최종보고서(일반과제용)

보안등급
일반[✔], 보안[ ]

중앙행정기관명	국토교통부	사업명	사업명	국토교통기술촉진연구 사업
전문기관명	국토교통과학기술진흥원		내역사업명	
공고번호	공고-제37호	총괄연구개발 식별번호		-
		연구개발과제번호		20CTAP-C141326-03

국가과학기술 표준분류	Q20	30%	Q88	25%	Q60	20%	

총괄연구개발명	국문	-
	영문	-
연구개발과제명	국문	배수성포장 및 우수 순환시스템을 이용한 도로변 미세먼지저감 실용화에 관한 연구
	영문	Development of rainfall cycle system with permeable asphalt concrete for fine dust reduction on the road

주관연구기관	기관명	서울과학기술대학교 산학협력단	사업자등록번호	210-82-08420
	주소	(우)01811 서울특별시 노원구 공릉로232 서울과학기술대학교 테크노큐브 2층	법인등록번호	111371-0004045

주관연구책임자	성명	문성호	직위	교수
	연락처 직장전화	02-970-9014	휴대전화	010-9080-0557
	연락처 전자우편	smun@seoultech.ac.kr	국가연구자번호	10143109

연구개발기간	전체 2018. 10. 10 - 2021. 06. 30(2년 9개월)
	1년차 2018. 10. 10 - 2018. 12. 31(3개월)
	2년차 2019. 01. 01 - 2019. 12. 31(1년)
	3년차 2020. 01. 01 - 2021. 06. 30(1년 6개월)

연구개발비 (단위 : 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금				합계			연구개발비 외 지원금
				지방자치단체		기타( )					
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계	
총계	600,000	23,000	207,000	-	-	-	-	623,000	207,000	830,000	-
1년차	150,000	5,000	45,000	-	-	-	-	155,000	45,000	200,000	-
2년차	250,000	10,000	90,000	-	-	-	-	260,000	90,000	350,000	-
3년차	200,000	8,000	72,000	-	-	-	-	208,000	72,000	280,000	-

공동연구기관 등	기관명	책임자	직위	휴대전화	전자우편	비고	
						역할	기관유형
공동연구기관	씨에스이 주식회사	이문기	연구소장	010-9049-0031	kr5472@daum.net	공동	중소기업
위탁연구기관							
연구기관 외 기관							

연구개발담당자 실무담당자	성명	권영주	직위	석사과정	
	연락처 직장전화	010-9234-6173	휴대전화	010-9234-6173	
	연락처 전자우편	1018pinetree@naver.com	국가연구자번호	1191-1291	

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재 처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2021년 8 월 12 일

주관연구책임자 : 문 성 호 (직인)

주관연구기관의 장 : 서울과학기술대학교 산학협력단
단장 권 용 재 (직인)

국토교통과학기술진흥원장 귀하

< 요 약 문 >

<table>
<tr><td colspan="2">사업명</td><td colspan="3">국토교통기술촉진연구 사업</td><td>총괄연구개발 식별번호</td><td colspan="3">-</td></tr>
<tr><td colspan="2">내역사업명</td><td colspan="3">-</td><td>연구개발과제번호</td><td colspan="3">20CTAP-C141326-03</td></tr>
<tr><td colspan="2">국가과학기술
표준분류</td><td>Q20</td><td>30%</td><td>Q88</td><td>25%</td><td>Q60</td><td colspan="2">20%</td></tr>
<tr><td colspan="2">총괄연구개발명</td><td colspan="6">-</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발과제명</td><td colspan="6">배수성포장 및 우수 순환시스템을 이용한 도로변 미세먼지저감 실용화에 관한 연구</td></tr>
<tr><td colspan="2">전체 연구개발기간</td><td colspan="6">2018. 10. 10 - 2021. 06. 30(2년 9개월)</td></tr>
<tr><td colspan="2">총 연구개발비</td><td colspan="6">총 830,000천원
(정부지원연구개발비 : 600,000천원, 기관부담연구개발비 : 230,000천원)</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발단계</td><td colspan="3">기초[ ] 응용[ ] 개발[✔]
기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[ ]</td><td>기술성숙도</td><td colspan="2">착수시점 기준( )
종료시점 목표( )</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발과제 유형</td><td colspan="6">지정공모 [✔] 자유공모 [ ]</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발과제 특성</td><td colspan="6">실용화</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구
개발
목표
및
내용</td><td>최종 목표</td><td colspan="6">배수성포장 도로변 유입 우수의 순환을 적용한 LID 자동 살수장치 개발</td></tr>
<tr><td>전체 내용</td><td colspan="6">최근 미세먼지가 급격히 늘어나면서 우리나라 사람들의 일상생활에도 많은 영향을 미치고 있다. 2017년도 한국환경공단 '전국 미세먼지 배출원별 기여율 통계'에 따르면 미세먼지 배출원으로는 비산먼지, 제조업 연소, 생물성 연소 등 다양한 배출원이 있으며, 전국 미세먼지(PM10) 배출원 대분류별 배출량중 50.3%로 비산먼지가 가장 높은 비율을 차지한다. 비산먼지는 공사장 등에서 일정한 배출구를 거치지 않고 대기중으로 직접 배출되는 먼지를 말하며, 이 비산먼지 배출원 중 도로에서 발생하는 재비산먼지는 약 45%로 가장 높은 비율을 차지하고 있다. 이에 국가에서는 미세먼지 발생량을 줄이기 위해 자동차 배출가스 등급제에 따라 5등급으로 분류된 자동차를 대상으로 수도권대기관리권역내 운행을 제한하는 미세먼지 비상저감조치를 시행과 더불어 여러 가지 방안으로 미세먼지 저감을 위해 노력을 기울이고 있다.
특히 정부에서는 2019년 2월 15일 부로 미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법을 시행하여 당일 미세먼지 농도에 따라 미세먼지 비상저감조치를 발령하고 있다. 또한 2019년 12월 1일 부로 미세먼지 계절 관리제를 시행하여 미세먼지 집중관리 도로를 지정하여, 기존 1일 1회에서 2~4회로 물청소를 확대하는 등의 다양한 조치를 취하고 있다.
효과적인 도로 재비산먼지 저감을 위해 배수성포장과 함께 도로변에 저영향개발(Low impact Development, LID) 기법을 적용한 도시배수시스템을 설치하고, 우천 시 배수성포장 및 측구 등을 통해 집수된 우수를 저장하고 미세먼지 발생 시 도로포장 표면으로 분사하여 도로 재비산먼지를 저감하는 시스템을 개발하고자한다. 저영향개발 기법은 자연에 대한 인위적인 간섭 결과인 건천화, 지하수 고갈 등 유역 물 순환의 왜곡과 수질 악화의 충격을 최소화할 목적으로 적용하여, 강우에 의해 배수성포장으로 유입되는 우수를 저장하여 미세먼지 농도에 따라 효율적으로 활용한다. 또한, 클린로드 시스템은 도로 표면의 물 분사를 통해 도로 표면 온도를 낮추는 효과가 있어, 도심지 열섬현상 완화에 효과적이다.
본 연구에서는 배수성포장을 통해 집수된 빗물을 식생플랜트 형태의 우수저장 및 분사장치에 저장하여 운영 시 건기와 우기를 구분하여 가동이 가능하도록 한다. 또한, 위치 특성에 따른 빗물저류시설을 알맞게 적용하기 위한 저류시설 구조의 연구를 진행하고 유입부로 들어오는 협잡물 등으로 인한 막힘 현상을 최소화 하는 유입구조를 설계한다. 전력 수급을 위해 일부 태양전지를 활용한 동력을 사용한다. 최종적으로 클린로드</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td rowspan="6"></td><td colspan="2"></td><td>시스템의 배수 시간 및 배수량에 따른 발전 규모 체계화를 통해 배수성포장 클린로드 시스템의 현장 적용성 평가하고자 한다.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">1년차</td><td>목표</td><td>배수성포장 현황 및 적용성 검토 보고서 및 클린로드 시스템 도면, 사양서 개발</td></tr>
<tr><td>내용</td><td>본 연구에서는 인구밀도 및 미세먼지 발생량을 고려하여 서울특별시를 대상으로 배수성포장의 현황을 조사하고, 배수성 포장이 시공된 현장을 분석하여, 클린로드 시스템 설치가능여부를 판단하고자 한다.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">2년차</td><td>목표</td><td>배수성포장 도로변 유입 우수의 순환을 적용한 LID 자동 살수장치 개발</td></tr>
<tr><td>내용</td><td>본 연구에서는 배수성포장 배합설계를 통한 품질시험 후 기준값 만족 여부를 확인하고 실내투수시험을 통해 투수계수를 산정했다.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">3년차</td><td>목표</td><td>클린로드 시스템 적용에 따른 배수성포장의 기능적 성능을 분석하고, 이에 따른 구조적 성능의 저검 검토를 통한 적용을 위한 공용성 검토</td></tr>
<tr><td>내용</td><td>배수성포장을 TEST BED에 적용하여 시공을 완료하고 주기적인 미세먼지 측정을 통해 클린로드시스템의 성능 분석</td></tr>
<tr><td>연구개발성과</td><td colspan="3">(1)정성적 연구개발성과
○ 논문 3건 작성 완료
○ TEST BED 설계 및 제작
- 교내 배수성포장 시공과 더불어 클린로드 시스템을 설치 완료
○ 설계도면 및 사양서 작성 완료
○ 시제품 제작 및 모니터링 실시 완료
○ 가이드라인 및 매뉴얼 작성 완료
(2)정량적 연구개발성과
○ 현장 투수시험
- 현장 투수시험 결과 목표치인 1000ml기준 15초 이내인 14.58초로 기준 만족
○ 실내투수계수
- 실내 투수시험 결과 0.021cm/sec로 기준값인 0.01cm/sec 만족
○ 미세먼지 저감성능
- 미세먼지 농도 측정 결과 저감율 12.08%로 기준값인 10% 만족</td></tr>
<tr><td>연구개발성과
활용방안 및
기대효과</td><td colspan="3">○ 활용계획
최근 미세먼지 증가로 인해 미세먼지저감 기술 또는 정책 등이 활발하게 연구중에 있다. 본 연구에서는 배수성포장을 활용한 클린로드시스템의 미세먼지 저감 효과를 확인하는 연구를 진행 하였다. 연구 결과 TEST BED에 적용된 배수성 포장의 우수한 투수 성능이 확인되었고 클린로드시스템의 미세먼지 저감효과 또한 확인되었다. 또한 우수를 활용한 클린로드시스템은 용수확보의 문제도 해결할 수 있다. 기존의 클린로드시스템의 단점을 개선한 본 연구의 기술은 미세먼지가 비교적 심한 계절인 봄철에 차량의 이동이 많은 구간에서 활용을 하면 큰 효과를 볼 수 있을 것으로 보인다. 또한 투수·배수성 포장의 경우 소음저감 효과와 더불어 기능적인 면(배수 및 빗길 차선 시야 확보 등)에서도 인정되어 점차 증가하고 있는 추세로 보아 본 연구의 활용도는 더욱 넓어질 것으로 기대된다.
○ 기대효과
1) 기술적 측면
- 인위적인 조작의 최소화를 통한 자동분사 또는 점적관수, 방류 등의 결정
- 기존 클린로드 시스템의 문제점인 물 튀김 개선 및 우수 순환을 통한 자원재활용
- 도시 홍수조절에 따른 강우 유출 수 관리 기능 향상
2) 경제적・산업적 측면
- 적용구간의 미세먼지저감 효과로 인한 도로변 환경 개선
- 미세먼지 발생에 따른 경제적 손실 저감
- 식생플랜트 또는 벤치형 우수저장탱크를 통해 도시경관 가치 창출을 통한 파생적 경제효과
3) 사회적 측면
- 미세먼지로 인한 심각성을 클린로드 시스템을 통한 시각적 효과 부여
- 기후변화에 더불어 도시 열섬현상 저감을 통해 전력 수요량 절감, 녹색 공간 확보 및 도로변 환경 개선을 통한 지역주민의 삶의 질 향상
- 국내 기술을 활용한 소프트웨어 개발로 국외의 상용프로그램 수입 대체효과 및 수출 가</td></tr>
</table>

	능성
연구개발성과의 비공개여부 및 사유	해당없음

연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구 시설·장비	기술 요약 정보	소프트웨어	표준	생명자원		화합물	신품종	
								생명 정보	생물 자원		정보	실물
	3	1										

연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입기관	연구시설·장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호

국문핵심어 (5개 이내)	미세먼지	클린로드 시스템	배수성포장	저영향개발(LID)	재비산먼지
영문핵심어 (5개 이내)	Fine Dust	Clean-Road system	Permeable asphalt concrete	Low Impact Development	Resuspended dust

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 1p

1) 연구개발과제의 최종 목표 ····· 1p
2) 연구개발과제의 년차별 목표 ····· 4p

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용 ····· 6p

1)1차년도 연구 진행 ····· 7p
2)2차년도 연구 진행 ····· 16p
3)3차년도 연구 진행 ····· 43p

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도 ····· 59p
1) 연구수행 결과 ····· 59p
2)목표 달성 수준 ····· 67p

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성) ····· 69p

5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여정도 ····· 70p

6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획 ····· 72p

별첨자료(참고문헌 등) ····· 75p

1. 연구개발과제의 개요

1) 연구개발과제의 최종 목표

● 연구의 필요성

최근 미세먼지가 급격히 늘어나면서 우리나라 사람들의 일상생활에도 많은 영향을 미치고 있다. 2017년도 한국환경공단 '전국 미세먼지 배출원별 기여율 통계'에 따르면 미세먼지 배출원으로는 비산먼지, 제조업 연소, 생물성 연소 등 다양한 배출원이 있으며, 전국 미세먼지(PM10) 배출원 대분류별 배출량중 50.3%로 비산먼지가 가장 높은 비율을 차지한다. 비산먼지는 공사장 등에서 일정한 배출구를 거치지 않고 대기중으로 직접 배출되는 먼지를 말하며, 이 비산먼지 배출원 중 도로에서 발생하는 재비산먼지는 약 45%로 가장 높은 비율을 차지하고 있다. 이에 국가에서는 미세먼지 발생량을 줄이기 위해 자동차 배출가스 등급제에 따라 5등급으로 분류된 자동차를 대상으로 수도권대기관리권역내 운행을 제한하는 미세먼지 비상저감조치를 시행과 더불어 여러 가지 방안으로 미세먼지 저감을 위해 노력을 기울이고 있다.

특히 정부에서는 2019년 2월 15일 부로 미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법을 시행하여 당일 미세먼지 농도에 따라 미세먼지 비상저감조치를 발령하고 있다. 또한 2019년 12월 1일 부로 미세먼지 계절 관리제를 시행하여 미세먼지 집중관리 도로를 지정하여, 기존 1일 1회에서 2~4회로 물청소를 확대하는 등의 다양한 조치를 취하고 있다.

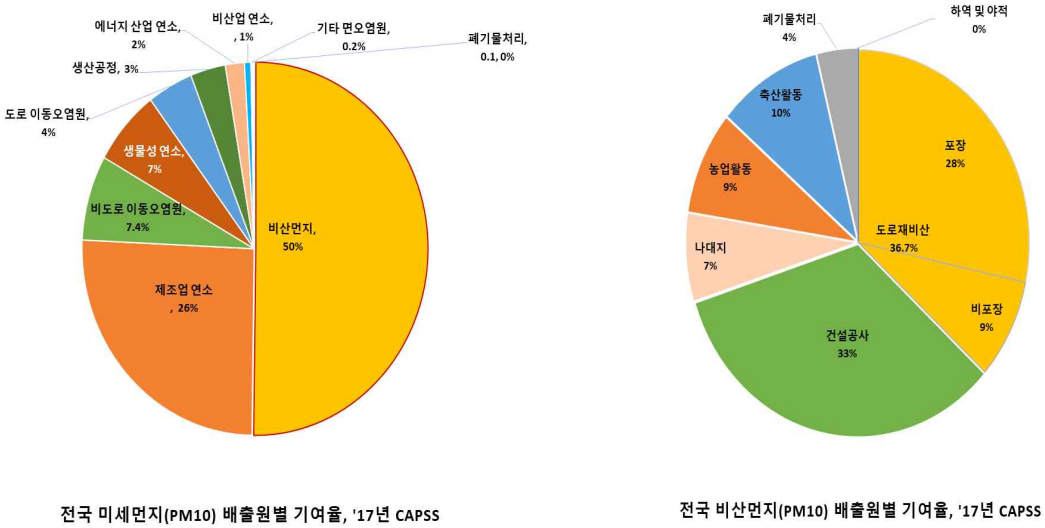


Fig.1 '17년 전국 미세먼지 배출원별 기여율

이에 따라 본 연구에서는 효과적인 도로 재비산먼지 저감을 위해 배수성포장과 함께 도로변에 저양향개발(Low impact Development, LID) 기법을 적용하여, 우천 시 배수성포장 및 측구 등을 통해 집수된 우수를 저장하고 미세먼지 발생 시 도로포장 표면으로 분사하여 도로 재비산먼지를 저감하는 시스템을 개발하고자 한다.

○ 배수성포장

대부분에 도로에서 사용중인 아스팔트 포장은 불투수성으로 우천 시 도로면 위에 물이 빠지지 않고 물이 그대로 고여 있는 것을 많이 볼 수 있다. 물이 빠지지 않고 물이 고여 있는 경우 주행 시 수막현상에 의해 제동거리가 증가하고, 도로에 고인 물로 인해 차선의 시인성이 떨어지게 되어 사고 위험이 증가하게 된다. 이에 따라, 주행 안전성을 고려하여 도로 노면의 물을 포장층으로 투과시켜 배출시키는 배수성포장을 적용중에 있다. 또한, 아스팔트 혼합물의 입경에 의해 타이어와 노면의 마찰음이 줄어들어 저소음 효과를 볼 수 있은 저소음·배수성포장으로 국내 적용 중에 있다. 배수성포장은 차선 시인성 증가, 수막현상 방지 등으로 우천시 안전성 이외에도 도로 노면에 고인 물로 인해 발생 할 수 있는 포트홀 방지에도 효과적이다. 포트홀은 도로 균열로 침투된 물에 의해 아스팔트 포장 표면이 부서지거나, 떨어져 나가는 현상으로 우기 시 가장 많이 발생하는 것으로 나타난다. 포트홀은 주행 시 사고 위험이 급격히 증가하며, 최근 사망사고(2018년 6

월) 또한 발생한 이력이 있다.

○클린로드 시스템(국외사례)

-프랑스 파리

프랑스 파리에서는 위생문제 해결을 위해 도로변에 클린로드시스템을 설치하였다. 이 시스템을 위한 용수는 세느강의 자연 유하를 이용하여 확보한다. 프랑스 파리의 클린로드시스템의 경우 용수확보에는 문제가 없지만 도로에 물고임에 따른 물튀김 현상이 발생할 수 있고 겨울철 저류조 탱크 빙결, 여름철 용수 오염 문제 등이 발생한다.



Fig.2 프랑스 파리 클린로드시스템

-일본 도쿄



Fig.3 일본 도쿄 클린로드시스템

일본 도쿄에서는 국회의사당 부근 약 350m 구간에 클린로드 시스템을 설치하여 도로변 살수 노즐을 통해 물을 분사시킨다. 일본 도쿄 클린로드시스템의 경우 용수를 인위적으로 공급해야 하므로 용수확보의 어려움이 발생하고 물고임에 따른 물튀김 현상이 발생하는 단점이 있다.

본 연구의 클린로드시스템은 배수성포장 적용을 통한 물 튀김을 최소화 시키고 배수성포장을 통한 우수를 활용함으로써 용수확보문제를 해결할 수 있다. 또한 열풍실험에 의한 겨울철 동결방지 문제를 해결하고 우수 유입부 필터를 적용함으로써 여름철 용수 오염 문제를 해결할 수 있다.

● 연구개발과제의 최종 목표

- 최종 연구목표 : 배수성포장 및 우수 순환시스템을 이용한 도로변 미세먼지 저감 기술 개발 및 평가

Table 1. 최종 연구목표

LID 클린로드 시스템 적용을 위한 배수성 아스팔트 혼합물 공용성 검토
• LID 클린로드 시스템 적용을 위한 배수성 혼합물 배합설계 • 배수성 아스팔트 혼합물 품질 및 내구성 평가 • 배수성포장 현장 적용을 위한 투수성 아스팔트 혼합물 기능성 및 공용성 평가
배수성포장을 적용한 클린로드 시스템의 현장 적용성 평가
• 배수성포장 시공 및 LID 클린로드 시스템 테스트베드(Test Bed) 설치 • 현장 투수시험을 통한 현장투수성능 및 공극률 평가(현장투수 1000ml기준 15초 이내) • 클린로드 시스템 적용에 따른 미세먼지 저감 효율 평가(저감율 10%)
배수성포장을 적용한 LID 클린로드 시스템 개발
• 배수성 포장을 통해 우수를 순환할 수 있는 클린로드 시스템 개발
배수성포장을 적용한 LID 클린로드 시스템 가이드라인(안) 개발
• 클린로드시스템 작동을 위한 가이드라인(안) 개발

2) 연구개발과제의 년차별 목표

구분(연도/단계)	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
1차 연도 (2018)	배수성포장의 LID 클린로드 시스템 적용을 위한 공용성 검토	국내 배수성포장 현황 및 적용성 평가	국내 적용중인 배수성포장 문헌조사 및 적용성 평가	국내 배수성포장 현황 및 클린로드 적용성 평가
		클린로드 시스템 설계도면 및 사양서 개발	배수성포장 및 도로변 적용을 위한 클린로드 시스템의 설계도면 및 사양서 개발	설계도면 및 사양서 초안 완료

구분 (연도/단계)	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
2차 연도 (2019)	도로변 미세먼지 저감을 위한 배수성포장의 우수 순환시스템 개발	LID 클린로드 시스템 적용을 위한 배수성포장의 공용성 검토	배수성포장 배합설계를 통한 품질시험 후 기준값 만족 여부 확인	○ 칸타브로 손실률을 제외한 모든 항목에서 기준 만족
		배수성 포장의 배수능력 및 협잡물 유입에 따른 기능분석	실내투수시험을 통한 투수계수 산정	○ 실내투수계수 목표값 (0.01㎝/sec)만족
		클린로드 시스템 적용을 통한 도로변 미세먼지 저감 성능 평가	TSS 시험을 통한 물 분사 후 도로 노면 상태 평가, 미세먼지 측정기를 이용한 미세먼지 감소량 분석	○ 1차 분사, 2차 분사, 3차 분사 시의 노면 재미산먼지 저감 상태 확인 ○ 물 분무 전 · 후, 미세먼지 약 12.6% 저감
		LID 클린로드 시스템 설계 및 제작	클린로드 시스템 TEST BED 적용	○ TEST BED 적용 완료
		LID 클린로드 시스템 모니터링	클린로드 시스템 실제 현장에 적용 후 모니터링	○ 주기적으로 모니터링 실시

구분 (연도/단계)	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
3차 연도 (2020)	도로변 미세먼지 저감을 위한 배수성포장의 우수 순환시스템 개발	실내 공용성시험(함부르크 휠트래킹, 동탄성계수)을 통한 배수성포장의 TEST BED 적용성 검토	배수성포장 배합설계를 통해 시편 제작 후 실내시험을 통해 적용성 검토	○배합설계 진행 ○품질시험 만족 ○공용성 평가 실시 완료
		배수성포장 시험시공	TEST BED를 위한 배수성포장 시험시공 실시	○배수성포장 시공 완료
		시험시공 구간 추적관리를 통한 클린로드 시스템의 미세먼지 저감율 10%이상 도출	TSS 시험을 통한 물 분사 후 도로 노면 상태 평가, 미세먼지 측정기를 이용한 미세먼지 감소량 분석	○미세먼지 약 12.08% 저감

		LID 클린로드 시스템의 매뉴얼 및 가이드라인 제시	설치 경험과 운전을 통해 학습	매뉴얼 및 가이드라인 작성
		회수된 물의 오염도를 분석하여 개선방안 도출	시운전으로 개선	회수방법, 집수정 개선
		LID 클린로드 시스템의 PC, 모바일 컨트롤 장치 개발	원격 컨트롤러 기초 단계 완성	원격 컨트롤러와 소통할 수 있는 컨트롤러 제작, 설치운전
		동절기 미세먼지 저감을 위한 동결방지 시스템 개발	열선, 열풍기 개발	열선 및 열풍기 제작하여 시운전 완료

구분	연구개발목표	핵심 연구개발성과 (연구개발성과물)	현재 국내・외 기술수준	연구개발 목표치	목표치 설정 근거	가중치 (%)
1년차 (2018)	배수성포장 투수성능 및 적용성 검토	논문작성	-	-	-	5
		결과 보고서	-	-	-	5
	설계도면 및 사양서 개발	설계도면	-	-	-	5
		사양서 작성	-	-	-	5
2년차 (2019)	배수성포장의 협잡물유입에 따른 기능분석	실내투수계수 0.021 (cm/sec)	국토교통부 0.05cm/sec	투수계수0.01	국토교통부시공지침	5
		현장투수14.58초/1000ml	국토교통부 15초/1000ml	15초/1000ml	국토교통부시공지침	10
		TEST BED 설계 검토	-	-	-	5
	성능검토	시제품제작 및 TEST BED설계	-	-	-	10
		TEST BED제작	-	-	-	15
		모니터링 실시	-	-	-	10
3년차 (2020)	적용성검토	미세먼지 저감율 12.08% 달성	○스페인에 설치된 클린로드 시스템: 10~30%감소 ○대구 클린로드 시스템 설치 전·후 저감효과13%	미세먼지 10% 감소	선행연구 사례분석	10
	성능기준 확보	가이드라인(안)	-	-	-	5
		매뉴얼 작성	-	-	-	10

본 연구는 진행을 위해 1차년도에서는 국내 배수성포장 현황에 대해 조사를 하고 2차년도에 시공할 TEST BED에 제작할 클린로드 시스템 설계도면 및 사양서를 개발하였다. 또한 여러 가지 상황을 고려하여 2차년도에 시공할 TEST BED장소를 선정 완료하였다.

2차년도에는 본격적으로 TEST BED를 시공하기 앞서 배수성포장의 공용성 검토를 위해 배합설계 후 품질시험을 진행하였다. TEST BED 적용 후 클린로드시스템을 설치하였고 이에 따른 미세먼지 저감량을 확인하고자 하였다.

3차년도에는 2차년도에 적용하지 못했던 배수성포장을 적용하여 TEST BED를 시공하였고 클린로드시스템의 미세먼지 저감 실험을 진행하여 목표치인 저감율10%를 만족하고자 하였다.

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

● 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

Table 2. 연구 내용 및 추진방법

배수성 아스팔트 혼합물 배합설계 및 공용성 평가
• 배수성 아스팔트 혼합물 배합설계 • 배수성 아스팔트 혼합물 품질시험 -공극률 시험, 인장강도비(TSR), 동적안정도 시험, 실내투수계수 시험 등 • 배수성 아스팔트 혼합물 공용성 평가 -동탄성계수 시험(Dynamic Modulus Test, DM), Hamburg Wheel Tracking Test 등
배수성포장을 적용한 클린로드 시스템의 현장 적용성 평가
• 배합설계 및 품질시험을 통해 도출한 원자재별 배합비율을 적용해 배수성포장 시공 • 현장투수시험 실시 • TSS(Total Suspended Solids), 대기 미세먼지 농도 측정을 통한 미세먼지 저감 효율 평가
배수성포장을 적용한 LID 클린로드 시스템 개발
• 클린로드 시스템 TEST BED 적용 • 클린로드 시스템 매뉴얼 작성 • 동절기를 위한 열선 및 열풍기 개발
배수성포장을 적용한 LID 클린로드 시스템 가이드라인(안) 개발
• 클린로드 부분과 시스템 컨트롤러 부분의 가이드라인 개발

1)1차년도 연구진행

본 연구배경과 같이 도로에서 발생하는 재비산먼지를 저감시키기 위해 배수성포장 도로에 저영향개발(Low Impact Development, LID) 기법을 적용한 도시배수시스템을 설치를 위한 배수성포장 현황조사를 수행한다. 또한, 각 노선을 분석, 적용성을 검토하여 적용 우선순위를 선별하여 향후 클린로드 시스템 적용구간으로 활용하고자 한다.

