

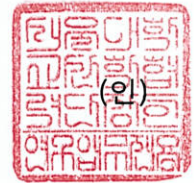
제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘지속가능한 산업단지 및 철도부지 인프라 조성을 위한 고효율 하이브리드 성토재 개발’(연구개발 기간 : (2017. 06. 30 ~ 2018. 12. 31) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2019. 01. 22.

주관연구기관명 : 서울대학교 산학협력단 김 성 철



주관연구기관책임자: 박 준 범

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	17CTAP-C13 2706-01	해당 단계 연구 기간	2017. 06. 30 -2018. 12. 31 (18 개월)	단계구분	2단계/2단계
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명				
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	지속가능한 산업단지 및 철도부지 인프라 조성을 위한 고효율성 하이브리드 성토재 개발			
연구책임자	박준범	해당단계 참여연구원 수	총: 7명 내부: 7명 외부: 명	해당단계 연구비	정부: 220,000 천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 220,000 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 9명 내부: 9명 외부: 명	총 연구비	정부: 350,000 천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 350,000 천원
연구기관명 및 소속 부서명	서울대학교 산학협력단			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반
-------------------------	----

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	5	1	1								

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

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

요약(연구개발성과를 중심으로 개조식으로 작성하되, 500자 이내로 작성합니다)

- 문헌조사 및 실험을 통한 흡착제 후보군 조사
- 성토재 및 흡착제 물리적, 화학적 기본 물성 평가 및 재료선정
- 선정재료 배합법, 배합비율 별 물리적, 화학적 특성 평가
- 1-D flow 컬럼시험을 통해 흡착능 평가 및 장기거동 평가
- 대형토조 시험을 통해 현장적용성 평가

보고서 면수

71

〈 국문 요약문〉

연구의 목적 및 내용	건설의 관점에서, 산업단지 하부의 지반은 충분한 강도를 가져야 한다. 산업단지 및 철도부지 등에서는 다양한 화학물질을 취급하는데, 일부 유해물질이 지반 및 지하수로 유입되고 있다. 기존의 흙이 건설재료로써 가지는 성능인 ‘강도’ 뿐 아니라 유해물질의 확산을 방지하기 위하여 ‘고흡착능’을 동시에 갖는 하이브리드 성토재를 개발하고자 한다. 문헌조사와 기초 연구를 통해 가능한 성토재 및 흡착제를 조사하여 기본 특성을 확보한다. 이를 통해 지반공학 및 지반환경공학적 특성에 대한 데이터베이스를 확보한다. 이를 바탕으로 성능 및 활용가능성을 고려하여 후보군을 선정한다. 선정된 후보군을 대상으로 다양한 성토재-흡착제 조합을 도출하여 적절한 재료의 융합 방법을 연구한다. 융합 연구는 기본적으로 ‘배합’과 ‘코팅’의 2가지 방법을 기본으로 하며, 흡착제가 입자의 성질을 강하게 나타내는 경우, ‘배합’하며, 흡착제가 이온의 성질을 강하게 나타내는 경우, ‘코팅’하여 하이브리드 성토재를 제조한다. 제조된 다양한 조합의 하이브리드 재료에 대하여 ‘강도’와 ‘흡착능’을 평가한 뒤, 각 조합의 장단점을 고려하여 최적의 하이브리드 성토재를 도출한다.				
연구개발성과	- 국내 성토재 재료기준 문헌조사 - 문헌 연구를 통한 흡착제 후보군 도출 - 성토재 및 흡착제 물리적, 화학적 기본 물성 평가 및 재료선정 - 선정재료 배합법, 배합비율 별 물리적, 화학적 특성 평가 - 1-D flow 컬럼시험을 통해 흡착능 평가 및 장기거동 평가 - 대형토조 시험을 통해 현장적용성 평가				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	산업단지 및 철도부지 인근의 오염 확산을 최소화함으로써 사회적 비용을 최소화할 수 있다. 또한 다양한 건설 재료에 새로운 기능 적용을 보여주는 연구가 될 수 있으며, 이를 통해 건설 분야와 타 분야의 융합 연구를 선도할 수 있다. 향후 플랜트나 또는 투수성 포장 도로 하부 지반 등에 응용될 수 있을 것으로 보인다.				
핵심어 (5개 이내)	산업단지	철도부지	부지 조성	성토재	하이브리드

< Summary >

Purpose	The subsurface should be rigid enough to support the huge infrastructures at industrial areas or railroad sites. Fairly large amount of chemicals have been spilled into the subsurface while those are in use at industrial areas or railroad sites. Therefore, the development of the soil materials which have not only sufficient strength but also adequate sorption capacity (hybrid) for sustainable operation is needed.				
Contents	Literature reviews and basic investigations would lead us to secure the candidate group of base materials for fill materials or adsorbents including the geotechnical and geoenvironmental characteristics. Trials to combine the base materials would be categorized into two groups. To mix the base material and adsorbent would be the basic idea. Partial substitution would be tried to maximize the effect of mix. Second method is coating. Certain chemicals can enhance the surface chemistry of target solid materials. Some trials would be performed on base materials using other chemicals such as surfactants or zero-valent iron or others. The evaluation for various combinations would be performed and the best combination would be derived from the results.				
Development results	- Literature review on requirement of fill material properties of Korea - Providing potential candidate materias by literature review - Physical, chemical evaluation on fill materials and adsorbent - Physical, chemical evaluation on hybrid fill material depends on the mixing method and mixing ratio - Evaluation of adsorption capacity and long term behavior by 1-D flow column test - Evaluation of field application by soil tank test				
Expected Contribution	Subsurface contamination is quiet but severe. The most problem is very high cost for its remediation. The highly adsorptive hybrid-fill materials would minimize the spread of contamination and it would significantly reduce the cost for remediation. This material would be applied to various areas where various chemicals or contaminants are used such as plant or porous pavements. Furthermore, this trial for fusion of two or more different materials could lead the field of 'functional soil' .				
Keywords	Industrial complex	Railroad site	Site reclamation	Fill materials	Hybrid

< Contents >

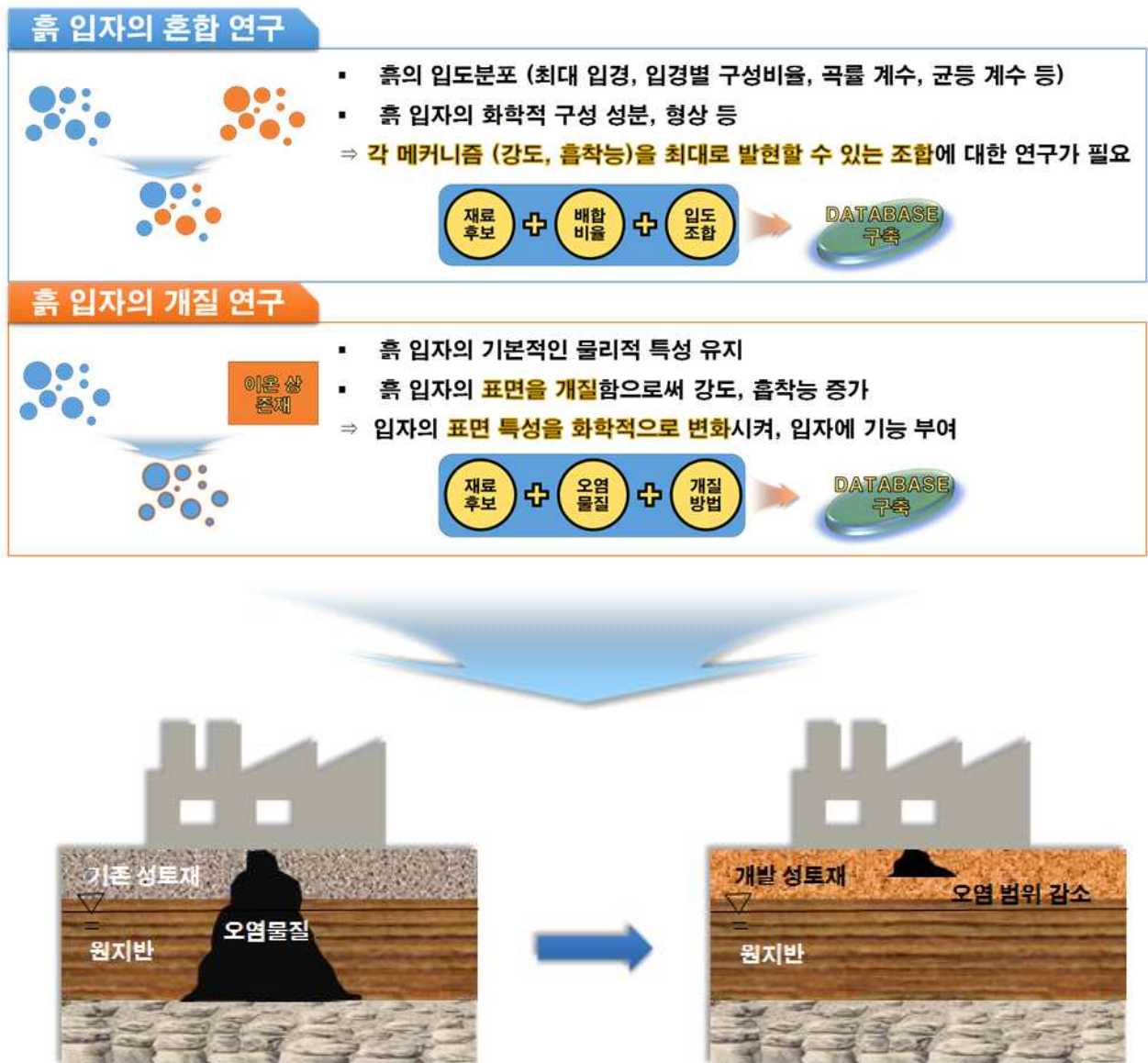
1. Outline of research	1
2. Status of domestic and overseas technology development	11
3. Research performance and achievements	12
3-1. Purpose and content of research	12
3-2. Strategy, method and implementation system of research	15
3-3. Method of research	17
3-4. Result of research	20
가. First year	20
나. Second year	35
3-5. Achievements of the research.....	50
4. Achievement and self-evaluation of research	53
5. Future plan for research application	56
6. Collected overseas technology during research	59
7. Security rating of research achievement	59
8. Status of research facilities and equipment registered in the NTIS	59
9. Implementation of safety measures in laboratory	60
10. Representative research achievement	60
11. Et cetera	61
12. References	61

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
2. 국내외 기술 개발 현황	11
3. 연구수행내용 및 성과	12
3-1. 연구개발의 목표 및 내용	12
3-2. 연구개발의 추진전략·방법 및 추진체계	15
3-3. 연구 수행방법	17
3-4. 연구결과	20
가. 1차연도	20
나. 2차연도	35
3-5. 연구개발성과	50
4. 연구개발 목표의 달성도 및 자체 평가	53
5. 연구개발성과의 활용 계획	56
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	59
7. 연구개발성과의 보안등급	59
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	59
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	60
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	60
11. 기타 사항	61
12. 참고 문헌	61

제1장. 연구개발과제의 개요

1-1. 연구개발 목적

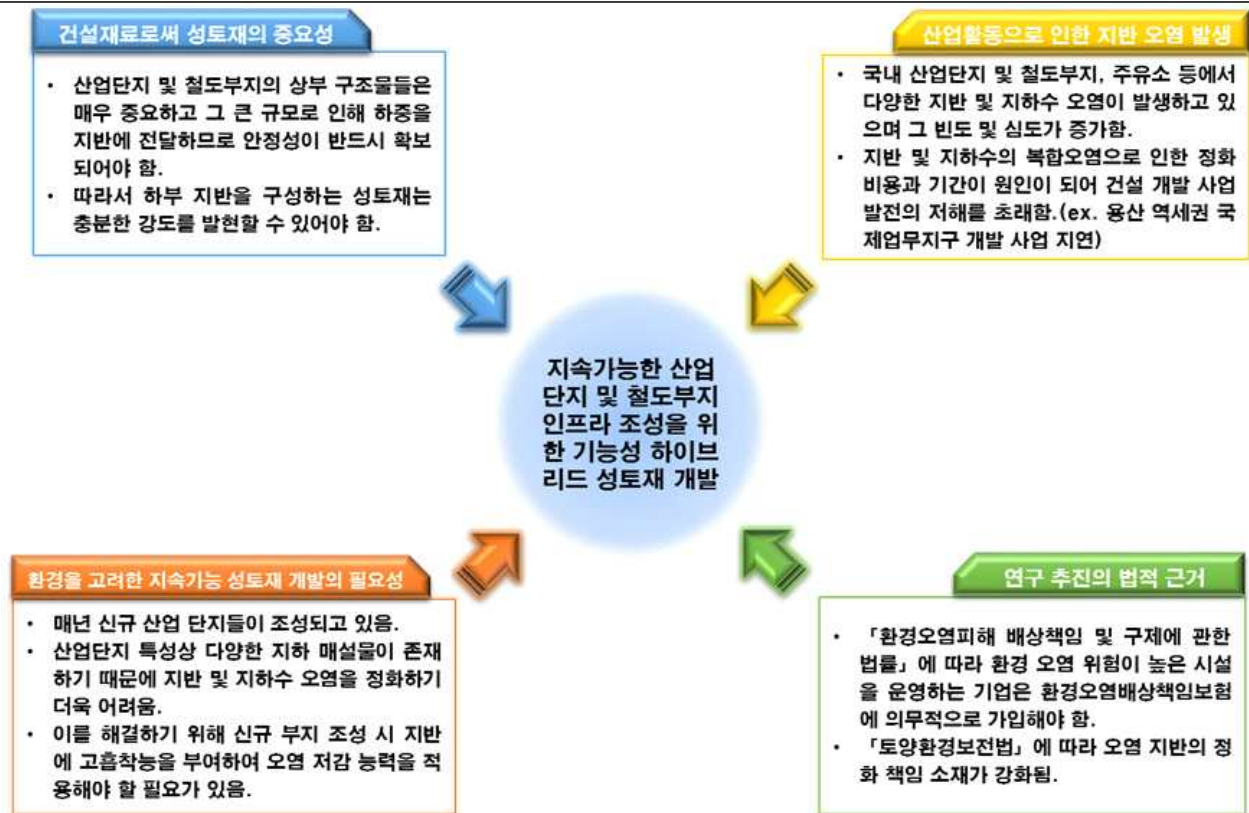


<연구 개념도 (좌: 기존 성토재료 사용, 우: 개발 성토재료 사용)>

지속가능한 건설의 관점에서, '강도'와 '고흡착능'을 동시에 갖는 하이브리드 성토재의 개발

- 건설의 관점에서, 산업단지 및 철도부지를 구성하는 가장 중요한 건설재료 중 하나가 바로 '흙'이며, 따라서 산업단지 하부의 지반은 거대한 구조물을 받쳐주는 충분한 지지력을 갖고 있어야 함
- 충분한 지지력을 확보하기 위해 산업단지 및 철도부지 개발 시, 부지 조성 과정에서 원지반 상부에 성토가 이루어짐
- 한편, 산업 활동 및 철도 운영으로 인해 유류 및 중금속 등과 같은 다양한 물질을 취급하게 되는데, 이 과정에서 관리되지 않은 일부분이 지반 및 지하수로 유입되는 상황이 발생하고 있음
- 지속가능한 건설의 관점에서, 산업단지 및 철도부지의 하부 지반을 조성할 때 사용하는 성토재에 대한 연구를 수행하고자 함
- 성토재는 '흙'이라는 입자로 이루어진 재료이며, 그 재료를 무엇으로 하느냐에 따라 기존의 것과는 다른, 차별화된 기능을 발현할 수 있음
- 기존의 흙이 건설재료로써 가지는 성능인 충분한 '강도' 뿐 아니라 오염원 관리 차원에서 상부 오염물질이 하부로 더 이상 확산되지 않도록 '고흡착능'을 동시에 갖는 하이브리드 성토재를 개발하고자 함

