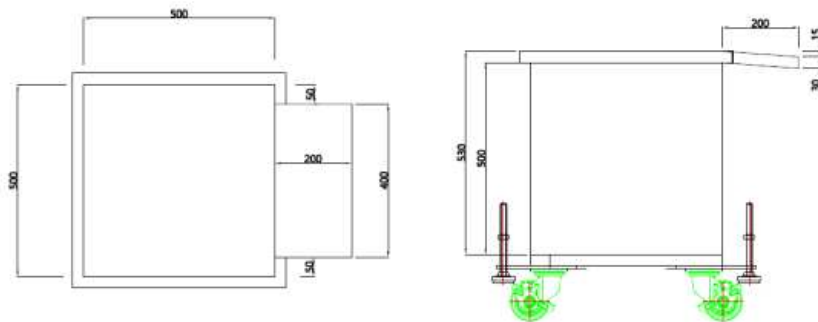


그림 1.마.3 수조부 세부 사양

- 수두 조절부

- 수두 조절부는 30 mm 및 60 mm 의 두 가지 높이를 갖는 수두조절판과 시료고정부 받침대로 구성되며, 시료고정부 받침대 위에 수두조절판을 놓고 이를 이용하여 동수 경사를 조절함. 시편고정부 받침대에는 큰 구멍이 있으며, 시료를 통해 침투한 물이 원활하게 흘러 수조로 유출되도록 하는 역할을 하며, 유수의 흐름에 미치는 영향을 최소화하기 위한 충분한 유수단면적을 확보하고 있음.

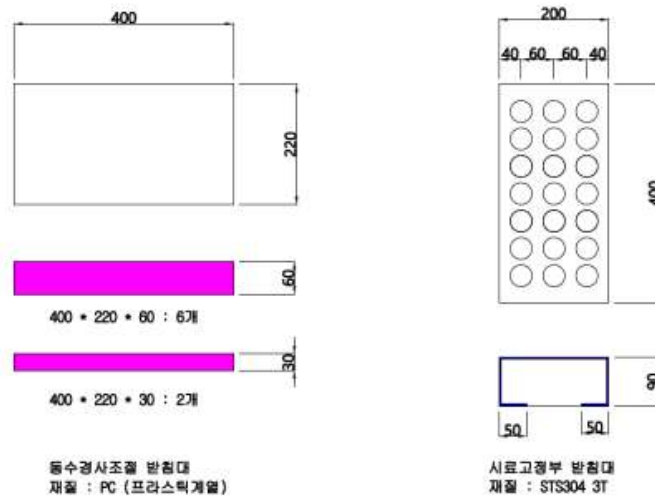


그림 1.마.4 수두 조절부 세부 사양

(3) 시험 방법

- 시험은, 투수성 포장의 투수계수는 일반 토양에 비하여 크므로, 정수위 투수 시험이며, 앞서 설명한 장비와 그림에 나타나 있듯이, 일정한 단면과 길이를 가진 시험체 안을, 조절 가능한 수위차 중 한 가지 수위차로 고정한 상태에서 일정 시간 내에 통과하는 수량을 측정하는 시험임.
- 동수경사의 조절
 - 수조 내부에 두께 60 mm의 수두조절판, 시편고정부 받침대 그리고 시편고정부를 위치시키면, 아래 그림의 Δh 는 60 mm가 됨.

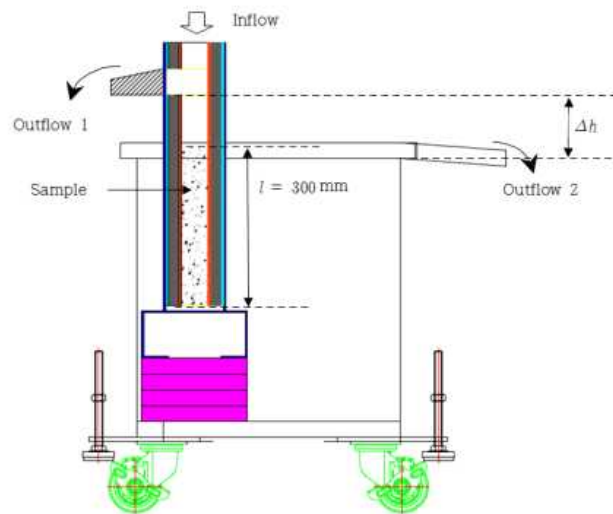


그림 1.마.5 시험장치의 구성

- 시편 고정부의 높이는 $l = 300 \text{ mm}$ 이므로 이때의 동수경사 i 는 $60/300=0.2$ 가 됨. 즉, 시편고정부 받침대의 두께가 Δh 이며, 증가시킬 수 있는 최대 두께는 수조 높이에 의해 제한되어 490 mm 까지 높일 수 있음.
- 30 mm 및 60 mm의 수두조절판을 사용하면 총 13 가지의 동수경사를 생성할 수 있음.
- 실험가능한 동수경사는 최소 0.1이며, 최대 1.3으로 다음 표에 보임.

수두조절판 두께(mm)	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	390
동수경사, i	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3

표 1.마.1 동수경사 최소 및 최대 범위

○ 시험체의 포화

- 본 시험에서 대상으로 하는 혼합물은 공극이 큰 매질을 대상으로 하므로, 시험체 상부에 시험수를 부을 경우 매질은 포화되는 것으로 가정하나, 공극이 작은 시료를 대상으로 하는 시험에서 포화도를 높이하고자 하는 경우, KS F 2322에서 제시하는 절차를 따름.

○ 시험방법

- 시험을 실시할 시료에 시료정보를 표기한 후, 수평투수계수를 평가하고자 하는 시료 방향 설정.
- 설정한 방향으로 시료를 시편고정부에 장착하고 포화시켜 수평투수계수 시험기를 셋업함. 이때 동수경사는 동수경사조절판을 사용하여 설정. 본 연구에서 예시로 제시한 시험에는 동수경사 $i = 0.5$ 를 사용하였음.

- 시험수를 시편고정부의 상부로 주입하여 물이 시험재료를 침투하여 수조로 유출되게 함.
- 유출된 물이 수조에 누적되어 수조가 월류하고, 월류량이 거의 일정해질 때 까지 기다림.
- 월류량이 일정해지면 설정한 동수경사에 대해 시간당 월류량을 측정하여 유출수 부피를 측정함. 유출수량은 매질의 투수성능에 따라 크게 변화함. 매질의 투수계수가 높은 경우 유출되는 시험수의 부피가 상당히 많아 질 수 있으므로, 매질의 투수성능에 부합하는 적절한 부피측정 기기를 구비하여야 함.
- 동수경사에 따라 시험을 반복 수행.

(4) 투수계수 계산

- 투수계수를 결정하기 위해 Darcy의 법칙을 적용함. Darcy에 따르면, 다음 식과 같이 다공성 매질을 통한 층류의 움직임은 동수경사에 비례.

$$q = kiA = k \frac{h}{l} A \quad (1)$$

여기서,

- q : 체적 유량
- k : 투수계수
- i : 동수경사
- A : 시료 면적
- l : 시편의 길이(cm)
- h : 수두 조절판 총 높이(수두차, cm)

- Darcy의 법칙에 근거하여 투수계수는 다음의 식에 따라 계산.

$$k = 10^3 \times \frac{Vl}{Aht} \quad (2)$$

여기서

- k_x : 도로의 종방향으로 측정된 수평방향 투수계수(cm/s)
- k_y : 도로의 횡방향으로 측정된 수평방향 투수계수(cm/s)
- V : t 시간 동안 측정된 월류수의 부피(cm^3)
- t : 월류수의 부피 측정 시간(s)

(5) 보고

○ 다음 사항을 기록하여야 함.

- 시험에 사용된 동수경사
- 시험체의 규격
- 종·횡 방향으로 측정된 수평방향 투수계수
- 시험시의 수온

(6) 결과정리 시트 예시

○ 시험 시 다음과 같은 시트를 예시로 사용할 수 있음.

수평방향 투수계수 시험												
과업명						시험날짜						
조사위치						온도 및 습도						
시료명						시험자						

종방향 투수계수 측정내용												
동수경사												
시험 횃수												
월류수의 부피(cm ³)												
월류수 부피 측정시간(s)												
K_x												
$K_{x, 15}$												

횡방향 투수계수 측정내용												
동수경사												
시험 횃수												
월류수의 부피(cm ³)												
월류수 부피 측정시간(s)												
K_y												
$K_{y, 15}$												

바. 현장 투수성 포장재의 효율적인 표면침투율 측정장치

(1) 개요

(가) 기존 투수성 포장재의 표면침투율 측정

○ 투수성 포장재의 표면침투율

- 표면침투율은 투수성 포장의 현장 성능을 대표하는 성능지표임. 효과적인 우수관리를 위해서는 투수성 포장에 대한 표면침투율을 평가하여야 함.
- 또한 투수성 포장 시공 완료 후에도 표면침투율을 지속적으로 평가하여 폐색 현상이나 우수관리 효과를 점검할 수 있음.

○ 기존 표면침투율 측정시험

- 표면침투율을 산정함에 있어 가장 보편적으로 사용되는 시험법은 싱글링 침투계 시험법인 ASTM C 1701와 더블링 침투계 시험법인 ASTM C D 3385가 있음.
- 더블링 시험법은 주로 지반 재료나 노상의 재료에 주로 사용됨. 시험 시 실링(시험장치 외부로 물이 흘러나가는 것을 방지하는 작업)을 위해 고무망치 등을 이용한 타격을 통해 각 링들을 적당한 깊이 이상 관입시켜서 시험을 진행함.
- 싱글링 시험법은 투수 콘크리트 포장을 대상으로 한 시험법으로 하나의 링만을 사용하여 시험을 실시함. 하나의 링을 시료 위에 설치한 다음 포장과 링 사이에서 물이 유출되는 것을 방지하기 위해 불투수성 재료를 사용하여 실링한 후 시험을 진행함. 일반적으로 유용성과 편리함을 이유로 Clay 계열의 재료를 사용해 실링함.
- 투수 콘크리트 포장에 대해서는 주로 ASTM C 1701 싱글링 시험법을 사용함.

○ ASTM C 1701 싱글링 시험법

- 포장표면 이물질 제거 후 싱글링 설치.
- Clay로 링과 포장표면 사이의 공간을 밀봉.
- Pre-wetting과정: 링 내의 수위(1cm) 유지하면서 3.6L의 물을 부으며 투수완료 시간을 측정.
- 1차 측정: (30초 미만의 시간이 소요될 경우) 18L의 물을 주입하여 시험을 수행. (30초 이상의 시간이 소요될 경우) 3.6L의 물을 주입하여 시험을 수행.
- 2차 측정: 5분 이내에 다시 1차 측정과 같은 방법으로 측정.
- 표면침투율은 1,2차 측정값의 평균값 취하여 결정.
- 아래 식을 이용하여 표면침투율을 계산.

$$V = \frac{Q}{A \cdot T}$$

$$\left(\begin{array}{l} V = \text{투수속도}(mm/s) \\ Q = \text{물의용적}(l) \\ A = \text{싱글링의 면적}(cm^2) \\ T = \text{투수시간}(sec) \end{array} \right)$$

(나) 현장 투수성 포장재의 효율적인 표면침투율 시험 방법 제안

- 기존의 방법인 ASTM C 1701은 가장 보편적인 표면침투율 측정시험이지만 시험 시 실링과정의 번거롭다는 단점과, 정수위를 항상 유지하여야 한다는 단점이 있음.
- 투수포장에 대한 시험이라는 특성상, 지반 재료 링을 관입시켜 차수를 실시하는 것은 불가능함. 따라서 투수성 포장에 대해 싱글링 시험을 실시하는 경우 대부분 Clay 등의 재료를 이용해 차수를 실시하고 시험을 진행함. 하지만 Clay 등을 사용하면 밀봉 단계에 있어 많은 작업자가 번거로워지고 긴 시간을 요하게 됨. 뿐만 아니라 시험이 끝난 뒤 블록 위에 남아 있는 Clay를 제거하는 것도 문제가 됨.
- ASTM C 1701은 1cm 정수위를 유지시키는 것이 중요한데 현장에서는 사람이 직접 물을 부으므로 1cm 내외로 오차가 발생하게 됨. 이에 따라 수두유지에 대한 정확도가 떨어지는 문제가 발생.
- 따라서, 본 장치의 개발을 통해 기존의 ASTM C 1701의 단점을 보완하고자 실링재로 발포실리콘을 사용한 Falling head 시험을 제안함.

(2) 시험 장비

- 직경 50 cm 싱글링, 30 cm 싱글링 두 가지가 있음.



D 50 cm, Single Ring

D 30 cm, Single Ring



D 50 cm, Guide Ring

D 30 cm, Guide Ring



D 50 cm, Press Ring

D 30 cm, Press Ring



발포실리콘(50cm, 30cm)

물통

○ 사이즈(직경 50 cm 싱글링, 30 cm 싱글링 두 가지가 있음)

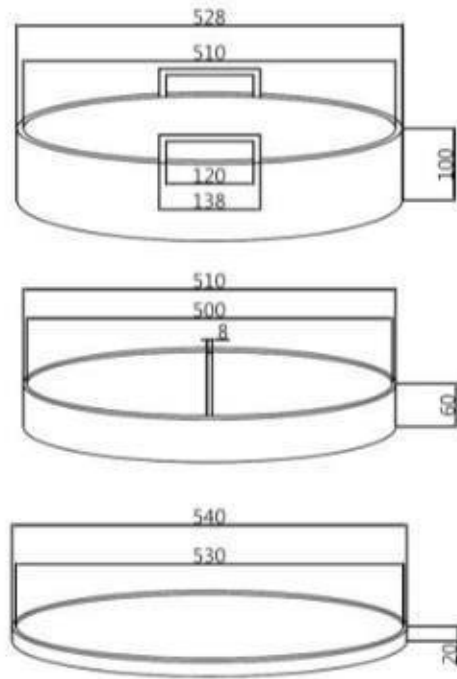


그림 1.바.5 50cm Ring Size

썰링 링 (∅300 x ∅360 x h50 용)

단위: mm

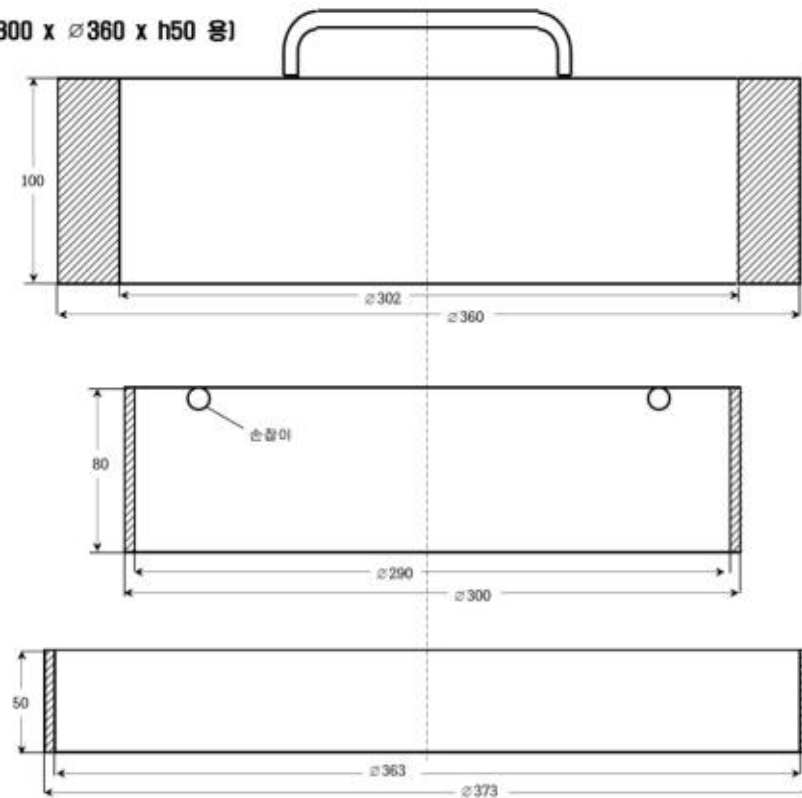


그림 1.바.6 30cm Ring Size

○ 발포실리콘 특성

	특성	값
	비중(Specific gravity)	0.65
	인장강도(Tensile strengt h)	6.1 Kgf/cm^2
	경도(Shore a)	28~30
	인열강도	30 mg
	신장율	140%
	반발탄성	40%

표 1.바.5 발포실리콘 특성

- 본 장치는 표면 침투율 측정 시 싱링을 위해, 기존에 사용되는 시간이 많이 소요되는 실링방법인 점토부착 대신, 발포실리콘을 싱글링 둘레를 따라 마련된 프레임 사이 공간에 압착시켜 두르고, 위에서 사하중을 가하여 지반에 압착시키는 방식.
- 해당 실링 방법은 Clay 등을 사용 시 문제가 되는 긴 시험시간, Clay 자국 발생 등의 문제를 해결 가능한 실링 방법임.

(3) 시험 방법

- ① 포장표면 이물질 제거 후 발포실리콘을 이용하여 내경 50cm의 링 설치.
- ② Pre-wetting과정: 링 내에 10L의 물을 나눠 주입.
- ③ 1차 측정: 하중을 가한 뒤 물 주입 직후 링 내의 수위 1cm를 형성하기 위한 2L의 물을 주입한 후 투수완료 시간을 측정.
- ④ 2차 측정: 5분 이내에 ③와 같은 방법으로 측정.
- ⑤ 표면침투율 산정법은 1,2차 측정값의 평균값을 사용.
- ⑥ 이어서 내경이 30cm인 링을 설치하여 ③(2L→700mL)~⑤과정을 반복.
- ⑦ 아래와 같은 공식을 이용하여 표면침투율을 계산.

$$V = \frac{Q}{A \cdot T}$$

$$\left(\begin{array}{l} V = \text{투수속도}(mm/s) \\ Q = \text{물의용적}(l) \\ A = \text{싱글링의면적}(cm^2) \\ T = \text{투수시간}(sec) \end{array} \right)$$

※Pre-wetting과정부터 시험완료 시점까지 차수를 위한 지속적인 하중재하 요구.

사. 평판재하시험을 통한 투수성 기층 재료의 다짐정도에 따른 강성평가

(1) 개요

- 본 연구의 목적은 투수성 포장 개립도 골재 기층의 다짐품질관리 기준을 수립하기 위한 연구의 일환으로, 다짐정도에 따른 현장 개립도 골재 기층의 역학적 거동을 강성평가를 통해 알아보는 것.
- 이에 따라 본 연구에서는 다짐된 지반의 강성을 평가하기 위해 평판재하시험을 선택하고 투수성 포장 기층으로 적용될 수 있는 다양한 입도의 개립도 골재를 사용하여 개립도 골재 기층 현장시험장을 구축함.
- 이렇게 구축된 여러 종류의 개립도 골재 기층의 역학적 거동을 진동롤러다짐반복횟수에 따른 강성 변화를 측정하여 평가하였음.

(2) 현장시험

(가) 시험 재료

- 현장시험에는 D40(최대입경 40 mm), D25(최대입경 25 mm), D13(최대입경 13 mm)의 3가지 유문암질 개립도 골재가 사용되었음. 해당 골재는 시험 전 자연건조상태로 시험부지 근처에 미리 준비하여 보관해두었음. 그리고 D40과 D25를 같은 부피비율로 혼합하여 D40+D25를 만들고, 같은 방식으로 D25+D13을 제작(아래 그림에 나타냄). 골재의 혼합을 위해 백호를 사용하였고 백호 버킷을 부피의 기준으로 사용. 결과적으로 총 5가지 입도의 골재가 시험재료로 준비되었고 이를 현장시험장 시공에 사용.



(a) D40(최대입경 40 mm) 골재 (b) D25(최대입경 25 mm) 골재 (c) D13(최대입경 13 mm) 골재

그림 1.사.1 현장시험에 사용된 골재의 종류

- 각 재료의 골재 부피구성, 기본물성, 입도분포는 아래에 나타냄. 아래에 나타낸 입도분포 그래프에는 기존 도로포장 기층에 사용되는 밀입도 골재(국토교통부 2015)와 투수성 포장 기층에 사용되는 개립도 골재 입도 기준 (서울특별시 2013, Smith 2011, Eisenberg et al. 2015)을 함께 나타내었음. D40+D25의 입도가 ICPI(Smith 2011), ASCE(Eisenberg et al. 2015)이 제안한 ASTM No. 57 골재나 서울시(서울특별시 2013) 제안 골재와 유사한 분포를 나타냄.