본 연구에서는 인구밀도 및 미세먼지 발생량을 고려하여 서울특별시를 대상으로 배수성포장의 현황을 조사하고, 배수성 포장이 시공된 현장을 분석하여, 도시배수시스템 설치가능여부를 판단 하고자 한다. 이에 따라, 배수성 포장의 주변 환경 및 미세먼지를 고려하여 클린로드 시스템 적용성을 평가하였다. 또한, 선정노선의 클린로드 시스템의 적용이 어려운 경우 교내 클린로드 시스템 적용 가능구간을 선별하고자 한다.

○ 클린로드 시스템 개발

1차년도에서는 교내 시공예정 구간을 선정하고 클린로드시스템의 초안을 개발하였다. 클린로드시스템은 도로 미세먼지 및 지면온도저감 기능을 갖는 스마트 플랜터 시스템으로 강우 시 도로변에 흐르는 빗물을 저장하였다가, 도로에 일정 주기로 자동 살수하여 도로표면의 저감 및 지면온도를 효율적으로 저감하는 것이 가능한 시스템이다. 본 연구를 통해 스마트 플랜터 시스템을 보완 및 개발하여 새로운 클린로드 시스템을 제작하기로 하였다.

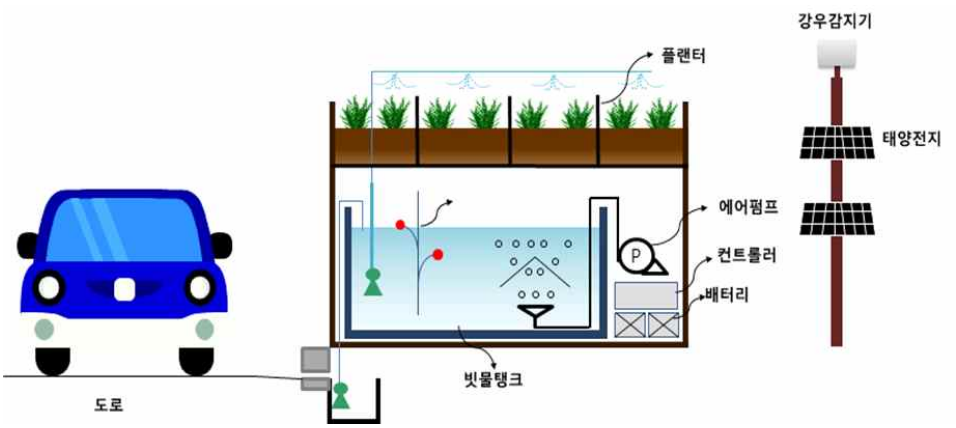


Fig.4 클린로드 시스템 모식도

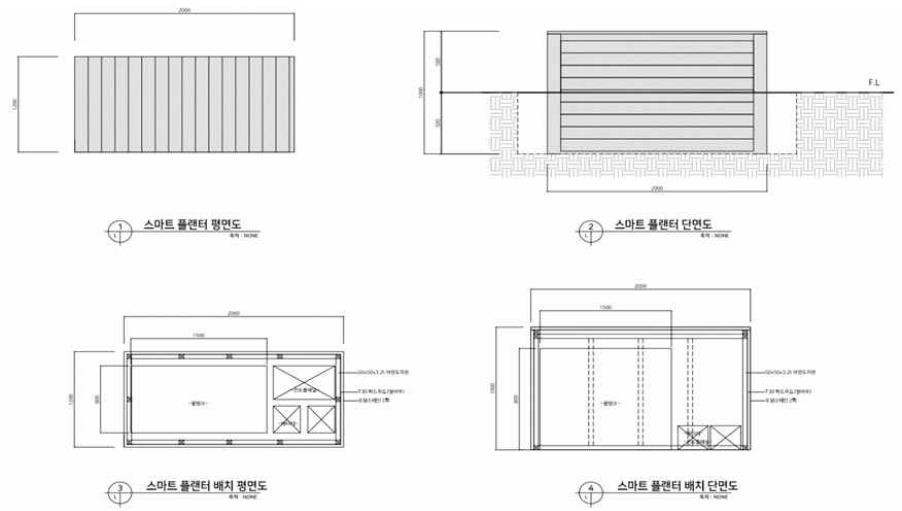


Fig.5클린로드시스템 도면

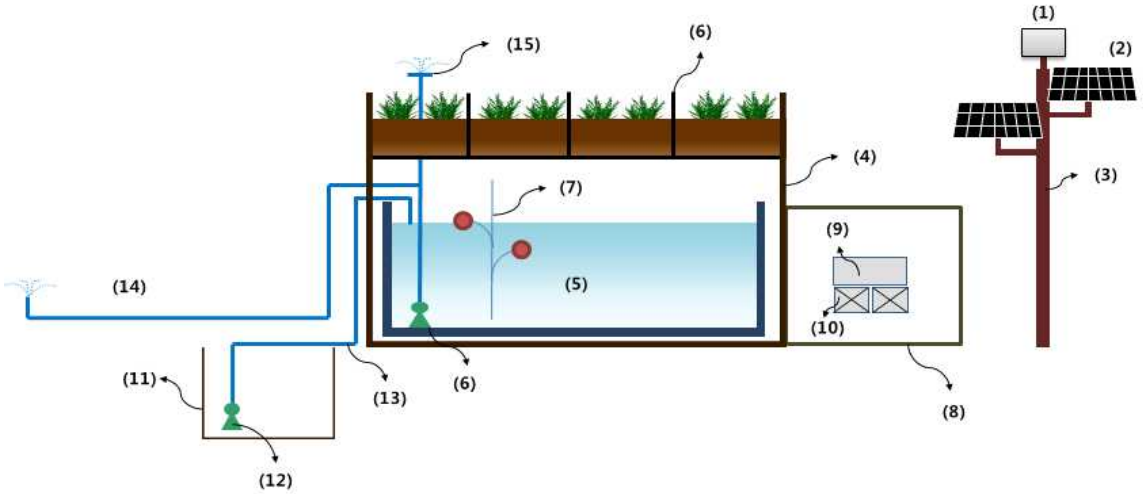


Fig.6클린로드 시스템 초기 시설 구성 도안

(1) 강우감지기

시장조사를 해본 결과 강우신호를 인식할 수 있는 기존 제품들의 가격은 80~150만원의 금액이 소요됨에 따른 차후 경제성에서 떨어질 것으로 판단되어 기존 보유중인 선행 특허인 특허 제 10-1359397호 센서형 강우감지장치 및 그를 이용한 배수제어 시스템을 활용하여 강우감지기를 제작하였다. 강우시작과 강우 종료신호를 컨트롤 판넬에 전달하여 강우가 종료되면 타이머를 작동시켜 일정시간(관수주기)이 경과되는 것을 카운팅하고, 관수주기가 도달하기 전에 강우가 시작되면 시간경과기능을 리셋 시켜, 처음부터 system을 다시 시작하게 된다. 또한, pumping 중에 강우가 진행되면 즉시 pump의 가동을 중단시켜 강우 유출저감 기능을 적극적으로 수행토록 하여 도시 홍수저감 기능을 발휘하도록 하였다.



Fig.7강우량계 및 강우감지기

(2) 태양전지

태양전지의 용량을 선정하기 위해 사용되어지는 전력소모량을 계산하여 선정하도록 하였다.

DC pump : 100w, 24V, 70L/min 3㎥ Tank에 빗물을 가득 채울 경우

3000÷70 = 43min (≒1hr으로 계산)

- 1일 소비전력(wh) = 100w×1hr = 100whr
- 1일 필요한 발전량(w) = 1일 소비전력(whr) ÷ 3.5hr(한국의 평균일조시간)

  w = 1000whr ÷ 3.5hr = 28.6w

  ※ 태양전지용량(w) = 30w > 28.6w

이를 고려하여 일조시간에 햇빛을 받아 전기를 생산하여 배터리에 전기가 충전되도록 한다.



Fig.8태양전지 실험 전경

(3) 태양전지지지 기둥

태양전지와 강우감지기를 부착하는 구조체로서 내부에 전선 등이 통과하도록 구상되어 있다. 사용되는 전력의 효율적으로 DC 24V를 사용하기 위해 12V 태양전지 2개를 직렬로 연결하여 태양전지 판넬이 2EA가 들어가야 하며, 수직으로 연결 시 그늘로 인한 발전효율이 떨어짐에 따른 양쪽으로 설치할 수 있는 구조로 제작 한다.



Fig.9태양전지 폴대



Fig.10제작 전경

(4) 빗물저류시설 외벽

저류시설 외벽의 경우 나무화분의 재료를 선정하기 위해 조사를 실시하였으며, 재료로는 최종적으로 하드우드로 결정하였다. 각 종류별 나무의 특징이 있으나, 최근 수입을 통해 많이 사용되고 있으며, 재고확보가 용이한 이페를 사용하였다.



Fig.11외벽 사용 자재



Fig.12저류시설 외벽

(5) 빗물저장탱크

빗물저장탱크의 경우 기성품을 사용하기에는 공간적 여유 및 저류량에 따른 제한이 있음에 따른 PVC재질의 탱크를 주문제작을 하도록 결정하였다. 저류조 용량의 경우 유입용수량을 고려하여 초기 적정 관수량을 설정하였으며, 산정내역은 다음과 같다.

- 1회 적정 관수량 25㎜(출처 : 홍종운 흙이야기)
- 물탱크 용량 약 375ℓ
- 1회 필요 관수량 : 화단면적 X 25㎜ = 28ℓ

- 관수 주기 : 5일 1회 관수
- 물탱크 용량 ÷ 28ℓ = 13회
- 사용가능 일수 : 5일 x 13회 = 약 65일

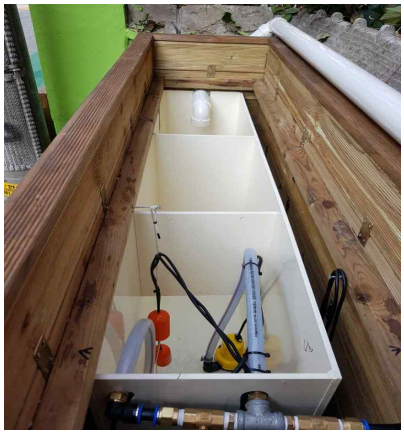


Fig.13PVC 제작 빗물저장탱크 전경

(6) 관수펌프

관수펌프의 경우 센서의 유무, 용량, 전력 타입에 따라 나누어지며, 태양전지를 활용하기 위해 DC펌프를 사용하였으며, 센서의 경우 빗물 저장탱크의 수위에 따른 조건부여를 위해 일반타입의 DC펌프를 사용하였다.

(7) 수위감지기

수위감지기의 경우 국내에 존재하는 제품의 경우 접점식, 전기식, 초음파식이 있으며, 자동 제어판넬에 PLC를 사용함에 따른 3가지 종류의 제품을 모두 활용할 수 있다. 그러나 현장여건 및 경제성 등을 비교 검토하여 접점식 수위감지기를 사용하였으며, 점적식 중 설치가 용이하며 유지관리성이 높은 오뚝이타입 수위감지기를 사용하였다.



Fig.14오뚝이타입 수위감지기

(8) 컨트롤 판넬 보관함

컨트롤 판넬 보관함 또한 빗물저류시설외벽의 옆에 붙어있는 구조로 인하여 빗물저류시설과 동일한 목재를 사용하도록 한다.

(9) 컨트롤 판넬

컨트롤 판넬의 경우 시설 내에 최소한의 공간을 차지하며, 유지관리의 용이성을 고려하여 소형 PLC를 사용하도록 구상하였으며, 펌프구동에 따른 안정성을 위해 마그네틱 스위치와 릴레이를 사용함, 현재 테스트모드와, 실사용 모드, 강제 펌프 구동모드 3가지 타입으로 제작하였다.



Fig.15시작품에 설치된 컨트롤 판넬

(10) 배터리

배터리의 경우 소모되는 전력 및 부조일수와 손실계수를 계산하였으며, 유지관리 용이함을 위한 산업용 배터리를 사용하였다.

필요한 배터리용량(Ahr) 다음과 같다.

= 1일 소비전력(whr) ÷ 배터리 전압(24V) × 부조일수 × 1.25(손실계수)

Ahr = 100whr ÷ 24V × 5 × 1.25

= 26Ahr

※배터리용량(Ahr) = 50Ahr > 26Ahr

(부조일수 : 햇빛이 없는 날)



Fig.16 50ah 배터리

(11) 빗물 차집박스

초기 시작품의 경우 빗물차집박스의 경우 별도의 제작 필요 없이 기존 맨홀을 활용하여 배관작업만 할 수 있도록 우수맨홀을 활용 하도록 구상하였다. 궁극적으로 배수성포장에서 유입되는 차집 할 수 있도록 차후 개선할 예정이다.

(12) 유입펌프

유입펌프의 경우 센서의 유무, 용량, 전력 타입에 따라 나누어진다. 태양전지를 활용하여 물이 있을 경우 빗물저류조의 수위만큼 물을 저장하기 위해 공급되는 DC펌프를 사용하였으며, 수위감지를 통해 유입수의 조절이 가능한 DC소형펌프 사용이 적합할 것으로 판단하였다.

(13) ~ (15) 배관

유입, 크린로드, 관수배관의 경우 시공성, 내구성, 경제성을 고려하여 LD관으로 선택하였다. 일반적인 배관으로는 스테인리스, PVC, 철, PE 등 종류가 다양하다. 시공성을 고려하여 PE재질을 선택하였으며, 관수부분에 필요로 한 PE재질의 LD관을 선택하였다.

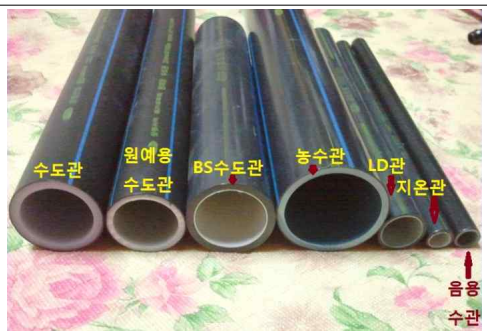


Fig.17 PE재질의 관

- 연구개발성과 : 도면 및 사양서 각각 1건

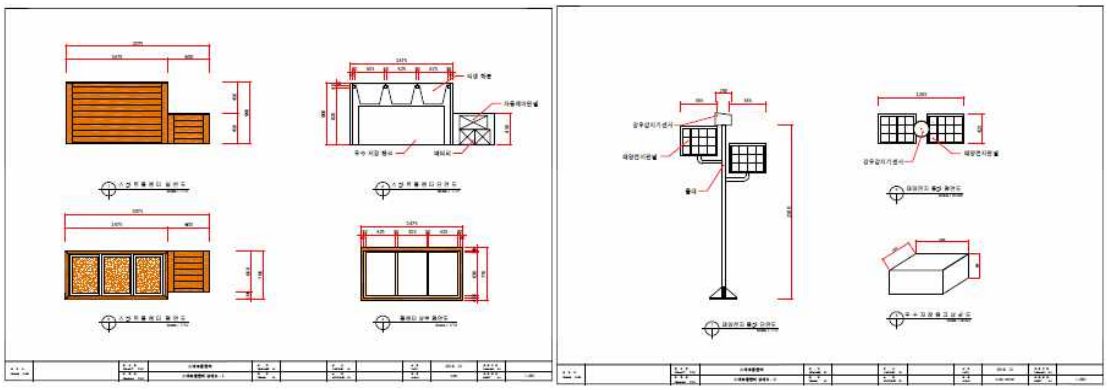


Fig.18설계 도면

2차년도 TEST BED 시공예정 구간 조사

본 연구에서는 2차년도에 직접 클린로드시스템을 설치해 실험을 진행할 TEST BED 시공하기 위해 적합한 장소를 선정하기로 하였다. 몇가지 검토구간을 조사를 하고 비교 후 최종적으로 적용구간을 선정하였다.



Fig.19 검토구간 1

첫 번째 검토구간은 후문과 정문을 연결하는 도로이다. 이 구간은 차량의 통행량이 잦아 재비산먼지 발생이 교내 다른 구간에 비해 상대적으로 높은 것으로 판단되어 선정하였다.



Fig.20 검토구간 2

두 번째 검토구간은 붕어방 근처 도로이다. 이 구간은 버스 정류장이 위치하여, 버스 통행량이 상시 존재하여, 재비산먼지 발생이 교내 다른 구간에 비해 상대적으로 높을 것으로 판단되며, 도로 우측 편 호수가 있어 용수 확보 및 배수가 원활히 이루어질것으로 판단되어 선정하였다.



Fig.21 검토구간 3

세 번째 검토구간은 과기대 후문쪽 오르막길 도로이다. 이 구간은 다른 구간과 비슷한 차량의 통행량을 갖으며, 다르 구간보다 클린로드 시스템을 적용 하기 위한 공간이 충분할 것으로 판단되어 선정하였다.

최종적으로 TEST BED를 적용시킬 구간으로 검토구간 3을 선정하였다. 검토구간 1과 검토구간 2는 차량 통행은 충분하지만 클린로드시스템 설치를 위한 공간이 충분하지 않아 시공의 어려움이 있었다. 검토구간 3은 시스템 설치를 위한 공간이 충분할 뿐 아니라 경사가 있어 용수를 집수하기 쉬운 장점이 있었다.

Table3. 1차년도 성과점검기준표

구분		핵심성과물	단위성과물	당해단계 성과목표			해당기관	실적목표/달성치
주관	A	배수성포장의 LID 클린로드 시스템 적용을 위한 공용성 검토	배수성포장 투수성능 및 적용성 검토	①	논문작성	1/1	서울과학기술대학교	논문 : 1건/1건 보고서 :1건/1건
				②	결과 보고서	1/1	서울과학기술대학교	
공동	B	배수성포장 LID 클린로드시스템 개발	설계도면 및 사양서 개발	①	설계도면	1/1	씨에스이 주식회사	사양서 : 1 건/1 건 도면 : 1건/1건
				②	사양서 작성	1/1	씨에스이 주식회사	

1차년도 연구에서는 2차년도 TEST BED 적용을 위한 사전조사 위주로 이루어 졌으며 클린로드시스템의 설계도면 및 사양서 작성을 완료하였다. 이에 대한 성과물로 주관연구기관에서는 논문1건, 보고서1건 공동연구기관에서는 사영서1건, 도면1건 작성을 완료하였다.

2) 2차년도 연구진행

2차년도에서는 배수성포장에 적용할 아스팔트 혼합물의 배합설계를 진행하고 품질시험 및 공용성 시험을 진행하였다. 그리고 교내에 시공구간을 정해 TEST BED를 설치하여 클린로드시스템의 미세먼지 저감 실험을 진행하였다.

○ 배수성 아스팔트 혼합물 배합설계 및 품질시험

배수성포장 배합설계는 소요 품질의 재료를 사용하여 소성변형과 균열 등에 대한 저항성과 내구성이 좋고, 소요의 기준을 만족하는 배수성 아스팔트 혼합물을 얻도록 하여야 한다. 배수성 아스팔트 콘크리트 포장의 혼합물 종류 및 특징은 다음 Table 4. 과 같다.

Table 4. 배수성 아스팔트 포장의 혼합물 종류 및 특징

포 장 층	아스팔트 혼합물 종류	용 도	특 징
표 층 용	배수성 아스팔트 콘크리트(20) [PA-20]	다층 배수성 아스팔트 포장의 하부층용 등	내유동성이 좋지만, 골재 탈리나 균열 우려가 높음. 따라서 배수성 포장을 다층으로 구성하는 경우 하부층에 사용함.
	배수성 아스팔트 콘크리트(13) [PA-13]	배수성 표층용	내유동성, 배수성, 소음저감 특성 등이 우수하여 일반적으로 사용
	배수성 아스팔트 콘크리트(10) [PA-10]	배수성 표층용	소음저감 특성, 골재 탈리 저항성 등을 고려시 사용
중간층용	중간층용 아스팔트 콘크리트(20) [MC-1]	중간층용이며, 수밀성 유지 및 평탄성 확보	중간층에 주로 사용함
	내유동 아스팔트 콘크리트(20R) [WC-5]		MC-1과 비슷한 입도이며, 중간층에 사용함
기 층 용	기층용 아스팔트 콘크리트(40, 30) [BB-1, BB-2]	기층용	소성변형 저항성이 높지만, 생산 및 시공시 재료분리 우려가 있음
	기층용 아스팔트 콘크리트(25) [BB-3]	기층용	기층에 주로 사용함
	내유동 기층용 아스팔트 콘크리트(25R) [BB-4]	중교통량 도로의 기층	소성변형 저항성이 우수함

본 연구에서는 배수성포장의 배수성, 강도, 골재 탈리 저항성 등을 고려하여 표층용 배수성 아스팔트 콘크리트(PA-10)에 따라 배합설계를 진행하였다. 배수성 아스팔트 혼합물의 입도는 다음 Table 5. 와 같다.

Table 5. 배수성 아스팔트 혼합물의 표준 배합

아스팔트 혼합물의 종류 / 체의호칭크기		PA-10	PA-13	PA-20
통과질량백분율(%)	25㎜	-	-	100
	20㎜	-	100	95~100
	13㎜	100	92~100	53~78
	10㎜	85~100	62~81	35~62
	5㎜	20~40	10~31	10~31
	2.5㎜	5~20	10~21	10~21
	0.6㎜	4~13	4~17	4~17
	0.3㎜	3~10	3~12	3~12
	0.15㎜	3~8	3~8	3~8
	0.08㎜	2~7	2~7	2~7

본 연구에서는 LID 클린로드 시스템 개발에 앞서 배수성 아스팔트 혼합물의 기본 품질시험 및 공용성 평가를 진행하기 위해 배수성 혼합물 배합설계를 진행하였다. 배합설계는 혼합물의 종류, 재료 선정 및 재료시험, 재료 적합판정의 과정을 거쳐 골재의 배합비율 및 합성 입도를 결정한다. 배합설계 시 굵은 골재최대치수 10㎜를 기준으로 하여 굵은 골재, 부순 잔골재, 채움재를 적용하였으며 바인더는 PG 82를 사용하였다. 이후 추정 아스팔트 함량을 결정한 후 마샬 시험용 공시체를 제작해 겉보기밀도 및 겉보기밀도 실측을 통한 공극률 20±0.3%(표층) 기준의 최적 아스팔트 함량을 결정해 품질시험용 시편을 제작하였다.

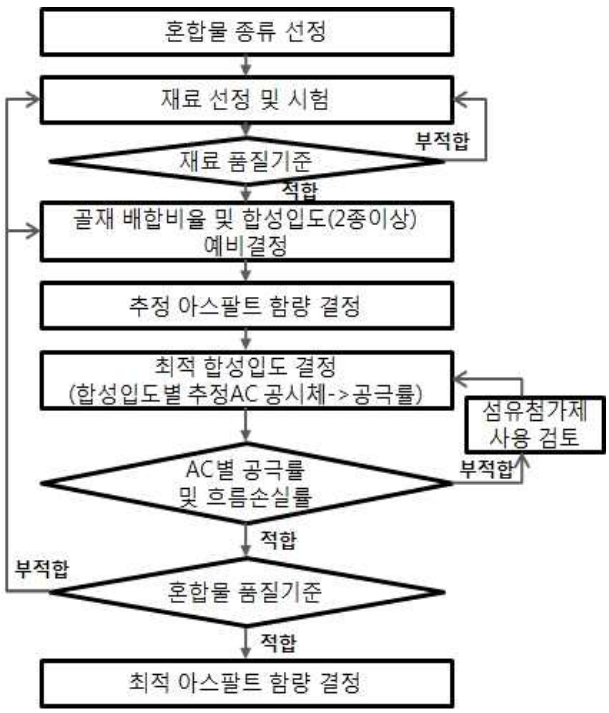


Fig.22 배수성 아스팔트 혼합물 배합설계 흐름도

본 연구에서는 골재 최대입경 10㎜를 기준으로 배합설계를 진행하였으며 본 연구에서 적용한 배수성 아스팔트 혼합물 합성입도는 Fig.23 과 같다.

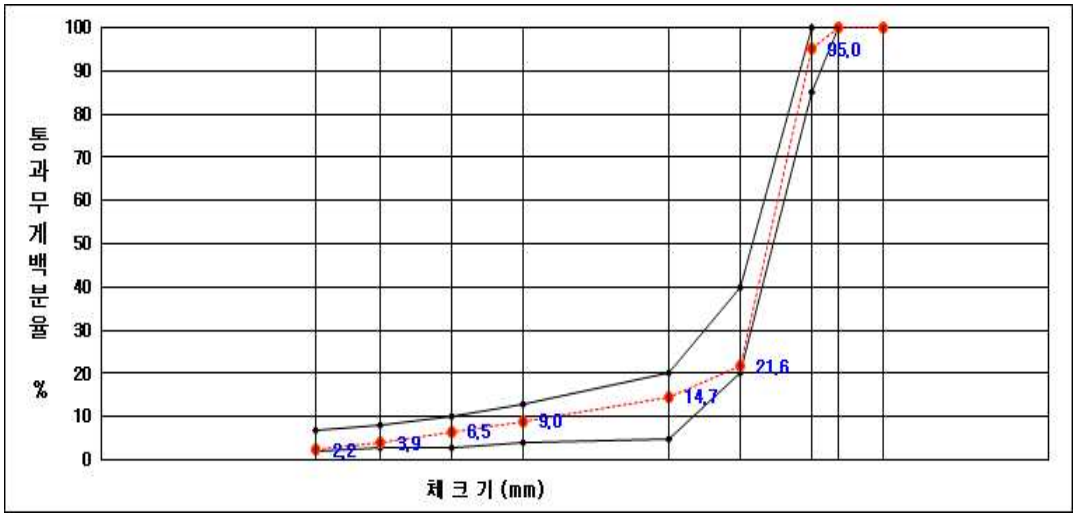


Fig.23 배수성 아스팔트 혼합물 합성입도 그래프

결정된 합성입도를 바탕으로 추정아스팔트 함량을 결정한 후, 추정 아스팔트 함량을 기준으로 -1%, -0.5%, 0%, +0.5%, +1%로 아스팔트 함량을 변경하여 각각 공시체 3개와 이론최대밀도 시료 3개를 제작하여 겉보기밀도, 이론최대밀도를 구하여 목표 공극률 20±0.3%에 대한 최적 아스팔트 함량을 도출하였다. 위의 시험을 통해 결정된 설계 공극률 20% 기준의 최적 아스팔트 함량은 4.7%이고, 결정된 최적 아스팔트 함량을 토대로 확인 배합설계를 한 결과 공극률은 19.9%로 계산되었다. 이를 바탕으로 아래 Table6. 과 같이 품질시험을 수행하였다.