1-2. 연구개발의 중요성



<본 연구의 기초원천연구로서 지원 필요성>

○ 건설재료로써 성토재의 중요성

- 산업단지, 철도부지 등의 지역에서 발견할 수 있는 상부 구조물들은 매우 중요하여 그 안정성이 반드시 확보되어야 하며, 또한 그 큰 규모로 인해 거대한 하중을 지반에 전달한다는 특징이 있음
- 따라서 이러한 산업단지, 철도부지의 하부 지반을 구성하는 성토재는 매우 중요한 건설재료의 하나로서 충분한 강도를 확보해야할 필요가 있음



산업단지 부지조성 공사



여수산업단지

<산업단지 조성 및 여수산업단지>

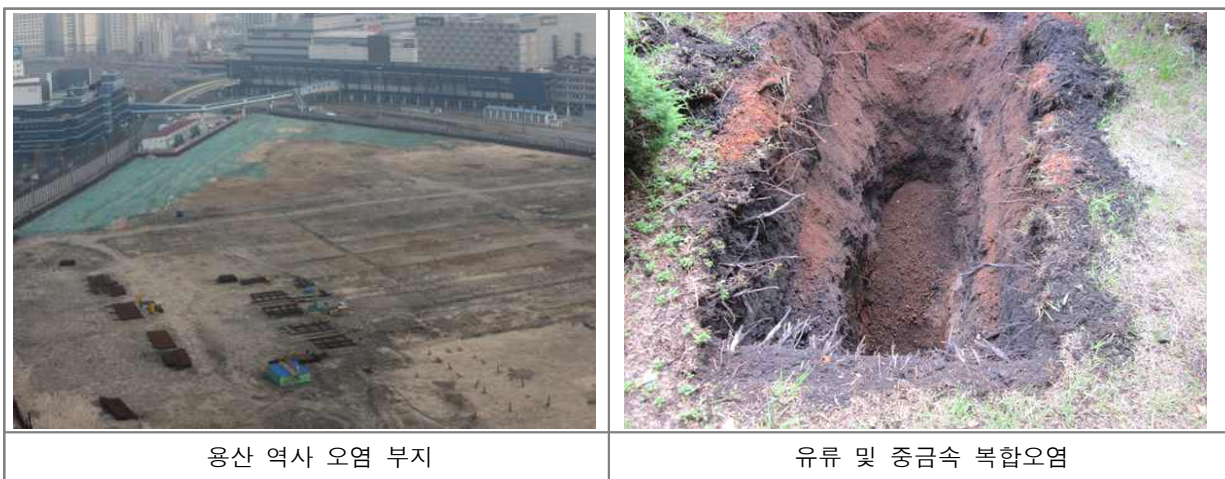
○ 산업활동으로 인한 성토재 지반 및 지하수의 오염 발생

- 아래의 표에 따르면, 현재 국내 산업단지 및 철도부지, 주유소 등에서 유류 및 중금속 오염 등 다양한 토양 및 지하수 오염이 발생하고 있으며, 이러한 오염의 발생이 과거에 비해서 크게 문제가 되고 발생 빈도가 더욱 증가하고 있음
- 2014년 11월 환경부 보도 자료에 따르면 전국 471개소의 산업 단지 내 업체와 38개소의 주거 인근 주유소의 토양 오염을 조사한 결과, 산업단지는 전체의 3.4%, 주유소는 31.6%가 토양 오염 기준을 초과하였음 (일부 부지에서 지하수 오염도 발견)

<산업단지 토양 및 지하수 오염 현황(환경부, 2015)>

조사 년도	산업단지	토양 오염		지하수 오염	
		개소	오염물질	개소	오염물질
2004	반월	7	TPH, BTEX		
2005	온산	92	Zn, Cu, Cd, Pb, As, Ni, TPH		
2006	창원	36	Cu, Zn, Ni, TPH	4	TPH, BTEX, TCE, PCE
	여수	26	Zn, As, Pb, Ni, TPH, BTEX	3	TPH, Benzene, Xylene, Phenol
2007	울산 미포	59	Cr ⁶⁺ , F, Ni, As, Zn, TPH, BTEX		
	시화	30	Cu, Zn, Ni, TPH, BTEX		
	청주	2	Ni, TPH	6	TPH, TCA, TCE, PCE
	익산	4	BTEX		
2008	부평, 주안	39	Cu, TPH		
	진주 상평	5	Zn		
	성서	47	Ni, Zn, TPH, BTEX		
	서대구	40	Ni, Zn, TPH, BTEX		
2009	양산	45	Zn, TPH, BTEX	2	TPH
	달성	36	Zn, TPH, BTEX	1	TPH
	전주	13	Zn, TPH		
	구미	26	As, TPH, PCE	1	PCE
2010	하남	41	Pb, TPH, BTEX, PCE		
	남동	13	As, F, TPH, TCE		
	대구	42	TPH		
	포항	78	Zn, Ni, TPH, BTEX	6	TPH, BTEX
2011	광양	109	TPH, BTEX, Pb, Zn, F, PAH	3	BTEX
	광양	9	TPH, BTEX, Pb, Zn, F	1	Benzene
	옥포	4	TPH		
	군산	58	TPH, BTEX, Pb, As	1	Ethylbenzene, Xylene
	서울 디지털	9	TPH, TCE		
전 체		861		28	

- 빗물 등에 의해서 오염물질이 확산되면서 지하수를 지속적으로 오염시킬 수 있으며, 이에 따른 인근 지역에 대한 피해가 증가함
- 최근 산업단지 부지의 토양오염에 의한 주민들의 민원이 증가하면서 지방자치단체, 입주 기업, 주민들 간의 갈등이 심화되고 있으며, 여러 문제들이 발생하고 있음
- 여수 시의회는 국가산업단지 주변 주민들이 제기한 산업단지 주변 토양오염도 조사를 받아들여, 2015년 5월부터 여수 국가산업단지에 대한 토양오염 합동조사를 실시하였음
- 2014년도에는 경기도에서도 도내 31개 시군 299개소를 대상으로 토양오염 실태조사를 실시하였고, 그 결과 9%에 해당하는 지점에서 토양 오염 기준을 초과하였음
- 2001년도부터 경기도에서 시행해온 토양 오염 실태 조사 부적합률은 2011년 2.16%에서 2012년 2.93%, 2013년 3.45% 등 지속적인 증가 추세를 보임
- 이러한 토양 오염의 주된 발생 원인으로는 부지관리 소홀, 시설 노후로 인한 오염 물질 유출인 것으로 나타났으며, 이 때문에 산업단지나 주유소 등을 조성한 이후 시간이 지날수록 해당 부지에서 토양 오염이 발생할 가능성은 더욱 높아짐

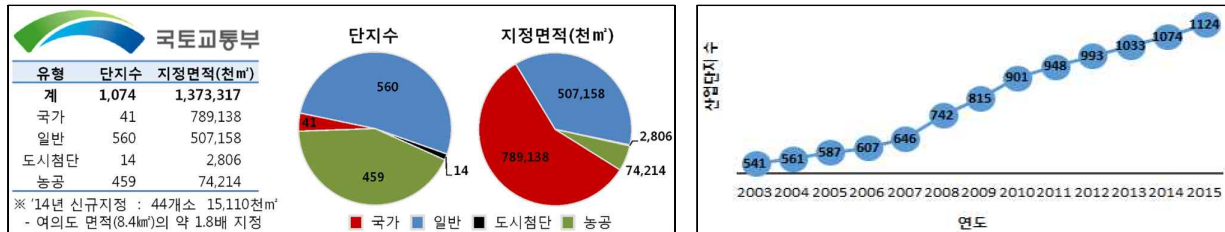


<용산 역사 오염>

- 철도부지는 철도를 유지, 보수 및 관리를 위해서 사용되는 윤활유, 철도 운영을 위한 디젤유에 의한 유류 오염과 철로 등의 철제에서 나오는 중금속에 의해서 복합적으로 오염되어 있음
- 넓은 부지에 광범위하게 오염이 진행되며, 철도 운행 중에는 해당 부지의 정화가 용이하지 못함
- 2009년 서울시에서 실시한 철도 차량기지 토양 오염 조사나 2010년 한국철도공사 수색차량기지 토양 오염과 같이 철도부지에서 오염이 나타나고 있으며, 이러한 철도부지 토양 오염은 장기간 지속되어 온 것으로 파악 되고 있음
- 특히 2013년 무산된 용산역세권 국제업무지구 개발 사업은 이러한 철도부지 오염으로 인한 개발 및 건설 사업 발전의 저해를 단적으로 보여주는 사례임
- 단군 이래 최대 개발 사업으로 불리던 용산 역세권 국제업무지구 개발 사업은 8조원에 이르는 땅, 약 35만 m² 규모의 거대한 땅을 개발하는 사업으로 2001년도부터 계획되어 2006년 8월 개발을 확정 지었으나, 여러 가지 원인으로 인해서 2013년 개발 무산됨
- 주된 원인 중 하나가 바로 토양 오염으로 인한 정화 비용 및 기간이었음
- 오염 농도는 토양 오염 우려기준(1지역)의 기준치로 비교해볼 경우, 유류 오염도는 83배, 중금속 오염도는 구리 14배, 아연과 납 32배까지 검출됨
- 전체 정화비용은 2,905억원이 책정되면서 오랜 기간의 정화와 많은 비용을 소모함
- 용산부지의 사례가 토양오염의 확산이 건설 개발 사업에 큰 영향을 미칠 수 있다는 것을 시사함

○ 환경을 고려한 지속가능한 건설재료(성토재) 개발의 필요성

- 산업단지에서 발생하는 토양오염은 주로 하부 지반에 발생하는 오염이고, 산업단지의 특성상 다양한 지하 매설물이 존재하기 때문에 정화하기 더욱 어려운 경향을 보임
- 본 문제의 해결을 위해서 신규 산업단지 조성 시에 사용되는 흙에 고흡착능을 부여하여 환경오염 발생 저감 능력을 하부 지반에 적용해야할 필요가 있음
- 전국산업단지 현황통계(15.4분기) 자료에 따르면, 올해에는 작년 동기에 비해 50개의 산업 단지가 더 조성되었으며, 매년 비슷한 수의 신규 산업 단지들이 조성되고 있음
- 현재에도 대구 국가 과학 산업 단지 및 대규모 산업 단지 조성 계획들이 준비 및 시행되고 있음
- 현재 조성되고 있는 다수의 산업 단지는 시간이 지남에 따라 토양 오염이 발생할 가능성에 노출되며, 이러한 위험성을 줄이기 위해서 고흡착능을 가지는 건설 재료가 필요함



<산업단지 지정 추이>

○ 연구 추진의 법적 근거

「 환경오염피해 배상책임 및 구제에 관한 법률 」 (2014.12.31. 제정, 2016.1.1. 시행)

- 이 법안은 환경오염 사고가 빈발해 사회적 불안감이 증대됨에 따라 환경오염 피해에 대한 기업의 배상책임 규명과 피해자의 입증부담을 경감하는 등 신속하고 구체적인 구제에 대한 내용을 담고 있음
- 환경오염 위험이 높은 시설을 운영하는 기업은 환경오염배상책임보험에 의무적으로 가입하는 것은 물론 (2016.7.1.부터 의무화) 대규모 환경오염 피해 발생 시 기업의 피해배상 책임이 있음을 명시하는 내용을 담고 있음
- 앞으로 산업단지나 철도부지의 건설에도 환경오염 피해에 대한 대비책을 충분히 고려해야함을 확인할 수 있음

※ 제4조(국가 등의 책무)

- ① 국가는 이 법의 목적에 따라 실효성 있는 환경오염피해 구제수단을 마련하고 피해경감을 위하여 필요한 시책을 강구하여야 한다.
- ② 지방자치단체는 제1항에 따른 국가의 시책과 지역적 특성을 고려하여 환경오염물질 및 시설의 안전관리를 통하여 환경오염피해의 사전예방에 노력을 기울여야 한다.
- ③ 사업자는 시설의 설치·운영으로부터 발생하는 환경오염피해를 예방하기 위하여 스스로 노력하고, 환경오염 사고가 발생하였을 때에는 피해경감에 필요한 조치를 하여야 하며, 제1항과 제2항에 따른 국가 또는 지방자치단체의 시책이 효과적으로 추진될 수 있도록 협력하여야 한다.

「 토양환경보전법 」 (2014.3.24. 일부개정, 2015.3.25. 시행)

- 2014년 개정된 주요내용 중 토양오염에 따른 사법상의 손해배상책임과 공법상의 토양정화책임 간의 법적 영역을 명확히 구분하도록 하는 등 오염토양의 정화책임 소재 부분에 있어서 강화됨

⇒ 본 연구에서는 기본적인 흙의 강도를 유지하며 고흡착능을 가진 성토재를 개발함으로써 산업단지나 철도부지 내 지반의 자체 정화 능력을 향상 시키고, 새롭게 개발되는 다양한 부지의 지속가능한 설계 및 건설을 가능케 할 것임

1-3 연구개발 범위

연구 범위	연구 수행 방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
하이브리드 성토재료 개발 및 실험실 수준 에서의 검증	- 성토재, 흙착제의 물리적·화학적 특성 분석 - 흙착제 후보물질 선정 - 배합법, 배합비에 따른 물리적·화학적 특성 분석 - 최적 배합법, 배합비 도출	- 풍화토 물리적, 화학적 특성 검증 시험 - 흙착제의 중금속 흡착능 평가 - 흙착제 선정 및 혼합 입경별 화학적 특성 평가 - 하이브리드 성토재 물리적, 화학적 특성 검증 및 개선여부 검증 - 국내 성토재 기준을 충족하는 하이브리드 성토재 도출

○ 국내 기준서의 성토재 재료 기준

흙쌓기에 사용되는 재료는 일반적으로 철도, 산업단지 조성 등 모든 건설공사에 가장 많은 양이 취급되는 재료로써 국가건설기준에서 각기 다른 기준을 제시하고 있다. 본 연구에서 직접적으로 고려하는 산업단지와 철도부지에 사용되는 흙쌓기 재료에 대한 기준은 국가건설기준 표준시방서 흙쌓기(성토) (KCS 11 20 20 : 2016)과 철도설계기준 흙 구조물편(KDS 47 10 25 : 2016)이 해당된다. 추가적으로 산업단지와 철도부지의 큰 면적을 차지하는 도로에 대한 규정은 도로설계기준 도로토공(KDS 44 30 00) 해당된다.