표 1.사.1 시험재료의 기본물성

시험재료	암질	재료구성 부피비(%)			균등 계수 (Cu)	곡률 계수 (Cc)	통일 분류 (USCS)	비중 (Gs)	마모도 (%)
		D40	D25	D13					
D40	유문암	100	-	-	2.88	1.19	GP	2.67~2.75	12.8
D40+D25		50	50	-	2.99	1.08			9.8
D25		-	100	-	2.48	1.02			10.3
D25+D13		-	50	50	2.84	1.16			11.2
D13		0	0	100	2.79	1.16			12.3

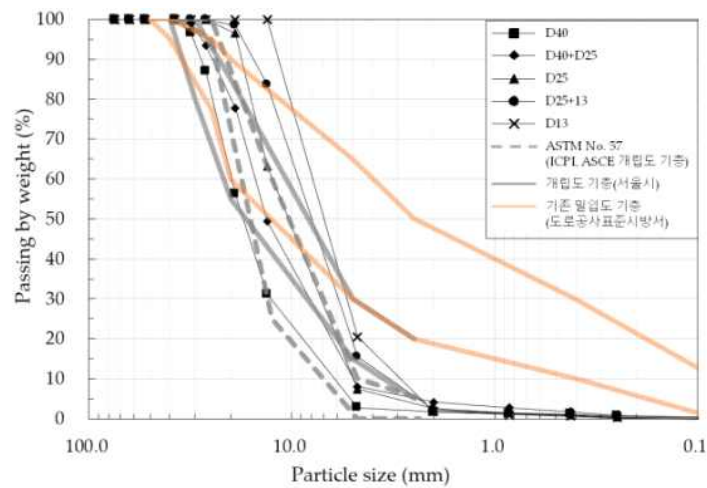


그림 1.사.2 시험재료와 기존 기준의 입도분포

(나) 시험계획

- 시험은 앞서 설명한 5가지의 재료에 대해 다음과 같이 계획됨.
- 먼저 각 골재를 30 cm 만큼 포설(첫번째 층)한 후 10톤 진동다짐롤러로 12회 다짐을 수행. 이때, 롤러다짐반복횟수의 증가에 따른 다짐된 골재지반의 강성변화를 알아보기 위해 2, 4, 8, 12회의 롤러다짐반복횟수에서 모든 재료에 대해 평판재하시험을 2회 반복하여 실시함.
- 시험에는 직경 30 cm 평판을 사용함. 그 후 앞서 포설된 골재층 위에 30 cm 만큼 각 골재를 더 포설(두번째 층)한 후 동일 과정을 반복하였음.
- 결과적으로 총 80회의 평판재하시험을 실시함(시험조건 : 5개 재료, 2개 층, 4종류의 롤러다짐반복횟수, 시험조건 당 시험횟수 : 2회의 반복시험).
- 평판재하시험 결과로부터 본 연구의 “평판재하시험(Plate load test, PLT)를 통한 지반 강성평가”에서 설명한 독일 DIN 18134 기준을 사용하여 첫번째, 두번째 재하사이클의 변형률계수(각각, E_{v1} , E_{v2})와 지반반력계수(2.5 mm 침하량에서 산정, $k_{2.5}$)를 계산함.

표 1.사.2 시험계획

시험조건			시험조건 당 시험횟수	총 시험횟수
시험재료	성토 층 두께 ¹	롤러다짐 반복횟수		
D40	30 cm(첫번째 층) 60 cm(두번째 층)	2	2회	80회
D40+D25		4		
D25		8		
D25+D13		12		
D13				

¹ 시험재료를 30 cm 포설하여 첫번째 층을 구성하고 진동롤러로 다져 계획한 평판재하시험을 완료한 후, 첫번째 층 위에 30 cm 만큼 골재를 더 포설하여 두번째 층을 구성하고 첫번째층과 동일하게 시험을 수행하였음.

(다) 현장시험장 시공과 시험절차

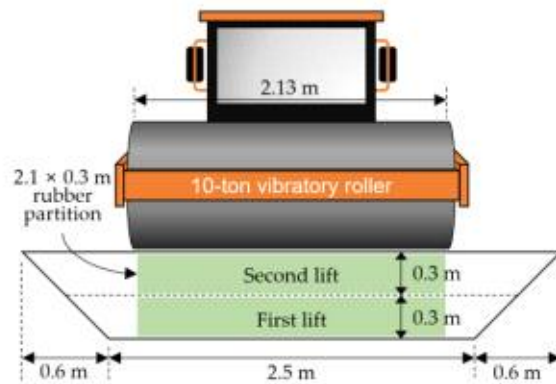
○ 현장시험장은 부산대학교 양산캠퍼스 내에 있는 한 부지에 시공되었음.



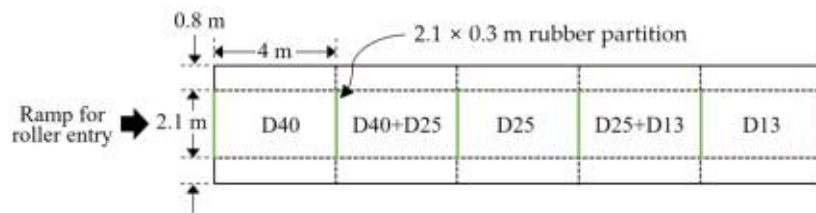
그림 1.사.3 현장시험장 전경(가까운 쪽부터 D40, D40+D25, D25, D25+D13, D13 시험구역)

○ 시험을 위해 구축한 현장시험장의 형상은 다음과 같음.

- 굴착된 시험장의 전체 평면크기는 3.7×20 m이며 횡단면은 사다리꼴 형상으로 시공하여 시험 및 건설장비의 원활한 진입을 위한 경사로를 두었음.
- 굴착 후 시험장을 고무 파티션을 사용하여 5가지 구역으로 나눔.



(a) 횡단면도



(b) 평면도

그림 1.사.4 현장시험장 개략도

○ 시공 과정은 다음과 같음.

- 각 시험재료가 포설될 공간을 구분(아래 그림 a).
- 해당 구역에 각 시험재료를 포설하고 백호 버킷을 사용하여 첫번째 층 높이(30 cm)가 되도록 표면을 평평하게 다듬음. 이때 층 높이는 고무 파티션(높이 30 cm)을 기준으로 사용하여 30 cm가 되도록 조절되었음(아래 그림 b).
- 첫번째 층 포설이 완료된 후 10톤 진동롤러(Dynapac)를 사용하여 시험장의 종방향을 따라 계획된 롤러다짐반복횟수(2, 4, 8, 12 회 중 계획 횟수)만큼 골재층을 다지고(아래 그림 c) 각 롤러다짐반복횟수 마다 모든 시험재료에서 평판재하시험을 실시하여 다짐된 개립도 골재 기층의 강성을 평가함(아래 그림 d).



(a) 시험장 굴착 시험구역 구분



(b) 시험재료 포설



(c) 진동다짐



(d) 평판재하시험 실시

그림 1.사.5 현장시험장 시공과 시험절차

- 첫번째 층에서 모든 시험이 종료된 후 두번째 층을 그 위에 포설하고 동일한 다짐과 시험을 반복함.
- 평판재하시험 방법은 다음과 같음.
 - 평판재하시험은 본 논문의 “평판재하시험(Plate load test, PLT)를 통한 지반 강성평가”에서 설명한 독일 DIN 18134(DIN 2012)를 기준으로 수행되었으며 현장상황에 따라 일부 과정은 적절히 수정됨.
 - 시험에는 직경 30 cm의 평판을 사용하였고, 다짐 후 시험지반은 매우 평평하였기 때문에 평판 설치상태를 고르게 하기 위한 모래는 별도로 사용하지 않음.
 - 평판에 반력하중을 전달하기 위해 백호를 사용함.
 - 평판에 작용하는 수직응력은 유압잭에 부착된 다이얼게이지를 통해 유압을 읽고 이를 평판면적으로 환산하여 측정함.
 - 시험 시작 전 평판이 시험지반에 적절히 안착되도록 하기 위해 약 0.1 MPa의 초기응력을 가하고 30초 가량 대기한 후 변위측정용 다이얼게이지의 영점을 조절함(선행재하과정).
 - 재하과정(첫번째 재하사이클)은 계획된 최대응력(약 0.5 MPa)까지 총 8단계에 걸쳐 등간격으로 구성하여 재하함.
 - 그 후 최대응력의 50%, 25%, 그리고 마지막으로 선행재하과정에서 가했던 초기응력치

까지 제하하고, 다시 하중을 재하함(두번째 재하사이클). 두번째 재하사이클은 첫번째 재하사이클과 동일하나, 8번째 단계의 응력, 즉 최대응력은 가하지 않음.

- 초기응력과 최대응력은 시험 주변장치와 현장상황에 따라 다소 차이가 있음.

○ 시험이 수행된 위치는 아래 그림에 나타냄.

- 그림에서 회색원은 평판재하시험이 수행된 위치를 나타내고, 숫자(2, 4, 8, 12)는 롤러 다짐반복횟수, 그리고 기호 "a", "b"는 해당 롤러다짐반복횟수에서 수행된 첫번째, 두번째 시험의 위치를 나타냄.
- 시험 간 간섭을 최대한 피하기 위해 오프셋 두고 시험을 실시하였음.

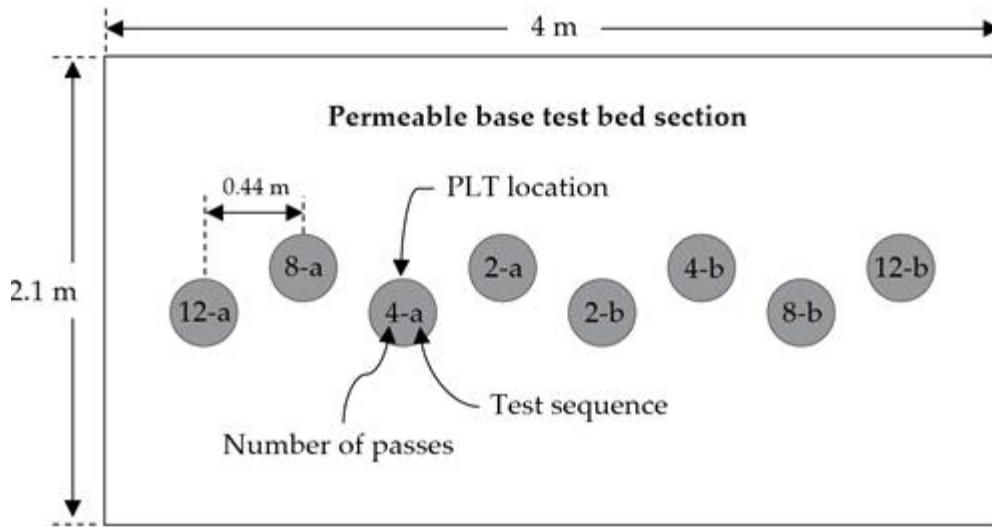


그림 1.사.6 각 시험구역의 시험위치(모든 구역 동일 적용)

(3) 결과 및 고찰

(가) 평판재하시험 결과

- 평판재하시험 결과평판재하시험 결과로부터 얻은 응력-침하량 관계로부터 앞서 설명한 독일기준(DIN 18134) 평판재하시험 방법을 사용하여, 첫번째 재하사이클에서의 변형률계수(E_{v1})와 두번째 재하사이클에서의 변형률계수(E_{v2})를 계산함.
- 지반반력계수는 연성포장의 한계침하량인 2.5 mm를 적용하여, 침하량 0인점과 회귀곡선상 침하량 2.5 mm인 점의 평균 기울기를 지반반력계수($k_{2.5}$)로 정의하고 다음 식을 사용하여 계산함.

$$k_{2.5} = \frac{\Delta\sigma_0}{s}$$

- 여기서, $\Delta\sigma_0$ 는 침하량 0인점의 응력(초기응력)과 회귀곡선상 침하량 2.5 mm에 해당하는 응력의 차이, s 는 침하량. 시험결과 예시로 응력-침하량 관계를 아래 그림에 나타내었고, 이로부터 결정된 회귀계수(a_0, a_1, a_2)와 $E_{v1}, E_{v2}, k_{2.5}$ 의 계산결과를 다음 표에 나타냄.

- 시험결과, 개립도 골재는 대부분의 시험조건에서 시험응력에 의해 발생하는 평균 침하량이 $k_{2.5}$ 를 계산할 때 사용되는 변위인 2.5 mm를 크게 상회하는 것으로 나타남. 따라서 $k_{2.5}$ 는 응력-침하량 곡선의 초기부분만 반영하게 됨. 반면 E_{v1} 과 E_{v2} 는 발생한 변위수준과는 무관하게 $k_{2.5}$ 보다 넓은 범위의 응력수준을 고려함.

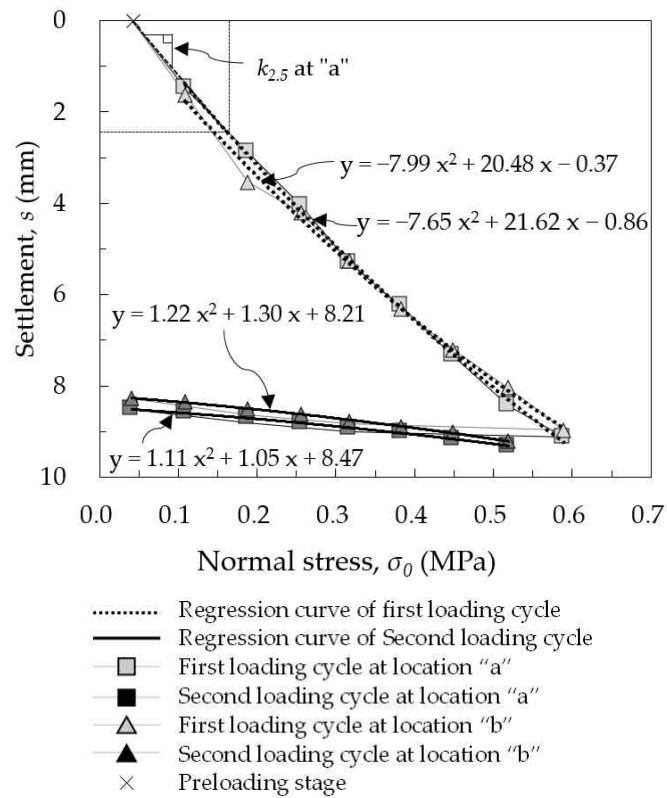


그림 1.사.7 응력-침하량 관계(D25, 첫 번째 층, 4회 다짐, 위치 “a”, “b”)

표 1.사.4 응력-침하량 관계로부터 계산된 회귀계수(a_0 , a_1 , a_2)와 강성(E_{v1} , E_{v2} , $k_{2.5}$)
(D25, 첫 번째 층, 4회 다짐, 위치 “a”, “b”)

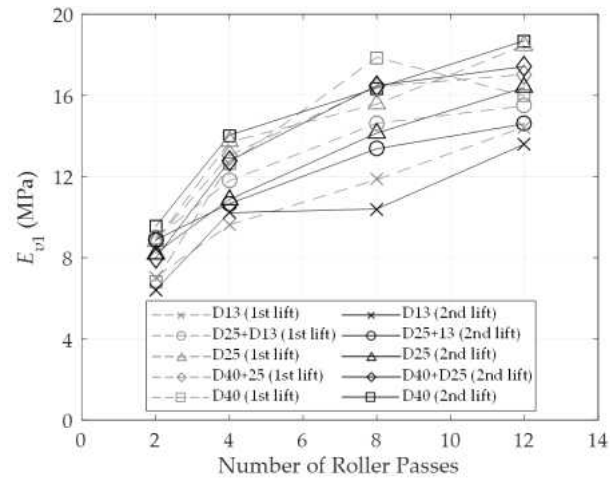
Case	a_2 (mm/MPa ²)	a_1 (mm/MPa)	a_0 (mm)	E_{v1}^1 (MPa)	E_{v2}^1 (MPa)	$\Delta\sigma_0$ (MPa)	$k_{2.5}$ (MPa/m)
“a”-1st loading	-7.646	21.623	-0.861	13.144	-	0.124	49.727
“a”-2nd loading	1.108	1.046	8.469	-	132.447	-	-
“b”-1st loading	-7.994	20.483	-0.371	14.264	-	0.108	43.218
“b”-2nd loading	1.219	1.298	8.206	-	111.584	-	-

¹ 시험 시 최대응력 $\sigma_{0 \max}$ 는 0.589 MPa.

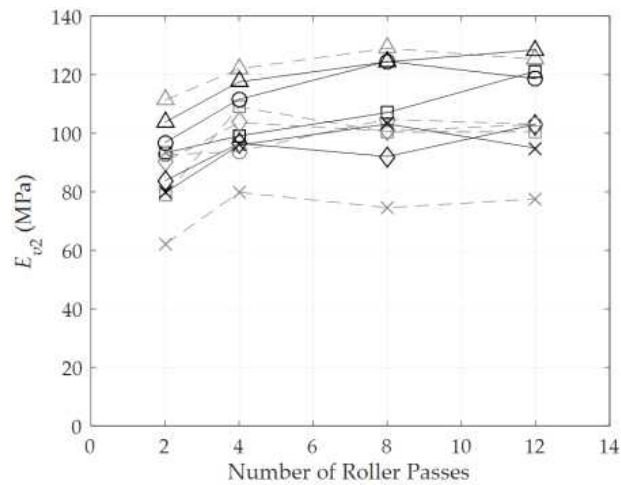
(나) 롤러다짐반복횟수에 따른 강성 변화

- 시험조건별 롤러다짐반복횟수에 따른 E_{v1} , E_{v2} , $k_{2.5}$, E_{v2}/E_{v1} 의 변화를 아래에 요약하여 나타냄. 각 점은 각 시험조건에서 실시된 두 반복시험 결과의 평균값을 나타냄.

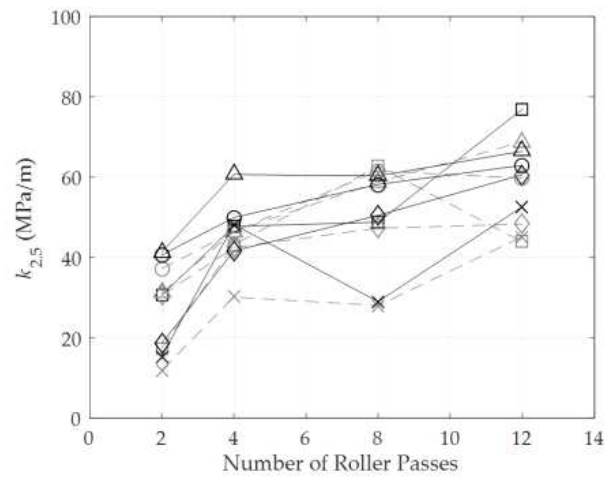
- 롤러다짐반복횟수에 따른 E_{v1} 변화



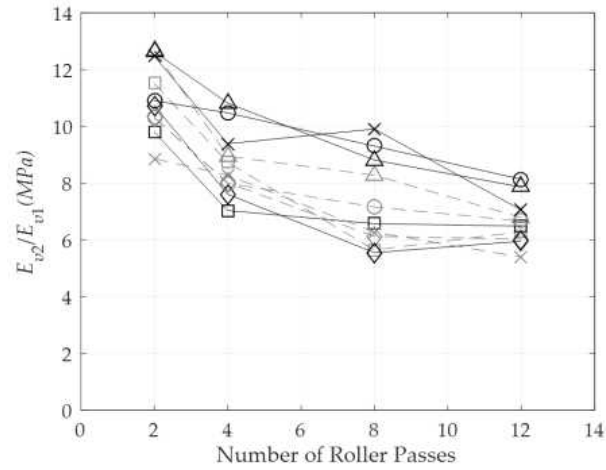
- 롤러다짐반복횟수에 따른 E_{v2} 변화



- 롤러다짐반복횟수에 따른 $k_{2.5}$ 변화



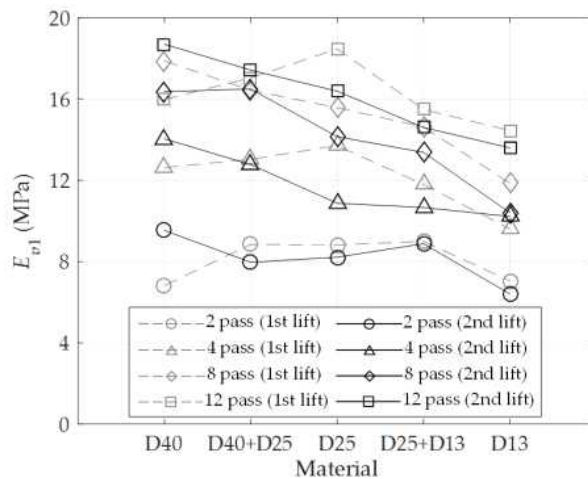
- 롤러다짐반복횟수에 따른 E_{v2}/E_{v1} 변화



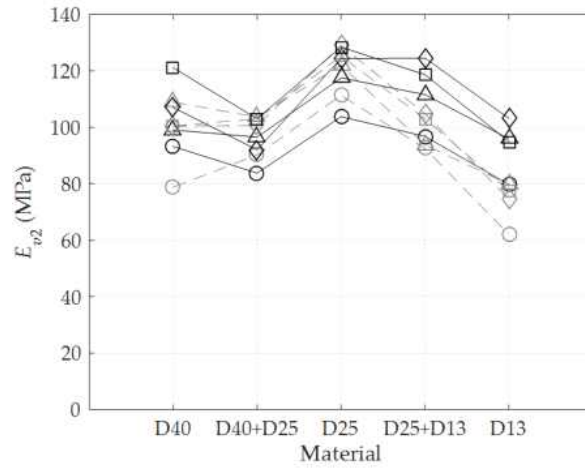
- 대부분의 시험조건에서 E_{v1} , E_{v2} , $k_{2.5}$ 값은 다짐횟수 4회까지는 가파르게 증가함. 4회 이후에도 E_{v1} 은 롤러다짐반복횟수 증가에 따라 지속적인 증가추세를 보였으며 증가율은 감소함.
- E_{v2} 와 $k_{2.5}$ 는 4회 이후 일부 시험조건에서 증가하는 경향을 보이기도 하였으나, E_{v1} 와 같이 다짐횟수의 증가에 민감하게 반응하여 증가하거나 일관된 경향을 보이지는 않음.