Table 6. 배수성 아스팔트 혼합물의 품질 기준(국토교통부, 2020.08)

항 목		시험방법	품질기준
드레인다운 시험값(%)		주1)	0.3 이하
공극률(%)		KS F2397, KS F2366, KS F2364	20 ± 0.3
칸타브로 손실률 (%)	20℃	KS F 2492	20 이하
	-20℃		30 이하
인장강도비(TSR, 1회 동결)		부록 IV-7 배수성아스팔트 혼합물 인장강도비 시험 참조	0.85 이상
동적안정도(회/mm)		KS F 2374	3,000 이상
실내투수계수(cm/sec)		KS F 2494	0.01 이상
다짐횟수			선회다짐 : 75회, 마샬다짐 : 양면 각 50회

결정된 합성입도에 따라 추정 아스팔트 함량을 결정하였으며 결정 식은 아래와 같다.

$$\text{골재표면적} = (2+0.02a+0.04b+0.08c+0.14d+0.3e+0.6f+1.6g)/48.74$$
$$\text{추정아스팔트량} = \text{피막두께예상값}(14\mu m) \times \text{골재표면적}$$

여기서 a, b, c, d, e, f, g는 다음 Table7과 같다.

Table7. 골재표면적 결정 계수

체 눈의 크키(mm)	5.0	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	0.08
체통과질량백분율(%)	a	b	c	d	e	f	g
계수	0.02	0.04	0.06	0.14	0.3	0.6	1.6

이를 통해 산정된 추정아스팔트 함량은 3.8%이고 추정 아스팔트 함량을 기준으로 -1%, -0.5%, 0%, +0.5%, +1%로 아스팔트 함량을 변경하여 각각 공시체 3개와 이론최대밀도 시료 3개를 제작하여 겉보기밀도, 이론최대밀도를 구하여 목표 공극률 20% ± 0.3에 대한 최적 아스팔트 함량을 도출하였다.

본 연구에서는 햔장조건을 보다 잘 묘사하기 위해 골재 및 아스팔트 혼합 시 온도 설정이 가능한 아스팔트 혼합용 믹서를 활용하여 아스팔트, 골재 혼합을 진행하였으며 아스팔트 혼합물 제작 시 마샬다짐법이 아닌 선회다짐법을 적용하였다. 마샬다짐법은 아스팔트 혼합물에 일정 높이에서의 충격하중을 가하여 제작하는 방식으로m 제작 시 골재파손이 발생하기도 한다. 반면 선회다짐법은 아스팔트 포장 시 롤러에 의한 다짐을 보다 잘 묘사하여 현장조건을 잘 반영하는 방식으로 볼 수 있다. 본 연구에 활용된 장비 전경은 아래 Fig.24과 같다.



아스팔트 혼합용 믹서
(Automatic Laboratory Mixer)



선회다짐기(Gyratory Compactor)

Fig.24 배수성 아스팔트 혼합물 제작 및 다짐 장비 전경

공극률은 다져진 아스팔트 혼합물의 용적 중 공극이 차지하는 비율을 나타낸 것으로 본 연구에서는 진공밀봉방법을 이용한 다져진 아스팔트 혼합물의 겉보기 비중 및 밀도(KS F 2496) 및 아슬팔트 혼합물의 이론최대 비중 시험(KS F 2366)을 통해 공극률을 산정하였다. 공극률 산정 식은 아래와 같다.

$$\text{공극률}(\%) = (1 - \frac{\text{겉보기밀도}}{\text{이론최대밀도}}) \times 100$$

겉보기밀도와 이론최대밀도 측정을 통한 공극률 산정 전경은 아래 Fig.25와 같다.



걷보기밀도 측정



이론최대밀도 측정

Fig.25 배수성 아스팔트 혼합물 제작 및 다짐 장비 전경

위의 과정을 통해 결정된 설계 공극률 20% 기준의 최적 아스팔트 함량은 4.7%이고, 결정된 최적 아스팔트 함량을 토대로 확인 배합설계를 한 결과 공극률은 19.8%로 계산되었다. 그 후 <표 2-3>의 품질시험을 진행하여 기준 만족 여부를 확인하였다.

2.3 품질시험

① 드레인다운 시험값

드레인다운 시험은 <표 2-3>의 주1)과 같이 실험을 하였으며 드레인다운 산정 식은 다음과 같다.

$$\text{드레인다운 시험값}(\%) = \frac{\text{흘러내린 아스팔트 무게}(g)}{\text{아스팔트 혼합물 무게}(g)} \times 100$$

드레인다운 시험결과는 다음 Table8과 같다.

Table8. 드레인다운 시험 결과

항목	결과값	기준값
드레인다운 시험값(%)	0.16	0.3 이하

드레인다운 시험값은 0.16로, 기준값인 0.3 이하를 만족하였다.

② 칸타브로 손실률

칸타브로 손실률 시험은 도로 포장용 배수성 아스팔트 혼합물의 골재 비산 저항성을 평가하기 위한 시험이다. 시험방법은 다음과 같다.

1) 시험용 공시체를 3개 준비하여 질량을 0.1g까지 측정하고 기록한다.
2) 시험 시편은 (20±1)℃, (-20±1)℃에서 20시간 이상 양생시킨다.
3) 양생시킨 후 로스앤젤레스 시험기에 넣고 매분 (30 ~ 33)회전수로 드럼을 300회 회전시킨다.
4) 300회 회전 후 드럼 내의 시편을 꺼내어 0.1g까지 시편의 질량을 측정하고 기록한다.
5) 3개의 시험 결과를 평균하여 보고한다.

시험 후, 손실률은 다음 식과 같이 계산한다.

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

여기서,
C.L = 칸타브로 손실률(%)
A = 시험 전 시편의 질량(g)
B = 시험 후 시편의 질량(g)

칸타브로 손실률 시험 후 시편 전경은 그림 Fig.26와 같고 시험결과는 다음 Table9와 같다.



Fig.26칸타브로 손실률 시험 후 공시체 전경

Table9. 칸타브로 손실률 시험 결과

항목	결과값		기준값	
칸타브로 손실률(%)	20℃	26.15	20℃	20 이하
	-20℃	40.63	-20℃	30 이하

칸타브로 시험 결과, 두 온도 모두에서 기준을 만족하지 못했다. 이는 배합설계 시 골재와 바인더의 결합 상태가 미비했다는 것을 의미하며, 추후 최적 배합설계를 통해 골재 비산 저항성능 증대시켜야 할 것으로 판단된다.

③ 인장강도비(TSR) 시험

인장강도비 시험은 도로 파손의 수분에 대한 영향을 평가하기 위한 시험으로, 가장 일반적으로 사용하고 있는 수분민감도 평가 방법이다. 시험은 국토교통부 아스팔트 콘크리트 포장 시공 지침 부속서 및 부록 부속서 Ⅳ-7 배수성 아스팔트 혼합물의 인장강도비 시험방법에 의거하여 진행하였으며 시험방법은 다음과 같다.

1) 규정에 맞게 공시체 6개를 준비하여 건조상태 시험용 공시체 3개, 습윤상태 시험용 공시체 3개로 구분한다.

2) 진공장치 바닥에 철망(망크기 약 4.75mm) 등의 스페이서를 이용하여 간격을 띄운 상태에서 공시체

를 넣고, 증류수를 공시체 상단에서 최소 25mm까지 채운다.

3) 88±2kPa 범위의 진공압을 10분 동안 가하여 공시체를 포화시킨 후 진공압을 천천히 제거한다. 공시체의 포화도는 특별히 관라하지 않는다.

4) 포화된 공시체를 60±1℃의 항온수조에 24±1시간 동안 수침한다.

5) 공시체를 수중상태에서 -18±3℃의 온도로 16시간 이상 냉각한다. 비닐백이나 플라스틱함 등을 사용할 수 있으며, 어떠한 경우에도 동결 중인 공시체가 공기중에 노출되면 안된다.

6) 공시체를 60±1℃의 항온수조에 24±1시간 동안 수침한다.

7) 60±1℃의 항온수조에서 공시체를 꺼내 25±0.5℃의 항온수조에 2±0.5시간 동안 넣어둔다. 이때 항온수조의 물 온도가 상승하는 것을 방지하기 위하여 수조에 얼음 등을 사용하여 온도를 유지시킨다.

이후 건조상태의 공시체와 포화 후 습윤상태의 공시체를 25±0.5℃의 항온수조에서 꺼내 수분을 수건으로 닦은 후 즉시 KS F 2382에 따라 간접인장강도 시험을 수행한다. 시험 시에는 공시체를 지그에 올려놓고 수평과 중심을 맞춘 후 50mm/min의 재하속도로 수직파괴가 발생할 REo까지 하중을 가한 후 최대하중을 기록한다.

인장강도는 최대 하중 강도값을 이용하여 다음 식으로 계산한다.

$$S_t = 2000\frac{P}{\pi t D}$$

여기에서,
St = 인장강도(kPa)
P = 최대하중(N)
t = 인장 시험 직전에 측정한 공시체 두께(mm)
D = 공시체 직경(mm)

인장강도비는 다음과 같이 계산한다.

$$TSR = (\frac{S_{tm}}{S_{td}}) \times 100$$

여기서,
TSR = 인장강도비(%)
Stm = 수분처리된 공시체의 평균 인장강도(kPa)
Std = 건조 공시체의 평균 인장강도(kPa)

인장강도비 시험 전경은 다음 Fig.27과 같고 시험 결과는 다음 Table10과 같다.



Fig.27 인장강도비 시험

Table10. 인장강도비(TSR) 시험 결과

항목	시료번호	최대하중(N)	간접인장강도(MPa)	건조상태 평균	수분처리 평균	인장강도비	기준값
인장강도비(%)	1(수분처리)	6,075	0.61	0.641	0.575	90%	85% 이상
	2(수분처리)	5,765	0.58				
	3(수분처리)	5,355	0.54				
	4(건조상태)	6,535	0.65				
	5(건조상태)	6,195	0.63				
	6(건조상태)	6,370	0.64				

인장강도비 시험 결과 수분처리 공시체와 건조상태 공시체의 간접인장강도 평균은 각각 0.575와 0.641이며 인장강도비는 90%로 기준값인 85%를 만족하였다.

④ 동적안정도 시험

동적안정도 시험은 휠 트래킹 시험기를 사용하여, 아스팔트 혼합물 공시체에 차륜 하중을 반복적으로 가하여 동적 안정도 및 소성 변형 저항성을 측정하는 시험이다. 동적안정도 시험은 아스팔트 혼합물의 휠 트래킹 시험방법(KS F 2374, Standard test method for wheel tracking of asphalt mixture)에 의하여 수행하였다. 시험방법은 다음과 같다.

1) 시편이 담긴 몰드를 (60±0.5)℃로 약 5시간 동안 양생한다. 양생 시간은 24시간을 초과하지 않도록 한다.

2) 양생시킨 시편을 휠 트래킹 시험기에 설치한 후 시험기 내부의 온도와 공시체 온도를 기록한다.

3) 시험 윤하중은 686N이며 접지압에 따라 동적안정도에 차이가 있을 수 있음을 고려하여 접지압은 628±15kPa을 유지한다.

4) 공시체 표면 온도가 (60±0.5)℃가 되었는지 확인하여 온도가 안정된 후 시험 차륜을 직진으로 왕복 주행 시킨다. 시험 차륜의 주행 방향은 다짐 방향과 같게 한다.

5) 변형량 측정은 최초에 중심부를 통과한 때, 다이얼 게이지의 눈금을 원점으로 하며 1분, 5 분, 10분,

15분, 30분, 45분, 60분이 경과한 때의 침하 깊이를 측정하여 기록한다.

6) 시험 중 발생한 변형량을 측정하여 변형량-시간 곡선을 이용하여 다음 식을 이용하여 변형 속도를 구한다.

$$\text{변형속도}(RD, mm/\min) = \frac{d_{60} - d_{45}}{15}$$

여기서,
RD = 변형속도(mm/min)
d60 = 60분에서의 변형량(mm)
d45 = 45분에서의 변형량(mm)

7) 동적안정도(DS, Dynamic Stability)는 공시체의 표면으로부터 1mm 변형하는데 소요되는 시험 차륜의 통과 횟수로서 다음 식을 이용하여 구한다.

$$DS = 42 \times \frac{t_2 - t_1}{d_2 - d_1} \times C$$

여기서,
DS = 동적안정도(회/mm)
d1 = t1(일반적으로 45분)에서의 변형량(mm)
d2 = t2(일반적으로 60분)에서의 변형량(mm)
C = 크랭크에 의한 변속 구동형 시험기를 사용한 경우의 보정계수 : 1

아래 Fig.28은 동적안정도 시험 후 공시체의 전경이고 Table11은 동적안정도 시험 결과, Fig.29는 동적안정도 결과 그래프이다.



시료 1 시료 2 시료 3

Fig.28 동적안정도 시험 후 공시체 전경

Table11. 동적안정도 시험 결과

항목		변형속도(RD)	총 변형량	동적안정도(DS)	평균 동적안정도	기준값
동적안정도	1	0.010	2.67	4,139	4,074	3,000 이상
	2	0.012	2.22	3,606		
	3	0.009	2.55	4,477		

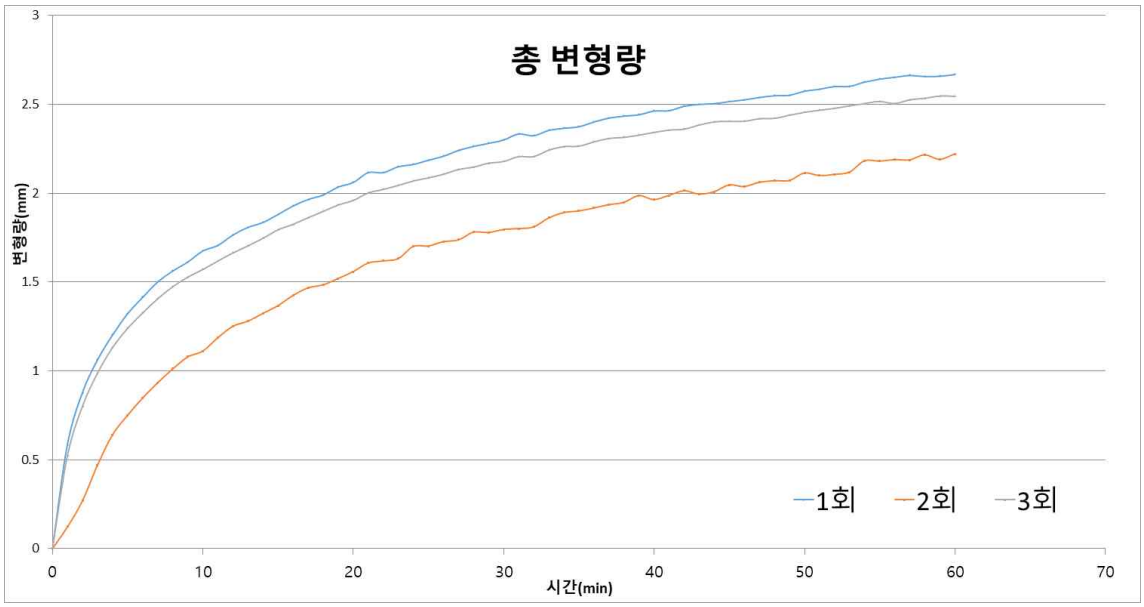


Fig.29 시간별 총 변형량 그래프

시험결과, 동적안정도는 평균 4,074로 기준값인 3,000 이상을 만족하였다.

⑤ 실내투수시험

실내투수시험은 도로 포장용 배수성 아스팔트 혼합물의 투수성을 실내에서 평가하는 방법으로 배수성 아스팔트 혼합물의 실내 투수 시험방법(KS F 2494, Standard test method for the laboratory permeability test for porous asphalt mixtures)에 의거하여 시험을 진행하였다.

본 연구에서 활용한 실내투수시험 장비는 다음 Fig.30과 같다.



Fig.30 실내투수시험 장비

실내투수시험 방법은 다음과 같다.

1) 지름이 100mm 원주형 시편을 준비하고 시편의 지름과 두께를 버니어캘리퍼스를 사용하여 0.01mm까지 측정한다.
2) 시편을 원통 내부에 위치시킨 후 고정한다.
3) 투수 원통의 상단으로부터 천천히 25℃의 물을 채우고, 원통 상부의 월류구로부터 물을 월류시킨다. 이때 일정 수위를 확보하면서 수조의 배수구에서 물을 배수시킨다.
4) 수조의 배수구로부터 월류량이 거의 일정하게 되는 것을 기다린 후 시험을 시작하여야 하며, 시험 시작 후 일정 시간 내에 배수괴는 물의 양을 매스실린더로 측정한다.
5) 물의 높이를 버니어캘리퍼스를 이용하여 측정한다.
6) 수조에 있는 물의 온도를 측정한다.

투수 계수 계산은 다음 식과 같이 한다.

$$K_T = \frac{L}{h} \times \frac{Q}{A \times (t_2 - t_1)}$$

여기서,
L = 시편의 두께(mm)
A = 시편의 단면적(mm2)
h = 원통 월류구에서 수조 월류구까지의 수위차(mm)
t1 = 측정 시작 시간(sec)
t2 = 측정 시작 시간(sec)
Q = t1 ~ t2에 배수된 수량(mm3)

$$K_T = K_{15} \times \frac{\eta_T}{\eta_{15}}$$

여기서,

K_{15} = 온도 15℃에서의 투수계수(mm/초)

η_T/η_{15} = 온도 15℃에서의 투수계수를 구하기 위한 보정계수로, 아래 Table12와 같이 구한다.

Table12. 온도 15℃에 대한 T℃의 점성계수 비

T(℃)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1.575	1.521	1.470	1.424	1.378	1.336	1.295	1.217	1.217	1.181
10	1.149	1.116	1.085	1.055	1.027	1.000	0.950	0.925	0.925	0.925
20	0.880	0.859	0.839	0.819	0.800	0.782	0.748	0.731	0.731	0.715
30	0.700	0.685	0.671	0.657	0.645	0.632	0.607	0.596	0.596	0.584
40	0.574	0.564	0.554	0.544	0.535	0.525	0.507	0.498	0.498	0.490

실내투수시험 결과는 다음 Table 13과 같다.

Table13.실내투수시험 결과

항목	투수계수 값	평균	기준값
1	0.019	0.021	0.01cm/sec
2	0.021		
3	0.023		

시험결과, 3회 시험 평균 투수계수는 0.021cm/sec로 기준값인 0.01cm/sec를 만족한 것을 알 수 있다.

○ 공용성 평가

본 연구의 목표는 배수성 포장을 통해 미세먼지를 저감시키는 것이므로 배수성 포장의 적용성에 대해 검토할 필요가 있다. 배수성포장의 경우 배합설계시 목표 공극률을 20±0.3%로 설계를 하므로 이러한 배합설계를 할 시 소성변형, 피로저항 등에 대해 적합한지 평가를 할 필요가 있다. 따라서 다음과 같은 실내 공용성 시험을 통해 배수성 포장의 성능을 평가해 보고자 한다.

- 동탄성계수 시험

아스팔트는 점탄성체로서 온도와 충격에 민감하기 때문에 열이나 충격으로 인해 포트홀, 싱크홀, 피로 등의 파손이 발생한다. 이러한 도로 파손방지를 위해 동탄성계수 시험으로 아스팔트의 물성을 평가한다.

아스팔트 혼합물의 점탄성 거동특성은 사인파 하중을 연속 재하한 상태에서 측정된 변형특성과 하중과의 상관관계로부터 규명이 가능하다(김현오 외, 2005). 시험으로부터 결정되는 동탄성계수는 시험온도 및 하중조합에 다라 각각의 값을 얻을 수 있으며, 이것을 하중 시간과 온도의 중첩(Superposition Princibple) 원리를 적용하여 마스터커브 및 전이함수를 작성할 수 있다. 마스터커브는 아스팔트 혼합물의 하중과 온도와의 상관관계를 통해 물리적 특성을 파악할 수 있다.

동탄성계수는 아스팔트 혼합물의 강성(Stiffness)을 나타내는 중요한 요소로서, 아스팔트 포장의 해석

및 설계에 있어 중요한 역할을 하는 공학적 물성이다. 본 연구에서는 SGC(Super-pave Gyratory Compactor)로 순환 골재 혼입 비율 및 일반 아스콘 시편을 제작하여 코어 및 상, 하부 절단 작업을 통해 시험 시편의 규격은 높이 150mm, 직경 100mm으로 제작하였고. 시험온도 -10, 5, 20, 40, 54℃, 주파수 25, 10, 5, 1, 0.5, 0.1 Hz에서 시험을 실시하였다. 시험을 통해 얻어진 동탄성 계수는 마스터커브 작도, MEPDG 프로그램을 통한 공용성 분석에 활용된다. 아래 Fig.31은 UTM-30을 활용한 동탄성계수 측정 시험 전경이다.

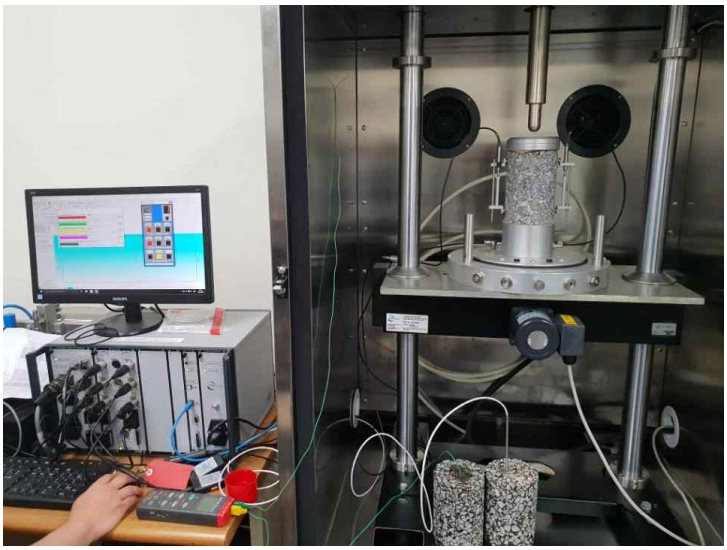


Fig.31 동탄성계수 측정 시험 전경(UTM-30)

아스팔트 콘크리트의 물리적 성능을 나타내는 동탄성계수는 주기적 하중과 온도에 따라 다르게 측정되며, 측정된 동탄성계수는 온도-주기에 따른 변환을 통해 마스터커브를 작도할 수 있다. 아스팔트 혼합물은 구조적으로 점탄성 거동을 가지므로 온도에 따라 다른 성능을 나타내고, 하중에 따라 다르게 회복되거나 저항한다. 이러한 점탄성 물질의 물리적 저항 성능을 나타내는 것이 동탄성계수이다. 동탄성계수 시험은 일정한 온도범위(-10℃~54℃)에서 다른 주기적 하중(25Hz~0.1Hz)을 주어, LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 통해 측정되는 변위로 그 저항성을 파악하는 시험이다. 얻어진 온도 및 하중 주기에 따른 동탄성계수는 시간-온도 중첩의 원리(TTSP, Time-Temperature Superposition Principle)를 이용해 온도와 주파수에 해당하는 동탄성계수로 이동시켜 그 물리적 특성을 예측하는 방식이다.

동탄성계수 시험에서는 먼저 복합탄성계수(Complex Modulus, E^*)를 측정된 변형과 하중에 의해 결정하는데, 이에 대한 함수는 아래 식과 같다(Terhi K. Pellinen et al. 2004).

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \varnothing)$$

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_0^{i\omega t}}{\varepsilon_0 e^{i(\omega t - \varnothing)}}$$

이는 하중 주기와 응력 사이에 발생하는 위상의 차로 인해 동탄성계수가 결정될 수 있으며, Euler의 법칙 및 Isotropy에 의해 도출될 수 있다. 동탄성계수는 복합탄성계수의 절대값을 의미하며, 이는 아래 식과 같이 다시 표현된다.

$$|E^*| = \frac{\sigma_o}{\varepsilon_o}$$

동탄성계수에 대한 마스터커브 작도는, 다양한 이론과. 접근방법에 의해 Sigmoidal 함수로 정의되고 있다. 이러한 함수는 최솟값에 임의의 기울기를 갖는 S형 곡선반경을 거쳐 순간적인 이중 난형에 대한 일정 최댓값을 갖는 마스터커브로 작도할 수 있다. 마스터커브를 구성하는 인자는 다양한 이론으로 접근할 수 있으며, 이를 구성하는 전이함수(Shift Factor) 역시 다양한 접근법에 의해 도출할 수 있다. 그러나 역학적인 측면에서, 어떠한 접근법이나 이론을 사용하더라도 동탄성계수에 대한 추세는 변하지 않으며, 다만,

그 예측에 대한 결과가 다소 상이할 수 있다. 과거 전 세계적으로는 Witzak이 개발한 모형을 토대로 아래 식과 같이 재료시험을 통한 동탄성계수 예측 모형이 사용되었으며, 전이함수에 대한 접근 역시 아래 식과 같이 William, Landel & Ferry의 함수를 사용하여 아스팔트 혼합물에 대한 성능을 평가한다.

$$\log_{10}|E^*| = -1.249937 + 0.02923p_{200} - 0.001767(p_{200})^2 - 0.002841p_4 - 0.05809V_a - 0.082208\frac{V_{beff}}{V_{beff}+V_a} + \frac{3.871977 - 0.0021p_4 + 0.003958p_{3/8} - 0.000017(p_{3/8})^2 + 0.00547p_{3/4}}{1+\exp(-0.603313 - 0.313351\log f - 0.0393532\log\eta)}$$

$$\log a_T = -\frac{C_1(T-T_0)}{C_2+(T-T_0)}$$

종래에 들어서는 이러한 시험에 의한 방법보다, 실제 주기적 하중시험을 이용한 동탄성계수 시험을 실시함으로써, 이를 단순히 이동시키는 전이모형을 사용하여 그 예측을 실시하고 있다.

Table 14. 동탄성계수 전이함수

구분	Standard Logistic	Generalized Logistic
MEPDG	$\log(E^*) = \delta + \frac{\alpha}{1+e^{(\beta+\gamma\log\omega)}}$	$\log(E^*) = \delta + \frac{\alpha}{(1+\lambda e^{(\beta+\gamma\log\omega)})^{1/\lambda}}$
Other	$\log(E^*) = D + \frac{A}{1+e^{-B(\log\omega - M)}}$	$\log(E^*) = D + \frac{A}{(1+T\exp(-B(\log\omega - M))^{1/T}}$

동탄성계수를 평가하기 위해 전 세계적으로 다양한 함수를 사용하고 있으나 그 가운데에서도 대체적으로 MEPDG(Mechanical-Empirical Pavement Design Guide)에 의한 함수를 적용하는 추세이며, 전이함수를 위한 적용 이론은 전반적으로 다양하게 적용되고 있다.

아스팔트에 대한 점성 시험을 진행하는 경우 기준 온도에 대한 점성평가를 전이함수에 반영시키는 이론을 사용하고, 점성시험을 진행하지 않는 경우 2차 회귀함수 혹은 앞서 언급한 William, Landel & Ferry 이론을 활용한다. 우리나라에서는 시험에 의해 동탄성계수를 산정하는 경우, 2차 회귀함수에 대한 온도 별 Shift Factor 예측 모형을 사용하며, 포장에 대한 공용성 평가를 위한 MEPDG 해석에서는 Pellinen에 의해 제안된 함수를 사용한다. 우리나라의 역학적-경험적 설계프로그램인 KPRP에서 사용하고 있는 동탄성계수 예측 모형 및 마스터커브 결정함수는 아래 식과 같다.

$$\log(E^*) = \delta + \frac{a}{1+\exp^{\beta-\gamma\log(t_r)}}$$

$$\log(t_r) = \log(t) - c\{\log(\eta) - \log(\eta_{Tr})\}$$

우리나라에서는 비교적, 간단해진 예측모형을 사용함으로써 포장 및 혼합물에 대한 공용성 평가를 실시하고 있다.