<국가건설기준 표준시방서 흙쌓기(성토) (KCS 11 20 20 : 2016)>

재료 분류	재료기준	
보통 메우기 재료	• 자갈, 모래, 실트 및 점토가 섞여 있고 입도가 적당하거나 좋은 흙 • 체가름 또는 혼합해서 사용 • 최대입경이 100 mm • 5 mm보다 작은 입자가 60% 미만	
보통쌓기 재료	KS F 2303에 의한 액성한계가 40% 이하 KS F 2304에 의한 소성지수가 15 이하	
선별재료 쌓기 재료	• 자갈, 모래, 실트 및 점토가 섞여 있고, 입도가 적당하거나 좋은 흙 • 체가름 또는 혼합해서 사용 • 모래당량(KS F 2340) : 10 이상 • 소성지수(KS F 2304) : 10 이하 • 입도 (KS F 2302)	
	체의 호칭치수(mm)	무게 통과율 (%)
	25	100
	10	75 이상
	5	20 이상
	0.08	35 이하
흙구조물 쌓기 재료	• 0.425 mm 보다 가는 재료 - 액성한계(KS F 2303) : 25 이하 - 소성지수(KS F 2304) : 6 이하 • 모래당량(KS F 2340) : 20 이상 • 입도(KS F 2302)	

	체의 호칭치수(mm)	무게 통과율 (%)
	80	100
	5	35 이상
	0.6	20 이상
	0.08	25 이하
투수성 되메우기 재료	• 마모율 (KS F 2508) : 50 이하 • 마모율로 나타낸 연성질 : 15 이하 • 석탄 및 갈탄 : 0.25 이하 • 점토덩어리 : 0.25 이하 • 기타 유해한 재료 : 2.0 이하 • 입도(KS F 2302)	
	체의 호칭치수(mm)	무게 통과율 (%)
	50	100
	0.3	0 ~ 100
	0.15	0 ~ 80
	0.08	0 ~ 40

<철도설계기준 흙 구조물편(KDS 47 10 25 : 2016)>

구분	자갈궤도		콘크리트궤도	
	상부노반	하부노반	상부노반	하부노반
최대입경	100 mm 이하	300 mm 이하	100 mm 이하	300 mm 이하
수정CBR	10 이상	2.5 이상	10 이상	2.5 이상
5 mm체(4번체) 통과율	25% ~ 100%	-	25% ~ 100%	25% ~ 100%
0.08 mm체(200번체) 통과율	0% ~ 25%	-	0% ~ 25%	0% ~ 25%
소성지수	10 이하	-	10 이하	10 이하

<도로설계기준 도로토공(KDS 44 30 00)>

공종 규격기준	노체	노상	구조물 뒤편
최대치수 (mm)	300 이하	100 이하	100.0 mm
수정 CBR (시방다짐)	2.5 이상	10 이상	10 이상
5 mm 체 통과율 (%)	-	25 ~ 100	25 ~ 100
0.08 mm 체 통과율(%)	-	0 ~ 25	0~15
소성지수	-	10 이하	10 이하
다짐 후 건조밀도	14.71kN/m ³	-	-
시공 함수비	다짐곡선 90% 습윤측 함수비	최적함수비의 ±2%	-
다짐도	90% 이상	95% 이상	-

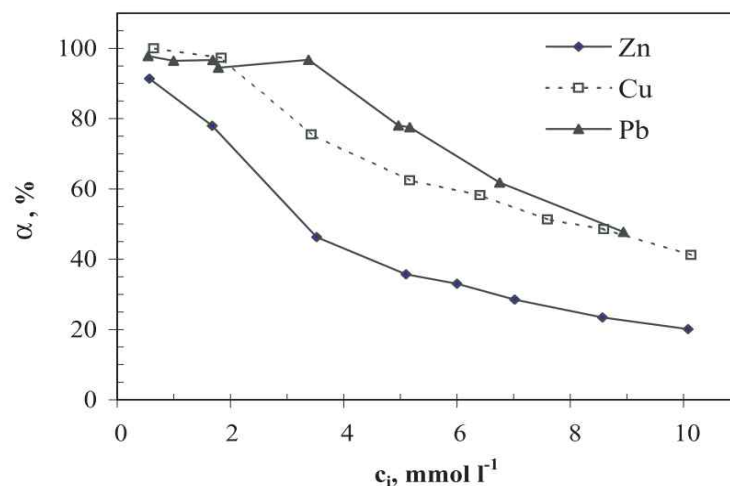
○ 흡착제

1) 제올라이트

제올라이트는 1756년 스페인 광물학자에 의해 발견된 광물로, 광물결정을 가열했을 때 거품을 내며 물이 끓는 것 같은 현상을 발견하여 끓는 돌이라는 뜻으로 Zeolite라 명명되었다. 국내에서는 1960년대부터 제올라이트 광상이 존재하는 영일, 감포, 구룡포 일대 지역에서 생산되고 있다. 제올라이트는 체르노빌, 후쿠시마 원전 방사능 오염지대에서 원자력 폐기물들을 제거하는데 사용되어왔으며, 잘 알려진 흡착제로 다양한 연구진에 의해 활발히 연구되어왔다. Zamzow 등 1992에 의하면 제올라이트의 주성분은 클리노프틸로라이트 (Clinoptilolite)로 국내에서는 영일만 지역에서 다량 생산된다. 클리노프틸로라이트는 $Pb(II) > Cd(II) > Cs(I) > Cu(II) > Co(II) > Cr(III) > Zn(II) > Ni(II) > Hg(II)$ 의 순으로 선택성을 갖는다. 흡착반응은 실험조건에 따라 상이한 결과를 갖지만 대부분의 연구에서 Zamzow의 연구결과와 유사한 결과를 발표했다. 다음 표는 Erdem 등 (2004)에서 제시한 실험 결과이다.

<천연제올라이트 흡착특성-Langmuir model (E. Erdem 등 2004)>

금속이온	흡착능 (mmol/Kg)	흡착능 (mg/g)	b (1/g)	R ²
Cu(II)	141.12	8.96	1.16	0.9775
Co(II)	244.13	14.38	1.75	0.9919
Zn(II)	133.85	8.75	0.85	0.9803
Mn(II)	76.78	4.23	0.33	0.9503



<초기농도에 따른 제올라이트의 아연, 구리, 납 이온 제거율 (J. Peric 등 2004)>

J. peric 등 (2004)의 결과 또한 Zamzow의 연구 결과와 유사한 하게 아연의 제거율이 납보다 작은 것을 알 수 있으며 정량적으로 동일한 조건에서 제올라이트의 아연 제거율이 구리와 납의 약 50%정도로 나타났다.

2) 굴패각

굴패각은 수하식 양식장이 밀집한 남해안 인근에서 알굴 수확 후 부산물로 매년 약 32만톤이 발생하고 매년 발생하는 굴패각을 처리하지 못하고 대부분 야적되어 있다. 하지만, 최근 굴패각을 일반토사와 혼합하여 공유수면 매립 성토재로 재활용을 시도 점을 볼 때 굴패각의 흡착제로서 활용할 수 있는 가능성이 크다. 굴패각은 낮은 비용을 효과적으로 오염물을 흡착 할 수 있는 장점이

있어 흡착제, 토양 개량제로 활발히 연구되어왔다. 특히 굴패각의 주성분이 CaCO_3 의 용해되어 Ca^{2+} 이온과 CO_3^{2-} 이온의 농도가 증가해 pH를 상승시킨다. 일반적으로 금속이온은 높은 pH에서 수산화물에 의한 수착화물을 형성해 $\text{M}(\text{OH})_n$ 의 형태로 침전된다. 결론적으로, 공급의 용이성과 흡착제로서의 활용가능성을 고려했을 때 성토재와 혼합해 산업단지와 철도부지의 오염심도 저감을 위한 흡착층을 조성하는데 활용될 가능성이 있다고 판단된다.

3) 활성탄

활성탄은 다양한 유기화합물에 대한 흡착능이 좋아 정수처리, 하수처리, 고도 정수 처리 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 활성탄은 주로 용존 유기물을 제거하는데 사용되지만, 중금속 흡착능 또한 우수 한 것으로 알려져있다. 활성탄이 흡착원리는 가역적인 물리흡착과, 비가역적인 화학적 흡착으로 나뉜다. 물리적 흡착은 흡착제와 흡착질이 물리적 인력에 의해 부착되어 있는 것으로 가역 반응이다. 하지만 화학적 흡착은 결합력이 강해 비가역적이므로, 산업단지와 철도 부지에서 발생한 오염물질의 이동성을 저감 시키는데 효율적일 것으로 판단된다. 활성탄은 원료, 형상에 따라 분류 할 수 있다.

- 사용원료에 의한 분류

1. 식물계 : 목재, 톱밥(분말탄-연질), 야자껍질(분말탄-경질)
2. 석탄계 : 역청탄(입상탄)
3. 석유계 : Pitch(입상탄)

- 형상에 따른 분류 및 특징

1. 입상탄 : 재생과정에서 입자의 크기를 균일하게 조정하여 생산 할 수 없지만, 파쇄하여 입도별로 선별해 사용한다.
2. 분말탄 : 입자의 크기에 따라 다른 용도로 사용되며, 일반적으로 200번 체 (0.075mm)이하 입경

<활성탄의 종류별 특징>

활성탄명칭	제조방법	특 징
입상활성탄 (GAC)	탄을 세분화시켜 탈피치등을 혼합한다. 혼합물을 성형기로 성형하여 다시 탄화시키고, 그 후 수증기에 의하여 재생시킨다.	○ 분말에 비해 흡착속도가 느리다. ○ 물과 분리가 쉽다. ○ 재생하기 쉽다. ○ 흡착탑에 충전하든지 유동상에 사용한다. ○ 분말보다 취급이 용이하다.
분말활성탄 (PAC)	입상등의 가공을 하지 않고 부활시킨다.	○ 흡착속도가 빠르다. ○ 사용할 때 복잡한 장치가 필요하지 않고 접촉여과에 의해 흡착이 된다. ○ 분말의 비산이 있고 취급이 불편하다
생물활성탄 (BAC)	입상활성탄에 미생물을 도포시켜 재생시킨다.	○ 용존성유기물질 제거율이 높다. ○ 저온시 제거율이 낮으므로 계절적인 고려가 필요하다. ○ 재생없이 수년간 이용가능하다. ○ 건설비 및 운전비용이 절감된다. ○ GAC공정 운전상의 변형공정이다.

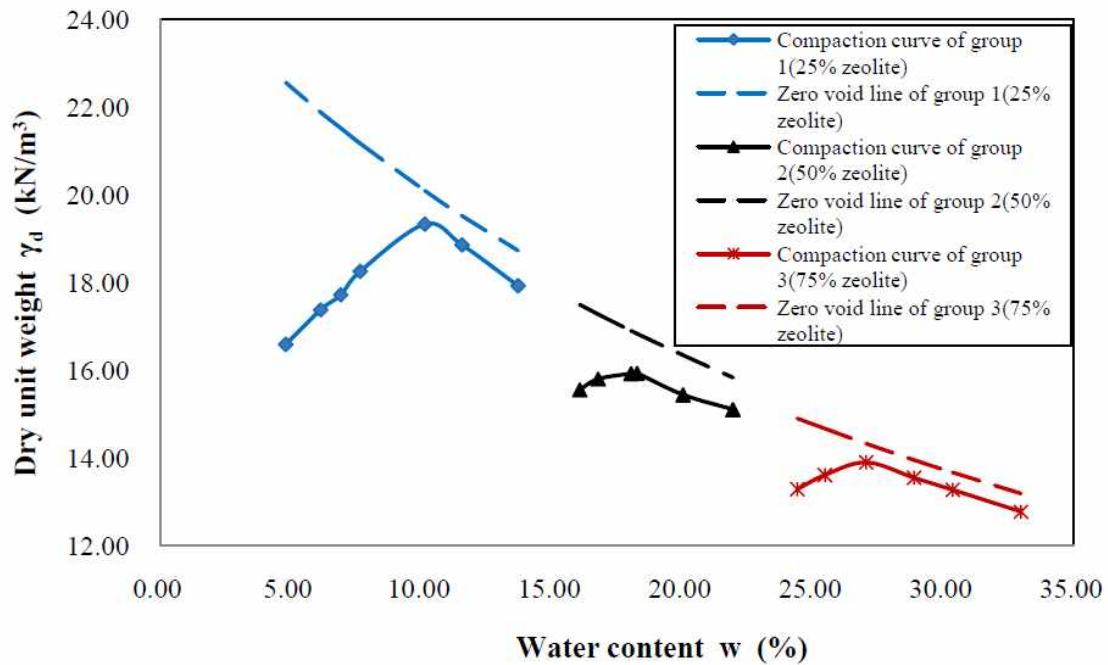
다음 표는 는 다양한 연구진에 의해 수행된 활성탄의 흡착능을 정리하였다. 비표면적은 약 1000으로 나타났으며 흡착능은 작게는 13mg/g 에서 93.39mg/g 으로 나타났다. 연구 결과를 종합했을 때 흡착능이 단순히 비표면적에 비례하는 것이 아님을 알 수 있고, 흡착 실험 조건에 따라서 다양하게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 일반적으로 하수처리, 정수처리에서 주 사용목적인 유기화합물뿐만 아니라, 중금속도 흡착하는데 효율적임을 알 수 있다.