(다) 재료에 따른 강성 변화

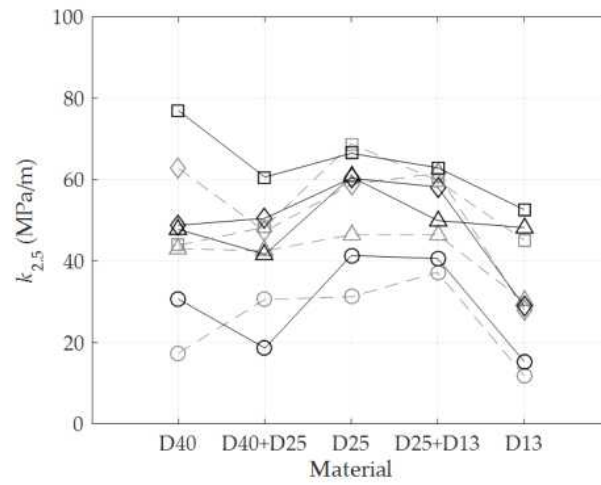
- 재료종류에 따른 강성의 경향을 더 잘 알아보기 위해 시험 결과를 아래와 같이 다시 정리하여 나타냄.
- 재료에 따른 E_{v1}



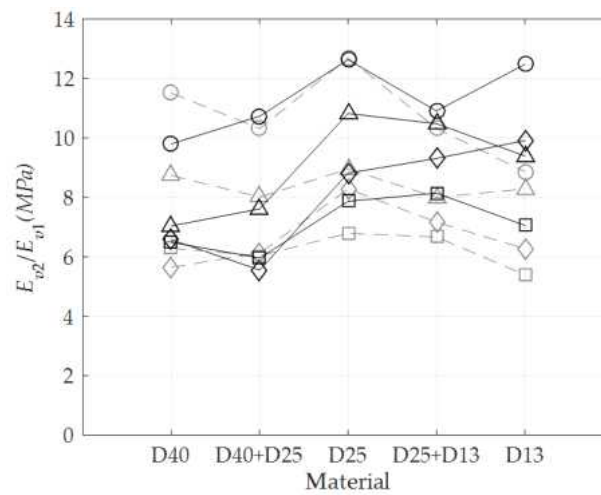
- 재료에 따른 E_{v2}



- 재료에 따른 $k_{2.5}$



- 재료에 따른 E_{v2}/E_{v1}



- E_{v1} 의 경우 시험재료의 입경이 클수록 강성이 큰 경향을 보임. 시험재료 중 가장 입경이 작은 D13은 대부분의 경우에 대해 가장 작은 E_{v1} , E_{v2} , $k_{2.5}$ 값을 보였다. E_{v2} 값은 대부분 80~130 MPa 범위의 값을 보임. $k_{2.5}$ 값의 경우 일정하지 않은 결과를 보였는데, $k_{2.5}$ 는 응력-침하량 곡선의 초기부분만 반영하여 계산된 강성이기 때문인 것으로 생각됨.

(라) 결론

- 본 연구에서는 개립도 골재의 역학적 특성을 알아보기 위해 현장시험장을 구축하고, 여러 입도의 개립도 골재를 준비하여 다짐정도에 따른 강성변화를 평판재하시험을 통해 알아보았음. 시험결과 다음과 같은 결론을 도출하였음.
 - E_{v1} , E_{v2} , $k_{2.5}$ 값은, 본 실험에서 고려한 재료와 층높이에 대해, 진동롤러다짐반복횟수 4회까지는 급격히 증가하였음. 4회 이후에도 E_{v1} 은 증가율은 감소하였지만 지속적으로 증가하는 경향을 보임. 하지만 다른 강성지표의 경우 뚜렷한 증가추세를 보이지 않았음. ICPI(Smith 2011)나 ASCE(Eisenberg et al. 2015)에서 제안한 4회의 진동롤러다짐반복횟수는 효율적인 횟수이나, 추가적인 다짐을 통한 개립도 골재의 다짐상태 개선도 유효한 것으로 판단됨.
 - 재재하 사이클에서의 변형률계수(E_{v2})는 재료종류에 크게 영향을 받는 것으로 나타났음. 입경이 큰 골재를 2회만 다지는 것이 입경이 작은 골재를 12회 다지는 것보다 더 큰 E_{v2} 값을 보이는 경우가 종종 있었음. 개립도 골재 기층 시공에는 재료의 선택이 매우 중요하고, 충분한 다짐을 실시하더라도 재료를 잘못 선택하면 적절한 강성을 달성할 수 없다는 것을 확인할 수 있었음.
 - 개립도 골재의 경우 평판재하시험 시 큰 침하가 발생함. 이에 따라 응력-침하량 곡선의 초기부분만 고려하게 되는 $k_{2.5}$ 보다, 응력-침하량 곡선의 초기부분과 후기부분을 함께 고려하는 E_{v1} , E_{v2} 가 더 작은 측정치 편차와 높은 일관성을 보임. 개립도 골재의 경우 E_{v1} , E_{v2} 가 $k_{2.5}$ 보다 더 신뢰성 있는 다짐품질관리 지표인 것으로 판단됨.
 - 서울시나 독일의 다짐관리기준에 제시된 강성 요구값과 비교하였을 때, 모든 시험재료가 E_{v2} 기준을 만족하였지만 E_{v2}/E_{v1} , $k_{2.5}$ 는 만족하지 못했음. 이러한 결과를 보인 이유 중 일부는, 기존 기준의 요구값이 밀입도 재료에 대해 설정되었기 때문인 것으로 생각됨. 개립도 골재에 기층의 다짐관리를 위한 보다 적합한 강성 요구값 설정이 필요할 것으로 판단함.

2. 포장 공극, 폐색 입자 고려 투수성 포장 시스템의 침투 지속성 시뮬레이션 기법 개발

가. 물리적 모델 기반 지반 내 세립토 유동에 대한 수치해석적 연구

(1) 세립토 유동의 구성모델

(가) 세립토의 이탈, 부착 그리고 공극막힘

- 다공질 재료에서 세립토의 이탈과 부착의 이론적 배경은 세립토의 운동학에 기반한 여과모델(filtration model) (Logan, 2001)에 근거하고 있음. Bedrikovetsky 등(2011)은 세립토 최대 잔류함수(maximum retention function) σ_{cr} 을 도입하였으며, Coronado와 Díaz-Viera(2017)는 세립토의 농도 σ_a 가 σ_{cr} 에 근접할 때 연속적인 함수로 제시하였음. 세립토 이탈(detachment)과 부착(attachment)의 운동학적 거동을 모사하기 위하여 다음의 모델식을 제시하였음. 공극수의 흐름 속도 u 가 0일때, 부착의 변화량이 최대값을 갖도록 수정하였음.

$$\frac{\partial \sigma_a}{\partial t} = \begin{cases} -\lambda_d \cdot u \cdot (\sigma_a - \sigma_{cr}) & \sigma_a > \sigma_{cr} \text{ (detachment)} \\ \lambda_a \cdot c_e \cdot (1 - \sigma_a / \sigma_{cr}) & \sigma_a < \sigma_{cr} \text{ (attachment)} \end{cases} \quad \text{식 1}$$

- 여기서 λ_d 는 조립토 표면에서 세립토의 이탈계수[1/m]이며, $(\lambda_d \cdot u)^{-1}$ 는 세립토의 표면이 탈 과정을 통하여 $\sigma_a = \sigma_{cr}$ 에 도달하기 위한 지체 특정 시간을 나타냄(Coronado & Díaz-Viera, 2017). λ_a 는 세립토의 조립토 표면에 대한 침전 계수[1/s]이며, λ_a^{-1} 는 공극내의 이탈된 세립토가 조립토 표면에 완전히 침전하는데 소요되는 시간임.
- 유속 u 가 증가할수록, 최대 세립토 부착량 σ_{cr} 이 감소하여 식 9에서 세립토의 이탈량이 증가함. 공극수내의 세립토의 농도 c_e 는 세립토의 이탈과 부착에는 영향을 미치지 않으며, 부착 과정에서 세립토의 부착률에 영향을 미침. 공극수내의 세립토의 부착량 σ_a 이 최대값인 σ_{cr} 에 도달하면 추가적인 부착은 멈춤.
- 유동하는 세립토는 큰 공극은 통과하지만, 작은 공극에서 통과하지 못하고 막힘. 조립토의 공극에 세립토의 비가역적 공극막힘(clogging) 현상은 다음과 같은 선형의 운동방정식으로 표현됨. (Yang 등, 2016). 실내모형실험을 통하여 공극을 막은 세립토의 변화량은 공극수내의 세립토의 농도와 유속에 비례하는 것으로 나타남. (Bennacer 2013; Cui, 2017)

$$\frac{\partial \sigma_s}{\partial t} = \lambda_s \cdot u \cdot c_e \quad \text{식 2}$$

- 여기서, λ_s 는 공극수내의 세립토에 의한 공극의 폐색계수 [1/m]를 나타냄. 동일한 농도의 세립토를 이용한 일정유량 주입실험이나 순간 주입실험을 통하여, 실험결과와 이론식

에 대한 분석을 통하여 모델 변수 λ_s 를 산정할수 있음. (Cui, 2017).

(나) 역해석에 의한 세립토 공극막힘에 대한 물성치 추정

- 아래 그림은 초미분의 공극막힘 현상에 대한 실내실험과 역해석으로부터 산정된 λ_s 를 이용한 수치해석 결과를 보여주고 있음. 상부에서 주입되는 초미분의 농도는 100ppm, 300ppm이며, 침투 동수경사는 $i=1.0, 2.0$ 에 대한 해석을 수행하였음. 하부에서 유출되는 초미분의 농도변화는 실내실험과 수치해석 결과가 매우 유사하게 나타남.
- 아래 표는 역해석으로 부터 산정된 초미분 주입에 대한 폐색계수 λ_s 를 보여주고 있음. 4가지 실험조건에 대하여 폐색계수를 유사하게 도출되었으나, 초기 주입농도 100ppm & 동수경사 $i=1.0$ 에 대한 폐색계수는 다른 실험조건에 비하여 매우 크게 도출되었음. 이는 초기 주입농도 100ppm에 대한 실험결과들을 비교하면, 동수경사 $i=1.0$ 에서 초미분 유출량이 $i=2.0$ 에 비하여 작은 양임을 확인할 수 있음. 시료의 불균질성과 세립토의 침식-퇴적 모델의 미고려에 의한 것으로 추정됨.

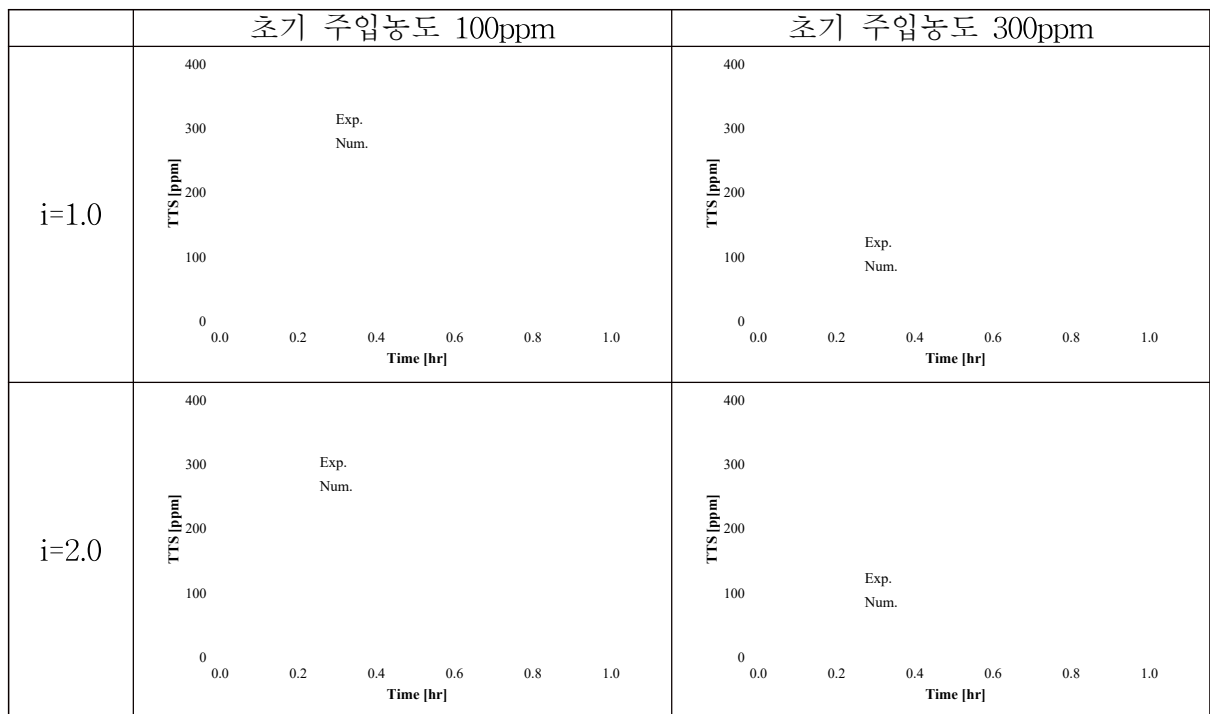


그림 1. 실험과 수치해석에 의한 세립토 유출농도 비교 (초미분)

표 1. 수치해석으로 부터 추정된 초미분에 대한 폐색계수 λ_s [1/m]

	초기 주입농도 100ppm	초기 주입농도 300ppm
i=1.0	11.09	3.56
i=2.0	4.29	3.49

- 아래 그림은 초미분의 공극막힘 현상에 대한 실내실험과 역해석으로부터 산정된 λ_s 를 이용한 수치해석 결과를 보여주고 있음. 그리고 아래 표는 역해석으로부터 산정된 초미분 주입에 대한 폐색계수 λ_s 를 보여주고 있음.
- 하부에서 유출되는 초미분의 농도변화는 실내실험과 수치해석에서 매우 유사하게 나타남. 그리고 역해석을 통하여 산정된 폐색계수는 모든 실험조건에 대하여 유사한 값을 보여주고 있음. 앞서 제시한 표 (위 참조)의 초미분과 아래에 제시한 미분을 이용한 폐색실험 결과에서 미분에 대한 폐색계수 λ_s 가 큰 값을 보여주고 있는데, 이는 동일한 조립토의 공극에 대한 유동하는 세립분의 입자가 크기 때문인 것으로 판단됨.

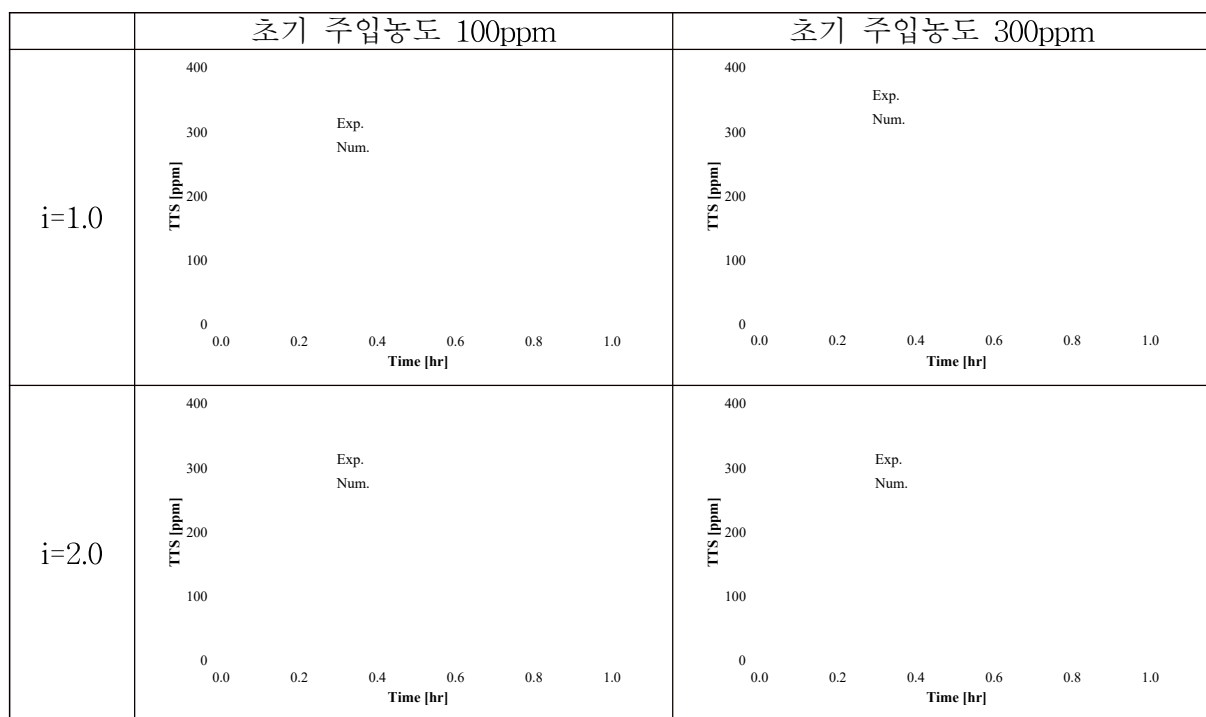


그림 2. 실험과 수치해석에 의한 세립토 유출농도 비교 (미분)

표 2. 수치해석으로부터 추정된 미분에 대한 폐색계수 λ_s [1/m]

	초기 주입농도 100ppm	초기 주입농도 300ppm
i=1.0	10.61	7.95
i=2.0	9.68	9.15

나. 이미지 기반 공극 분석기 및 가상 기료 분석기

(1) 연구 개요

- 미세 구조는 현미경으로 확대하여 볼 수 있는 매우 작은 규모의 재료 구조임. 미세 구조 특성은 재료 구조를 이해하고 재료의 기계적 거동 (탄성, 변형, 분산, 강수량 등)을 연구하는 데 매우 중요함
- 지속 가능한 개발을 위한 환경 문제로 인해 투수성 포장 사용이 증가하고 있음. 포장 품질을 향상시키기 위한 연구로 막힘 가능성 평가가 필요함. 기존에는 물리적 특성을 실험을 통하여 파악함.
- 이미지 분석이 필요한 도전적인 이유
 - 현장 실험: 필요한 재료, 장비를 구입 및 실험 장비 설정을 위한 사전 준비에 많은 인력, 시간, 비용이 소모됨.
 - 미세 구조 재구성: 제한된 자원과 데이터를 사용하여 정확한 미세 구조 재구성을 할 방법이 필요
 - 미세 구조 분석: 유동 특성 (flow property) 계산에서 임의 오류를 줄이고 형태학 특성을 효율적으로 평가하는 방법 연구 필요

(2) 기존 연구

- 이미지 처리 분야에서 통계 방법과 Support vector machine (SVM)과 유전 알고리즘과 같은 기계 학습 기술을 사용하여 3 차원 미세 구조를 재구성하는 방법들이 연구되어 왔음. 또한 하이브리드 최적화와 결합 된 Gaussian random field를 사용하여 특정 함수로부터 특정 함수로부터 3D 다공성 물질 구조를 생성하는 확률론적인 모델 연구도 있음
- 딥러닝 기술이 발전함에 따라 아래 표와 같이 딥러닝 기법을 활용하여 2차원 미세 구조를 재구성 하는 연구, 2차원/3차원 객체 구조를 구성하는 연구가 수행되었음. 하지만 본 과제에서는 딥러닝 기법을 적용하여 3차원 미세 구조 재구성을 하는 것이 목표이고, 이는 기존의 다른 연구와 차별성을 가짐.