동탄성계수 시험 절차

동탄성계수 시험은 각 시험 온도별 사인파 하중 주기에 따라 공시체에 필요 하중을 가하여 부착된 변형률계(LVDT)를 통해 공시체의 변형 특성을 파악하는 시험으로, 시험 시 하중은 공시체에 변형이 생기지 않을 정도의 미세한 하중을 가하여 측정한다.

본 연구에서는 AASHTO T342 규정에 따라 시험온도 -10, 5, 20, 40, 54℃에서 실시하며 하중주기는 25, 10, 5, 1, 0.5, 0.1Hz에서 실시하였다. 하중 주기별 횟수는 다음 Table 15와 같다.

시험 시편의 시험온도 도달을 위해 적정 시간의 양생을 거치고 보다 정확한 온도 측정을 위해 온도 확인용 더미(Dummy)를 제작하여 시험에 대한 신뢰도를 높였다. 각 온도별 공시체는 시험 온도를 고려하여 양생시간을 다르게 두었으며 다음Table 16은 온도별 시편 양생시간을 나타낸다.

Table 15. 하중 주기별 횟수

Frequency(Hz)	Number of Cycles
25	200
10	200
5	100
1	20
0.5	15
0.1	15

Table 16. 온도별 공시체 양생시간

시험온도	양생시간
-10	12
5	12
20	8
40	6
54	4

동탄성계수 시험용 공시체 제작

본 연구에서는 배수성 포장 PA-10(최대입경 100㎜) 배합설계 결과를 활용하여 직경 150㎜, 높이 165㎜ 이상의 선회다짐 공시체를 제작하였다. 이후 시편의 중심부를 추출 한 후 코어의 상, 하부의 절단 작업을 통해 최종 시험용 시편을 제작한다. 최종 시편은 절단면의 수평을 맞추기 위해 추가적으로 연마작업을 통해 수평을 맞추어 시험 시편의 높이 150㎜, 직경 100㎜을 확인한다. 다음 Fig.32는 선회다짐 공시체와 추출 후의 공시체이다.



선회다짐 공시체


코어 추출 후 공시체

Fig.32 공시체 전경

본 연구에서는 배수성 혼합물 선회다짐 시편에 대해 3개의 공시체를 제작하여 동탄성계수 시험에 활용하였다.

동탄성계수 시험 결과 분석

비교를 위해, 본 연구에서 진행한 배수성 혼합물의 동탄성계수 뿐만 아니라 기존 연구(전진호 외 2명, 2019)에서 진행되었던 순환골재 혼입비율 0%(일반 가열아스팔트 혼합물) 결과를 이용하였다. 동탄성계수

시험 결과를 이용하여 마스터커브를 작도한 결과는 다음 Table17과 Fig.33 ~ Fig.36과 같다.

Table 17. 동탄성계수 평균값

일반 가열아스팔트 혼합물 평균값					
Temp(℃)	-10	5	20	40	54
Freq(Hz)	DM	DM	DM	DM	DM
25	39,363	22,177	12,729	2,506	708
10	36,541	21,304	12,271	1,811	446
5	35,566	19,802	9,669	1,300	322
1	31,634	15,794	5,464	650	178
0.5	29,696	14,113	4,322	482	150
0.1	25,166	10,637	2,406	289	113
배수성 혼합물 평균값					
Temp(℃)	-10	5	20	40	54
Freq(Hz)	DM	DM	DM	DM	DM
25	12,659	7,896	4,630	1,619	790
10	11,900	7,299	4,121	1,209	495
5	11,486	6,767	3,619	953	370
1	10,373	5,418	2,432	536	214
0.5	9,830	4,950	2,033	426	186
0.1	8,547	3,861	1,283	270	132

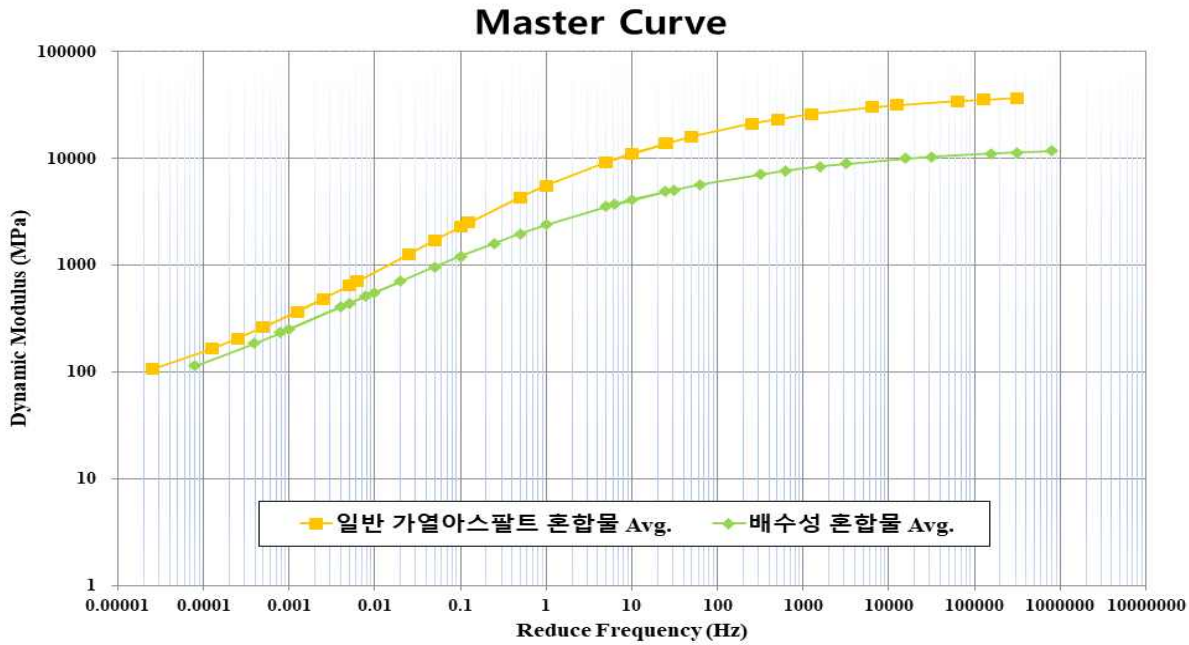


Fig.33 마스터커브 종합

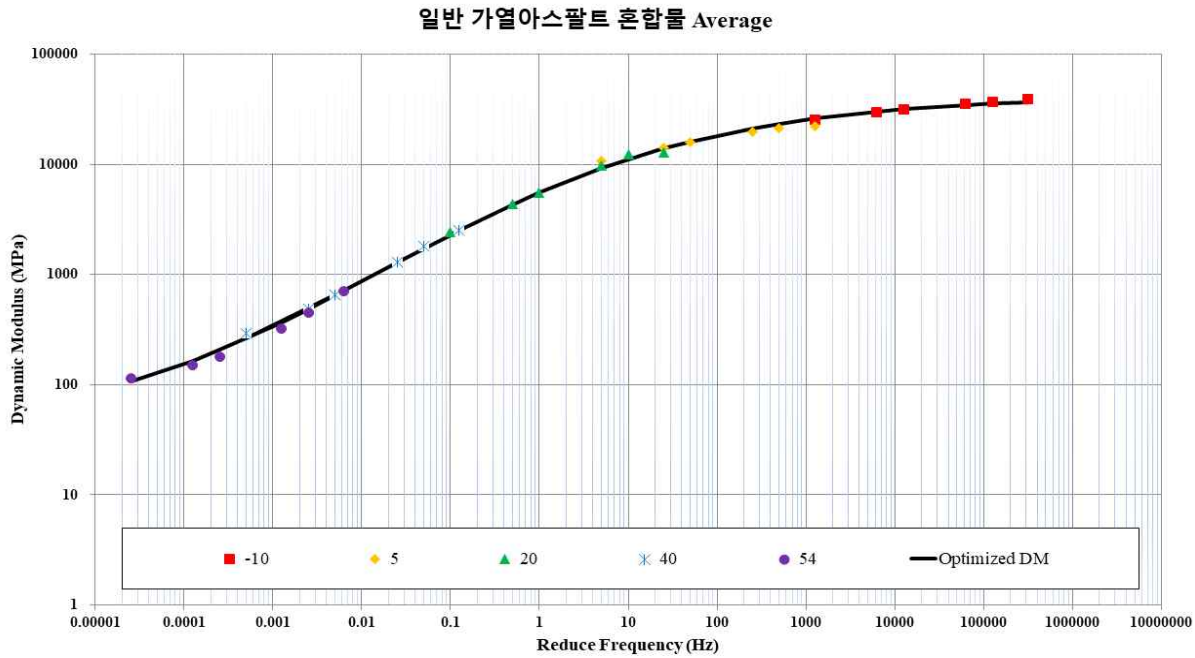


Fig.34 일반 가열아스팔트 혼합물 마스터커브

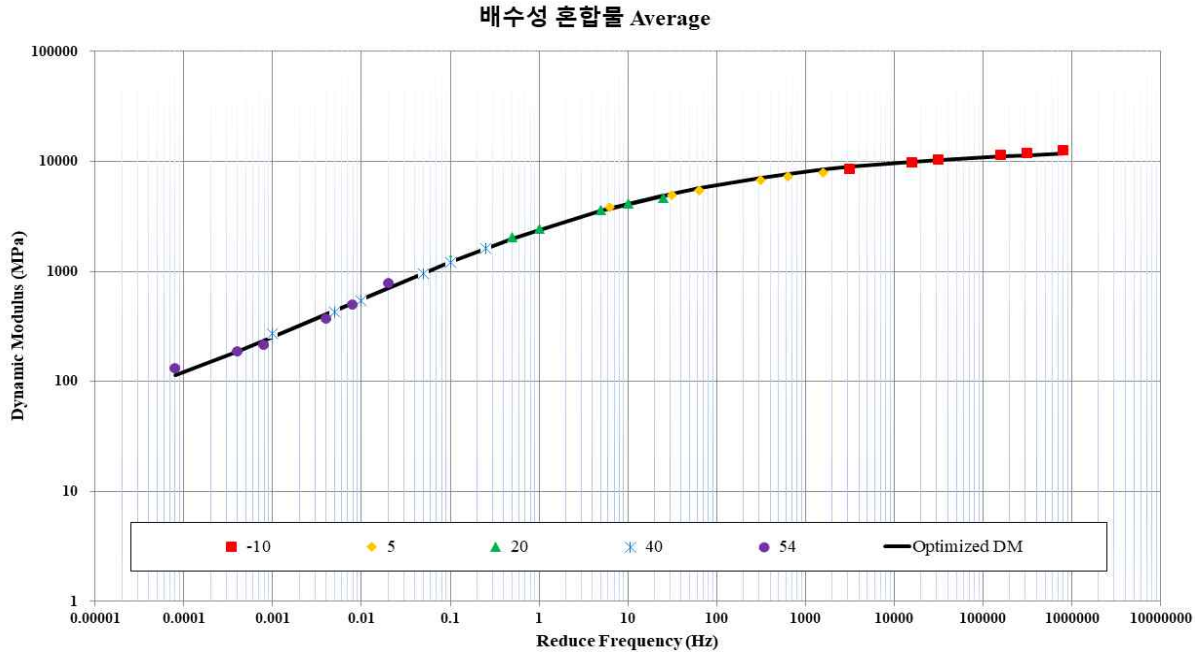


Fig.35 배수성 혼합물 마스터커브

고주파수 영역인 고속의 하중 부분은 저온에서의 피로균열에 대한 특성으로 보며, 낮은 동탄성계수 값을 나타낼수록 피로균열에 대한 저항성이 우수한 것으로 보고, 저주파수 영역인 저속의 하중 부분은 고온에서의 소성변형에 대한 특성으로 보며, 높은 동탄성계수 값을 나타낼수록 소성변형에 대한 저항성이 우수한 것으로 본다. 시험 결과, 전체적으로 일반 가열 아스팔트 혼합물에 비해 배수성 혼합물에서 낮은 동탄성계수 값을 나타낸 것을 알 수 있다. 이는 배수성 혼합물의 높은 공극률로 인한 것으로 유추되며, 저온영역에서 높은 피로균열 저항성을 보이는 것은 고성능의 바인더 사용(PG 82) 때문인 것으로 판단된다.

○ 개발된 LID 클린로드 시스템 현장 적용

본 연구에서는 개발된 클린로드 시스템을 활용하여 교내에 TEST BED 설치를 완료하였다. TEST BED의 전경은 다음 그림과 같다.

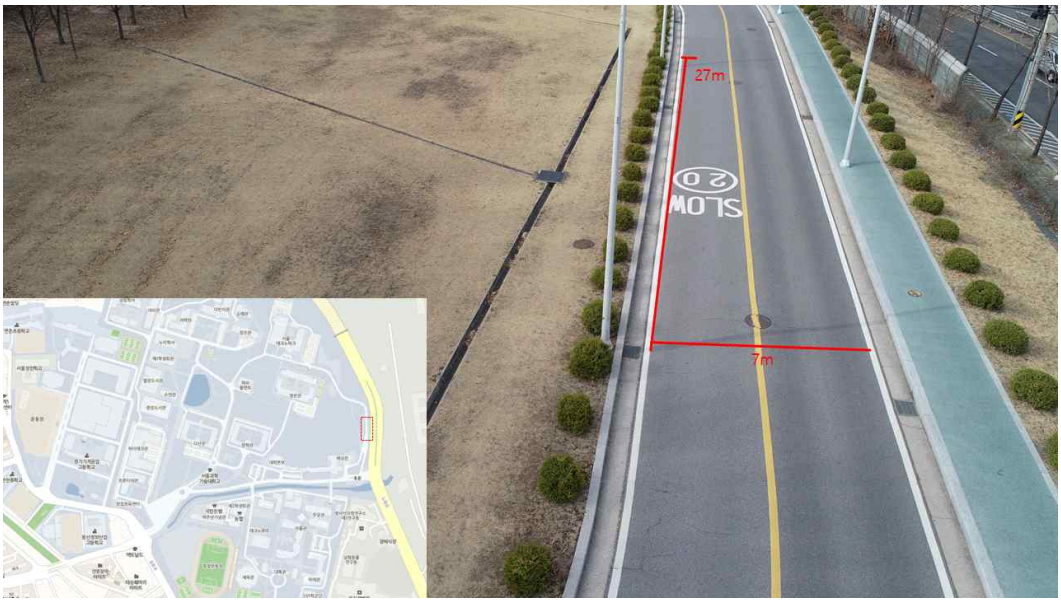


Fig.36 교내 클린로드 시스템 시험시공구간(항공사진)



Fig.37클린로드시스템 전경

-시제품 설계 및 제작

본 연구에서 서울과학기술대학교 교내에 LID 클린로드 시스템 시제품 제작 및 TEST BED 설계를 진행하였다. 아래 Fig.38은는 클린로드 시스템의 평면도, 단면도 및 배치 평면도, 배치 단면도이다.

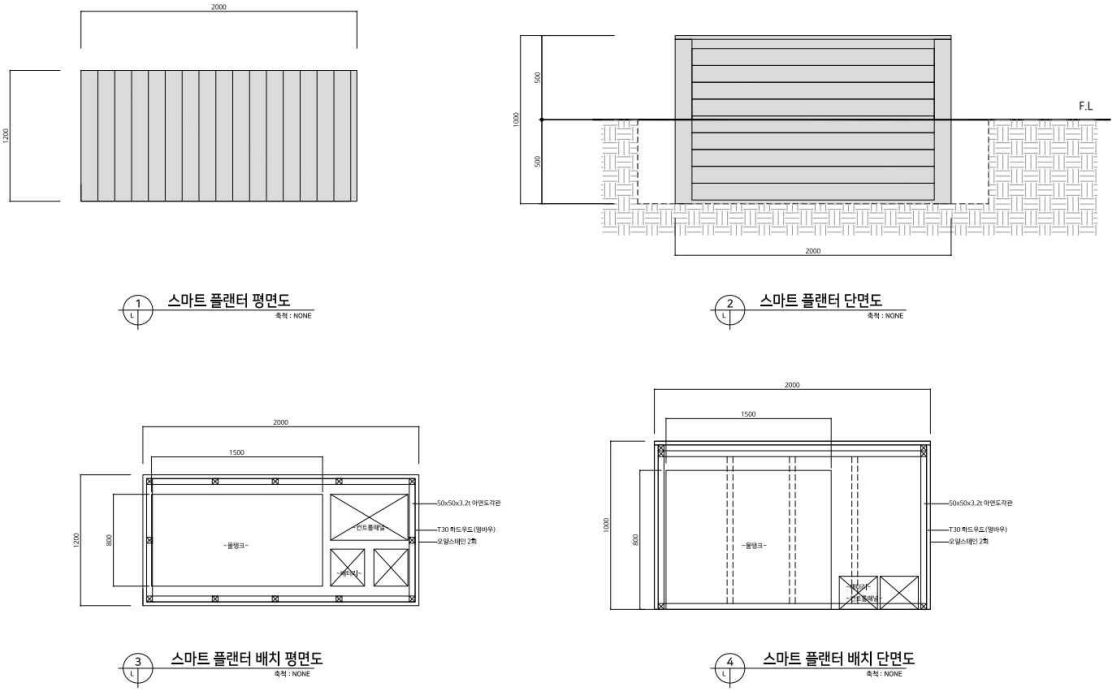


Fig.38 LID 클린로드 시스템 도면

현재 교내의 설치한 LID 클린로드시스템의 경우 배수성포장을 적용하지 않아, 비가 내리면 포장층으로 물을 투과시켜 물을 모으는 방식이 아닌 배수구에 모인 물을 모터와 필터를 통해 물탱크 안에 협잡물을 거른 물을 저장하는 방식이다. 아래 Fig.39는 실제 사용하고 있는 모터와 필터 사진이다.



Fig.39클린로드시스템 모터 및 필터

또한 LID 클린로드 시스템의 경우 태양전지와 강우감지기를 사용하고 있다. 태양전지의 경우 전기를 충전하여 전체적으로 시스템을 구동하는데 사용하고 있고, 강우감지기의 경우 기존 보유중인 선행 특허인 특허 제 10-1359397호 센서형 강우감지장치 및 그를 이용한 배수제어 시스템을 활용하여 제작하였다. 강우시작과 강우 종료신호를 컨트롤 판넬에 전달하여 강우가 종료되면 타이머를 작동시켜 일정시간(관수주기)이 경과되는 것을 카운팅하고, 관수주기가 도달하기 전에 강우가 시작되면 시간경과기능을 리셋 시켜, 처음부터 system을 다시 시작하게 된다. 또한, pumping 중에 강우가 진행되면 즉시 pump의 가동을 중단시켜 강우 유출저감 기능을 적극적으로 수행토록 하여 도시 홍수저감 기능을 발휘하도록 하였다. 아래 Fig.40은 강우감지기 및 태양전지 사진이다.



Fig.40 강우감지기 및 태양전지

마지막으로 Fig.41~42는 실제로 빗물을 모으는 물탱크와 시스템을 운용하는 컨트롤 판넬이다.



Fig.41 물탱크

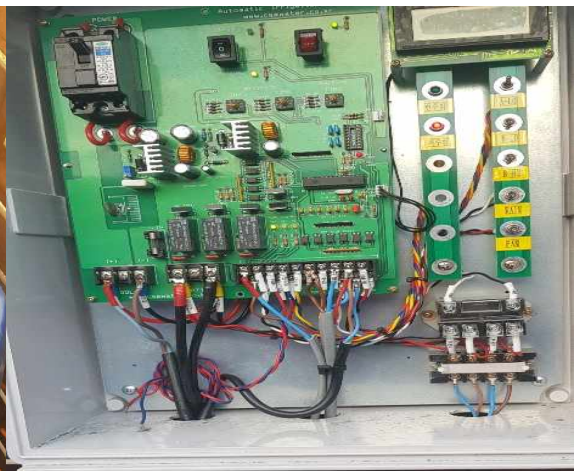


Fig.42 컨트롤 판넬

- TEST BED 설계 및 제작

당해연도 서울과학기술대학교 교내 TEST BED에 LID 클린로드 시스템을 적용하였다. 아래 Fig.43 ~ 45 는 물분사장치, LID 클린로드 시스템 전면, LID 클린로드 시스템 측면사진 이다.



Fig.43 물분사장치



Fig.44 LID 클린로드 시스템 전면



Fig.45 LID 클린로드 시스템 측면

LID 클린로드 시스템의 경우 컨트롤 판넬을 이용하여 수동 및 자동 분사 방법이 있다. 자동 분사의 경우 몇 분 동안 분사할지, 몇 시간 간격으로 분사할지 등 설정하여 이용 할 수 있다. 또한 물탱크에 물이 없는 경우 모터의 오작동을 방지하기 위해 물탱크 안에 수위감지기를 부착하여 어느정도의 수위가 되었을 때만 모터가 작동하여 물을 분사할 수 있게 설정해놓았다. 아래 Fig.46은 수위감지기 사진이다.



Fig.46 수위감지기

- 모니터링

미세먼지 저감의 효과적인 노즐 설치를 위해 노즐각도, 노즐 No,에 따른 물의 분사량 및 분사 범위등을 모니터링을 통해 평가하였다. 실험에서 선정한 노즐은 부채꼴 형태로 분사되는 Flat Nozzle을 선정하였으며, 분사각도는 110도, 95도, 65도, 25도 4종류에 대해 모니터링을 진행하였다. 분사각도를 달리하여 모니터링을 한 이유는 도로 표면 전체에 물이 골고루 분사되도록 하기 위해서이다. 물의 분사량은 No.10 노즐과 No.20 노즐을 선택하였고, 펌프의 압력에 따라 분사되는 양의 변화에 따라 어떤 노즐이 더 적합한지 모니터링을 진행하였다. 아래 Fig.47은 각 노즐 NO.에 대한 정보이다.

CAPACITY CHART

NOZZLE	BSPT THREAD SIZE						EQUIV. ORIFICE	FLOW RATE IN LITRES/MIN AT Bar.G.								SPRAY ANGLES (°) @ 2.8 Bar.G.									
NUMBER	1/8	1/4	3/8	1/2	3/4	1	DIA.(mm)	0,7	1,0	2	3	4	5	7	10	0	15	25	40	50	65	80	90	100	110
02	■	■					0,9	0,38	0,46	0,65	0,80	0,89	0,99	1,24	1,43	■	■	■	■	■	■	■	■	*	*
03	■	■					1,10	0,57	0,68	0,97	1,18	1,36	1,53	1,81	2,23	■	■	■	■	■	■	■	■	*	*
04	■	■					1,25	0,75	0,90	1,27	1,56	1,83	2,03	2,38	2,86	■	■	■	■	■	■	■	■		*
05	■	■					1,4	0,96	1,15	1,62	1,99	2,28	2,55	3,02	3,62	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
06	■	■					1,5	1,15	1,37	1,94	2,37	2,72	3,07	3,61	4,46	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
07	■	■					1,65	1,33	1,59	2,25	2,75	3,21	3,54	4,21	5,36	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
08	■	■					1,75	1,53	1,83	2,59	3,17	3,66	3,98	5,03	5,80	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
09	■	■					1,9	1,72	2,05	2,90	3,55	4,11	4,75	5,50	6,25	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
10	■	■					2,0	1,90	2,27	3,21	3,93	4,46	5,19	5,95	7,14	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
12,5	■	■					2,2	2,40	2,90	4,02	4,97	5,69	6,38	7,55	9,04	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
15	■	■					2,4	2,84	3,44	4,21	6,16	6,70	7,78	9,15	10,71	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
20	■	■					2,8	3,80	4,46	6,25	8,05	9,37	9,94	12,35	14,73	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
25		■					3,1	4,80	5,80	8,03	9,94	11,38	12,75	15,09	18,08	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
30		■	■				3,6	5,95	6,70	9,82	11,84	13,84	15,13	17,84	21,43	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
40		■	■				4,0	7,78	9,37	12,05	15,62	18,30	20,57	24,25	28,57	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
50		■	■				4,4	9,61	11,61	16,07	19,89	22,77	25,50	30,19	36,16	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
60		■	■				4,8	11,44	13,84	19,20	23,67	27,23	30,69	36,14	43,30	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
70		■	■				5,2	13,27	16,07	22,77	27,46	32,14	35,88	42,54	50,45	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
80			■	■			5,6	15,10	18,75	25,45	31,72	36,61	41,06	48,03	57,14	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
100			■	■	■		6,4	19,21	22,77	31,70	39,30	45,53	51,00	60,38	72,32	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
125			■	■	■		7,0	24,01	28,46	39,62	49,12	56,91	63,75	75,48	90,40	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
150				■	■		7,5	28,82	34,37	48,21	59,19	68,31	76,50	90,10	108,0	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
200				■	■		8,8	37,96	45,53	64,28	79,07	91,10	102,0	120,3	143,8	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
250					■		9,8	45,57	58,84	80,36	98,50	113,4	127,5	150,0	179,9	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
300					■	■	10,8	57,18	68,30	96,87	118,4	136,6	152,6	180,7	215,6	■	■	■	■	■	■	■	■		
400					■	■	12,5	76,39	90,60	128,6	157,7	182,1	204,0	241,1	287,9	■	■	■	■	■	■	■	■		
500						■	14,0	95,40	114,0	161,3	197,5	228,0	254,9	301,6	360,5	■	■	■	■	■	■	■	■		
600						■	15,0	114,4	136,8	193,5	237,0	273,7	306,0	362,1	432,8	■	■	■	■	■	■	■	■		

Fig.47 노즐정보

또한 아래 Fig.48~49는 실제로 사용한 노즐의 사진과 도면이다.



Fig.48 분사노즐

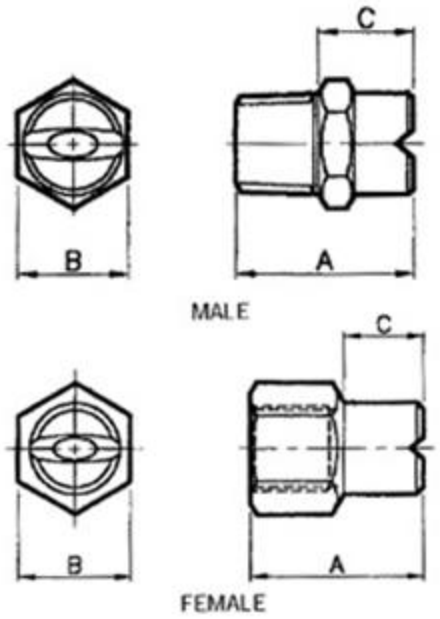


Fig.49 노즐 도면

-TSS(Total Suspended Solids)실험

본 연구에서는 재비산먼지 저감 측정을 위해 TSS(Total Suspended Solids)시험을 진행하였다. TSS시험은 여과지로 걸러지지 않는 부유물질을 건조로 105℃에서 2시간 건조시킨 후 무게를 측정하여 ppm이나 mg/L로 나타내어 여과지에 잔류한 부유성고유물의 양을 수치와 한 것이다.
분사형 노즐을 통해 도로에 물을 분사한 후 초기 물, 1차 분사 후 흐른 물, 2차 분사 후 흐른 물, 3차 분사 후 흐른 물을 채취해 총부유성고형물(TSS, Total Suspended Solids) 시험을 통해 도로 위 재비산먼지 저감 효과를 분석하였다. 시험 결과는 다음 표와 같다.

Table18. TSS 실험 결과(일반 조건)

구분		초기 무게 W0 (g/50mL)	나중 무게 W1 (g/50mL)	W1-W0 (g/50mL)	mg/L	평균
초기	1	0.0901	0.0902	0.0001	2	4
	2	0.0913	0.0916	0.0003	6	
1차 분사	1	0.0912	0.0972	0.006	120	128
	2	0.0929	0.0997	0.0068	136	
2차 분사	1	0.0907	0.0917	0.001	20	14
	2	0.0901	0.0905	0.0004	8	
3차 분사	1	0.0919	0.0921	0.0002	4	3
	2	0.0916	0.0917	0.0001	2	

또한 공사현장 근처 등 악조건을 묘사하기 위해 노면에 일정량의 모래를 뿌린 후 TSS 시험을 진행하였고 결과는 다음 표와 같다.