<활성탄의 표면적과 납에 대한 흡착 특성>

활성탄 종류	표면적 S_{BET} (m^2/g)	흡착능 (mg/g)	실험조건		
			pH	온도(℃)	초기농도 (mg/L)
Hazelnut husk (Imamoglu & Tekir, 2008)	1092	13.05	5.7	18	200
Coconut shell (Kikuchi 등, 2006)	1000	76.66	5.6	25	-
Peanut hull (Brown 등, 2000)	-	30.43	-	25	30
Palm shell (Issabayeva 등 2006)	957	82.0	3.0	27	100-700
Pecan shell (Bansode 등 2003)	1340	64.20	4.8	-	104
Algal waste (Vilar 등 2005)	-	44.00	5.3	20	10-300
Date pit (Abdulkarim & Al-Rub, 2004)	1322	30.70	5.2	25	25-300
Rice straw (Johns 등, 1998)	-	36.05	5.0	23	518
Polygonum orientale Linn (Wang 등 2010)	1398	98.39	5.0	25	50-75

○ 혼합 성토재

폐자원을 재활용하고 폐기물을 재활용해 새로운 용도로 사용함으로써 환경문제를 개선함과 동시에 건설업에 있어서 경제성을 확보하는 효과가 있다. 성토시 폐기물을 재활용, 혼합해 매립하는 기술에 대한 개발 필요성과 관심은 계속 증가하고 있다. 최근, 광양시 명단지구에 조성중인 명당 3지구 국가산업단지 사업에 석탄재를 토사와 혼합해 성토를 한 사례가 있다. 이러한 사례를 고려해볼 때 산업단지 및 철도부지 조성에 흡착제를 혼합한 매립성토의 충분한 활용성을 확보했다고 할 수 있다. 유사한 시도로, 폐기물이 아닌 제올라이트 혼합 성토재에 관한 연구도 수행되었다(Shang (2015)). (Shang (2015)에 따르면 모래와 제올라이트의 혼합비율이 증가함에 따라 최적함수비는 증가하고, 최대건조단위 중량은 감소하는 경향을 보인다. Shang (2015)의 연구에서는 제올라이트는 약 0.1mm, 모래의 경우 0.1mm 인 입경을 혼합해 실험을 수행했다. 두 재료 모두 균일한 입도를 갖고 입경의 크기가 확연히 다른 재료를 사용해 다짐시험 결과가 그림과 같이 혼합 비율에 따라 확연히 다른 결과가 도출된 것으로 판단된다. 특히 최대 건조단위중량이 눈에 띄게 감소해 혼합 성토재로서의 사용가능성이 떨어지는 것으로 보인다. 하지만, 세립분의 제올라이트가 아닌 큰 입경(0.1mm~4.75mm)의 제올라이트와 혼합해 연구를 수행한다면 오염 확산 방지층 조성뿐만 아니라 물리적 특성 또한 양호한 배합 성토재를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.



<모래-제올라이트 혼합 비율에 따른 다짐곡선, Shang (2015)>

제2장. 연구개발 대상의 국내외 현황

○ 국내 현황

가. 성토재에 관한 연구

- 과거(1991)부터 국내에서 성토재로서 우수한 자경성, 경량성을 갖고 있는 화력발전소 부산물인 석탄회를 이용하려는 방안을 연구함
- 이후(1995~2014)에도 폐석회, 폐타이어, 폐 콘크리트, 폐 주물사, 폐 스티로폴, 최근에는 커피찌꺼기 등까지 다양한 재활용 재료를 기존 재료보다 향상된 성능의 성토재로서 활용하는 연구를 중심으로 활발히 진행함
- 성토재 활용을 위해 재료의 입도분포, 비중, 다짐밀도, 전단강도, 투수특성 등 기본물성 및 지반공학적 물성 평가와 재료 자체의 용출 특성 평가를 토대로 연구를 진행함
- 그러나 현재 지반의 오염을 고려한 성토재의 흡착능을 평가하는 연구는 없는 실정

나. 흡착 재료에 관한 연구

- 과거 국내에서 중금속 이온의 흡착 재료로서 천연제올라이트, 제강슬래그, Fly ash, 활성탄 등을 중심으로 연구함
- 현재까지 유류 등 유기 오염원에 대한 흡착 재료로서 팽창흑연, 활성탄 등을 중심으로 연구함
- 또한 중금속 및 유류로 복합오염 된 지역 발생 건수가 증가함에 따라 중금속, 유류 복합오염물질에 대한 흡착능 및 그에 대한 경쟁효과에 대해 다루는 추세
- 현재 흡착 재료의 흡착능 향상이나 새로운 흡착 재료의 개발에 관한 연구는 활발히 진행되고 있으나 흡착 재료의 강도에 관한 연구는 부족한 실정

○ 국외 현황

가. 성토재에 관한 연구

- 국내와 마찬가지로 과거부터 현재까지 성토재 개발 시 주로 폐기물 재활용을 통한 지반공학적 특성 향상에 초점을 맞추어 연구가 이루어짐
- 국외의 경우, 최근(2012~2016) 제올라이트와 모래를 혼합한 반응성투수벽체(Permeable Reactive Barrier)나 뒷채움재를 개발하는 연구들이 진행됨

- 이는 국외에서 환경적인 측면을 고려하여 모래에 제올라이트를 혼합함으로써 건설재료에 오염 저감 능력을 부여하려는 시도가 진행되고 있다는 것을 시사함

- 그러나 현재까지 국외에서도 성토재에 고흡착능 부여를 통한 산업단지 및 철도부지 내의 오염 저감에 대한 연구는 없는 실정

나. 흡착 재료에 관한 연구

- 중금속 이온의 흡착 재료 개발에 있어서 국내와 유사한 동향을 보임

- 유류 등 유기 오염원에 대한 흡착 재료로써 mesoporous silica, mesoporous molecular sieves, 팽창흑연, 활성탄, 탄소나노튜브 등을 중심으로 연구함

- 최근(2013~2016) 국내·외 흡착 재료 관련 연구는 기존의 흡착 재료의 흡착능 향상을 위한 표면 코팅 처리 기술, 다른 물질과의 복합체 형성 등의 흡착 재료 개질이나 활성탄, 탄소나노튜브와 같은 고비용 재료에 대한 대안으로써 biochar 물질을 개발하는 연구를 다루는 추세

- 또한 중금속 이온 간의 경쟁 효과, 복합오염이 증가함에 따라 중금속과 유기물간의 경쟁 효과 등을 중심으로 흡착 재료의 흡착능 평가 연구를 진행함

- 국내와 마찬가지로 현재까지 흡착 재료의 흡착능 향상이나 다양한 폐기물 활용을 통한 새로운 흡착 재료의 개발에 대한 연구는 활발히 진행되고 있으나 흡착 재료의 강도에 관한 연구는 부족한 실정

⇒ 이를 종합하였을 때, 토양오염을 고려한 흡착능을 갖는 성토재 개발에 관한 연구가 없음을 의미함

제3장. 연구수행내용 및 성과

3-1. 연구개발의 목표 및 내용

가. 연구개발의 최종 목표

구분	내용
최종 목표	고흡착성 하이브리드 성토재료 개발 및 실험실 수준 검증
세부 목표	1) 다양한 성토재료, 흡착재료의 조합에 따른 물성변화 database 확보 2) 최적의 성토재료 조합 방법 확보 및 기본 물성치 data 확보 3) 1-D 흐름조건에서 개발재료의 성능 평가: 강도 변화, 오염저감 효과 4) 대형토조실험을 통한 현장 적용성 평가: 오염저감 효과

나. 연차별 연구개발 목표 및 내용

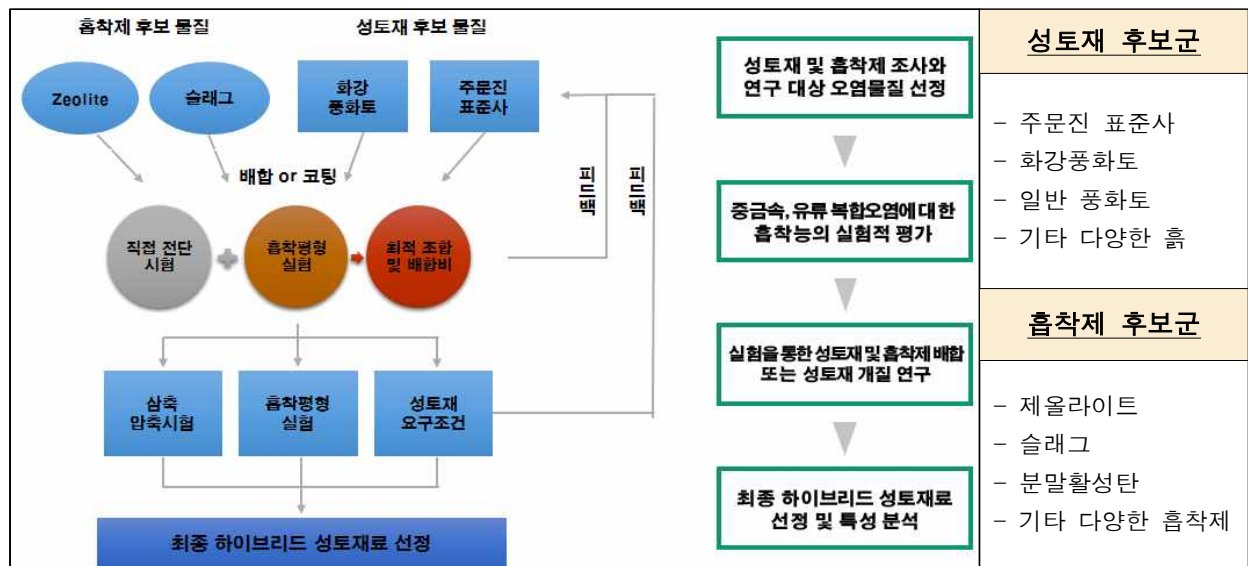
○ 1차 연도

① 개발 목표

- 주관연구기관(서울대학교): 성토재료써의 강도와 오염물질에 대한 흡착능을 동시에 갖는 하이브리드 성토재료 개발 및 실험실 수준에서의 검증 [재료 도출 및 기본 특성 평가]

② 개발 내용 및 범위(그림을 이용하여 시스템 구성도, 구조 등을 구체적으로 표현)

- 주관연구기관(서울대학교):



<1차 연도 개발 내용 및 범위 시스템 구성도>

○ 성토재 및 흡착제 조사 및 기본 특성 확보

- 성토재로 연구된 흙, 산업부산물, 또는 재활용 자원 등 강도 발현에 기초가 될 수 있는 물질에 대한 문헌 조사 및 기초 자료 확보
- 중금속 또는 유류 오염물질을 대상으로 연구된 여러 종류의 흡착제에 대한 문헌 조사 및 기초 자료 확보
- 문헌 조사 결과를 바탕으로 성토재 및 흡착제에 대한 기초 데이터베이스 확보(전단강도, 구성 성분, 입도, 흡착능, 주요 흡착기작 등)
- 성능, 활용가능성 등을 고려한 성토재 및 흡착제 후보군 도출; 다양한 성토재-흡착제 조합 도출
- 경제성을 고려한 성토재 및 흡착제 후보군 도출; 폐자원 활용등 방안 고려

○ 연구 대상 오염물질 종류 선정

- 문헌 조사를 바탕으로 연구 대상 지역의 오염 현황 확인
- 산업단지, 철도부지에 대한 사례 조사를 중심으로 빈도수, 오염량을 기준으로 오염물질 종류 선정
- 조사된 중금속, 유류 오염농도 데이터를 바탕으로 여러 종류의 오염 누출 시나리오 작성
- 흡착능 평가를 위한 오염조건 설정

○ 오염물질에 대한 흡착 성능 실험적 평가

- 실험실 회분식 실험을 통한 흡착능 연구
- 흡착제 후보군을 대상으로 다양한 흡착제들 간의 조합 중 흡착능이 가장 높은 조합 도출
- 흡착제 후보군을 대상으로 중금속 및 유류 오염물질에 동시 대응할 수 있는 새로운 흡착제 도출
- 중금속, 유류 오염물질의 흡착경쟁력 평가
- 표면 분석, 성분 분석을 통해 각 오염물질 흡착에 대한 메커니즘 규명
- 흡착제 입도별 흡착능 평가

○ 실험을 통한 성토재 및 흡착제 배합 연구

- 흡착제가 입자의 성질을 강하게 나타내는 경우 성토재와 흡착제를 ‘배합’ 하는 연구 수행

- 다양한 성토재-흡착제 조합에 대하여 배합비에 따른 강도 및 흡착능 변화 특성 관찰
- 배합의 장점을 극대화하기 위하여 ‘부분 치환’ 시도: 일반적으로 강도는 조립질의 입자를 통해 주로 발현되고, 흡착능은 세립질의 입자에서 큰 비표면적을 바탕으로 주로 발현되므로, 두 특징을 최대한으로 발현시키기 위하여 조립질은 성토재로, 세립질은 흡착제로 구성하는 치환 방법
- 최적의 성토재-흡착제 조합 및 그 배합비 도출: 각 조합에 따라 강도 또는 흡착능의 변화가 다양하게 나타날 수 있으며, 효율성, 경제성 등을 고려하여 최적의 조합을 도출
- 성토재의 강도 및 흡착능을 만족 시킬 수 있는 전제조건 하에 경제성 확보 방안 제시
- 다양한 배합재료에 대한 실험 결과 DB화 및 장단점 평가

○ 최종 하이브리드 성토재료 선정 및 특성 분석

- 연구 결과를 바탕으로 각 성토재료 조합의 장단점을 평가하여 최종 하이브리드 성토재료 선정

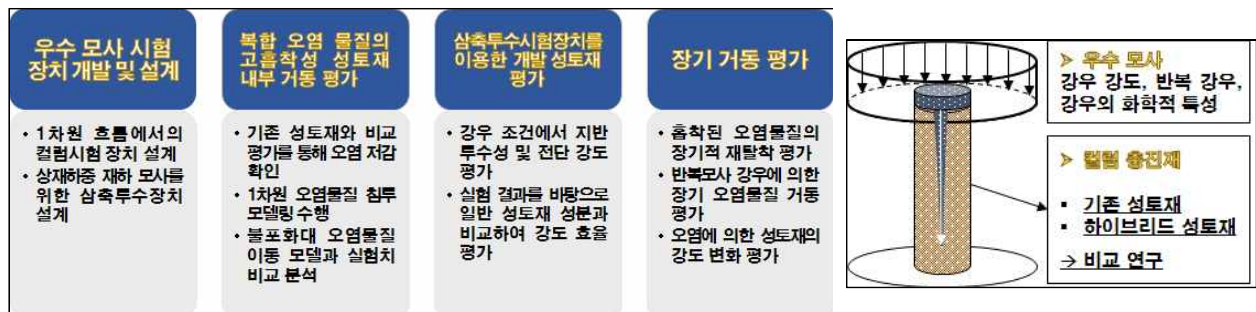
○ 2차 연도

① 개발 목표

- 주관연구기관(서울대학교): 개발된 하이브리드 재료를 이용하여 1) 우수흐름조건(1-D flow), 2) 대형 토조를 이용한 현장적용성 평가(흡착능 평가)[개발재료의 성능 평가]

② 개발 내용 및 범위(그림을 이용하여 시스템 구성도, 구조 등을 구체적으로 표현)

- 주관연구기관(서울대학교):



<2차 연도 개발 내용 및 범위에 대한 시스템 구성도>

○ 실험 조건 설정

- 1차년도에서 작성된 오염시나리오를 기반으로 오염물질 주입 조건 결정
- 연간 강우기록을 참조하여 그 경향을 바탕으로 우수 주입량 및 시간 선정
- 산업단지 및 철도부지에 조성된 성토 자료를 바탕으로 지반 모사 조건 결정