표 2.나.1 미세 구조 재구성 관련 연구

접근 분류	방법	응용
통계적 접근	Two-point Correlation Function	미세 구조 기하학적 재구성, 분석
딥러닝	Convolutional Deep Belief Network	2차원 미세 구조 재구성
딥러닝	3D-GAN	3차원 객체 재구성
딥러닝	IWGAN	2차원/3차원 객체 재구성

(3) 3D-IWGAN을 사용한 투수성 포장 미세 구조 재구성 시스템

- 전체 시스템은 아래 그림과 같이 전처리 모듈, 3D 모델 생성 모듈, 포장 분석 모듈의 세 가지 주요 구성 요소를 가짐

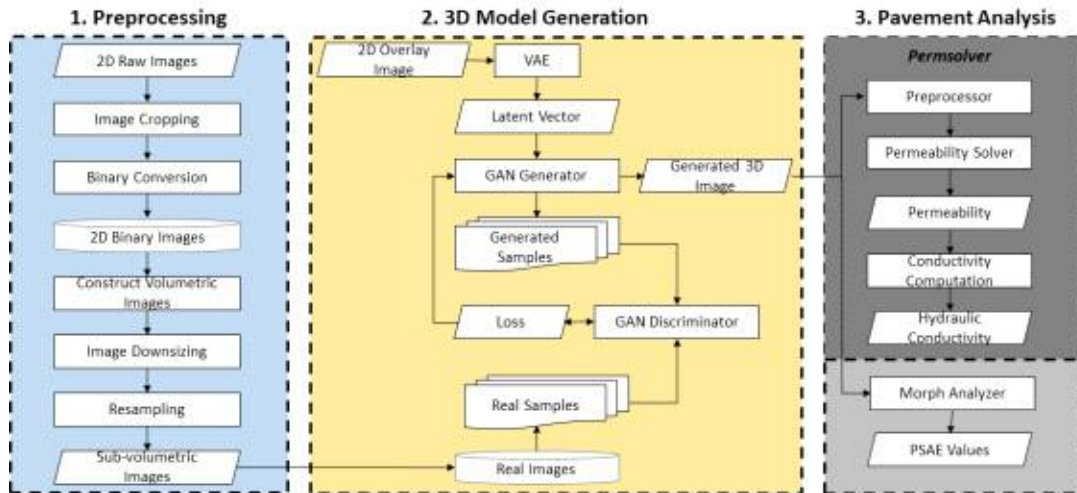


그림 2.나.1 3차원 미세 구조 재생성을 위한 시스템 구조

- 전처리 모듈: 입력으로 받은 2차원 이미지를 자르고, 변환하고, 크기 축소 및 샘플링 작업을 수행함
- 3D 모델 생성 모듈(이미지 기반 해석 모델): 다공성 포장 미세 구조물의 2차원 이미지로부터 3차원 이미지를 생성하기 위해 적대적 네트워크를 사용. 적대적 네트워크 생성기의 결과인 3차원 이미지는 결과 분석을 위한 입력으로 이용됨
- 포장 분석 모듈(가상 시료 분석 모델): 다공성, 투수율 및 수리학적 전도도와 같은 물리적 속성의 수치 값을 계산하여 2차원 이미지에서 생성된 3차원 이미지들의 정확성 검증
- 2차원 이미지 전처리 절차
 - 그림 48은 전처리 절차의 중간 결과물을 보여줌
 - 미세 구조의 원시 CT 이미지는 크기 1130 x 1130 픽셀의 이진 이미지로 변환
 - 두 번째 단계에서 변환된 이진 이미지의 원 안에서 크기 800 x 800 픽셀의 사각형 모양으로 자름
 - GAN의 입력 크기에 맞추어 동작할 수 있도록 300 x 300 픽셀 크기로 조정

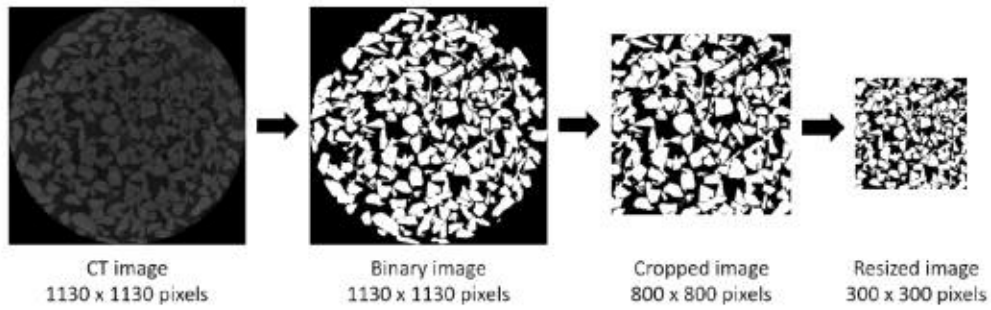


그림 2.나.2 2차원 이미지 전처리 절차

○ 3차원 이미지 전처리

- 이진 이미지를 쌓아서 그림 49와 같은 3차원 미세 구조 이미지 생성. 각 이미지에 대해 800 x 800 픽셀 크기의 침투성 포장 미세 구조 800 개 이미지를 이용함

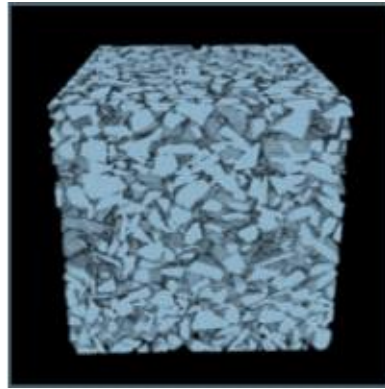


그림 2.나.3 침투성 포장 샘플의 복셀(체적) 이미지

- 800 x 800 x 800 크기를 가지는 복셀 이미지를 300 x 300 x 300 크기를 가지는 복셀 이미지로 축소. 하나의 데이터 샘플에서 다운사이징을 통하여 샘플의 속성을 가지는 여러 가지 샘플 이미지를 만드는 과정임.

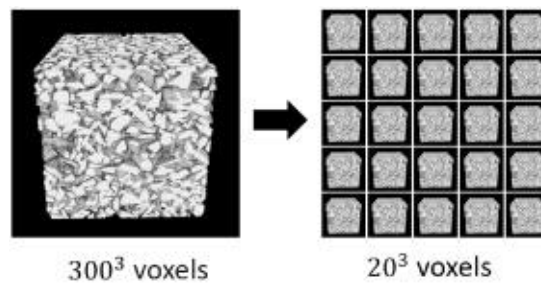


그림 2.나.4 리샘플링한 체적 이미지들

- 그림 50은 하나의 단일 샘플 이미지에서 생성한 24389개의 생성된 복셀 이미지를 보여줌

○ 3D-IWGAN을 활용한 3차원 모델 생성

- 적대적 생성 신경망(Generative Adversarial Network, GAN)은 서로 대립하여 데이터를 생성해내는 딥러닝(deep learning) 알고리즘 중 하나임. 3차원 이미지를 생성하기 위하여 GAN을 수정한 3D-IWGAN 모델에 기반하여 2차원 이미지로부터 3차원 이미지를 생성
- 아래 그림은 2차원 이미지로부터 3차원 이미지를 생성하는 생성기의 구성을 보여줌. 생성기가 만들어 낸 이미지는 판별기 네트워크로 전달되어 생성된 미세 구조 이미지가 실제 샘플 데이터의 이미지인지 판별하게 하는 방식으로 실제 이미지와 매우 유사한 3차원 이미지를 생성하게 됨.

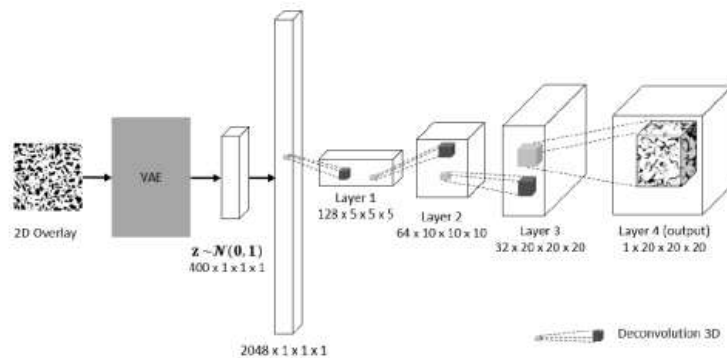


그림 2.나.5 생성기의 구조

- 입력으로 들어온 2차원 이미지에서 잠재 벡터(latent vector)를 생성하기 위해서 잠재 변수의 정규 분포를 가정하고, variational autoencoder (VAE)를 사용.

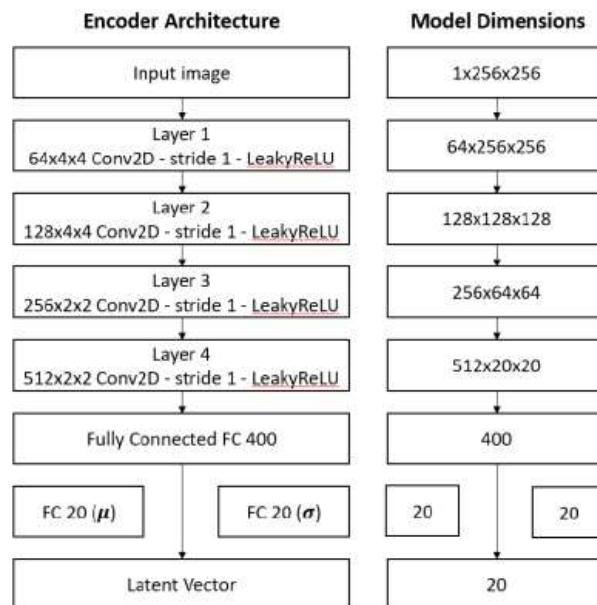


그림 2.나.6 VAE의 구조와 각 계층의 모델 차원 값

- 다음 표는 생성기와 판별기의 전반적인 계층 구조를 나열함. 생성기는 4개의 3차원 디콘볼루션 계층으로 결합되어 있으며, 판별기는 4개의 콘볼루션 계층으로 연결되어 있음.

표 2.나.2 Generator 계층 구성

Layer	Type	Filters	Stride	Padding	Batchnorm	Activation
1	DeConv3D	128	1	0	Yes	ReLU
2	DeConv3D	65	2	1	Yes	ReLU
3	DeConv3D	20	2	1	Yes	ReLU
4	DeConv3D	1	1	1	No	Tanh

표 2.나.3 Discriminator 계층 구성

Layer	Type	Filters	Stride	Padding	Batchnorm	Activation
1	Conv3D	1	1	1	No	LeakyReLU
2	Conv3D	32	2	1	No	LeakyReLU
3	Conv3D	64	2	1	No	LeakyReLU
4	Conv3D	128	1	0	No	LeakyReLU

○ 투수성 포장 분석 모듈

- 제안한 기법이 생성한 3차원 미세 구조 이미지가 사실적인 이미지를 생성하는 지를 확인하기 위하여 미세 구조의 물리적 특성을 분석하는 모듈이 필요함
- PermSolver 와 MorphAnalyzer를 모듈을 제안한 3차원 이미지 모듈과 결합하여 분석을 수행함.

(4) 실험 결과

○ 실험 환경

- 실험을 위하여 다음과 같은 컴퓨터를 사용: Intel Xeon (R) CPU E5-2609 v4 @ 1.70GHz x 16와 64GB 메모리, NVIDIA GeForce GTX 1060 6GB가 설치되어 있음. 64 비트 Ubuntu 16.04 운영체제 사용
- 시스템 구현을 위해 CUDA 툴킷 8.0 및 cuDNN 6.0으로 수행 된 Tensorflow-GPU 1.2.1을 사용하였고, Python 2.7을 이용하여 구현

○ 실험 데이터

- 투수성 포장 도로 시료 9개를 만들어서 CT 촬영하여 9개의 샘플 2차원 이미지를 생성. 9개의 샘플 이미지는 복셀 크기가 88.194 μm 인 CT 장비를 사용하여 스캔됨.
- 8비트 해상도로 이진 변환 한 샘플 이미지의 크기는 300 x 300 x 300 복셀. 리샘플링 하여 20 x 20 x 20 복셀을 가진 24389 이미지를 추출. 데이터셋의 크기는 약 14.4GB 임

○ 3차원 이미지 생성 결과

- 적대적 생성 네트워크를 훈련시키고, 판별자 네트워크에서 손실을 계산함. 제안한 기법과 기존의 3D GAN의 손실 값(loss)을 비교한 결과는 그림 53과 같음. 3D-GAN, 3D-IWGAN의 판별자 손실은 1000 회 반복 될 때까지 계속 증가지만, 제안하는 방법인 3D-IWGAN with simplified GP가 판별자 손실값이 처음에는 증가하다가 600 회 반복 후에는 비교적 안정된 값을 가짐을 확인할 수 있음.

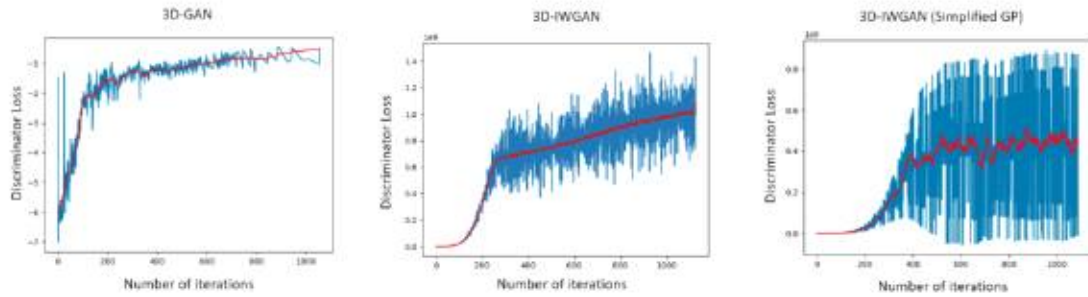


그림 2.나.7 손실 값 비교

- 아래의 첫 번째 그림과 두 번째 그림은 9개의 CT 샘플 이미지로부터 생성한 3차원 미세 구조의 이미지를 보여줌. GAN 방법으로 생성된 이미지는 원본 3D-IWGAN 및 3D-IWGAN에 의해 생성된 이미지와 비교하여 더 많은 공극을 가지고 있는 반면, 3D-IWGAN에 의해 생성된 이미지는 다른 방법에 비해 더 견고한 위상을 자짐. 세 가지 방법 중 이 과제에서 제안한 3D-IWGAN with simplified GP 기법이 포장 미세 구조의 보다 사실적인 표현하는 3차원 이미지를 생성함.

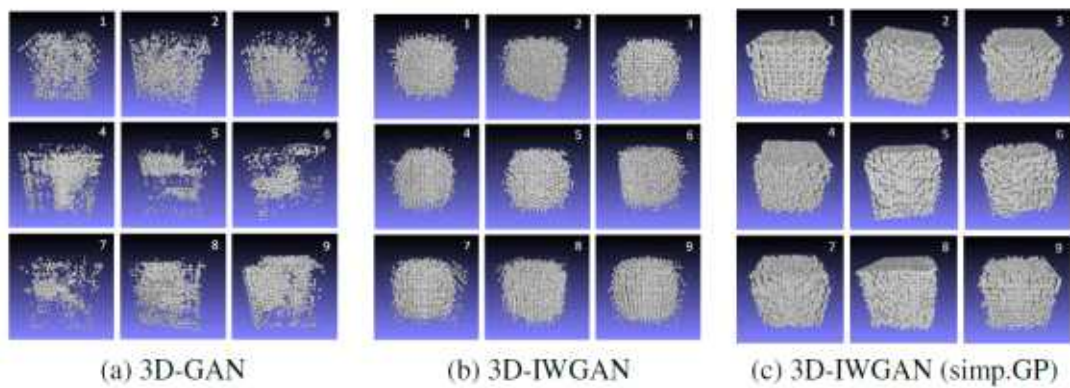


그림 2.나.8 생성된 3차원 미세 구조 복셀 비교

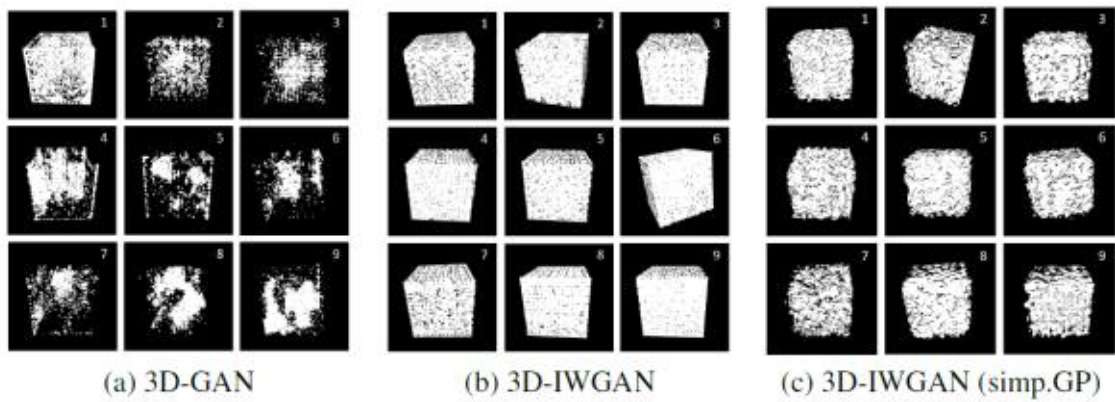


그림 2.나.9 생성된 3차원 미세 구조 이미지 비교

○ 투수 포장 분석 결과

- 투수성 포장과 같은 다공성 물질에서, 유체 특성은 다공성과 관련됨. 다공성은 또한 투수성 및 수리 전도성과 같은 다른 특성을 결정하는 데 필요함. ASTM 표준에 따르면, 투수성 포장에 대한 다공성은 약 15-35 %의 범위를 가짐. 아래 그림은 제안한 방법과 GAN 방법을 사용하여 생성된 9 개의 이미지들로부터 계산한 다공성 값을 보여줌. 다른 GAN 모델의 결과와 비교하여 볼 때, 제안한 모델은 다공성 값에서 ASTM 표준 값의 범위에 들어오는 다공성 값을 가짐을 확인함.

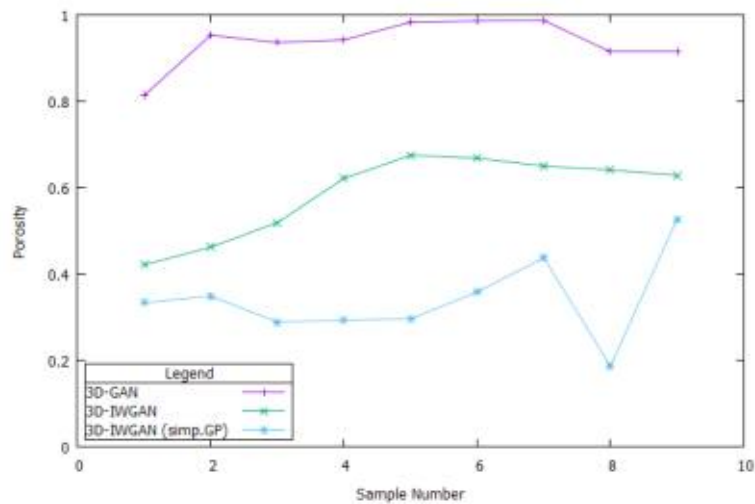


그림 2.나.10 다공성 값 그래프

- 각 시료에 대한 투자율 및 수분 전도도를 계산함. 이 계산 결과는 침투성 포장재의 막힘 가능성을 결정하는 데 사용됨

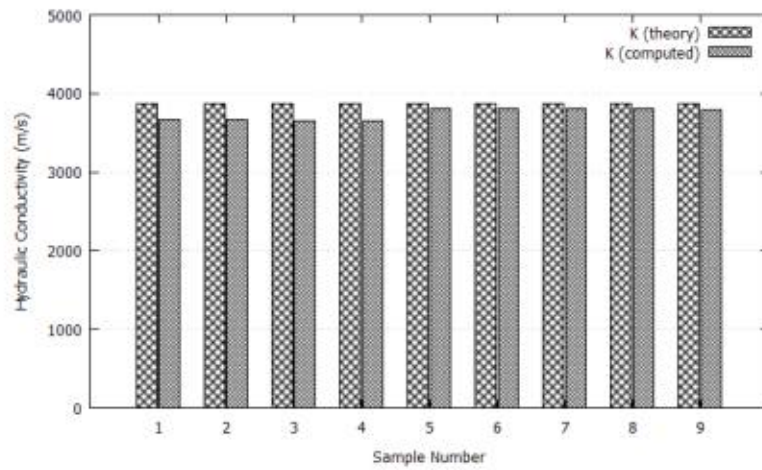


그림 2.나.11 계산한 Hydraulic Conductivity

- 앞서 제시된 그림 중 ‘다공성 값 그래프’에 따르면 생성된 9개의 3차원 이미지에서 이론적인 계산 값과 생성된 이미지로부터 계산한 결과 값은 1.9 % ~ 5.6 % 범위이며, 평균적으로 약 3.54 %의 차이임.

3. 공극 폐색이 적고 구조적으로 안정한 투수성 포장재 개발

가. 공극 폐색이 적고 구조적으로 안정한 투수성 폴리우레탄 포장재의 개발

(1) 개요 및 요약

○ 개발 기술

- 투수 포장은 우수를 침투시키는 수문학적 성능뿐만 아니라 교통하중에 대해 충분한 안정성 및 내구성을 가지는 것 또한 중요함.
- 본 개발 기술은 에스비비(주)의 폴리우레탄 포장재인 투수 콘크리트(아래 그림)임.
- 본 제품은 공극률이 30%이상으로 공극 막힘 현상에 대한 저항성이 비교적 우수하고, 뛰어난 투수성능을 가지고 있음.