Table19. TSS 실험 결과(악조건)

구분		초기 무게 W0 (g/50mL)	나중 무게 W1 (g/50mL)	W1-W0 (g/50mL)	mg/L	평균
초기	1	0.0901	0.0902	0.0001	2	4
	2	0.0913	0.0916	0.0003	6	
1차 분사	1	0.0925	0.1176	0.0251	502	435
	2	0.0922	0.1106	0.0184	368	
2차 분사	1	0.091	0.0949	0.0039	78	70
	2	0.0909	0.094	0.0031	62	
3차 분사	1	0.0911	0.0915	0.0004	8	5
	2	0.0922	0.0923	0.0001	2	

시험결과, 일반 조건에서는 1차 분사 후 채취한 물에서 가장 높은 TSS 값을 나타냈으며 2차 분사와 3차 분사 시 TSS 값 분석 결과, 큰 차이가 없었고 이는 물을 2번까지 분사했을 시 도로 위 재비산먼지가 대부분 청소되는 것을 알 수 있다. 악조건에서의 시험 결과, 2차 분사 후에도 초기와는 큰 TSS 값 차이를 보였으며 3차 분사 후에 초기와 비슷한 TSS 값을 가지는 것을 알 수 있다.

< 분무형 노즐을 통한 도로 노면의 미세먼지 저감 >

본 연구에서는 분무형 노즐을 이용하여 물을 대기 중으로 분무한 뒤 미세먼지 측정기를 통해 미세먼지 농도를 분석하여 3차년도 배수성 포장 TEST BED 시험 시공 후 미세먼지 저감 효과에 대해 사전 분석을 하였다. 미세먼지 측정은 하루에 2번씩 10시, 16시에 측정을 하였고 분석 결과는 다음 표와 같다.

Table20. 미세먼지 측정 결과

미세먼지(PM10)($\mu g/m^3$)					
측정날짜 및 시간	대기오염정보 (서울시 노원구)	미세먼지농도 (보유 측정기)	LID 클린로드 시스템 물 분사후 미세먼지 농도	감소량	감소율(%)
2019년 9월 30일 10시	45	42	36	6	14.3
2019년 9월 30일 16시	38	37	32	5	13.5
2019년 10월 5일 10시	54	49	42	7	14.3
2019년 10월 5일 16시	33	28	25	3	10.7
2019년 10월 22일 10시	52	46	41	5	10.9
2019년 10월 22일 16시	30	24	21	3	12.5
2019년 10월 29일 10시	93	88	69	14	15.9
2019년 10월 29일 16시	79	71	61	10	14.1
2019년 11월 1일 10시	73	67	61	6	9.0
2019년 11월 1일 16시	57	55	49	6	10.9
2019년 11월 5일 10시	31	27	24	3	11.1
2019년 11월 5일 16시	40	36	31	5	13.9
2019년 11월 18일 10시	43	37	33	4	10.8
2019년 11월 18일 16시	145	134	115	19	14.2
평균					12.6

미세먼지 측정 결과, 환경공단에서 공시한 미세먼지 농도와 보유하고 있는 주관연구기관에서 보유하고 있는 미세먼지 측정기로 측정한 농도가 약간 차이가 있지만 대체로 비슷하였고, 분무형 노즐로 물 분무를 한 결과, 평균적으로 약 12.6%가 감소한 것을 알 수 있다.

Table21. 2차년도 성과점검기준표

구분		핵심성과물	단위성과물	당해단계 성과목표			해당기관	실적목표/달성치
주관	A	배수성포장의 LID클린로드 시스템 적용을 위한 공용성 검토	배수성포장의 협잡물유입에 따른 기능 분석	①	현장 투수 (초,1000mL), (현장 실험)	15/14.58	서울과학기술대학교	논문 : 1건/1건 보고서 :2건/2건
				②	실내투수계수 (cm/sec), (실내 실험)	0.01/0.021	서울과학기술대학교	
				③	TEST BED 설계 검토(작성 건수)	1/1	서울과학기술대학교	
공동	B	배수성포장 LID 클린로드 시스템 개발	성능검토	①	시제품제작 및 TEST BED설계 (TEST BED설계)	1/1	씨에스이 주식회사	특허 : 출원 1건/1건 도면 : 1건/1건 시제품 :1건/1건 TEST BED : 2건/2건 보고서 :1건/1건
				②	TEST BED 제작(TEST BED 제작 건수)	2/2	씨에스이 주식회사	
				③	모니터링 실시(모니터링 데이터)	1/1	씨에스이 주식회사	

2차년도에서는 TEST BED제작과 더불어 배수성포장 아스팔트 성능 평가를 위해 현장 투수실험과 실내 투수계수 실험을 진행하였고 실험 목표치를 모두 만족시켰다. 또한 TEST BED 관련하여 시제품 제작 및 모니터링 실시를 완료하였고 이에 대한 성과물로 주관 연구기관에서는 논문1건, 보고서2건 공동연구기관에서는 특허(출원)1건, 도면1건, 시제품1건, 보고서1건이 완료되었다.

특허와 본 과제와의 관련성 설명

1. 연구개발계획시에 제시된 연구개발 내용은 다음과 같다.

①배수성 포장을 통해 빗물을 집수하고 저장

②상기 시스템 운영시 건기와 우기를 구분하여 가동이 가능토록 연구

③위치특성에 맞게 빗물저류 시설을 설치

④유입부의 협잡물 등으로 인한 막힘 현상을 최소화 하는 구조 개발

2.연구개발 과제로 등록한 특허 10-2018059 도로 미세먼지 및 지면온도 저감기능을 갖는 스마트 플랜터 시스템의 내용에는 다음내용이 포함되어 있다.

①도로면 경계석에 대응하여 지중에 설치하되 도로의 노면을 따라 흐르는 빗물을 수용하는 집수피트

②외부에서 강우여부를 감지하는 강우감지수단

③식생플랜터에는 빗물의 내부 순환 과정에서 이물질을 여과할 수 있는 여과스크린을 구성

④차도 관수부에는 차도의 상면에 투수성포장면을 형성하여 차도에 분사된 빗물을 흐름 흡수하는 투수부를 포함하고, 투수부에서 흡수된 빗물을 상기 우수집수부의 집수피트에 모아 차집

3. 연구개발계획과 특허출원 내용을 비교해보면 배수성포장, 건기와 우기를 감지하여 선택적 살수, 투수

성포장을 통해 차집된 살수용수의 빗물탱크로 이송, 협잡물로 인한 노즐의 막힘을 최소화하기 위해 식생플랜트를 이용한 여과기능 등이 다같이 포함되어 있음을 알 수 있다.

또한 특허출원 과정에서 공기중에 부유하는 미세먼지를 에어 펌프를 이용하여 빗물탱크 내부로 송풍하여 포집할 수 있는 기능을 추가하였다.

이와 같이 연구개발초기에 연구계획에 따른 아이디어를 모아 특허를 출원하고, 연구계획과 특허출원 내용에 근거한 장비제작 및 실험등을 수행하였다.

3) 3차년도 연구진행

3차년도에는 2차년도에 만족하지 못했던 칸트브로 손실률을 포함한 모든 조건 만족을 위해 배수성포장 배합설계를 다시 실시한 후 품질시험을 재실시하였다.

Table22.품질시험 결과

항목	결과값		기준값	
드레인다운 시험값(%)	0.19		0.3 이하	
칸타브로 손실률(%)	20℃	16.75	20℃	20 이하
	-20℃	28.14	-20℃	30 이하
인장강도비(%)	87%		85% 이상	
동적안정도(회/mm)	4,214		3,000 이상	
실내투수계수(cm/sec)	0.016		0.01 이상	

- 함부르크 휠트래킹

아스팔트 혼합물에 대한 수분민감도를 평가하기 위해 가장 일반적인 시험방법은 AASHTO T-283에 규정된 수정 로트만 시험(Modified Lottman Test)에 의한 간접 인장강도 비(Tensile Strength Ratio, TSR) 시험이 다. 하지만 최근 간접 인장강도비 시험결과가 현장 공용성과 상관관계가 없다는 조사결과가 보고되고 있으며, 이에 따라 미국의 많은 주 교통국에서는 간접인장강도 비를 대체할 시험방법을 모색하고 있다. 최근에는 소성변형과 수분민감도를 동시에 측정할 수 있는 함부르크 휠 트래킹 시험(Hamburg Wheel Tracking Test)이 대안으로 제안되고 있다. 함부르크 휠 트래킹 시험은 AASHTO T 324에 규정되어 있으며, 50℃의 고온에 다짐된 공시체를 물에 침수시켜 705±4.5N의 차륜하중을 반복재하 하여 재하 횟수에 따는 침하량을 측정하는 시험법이 다. 일반적으로 미국의 주 교통국에서는 20,000회의 차륜하중을 재하하며, 박리가 발생하는 지점이 최소 10,000회 이후 발생하고 20,000회에서의 침하량이 20mm를 초과하지 않는 아스팔트 혼합물을 사용하도록 규정하고 있다. 수분민감도의 경우, Fig.50과 같이 함부르크 휠 트래킹 시험 시 침하량 기울기가 급변하는 지점 을 박리발생점(Stripping Point-SIP)로 규정하며 박리가 발생하는 지점이 늦게 발생할수록 수분민감도가 우수한 아스팔트 혼합물로 평가한다.

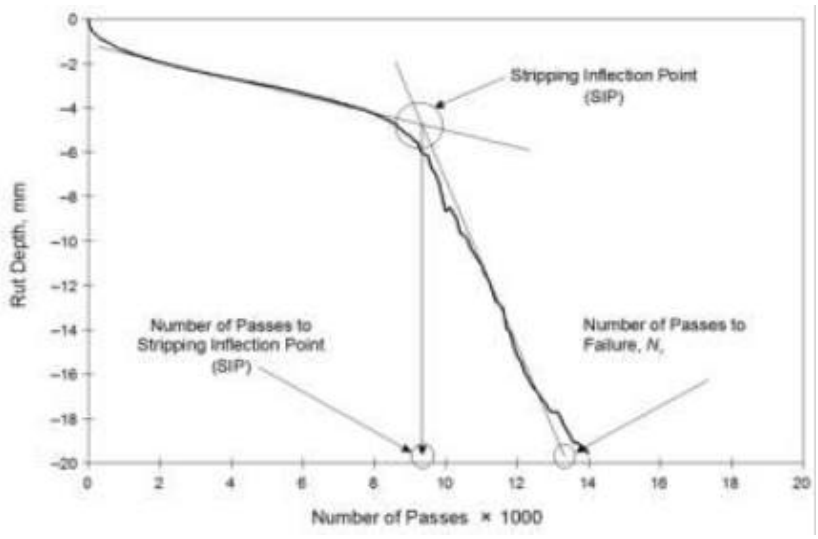


Fig.50 함부르크 휠트래킹 시험 결과 그래프(예시)

아래 Fig.51은 함부르크 휠트랙킹 시험 전경이다.

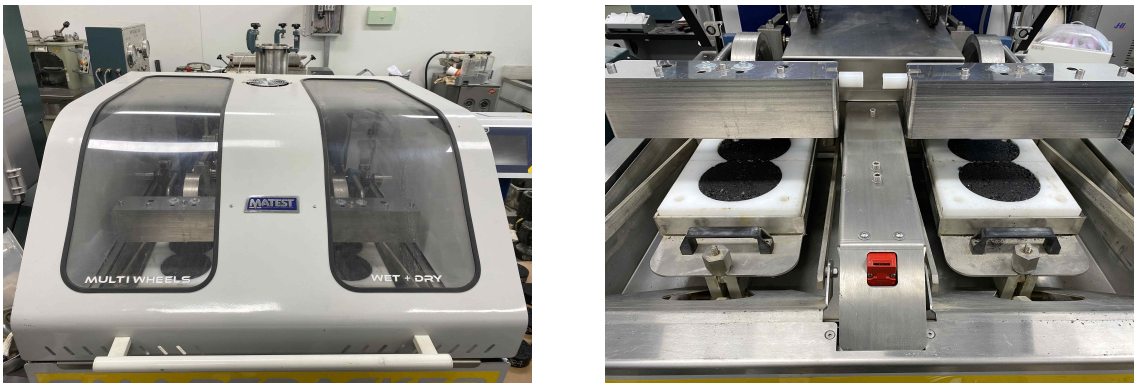


Fig.51 함부르크 휠트랙킹 시험 전경

본 연구에서는 함부르크 휠트랙킹 시험을 통한 배수성 아스팔트 혼합물의 수분민감도 및 소성변형 저항성을 평가하기 위해 배합설계의 원자재별 혼합비율을 적용하여 직경 150㎜, 높이 60㎜, 공극률 16.2% 선회다짐 공시체를 제작하였다. 일반 가열 아스팔트에 대한 함부르크 휠트랙킹 시험은 AASHTO T-283에 규정된 재료 물성 및 시험 방법을 따르나, 배수성 아스팔트 혼합물에 대한 별도의 규정이 명시되어있지 않다. 또한 목표 공극률 20.0±0.3% 배합설계에 따라 선회다짐을 실시하면 다짐 횟수가 현저히 감소해 충분한 강도를 확보하지 못하게 된다. 따라서 본 연구에서는 결정된 골재 합성입도를 바탕으로 목표 공극률 16±0.3%에 대한 배합설계를 진행하였다. 이후 종단면 방향 절단을 통해 최종 시편 제작을 완성한다.

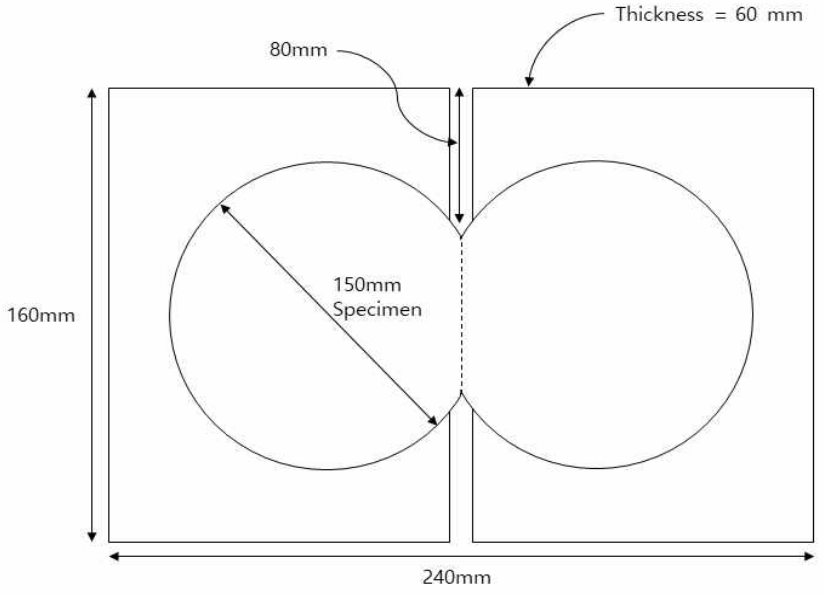


Fig.52 함부르크 휠트랙킹 시험용 공시체 몰드 장착 모식도

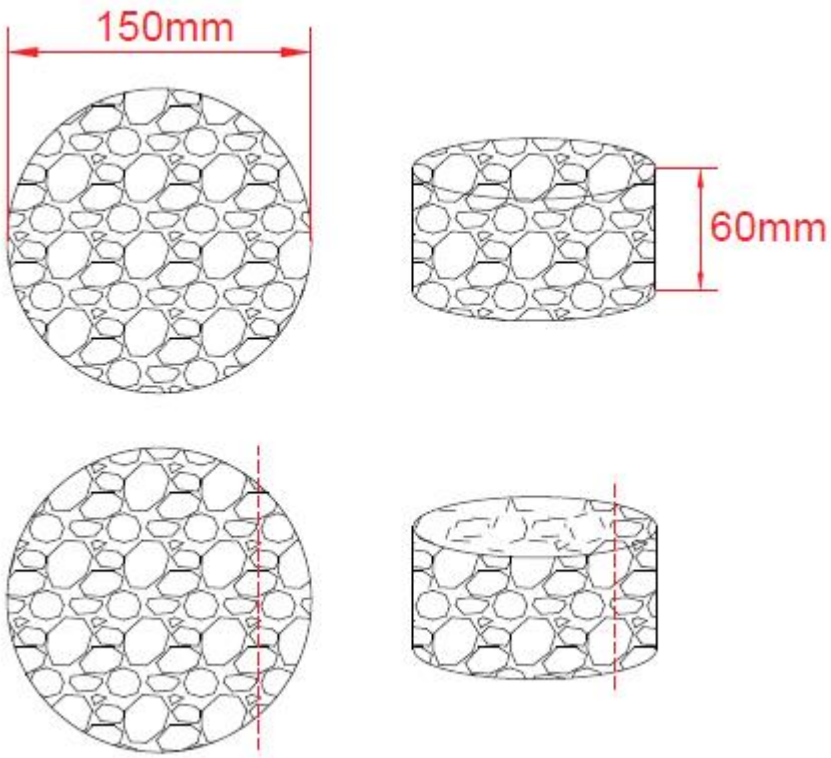


Fig.53 함부르크 휠트랙킹 시험용 공시체 절단 모식도

Table 23. 배수성 아스팔트 혼합물 함부르크 휠트랙킹 시험 결과 및 전경

분류	배수성 아스팔트 혼합물
Passes	27,804
SIP	25,584
사진	

Table 24. 배수성 아스팔트 혼합물 함부르크 휠트랙킹 시험 결과

배수성 아스팔트 함부르크 휠트랙킹 시험 결과	
Number of passes	27,804
SIP passes	25,584
10,000 Passes Rut depth	10.39 mm
20,000 Passes Rut depth	17.52 mm
Max Rut depth	25.10 mm
Test Temp Avg	49.89 ℃

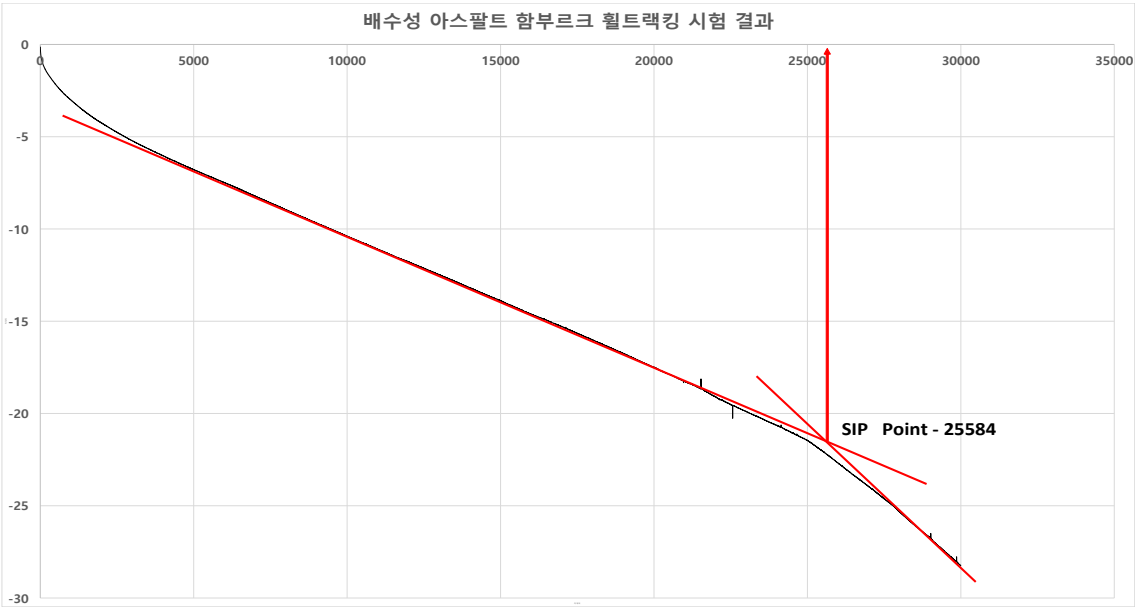


Fig.54 배수성 아스팔트 혼합물 함부르크 휠트랙킹 시험 결과

함부르크 휠트랙킹 시험은 Table 23.의 초기조건으로 실시하였으며 시험결과는 Table 24.와 같다. 시험 결과, 10,000회에서의 침하량 10.39mm, 20,000회에 17.52mm로 나타났으며 SIP(Stripping Inflection Point) 발생지점은 25,584회로 나타났다. 또한, 최종 변형량은 25.1mm로 27,804회 지점에서 발생했다.

Table 25. Start data test

Start Data	
Specimen Thickness	60 (mm)
Number of passes	30,000
Max Rut depth	25.00 (mm)
Pre-Conditioning	30 (min)
Wheel Speed	52 (p/min)
Test Temp	50 ± 1 (℃)

-동탄성계수

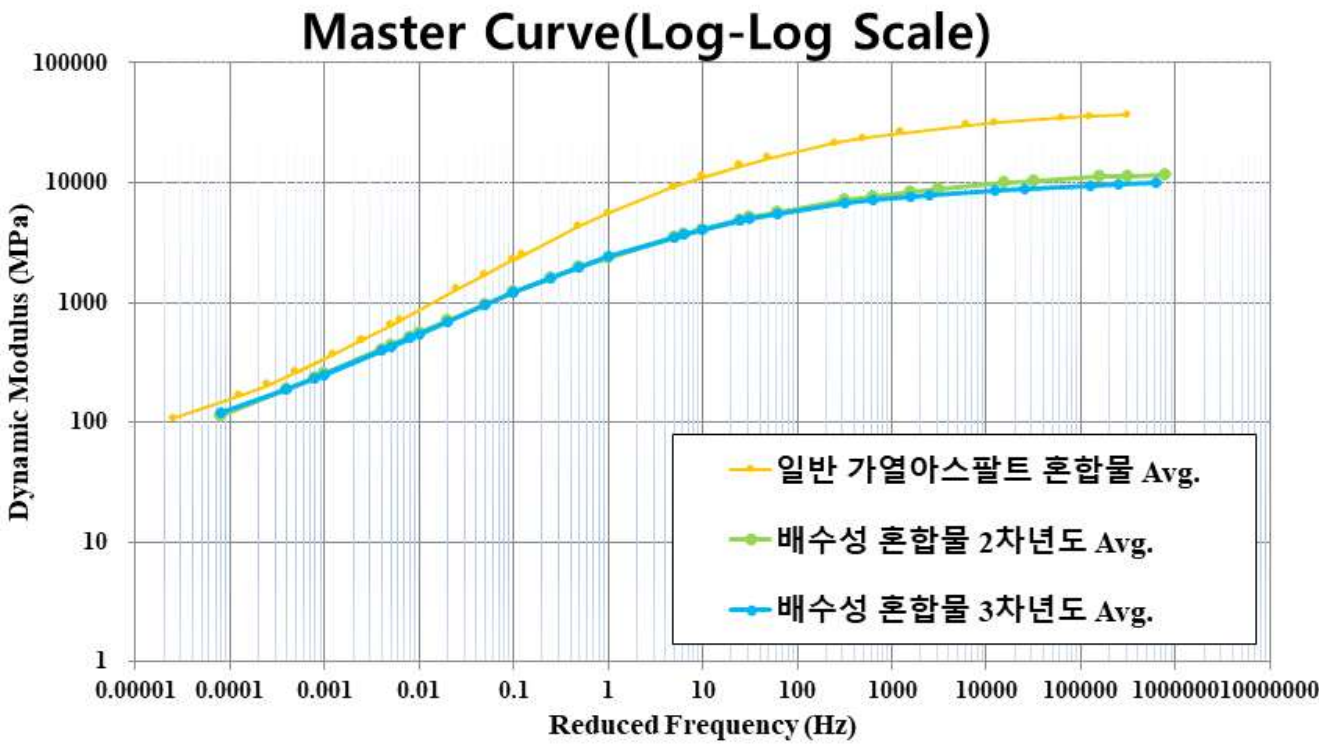


Fig.55 마스터커브 종합

3차년도에 새로 진행된 칸타브로 손실률을 포함한 모든 조건을 만족한 품질시험을 바탕으로 배합설계 후 동탄성계수 시험을 재실시하였다. 시험 결과 2차년도에 비해 미세하지만 좀더 우수한 피로균열 저항성을 보였고 소성변형에 대한 저항성은 거의 비슷하게 나왔다.

○ 배수성포장 시험시공

- 본 연구 진행을 위해서 미세먼지 측정을 하기 위한 TEST BED를 위해 교내 포장공사를 실시하였다. 시공 장소는 서울과학기술대학교 테크노큐브 근처의 도로로 선정하였다. 기존에 있던 일반 포장 아스팔트 표층을 제거하고 배수성 포장도로를 시공하였다. 배수성포장을 통해 스며든 우수는 아래의 불투수층을 통해 집수된다. 좀 더 효율적인 집수를 위해 시공시 도로 옆 L형 측구에 유공관을 설치하였다. 집수된 우수는 유공관을 통해 펌프를 설치한 곳으로 이동된다. 이동된 물은 펌프를 통해 흡수되고 물탱크에 저장된다. 물탱크에 저장된 물은 분사장치에 의해 도로변에 살수된다.

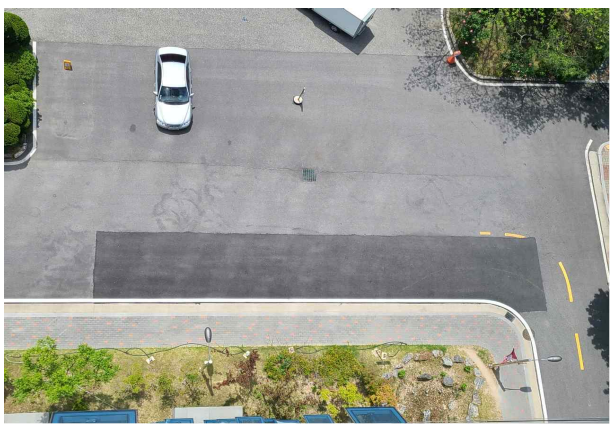


Fig.56 배수성 포장 시공 구간

○ 클린로드시스템

배수성 포장 시공을 완료한 후 클린로드시스템을 설치하였다. 본 연구의 목표에 맞게 용수확보를 위해 우

수를 순환시키기 위해 아래 그림과 같이 2종류의 펌프를 사용하였다. 강수 발생 시 배수성 포장층을 통해 우수는 불투수층으로 스며든다. 이렇게 스며든 우수는 유공관을 통해 집수되고 회수용 펌프를 통해 물탱크로 이동된다. 이렇게 물탱크에 저장된 물은 분사용 펌프를 통해 이동되고 물 분사 장치를 통해 도로변에 살수한다. 펌프의 작동은 아래 그림과 같은 컨트롤러로 조정할 수 있다. 때에 따라 수동으로 물 분사를 할 수 있고 시간을 설정하여 자동적으로 물을 분사시킬 수 있도록 설정하여 이용할 수 있다. 또한 물탱크에 물이 없을 경우 모터의 오작동을 방지하기 위해 물탱크 안에 수위감지기를 부착하여 어느 정도의 수위가 되었을 때만 모터가 작동하여 물을 분사할 수 있게 설정해놓았다.