○ 시험장치 설계 및 제작

- 불포화층에서 우수흐름조건(1-D flow)을 모사할 수 있는 컬럼시험장치 설계 및 제작
- 성토재의 현장적용성을 평가하기 위해 대형 토조를 설계 및 제작

○ 불포화 1-D flow 컬럼실험 수행

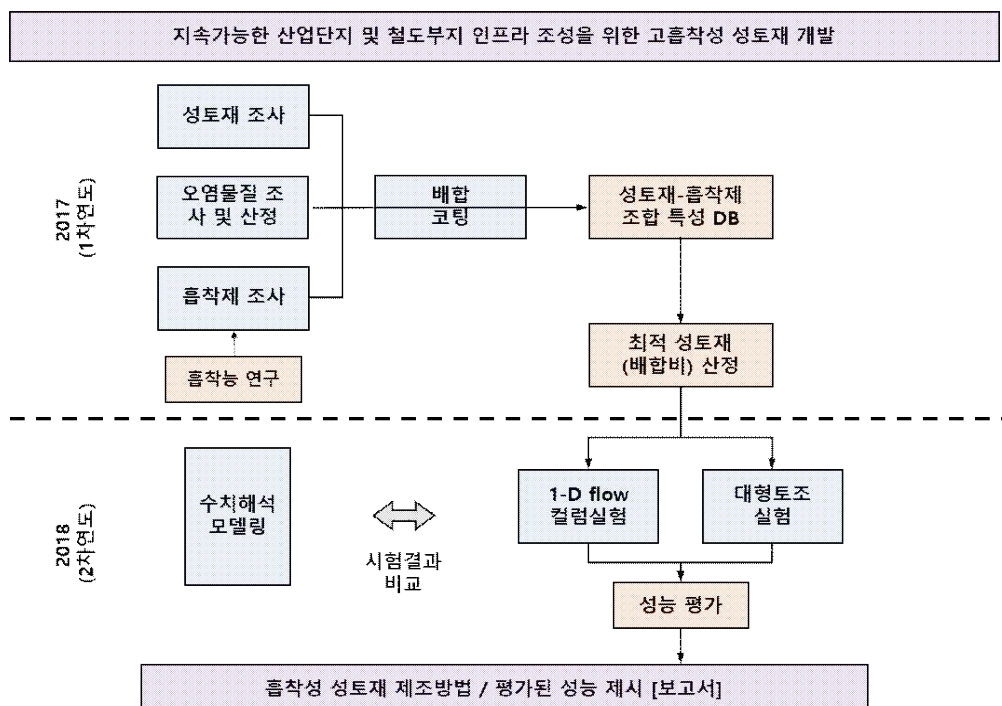
- 오염물질 주입에 의한 시간에 따른 유출수 농도 분석
- 파과곡선 작성을 통해 지연 계수 R 산정
- 다양한 흐름 조건에 의한 영향 평가 (지연 계수의 변화)

- 불포화대 오염물질 이동 모델 연구 (수치해석적 연구)
 - 기존 불포화대 오염물질 이동 모델 조사
 - 1-D flow 실험 결과를 바탕으로 기존 모델 보정
 - 기존 성토재와 개발된 성토재에 의한 오염 누출 영향을 수치해석적으로 비교 평가
- 대형토조 내에서 장시간의 모사 실험을 통한 개발된 흡착제의 성능평가
 - 시간 변화에 따른 성토재의 강도 및 흡착능 변화 특성 관측
 - 개발된 흡착제의 내구성 확보 방안 연구
 - 산업단지 및 철도부지에서 조성된 성토재의 성능 지속 기간 확보를 위한 사후관리 방법 제시
- 오염물질이 흡착된 성토재의 환경적정성 평가
 - 오염물질이 흡착된 성토재의 유해성 평가; 오염물질 유출 가능성 등 평가
 - 실내 모사 실험을 통한 성토재의 장기거동 및 안정성 평가

3-2. 연구개발의 추진전략·방법 및 추진체계

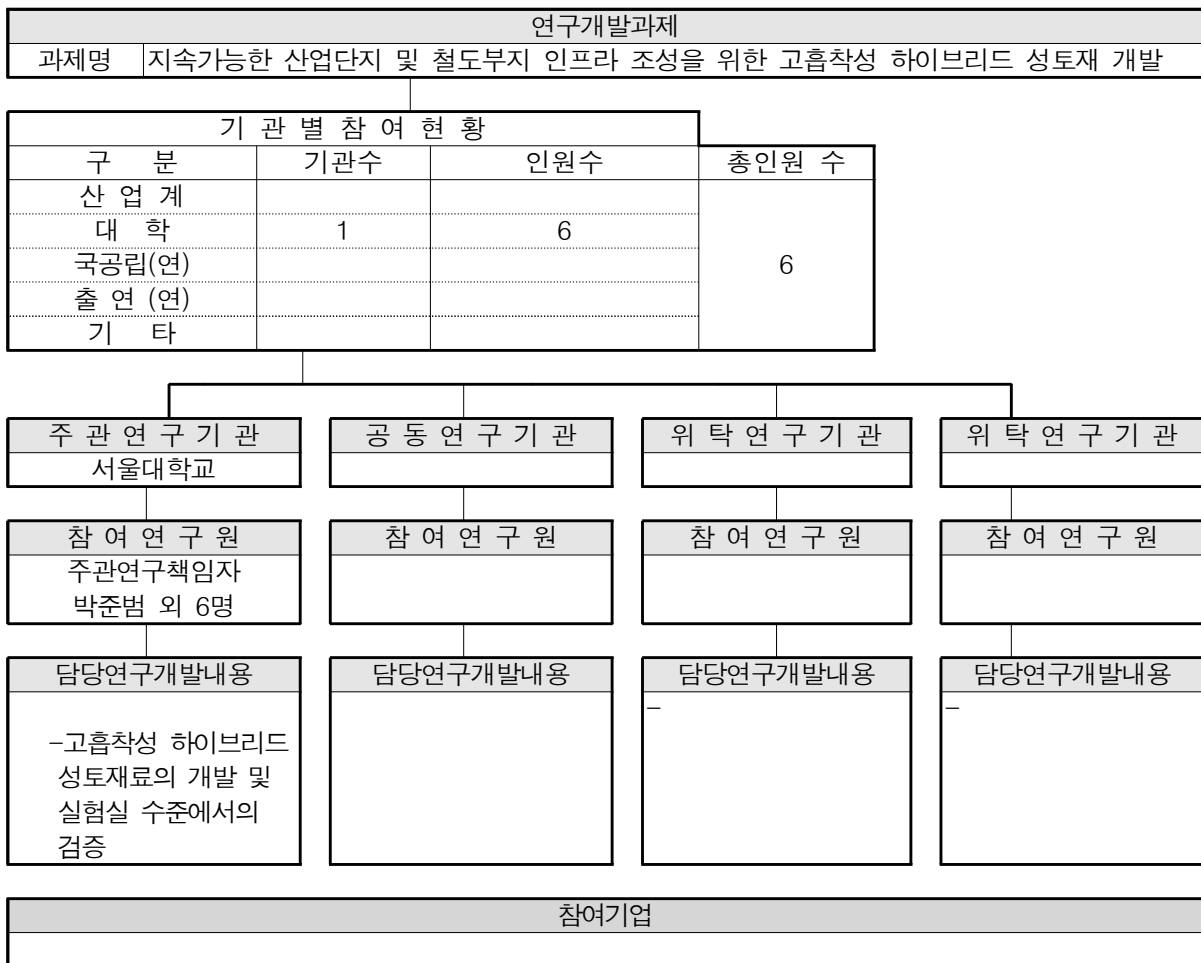
가. 연구개발 추진전략·방법

- 1차년도: 성토재로써의 강도와 오염물질에 대한 흡착능을 동시에 갖는 하이브리드 성토재료 개발 및 실험실 수준에서의 검증 [재료 도출 및 기본 특성 평가]
- 2차년도: 개발된 하이브리드 재료를 이용하여 1) 우수흐름조건 컬럼실험(1-D flow), 2) 대형토조실험 [개발재료의 성능 평가]



나. 연구개발 추진체계

○ 연구수행 체계도



다. 추진일정

구분	연구과제명 (연구수행기관)	관련 성과목표/지표			세부추진내용 (연구수행 Activity)	Activity별 산출물	소요 연구비 (백만원)	1차년도				2차년도			
		핵심성과	단위성과	질적 성과지표				1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4
총괄															
주관	서울대학교	1	1-1	공동	문헌 조사	후보재료군 선정	15								
				마찰각	다양한 조합에 대한 공학적 특성 평가	각 조합별 강도특성 database	45								
				흡착능	다양한 조합에 대한 흡착 특성 평가	각 조합별 흡착특성 database	45								
				공동	최적 조합 도출: 논문 발표	논문발표, 보고서	25								
			1-2	공동	1-D flow 및 대형토조시험 장치 설계 및 제작	1-D flow 및 대형토조 실험장치	45								
				유출수의 농도변화 그래프	1-D column test	유출수농도 그래프	60								
				흐름조건에서의 강도 변화	1-D column test	오염물질의 강도에 대한 영향성	60								
				유출수 농도변화 그래프	최적 배합비 시료의 대형토조시험	유출수의 농도변화 그래프	30								
				공동	특허 출원, 논문 발표, 성능평가 결과보고서 작성	특허 출원, 논문 발표, 보고서	25								

3-3. 연구 수행방법

물리적 특성

1) 다짐시험

건설재료 기준에서 일부 수정 다짐으로 규정하고 있으나 본 연구에서는 더욱 보수적인 평가를 위해 표준다짐시험 법을 준용하였으며, 다짐시험을 통해 최대건조단위 중량과 최적함수비를 도출하였다.

2) 직접 전단시험

다짐시험을 통해 도출한 최대건조단위 중량의 90%로 직접 전단시험을 수행하였다. 직접 전단 수행 시 가장 큰 입자의 크기만큼 전단몰드를 이격시켜 시험을 수행하였다. 수직 하중은 40, 80, 160kPa로 가해 전단을 수행하였다. 다짐 몰드는 직경이 6cm로 최대 12mm까지 전단을 수행하였다. 직접 전단 수행 후 얻은 전단력은 수직 하중과 함께 도시해 Mohr-coulomb 파괴 포락선을 이용해 전단 강도 정수를 계산하였다. 전단 강도 정수를 직접적으로 성토재의 규정으로 제시한 기준서는 없었으나, 직접 전단으로 얻은 강도 정수는 직간접적으로 성토재로서의 활용 가능 여부를 제시할 수 있을 것으로 판단되어 수행하였다.

3) 변수위 투수시험

다짐시험을 통해 도출한 최대건조단위 중량의 90%로 시료를 다진 후 변수위 투수시험을 수행하였다. 다져진 시료는 상대적으로 투수성이 낮아, 정수위 투수시험보다는 변수위 투수시험에 적합하다. 성토재의 규정으로 투수계수를 제시한 기준서는 없었으나, 투수계수는 오염물질과 흡착제간의 접촉시간을 결정하는 요소인 만큼 추후 현장시공 시 흡착 층의 두께를 설계할 때 참고 할 수 있을 것으로 보인다. 투수시험에서 사용한 몰드는 직경은 8cm, 높이는 16cm이다.

화학적 특성

1) BET 비표면적시험

BET 장비를 사용해서 중금속 흡착의 중요한 요인인 비표면적을 측정하였다. BET 장비는 일정한 온도에서 고체 표면에 물리적으로 흡착한 기체 분자의 양이 기체의 부분압력의 함수이며, 이렇게 흡착한 기체는 다층 구조를 이룬다는 이전에 사용되던 단일 흡착 층 가정의 Langmuir 이론을 보완한 BET 이론을 바탕으로 한다. 일정 온도에서 기체의 압력을 변화시켜 가면서 고체 표면에 흡착한 기체의 양을 측정하도록 제작된 장비로, 일반적으로 장비는 액체질소 온도에서 작동되며 진공 펌프, 진공 챔버(chamber), 진공 게이지, 전동 밸브 등으로 구성되어 주어진 온도에서 흡착시키고자 하는 기체의 압력을 변화시키면서 기체의 흡착량을 진공 챔버의 압력 변화로 측정할 수 있도록 만들어져 있다.

2) 양이온 교환능력 시험(Cation Exchange Capacity)

양이온 교환능력은 토양 또는 해당 시료가 흡수할 수 있는 교환성 양이온의 총량을 말하며, 이는 중금속 흡착의 중요한 요인이라 할 수 있다. 양이온 교환능력은 시료의 양이온을 추출한 최종 액을 암모니아성 질소를 통해 정량화하여 측정하였다.

3) X-Ray Diffraction (XRD) 분석

XRD 분석은 X선의 회절 현상을 이용한 분석으로 X선 회절현상은 X-선이 원자의 전자들에 의해 산란되는 과정으로 설명되는데 즉 Bragg 법칙이나 Laue 방정식을 만족하는 어떤 특정한 기하학적 조건에서 산란이 될 때만 회절빔이 생기게 되며 이러한 회절현상의 분석을 통하여 물질의 단위구조 크기, 구조, 방향 등의 정보를 알아낼 수 있다. 천연 제올라이트의 경우, 이산화규소와 다른 여러

종류의 제올라이트로 이루어져 있다. 사용한 제올라이트의 종류 및 함량을 알기 위해 XRD 분석을 이용하여 분석하였다.

4) X선 형광분석(X-ray Fluorescence, XRF)

X선 형광분석기를 통해 시료를 구성하는 원소의 정량분석을 하였다. 제올라이트의 경우, 규소와 알루미늄의 비가 흡착특성에 영향을 주는 요인이라는 연구결과가 있다. 이에 XRF 분석을 통해 시료의 화학적 구성성분을 분석하였다.

5) 원소분석기(Elemental Analyzer)

원소분석기는 XRF 분석과는 다른 원소를 분석하기 위해 사용하였다. 원소분석기에서는 시료 내에 존재하는 탄소, 수소, 질소, 황 및 산소의 함량을 정량분석할 수 있다. 일반적으로 유기물질은 유기물질과의 흡착이 잘된다고 알려져 있다. 따라서 만약 시료 내의 탄소함량이 많다면 상대적으로 적은 물질에 비하여 유기물질에 대한 흡착능이 뛰어날 것으로 판단된다.