그림 3.가.1 에스비비(주)의 폴리우레탄 포장재인 투수 콘크리트

○ 평가 범위 및 경위

- 투수성 포장의 가장 중요한 성능 중 하나는 투수성능. 이는 포장체가 가지는 공극률과 밀접한 연관이 있음.
- 투수 포장은 투수성능뿐만 아니라 교통하중에 대해 충분한 안정성 및 내구성도 확보하여야함.
- 또한 포장체 공극사이에 침투한 물이 기상요인에 의해 동결과 융해를 반복하며 포장체의 강도를 저하시키기 때문에 동결융해에 따른 저항성 또한 확보하여야함.
- 이와 관련하여 에스비비(주) 폴리우레탄 투수 콘크리트의 성능을 평가하기 위해 본 평가를 실시하였음.
- 본 평가 대상인 폴리우레탄 포장재 투수 콘크리트를 다양한 재료와 배합으로 제작하여 이들에 대해 공극률, 투수계수, 압축강도, 동결융해 저항성, 칸타브로 손실률 시험을 실시하고, 시험결과를 통해 성능을 종합적으로 평가하였음.

○ 평가 결과 요약

표 3.가.1 공극률, 투수계수, 압축강도, 동결융해 후 압축강도, 동결융해 후 압축강도 변화율, 칸타브로 손실률 시험 결과 요약

평가항목(평균치)	시험 종류			
	1안	2안	3안	4안
공극률 (%)	34.35	33.72	33.60	31.98
투수계수 (mm/s)	10.189	6.927	6.534	5.328
압축강도 (MPa)	8.20	8.87	8.71	9.93
동결융해 후 압축강도(MPa)	4.57	5.39	5.83	6.22
동결융해 후 압축강도 변화율(%)	-44	-39	-33	-37
칸타브로 손실률 (%)	33.32	23.34	38.65	36.05

(2) 시험 장비 및 절차

(가) 공극률 시험

- 투수 콘크리트의 공극률 계산에는 시험편의 겉보기부피와 비중이 필요함. 겉보기 부피는 시험편의 형상을 사용하여 계산함. 비중은 KS F 2366에 따라 측정하였음.



그림 3.가.2 이론최대밀도 시험기 구성

(나) 투수계수 시험

- 투수계수 시험은 본 연구과제에서 개발한 장비 및 절차를 사용하였음.
- 자세한 내용은 본 보고서의 제 3장 - 1절 “포장 공극, 폐색 입자 고려 투수성 포장 시스템의 침투 지속성 실험적 평가 기법 개발 및 표준화” - 가. “폐색을 고려한 소단면 투수성 포장과 하부재료 투수특성 평가장비 및 시험절차의 개발”에 자세히 나타내었음.

(다) 강도

- 강도시험은 KS F 2405의 ‘콘크리트 압축 강도 시험방법’ 기준으로 진행하였으며 상세한 시험과정은 다음과 같음.
- 공시체의 상하 끝면 및 상하의 가압판의 압축면을 청소.
- 공시체를 공시체 지름의 1% 이내의 오차에서 그 중심축이 가압판의 중심과 일치하도록 위치.
- 시험기의 가압판과 공시체의 끝면은 직접 밀착. 쿠션재 등은 사용하지 않음.
- 공시체에 충격을 주지 않도록 똑같은 속도로 하중을 재하. 하중을 재하하는 속도는 압축 응력도의 증가율이 매초 (0.6 ± 0.4) MPa가 되도록 함.
- 공시체가 급격한 변형을 시작한 후에는 하중을 가하는 속도의 조정을 중지하고 하중을 계속 재하.
- 공시체가 파괴될 때까지 시험기가 나타내는 최대 하중을 유효 숫자 3자리까지 읽음.



그림 3.가.3 압축강도시험 장면

(라) 동결융해 저항성

- 일반적으로 콘크리트 구조물은 기상작용의 영향을 받아 동결과 융해를 반복하며 수축하거나 팽창함. 이러한 현상이 장기간 지속될 경우 콘크리트의 내구성능을 저하시킴.
- 이러한 동결융해 작용에 대한 본 평가 투수 콘크리트의 저항성을 평가하기 위해 시편에 동결융해 사이클을 가하고 그 후 압축강도를 측정하였음. 그리고 이 값을 동결융해 사이클을 가하기 전의 압축강도와 비교함. 동결융해 사이클은 KS F 2456에 제시된 사이클을 사용함.
- 시험 장비는 동결융해 장비, 시험에 사용할 콘크리트를 담을 수 있는 용기로 구성. 동결융해 장치는 공시체가 소정의 동결 융해 사이클을 받는 데 적당한 체임버, 동결 및 가열 장치, 소정의 요구 온도 하에서 연속적이고 자동적으로 재현성 사이클을 발생시킬 수 있는 조절 장치로 구성. 용기는 시험에 사용할 콘크리트가 들어 갈만한 적당한 용기를 준비.
- 상세한 시험과정은 다음에 나타냄.
 - 용기에 콘크리트를 넣고 약 3mm 정도의 물로 덮이도록 채움.
 - 동결융해 장치에 콘크리트가 들어있는 용기를 넣고, 미리 설정해놓은 동결융해 사이클 조건으로 동결융해 시험을 진행함. 시험의 종료는 300사이클로 하며, 동결융해 사이클은 다음과 같음.
 - 동결 융해 1사이클은 공시체 중심부의 온도를 원칙으로 하며 원칙적으로 4℃에서 -18℃로 떨어지고, 다음에 -18℃에서 4℃로 상승되는 것으로 함. 각 사이클에서 공시체 중심부의 최고 및 최저 온도는 각각 $(4\pm 2)^\circ\text{C}$ 및 $(-18\pm 2)^\circ\text{C}$ 의 범위 내에 있어야 하고, 언제라도 공시체의 온도가 -20℃ 이하 또는 6℃ 이상이 되어서는 안 됨.
 - 동결융해 1사이클의 소요 시간은 2시간 이상, 4시간 이하. 융해 시간은 총시간의 25%보다 적게 사용하여서는 안 됨.
 - 임의의 공시체 중심에서의 온도가 3℃에서 -16℃로 떨어지는데 소요되는 시간은 냉각 시간의 1/2 이하가 되어서는 안 되고, 또 -16℃에서 3℃로 상승하는데 소요되는 시간은 가열 시간의 1/2 이하가 되어서는 안됨. 상호 비교를 목적으로 하는 공시체에서는 임의의 공시체의 중심 온도가 2℃에서 -12℃로 변화하는데 소요되는 시간이 다른 공시체에서 소요되는 냉각 시간의 1/6 이상 차이가 나서도 안 됨. 또한 임의의 공시체의 중심 온도가 -12℃에서 2℃로 변화하는데 소요되는 시간이 다른 공시체에서 소요되는 가열 시간의 1/3이상 차이가 나서는 안 됨.
 - 공시체의 중심과 표면의 온도차는 항상 28℃를 초과해서는 안 됨.
 - 동결 융해에서 상태가 바뀌는 순간의 시간이 10분을 초과해서는 안 됨.

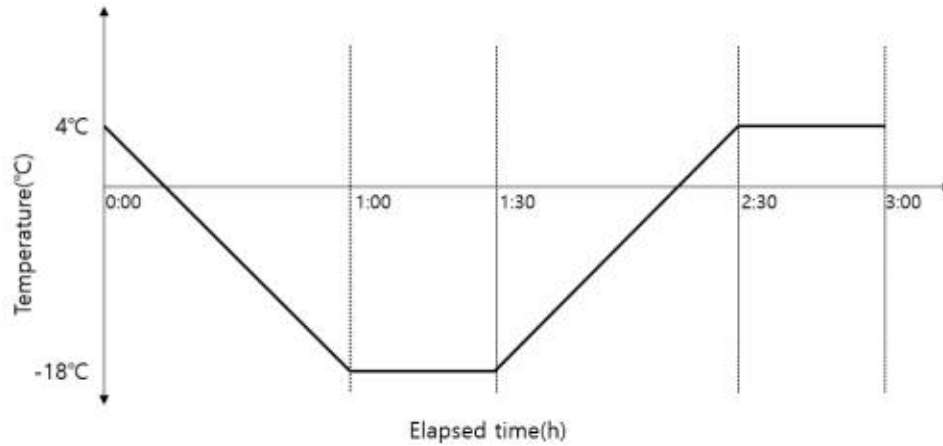


그림 3.가.4 동결융해 1사이클 구성 요약



그림 3.가.5 동결융해 시험 장면

- 300사이클이 종료되면, 동결 융해 후 변화한 시편의 강도를 알아보기 위해 압축강도 시험을 준비.
- 앞서 설명한 “압축강도” 시험 방법을 따라 압축강도 시험을 실시.
- 동결융해 전후의 압축강도를 비교.

(마) 칸타브로 손실률

- 시험 장비는 로스앤젤레스 시험기, 저울로 구성.
- 로스앤젤레스 시험기는 그림과 같이 안지름 $(710 \pm 5)\text{mm}$, 안쪽 길이 $(510 \pm 5)\text{mm}$ 의 양끝이 닫힌 강제 원통에 부착한 수평 회전축을 베어링에 부착한 것으로 함.
- 원통의 옆면에는 재료 투입구를 만들고 틈이 생기지 않도록 긴밀하게 연결할 수 있는 강제의 덮개를 부착. 이 덮개는 그 내면과 원통 내면이 같은 곡면이 되도록 부착할 수 있는 것으로 함. 원통의 내부에는 원통의 길이와 같고 너비 $(89 \pm 2)\text{mm}$ 의 뿔 수 있는 선반을 원통의 반지름 방향으로 $(89 \pm 2)\text{mm}$ 만큼 튀어 나와 부착함.
- 선반에서 재료 투입구까지의 거리는 회전 방향으로 원통의 바깥둘레를 따라 1270mm 이상 떨어져 있는 것으로 함.
- 칸타브로 시험은 KS F 2492의 시험방법을 따름.
 - 시편($\varnothing 100 \times 60\text{mm}$)의 질량을 0.1g 까지 측정하고 기록.
 - 시편을 로스앤젤레스 시험기에 넣고 매분 $(30 \sim 33)$ 회 회전수로 드럼을 300회 회전. 이때, 볼 베어링용 강구는 사용하지 않음.
 - 300회 회전 후 드럼 내의 시편을 꺼내어 0.1g 까지 시편의 질량을 측정하고 기록.
 - 총 3개의 시험 결과를 평균.



그림 3.가.6 칸다브로 손실률 시험기

(3) 시험 분석

(가) 공극률

- 이론최대밀도 시험결과로부터 다음 식을 사용하여 공극률을 계산.

$$n(\%) = \left(1 - \frac{A - C + B}{V \times \gamma_w}\right) \times 100$$

여기서,

n : 공극률(%)

V : 시편의 겉보기 부피(cm^3)

γ_w : 물의 단위중량(= 1 g/cm^3)

A : 시편의 자연건조 무게(g)

B : 물 + 용기 무게(g)

C : 물 + 시편 + 용기 무게(g)

(나) 투수계수

- 투수성능을 나타내는 지표인 투수계수를 결정하기 위해 Darcy의 법칙을 적용. Darcy에 따르면, 다음 식과 같이 다공성 매질을 통한 층류의 움직임은 동수경사에 비례.

$$q = kiA$$

여기서,

q = 체적 유량

k = 투수계수

i = 동수경사

A = 시료 면적

- 단위면적당 동수경사를 따라 흐르는 유체의 양으로 정의되는 유출속도는 다음과 같이 표현됨.

$$v = ki$$

- 정수두 시험에서, 일정 수준으로 유지된 동수경사에서 시간과 수위를 모두 기록. 유출속도(v)는 시간에 따른 측정수조의 수위 증가 측정치의 자료로 부터, 선형회귀분석을 통해, 수위 증가 추세의 기울기로부터 결정. 투수계수(k)는 유출속도(v)에서 동수경사(i)를 나누어 산정.

(다) 강도

○ 시험 후 다음 식으로 압축강도를 계산.

$$f_c = \frac{P}{\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

여기서,

f_c : 압축강도(MPa)

P : 시험기가 나타낸 최대 파괴 하중(N)

(라) 동결융해 저항성

○ (다) - “강도”에 제시된 식으로 동결융해 후 압축강도를 계산하고 동결융해 후 압축강도의 변화율을 다음과 같이 계산.

$$\text{동결융해 후 압축강도 변화율(\%)} = \frac{S_1 - S_0}{S_0} \times 100$$

S_0 : 동결융해 전 압축강도(MPa)

S_1 : 동결융해 후 압축강도(MPa)

(마) 칸타브로 손실률

○ 칸타브로 손실률은 다음식에 따라 계산.

$$C.L(\%) = \frac{A-B}{A} \times 100$$

여기서,

C.L : 칸타브로 손실률(%)

A : 시험 전 시편의 질량(g)

B : 시험 후 시편의 질량(g)

(4) 시험 결과

(가) 시험 대상

- 시험 대상은 에스비비(주)의 폴리우레탄 투수 콘크리트. 본 제품은 공극률이 30%이상으로 공극 막힘 현상에 대한 저항성이 우수하며, 뛰어난 투수성능을 가지고 있음.



그림 3.가.7 에스비비(주)의 폴리우레탄 투수 콘크리트

(나) 시편 특성

○ 기술의 개요

- 에스비비(주)의 투수 콘크리트는 기존 친환경 투수 포장재에 사용되는 골재와 Filler를 혼합한 직경 10cm, 높이 20cm인 공시체로 Filler 함유량(0%, 10%, 20% 30%)에 따라서 총 4종류로 이루어진 폴리우레탄 투수 콘크리트. 제품의 자세한 특징은 다음과 같음.

• 투수 특성

- 탁월한 투수 성능
- 간편한 성능 복원

• 물리적 특성

- 가수분해 및 자외선에 대한 내구성이 월등함

• 환경적 특성

- 유해물질이 검출되지 않음

• 경제성

- 경제적인 시공비
- 간편한 유지보수
- 침수, 가뭄, 열섬, 결빙 등 저감으로 사회적 비용 절감

○ 제품 제원

- 시편의 크기 : Ø100×200mm
- 시편의 제작 과정에서 발생한 시편 길이 오차가 있을 수 있음.

○ 시편 종류

- 본 투수 콘크리트는 앞서 설명한 바와 같이 기존 친환경 투수 포장재에 사용되는 골재와 Filler를 혼합한 공시체로, 총 4개의 종류로 이루어짐.

표 3.가.2 골재의 입도 분포

10mm이하 골재 체가름(mm)	백분위(%)	비고
10mm이하	65	±5%
5mm이하	30	±5%
2.5mm이하	5	±5%
합 계	100	

표 3.가.3 Filler의 사용유무 및 함량

종류	필러사용 유/무	필러사용 (%)
Case 1 (기존포장)	무	0
Case 2	유	10
Case 3	유	20
Case 4	유	30

표 3.가.4 투수콘크리트 배합표

종류	10mm이하 골재 체가름(mm)			Filler 함유량 (%)	Binder 함유량 (%)
	10mm이하	5mm이하	2.5mm이하		
Case 1 (기존포장)	65	30	5	0	5
Case 2	58.5	27	4.5	10	5
Case 3	52	24	4	20	5
Case 4	45.5	21	3.5	30	5

(다) 시험 상세

○ 공극률

- 위의 “시편 종류”에서 설명한 4종류의 시편(Case 1, Case 2, Case 3, Case 4)에 대해 각각 3개의 시편(시편1, 시편2, 시편3)을 준비하여 공극률을 측정함. 즉, 총 12회의 공극률 측정이 수행됨.

○ 투수계수

- 위의 “시편 종류”에서 설명한 4종류의 시편(Case 1, Case 2, Case 3, Case 4)에 대해 각각 2개의 시편(시편1, 시편2)을 준비하여 투수계수를 측정함. 즉, 총 8회의 투수계수

측정이 수행됨.

○ 강도

- 위의 “시편 종류”에서 설명한 4종류의 시편(Case 1, Case 2, Case 3, Case 4)에 대해 각각 3개의 시편(시편1, 시편2, 시편3)을 준비하여 압축강도를 측정함. 즉, 총 12회의 압축강도 측정이 수행됨.

○ 동결융해 저항성

- 위의 “시편 종류”에서 설명한 4종류의 시편(Case 1, Case 2, Case 3, Case 4)에 대해 각각 2개의 시편(시편1, 시편2)을 준비하여 동결융해 사이클을 가한 후 압축강도를 측정하고 사이클을 가하기 전의 압축강도와 비교하여 동결융해 저항성을 평가함. 즉, 총 8회의 동결융해 저항성 평가가 수행됨.

○ 칸타브로 손실률

- 위의 “시편 종류”에서 설명한 4종류의 시편(Case 1, Case 2, Case 3, Case 4)에 대해 각각 3개의 시편(시편1, 시편2, 시편3)을 준비하여 칸타브로 손실률을 측정함. 즉, 총 12회의 칸타브로 손실률 측정이 수행됨.

(라) 시험 결과 및 분석

- 공극률, 투수계수, 휨강도, 동결융해 후 압축강도, 동결융해 후 압축강도 변화율, 칸타브로 손실률 시험 결과를 다음 표에 나타냄.

표 3.가.5 공극률, 투수계수, 압축강도, 동결융해 후 압축강도, 동결융해 후 압축강도 변화율, 칸타브로 손실률 시험 결과

평가항목	시험기준	시편 종류			
		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
공극률 (%)	KS F 2366	34.35	33.72	33.60	31.98
투수계수 (mm/s)	자체 개발	10.189	6.927	6.534	5.328
압축강도 (MPa)	KS F 2405	8.20	8.87	8.71	9.93
동결융해 후 압축강도 (MPa)	KS F 2456 KS F 2405	4.57	5.39	5.83	6.22
동결융해 후 압축강도 변화율 (%)	자체 개발	-44	-39	-33	-37
칸타브로 손실률 (%)	KS F 2492	33.32	23.34	38.65	36.05

○ 투수계수 시험

- 투수계수 시험은 본 연구과제에서 개발한 장비 및 절차를 사용하였음.

- 자세한 내용은 본 보고서의 제 3장 - 1절 “포장 공극, 폐색 입자 고려 투수성 포장 시스템의 침투 지속성 실험적 평가 기법 개발 및 표준화” - 가. “폐색을 고려한 소단면 투수성 포장과 하부재료 투수특성 평가장비 및 시험절차의 개발”에 자세히 나타내었음.

○ 동결융해 후 압축강도 시험

- 동결융해시험은 KS F 2456의 수중 급속 동결융해 시험방법으로 진행하였음. 시료의 특성상 동 탄성 계수 측정 대신 압축강도를 측정하였으며, 동결융해 전과 후의 압축강도에 대한 동결융해 저항성을 평가함.

표 3.가.6 투수콘크리트 설계기준

항목	한국	일본 일본도로협회		미국 ACI
		차도	보도	
압축강도 (MPa)	≥ 18			
투수계수 (cm/s)	≥ 0.01	≥ 0.01	≥ 0.1	
공극률 (%)		15-20	20-25	15-25
칸타브로 손실률 (%)	≤ 20			

나. 공극 폐색이 적고 구조적으로 안정한 투수성 흙 콘크리트의 개발

(1) 개요 및 요약

○ 개발 기술

- 투수 포장은 우수를 침투시키는 수문학적 성능뿐만 아니라 교통하중에 대해 충분한 안정성 및 내구성을 가지는 것 또한 중요함.
- 본 개발 기술은 에스비비(주)의 투수 흙콘크리트 포장재인 워터포켓 투수블록(아래 그림)임.
- 본 제품은 실제 시공 시 줄눈에 워터포켓(틈새)이 형성되어, 빗물이 블록뿐만 아니라 줄눈을 통해 지반으로 침투되는 구조를 가지고 있음.



그림 3.나.1 ㈜더지엘 투수 흙콘크리트 포장재 워터포켓 투수블록

○ 평가 범위 및 경위

- 투수성 포장의 가장 중요한 성능 중 하나는 투수성능. 이는 포장체가 가지는 공극률과 밀접한 연관이 있음.
- 투수 포장은 투수성능뿐만 아니라 교통하중에 대해 충분한 안정성 및 내구성도 확보하여야함.
- 또한 포장체 공극사이에 침투한 물이 기상요인에 의해 동결과 융해를 반복하며 포장체의 강도를 저하시키기 때문에 동결융해에 따른 저항성 또한 확보하여야함.
- 이와 관련하여 에스비비(주) 워터포켓 투수 블록의 성능을 평가하기 위해 본 평가를 실시하였음.
- 본 평가 대상인 투수블록을 다양한 재료와 배합으로 제작하여 이들에 대해 공극률, 투수계수, 휨강도, 동결융해 저항성, 칸타브로 손실률 시험을 실시하였음. 그리고 시험결과를 통해 성능을 종합적으로 평가함.