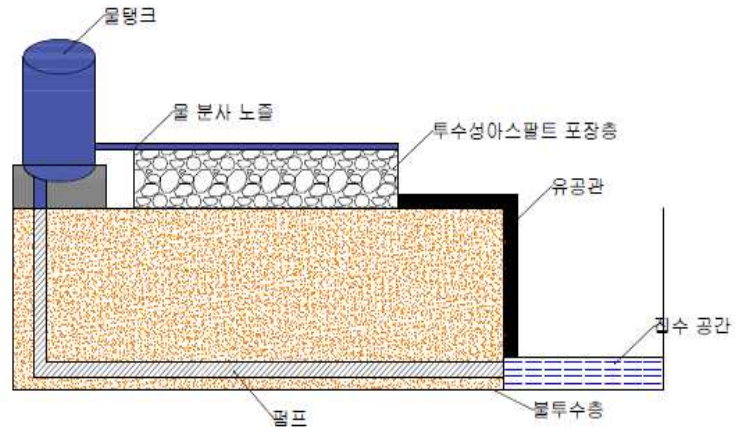


Fig.57 우수순환시스템 개략도

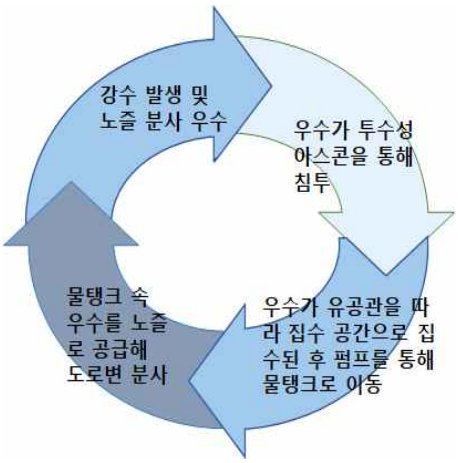


Fig.58 우수순환시스템 흐름도



Fig.59 분사용 펌프



Fig.60 회수용 펌프



Fig.61 물 분사 장치



Fig.62 클린로드 시스템 컨트롤러

- 이동형 살수 트레일러 제작

도로의 미세먼지를 저감하기 위해서는 도로 또는 인도상에 물탱크, 펌프, 살수라인을 설치해야 하는데 설치공간의 부족, 보행자의 통행 방해 및 안전 문제등이 발생하게 된다. 이를 해결하기 위해 이동하면서 살수를 할 수 있는 트레일러를 제작하였다. 펌프는 충전식 배터리를 장착하여 필요할 때마다 원하는 위치에서 살수를 하게 되어 설치 위치문제를 해결하였다.



Fig.63 이동형 살수 트레일러

- 살수라인 동결방지 장치 제작실험

동절기에 미세먼지를 저감하기 위해서 살수를 하게 되면 물탱크, 펌프, 살수라인, 노즐 등의 동결문제가 발생하게 된다. 이를 해결하기 위해 물탱크에는 전용 히팅코일을 넣고 온도 컨트롤러를 이용하여 동결방지 실험을 하였으며, 살수라인 및 노즐에는 열선을 감고 테스트를 하고 또한 브로와와 히터를 결합하여 열풍을 만들어 살수라인, 노즐 등에 남아있는 물을 배출할 수 있도록 하였다.

- 살수 및 열풍공급을 위한 자동컨트롤러 제작

도로의 미세먼지 저감을 위해 살수를 하게 되면 살수라인 등에 동결문제가 생기는데 살수 후 열풍 송풍이 자동으로 수행될 수 있도록 컨트롤러를 제작 실험하였다.

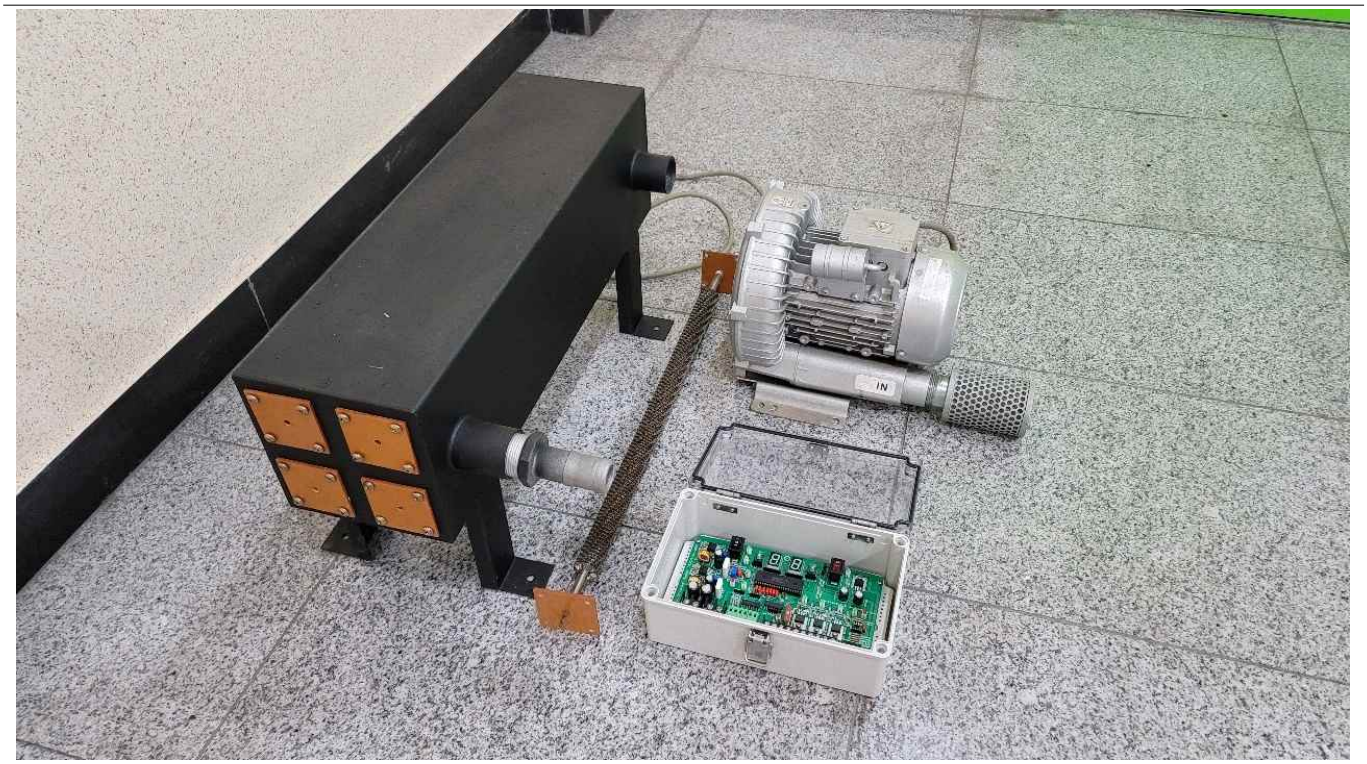


Fig.64 열풍기



Fig.65 자동컨트롤러

○열풍기 실험과정

히터케이스에는 1kw열선이 4개가 들어갈 수 있게 제작하여 우선 열선 하나를 설치하여 링브로워는 D사의 0.4kw, 1.4m^3/mm를 사용하였다.

외기 온도는 10~15℃였는데 열풍기를 가동하자 유출공기온도가 41℃까지 상승하였다. 이를 보면 열선의 크기와 개수를 증가시키고 링브로워 용량을 키우면 살수라인의 열풍송풍이 가능할 것으로 보이고 조금 더 체계적인 현장실험이 필요해 보인다.

○ 현장시험

본 연구에서는 배수성 포장도로의 투수성능을 평가하기 위해 소형 현장 투수시험기를 사용하여 현장 투수 시험을 진행하였다. 시험 전에 포장층을 포화시키기 위해 약 5분동안 포장층 표면에 살수시킨 후 시험을 진행하였다. 살수 후 포장층에 그림과 같은 투수시험기를 설치하는데 이때 유성점토를 부착해 누수를 방지

한다. 시험기를 설치한 후 일정량의 물이 포장층을 통해 빠져 나가는 시간을 측정하여 배수성 포장에 대한 투수성능을 평가한다. 본 연구에서는 400ml의 물이 모두 통과하는 시간을 측정하였다. 또한 일반 포장층과 투수성능을 비교하기 위해 노후화된 일반 포장층에서도 시험을 진행하였다. 시험 결과 배수성포장층과 일반 포장층은 투수 성능에 있어 큰 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다.

시험은 배수성 포장층을 총 3군데를 나누어 각각 3회씩 측정을 하였다. 다짐의 차이로 인해 측정구역마다 약간의 차이가 있었으나 측정 결과 평균적으로 1000ml 기준 14.58초의 투수성능을 보였고 기준치인 15초/1000ml를 만족하였다.

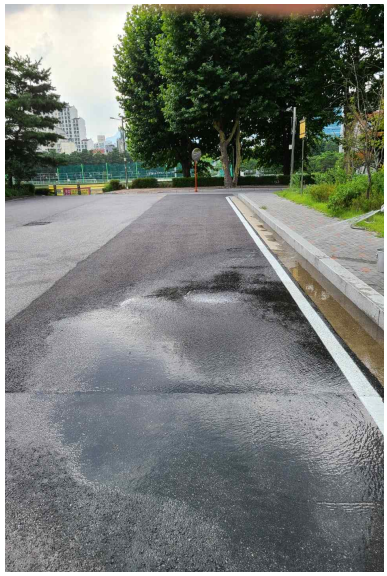


Fig.66 포장층 살수



Fig.67 현장 투수 시험기(배수성 포장)



Fig.68 현장 투수 시험기(일반 포장)

	Test1	Test2	Test3	평균	1000ml환산
배수성포장1	5.11	5.39	5.89	5.463333	13.6583333
배수성포장2	7.23	6.22	6.56	6.67	16.675
배수성포장3	5.02	5.15	5.92	5.363333	13.4083333
일반포장	482	479	472	477.6667	1194.16667

Table 26. 현장 투수시험 결과(sec)

○ 미세먼지 측정

– 클린로드 시스템 실시 전·후에 대한 미세먼지 측정을 통해 저감량 분석을 진행하였다. 미세먼지 측정의 경우 클린로드 시스템 가동 전 과 운용 중, 운용 후 미세먼지 PM2.5(초미세먼지)와 PM10(미세먼지) 측정량을 비교하여 적용 효율을 평가하였다.



Fig.69 Particle Counter

측정시 위 그림과 같은 측정 장치(Particle Counter)를 사용하였다. 주기적으로 TEST BED구간의 미세먼지를 측정한 후 가까운 측정소의 데이터와 비교를 하여 클린로드시스템의 성능을 평가하였다.
미세먼지 측정은 물 분사 전, 물 분사 후로 나누어 측정한 후 그 데이터를 비교하는 식으로 진행하였고 미세먼지가 다소 많이 발생하는 3월부터 4달간 측정을 진행하였고 측정 시간은 오후 1시로 선정하였다.

	측정소데이터(㎍/m^3)	물분사전(㎍/m^3)	물분사후(㎍/m^3)	초미세먼지 저감율(%)
2021-03-03	23	22	23	-4.545
2021-03-04	27	27	24	11.111
2021-03-09	34	36	33	8.333
2021-03-10	49	58	52	10.345
2021-03-11	114	129	108	16.279
2021-03-12	79	82	69	15.854
2021-03-14	70	81	69	14.815
2021-03-15	76	80	70	12.500
2021-03-19	17	12	10	16.667
2021-03-21	31	30	26	13.333
2021-03-24	22	21	19	9.524
2021-03-29	18	23	19	17.391
2021-04-03	18	20	21	-5.000
2021-04-04	6	13	11	15.385
2021-04-06	25	34	30	11.765
2021-04-07	42	45	38	15.556
2021-04-09	12	11	13	-18.182
2021-04-13	15	11	8	27.273
2021-04-15	30	37	36	2.703
2021-04-16	11	22	18	18.182
2021-04-20	49	53	45	15.094

2021-04-21	40	44	39	11.364
2021-04-22	42	41	38	7.317
2021-04-28	33	33	31	6.061
2021-04-29	20	22	19	13.636
2021-05-04	19	16	11	31.250
2021-05-07	48	51	49	3.922
2021-05-08	50	69	58	15.942
2021-05-13	17	18	15	16.667
2021-05-14	38	32	30	6.250
2021-05-15	23	20	18	10.000
2021-05-18	16	20	19	5.000
2021-05-19	23	22	20	9.091
2021-05-22	16	19	18	5.263
2021-05-24	24	33	28	15.152
2021-05-25	24	20	20	0.000
2021-05-31	20	24	21	12.500
2021-06-02	28	26	24	7.692
2021-06-05	35	36	32	11.111
2021-06-06	34	30	25	16.667
2021-06-10	32	39	31	20.513
2021-06-12	14	10	10	0.000
2021-06-17	8	9	10	-11.111
2021-06-19	22	30	29	3.333
2021-06-20	30	31	30	3.226
2021-06-21	24	24	21	12.500
2021-06-25	29	28	22	21.429
2021-06-26	13	19	17	10.526
2021-06-28	21	17	16	5.882
2021-06-29	20	25	21	16.000

Table27. 초미세먼지 측정 데이터

	측정소데이터(㎍/m^3)	물 분사 전(㎍/m^3)	물분사후(㎍/m^3)	미세먼지 저감율(%)
2021-03-03	50	49	42	14.286
2021-03-04	55	56	51	8.929
2021-03-09	59	63	51	19.048
2021-03-10	90	107	93	13.084
2021-03-11	157	152	131	13.816
2021-03-12	118	121	105	13.223
2021-03-14	98	99	79	20.202
2021-03-15	118	127	116	8.661
2021-03-19	67	67	60	10.448
2021-03-21	54	59	54	8.475
2021-03-24	69	68	61	10.294
2021-03-29	180	202	165	18.317

2021-04-03	33	30	28	6.667
2021-04-04	16	10	11	-10.000
2021-04-06	56	61	58	4.918
2021-04-07	81	78	69	11.538
2021-04-09	27	22	19	13.636
2021-04-13	29	31	27	12.903
2021-04-15	60	52	45	13.462
2021-04-16	22	15	13	13.333
2021-04-20	95	92	79	14.130
2021-04-21	89	99	86	13.131
2021-04-22	85	89	78	12.360
2021-04-28	87	82	71	13.415
2021-04-29	92	92	85	7.609
2021-05-04	34	33	30	9.091
2021-05-07	476	492	397	19.309
2021-05-08	362	377	301	20.159
2021-05-13	38	35	31	11.429
2021-05-14	43	49	45	8.163
2021-05-15	39	33	27	18.182
2021-05-18	38	44	41	6.818
2021-05-19	40	41	38	7.317
2021-05-22	28	20	14	30.000
2021-05-24	122	106	99	6.604
2021-05-25	89	87	81	6.897
2021-05-31	44	50	43	14.000
2021-06-02	54	55	47	14.545
2021-06-05	62	66	62	6.061
2021-06-06	61	70	61	12.857
2021-06-10	60	55	47	14.545
2021-06-12	25	23	19	17.391
2021-06-17	19	11	8	27.273
2021-06-19	42	46	40	13.043
2021-06-20	62	62	58	6.452
2021-06-21	34	33	30	9.091
2021-06-25	40	33	30	9.091
2021-06-26	22	25	21	16.000
2021-06-28	30	27	26	3.704
2021-06-29	30	19	17	10.526

Table28. 미세먼지 측정 데이터

미세먼지와 초미세먼지를 측정한 데이터는 위와 같다. 아무래도 측정소와 비교적 거리가 있는 구역이다 보니 측정소 데이터와 비슷한 날도 있었지만 측정소와 차이가 많이 나는 날도 종종 발생했다. 미세먼지는 대기 상태에 따라 그 양이 매일 다르다. 미세먼지 상태가 좋음 또는 매우좋음인 날에는 미세먼지 양이 적어서 저감시켜도 확연히 줄지 않고 제대로된 측정이 되지 않았다. 특히 초미세먼지의 경우 그 양이 상대적으로 적어 농도가 낮은 날에는 측정이 정확하게 되지 않았다. 하지만 미세먼지가 나쁨 또는 매우나쁨인 날에는 물 분사 후 확실히 그 양이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 4달간의 데이터를 종합해본 결과 평균적

으로 미세먼지는 12.08%, 초미세먼지는 10.23%의 감소율을 보였다.

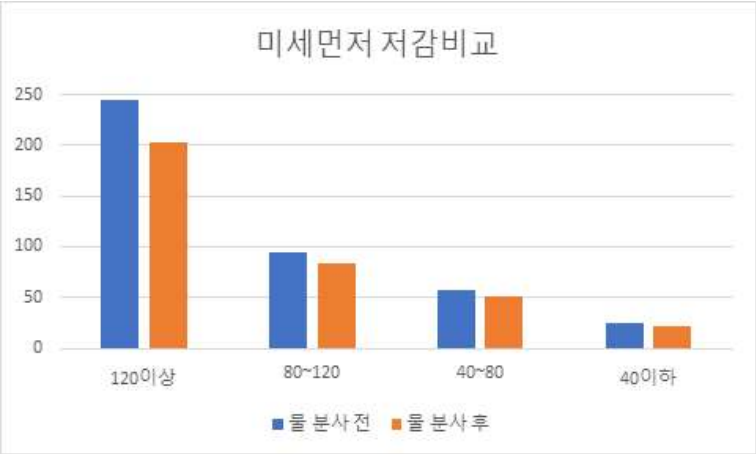


Fig.70 미세먼지 저감 그래프

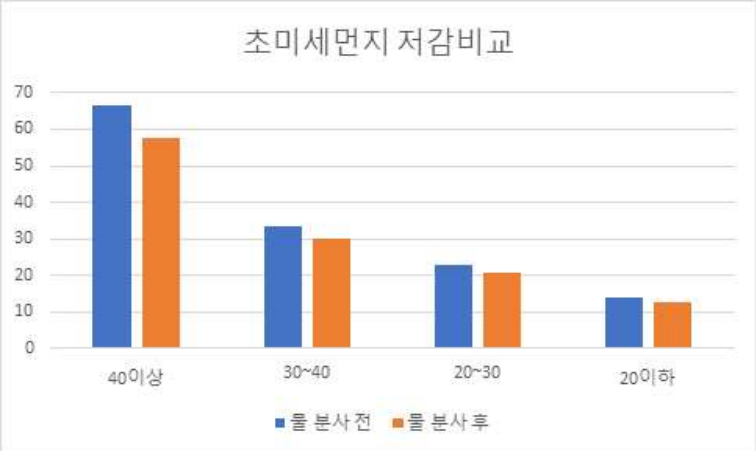


Fig.71 초미세먼지 저감 그래프

위 그래프는 미세먼지와 초미세먼지 농도에 따른 저감율을 비교한 그래프이다. 미세먼의 경우 40μg/m^3씩 분류하여 비교를 하였고 초미세먼지의 경우10μg/m^3씩 분류하여 평균을 낸 후 그 데이터를 비교를 해보았다. 데이터 경향을 보면 미세먼지의 양이 적을 때는 큰 효과를 보지 못했지만 대체로 미세먼지의 양이 많을 때 큰 감소율을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 재비산먼지 저감 측정을 위해 TSS(Total Suspended Solids)시험을 진행하였다. TSS시험은 여과지로 걸러지지 않는 부유물질을 건조로 105℃에서 2시간 건조시킨 후 무게를 측정하여 ppm이나 mg/L로 나타내어 여과지에 잔류한 부유성고유물의 양을 수치와 한 것이다.

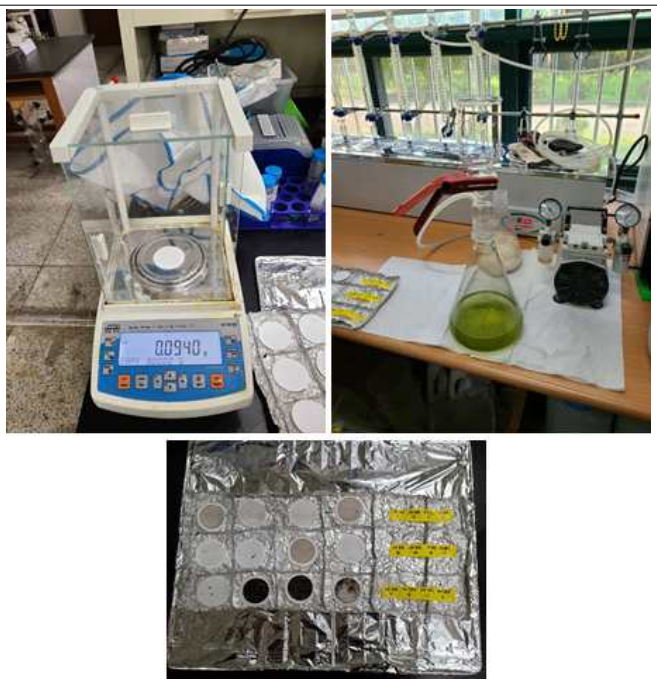


Fig.72 TSS실험



Fig.73 악조건 묘사

TSS값은 아래 식으로 구할 수 있다.

$$TSS(mg/L) = (W_1 - W_0) \times \frac{1000}{V}$$

여기서, W_0는 시료 여과 전의 유리섬유 여과지 무게(mg)이고, W_1은 건조 후 잔유물과 유리섬유 여과지 무게의 합(mg)이고, V는 시료의 양(mL)이다.

본 연구에서는 TEST BED의 3개의 구역을 정해 물 분사를 3번에 걸쳐 1차,2차,3차로 나누어 시료를 수집하였다. 또한 일반 도로 뿐만 아니라 공사현장 등과 같은 악조건을 묘사하기 위해 노면에 일정량의 모래를 뿌린 후 똑같은 방법으로 시료를 수집하였다.

구분	여과 전 무게(g)	여과 후 무게(g)	여과 전 무게(mg)	여과 후 무게(mg)	TSS(mg/L)
일반-구역1-1차	0.0948	0.0984	94.8	98.4	63.16
일반-구역1-2차	0.095	0.0966	95	96.6	28.07
일반-구역1-3차	0.0945	0.0954	94.5	95.4	15.79
일반-구역2-1차	0.0944	0.0972	94.4	97.2	49.12
일반-구역2-2차	0.094	0.0951	94	95.1	19.30
일반-구역2-3차	0.0952	0.0973	95.2	97.3	36.84

일반-구역3-1차	0.0949	0.0978	94.9	97.8	50.88
일반-구역3-2차	0.0939	0.0946	93.9	94.6	12.28
일반-구역3-3차	0.0944	0.0948	94.4	94.8	7.02

Table 29. TSS실험 일반조건

구분	여과 전 무게(g)	여과 후 무게(g)	여과 전 무게(mg)	여과 후 무게(mg)	TSS(mg/L)
악조건-구역1-1차	0.0941	0.8094	94.1	809.4	12549.12
악조건-구역1-2차	0.096	0.7594	96	759.4	11638.60
악조건-구역1-3차	0.094	0.1804	94	180.4	1515.79
악조건-구역2-1차	0.0944	0.8155	94.4	815.5	12650.88
악조건-구역2-2차	0.0947	0.7258	94.7	725.8	11071.93
악조건-구역2-3차	0.0948	0.2056	94.8	205.6	1943.86
악조건-구역3-1차	0.094	0.7748	94	774.8	11943.86
악조건-구역3-2차	0.0951	0.5571	95.1	557.1	8105.26
악조건-구역3-3차	0.0942	0.1566	94.2	156.6	1094.74

Table 30. TSS실험 악조건

실험 결과 일반 조건의 경우 1차, 2차, 3차 물 분사 시 TSS값이 갈수록 줄어드는 경향을 보였다. 악조건의 경우도 마찬가지로 점점 줄어드는 경향을 보이는데 1차에서 2차보다 2차에서 3차의 차이가 확연하게 나는 것을 확인할 수 있었다. TSS실험을 통해 클린로드시스템의 재비산먼지 감소 효과를 확인할 수 있었다.

Table 31. 3차년도 성과점검기준표

구분		핵심성과물	단위성과물	당해단계 성과목표			해당기관	실적목표/달성치
주관	A	배수성포장 LID클린로드 시스템 현장 적용성 평가	적용성 검토	①	미세먼지 저감성능	10%/12.08%	서울과학기술대학교	논문 : 1건/1건
공동	B	가이드라인 개발	성능기준 확보	①	가이드라인(안)	1/1	씨에스이 주식회사	보고서 :2건/2건
				②	매뉴얼 작성	2/2	씨에스이 주식회사	

3차년도에서는 시공 완료된 TEST BED에서 미세먼지 저감 실험을 진행하였다. 실험 결과 목표치인 10%를 만족하였다. 또한 클린로드시스템 작동을 위한 가이드라인(안)과 매뉴얼 작성을 완료하였다. 3차년도 성과물은 주관연구기관에서는 논문1건, 공동연구기관에서는 보고서 2건을 작성 완료하였다.

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

본 연구는 1차년도에 TEST BED를 설계도안을 그려 2차년도에 시공할 TEST BED설계 계획을 완료하였다. 2차년도에는 1차년도에 선정한 시공 구간에 TEST BED를 시공완료 하였고 실험을 통해 데이터 측정을 진행하고 모니터링 실시를 완료하였다. 3차년도에는 2차년도에 실시하지 못했던 배수성 포장을 적용하여 TEST BED를 시공완료하였고 클린로드시스템 사용을 위한 가이드라인 및 매뉴얼 작성을 완료하였다. 또한 차년도별로 논문을 1건씩 작성 완료하여 기준 목표 성과를 달성 완료하였다.

○ 논문 3건 작성 완료
○ TEST BED 설계 및 제작
 - 교내 배수성포장 시공과 더불어 클린로드 시스템을 설치 완료
○ 설계도면 및 사양서 작성 완료
○ 시제품 제작 및 모니터링 실시 완료
○ 가이드라인 및 매뉴얼 작성 완료

(2) 정량적 연구개발성과

본 연구는 TEST BED 제작 후 클린로드시스템의 성능을 평가하기 위해 TEST를 진행하였다. 투수성능 평가를 위해 2차년도 및 3차년도에 실내투수계수 시험을 진행하였고 시험 결과 0.021cm/sec로 기준값인 0.01cm/sec를 만족하였다. 3차년도에는 배수성포장을 적용시킨 TEST BED에서 현장투수시험을 진행하였고 시험 결과 14.58초로 목표치를 만족시켰다. TEST BED의 미세먼지 저감성능 평가 결과 12.06%로 기준값인 10%를 만족하였다.