6) 흡착능 평가

6-1) 회분식흡착시험 및 탈착 시험

시료들의 흡착능을 실험하기 위해 회분식흡착시험을 수행하였다. 각기 4g의 건조 시료를 배치에 넣고 40mL의 중금속수용액과 24시간 동안 등온반응 시킨 후 필터를 통해 시료와 수용액을 분리한 후 수용액 내의 잔류 중금속 이온의 양을 원자 흡광 광도기(Atomic Absorption Spectroscopy)를 통해 측정하였다. 중금속수용액의 농도는 50, 125, 250, 500, 750, 1000, 1500, 2000mg/L로 저농도부터 고농도까지 사용하였다. 추후 흡착된 오염물질의 유출에 대한 영향성을 평가하기 위하여 탈착 시험을 수행하였다. 탈착 시험의 경우, 흡착시험에서 사용한 오염물질이 흡착된 시료를 건조한 후 각각 증류수와 산성용액과 반응시킨 후 용액 속의 중금속농도를 측정하였다. 유류오염 물질 역시 1:10의 비로 건조 시료와 유류오염 물질을 등온반응시켜 실험을 진행하였다. 유류오염물질의 농도는 10, 50, 100, 150, 200mg/L를 사용하였다. 이는 중금속에 비해 유류오염물질의 위험도가 상대적으로 높기 때문이다. 잔류 유류오염 물질은 가스크로마토그래피를 통해 측정하였다.

○ 등온흡착 모델 분석

회분식 흡착시험의 결과는 등온흡착 모델을 통해 분석하였다. 흡착은 두 상의 경계면에서 그 상을 구성하고 있는 성분물질이 농축되는 현상을 말한다. 표면 또는 계면에 흡착이 일어날 때를 양 흡착, 그 반대로 계면 쪽이 내부보다 성분농도가 옅어질 때를 음 흡착이라 하며, 다량의 양 흡착을 일으키는 물질을 흡착제라 한다. 대표적인 흡착제로는 활성탄(activated carbon)이 있으며 특히 흡착력을 강하게 한 활성탄을 사용한다. 특히, 흡착제는 다양한 환경 정화 분야에서 활용되는 물질로, 본 연구에서는 지중으로 침투하는 오염물 또는 강우 시 지중으로 침투하는 물에 용해되어 있는 오염물질을 흡착시켜 이동성을 감소시키는 목적으로 연구를 수행하였다.

흡착 기작을 수학적으로 표현하기 위한 다양한 모델이 존재하며 크게 두 가지로 나뉜다. 1) 평균장 모델(mean-field model) 2) 응집모델(Aggregation model). 개념적으로 다음과 같이 큰 틀에서 두 가지 모델로 나뉘며, 본 연구에서 주목한 중금속의 흡착기작은 일반적으로 평균장 모델을 사용한다. 평균장 모델은 대표적으로 Langmuir model, Freundlich model, Langmuir-Freundlich(L-F) model, Frumkin-Fowler-Guggenheim(FFG) 등이 있다.

평균장 모델은 흡착이 진행됨에 따라 흡착 층이 균일하게 사라진다고 가정하고 있으며 추가적인 가정 사항은 Langmuir model과 Freundlich model에 대해 상술하였으며, 본 연구에서 FFG, L-F model은 고려하지 않았다.

1) Langmuir model

흡착 모델 중 가장 널리 사용되는 Langmuir model은 다음과 같은 가정 사항을 둔다. 분자 간 상호작용이 없는 분자(오염물)가 이상적으로 희석되어 흡착제의 균일한 결합자리에 결합하는 것을 기본적으로 가정하고 있다. 흡착제 입자의 형상과 결합자리의 정확한 위치는 고려하지 않으며 단순히 결합자리의 균일성만을 고려한 모델이다. 하지만, 실제 흡착제의 표면은 균일하지 않으며, 대단히 강하게 흡착되지 않으면 흡착된 분자(흡착질) 간의 상호작용을 무시하지 않을 수 없다. 특히, 흡착된 흡착 질이 흡착제의 표면을 완전히 덮었을 때는 본 모델을 사용할 수 없다. 따라서, Langmuir 모델은 흡착량이 크지 않고 흡착 세기가 강한 화학적 흡착을 잘 표현한다.

$$C_s = \frac{Q_L K_L C_e}{1 + K_L C_e}$$

C_s : 흡착제 중량당 평형 흡착량[mg/g]

C_e : 흡착 평형상태의 흡착질 용액의 농도[mg/L]

Q_L : 최대 흡착능

K_L : 흡착제의 오염물질(흡착질)에 대한 친화도

Langmuir model은 다음 식과 같이 역수를 취해 다음과 같이 선형화할 수 있다. 시험결과를 토대로 y축 절편에 해당하는 $1/Q_L K_L$ 과 기울기에 해당하는 $1/Q_L$ 을 구해 최대 흡착능(Q_L), 흡착제의 흡착 질에 대한 친화도(K_L)를 구할 수 있다.

$$\frac{C_e}{C_s} = \frac{1}{Q_L K_L} + \frac{C_e}{Q_L}$$

2) Freundlich model

Freundlich model은 Langmuir model과 더불어 실험적으로 얻은 결과를 표현하는 경험 식으로 흡착기작을 표현하는데 자주 사용되는 경험식이다. Freundlich model은 Langmuir model과 다르게 흡착이 여러층으로 발생할 수 있다. 일반적으로 낮은 농도의 흡착 반응에서는 Langmuir model과 Freundlich model에 모두 잘 맞는 것으로 알려져 있다. 하지만 높은 농도로 실험을 할 경우 그 차이를 극명하게 볼 수 있다. Freundlich model은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$C_s = K_F C_e^{1/n}$$

C_s : 흡착제 중량당 평형 흡착량[mg/g]

C_e : 흡착 평형상태의 흡착질 용액의 농도[mg/L]

K_F : Freundlich 흡착 상수

n : 흡착친화도 지수

상기 식을 대수적으로 표현하면 선형방정식을 유도할 수 있으며 이때 K_F 와 $1/n$ 을 구할 수 있다.

$$\ln C_s = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e$$

6-2) 1-D flow 칼럼흡착시험

회분식흡착시험의 경우, 흐름 조건에서의 흡착능을 평가할 수가 없다. 이를 보충하고자 우수 흐름 조건(1-D flow) 컬럼시험을 수행하였다. 시료는 다짐시험을 통해 도출한 최대건조단위 중량의 90%로 시료를 다진 후 시험을 진행하였다. 성토재의 경우, 지하수위 위에 시공하게 되어 불포화 층에 속한다. 따라서 본 연구에서는 불포화 층에서 우수 흐름 조건(1-D flow)을 모사해 위에서 중금속 용액을 유입시켜 시험을 수행하였다. 시험에서 사용한 컬럼의 크기는 직경 5cm, 높이 30cm이며 유량의 경우 2mL/min의 유량으로 용액을 유입시켰다. 사용된 시료는 상부에는 유입용액의 분

배를 위한 모래층을 2.5cm 두께로 배치하였으며 시료의 총 높이는 25cm로 다짐시험을 통해 도출한 최대건조단위 중량의 90%로 다지며 5개의 층으로 나누서 투입하였으며 하부에는 시료유실방지를 위해 2.5cm의 모래층을 배치하였다. 실험은 유입용액의 농도와 유출용액의 농도가 같게 유지될 때까지 진행하였다. 추후 흡착된 오염물질의 유출에 대한 영향성을 평가하기 위하여 흡착시험이 끝난 후 컬럼 내부에 잔류하고 있는 용액을 빼낸 후 증류수를 흡착시험과 똑같은 유량으로 주입해 실험을 진행하였다. 회분식 시험결과, 증류수와 산성용액을 이용한 탈착 시험의 탈착율이 거의 차이가 없어 증류수를 이용해 시험을 수행하였다.

6-3) 대형토조 흡착시험

본 연구에서 제시한 성토재의 현장 시공성을 평가하기 위해 대형토조를 제작해 흡착시험을 수행하였다. 제작한 토조의 크기는 폭 50x100cm 높이 120cm이며 이 중 30cm를 시료로 채운 후 토조 상부에서 용액을 분사해 우수를 묘사하였다. 시료의 배열은 컬럼시험과 똑같이 2.5cm의 상하부 모래층과 25cm의 시료로 구성되어 있으며 시료는 다짐시험을 통해 도출한 최대건조단위 중량의 90%로 5층으로 나누어 투입한 후 시험을 진행하였다. 실험시간은 컬럼시험과 마찬가지로 유입용액의 농도와 유출용액의 농도가 일치할 때까지 진행하였다. 추후 오염물질의 장기 유출을 검토하기 위해 흡착시험이 끝난 후 내부의 용액을 유출 시킨 후 증류수를 48시간 동안 흡착시험과 같은 유량으로 주입 후 건조를 반복해 장기적인 탈착 여부를 판단하였다.



3-4. 연구결과

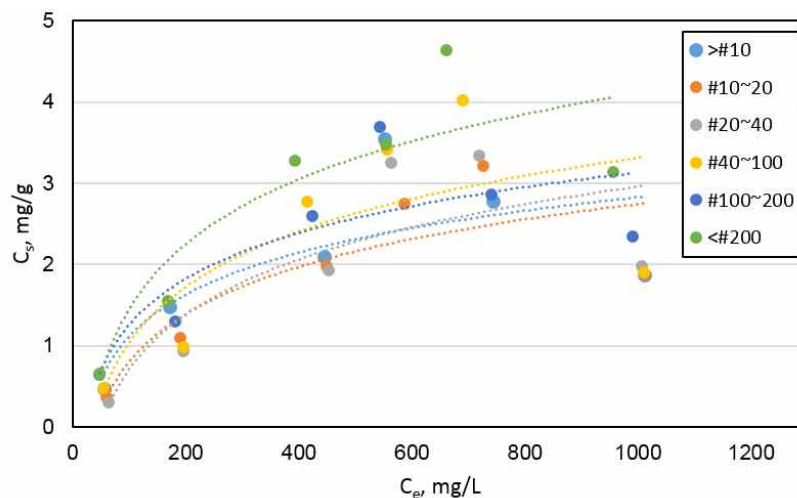
가. 1차 연도

○ 풍화토 및 흡착제 등온흡착실험(중금속)

1) 풍화토

- 입도별 흡착실험

풍화토의 흡착능을 평가하기 이전에 풍화토의 입자 크기가 흡착능에 미치는 영향을 확인하였다. 일반적으로 알려진 결과와 동일하게 입자의 크기가 작을수록 흡착능이 증가함을 확인할 수 있었다. 2mm 이상, 0.45-0.2mm, 0.15-0.075mm의 입자는 비슷한 흡착능을 갖고 있으며 입자의 크기가 작아져도 흡착능이 증가하지 않았다. 풍화토의 흡착능은 대부분 0.15mm 이하의 입자에서 발현됨을 알 수 있다.



<풍화토의 입도별 아연 이온 등온흡착 실험>

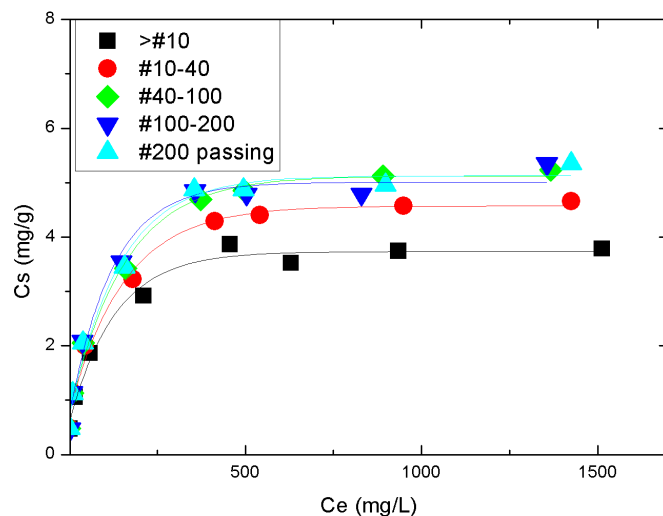
<풍화토의 입도별 아연이온 흡착 모델 분석결과>

Particle size (mm)	Langmuir model			Freundlich		
	Q_L (mg/g)	K_L (L/g)	R^2	K_F (L/g)	$1/n$	R^2
> 2	<u>1.457</u>	0.003	0.941	0.064	0.565	0.751
0.45-2	<u>1.630</u>	0.006	0.933	0.018	0.767	0.859
0.15-0.45	<u>1.763</u>	0.011	0.846	0.034	0.679	0.761
0.074-0.15	<u>2.334</u>	0.023	0.867	0.093	0.524	0.838
< 0.074	<u>2.920</u>	0.040	0.937	0.067	0.617	0.902

2) 제올라이트

- 입도별 흡착실험

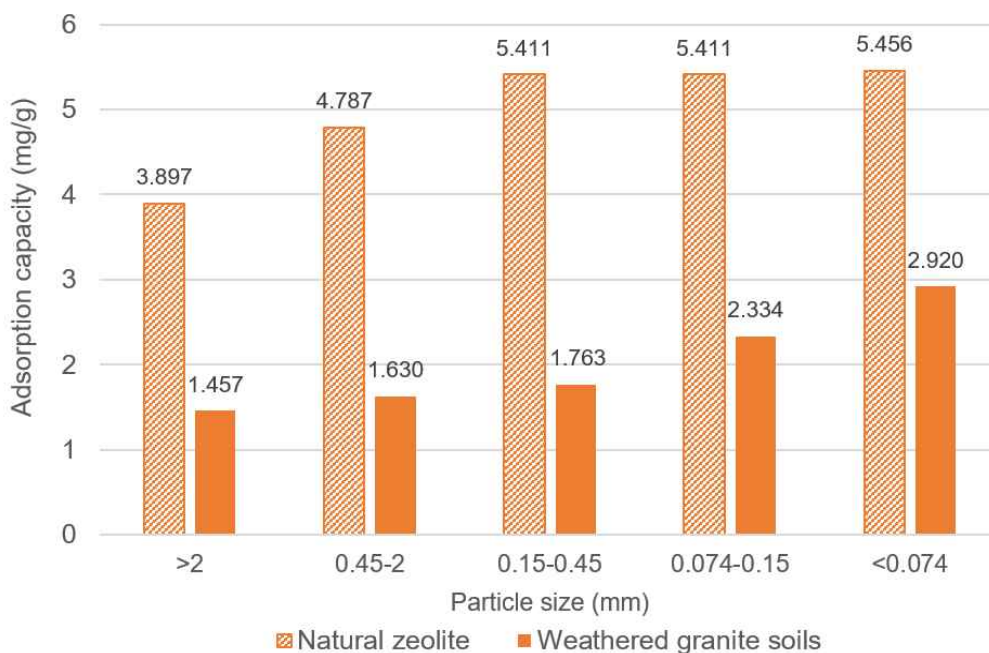
풍화토의 입도별 흡착실험과 동일하게 제올라이트 또한 입도별로 아연에 대한 흡착능을 평가하였다. 입도별 흡착능을 비교했을 때 아연의 흡착능은 3.89~5.45 mg/g로 풍화토의 약 두 배 정도로 확인되었다. 표는 제올라이트의 흡착능을 Langmuir model과 Freundlich model로 분석한 결과이다. 제올라이트는 아연 이온의 농도가 증가함에 따라 흡착량이 증가하는 추세를 보인다. 일정 농도 이상 흡착되면 일정한 값으로 수렴하는 것을 볼 때 흡착제는 단일층 흡착 거동을 보였으며, Freundlich model보다 Langmuir model이 제올라이트의 흡착 거동을 더 잘 표현하는 것으로 확인되었다. 입경이 작아질수록 흡착률이 증가하지만, 입경이 일정 이하로 작아지는 경우 큰 차이를 보이지 않는다. 이러한 경향은 Malliou 등(1994) 이 보고한 클리노프틸로라이트의 흡착능 시험과 유사한 결과를 보여준다. 중금속 흡착에 있어서 가장 주요한 요소는 양이온치환능력과 비표면적이다. 일반적인 물질은 입경이 작아짐에 따라 비표면적 및 양이온 치환능력이 증가한다(Helffeich and Kunin, 1963). 그러나 제올라이트의 경우, 내부에 공동이 많아 내부와 외부에 양이온치환능력과 비표면적이 차이를 보인다. 외부의 비표면적과 양이온치환능력은 입경이 작아짐에 따라 감소하나 외부의 양이온치환능력과 비표면적은 전체의 비표면적과 양이온치환능력에 대해서 상대적으로 작은 비중을 차지하고 있다(Guan et al., 2010). 따라서 이처럼 일정 입경 이하에서는 흡착능이 비슷해지는 경향을 보여준다. 제올라이트의 흡착능을 고려했을 때 혼합성토재의 재료로써 합당하다고 판단되며, 제올라이트는 대표적인 광물로 건설재료로써 강도를 확보할 수 있을 것으로 예상된다. 배합시 혼합성토재의 흡착능을 극대화 하기 위해서는 세립분을 치환하는 것과 동일 입경으로 혼합하는 것보다 일정 입경(0.15-0.45mm)이하의 제올라이트와 기존의 풍화토를 혼합하는 것이 더 효과적일 것으로 판단된다. 이는 일정 입경이하에서 제올라이트의 경우 흡착능의 차이가 크지 않지만, 풍화토의 경우 입경이 작아짐에 따라 흡착능이 증가해 세립분을 제거하는 것보다 더 효율이 좋다. 또한, 실제 시공현장에서 세립분을 치환하는 것과 동일입경의 풍화토와 제올라이트를 혼합하는 것보다 일정입경 이하의 제올라이트와 기존의 성토재로 사용하는 풍화토 그대로 혼합하는 것이 더 실용적일 것으로 판단된다.