○ 평가 결과 요약

표 3.나.1 공극률, 투수계수, 휨강도, 동결융해 후 휨강도, 동결융해 후 휨강도 변화율, 칸타브로 손실률 시험 결과 요약

평가항목(평균치)	시험 종류			
	1안	2안	3안	4안
공극률 (%)	19.40	24.53	22.58	22.59
투수계수 (mm/s)	0.160	0.302	0.113	0.092
휨강도 (MPa)	6.86	6.39	5.95	5.64
동결융해 후 휨강도(MPa)	6.52	4.37	5.74	5.50
동결융해 후 휨강도 변화율(%)	-5	-32	-4	-2
칸타브로 손실률 (%)	41.63	68.34	54.02	65.44

(2) 시험 장비 및 절차

(가) 공극률 시험

- 공극률 시험 장비 및 절차는 본 보고서의 제 3장 - 3절 “공극 폐색이 적고 구조적으로 안정한 투수성 포장재 개발” - 가. “공극 폐색이 적고 구조적으로 안정한 투수성 폴리우레탄 포장재의 개발” - (가) “공극률 시험”과 같음.

(나) 투수계수 시험

- 아래 그림은 투수성 시험기의 구성을 나타냄. 시험장비는 투수성 시험장치(거푸기, 수조)와 메스실린더, 초시계, 버니어캘리퍼스로 구성.
- 거푸기는 강철제 틀과 고무형틀로 이루어져 있으며, 그 사이에 투수성 블록을 넣고 고정용 볼트로 투수성 블록이 움직이지 않게 고정시켜주는 역할. 수조는 정확한 수두차를 유지할 수 있도록 바닥이 평평한 곳에 놓여야 함.

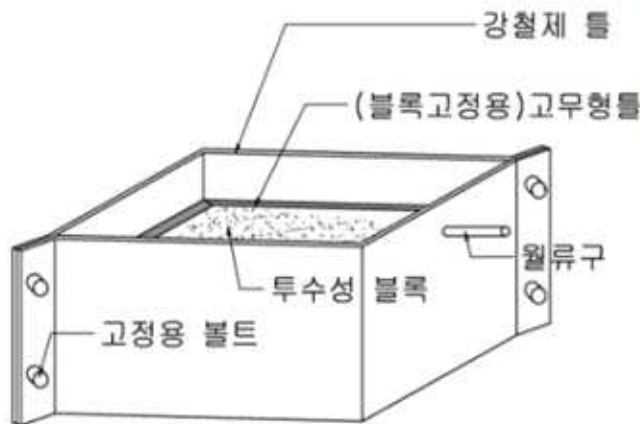


그림 3.나.2 투수성 시험기 구성

- 본 시험은 투수계수를 측정하기 위한 시험으로, 투수블록에 대해서는 KS F 4419가 사용됨. 자세한 절차는 다음과 같다.
 - 블록의 두께와 단면적을 버니어 캘리퍼스로 측정.
 - 아래 그림에 나타낸 바와 같이 거푸기 내에 블록을 고정. 이때, 블록 이외로 물이 빠지지 않도록 파라핀이나 실링재로 빈틈없이 채워 막음.
 - 아래 그림 “투수성능 시험 방법”에 나타낸 바와 같이, 투수성 시험장치의 월류 수조에 물을 채우고, 급수 쪽 거푸기 내 블록을 포수한 다음, 거푸기 윗부분의 월류구에서 물이 월류할 때까지 주수하여 수위를 일정하게 함.



그림 3.나.3 거푸기 내 블록 고정 및 실링

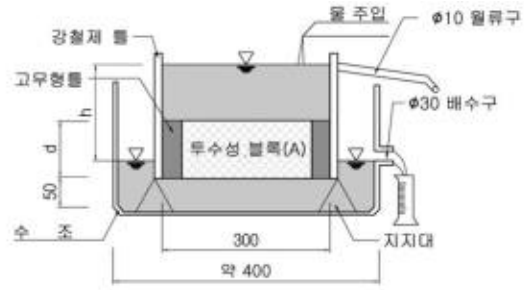


그림 3.나.4 투수성능 시험 방법

- 월류 수조에서 배수량이 일정해지는 것을 기다려서, 30초 동안의 유출수량 $Q(\text{mm}^3)$ 를 메스실린더로 측정.
- 동시에 30초 동안 배수되는 월류 수위와 급수 쪽 거푸기 수위와의 수위차를 측정.
- 투수계수는 시료 3개를 1분 이상의 간격을 두고 시험을 하여 각각의 값을 평균한 값으로 나타냄.

(다) 강도

- 강도시험은 KS F 4419 ‘보차도용 콘크리트 인터로킹 블록’의 ‘휨 시험’을 기준으로 진행하였으며 상세한 시험과정은 다음과 같음.
- 시료를 24시간 물속에 침수시킨 후 꺼낸 즉시 시험함. 지점간 거리를 140 mm로 취하여 지점 간 중앙에 하중을 재하.



그림 3.나.5 휨강도시험 장면

- 가압 속도는 파괴 하중의 약 50%까지는 빠른 속도로 작용시킨 다음, 최대 휨 압축 응력의 증가가 매분 $9.8 \text{ MPa}(= \text{N/mm}^2)$ 을 초과하지 않을 정도로 하중을 가하여 시험기에 나타난 최대 하중 P 를 측정함.

(라) 동결융해 저항성

- 일반적으로 콘크리트 구조물은 기상작용의 영향을 받아 동결과 융해를 반복하며 수축하거나 팽창함. 이러한 현상이 장기간 지속될 경우 콘크리트의 내구성능을 저하시킴.
- 이러한 동결융해 작용에 대한 본 평가 투수 콘크리트의 저항성을 평가하기 위해 시편에 동결융해 사이클을 가하고 그 후 압축강도를 측정하였음. 그리고 이 값을 동결융해 사이클을 가하기 전의 압축강도와 비교함. 동결융해 사이클은 KS F 2456에 제시된 사이클을 사용함.
- 시험장비와 절차에 대한 자세한 내용은 본 보고서의 본 보고서의 제 3장 - 3절 “공극 폐색이 적고 구조적으로 안정한 투수성 포장재 개발” - 가. “공극 폐색이 적고 구조적으로 안정한 투수성 폴리우레탄 포장재의 개발” - (라) “동결융해 저항성”과 같음.
- 아래 그림은 투수성 흙 콘크리트 포장재 동결융해 시험 장면.



그림 3.나.6 동결융해 시험 장면

(마) 칸타브로 손실률

- 시험장비와 절차에 대한 자세한 내용은 본 보고서의 본 보고서의 제 3장 - 3절 “공극 폐색이 적고 구조적으로 안정한 투수성 포장재 개발” - 가. “공극 폐색이 적고 구조적으로 안정한 투수성 폴리우레탄 포장재의 개발” - (라) “칸타브로 손실률”과 같음.

(3) 시험 분석

(가) 공극률

○ 이론최대밀도 시험결과로부터 다음 식을 사용하여 공극률을 계산.

$$n(\%) = \left(1 - \frac{A - C + B}{V \times \gamma_w}\right) \times 100$$

여기서,

n : 공극률(%)

V : 시편의 겉보기 부피(cm^3)

γ_w : 물의 단위중량(= 1 g/cm^3)

A : 시편의 자연건조 무게(g)

B : 물 + 용기 무게(g)

C : 물 + 시편 + 용기 무게(g)

(나) 투수계수

○ 투수계수는 다음 식에 따라 계산한다.

$$K = \frac{d}{h} \times \frac{Q}{A \times 30s}$$

여기서,

K : 투수계수(mm/s)

Q : 배수되는 유출수량(mm^3)

d : 블록의 두께(mm)

h : 수위차(mm)

A : 블록의 단면적(mm^2)

$30s$: 측정시간(s)

(다) 강도

○ 시험 후 다음 식으로 휨강도를 계산.

$$S = \frac{3Pl}{2bd^2}$$

여기서,

S : 휨강도(MPa)

P : 시험기가 나타낸 최대 파괴 하중(N)

l : 지점 간 거리(=140 mm)

b : 블록의 평균 폭(mm)

d : 블록의 평균 두께(mm)

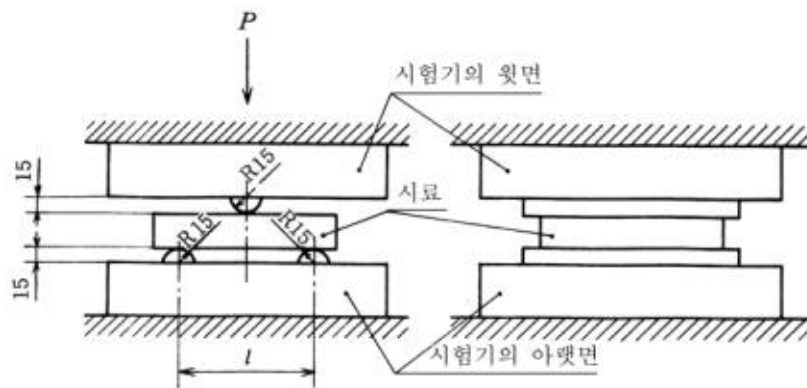


그림 3.나.7 휨 강도 시험방법

(라) 동결융해 저항성

○ 앞서 설명한 (다) “강도”에 제시된 식으로 동결융해 후 휨강도를 계산하고 동결융해 후 휨강도의 변화율을 다음과 같이 계산.

$$\text{동결융해 후 휨강도 변화율(\%)} = \frac{S_1 - S_0}{S_0} \times 100$$

S_0 : 동결융해 전 휨강도(MPa)

S_1 : 동결융해 후 휨강도(MPa)

(마) 칸타브로 손실률

○ 칸타브로 손실률은 다음식에 따라 계산.

$$C.L(\%) = \frac{A-B}{A} \times 100$$

여기서,

C.L : 칸타브로 손실률(%)

A : 시험 전 시편의 질량(g)

B : 시험 후 시편의 질량(g)

(4) 시험 결과

(가) 시험 대상

○ 실제 시공 시 줄눈에 워터포켓(틈새)이 형성되어, 빗물이 블록뿐만 아니라 줄눈을 통해
지반으로 침투되는 구조 가지고 있음.

(나) 시편 특성

○ 기술의 개요

- (주)더지엘의 워터포켓 투수블록은 줄눈확대에 의한 틈새투수형 보차도용 투수블록임.
시공 시 블록 4면에 워터포켓(틈새)이 형성되어 이 틈새와 블록을 통해 빗물이 지반으로 침투되고, 도로노면 비점오염원 저감기능을 가지고 있음. 제품의 자세한 특징은 다음과 같음.
- 블록 사이 워터포켓(물주머니)조성
 - 투수성 향상
 - 공극막힘에 대한 저항성 증가
 - 초기유출수 저감
 - 비점오염원 저감
- 블록단면구조(2개층 → 3개층) 변화
 - 하부고강도 콘크리트 → 휨강도 증대
- 3way 표면 줄눈 형성
 - 미끄럼저항성 및 보행안전성 향상
 - 유로형성으로 배수기능 향상

- 유해물질이 검출되지 않음
- 경제성
 - 경제적인 시공비
 - 간편한 유지보수
 - 침수, 가뭄, 열섬, 결빙 등 저감으로 사회적 비용 절감

(다) 제품 제원

- 시편의 크기 : 200×200×60mm
 - ※ 시편의 제작 과정에서 발생한 시편 길이 오차가 있을 수 있음
- 사용 재료
 - ※ 본 투수블록은 4.2.1절에 설명한 바와 같이 한 블록의 단면구조가 3개의 층으로 이루어짐

표 3.나.2 제품의 단면구성

구분	골재	바텀애쉬
상부층	규사(4호, 5호)	1~3mm
중간층	골재(8mm)	4~10mm, 1~3mm, 1mm이하 (72%, 21%, 7%)
하부층	골재(석분)	1~3mm

- 시편 종류

표 3.나.3 시편 종류에 따른 주재료, 배합

구분		주재료		배합비	
		골재 (kg)	바탕애쉬 (kg)	시멘트- 주재료비 (C/A)	물-시멘트비 (W/C)
1안 (표준)	상부층	○ (140)		26% (36.4/140)	25% (9.1/36.4)
	중간층	○ (600)		23% (138/600)	25% (34.5/138)
	하부층	○ (125)		36% (45/125)	25% (11.3/45)
2안 (전체 바탕애쉬대 체)	상부층		○ (124)	26% (32.2/124)	25% (8.1/32.2)
	중간층		○ (541)	23% (124.5/541)	25% (31.1/124.5)
	하부층		○ (124)	36% (44.6/124)	25% (11.2/44.6)
3안	상부층	○ (140)		26% (36.4/140)	25% (9.1/36.4)
	중간층		○ (541)	23% (124.5/541)	25% (31.1/124.5)
	하부층		○ (124)	36% (44.6/124)	25% (11.2/44.6)
4안	상부층	○ (140)		26% (36.4/140)	25% (9.1/36.4)
	중간층		○ (541)	23% (124.5/541)	25% (31.1/124.5)
	하부층	○ (125)		36% (45/125)	25% (11.3/45)

(라) 시험 상세

○ 공극률

- 위의 “시편 종류”에서 설명한 4종류의 시편(1안, 2안, 3안, 4안)에 대해 각각 3개의 시편(시편1, 시편2, 시편3)을 준비하여 공극률을 측정하였음. 즉, 총 12회의 공극률 측정이 수행됨.

○ 투수계수

- 위의 “시편 종류”에서 설명한 4종류의 시편(1안, 2안, 3안, 4안)에 대해 각각 2개의 시편(시편1, 시편2)을 준비하여 투수계수를 측정함. 즉, 총 8회의 투수계수 측정이 수행됨.

○ 강도

- 위의 “시편 종류”에서 설명한 4종류의 시편(1안, 2안, 3안, 4안)에 대해 각각 3개의 시편(시편1, 시편2, 시편3)을 준비하여 휨강도를 측정하였음. 즉, 총 12회의 휨강도 측정이 수행됨.

○ 동결융해 저항성

- 위의 “시편 종류”에서 설명한 4종류의 시편(1안, 2안, 3안, 4안)에 대해 각각 2개의 시편(시편1, 시편2, 시편3)을 준비하여 동결융해 사이클을 가한 후 휨강도를 측정하고 사이클을 가하기 전의 휨강도와 비교하여 동결융해 저항성을 평가하였음. 즉, 총 8회의 동결융해 저항성 평가가 수행됨.

○ 칸타브로 손실률

- 위의 “시편 종류”에서 설명한 4종류의 시편(1안, 2안, 3안, 4안)에 대해 각각 3개의 시편(시편1, 시편2, 시편3)을 준비하여 칸타브로 손실률을 측정하였음. 즉, 총 12회의 칸타브로 손실률 측정이 수행됨.

(마) 시험 결과 및 분석

- 공극률, 투수계수, 휨강도, 동결융해 후 휨강도, 동결융해 후 휨강도 변화율, 칸타브로 손실률 시험 결과를 다음 표에 나타내었음.

표 3.나.4 공극률, 투수계수, 휨강도, 동결융해 후 휨강도, 동결융해 후 휨강도 변화율, 칸타브로 손실률 시험 결과

평가항목	시험기준	시험 종류			
		1안	2안	3안	4안
공극률 (%)	KS F 2366	19.40	24.53	22.58	22.59
투수계수 (mm/s)	KS F 4419	0.160	0.302	0.113	0.092
휨강도 (MPa)	KS F 4419	6.86	6.39	5.95	5.64
동결융해 후 휨강도 (MPa)	KS F 2456 KS F 4419	6.52	4.37	5.74	5.50
동결융해 후 휨강도 변화율 (%)	자체 개발	-5	-32	-4	-2
칸타브로 손실률 (%)	KS F 2492	41.63	68.34	54.02	65.44

○ 동결융해 후 휨강도 시험

- 동결융해시험은 KS F 2456의 수중 급속 동결융해 시험방법으로 진행하였음. 시료의 특성상 동 탄성 계수 측정 대신 휨강도를 측정하였으며, 동결융해 전과 후의 휨강도에 대한 동결융해 저항성을 평가함.

표 3.나.5 투수블록 설계기준

항목	한국				일본 틈새투수블록
	자체투수블록		틈새투수블록		
	차도	보도	차도	보도	
휨강도 (MPa)	≥5	≥4	≥5	≥5	≥3
투수계수 (cm/s)	≥0.01	≥0.01	≥0.01	≥0.01	≥0.01
칸타브로 손실률 (%)	≤20				

- 평균적으로, 골재가 시편의 모든 층(상부, 중간, 하부)의 주재료로 골재가 사용된 1안의 공극률이 가장 작게 측정되었으며, 모든 층의 주재료로 바텀애쉬가 사용된 2안의 공극률이 가장 크게 측정되었음. 3안과 4안의 공극률 차이는 거의 없는 것으로 나타났음.
- 투수계수는 공극률이 큰 2안이 가장 큰 것으로 나타났으나, 1안의 경우 공극률이 가장 작게 평가되었음에도 불구하고 투수계수가 3,4안보다 큰 것으로 나타남.
- 휨강도는 골재가 시편의 모든 층(상부, 중간, 하부)의 주재료로 골재가 사용된 1안이 가장 높게 측정되었으며, 3안과 4안의 강도는 상대적으로 낮은 값을 보였음.
- 동결융해 후 휨강도의 변화를 동결융해 전과 비교하면, 전체적으로 휨강도가 감소하였고, 특히 바텀애쉬로만 구성된 2안은 매우 크게 감소하였음.
- 칸타브로 손실률은 골재로만 구성된 1안이 가장 작게 나타났음.

제 4장 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

성과목표	달성도	내용
포장 공극, 폐색 입자 고려 투수성 포장 시스템의 침투 지속성 실험적 평가 기법 개발 및 표준화	100%	■ 투수성 포장의 투수성능과 입자 폐색에 의해 감소하는 투수성능을 평가하기 위해 폐색을 고려한 투수성 포장 및 하부재료 투수특성 평가장비 및 시험절차를 개발하고, 이를 성공적으로 적용함. ■ 강우 시 투수성 포장재로 흘러 들어가는 비점오염 물질에 의한 폐색을 모사하기 위해, 부유물의 균등한 교반과 이를 이용한 투수성 포장의 공극막힘 모사가 가능한 LID 부유물 폐색시험 평가 시스템을 개발하고, 이를 성공적으로 적용함. ■ 도로 기하구조를 고려하여, 포장에서의 수평방향 우수침투 발생 시 투수성능을 평가할 수 있는 장비와 절차를 개발하고, 이를 성공적으로 적용함. ■ 기존 싱글링에 기반한 표면침투율 측정시험의 편의성 개선을 위한 시험장비와 절차를 개발하고 이를 적용함. ■ 투수성 포장 하부층의 역학적 성능 및 변형을 검증하기 위한 시험장을 구축하고, 이를 바탕으로 현장 시공 시 하부층 품질관리에 대한 연구를 성공적으로 수행함.
포장 공극, 폐색 입자 고려 투수성 포장 시스템의 침투 지속성 시뮬레이션 기법	100%	■ 폐색입자 혹은 부유물의 투입으로 인한 투수성 포장의 침투성능 변화를 해석하기 위한 모델을 개발하고, 실험적 연구결과에 적용함. ■ 3D 모델 생성기(이미지 기반 해석 모델): 다공성 포장 미세 구조물의 2차원 이미지로부터 3차원 이미지를 생성하기 위한 적대적 네트워크 기반의 삼차원 모델 생성기를 개발함. ■ 포장 속성 분석기(가상 시료 분석 모델): 다공성, 투자율 및 수리학적 전도도와 같은 물리적 속성의 수치 값을 바탕으로, 3차원 이미지의 정확성을 검증함.
공극 폐색이 적고 구조적 안정성이 높은 친환경 투수성 포장재의 개발	100%	■ 폴리우레탄 바인더 기반의 공극률이 30%이상으로 공극 막힘 현상에 대한 저항성이 우수한 투수성 콘크리트의 배합과 제품을 개발함.
공극 폐색이 적고 구조적 안정성이 높은 투수성 콘크리트의 개발	100%	■ 3층의 블록단면 구조를 바탕으로 하여 우수한 휨강도와 침투성능을 확보하는 흙콘크리트 기반 투수블록의 배합과 제품을 개발함.