○ 현장 투수시험
 - 현장 투수시험 결과 목표치인 1000ml기준 15초 이내인 14.58초로 기준 만족
○ 실내투수계수
 - 실내 투수시험 결과 0.021cm/sec로 기준값인 0.01cm/sec 만족
○ 미세먼지 저감성능
 - 미세먼지 농도 측정 결과 저감율 12.08%로 기준값인 10% 만족

(3) 세부 정량적 연구개발성과

[과학적 성과]

□ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	우수 순환시스템을 이용한 도로변 미세먼지 저감 기술 개발 및 적용성 평가 연구	한국도로학회논문집	이시원	3	대한민국	한국도로학회	비SCIE	2020.6	1738-7159	
2	드론을 활용한 아스팔트 도로포장상태 조사 기술에 관한 연구	한국도로학회논문집	김담륭	1	대한민국	한국도로학회	비SCIE	2020.2	1738-7159	
3	Kalman Filter 알고리즘을 활용한 제설제의 융빙 성능 평가에 관한 연구	한국도로학회논문집	공유석	1	대한민국	한국도로학회	비SCIE	2020.2	1738-7159	

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표 내용	발표자	발표 일시	장소	국명
1	한국도로학회 2019년 정기학술대회	우수순환장치를 이용한 도로변 미세먼지 저감 연구	정수호	2019.9	부산 벡스코 컨벤션홀	대한민국
2	한국도로학회 2019년 봄학술대회	배수성포장 및 우수 순환시스템을 적용한 도로변 미세먼지 저감 연구	가현길	2019.3	한국과학기술회관	대한민국

□ 기술 요약 정보

번호	연도	기술명	요약 내용	기술 완성도	등록 번호	활용 여부	미활용사유	연구개발기관 외 활용 여부	허용방식

□ 보고서 원문

번호	연도	보고서 명	발간일	등록 번호

□ 생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물

번호	생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물 명	등록/기탁 번호	등록/기탁 기관	발생 연도

[기술적 성과]

□ 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신품종, 프로그램)

번호	구분	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록			기여율	활용 여부
				출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호		
1	특허	도로 미세먼지 및 지면온도 저감 기능을 갖는 스마트 플랜터 시스템	한국	씨에스이(주)	2018.12.27.	1020190170651	씨에스이	2019.8.29	10-2018059호	1/1	

ㅇ 지식재산권 활용 유형

번호	제품화	방어	전용실시	통상실시	무상실시	매매/양도	상호실시	담보대출	투자	활용 예정	기타

□ 저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록번호	저작권자명	기여율

□ 신기술 지정

번호	명칭	고시일	보호기간	지정번호

□ 기술 및 제품 인증

번호	인증 분야	인증기관	인증 내용		인증 획득일	국가명
			인증명	인증번호		

□ 표준화

ㅇ 국내표준

번호	인증구분	인증여부	표준명	표준인증기구명	제안주체	표준종류	제안/인증일자

ㅇ 국제표준

번호	표준화단계 구분	표준명	표준기구명	표준분과명	의장단 활동여부	표준특허 추진여부	표준개발 방식	제안자	표준화 번호	제안일자

[경제적 성과]

□ 시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작업체명	설치장소	이용분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)
1	태양광 풍력 발전장치 제작	2020	제이더블유텍	인천미추홀구	자동살수			
2	살수라인동파방지열풍기 제작	2020	제이더블유텍	실험실	동파방지			
3	이동형 살수트레일러 제작	2020	제이더블유텍	실험실	이동형살수			
4	원격 분사장치	2020	삼일전기공업	실험실	자동살수			

□ 현장적용

번호	적용기술명	적용일	발주기관명	적용 연구개발기관명	적용현장명(장소)
1	살수장치제작 및 설치	2019.7.25	에스비비(주)	씨에스이(주)	경기부천시오정로

□ 기술 실시(이전)

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료	
					발생 연도	발생액(천원)

□ 사업화 투자실적

번호	연도	투자 자금 성격*	추가 연구개발 투자(천원)	설비 투자(천원)	기타 투자(천원)	합계(천원)

□ 사업화 현황

번호	사업화 방식	사업화 형태	지역	사업화명	내용	업체명	매출액		매출 발생 연도	기술 수명
							국내 (천원)	국외 (달러)		

□ 매출 실적(누적)

번호	사업화명	발생 연도	매출액		합계	산정 방법
			국내(천원)	국외(달러)		
1	살수장치제작 설치	2019	84,370		84,370	
합계						

□ 사업화 계획 및 무역 수지 개선 효과

성과					
사업화 계획	사업화 소요기간(년)				
	소요예산(천원)				
	예상 매출규모(천원)		현재까지	3년 후	5년 후
	시장 점유율	단위(%)	현재까지	3년 후	5년 후
		국내			
		국외			
	향후 관련기술, 제품을 응용한 타 모델, 제품 개발계획				
무역 수지 개선 효과(천원)	수입대체(내수)		현재	3년 후	5년 후
	수 출				

□ 고용 창출

번호	사업화명	사업화 업체명	고용창출 인원(명)		합계(명)
			yyyy년	yyyy년	
합계					

□ 고용 효과

구분			고용 효과(명)
고용 효과	개발 전	연구인력	
		생산인력	
	개발 후	연구인력	
		생산인력	

□ 비용 절감(누적)

번호	사업화명	발생 연도	산정방법	비용 절감액(천원)
합계				

□ 경제적 파급 효과

(단위 : 천원/년)

구분	사업화명	수입 대체	수출 증대	매출 증대	생산성 향상	고용 창출 (인력 양성 수, 명)	기타
해당 연도							
기대 목표							

□ 산업 지원(기술지도)

번호	내용	기간	참석 대상	장소	인원(명)

□ 기술 무역

(단위 : 천원)

번호	계약 연월	계약 기술명	계약 업체명	계약업체 국가	총 계약액	기 징수액	해당 연도	징수액	향후 예정액	수출/ 수입

[사회적 성과]

□ 법령 반영

번호	구분 (법률/시행령)	활용 구분 (제정/개정)	명 칭	해당 조항	시행일	관리 부처	제정/개정 내용

□ 정책활용 내용

번호	구분 (제안/채택)	정책명	관련 기관 (담당 부서)	활용 연도	채택 내용

□ 설계 기준/설명서(시방서)/지침/안내서에 반영

번호	구 분 (설계 기준/설명서/지침/안내서)	활용 구분 (신규/개선)	설계 기준/설명서/ 지침/안내서 명칭	반영일	반영 내용

□ 신진연구자 채용

번호	채용 연구개발기관명	채용일	근로기간	채용인원(명)	채용인원 중 청년인력(명)

□ 전문 연구 인력 양성

번호	분류	연도	현황(명)										
			학위별				성별		지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타

□ 산업 기술 인력 양성

번호	연도	프로그램명	프로그램 내용	교육 기관	교육 개최 횟수	총 교육 시간	총 교육 인원

□ 다른 국가연구개발사업에의 활용

번호	연도	중앙행정기관명	사업명	연구개발과제명	연구책임자	연구개발비(천원)

□ 국제화 협력성과

번호	구분 (유치/파견)	기간	국가	학위	전공	내용

□ 홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일
1	신문보도	서울경제신문	환경 도움 주려 '빗물' 10년 연구했죠	2018.11.26
2	신문보도	이데일리	씨에스이, 이동형 자동관수 장비 출시로 녹지 관리 효율성 증대	2020. 5. 25

□ 포상 및 수상 실적

번호	종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관

[인프라 성과]

□ 연구시설・장비

번호	구축 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	개발여부 (○/×)	연구시설・장비 종합정보시스템* 등록여부	연구시설・장비 종합정보시스템* 등록번호	구축일자 (YY.MM.DD)	구축비용 (천원)	비고 (설치 장소)

[그 밖의 성과](해당 시 작성)

○
–

○
–

(4) 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항(해당 시 작성)

○
–

○
–

<참고 1> 연구개발성과 실적 증빙자료 예시

성과유형	첨부자료 예시
연구논문	논문 사본(저자, 초록, 사사표기를 확인할 수 있는 부분 포함, 연구개발과제별 중복 첨부 불가)
지식재산권	지식재산권 등록증(또는 출원서) 사본(발명인, 발명의 명칭, 연구개발과제 출처 포함)
제품개발(시제품)	제품개발사진 등 시제품 개발 관련 증빙자료
기술이전	기술이전 계약서, 기술실시 계약서, 기술료 입금 내역서 등
사업화 (상품출시, 공정개발)	사업화된 제품사진, 매출액 증빙서류(세금계산서, 납품계약서 등 매출 확인가능 내부 회계자료) 등

<참고 2> 「국가연구개발혁신법」 시행령 제33조 제4항 및 별표 4에 따른 연구개발성과의 등록·기탁 대상과 범위

구분	대상	등록 및 기탁 범위
등록	논문	국내외 학술단체에서 발간하는 학술(대회)지에 수록된 학술 논문(전자원문 포함)
	특허	국내외에 출원 또는 등록된 특허정보
	보고서원문	연구개발 연차보고서, 단계보고서 및 최종보고서의 원문
	연구시설·장비	국가연구개발사업을 통하여 취득한 3천만 원 이상(부가가치세, 부대비용 포함) 연구시설·장비 또는 공동활용이 가능한 모든 연구시설·장비
	기술요약정보	연차보고, 단계보고 및 최종보고가 완료된 연구개발성과의 기술을 요약한 정보
	생명자원 중 생명정보	서열·발현정보 등 유전체정보, 서열·구조·상호작용 등 단백체정보, 유전자(DNA)칩·단백질칩 등 발현체정보 및 그 밖의 생명정보
	소프트웨어	창작된 소프트웨어 및 등록에 필요한 관련 정보
	표준	「국가표준기본법」 제3조에 따른 국가표준, 국제표준으로 채택된 공식 표준정보(소관 기술위원회를 포함한 공식 국제표준화기구(ISO, IEC, ITU)가 공인한 단체 또는 사실표준화기구에서 채택한 표준정보를 포함)
기탁	생명자원 중 생물자원	세균, 곰팡이, 바이러스 등 미생물자원, 인간 또는 동물의 세포·수정란 등 동물자원, 식물세포·종자 등 식물자원, DNA, RNA, 플라스미드 등 유전체자원 및 그 밖의 생물자원
	화합물	합성 또는 천연물에서 추출한 유기화합물 및 관련 정보
	신품종	생물자원 중 국내외에 출원 또는 등록된 농업용 신품종 및 관련 정보

2) 목표 달성 수준

연 구 개 발 목 표	달 성 내 용	달성도(%)
○ 국내 배수성포장 현황 및 적용성 평가	○ 국내 적용중인 배수성포장 문헌조사 및 적용성 평가	*100*
○ 클린로드 시스템 설계도면 및 사양서 개발	○ 배수성포장 및 도로변 적용을 위한 클린로드 시스템의 설계도면 및 사양서 개발	*100*
○ LID 클린로드 시스템 적용을 위한 배수성포장의 공용성 검토	○ 배수성포장 배합설계 및 실내실험을 통한 공용성 검토를 하여 이를 바탕으로 차년도 배수성포장 TEST BED 시공	*100*
○ 배수성 포장의 배수능력 및 협잡물 유입에 따른 기능분석	○ 실내투수실험을 통한 배수능력 검토 완료 차년도 배수성포장 TEST BED 시공 후 현장 투수실험을 통한 기능분석 완료	*100*
○ LID 클린로드 시스템 설계 및 제작	○ 서울과학기술대학교 교내의 클린로드 시스템 TEST BED를 제작완료	*100*

○ LID 클린로드 시스템 모니터링	○ 주기적으로 방문하여, 클린로드 시스템 모니터링 및 미세먼지 감소량 측정	*100*
○ 실내 공용성시험(함부르크 휠트래킹, 동탄성계수)을 통한 배수상포장의 TEST BED 적용성 검토	○ 배수성포장 배합설계를 통해 시편 제작 후 실내시험을 통해 적용성 검토	*100*
○ 배수성포장 시험시공	○ TEST BED를 위한 배수성포장 시험시공 실시	*100*
○ 시험시공 구간 추적관리를 통한 클린로드 시스템의 미세먼지 저감율 10%이상 도출	○ TSS 시험을 통한 물 분사 후 도로 노면 상태 평가, 미세먼지 측정기를 이용한 미세먼지 감소량 분석	*100*
○LID 클린로드 시스템의 매뉴얼 및 가이드라인 제시	○ 설치 경험과 운전을 통해 학습	*100*
○회수된 물의 오염도를 분석하여 개선방안 도출	○ 시운전으로 개선	*50*
○LID 클린로드 시스템의 PC, 모바일 컨트롤 장치 개발	○ 원격 컨트롤러 기초단계 완성	*100*
○동절기 미세먼지 저감을 위한 동결방지 시스템 개발	○ 열선, 열풍기 개발	*100*

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)

1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

○
–

○
–

2) 자체 보완활동

○
–

○
–

3) 연구개발 과정의 성실성

○
–

○
–

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

○ 배수성 포장을 적용한 클린로드시스템

본 연구에서는 클린로드시스템에 배수성 포장을 적용해 우수를 활용한 미세먼지를 저감 시스템을 개발했다. 그에 따라 기존 클린로드시스템의 단점인 용수 확보 문제를 해결할 수 있고, 물 튀김 현상을 저하시킬 수 있는 성능을 갖추고 있다.

○ 기존 클린로드시스템의 문제점

① 도로중앙 살수 장치를 통해 열섬현상 및 미세먼지저감 효과는 일부 확인되나 주행차량 물 튀김 의한 인근 보행자, 상가 등의 민원 발생 가능성이 있음

② 도로 표면 살수를 위한 용수의 경우 인근 하천 또는 지하수를 활용하는데, 지하수 또는 하천용수 확보가 어려운 도심지 도로의 경우 적용이 어려움

③ 하천용수 사용 시 하절기 악취문제(배수오염)

④ 계절적 요인에 의한 문제(동결 등)

○ 기존 클린로드 시스템의 경우 용수공급문제, 주변 물 튀김에 의한 민원 등으로 사용을 중단하는 경우가 발생하는 등 사용 대비 효율 문제로 적극 활용에 어려움이 있으며, 포항시의 경우 클린로드 시스템의 상수관 노후에 의한 용수공급 문제로 8월 한여름 폭염에도 사용을 중단하기도 하였다.

○ 그러나 최근 클린로드 시스템 활용 시 주변 물 튀김에 의한 민원을 고려하여 운용시간대 조절 및 분사량 조절 등의 방안을 구축하여 일부 활용 중에 있음

○ 클린로드 시스템의 도시 열섬현상 저감, 미세먼지 저감 등의 효과로 지방에서도 도입을 추진하고 있으며, 도시계획 단계부터 '미세먼지 저감' 기술을 도입하는 등의 마스터플랜 구축에서 클린로드 시스템을 활용하는 등 클린로드 시스템의 확산 예상

○ 또한, 미세먼지저감 이외에도 도심지의 경우 열섬현상에 효과적으로 사용이 가능하여 클린로드 시스템의 활용성이 대두되는 실정이다.



Fig.74 대구시 달구벌대로 클린로드 살수 전경

본 연구에서 개발한 클린로드시스템은 미세먼지 저감성능이 확인 되었고 배수성포장의 투수성능 또한 확인되었다.

본 기술은 신도시 및 기존 도시 개발에 활용 가능하며 객관적이고 체계적인 검증기법을 통해 성능을 확보함으로서 지자체 및 공공기관에 활용이 가능하다. 또한 타 미세먼지 저감 기술과의 연계를 통한 도로변 친환경 LID 기술로 확대 기여가 가능한 기술로서 평가된다.

사업화 전망

- 최근 미세먼지 증가와 이로 인한 관심의 급증과 함께 미세먼지에 대한 우려도 커지고 있는 실정으로 미세먼지저감 기술 또는 정책 등이 활발하게 연구중에 있다.

- 또한 본 연구에서 활용하고자 하는 LID 기술은 도로, 주차장 등 도시, 건설 및 환경 산업의 새로운 분

야 및 시장 개척 효과 및 해외진출을 위한 녹색기술로서 다양한 시장개발의 기반 조성 분야로 사업성이 큼.

- 본 개발기술은 계획, 설계, 시공, 유지관리, 운영 및 제품생산의 특성을 지니고 있으므로 도로 내 빗물 관리와 함께 미세먼지저감 효과를 확보하고 이와 관련된 통합 솔루션을 제공하는 산업으로 성장 발전시킬 수 있음

- 과거에 비하여 도시 내 빗물관리를 위한 법/제도가 정착되어지고 있으며, 각 지자체에서도 투수성 포장 등 도로에서 발생한 유출수 관리에 대한 정책을 지속적으로 제시함에 따라 시장 형성이 예상되며, 개발된 기술은 시장 진출 및 점유 확대에 기여할 것으로 예상됨

- 또한 투수·배수성 포장의 경우 소음저감 효과와 더불어 기능적인 면(배수 및 빗길 차선 시야확보 등)에서도 인정되어 점차 증가하고 있는 추세임

- 개발된 기술은 신도시 및 기존 도시 개발 시 활용이 가능하고 객관적이고 체계적인 검증기법을 통한 성능확보를 통해 지자체 및 공공기관에서 활용이 가능하며, 타 미세먼지 저감 기술과의 연계를 통한 도로변 친환경 LID 기술로 확대 기여가 가능한 기술로서 평가됨.

6. 연구개발성과 관리 및 활용 계획

○ 활용계획

최근 미세먼지 증가로 인해 미세먼지저감 기술 또는 정책 등이 활발하게 연구중에 있다. 본 연구에서는 배수성포장을 활용한 클린로드시스템의 미세먼지 저감 효과를 확인하는 연구를 진행 하였다. 연구 결과 TEST BED에 적용된 배수성 포장의 우수한 투수 성능이 확인되었고 클린로드시스템의 미세먼지 저감효과 또한 확인되었다. 또한 우수를 활용한 클린로드시스템은 용수확보의 문제도 해결할 수 있다. 기존의 클린로드시스템의 단점을 개선한 본 연구의 기술은 미세먼지가 비교적 심한 계절인 봄철에 차량의 이동이 많은 구간에서 활용을 하면 큰 효과를 볼 수 있을 것으로 보인다. 또한 투수·배수성 포장의 경우 소음저감 효과와 더불어 기능적인 면(배수 및 빗길 차선 시야 확보 등)에서도 인정되어 점차 증가하고 있는 추세로 보아 본 연구의 활용도는 더욱 넓어질 것으로 기대된다.

본 연구에서 활용하고자 하는 LID 기술은 도로, 주차장 등 도시, 건설 및 환경 산업의 새로운 분야 및 시장 개척 효과 및 해외진출을 위한 녹색기술로서 다양한 시장개발의 기반 조성 분야로 사업성이 크다. 과거에 비하여 도시 내 빗물관리를 위한 법/제도가 정착되어지고 있으며, 각 지자체에서도 투수성 포장 등 도로에서 발생한 유출수 관리에 대한 정책을 지속적으로 제시함에 따라 시장 형성이 예상되며, 개발된 기술은 시장 진출 및 점유 확대에 기여할 것으로 예상된다.

○ 기대효과

1) 기술적 측면
- 인위적인 조작의 최소화를 통한 자동분사 또는 점적관수, 방류 등의 결정
- 기존 클린로드 시스템의 문제점인 물 튀김 개선 및 우수 순환을 통한 자원재활용
- 도시 홍수조절에 따른 강우 유출 수 관리 기능 향상

2) 경제적·산업적 측면
- 적용구간의 미세먼지저감 효과로 인한 도로변 환경 개선
- 미세먼지 발생에 따른 경제적 손실 저감
- 식생플랜트 또는 벤치형 우수저장탱크를 통해 도시경관 가치 창출을 통한 파생적 경제 효과

3) 사회적 측면
- 미세먼지로 인한 심각성을 클린로드 시스템을 통한 시각적 효과 부여
- 기후변화에 더불어 도시 열섬현상 저감을 통해 전력 수요량 절감, 녹색 공간 확보 및 도로변 환경 개선을 통한 지역주민의 삶의 질 향상
- 국내 기술을 활용한 소프트웨어 개발로 국외의 상용프로그램 수입 대체효과 및 수출 가능성

○ 추가적인 보완사항

1) 장마, 가뭄 등을 고려한 적정 수조용량 설정방법에 대한 내용 보완

현재 사용 중인 시스템의 경우, 1회 분사 시 약 60L의 물이 분사된다. 일반 포장에 적용한 경우, 2000L의 물탱크를 기준으로 약 35회 분사가 가능하며 1일 1회 분사 시, 약 35일 정도 사용 가능하다. TEST BED에 배수성포장 공극을 통해 다시 흡수되는 물의 양을 측정하여, 현장투수시험과 연관지어 적정 물탱크량을 최종적으로 산정하고자 한다.

2)기존 배수성 포장 공극막힘 현상에 의한 효율 개선방법을 연구내용에 포함 필요

배수성 아스팔트 혼합물 배합설계를 통해 품질 기준을 만족하는 최적 아스팔트 함량을 도출하였고 실내투수시험 결과 기준치인 0.01㎝/sec 이상을 만족하였다. 배수성포장의 경우 시간이 지남에 따라 도로 재비산먼지로 인해 포장 공극막힘 현상이 발생할 수 있다. 때문에 주기적인 물 분사로 공극 막힘 현상을 사전에 예방하고 배수성포장 이외에 측구를 통해 우수가 유입이 가능하도록 설계하여 물 분사에 용이하게 하고자 한다.

3) 살수라인 동결방지 기술 보완

현재 살수라인은 펌프→이송배관→살수노즐의 계통으로 구성되어 있다. 미세먼지는 주로 가을부터 봄에 많이 발생하고, 겨울철에는 비가 오지 않아 더 많이 도로 등에 축적되어 재바산 가능성이 높다. 따라서 겨울철 미세먼지 저감을 위해서 살수를 시행해야 하는데 살수라인의 동결방지가 중요한 과제가 된다.

동결을 방지하기 위해서 열선 등을 감아서 보은을 하고 있는데 잠시만 전원이 공급되지 않아도 노즐 등이 얼어서 막히게 된다. 그리고 살수라인에 사용하는 열선은 굵은 배관 등 타용도로 사용하기 위해 제작된

것으로 노즐 등에 부착하기가 어려워 살수라인과 노즐에 적합한 열선의 개발이 필요하다.

4) 살수라인의 송풍방법개선

살수 후 살수배관 및 노즐에 잔류하는 물을 배수가 필요한데 현재 많이 사용하는 방법은 컴프레셔를 이용하여 송풍을 하는데 컴프레셔는 특성이 압력은 강하고 송풍량은 작다. 컴프레셔를 이용하는 송풍은 살수구간이 제한적일 수 밖에 없어서 대형 컴프레셔를 이용해야 하는데 설치 위치 및 동력사용의 문제가 따른다. 이와 비교되는 송풍방법으로 브로워를 사용할 수가 있는데 브로워의 특징은 송풍압력은 강하지 않으나 송풍량이 많다. 따라서 넓은 면적의 살수라인을 송풍할 때 유용하게 쓰일 수 있을 것이다. 하지만 아직까지 브로워를 사용해서 현장적용을 한 사례는 별로 없다. 따라서 현장적용실험을 추가로 진행해서 적정한 송풍량 테스트를 수행할 필요가 있다. 또한 컴프레셔는 순간 송풍량이 강하기 때문에 후단에 열을 만들어도 열량이 부족할 수가 있으나 브로워는 후단에 열 발생장치를 부착해도 풍량을 감당할 수 있을 것이다. 다만 현장적용을 위해서는 동절기에 현장에 설치를 하고 송풍량, 열발생량, 송풍라인 규모 등의 상관관계를 연구를 진행하고 외부온도 변화에 따른 조건 변화도 연구를 해야할 것이다.

5)노면동결문제의 검토

동절기 도로의 미세먼지 저감을 위하여 살수를 할 경우 노면상부에 살얼음(블랙아이스)이 생겨 교통사고를 유발할 수가 있다. 이를 해결하고자 일부 기술에서 투수성 포장이나 투수블럭을 시공하는데 동절기 한파가 심할 때는 살수된 물이 투수가 되기 전에 도로 표면이 얼게되는 것을 종종 보게 된다. 이를 피하기 위해서는 노면온도를 측정하여 일정온도 이하일 경우에는 살수를 하지 말아야 하고 이를 해결할 추가적인 기술이나 방법을 개발할 필요가 있다.

○시제품 성능시험 및 사업화에 대한 세부적인 계획

①시제품 성능시험

본 연구를 통해서 CSE측에서 개발한 시제품은 크게 컨트롤러, 열풍기 및 동파방지 시스템, 이동형 살수장치 등 세부분으로 구성되어 있다. 컨트롤러는 초기에는 펌프를 직접 컨트롤하는 시스템이었으나 점차 개선하여 현재는 펌프와 살수구역을 함께 컨트롤 하는 단계까지 개발을 완료하였다.

초기 살수방법은 펌프를 가동시켜 살수를 하고 일정시간이 경과하면 멈추도록 하는 시스템이었다. 따라서 펌르의 용량(성능)에 따라 30m구간, 50m구간 등을 살수를 해야 하였는데, 현재 컨트롤 시스템은 일정 성능의 펌프를 설치하고 살수대상구간을 2~n개 구역으로 나누고 각 구역을 순차적으로 살수할 수 있도록 하였다. 이렇게 살수를 진행하면 물탱크 용량, 펌프 용량 등을 감소시켜 효율적 설치가 가능할 뿐만 아니라 도시 경관도 고려한 시스템이 될 수 있다.

시제품의 성능시험은 자체적으로 가동실험 지자체 등의 미세먼지 저감사업, 도시경관시설(화단,잔디밭)의 관수시설, 또다른 연구과제 수행 등을 통해 계속할 예정이다. 현재 도시경관 시설의 관수는 부산에코델타시티의 잔디광장에 설치할 계획으로 완료하였다.

②사업화 계획

연구개발성과불을 활용한 사업화는 다음과 같이 진행할 예정으로 있다. 스마트 컨트롤러, 살수라인 관리기술, 이동형 살수장치를 활용하여 미세먼지 저감, 도시열섬현상 감소, 도시경관시설(화단 등)관수분야에 진출해서 지자체, 아파트, 학교, 공장 등 소규모 작업장 등을 대항으로 매출을 하려고 한다.

Table 32. 스마트 관수 시스템의 활용 계획 및 기대효과

활용계획	기대효과	비고
학교나 관공서, 아파트 등 실외 화단등에 편리한 관수	-도시 경관 향상 -퇴직자, 노인등의 일자리 창출	고정형, 이동형 모두 가능
병원 실내등, 실내에 화단 및 조경시설이 있는 곳에 편리한 관수	-조경시설의 편리한 관리 -작업자의 근무조건 향상	이동형 스마트 관수 시스템은 실내에도 적합함
버스정류장 주변, 아파트 주변 휴식공간 및 도로 측구 등 물 반사 장치로 활용	-도시 경관향상으로 Green City 구현 -열섬, 미세먼지 저감 -도시 관리 일자리 창출	이동형
소규모 작업장 및 생산시설의 바닥면에 물을 분사하여 먼지 및 미세먼지 비산 발생 억제	-미세먼지 비산방지 -공장 근로자의 근무조건 향상 -공장 주변의 화단, 수목 등의 효율적 관수로 쾌적한 조경경관 유지	이동형
학교, 아파트등에서 물건을 운반하는 운송도구로 사용	-근로자의 중량물 운반부담 해소로 직원 근로조건 개선 -작업의 효율성 증가	이동형

Table 33. 관련 시장 수량

구분	관리대상	전국의 수량	기대효과
아파트	화단, 화분	16,000여 단지	-복지증진 및 여성, 노인일자리 창출 -열섬 저감 효과 -경관개선
학교	화단, 화분텃밭	전국 학교 11,000여개	-복지증진 및 여성, 노인일자리 창출
지자체 등 관공서	화단, 화분	지자체 230여개소 동사무소 2700여개소	-복지증진 및 여성 노인일자리 창출
병원	화단, 화분	전국 종합병원 277개소	-복지증진 및 여성, 노인일자리 창출 -환자들의 심리안정 효과
소규모 작업장 및 생산시설	작업장, 생산시설 바닥면	약 25만개소	-바닥면 미세먼지 감소
도로주변	도로,화단, 화분	서울시 버스정류장 6300여개소	-복지증진 및 여성, 노인일자리 창출 -도로변 미세먼지 감소

< 별첨 >

별첨 자료
1. 참고문헌
2. 총 연구개발기간 성과점검기준표 및 증빙자료
3. 세부 정량적 연구개발성과 증빙자료(총 연구개발기간 성과점검기준표 실적 증빙자료에 기 포함되어 있는 증빙자료 제외)

1.참고문헌

1) 국토교통부 (2020), “아스팔트 콘크리트 포장 시공 지침”
2) 이시원, 고동영, 가현길, 문성호 (2020), “우수 순환시스템을 이용한 도로변 미세먼지 저감 기술 개발 및 적용성 평가 연구”, 한국도로학회논문집, 제22권, 제3호, pp.77-83
3) 김도완, 정상섬, 문성호 (2018), “투수성 포장과 배수성 포장 구조형식의 성능평가 및 비교 연구”, 한국도로학회논문집, 제20권, 제3호, pp47-57
4) 김도완, 이상염, 문성호 (2016), “수분민감성 관련 소석회 및 박리방지제 첨가 투수성 가열 아스팔트 혼합물의 최적 함량 평가”, 한국도로학회논문집, 제 18권, 제6호, pp123-130
5) 환경부 (2019), “환경부 고농도 미세먼지 비상저감조치 시행 지침”
6) Kim. S. R., Jung. E. H., and Kim. H. D. (2014). “Evaluation on the Effect of Air Quality Improvement Due to the Employment of Clean-Road System in Daegu”, Journal of Evironmental Science International, Vol.23, No.12, pp.2029-2034. 7) Lee. J. Y., and Kim. I. H. (2016). “Effect on Road Airpollutants Reduction by Operating Factors of Water Jet System”, Journal of the Korean Society of Urban Environment, Vol.16, No.3, pp.305-311.
8) Lee. J. Y., and Kim. I. H. (2017). “Characteristics of a Filter Module Adsorption for Fine Dust Removal on Road”, Journal of the Korean Society of Urban Environment, Vol. 39, No.1, pp.19-25.
9) Metropolitan Air Quality Management Office (2014). A Study on the Preparation of Guidelines and Management Plans for the Construction of Clean Road Systems in the Metropolitan Area, No. Automobile Management Division-835. (in Korean)
10) Park G. H. H., Kwak. J., and Yoo. E. C. (2014). “Analysis of Reduction Efficiency of PM-10 by Clean Road System”, Busan Metropolitan city Institute fo Health & Environment, Vol.24, No.1, pp.137-145.
11) Seoul Institute of Technology(SIT) (2019). Utilization Method of a Measurement Device of Ambient Particulate Matters (PM-2.5/PM-10) Using a Light Scattering Method Due to Introduction of Certification System, No. Seoul Institute of Technology(SIT) 2019-002. (in Korean)

LID 클린로드 시스템의 운영 매뉴얼

1. 클린로드 주변의 관리

가. 클린로드 시스템 주변의 여건, 상황 등을 파악하여 시설물의 기능이 잘 유지될 수 있도록 계획을 세워야 한다.