<제올라이트의 입도별 아연 이온 등온흡착 실험>

<제올라이트의 입도별 아연이온 흡착 모델 분석결과>

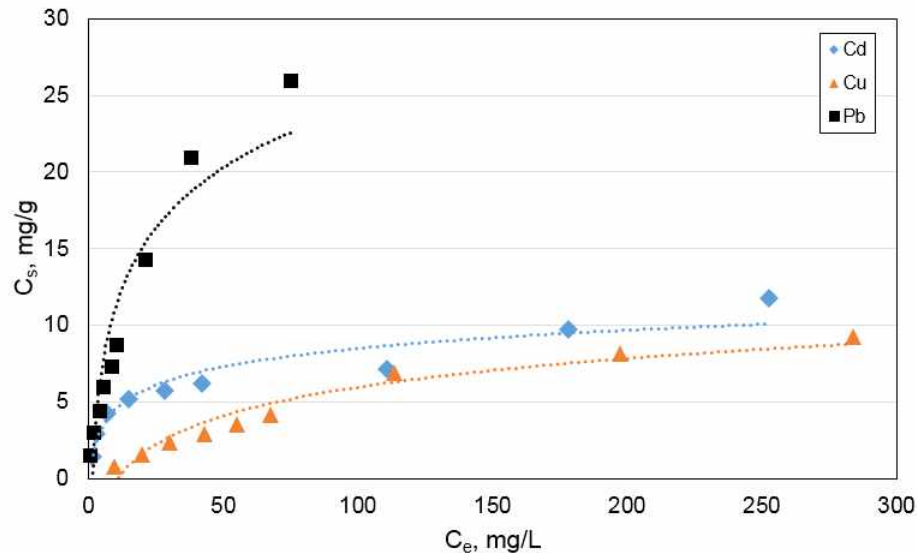
Particle size (mm)	Langmuir model			Freundlich		
	Q_L (mg/g)	K_L (L/g)	R^2	K_F (L/g)	$1/n$	R^2
> 2	<u>3.897</u>	0.023	0.998	0.443	0.324	0.966
0.45-2	<u>4.787</u>	0.022	0.998	0.554	0.320	0.981
0.15-0.45	<u>5.411</u>	0.019	0.998	0.498	0.356	0.978
0.074-0.15	<u>5.411</u>	0.019	0.996	0.460	0.372	0.953
< 0.074	<u>5.456</u>	0.019	0.997	0.479	0.364	0.970



<풍화토와 제올라이트의 입도별 아연 이온 흡착능 비교>

3) 굴패각

굴패각의 성토재로서의 활용가능성은 많은 연구진에 의해 수행되어왔다. 본 연구에서도 흡착제 후보물질로써 흡착실험을 수행하였다. 굴패각의 경우 구리와 카드뮴의 초기농도가 100이상이 되는 경우 수렴하는 경향을 보여 실험 농도 범위는 0~300 mg/L 로 설정하여 실험을 수행하였으며, 납은 다른 연구자들의 실험결과와 동일하게 월등하게 많이 제거되는 것을 확인 할 수 있다. 표 Langmuir model의 흡착능(Q_L)을 계산한 결과 납의 흡착능이 34.873으로 가장 잘 흡착되는 것을 알 수 있다. Langmuir model과 Freundlich model의 상관계수를 볼 때 구리와 카드뮴은 Langmuir model에 잘 맞으므로 단일 흡착층을 형성하는 것을 확인 할 수 있다. 납의 경우 고농도의 영역에서 흡착능이 일정한 값으로의 수렴여부를 확인하지 못해 흡착기작을 추측할 수 없을 것으로 판단된다. 실험 결과 굴패각의 문제점으로 제기되는 강도문제와, 악취, 폐색 현상을 개선할 수 있다면 하이브리드 성토제의 흡착물질로 사용할 가능성이 충분할 것으로 판단된다.



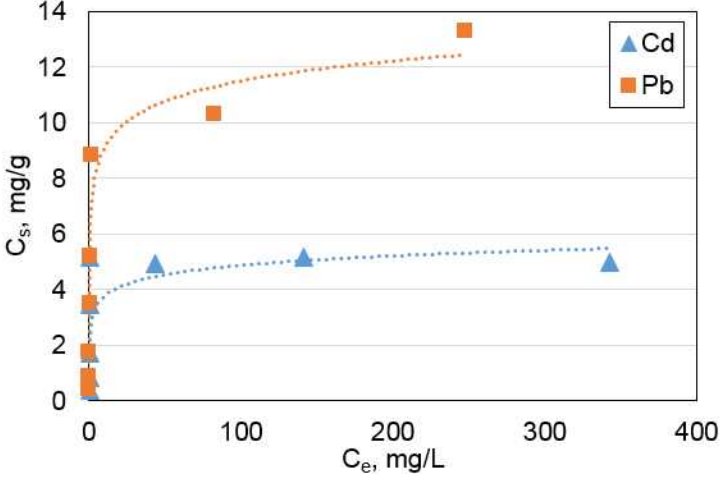
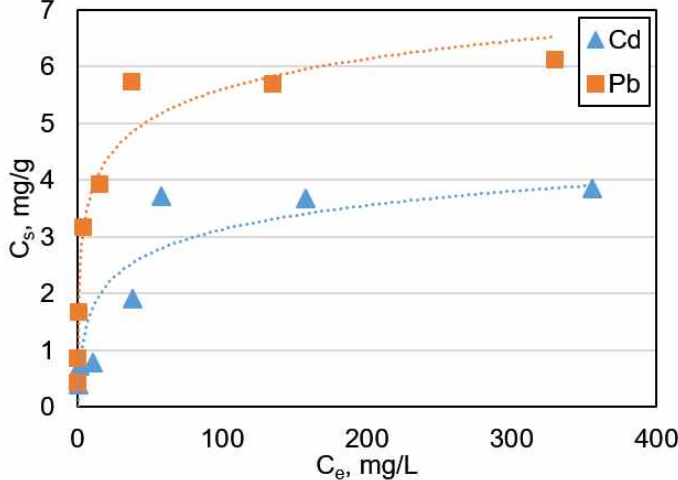
<굴패각의 카드뮴, 구리, 납 이온 등온흡착 실험>

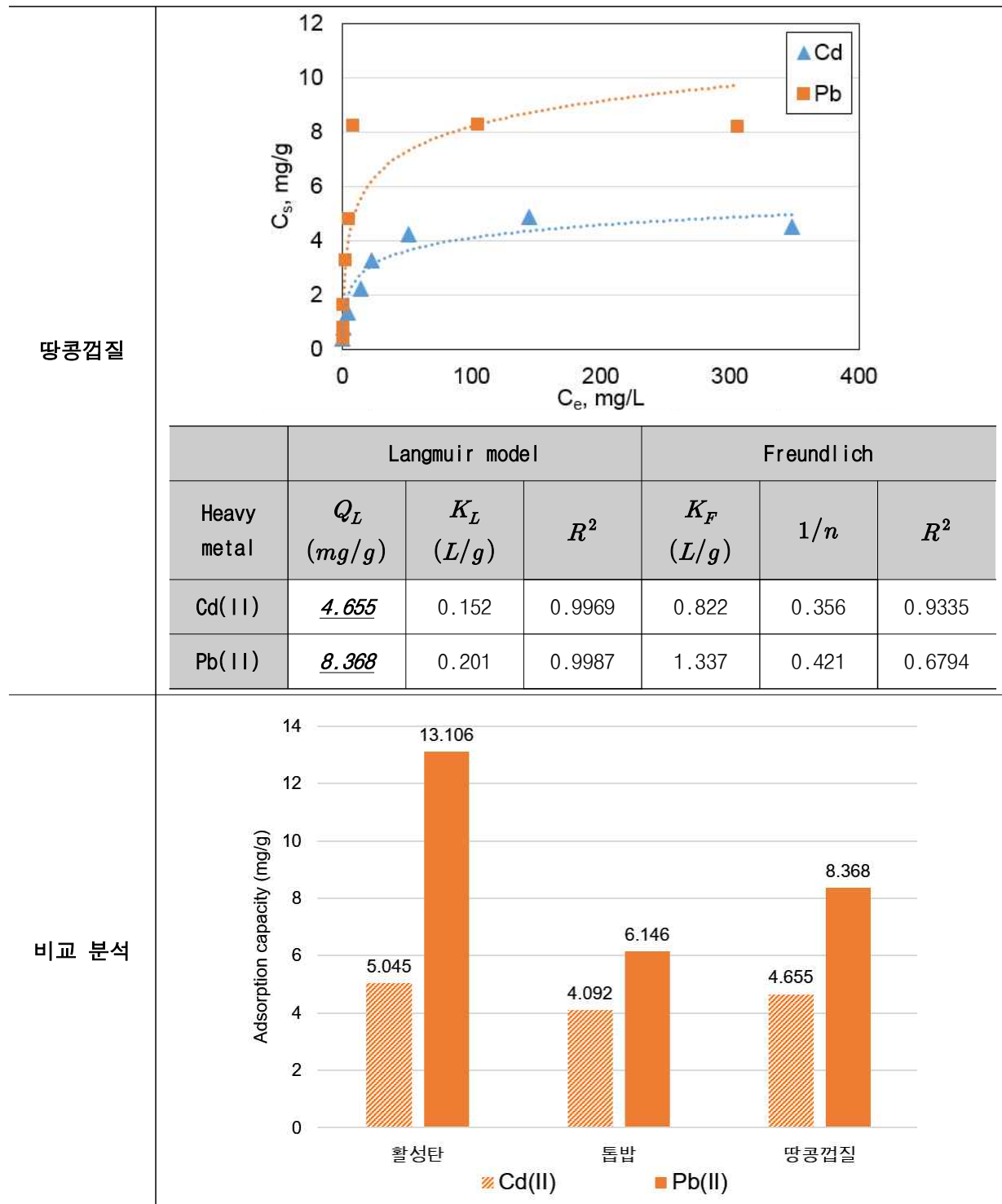
<굴패각의 카드뮴, 구리, 납 이온 흡착 모델 분석결과>

	Langmuir model			Freundlich model		
Heavy metal	Q_L (mg/g)	K_L (L/g)	R^2	K_F (L/g)	$1/n$	R^2
Cd(II)	<u>11.574</u>	0.0426	0.9468	1.781	0.336	0.9059
Cu(II)	<u>14.996</u>	0.0061	0.9804	5.350	0.726	0.9795
Pb(II)	<u>34.873</u>	0.0369	0.9643	1.812	0.651	0.9925

4) 활성탄 및 기타 산업 부산물

활성탄은 유기화합물과 중금속에 대한 흡착능이 우수한 것으로 알려져 있다. 혼합 성토재의 후보 물질로서 카드뮴과 납에 대한 흡착능을 평가하였다. 추가로 산업부산물로 발생하는 톱밥과 땅콩껍데기의 흡착능도 평가하였다. 초기 오염농도는 0~400mg/L이며, 강우 시 오염물이 용해되어 지중을 침투하는 상황을 고려해 모든 실험은 pH 5.5로 적정하여 실험을 수행하였다. 실험결과 납의 제거율이 카드뮴의 제거율보다 크게 측정되었다. 활성탄, 톱밥, 땅콩껍질은 입자 크기를 쉽게 조절할 수 있어 시공성이 용이할 것으로 판단된다. 하지만, 혼합성토재로 사용시 강도를 저하시키는 요인이 될 수 있을 것으로 판단된다. 추가적으로, 본 연구에서 목적인 산업단지와 철도부지의 사용연한을 고려했을 때, 세 가지 오염물질 모두 지중에서 분해되어 본래의 기능을 발현하지 못할 수 있을 것으로 판단된다.