2. 관련 분야 기여도

- 현재 국내의 기술여건상 도로-주차장 조성시 투수성 포장의 설치·시공에 대한 기준 및 효율성 검증이 미비하여 새로운 핵심소재 개발에 대한 방향제시가 부족함
- 따라서, 본 기술개발완료 및 사업화를 통해 개발되는 극한강우 투수성 도로-주차장 조성 기술과 각 투수성 포장 요소기술별 효율성 검증을 통한 핵심포장재 개발기술은 향후 관련기업 기술이전을 통하여 건설분야 투수성 도로, 보도 또는 주차장 조성시 통합형 기술을 통한 표준안 제시와 핵심소재 개발을 통한 효율향상 및 원가절감의 부분에서 기술적·경제적 파급효과를 미칠 것으로 판단됨
- 기술적 측면
 - 도시홍수조절에 따른 홍수 및 강우유출수 관리능력 달성, 침투/여과/저류 기능을 기본 메커니즘으로 하는 투수성 포장 기술의 보급으로 도시 수자원 확보를 통한 도시 하천 건천화 저감 및 가용 수자원의 확보, 도시 비점오염원 부하량의 저감을 통한 방류수역의 수질개선 기대
 - 투수성 포장 성능평가 기법 개발을 통해 투수성 포장에서 문제가 되는 재료의 내구성, 공극 막힘으로 인한 투수성 저하, 우수 침투 등으로 인한 지지력 저하에 대한 평가를 할 수 있는 계기를 마련하여 궁극적으로 효율적인 투수성 포장 설계 및 유지보수를 가능하게 함
- 사회·경제산업적 측면
 - 국내외 시장분석 전술한 바와 같이 동남아와 남미쪽에서 신규도로에 대한 수요가 폭발적으로 늘고 있는 바, 기후변화 대응형 투수성 포장시스템 기술 개발은 급속한 기후변화에 가장 적극적으로 대처하는 기술 중 하나로 향후 세계적으로 각광 받을 것으로 예견
 - 개발된 재난대응 투수성 포장 시스템을 해외 타겟 시장으로 진출하기 위해서는 그들이 믿을 수 있는 시공사례들이 필요하므로 국가적인 차원에서 신규 도로에 적용될 수 있도록 지원이 필요
 - 기후변화 적용 전술의 하나로 도시 열섬현상 저감을 통한 전력 수요량 절감, 녹색공간 확보 및 지역환경개선을 통한 지역주민의 삶의 질 향상, 경관적 가치 창출을 통한 파생적 경제적 효과 달성, 방재산업 일자리 창출 및 경제 활성화 및 건설 및 건축 비용절감을 통한 개발의 지속가능성 담보
 - 실험연구를 통한 기술적용의 검증결과를 현장적용에 대한 구체적인 설치기준 수립과 각종시설의 제품화시 반영함으로써 기술확산에 기여
 - 정부 및 지자체에 물순환 도시 조성모델, 운영 및 유지관리 가이드라인 제공
 - 산업체에 재난대응형 투수성 도로·교통시설의 개발, 도입 및 운영 등에 필요한 원천, 활용기술 제공.

- 투수성 도로·교통시설의 안정성, 효율성 및 경제성 확보를 통한 녹색산업 및 일자리 창출에 기여하며 유관 산업과의 연계 성장을 통한 신성장 동력 확보

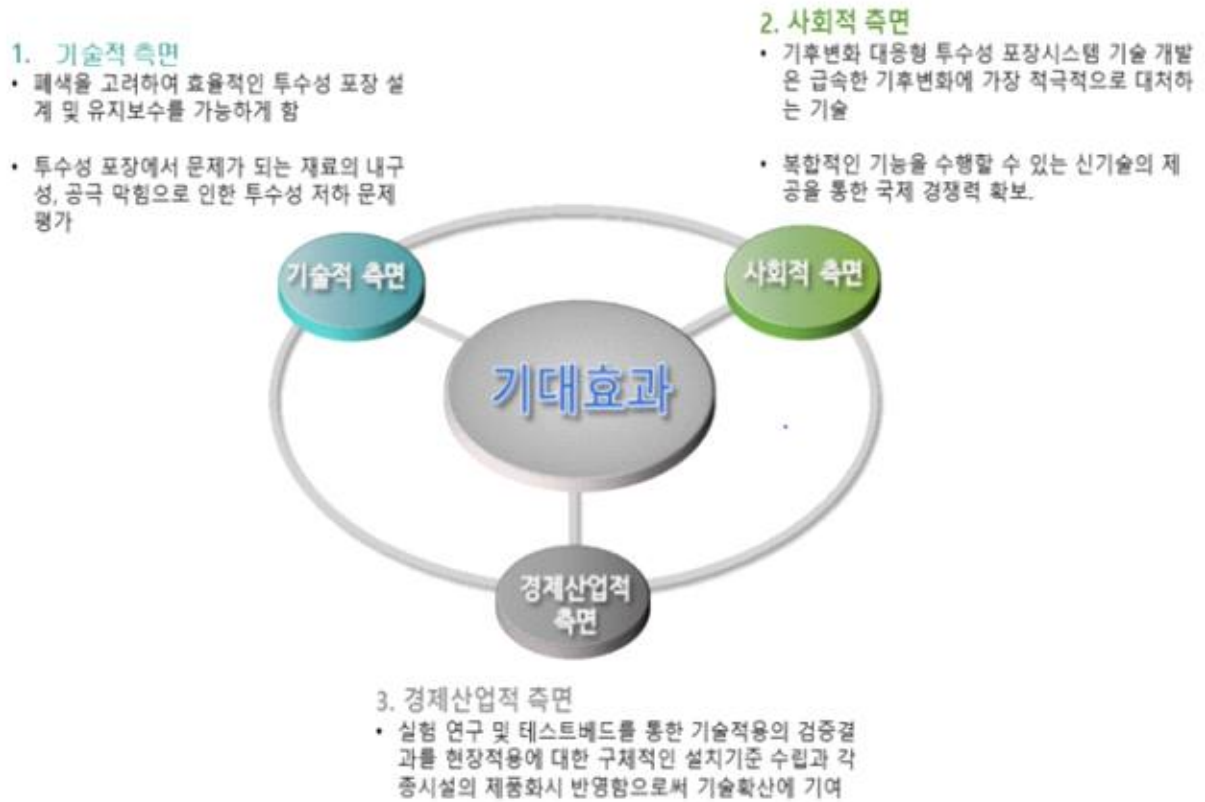


그림 8 포장 공극과 폐색 입자를 고려한 투수성 포장 시스템의 기대효과

제 5장 연구개발성과의 활용 계획 등

○ 정부 및 지자체 정책 추진 기반 활용

- 지속가능한 신도시 계획 기준(국토교통부, '10), 저탄소 녹색성장 기본법(국무총리실, '10), 친환경건축물의 인증에 관한 규칙(국토교통부, 환경부, '10), 친수구역 활용에 관한 특별법(국토교통부, '10)에 의한 친수구역 조성지침(국토교통부, '11) 등 법령 시행을 위한 비용 효율적 기술 확보.
- 정부 및 지자체에서 신도시 개발 또는 구도심 재생사업 시 투수율 증대, 방재성능 향상, 물순환 녹색도시 조성 등에 활용할 수 있는 투수성 도로포장 구축 기술, 통합 계획·설계·운영 기술 제공

○ 건설 산업성장 기반

- 투수성 도로포장 시스템의 수출 달성시 신생기술분야의 선진국 대비 기술적 우위 선점과 유관 산업시장 동반성장의 경제적 효과를 기대할 수 있는 기술전략으로 활용
- 이를 위하여 산업체에 투수성 도로포장 기술 및 운영 등에 필요한 원천기술 제공을 통한 투수성 도로포장 건설산업기반 육성

○ 쾌적한 도시환경 조성

- 효율적인 관리가 가능한 투수성 도로 포장 시설의 적절한 배치 및 운영으로 시민들에게 도시 내 친수공간을 제공하여 쾌적한 도시환경 조성에 기여
- 인구 밀집 지역 및 도심 교통시설에 투수성 도로포장 구축 시 침수 및 사고 저감 등 방재 성능 향상으로 도시 안전도 증대
- 투수성 도로 포장 기법을 통한 열환경 개선으로 도시기온 저감, 냉난방에너지 절감 및 CO2 배출량 저감 극대화를 통한 개발의 지속가능성 달성

○ 산업화 방안

- 차후 신성장동력 녹색산업의 일환으로서의 재난 대응 투수성 도로포장 기술은 녹색도로, 단지개발, 교통시설 건설에 직접적으로 활용되어 녹색건설교통기술 및 환경산업의 고도화 및 선진화에 기여할 수 있을 것임
- 또한, 정부의 신기술인증, 건설기술인증, 녹색기술인증 그리고 환경기술인증과 연계하여 건설, 환경, 조경 및 방재 등의 산업분야의 기술인력의 일자리 창출에 기여할 수 있을 것임
- 이들 산업으로의 확장 및 과급은, 개발되는 기술을 통한 기술 검증 및 인증 확보, 특허 및 기술 등록을 통한 선진 기술 확보 그리고 사업 규모가 대형화 되어감에 따라 더욱 크게 발생하는 사업성 확보를 통하여 구현될 수 있을 것임

붙임. 참고문헌

- 한국표준협회 (2015). KS F2310. 도로의 평판 재하 시험방법. 한국표준협회, 서울특별시, 대한민국.
- 서울특별시 (2013). Ver. 2.0. 투수 블록포장 설계, 시공 및 유지관리 기준. 서울특별시, 서울특별시, 대한민국.
- 김대상, 최찬용, 김성중, 유진영, and 양신추 (2007). "지반반력계수와 변형률계수에 대한 고찰." 한국철도학회 논문집, 10(3), 264-270.
- 국토교통부 (2015). 도로공사표준시방서. 국토교통부, 세종시, 대한민국.
- 국토교통부 (2013). 철도설계기준(노반편). 국토교통부, 세종시, 대한민국.
- Zorn (2011). User manual for the light weight deflectometer (LWD) ZFG 3.0. Zorn, Stendal, Germany.
- Zhenjiang You, Pavel Bedrikovetsky, Alexander Badalyan, Martin Hand, Chris Matthews (2014), Formation damage and fines migration in geothermal reservoirs (modelling and field case study) PROCEEDINGS, Thirty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, February 24-26
- Zhao, et al. (2010). Grain Size Distribution of Road-Deposited Sediment and its Contribution to Heavy Metal Pollution in Urban Runoff in Beijing, China. *Journal of Hazardous Materials*. 183(13), 203-210, ISSN 0304-3894, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.07.012>.
- Zhang, et al. (2018). Experimental Simulation Study on Pore Clogging Mechanism of Porous Pavement. *Construction and Building Materials*, 187. 803-818. [10.1016/j.conbuildmat.2018.07.199](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.199).
- Zhang XS, Wong H, Leo CJ, et al. (2013) A Thermodynamics-Based Model on the Internal Erosion of Earth Structures. *Geotechnical and Geological Engineering* 31(2): 479-492. Zhang, 2016
- Zhang L, Zhang LL (2014) Influence of particle transport on slope stability under rainfall infiltration. In *Geotechnical Safety and Risk IV* (pp. 323-328).
- Zeinijahromi et al., 2012 A. Zeinijahromi, A. Vaz, P. Bedrikovetsky. Well impairment by fines production in gas fields *J. Pet. Sci. Eng.*, 8889 (2012), pp. 125-135
- Zanders, J.M. (2005). Road Sediment: Characterization and Implications for the Performance of Vegetated Strips for Treating Road Run-Off. *Science of the Total Environment*. 339(13), 2005, 41-47, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.07.023>.
- Zafra-Meja et al. (2008). Particle Size Distribution of Accumulated Sediments on an Urban Road in Rainy Weather. *Environmental technology*. 29. 571-82. [10.1080/09593330801983532](https://doi.org/10.1080/09593330801983532).
- Yong, C.F.; McCarthy, D.T.; Deletic, A. (2013). Predicting Physical Clogging of Porous and Permeable Pavements. *J. Hydrol.*, 481, 4855, [doi:10.1016/j.jhydrol.2012.12.009](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.009).
- Yeong, C. and Torquato, S. (1998) "Reconstructing random media", *Physical Review E*, Vol.57, No.1, p. 495.
- Yang, Y., Siqueira, F. D., Vaz, A. S., You, Z., & Bedrikovetsky, P. 2016. Slow migration of detached fine particles over rock surface in porous media. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 34, 1159-1173
- Yang J.; Jiang, G. (2003). Experimental Study on Properties of Pervious Concrete Pavement Materials, *Cement and Concrete Research*, (33)3, 381-386, ISSN 0008-8846, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00966-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00966-3).
- Xianze Cui, Quansheng Liu, Chengyuan Zhang (2017). Physical factors affecting the transport and deposition of particles in saturated porous media, *Water Science and Technology: Water Supply* (2017) 17 (6): 1616-1625.

- Xiang, S., Huang. B., Hao. W., Qiao. D. and Edwin. G. B. (2011). Performance Comparison of Laboratory and Field Produced Pervious Concrete Mixtures, *Construction and Building Materials*, (25)8, August, pp 3187–3192.
- Wu, Zhirong, Shuran Song, Aditya Khosla, Fisher Yu, Linguang Zhang, Xiaoou Tang, and Jianxiong Xiao. (2015) "3d shapenets: A deep representation for volumetric shapes." In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 1912–1920.
- Wu, Jiajun, et al, (2016) "Learning a probabilistic latent space of object shapes via 3d generative-adversarial modeling", *Advances in Neural Information Processing Systems*.
- Wiman, L. G. (2006). Accelerated load testing of pavements: HVS–NORDIC tests at VTI Sweden 2003–2004, VTI rapport 544A, Swedish National Road and Transport Research Institute, Linköping, Sweden.
- Van Duin, B.; Brown, C.; Chu, A.; Marsalek, J.; Valeo, C. Characterization of long-term solids removal and clogging processes in two types of permeable pavement under cold climate conditions. In *Proceedings of the 11th International Conference on Urban Drainage*, Edinburgh, UK, 31, 2008.
- Uzuoka R, Ichiyama T, Mori T, et al. (2012) Hydro-mechanical analysis of internal erosion with mass exchange between solid and water. *ICSE6 Paris*, 655–662 Wan and Wang 2004
- US EPA. (1999). Preliminary Data Summary of Urban Storm Water Best Management Practices, EPA-821-R-99-012, US Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington D.C. Retrieved from <http://www.epa.gov>.
- Umashankar, B., Hariprasad, C., and Kumar, G. T. (2016). "Compaction quality control of pavement layers using LWD." *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(2).
- Tota-Maharaj, K. and Scholz, M. (2010). Efficiency of Permeable Pavement Systems for the Removal of Urban Runoff Pollutants under Varying Environmental Conditions. *Environ. Prog. Sustainable Energy*, 29: 358–369. doi:10.1002/ep.10418.
- Tong, B. (2011). Clogging Effects of Portland Cement Pervious Concrete.
- Tennis, P.D. et al. (2004). Pervious Concrete Pavements. Engineering Bulletin 302.02 Portland Cement Association Skokie Illinois and National Ready Mixed Concrete Association. Maryland: Silver Spring, pp 1–32.
- Tan, S.-A., Fwa, T.-F., & Han, C.-T. (2003). Clogging Evaluation of Permeable Bases. *Journal of Transportation Engineering*, 129(3), 309–315. doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2003)129:3(309).
- Tan, S. et al. (2000). Laboratory Measurements and Analysis of Clogging Mechanism of Porous Asphalt Mixes. *Journal of Testing and Evaluation*, 28(3), 207–216.
- Sutherland, R. C. (2009). Real World Street Cleaner Pickup Performance Testing. In *Proc., StormCon 2009*. Portland, OR: AMEC Earth & Environmental, Inc.
- Suresha et al. (2010). Effect of Aggregate Gradations on Properties of Porous Friction Course Mixes. *Materials and Structures*, 43, 789–801. 10.1617/s11527-009-9548-1.
- Sundararaghavan, V. and Zabaras, N. (2005) "Classification and reconstruction of three-dimensional microstructures using support vector machines", *Computational Materials Science*, Vol.32, No.2, pp. 223–239.
- Sukop, M. C. et al. (2013). Evaluation of Permeability and Non-Darcy Flow in Vuggy Macroporous Limestone Aquifer Samples with Lattice Boltzmann Methods. *Water Resour. Res.*, 49, doi: 10.1029/2011WR011788.
- Stovring, J.; Dam, T.; Bergen Jensen, M. (2018) "Surface sedimentation at permeable pavement systems: Implications for planning and design." *Urban Water J.* 15, 124–131.
- Sterpi, D. (2003). "Effects of the erosion and transport of fine particles due to seepage flow." *international journal of Geomechanics*, 3(1), 111–122. Tiab & Donaldson, 2004;

- Smith, Edward, and David Meger, (2017) "Improved adversarial systems for 3D object generation and reconstruction", arXiv preprint arXiv:1707.09557.
- Smith, D. R. (2011). Permeable interlocking concrete pavements, 4th Ed., Interlocking Concrete Pavement Institute, Herndon, VA, USA.
- Sibille L, Marot D, Sail Y (2015b) A description of internal erosion by suffusion and induced settlements on cohesionless granular matter. *Acta Geotech* 10:735–748
- Shackel, B. et al. (2003). Using Permeable Eco-Paving to Achieve Improved Water Quality for Urban Pavements. 7th International Conference on Concrete Block Paving (PAVE AFRICA 2003), Sun City, South Africa.
- Seoul Metropolitan City. (2013). Standard on Design, Construction, and Maintenance of Permeable Block Pavements (Ver. 2.0). Available online: <http://www.civiltech.co.kr/xe/66700>.
- Seghir, A., Benamar, A., Huaqing, W.: Effects of fine particles on the suffusion of cohesionless soils. *Transp. Porous Media* 103(2), 233–247 (2014)
- Schaefer, V. R.; Wang, K.; Suleiman, M. T., & Kevern, J. T. (2006). Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates. Ames, IA: Center for Transportation Research and Education, Iowa State University.
- Schaefer, V.R., Kevern, J.T. and Wang, K. (2008). A Retrospective Look at Field Performance of Iowa's First Pervious Concrete Sections as of Winter 2008, National Ready Mixed Concrete Association, Concrete technology forum, pp 1 –14.
- Sawangsurriya, A., Bosscher, P., and Edil, T. (2002). "Laboratory Evaluation of the Soil Stiffness Gauge." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1808, 30–37.
- Sata, V., Wongsas, A. and Chindaprasirt, P. (2013). Properties of Pervious Geopolymer Concrete using Recycled Aggregates, *Construction and Building Materials*, 42, pp 33–39.
- Sartor, J. et al. (1974). Water Pollution Aspects of Street Surface Contaminants. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 46(3): 458–465.
- Sanudo-Fontaneda, L.A.; Rodriguez-Hernandez, J.; Vega-Zamanillo, A.; Castro-Fresno, D. (2012). Laboratory Analysis of the Infiltration Capacity of Interlocking Concrete Block Pavements in Car Parks. *Water Sci. Technol.*, 67, 675–681, doi:10.2166/wst.2012.614.
- Sanudo-Fontaneda, L.; Andres-Valeri, V.; Costales-Campa, C.; Cabezon-Jimenez, I.; Cadenas-Fernandez, F. (2018) "The long-term hydrological performance of permeable pavement systems in northern Spain: An approach to the "end-of-life" concept." *Water* 10, 497.
- Sansalone et al. (2012). Filtration and Clogging of Permeable Pavement Loaded by Urban Drainage. *Water Research*, 46(20), 2012, 6763–6774, ISSN 0043–1354, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.10.018>.
- Sandoval et al. (2017). Comparison Between the Falling Head and the Constant Head Permeability Tests to Assess the Permeability Coefficient of Sustainable Pervious Concretes. *Case Studies in Construction Materials*, 7, 317–328, ISSN 2214–5095, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.09.001>.
- Roger, S. et al. (1998). Mineral, Physical and Chemical Analysis of the Solid Matter Carried by Motorway Runoff Water. *Water Research*, 32(4), 1119–1125.
- Rodriguez-Hernandez, J., Andres-Valeri, V. C., Ascorbe-Salcedo, A., & Castro-Fresno, D. (2016). Laboratory Study on the Stormwater Retention and Runoff Attenuation Capacity of Four Permeable Pavements. *Journal of Environmental Engineering*, 142(2), 04015068. doi:10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001033
- Roberts, A. P. (1997) "Statistical reconstruction of three-dimensional porous media from two-dimensional images", *Physical Review E*, Vol.56, No.3.