나. 정기적 점검과 강우 등으로 인한 수시 점검계획을 수립하여 진행하여야 한다.

다. 배수성포장 표변의 상태를 점검하여 투수율이 감소하지 않도록 관리하여야 한다.

라. 살수 후 회수되는 유량을 체크하여 배수성포장 공극률이 잘 유지되고 있는지 점검하여야 한다.

마. 회수된 물이 집수되는 맨홀과 맨홀 내부에 설치되는 회수용 펌프의 상태를 정기적으로 점검하고, 협잡물, 토사 등을 제거해 주어야 한다.

바. 살수한 물을 회수하는 유공관의 흐름이 원활한지 점검하여야 한다.

2. 기계 시설물의 관리

가. 살수용 펌프는 주기적으로 점검하여 항상 정상 상태가 유지되도록 한다.

나. 동파 방지를 위해 펌프, 배관 등에 열선을 이용하여 보온을 하게 되는데 열선의 상태, 온도 컨트롤러 등을 점검하여야 한다.

다. 노면 살수 후 노즐의 박힘 상태, 동절기에 물얼음 상태 등을 점검하여야 한다.

라. 살수라인 및 노즐이 동결되는 것을 방지하기 위해 살수 후 열풍기를 이용하여 송풍을 하고 노즐 끝부분을 점검하여야 한다.

마. 물탱크 내부에 설치한 수위센서가 정상작동하고 있는지 주기적으로 점검하여야 한다.

바. 물탱크 내부에 설치한 동결 방지용 열선 및 컨트롤러가 정상상태인지 상시 점검하여야 한다.

사. 클린로드 시스템의 메인컨트롤러는 주기적으로 자동, 수동, test 모드를 사용하여 점검하여야 한다.

아. 펌프주변의 밸브, 배관 등의 누수가 있는지 상시 점검하여야 한다.

LID 클린로드 시스템 Check List

점검 항목	특이사항/조치내용
클린로드 주변 상황점검	
도로 포장면의 상태 훼손여부	
집수정의 협잡물 유입여부	
살수 노즐 등의 훼손 여부	
살수용 펌프의 소음 check	
노즐의 정상 살수 여부	
동파방지용 열선 및 컨트롤러 점검	
동절기 살수시 노면의 결빙 여부	
열풍기의 정상 송풍 점검	
컨트롤러의 정상작동 점검	
펌프, 밸브 등의 누수 점검	
기계실의 낙엽, 쓰레기 점검	
집수 펌프의 자동작동 여부	
살수 회수용 유공관의 막힘 여부	
배수성 포장의 투수성능 점검	
기타 특이사항 check	

LID 클린로드 시스템의 가이드라인

1. 클린로드 부분

가. 클린로드의 핵심이 포장에 있으므로 포장방법 선정시 적절한 선택을 하여야 한다.

나. 살수한 물을 회수하여 재사용 할 경우 회수라인 및 집수정 설계에 주의를 기울여야 한다.

다. 회수라인은 포장층 하부에 유공관을 매설하는 방법과 L형 측구 하부에 유공관을 설치하는 경우 등이 있는데 도로와 주변의 상황에 적합하게 선택하여야 한다.

라. 예상 살수 면적과 살수량을 계산하여 물탱크와 펌프의 용량을 산정한다.

마. 살수 대상 도로의 폭과 포장면 상태에 맞는 노즐을 선정하여 도로상에 균등하게 살수가 되도록 한다.

바. 살수노즐의 위치는 현장 상황에 따라 도로 중앙분리대 부분과 보도 경계부분에 설치한다.

사. 살수라인과 노즐 부분은 동절기 동파예방을 위해서 열선 등으로 보온을 하여야 한다.

아. 노즐 끝부분의 동결을 방지하기 위해 송풍시설 등을 설치하는 것이 좋다.

2. 시스템 컨트롤러 부분

가. 시스템을 운영하는 컨트롤러는 방수형으로 제작하여야 한다.

나. 시스템의 설계는 운영관리가 용이하도록 한다.

다. 시스템의 설치시에는 낙뢰방지를 위한 시설을 설치한다.

라. 컨트롤러는 자동, 수동, Test 세가지 선택 스위치를 부착하여 시스템 점검과 가동이 편리하도록 한다.

마. 사용하는 전선은 안전 규격에 맞는 것을 사용하고 전선관을 이용하여 보호한다.

바. 물탱크의 보온을 위한 열선 등을 설치하고 설정된 온도에 따라 작동되도록 한다.

사. 배관에는 전동밸브를 부착하여 '살수 후 물이 흐르는 사이판 현상을 방지하여야 한다.

아. 동절기에 펌프가 동파에 취약하므로 펌프의 보온에 주의를 기울여야 한다.

자. 물탱크와 펌프 등을 보호하기 위해 가림막을 설치하는데 도시 미관을 고려하고 보행자의 안전에 방해가 되지 않도록 설치한다.

차. 가림막 외부에는 시설 표지판을 부착하여 클린로드 시스템을 설명하여야 한다.

성과기준점검표 관련 실험 데이터

항목	투수계수 값	평균	기준값
1	0.019	0.021	0.01cm/sec
2	0.021		
3	0.023		

실내투수시험 결과

	Test1	Test2	Test3	평균	1000ml환산
배수성포장1	5.11	5.39	5.89	5.463333	13.6583333
배수성포장2	7.23	6.22	6.56	6.67	16.675
배수성포장3	5.02	5.15	5.92	5.363333	13.4083333
일반포장	482	479	472	477.6667	1194.16667

현장 투수시험 결과(sec)

구분	여과 전 무게(g)	여과 후 무게(g)	여과 전 무게(mg)	여과 후 무게(mg)	TSS(mg/L)
일반-구역1-1차	0.0948	0.0984	94.8	98.4	63.16
일반-구역1-2차	0.095	0.0966	95	96.6	28.07
일반-구역1-3차	0.0945	0.0954	94.5	95.4	15.79
일반-구역2-1차	0.0944	0.0972	94.4	97.2	49.12
일반-구역2-2차	0.094	0.0951	94	95.1	19.30
일반-구역2-3차	0.0952	0.0973	95.2	97.3	36.84
일반-구역3-1차	0.0949	0.0978	94.9	97.8	50.88
일반-구역3-2차	0.0939	0.0946	93.9	94.6	12.28
일반-구역3-3차	0.0944	0.0948	94.4	94.8	7.02

TSS실험 일반조건

구분	여과 전 무게(g)	여과 후 무게(g)	여과 전 무게(mg)	여과 후 무게(mg)	TSS(mg/L)
악조건-구역1-1차	0.0941	0.8094	94.1	809.4	12549.12
악조건-구역1-2차	0.096	0.7594	96	759.4	11638.60
악조건-구역1-3차	0.094	0.1804	94	180.4	1515.79
악조건-구역2-1차	0.0944	0.8155	94.4	815.5	12650.88
악조건-구역2-2차	0.0947	0.7258	94.7	725.8	11071.93
악조건-구역2-3차	0.0948	0.2056	94.8	205.6	1943.86
악조건-구역3-1차	0.094	0.7748	94	774.8	11943.86
악조건-구역3-2차	0.0951	0.5571	95.1	557.1	8105.26
악조건-구역3-3차	0.0942	0.1566	94.2	156.6	1094.74

TSS실험 악조건

	측정소데이터(㎍/m^3)	물분사전(㎍/m^3)	물분사후(㎍/m^3)	초미세먼지 저감율(%)
2021-03-03	23	22	23	-4.545
2021-03-04	27	27	24	11.111
2021-03-09	34	36	33	8.333
2021-03-10	49	58	52	10.345
2021-03-11	114	129	108	16.279
2021-03-12	79	82	69	15.854
2021-03-14	70	81	69	14.815
2021-03-15	76	80	70	12.500
2021-03-19	17	12	10	16.667
2021-03-21	31	30	26	13.333
2021-03-24	22	21	19	9.524
2021-03-29	18	23	19	17.391
2021-04-03	18	20	21	-5.000
2021-04-04	6	13	11	15.385
2021-04-06	25	34	30	11.765
2021-04-07	42	45	38	15.556
2021-04-09	12	11	13	-18.182
2021-04-13	15	11	8	27.273
2021-04-15	30	37	36	2.703
2021-04-16	11	22	18	18.182
2021-04-20	49	53	45	15.094
2021-04-21	40	44	39	11.364
2021-04-22	42	41	38	7.317
2021-04-28	33	33	31	6.061
2021-04-29	20	22	19	13.636
2021-05-04	19	16	11	31.250
2021-05-07	48	51	49	3.922
2021-05-08	50	69	58	15.942
2021-05-13	17	18	15	16.667
2021-05-14	38	32	30	6.250
2021-05-15	23	20	18	10.000
2021-05-18	16	20	19	5.000
2021-05-19	23	22	20	9.091
2021-05-22	16	19	18	5.263
2021-05-24	24	33	28	15.152
2021-05-25	24	20	20	0.000
2021-05-31	20	24	21	12.500
2021-06-02	28	26	24	7.692
2021-06-05	35	36	32	11.111
2021-06-06	34	30	25	16.667

2021-06-10	32	39	31	20.513
2021-06-12	14	10	10	0.000
2021-06-17	8	9	10	-11.111
2021-06-19	22	30	29	3.333
2021-06-20	30	31	30	3.226
2021-06-21	24	24	21	12.500
2021-06-25	29	28	22	21.429
2021-06-26	13	19	17	10.526
2021-06-28	21	17	16	5.882
2021-06-29	20	25	21	16.000

초미세먼지 측정 데이터

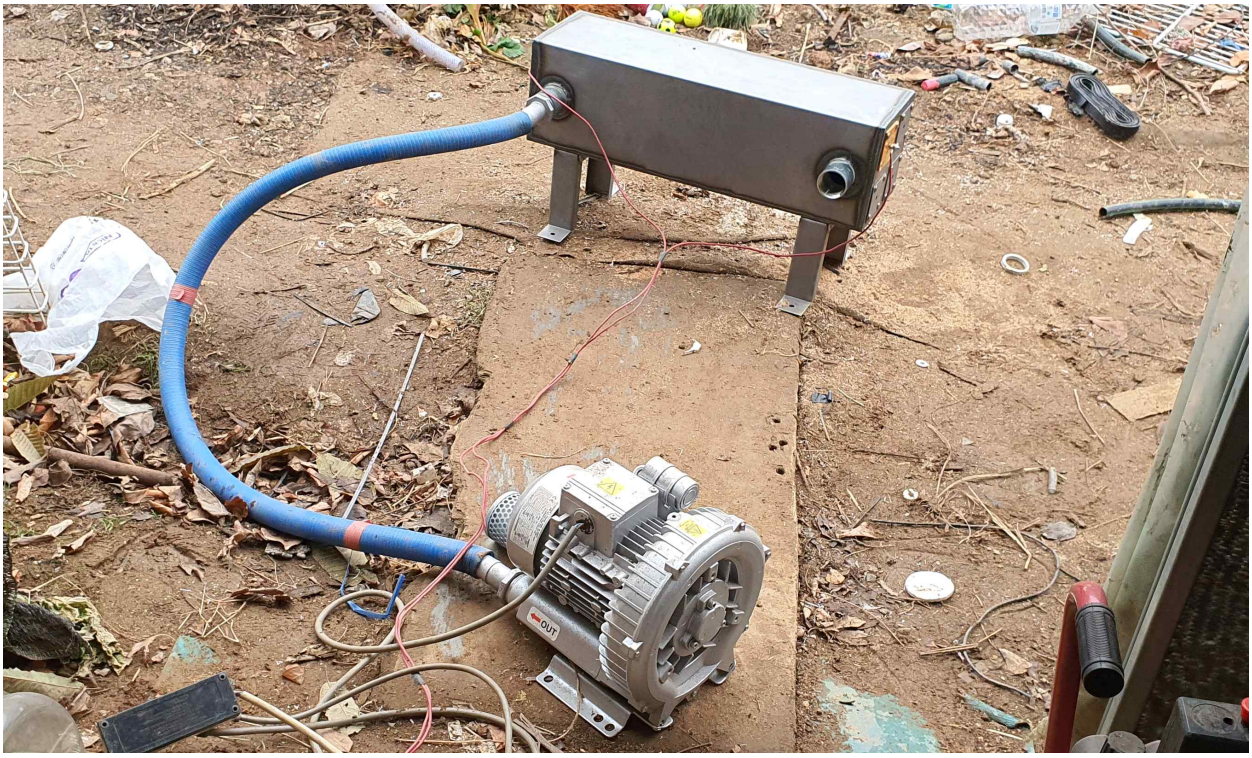
	측정소데이터(㎍/m^3)	물 분사 전(㎍/m^3)	물분사후(㎍/m^3)	미세먼지 저감율(%)
2021-03-03	50	49	42	14.286
2021-03-04	55	56	51	8.929
2021-03-09	59	63	51	19.048
2021-03-10	90	107	93	13.084
2021-03-11	157	152	131	13.816
2021-03-12	118	121	105	13.223
2021-03-14	98	99	79	20.202
2021-03-15	118	127	116	8.661
2021-03-19	67	67	60	10.448
2021-03-21	54	59	54	8.475
2021-03-24	69	68	61	10.294
2021-03-29	180	202	165	18.317
2021-04-03	33	30	28	6.667
2021-04-04	16	10	11	-10.000
2021-04-06	56	61	58	4.918
2021-04-07	81	78	69	11.538
2021-04-09	27	22	19	13.636
2021-04-13	29	31	27	12.903
2021-04-15	60	52	45	13.462
2021-04-16	22	15	13	13.333
2021-04-20	95	92	79	14.130
2021-04-21	89	99	86	13.131
2021-04-22	85	89	78	12.360
2021-04-28	87	82	71	13.415
2021-04-29	92	92	85	7.609
2021-05-04	34	33	30	9.091
2021-05-07	476	492	397	19.309

2021-05-08	362	377	301	20.159
2021-05-13	38	35	31	11.429
2021-05-14	43	49	45	8.163
2021-05-15	39	33	27	18.182
2021-05-18	38	44	41	6.818
2021-05-19	40	41	38	7.317
2021-05-22	28	20	14	30.000
2021-05-24	122	106	99	6.604
2021-05-25	89	87	81	6.897
2021-05-31	44	50	43	14.000
2021-06-02	54	55	47	14.545
2021-06-05	62	66	62	6.061
2021-06-06	61	70	61	12.857
2021-06-10	60	55	47	14.545
2021-06-12	25	23	19	17.391
2021-06-17	19	11	8	27.273
2021-06-19	42	46	40	13.043
2021-06-20	62	62	58	6.452
2021-06-21	34	33	30	9.091
2021-06-25	40	33	30	9.091
2021-06-26	22	25	21	16.000
2021-06-28	30	27	26	3.704
2021-06-29	30	19	17	10.526

미세먼지 측정 데이터



열풍실험 사진



열풍실험 사진

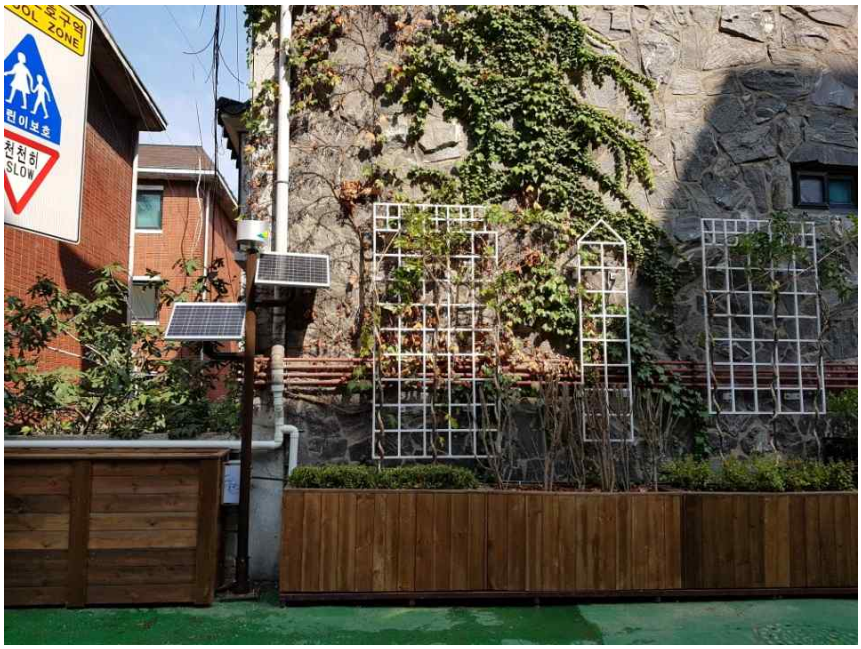


열풍실험 온도측정 사진



열풍실험 온도측정 사진

스마트 플랜터



1. 스마트 빗물 관리 기술의 개요

1) 기술의 개요

○ 강우시 건물의 옥상 또는 도로, 지표면 등의 빗물을 빗물탱크, 저류지 등에 저장하였다가 강우가 종료된 후 갈수기에 주변 녹지, 화단, 화분 등에 일정 주기마다 자동으로 관수를 하거나 배수를 할 수 있는 시설임.

○ 여름 장마철에는 강우시 빗물을 저장하였다가 강우종료 후 일정시간 경과 후에 배수를 하고 차기 강우를 대비토록 하여 도시 홍수예방에 기여함.

○ 설치 위치 및 목적에 따라 초기 강우를 배제 또는 선택할 수 있어 비점오염물질의 저감도 가능한 LID(저영향개발) 시설임.

○ 에너지원으로는 태양전지를 이용하여 발전을 하고 배터리에 충전하였다가 일정 주기마다 펌프 등을 작동시킴.

○ 강우감지기를 통하여 관수 또는 배수중에 강우가 감지되면 펌프의 작동을 멈추고 다시 빗물을 저장하여 강우유출 저감효과를 최대화 시키고 배터리의 소모를 최소화함.

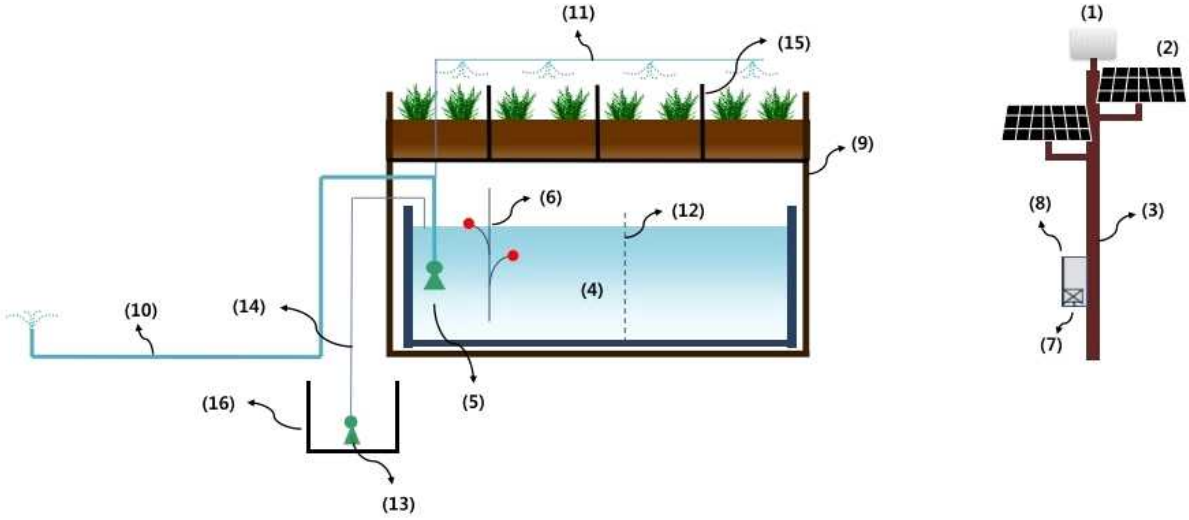
○ 동절기에는 지상에 설치된 빗물탱크의 동파를 방지하기 위해 자동 배수기능을 갖추었음.

○ 기존의 빗물이용시설은 주로 옥상의 빗물을 차집하여 사용하였으나 본 기술은 지표면의 빗물도 차집하여 사용할 수 있도록 설계되어 있어 도시 소공원, 도로, 도심 자투리공간, 아파트의 화단 등 장소의 구애 없이 설치 할 수 있음.

○ 스마트 빗물 관리 기술을 활용하여 도새재생, 스마트시티 등의 사업을 추진하면 도시의 경관성 향상과 도시녹화 등에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단됨.

(특허 제 10-1311288호, 특허 제 10-1359397호, 특허 제 10-1542347호)

2) 기술의 구성



번호	시 설 명
(1)	강우감지기
(2)	태양전지
(3)	태양전지 지지기둥
(4)	빗물저장 탱크
(5)	DC 수중펌프(자동)
(6)	수위센서
(7)	배터리
(8)	컨트롤 판넬
(9)	식생플랜터
(10)	외부관수 Line
(11)	점적관수 Line
(12)	스크린
(13)	빗물이송 펌프
(14)	빗물이송 파이프
(15)	식생화분
(16)	우수맨홀

(1) 강우감지기



강우시작과 강우 종료신호를 컨트롤 판넬에 전달하여 강우가 종료되면 타이머를 작동시켜 일정시간(관수주기)이 경과되는 것을 카운팅하고, 관수주기가 도달하기 전에 강우가 시작되면 시간경과기능을 리셋시켜서 처음부터 system을 다시 시작함.

pumping 중에 강우가 진행되면 즉시 pump의 가동을 중단시켜 강우 유출저감기능을 적극적으로 수행토록 하여 도시 홍수저감 기능을 발휘하도록 하였음.

(2) 태양전지



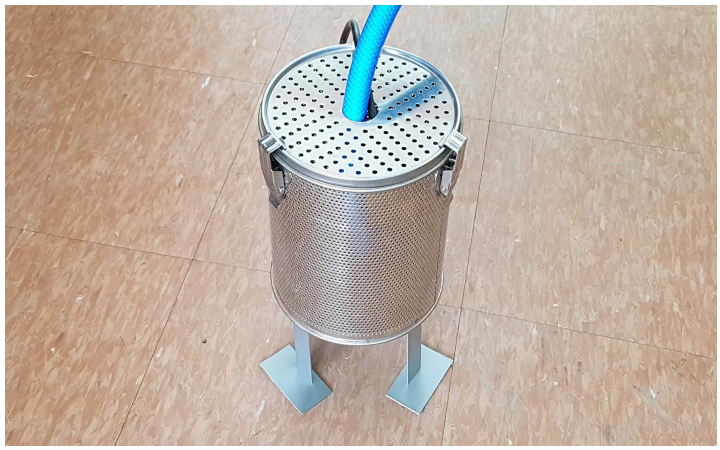
일조시간에 햇빛을 받아 전기를 생산하여 배터리에 전기가 충전되도록 함.

(3) 빗물저장탱크



옥상 또는 지표면에서 차집한 빗물을 저장하였다가 비강우시에 일정주기마다 플랜터에 관수를 하기 위해 설치하 였음. 현장 여건에 맞게 제작할 수 있으며 스크린을 설치하여 협잡물 등으로 pump가 막히지 않도록 구성하였음.

(4) DC수중펌프



빗물저장탱크의 빗물을 식생플랜터에 관수를 하는 기능을 갖고 있으며 수위센서 및 컨트롤러에 의해 가동되며 수위에 따라 상하로 이동하여 침전슬러지 유출을 방지함.

(5) 수위센서

수위를 감지하는 오뚜기형 센서로 만수(Hi), 부족(Low) 두 기능을 감지 할 수 있게 하였으며, 외부의 로컬판넬에 점등을 통하여 표시되도록 하였음. 또한 수위가 Hi 아래로 내려가면 보조 빗물 탱크의 펌프가 가동될 수 있도록 컨트롤 판넬에 신호를 보내게 하였음.

(6) 배터리



태양전지에서 생성된 전기를 저장하였다가 관수 및 빗물의 이송시 에너지로 사용하도록 하였으며, 12V 2대를 직렬로 연결하여 24V pump를 가동토록 하였음.

(7) 컨트롤 판넬



중앙 컨트롤을 하는 기능을 가지고 있으며 내장된 PLC에 프로그램을 입력하여 강우감지기, 수위센서 등의 신호를 받아 자동으로 관수 및 빗물이송 등을 통제하도록 하였음.

2. 적용하면 좋은 곳

1) 도심내 공원

- 공원내 관목 및 교목 등 조경용수로 빗물 이용



2) 학교 화단

- 학교 건물 및 주변 빗물을 취수하여 화단내 조경용수로 활용



3) 아파트 조경공간

- 건물 및 주변 도로 빗물을 취수하여 화단내 조경용수로 활용



4) 친환경 텃밭

- 텃밭주변 빗물을 집수하여 텃밭 농업용수로 활용



5) 식수대

- 도로에 내린 빗물을 집수하여 식수대 조경용수로 활용



6) 도로변 수목

- 도로에 내린 빗물을 집수하여 도로변 수목에 조경용수로 활용



7) 도로의 교통섬

- 도로의 빗물을 집수하여 교통섬 내 조경용수로 활용



8) 개발 후 경사면 녹화

- 주변 빗물을 집수하여 경사면 녹지부분 조경용수로 활용



9) 경관 조성용 화분

- 경관조성용 화분 대체 가능 및 화분사이에 스마트빗물관리기술을 도입하여 주변 빗물을 집수한 후 기존 화분에 관수



[뒷면지]

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업 '배수성포장 및 우수 순환시스템을 이용한 도로변 미세먼지저감 실용화에 관한 연구' 연구개발과제 최종보고서이다.

2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 국토교통부(국토교통과학기술진흥원)에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.