- Research Society of Road and Traffic (1994). ZTVE-StB 94. Additional technical contractual conditions and guidelines for earthwork in road construction and technical testing instructions for soil and rock in road construction. Research Society of Road and Traffic, Koln, Germany.
- Rasband, W. S. "ImageJ. (1997) "US National Institutes of Health, Bethesda, MD".
- Quiblier, J. A. (1984) "A new three-dimensional modeling technique for studying porous media", Journal of Colloid and Interface Science, Vol.98, No.1, pp. 84-102.
- Pezzaniti, D. et al. (2009). "Influence of Clogging on The Effective Life of Permeable Pavements". Proc. Inst. Civ. Eng. Water Manage. 162, 211-220.
- Papamichos E, Vardoulakis I (2005) Sand erosion with a porosity diffusion law. Computers and Geotechnics 32(1): 47-58
- Pang, S., Sharma, M.M.: A model for predicting injectivity decline in water-injection wells. SPE paper 28489, vol. 12, No. 3, pp. 194-201, September 1997
- Owens, et al. (2011). Total and Size-Fractionated Mass of Road-Deposited Sediment in the City of Prince George, British Columbia, Canada: Implications for Air and Water Quality in an Urban Environment. Journal of Soils and Sediments. 11. DOI: 1040-1051. 10.1007/s11368-011-0383-y.
- Neithalath et al. (2010). Characterizing Pore Volume, Sizes, and Connectivity in Pervious Concretes for Permeability Prediction, Materials Characterization, (61)8, 802-813, ISSN 1044-5803, <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2010.05.004>.
- Nazzal, M. (2014). Non-nuclear methods for compaction control of unbound materials, National Cooperative Highway Research Program Synthesis 456, Transportation Research Board, Washington, DC.
- Mulligan, A. (2005). Attainable Compressive strength of Pervious Concrete Paving Systems, Master's thesis, University of Central Florida, 132pp.
- Mosser, Lukas, Olivier Dubrule, and Martin J. Blunt, (2017) "Reconstruction of three-dimensional porous media using generative adversarial neural networks", Physical Review E, Vol.96, No.4.
- Moffat, R., and Fannin, R. J. (2011a). "A hydromechanical relation governing internal stability of cohesionless soil." Can. Geotech. J., 48(3), 413-424.
- Merska, O. et al. (2016). Low-Noise Thin Surface Course Evaluation of the Effectiveness of Noise Reduction. Transportation Research Procedia, 14, 2688-2697, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.445>.
- Meehan, C. L., Tehrani, F. S., and Vahedifard, F. (2012). "A comparison of density-based and modulus-based in situ test measurements for compaction control." Geotechnical Testing Journal, 35(3), 387-399.
- Martin, W. et al. (2014). Influence of Aggregate Gradation on Clogging Characteristics of Porous Asphalt Mixtures. Journal of Materials in Civil Engineering, 26, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000975](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000975).
- Marchioni, M. & Becciu G. (2014). Permeable Pavement Used on Sustainable Drainage Systems (SUDs): A Synthetic Review of Recent Literature. WIT Transactions on the Built Environment, 139, 183-194, doi:10.2495/UW140161.
- Maniquiz et al. (2012). Diffuse Pollutant Unit Loads of Various Transportation Landuses. Desalination and Water Treatment, 38(1-3).
- Mahalingam, R. et al. (2016). Analysis of Pervious Concrete Properties, GRAEVINAR, 68(6), 493-501, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.1434.2015>.
- M. Coronado, M.A. Daz-Viera Modeling fines migration and permeability loss caused by low salinity in porous media J. Petrol. Sci. Eng., 150 (2017), pp. 355-365

- Lucke, T.; Boogaard, F.; van de Ven, F. (2014) "Evaluation of a new experimental test procedure to more accurately determine the surface infiltration rate of permeable pavement systems." *Urban Plan. Transp. Res.* 2,
- Lucke, T. (2014). "Using drainage slots in permeable paving blocks to delay the effects of clogging: Proof of concept study." *Water*, 6(9), 2660-2670.
- Lucke, T. & Beecham, S. (2011). Field Investigation of Clogging in A Permeable Pavement System. *Build. Res. Inform.*, 39, 603-615, doi:10.1080/09613218.2011.602182.
- Logan, D.J.: *Transport Modeling in Hydrogeochemical Systems*. Springer, New York (2001)
- Liu, C.Y.; Chui, T.F.M. (2017). Factors Influencing Stormwater Mitigation in Permeable Pavement. *Water*, 9, 988.
- Lin et al. (2016). Development of Permeability Test Method for Porous Concrete Block Pavement Materials Considering Clogging. *Construction and Building Materials*. 118. 20-26. 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.107.
- Li, H. (2015). Particle Size Distribution and Characteristics of Heavy Metals in Road-Deposited Sediments from Beijing Olympic Park. *Journal of Environmental Sciences*. Volume 32, Pages 228-237, ISSN 1001-0742, <https://doi.org/10.1016/j.jes.2014.11.014>.
- Li, D. et al. (2014). The Effectiveness of Cool and Green Roofs as Urban Heat Island Mitigation Strategies. *Environmental Research Letters*, 9(5).
- Lei X, Yang Z, He S, Liu E, Wong H, Li X (2017) Numerical investigation of rainfall-induced fines migration and its influences on slope stability. *Acta Geotech* 12(6):1431-1446
- Legret, M.; Colandini, V.; Le Marc, C. (1996). Effects of a Porous Pavement with Reservoir Structure on the Quality of Runoff Water and Soil. *Science of The Total Environment*, Volumes 189-190, 1996, Pages 335-340, ISSN 0048-9697, [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(96\)05228-X](https://doi.org/10.1016/0048-9697(96)05228-X).
- Kutay et al. (2007). Computational and Experimental Evaluation of Hydraulic Conductivity Anisotropy in Hot-Mix Asphalt, *International Journal of Pavement Engineering*, (8)1, 29-43, DOI: 10.1080/10298430600819147.
- Kuo. W.T., Liu. C. C. and Su. D.S. (2013). Use of Washed Municipal Solid Waste Incinerator Bottom Ash in Pervious Concrete, Cement & Concrete Composites, 37, pp 328-335.
- Kumar, K., Kozak, J., Hundal, L., Cox, A., Zhang, H., and Granato, T. (2016). "In-situ infiltration performance of different permeable pavements in a employee used parking lot - A four-year study." *Journal of Environmental Management*, 167, 8-14.
- KS F 2366 Testing Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures.
- Kovacs, G. (1981). *Developments in Water Science*. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam and Akademiai Kiado, the Publishing House of the Hungarian Academy of Sciences, Budapest, Hungary, 1981, pp. 30, 241-243.
- Konrad, C.P. (2003). Effects of Urban Development on Floods, U.S. Geological Survey Fact Sheet, 076-03.
- Kline, L. (2010). Comparison of Open Graded Friction Course Mix Design Methods Currently Used in the United States, All Theses, Paper 846.
- Kim, H.K. and Lee. H.K. (2010). Influence of Cement Flow and Aggregate Type on the Mechanical and Acoustic Characteristics of Porous Concrete, *Applied Acoustics*, 71, pp 607-615.
- Kim, D., Choi, C, Kim, S. J., Yu, J. Y., and Yang, S. C. (2007). "Study on the subgrade reaction modulus and strain modulus." *Journal of the Korean Society for Railway*, 10(3), 264-270.
- Kim, D., and Park, S. "Relationship between the subgrade reaction modulus and the strain modulus

- obtained using a plate loading test." Proc., 9th World Congress on Railway Research.
- Kevern, et al. (2009). Effect of Curing Regime on Pervious Concrete Abrasion Resistance. *Journal of Testing and Evaluation*, 37(4), pp. 337–342, <https://doi.org/10.1520/JTE101761>.
- Kayhanian, et al. (2012). Permeability Measurement and Scan Imaging to Assess Clogging of Pervious Concrete Pavements in Parking Lots. *Journal of Environmental Management*, 95. 114–23. [10.1016/j.jenvman.2011.09.021](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.09.021).
- Kartic C. Khilar, H. Scott Fogler, *Migrations of Fines in Porous Media*, Springer Science & Business Media, 1998
- Kadurupokune, N.; Jayasuriya, N. (2009). Pollutant Load Removal Efficiency of Pervious Pavements: Is Clogging an Issue. *Water Science and Technology*, 60. 1787–94, doi: 10.2166/wst.2009.571.
- Jing, Y. and Jiang. G. (2003). Experimental Studies on Properties of Pervious Concrete Pavement Materials, *Cement and Concrete Research*, (33)3, pp 381–386.
- Jiang, Z., Chen, W., and Burkhart, C. (2013) "Efficient 3D porous microstructure reconstruction via gaussian random field and hybrid optimization", *Journal of microscopy*, Vol. 252, No.2 pp. 135–148.
- Jiang, W. et al. (2015). Experimental Study on Filtration Effect and Mechanism of Pavement Runoff in Permeable Asphalt Pavement. *Construction and Building Materials*, 100, 102–110, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.09.055.
- James, W. (2004) "Clogging of permeable concrete block pavement by street particulates and rain." *J. Water Manag. Model.* 12.
- Iverson RM. 2012 Elementary theory of bed-sediment entrainment by debris flows and avalanches. *J. Geophys. Res.* 117, F03006.
- Hunter RP, Bowman ET (2017) Visualisation of seepage-induced suffusion and suffosion within internally erodible granular media. *Geotechnique*. 68(10), p918–930
- Hunt, W.F. et al. (2010). Low Impact Development Practices: Designing to Infiltrate in Urban Environments. *Effects of Urbanization on Groundwater* 308–343, doi: 10.1061/9780784410783.ch12.
- Huang, B. (2010). Laboratory Evaluation of Permeability and Strength of Polymer-Modified Pervious Concrete. *Construction and Building Materials*. Volume 24, Issue 5, Pages 818–823.
- Huang et al. (1999). Fundamentals of Permeability in Asphalt Mixtures. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 68.
- Hill, K.D.; Beecham, S. (2018) "The effect of particle size on sediment accumulation in permeable pavements." *Water* 10, 403.
- Herngren et al. (2006). Analysis of Heavy Metals in Road-Deposited Sediments. *Analytica Chimica Acta*, Volume 571, Issue 2, Pages 270–278, ISSN 0003–2670, <https://doi.org/10.1016/j.aca.2006.04.064>.
- Hein, D. K., Swan, D. J., and Schaus, L. (2010). Structural and Hydrological Design of Permeable Pavements. 2010 Annual conference of the transportation association of Canada, Halifax, Canada.
- Gulrajani, Ishaan, Faruk Ahmed, Martin Arjovsky, Vincent Dumoulin, and Aaron C. Courville. (2017) "Improved training of Wasserstein GANs", *Advances in Neural Information Processing Systems*, pp. 5767–5777.
- Goodfellow, Ian, et al, (2016) *Deep learning*, Cambridge: MIT press, Vol. 1.
- Goodfellow, Ian, et al, (2014) "Generative adversarial nets", *Advances in neural information processing systems*.
- Fwa, T.; Tan, S.; Guwe, Y. (1999) "Laboratory evaluation of clogging potential of porous asphalt mixtures." *Transp. Res. Board* 1681, 43–49.

- Fwa, T.; Tan, S.; Chuai, C. (1998) "Permeability measurement of base materials using falling-head test apparatus." *Transp. News Rec.* 1615, 94799.
- Fujisawa K, Murakami A, Nishimura S (2010) Numerical analysis of the erosion and the transport of fine particles within soils leading to the piping phenomenon. *Soils and Foundations* 50(4): 471–482.
- Fleming, P., Frost, M., and Lambert, J. (2007). "Review of Lightweight Deflectometer for Routine In Situ Assessment of Pavement Material Stiffness." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2004, 80–87.
- Field, R., Masters, H. and Singer, M. (1982). An Overview of Porous Pavement Research. *Journal of the American Water Resources Association*, 18: 265–270. doi:10.1111/j.1752-1688.1982.tb03970.x
- Ferguson, B.K. (2005). Porous Pavement. *Integrative Studies in Water Management and Land Development*.
- Fell, R., Wan, C. F., Cyganiewicz, J., and Foster, M. (2003). "Time for development of internal erosion and piping in embankment dams." *J.Geotech. Geoenviron. Eng.*, 129(4), 307?314.
- Fassman, E. et al. (nd). *Permeable Pavement Performance on the North Shore*.
- Environmental Protection Agency (EPA). (2008). Introduction to the Clean Water Act. United States Environmental Protection Agency. Distance Learning Modules on Watershed Management. www.epa.gov/watertrain.
- Environmental Protection Agency (EPA). (2004). Stormwater Best Management Practice Design Guide: Volume 1 General Considerations. United States Environmental Protection Agency. Publication No. EPA/600/R-04/121. Office of Research and Development. Washington D.C.
- Elhakim, A. F., Elbaz, K., and Amer, M. I. (2014). "The use of light weight deflectometer for in situ evaluation of sand degree of compaction." *HBRC Journal*, 10(3), 298–307.
- Eisenberg, B. E., Lindow, K. C., and Smith, D. R. (2015). *Permeable pavements*, 1st Ed., American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA.
- Egorov, K.E. (1965). "Calculation of bed for foundation with ring footing." 6th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering.
- DIN (2012). DIN 18134. Soil – Testing procedures and testing equipment – Plate load test. DIN, Berlin, Germany.
- Dietz, M. (2007). Low Impact Development Practices: A Review of Current Research and Recommendations for Future Directions. *Water Air Soil Pollution*, 186, 351–363, doi:10.1007/s11270-007-9484-z.
- Coffman, L.S. (2000). Low-Impact Development Design: A New Paradigm for Stormwater Management Mimicking and Restoring the Natural Hydrologic Regime an Alternative Stormwater Management Technology.
- Coffman, L. S. & France, R.L. (2002). Low-impact Development: An Alternative Stormwater Management Technology. *Handbook of Water Sensitive Planning and Design*, 97?123.
- Cividini, A., Bonomi, S., Vignati, G.C., and Gioda, G. (2009). "Seepage-induced erosion in granular soil and consequent settlements." *International Journal of Geomechanics*, 9(4), 187–194.
- Civan, F., 2016. *Reservoir Formation Damage*, third ed. Gulf Professional Publishing, Burlington, MA, USA.
- Chithra et al. (2015). Impacts of Impervious Surfaces on The Environment. *International Journal of Engineering Science Invention*, 4, 27–31.
- Chen, H.X., Zhang, L.M., 2015. EDDA 1.0: integrated simulation of debris flow erosion, deposition and property changes. *Geosci. Model Dev.* 8, 829?844

- Cetin, A., Kaya, Z., Cetin, B., and Aydilek, A. H. (2014). "Influence of laboratory compaction method on mechanical and hydraulic characteristics of unbound granular base materials." *Road Materials and Pavement Design*, 15(1), 220–235.
- Cang, Ruijin, et al, (2017) "Microstructure representation and reconstruction of heterogeneous materials via deep belief network for computational material design", *Journal of Mechanical Design*, Vol.139, No.7, p. 071404.
- Brown, R.; Borst, M. (2013) "Assessment of clogging dynamics in permeable pavement systems with time domain reflectometers." *J. Environ. Eng.* 139, 1255–1265.
- Brown, C.R. (2007). Characterization of Solids Removal and Clogging Processes in Two Types of Permeable Pavement. Master Thesis, University of Calgary, Calgary, AB, Canada.
- Breault, R. Smith, K. Sorenson, J. (2005). Residential Street-dirt Accumulation Rates and Chemical Composition, and Removal Efficiencies by Mechanical- And Vacuum-type Sweepers, New Bedford, Massachusetts, 2003–04: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005–5184, 27 p.
- Brattebo, B. O., and Booth, D. B. (2003). "Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems." *Water Research*, 37(18), 4369–4376.
- Braswell, A.; Anderson, A.; Hunt, W. (2018) "Hydrologic and water quality evaluation of a permeable pavement and biofiltration device in series." *Water* 10, 33.
- Borgwardt, S. (2006). Long-term In-Situ Infiltration Performance of Permeable Concrete Block Pavement. Proceedings of the 8th International Conference on Concrete Block Paving, San Francisco, CA, US.
- Booth, D.B. (1991). Urbanization and the Natural Drainage System—impacts, Solutions, and Prognoses. *Northwest Environmental Journal* 1991, 7, 93–118.
- Booth, D.; Leavitt, J. (1999). Field Evaluation of Permeable Pavement Systems for Improved Stormwater Management. *Journal of the American Planning Association*, 65(3), 314–325, doi: 10.1080/01944369908976060.
- Boogard, F.; Lucke, T.; van de Giesen, N.; van de Ven, F. (2014) "Evaluating the infiltration performance of eight dutch permeable pavements using a new full-scale infiltration testing method." *Water* 6, 2070–2083.
- Bian, B. & Zhu, W. (2009). *Environ Geochem Health* 31: 511. <https://doi.org/10.1007/s10653-008-9203-8>.
- Bhutta, M.A.R.; Tsuruta, K. and Mirza, J. (2012). Evaluation of High-Performance Porous Concrete Properties, *Construction and Building Materials*, 31, pp 67–73.
- Berney IV, E. S., Mejias-Santiago, M., and Kyzar, J. D. (2013). Non-nuclear alternatives to monitoring moisture-density response in soils, ERDC/GSL TR-13-6, U.S. Army Engineer Research and Development Center Geotechnical and Structures Laboratory, Vicksburg, MS, USA.
- Bennacer, L., Ahfir, N.-D., Bouanani, A., Alem, A., Wang, H.-Q.: Suspended particles transport and deposition in saturated granular porous medium: particle size effects. *Transp. Porous Media* 100, 377–392 (2013)
- Bedrikovetsky, P., Siqueira, F.D., Furtado, C., de Souza, A.L.S.: (2011). Modified particle detachment model for colloidal transport in porous media. *J. Transp. Porous Media* 86, 353–383
- Bear, J. (1990). Introduction to modeling of transport phenomena in porous media, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, p.553.
- Bear, J. (1979). *Hydraulics of Groundwater*, McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering.
- Bean, E. Z., Hunt, W. F., & Bidelsbach, D. A. (2007). Evaluation of Four Permeable Pavement Sites

- in Eastern North Carolina for Runoff Reduction and Water Quality Impacts. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(6), 583–592. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:6(583).
- Basanta, D., Miodownik, M. A., Holm, E. A., and Bentley, P. J. (2005) “Using genetic algorithms to evolve three-dimensional microstructures from two dimensional micrographs”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 36, No.7, pp. 1643–1652.
- Barnes, K. B., J. M. Morgan III, M. C. Roberge. (2001). *Impervious Surfaces and the Quality of Natural and Built Environments*. Baltimore: Towson University.
- ASTM (2018b). ASTM D6951/D6951M Standard test method for use of the dynamic cone penetrometer in shallow pavement applications ASTM, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2018a). ASTM D6758. Standard test method for measuring stiffness and apparent modulus of soil and soil-aggregate in-place by electro-mechanical method. ASTM, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2017). ASTM D6938 REV A. Standard test methods for in-place density and water content of soil and soil-aggregate by nuclear methods (Shallow depth). ASTM, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2015b). ASTM D2167. Standard test method for density and unit weight of soil in place by the rubber balloon method. ASTM, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2015a). ASTM D1556/D1556M. Standard test method for density and unit weight of soil in place by sand-cone method. ASTM, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2012b). ASTM D698. Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort. ASTM, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2012a). ASTM D1557. Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort. ASTM, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2011). ASTM E2835. Standard test method for measuring deflections using a portable impulse plate load test device. ASTM, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2009). ASTM D1195/D1195M. Standard test method for repetitive static plate load tests of soils and flexible pavement components, for use in evaluation and design of airport and highway pavements. ASTM, West Conshohocken, PA, USA.
- Aryal, R.; Beecham, S.; Lee, B. (2015) “Evaluation of particle transport in permeable pavements under oil loadings.” *KSCE J. Civ. Eng.* 19, 2000–2004.
- Arjovsky, Martin, Soumith Chintala, and Leon Bottou, (2017) “Wasserstein gan.” *arXiv preprint arXiv:1701.07875*.
- Andres-Valeri, V.; Marchioni, M.; Sa?udo-Fontaneda, L.; Giustozzi, F.; Becciu, G. (2016) “Laboratory assessment of the infiltration capacity reduction in clogged porous mixture surfaces.” *Sustainability* 8, 751.
- Amirjani, M. (2010). *Clogging of Permeable Pavements in Semi-Arid Areas*. TU Delft. Dataset. <https://doi.org/10.4121/uuid:fc054477-e113-45a6-bca4-8a21116641be>.
- Alshibli, K. A., Abu-Farsakh, M., and Seyman, E. (2005). “Laboratory evaluation of the geogauge and light falling weight deflectometer as construction control tools.” *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(5), 560–569.
- Al-Rubaei, A. (2015). Long-Term Hydraulic Performance of Stormwater Infiltration Systems. *Urban Water Journal*, 12:8, 660–671, DOI: 10.1080/1573062X.2014.949796
- Alem A, Ahfir ND, Elkawafi A, Wang HQ. 2015. Hydraulic operating conditions and particle concentration effects on physical clogging of a porous medium. *Transport in Porous Media* 106(2): 303–321

- Ahn, J.; Marcaida, A.K.; Lee, Y.; Jung, J. (2018). Development of Test Equipment for Evaluating Hydraulic Conductivity of Permeable Block Pavements. *Sustainability*, 10, 2549.
- Ahn, J.; Jalmasco, M.; Shin, H.; Jung, J. (2017) "Test equipment and procedure to evaluate permeability characteristics of permeable pavements." *J. Korean Soc. Hazard. Mitig.* 17, 359-365.
- Ahiablame, L. M., Engel, B. A., & Chaubey, I. (2012). Effectiveness of Low Impact Development Practices: Literature Review and Suggestions for Future Research. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223 (7), 4253-4273. doi:10.1007/s11270-012-1189-2
- ACI committee 522. (2010). Report on Previous Concrete. Report ACI 522R-10, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA, pp 1-37.
- Abu-Farsakh, M., Alshibli, K. A., Nazzal, M., and Seyman, E. (2004). Assessment of in-situ test technology for construction control of base courses and embankments, FHWA/LA.041389, Louisiana Transportation Research Center, Baton Rouge, LA, USA.
- Abdollahian, S.; Kazemi, H.; Rockaway, T.; Gullapalli, V. (2018) "Stormwater quality benefits of permeable pavement systems with deep aggregate layers." *Environments* 5, 68.
- AASHTO (1993). AASHTO guide for design of pavement structures, 1993, 1993 Ed., AASHTO, Washington, DC, USA.

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.