흡착제	등온흡착 실험 결과 및 모델 분석					
활성탄						
	Langmuir model			Freundlich model		
	Heavy metal	Q_L (mg/g)	K_L (L/g)	R^2	K_F (L/g)	$1/n$ R^2
	Cd(II)	<u>5.045</u>	0.732	0.9995	1.827	0.205 0.3572
	Pb(II)	<u>13.106</u>	0.396	0.9915	4.438	0.263 0.8938
톱밥						
	Langmuir model			Freundlich model		
	Heavy metal	Q_L (mg/g)	K_L (L/g)	R^2	K_F (L/g)	$1/n$ R^2
	Cd(II)	<u>4.092</u>	0.047	0.983	0.489	0.385 0.906
	Pb(II)	<u>6.146</u>	0.247	0.999	1.383	0.322 0.889

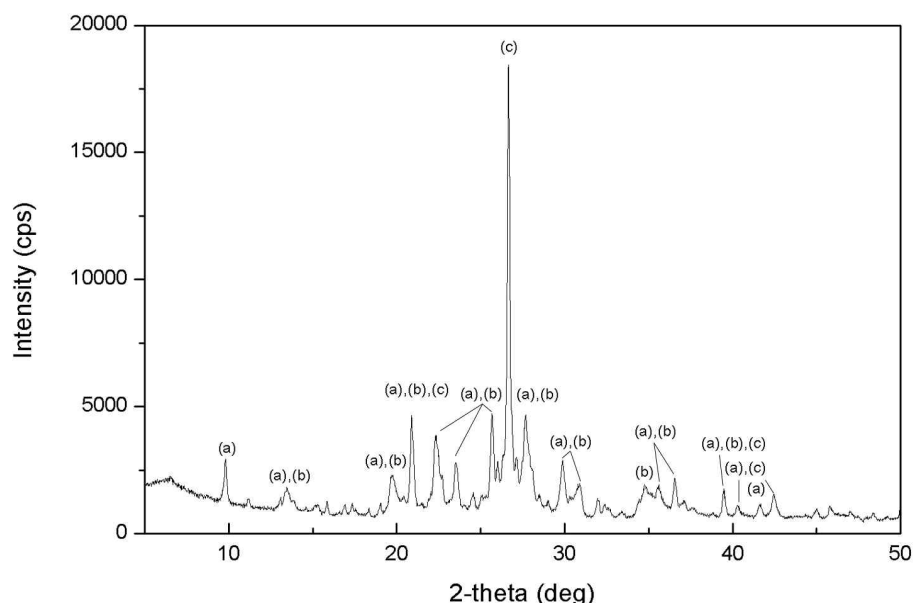


○ 풍화토와 제올라이트의 물리·화학적 특성

풍화토와 제올라이트를 혼합하기에 앞서 각각의 물리적, 화학적 특성을 분석하였다. 분석결과, 사용한 풍화토는 통일분류법상 SP에 해당하며, pH 시험결과 7로 중성을 띄고 있음을 알 수 있다. 사용한 제올라이트 역시 pH 시험결과 6.5로 중성을 띄고 있으며 Si:Al 비가 5.07:1로 일반적인 제올라이트 비율과 유사한 결과가 나타났다. 비표면적 시험결과, 제올라이트가 풍화토보다 약 4배 이상 큰 것으로 나타났고 양이온 교환능력 시험결과, 제올라이트가 풍화토보다 교환능력이 약 7배 정도 뛰어남을 보여준다. 이는 제올라이트가 다공성 물질로 오염물질 흡착에 효과적인 물질인 것을 보여준다. 비중은 상대적으로 풍화토보다 제올라이트가 작으며 이를 통해 다짐시험 결과 얻어지는 최대건조단위중량이 제올라이트 함량이 높아짐에 따라 낮아지는 경향을 설명할 수 있다.

	pH	통일분류법	화학적 구성성분	비표면적 (m ² /g)	양이온 교환능력 (meq/100g)	비중
풍화토	7	SP (C _u =8.5, C _g =0.74)	SiO ₂ - 59.55; Al ₂ O ₃ - 19.28; Na ₂ O - 1.32; Fe ₂ O ₃ - 6.68; CaO - 0.74; Na ₂ O - 1.32; K ₂ O - 2.96; LOI - 9.46	11.97	9.43	2.68
제올라이트	6.5	-	SiO ₂ - 70.87; Al ₂ O ₃ - 13.96; Na ₂ O - 2.23; Fe ₂ O ₃ - 2.72; CaO - 1.59; Na ₂ O - 3.84; K ₂ O - 3.13; LOI - 3.87	44.97	69.58	2.33

-XRD 분석을 통한 천연 제올라이트 성분 분석



<제올라이트의 XRD분석 ((a) = Heulandite-Ca, (b) = Mordenite, (c) = Silicon dioxide)>

XRD분석 결과, 본 연구에 사용된 제올라이트는 Silicon dioxide(61%), Heulandite-Ca (15.4%) Mordenite(23.8%)로 구성되어 있다. 본 연구에서 사용한 천연 제올라이트의 경우 포항 영일만 일대에서 채취한 제올라이트로 이를 사용한 다른 연구자(Kim et al., 2015)의 시험결과와 비슷한 경향을 보여준다.

○ 혼합법에 따른 혼합 성토재의 물리적, 화학적 특성

목표성능

- 물리적 특성

일반적으로 고 흡착성 물질은 다공성 물질로 물리적 특성은 일반적인 풍화토에 미치지 못한다. 이러한 흡착제와 성토재를 혼합 시 강도저하를 유발한다. 따라서 본 연구에서는 혼합 전후 물리적 특성을 비교하고, 혼합 성토재의 재료 기준 만족 여부를 확인하였다.

- 화학적 특성

본 연구에서 개발하고자 하는 고 흡착성 하이브리드 성토재는 물리적 특성인 성토재 재료 기준

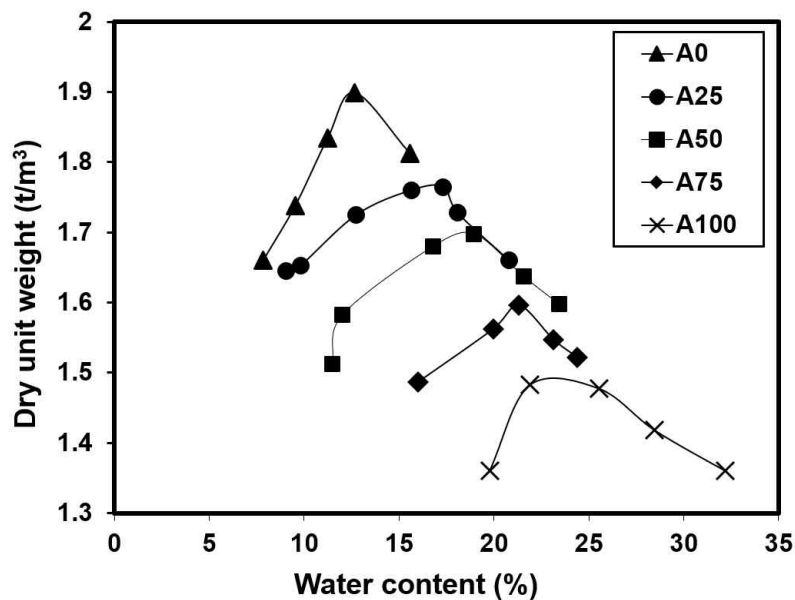
을 만족하고 동시에 오염물에 대한 높은 흡착능을 갖는 성토재를 말한다. 국내 성토재료로서 가장 흔하게 채취할 수 있는 흙은 풍화토이다. 일반적으로 풍화토는 오염물에 대한 흡착능이 거의 없다. 풍화토의 세립 분이 상대적으로 큰 입자의 흙보다 높은 흡착능을 갖지만, 그 역시 흡착능이 매우 작아 실질적으로 오염물질의 이동저감 효과가 작다. 전술한 바와 같이 Langmuir model과 Freundlich model을 이용해 흡착능을 제시하고자 한다. 흡착능은 흡착제와 오염물질에 따라 다르게 나타난다. 중금속의 흡착능은 흡착제에 따라 흡착능이 다르고, 특정 흡착제에 대한 흡착 선택성은 유사하게 나타나지만, 절대적인 수치로 제시하기에는 오염물질과 흡착제의 조합에 따라 상이한 결과가 나타난다. 따라서 본 연구에서는 고 흡착성 하이브리드 성토재의 목표성능으로 오염물질별로 기존 풍화토의 흡착능의 **2.5배 이상**으로 흡착능을 개선하고자 한다.

1) 동일 입경 혼합

- 물리적 특성

그림은 동일 입경 혼합비율별 다짐시험 결과이다. 제올라이트의 비율이 증가함에 따라 최적함수비가 증가하고, 최대건조단위 중량이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 도로 토공 흙쌓기 재료에서 규정된 노체의 최대건조단위 중량 기준은 14.71kN/m^3 이다. 최대건조단위중량이 가장 작게 측정된 제올라이트 100%(시료명 A100) 또한 노체의 규정을 만족한다.

표는 동일 입경 혼합비율별 직접 전단시험 결과이다. 제올라이트의 비율이 증가함에 따라 마찰각이 감소하는 경향을 확인할 수 있으나, 성토재의 재료 요건은 만족한다.



<동일 입경 혼합비율별 다짐시험 결과>

<동일 입경 혼합비율별 전단 강도 정수>

	A0	A25	A50	A75	A100
ϕ	47.60	42.01	46.07	40.48	39.78
c	23.59	48.91	9.019	44.06	34.69

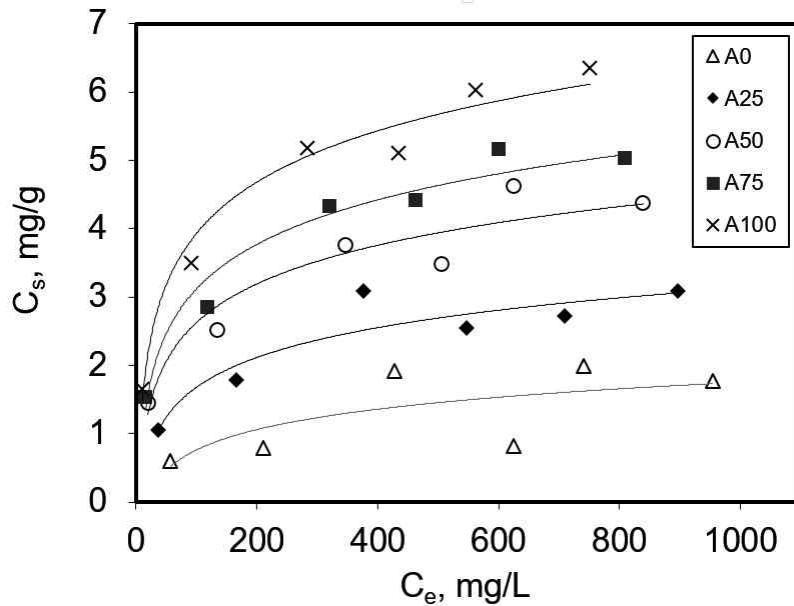
- 화학적 특성

혼합비율별로 아연에 대한 흡착능을 확인한 결과 예상한 바와 같이 제올라이트의 비율이 증가함에 따라 흡착능이 증가함을 알 수 있다. 풍화토와 혼합되지 않은 제올라이트(A100)의 흡착능이 6.674mg/g 로 측정되었으며, 혼합비율이 감소함에 따라 선형적으로 흡착능이 감소하였다.

제올라이트의 혼합비율을 증가시켜 흡착능을 확보할 수 있으나, 시공성, 경제성을 고려하지 않

을 수 없다. 제올라이트 25%인 시료(A25)의 흡착능은 제올라이트를 혼합하지 않은 풍화토(A0) 보다 약 1.6배 증가한 것을 알 수 있다. 이때 첨가된 굵은 입자의 제올라이트의 비율을 감소시켜 혼합하거나, 1mm 이하의 제올라이트만 사용해 혼합한다면 혼합 성토재의 흡착능을 보다 효율적으로 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다.

등온흡착실험결과 흡착기작은 Langmuir model과 Freundlich model에 모두 잘 맞는 것을 확인할 수 있다. 제올라이트와 풍화토를 혼합해 흡착 기작을 명확히 규명할 수 없지만, 흡착능을 명확히 수치적으로 표현하기 위해 흡착능은 Langmuir model로 제시해 표에 정리하였다.



<동일 입경 혼합비율별 아연 이온 등온흡착 실험>

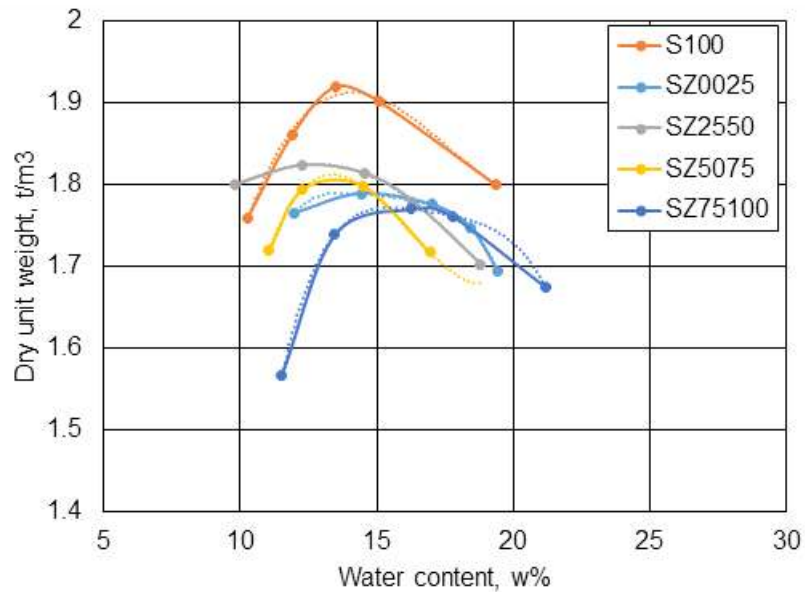
<동일 입경 혼합비율별 아연이온 흡착 모델 분석결과>

Heavy metal	Langmuir model			Freundlich model		
	Q_L (mg/g)	K_L (L/g)	R^2	K_F (L/g)	$1/n$	R^2
A0	<u>1.958</u>	0.016	0.505	0.123	0.383	0.569
A25	<u>3.274</u>	0.109	0.972	0.327	0.336	0.910
A50	<u>4.798</u>	0.249	0.965	0.583	0.306	0.966
A75	<u>5.518</u>	0.383	0.988	0.652	0.315	0.987
A100	<u>6.674</u>	0.623	0.983	0.816	0.314	0.989

2) 부분치환

- 물리적 특성

앞서 평가한 입도별 풍화토와 제올라이트의 흡착능과 동일 입경 혼합 시료의 흡착능을 고려해 혼합비율을 25%로 입도별로 부분 치환한 시료의 물리적, 화학적 특성을 평가하였다. 다짐시험 결과 제올라이트가 혼합될 경우 치환한 제올라이트의 입도와 관계없이 모두 최대건조단위 중량이 감소하였다. 실험한 모든 시료의 최대건조 단위 중량은 $1.7t/m^3$ 이상으로 입도와 관계없이 성토재 재료 기준을 만족하였다. 부분치환 시료의 마찰각은 모두 30° 이상으로 성토재로서 충분한 강도를 발현할 수 있을 것으로 판단된다.



<입도별 부분치환 다짐시험 결과>

<입도별 부분치환 시료의 최적함수비, 건조단위 중량>

	S100	SZ0025	SZ2550	SZ5075	SZ75100
$\gamma_{d,max}$ (t/m^3)	<u>1.92</u>	<u>1.79</u>	<u>1.83</u>	<u>1.79</u>	<u>1.77</u>
w_{opt} (%)	13.2	14.3	12.3	16	17.2

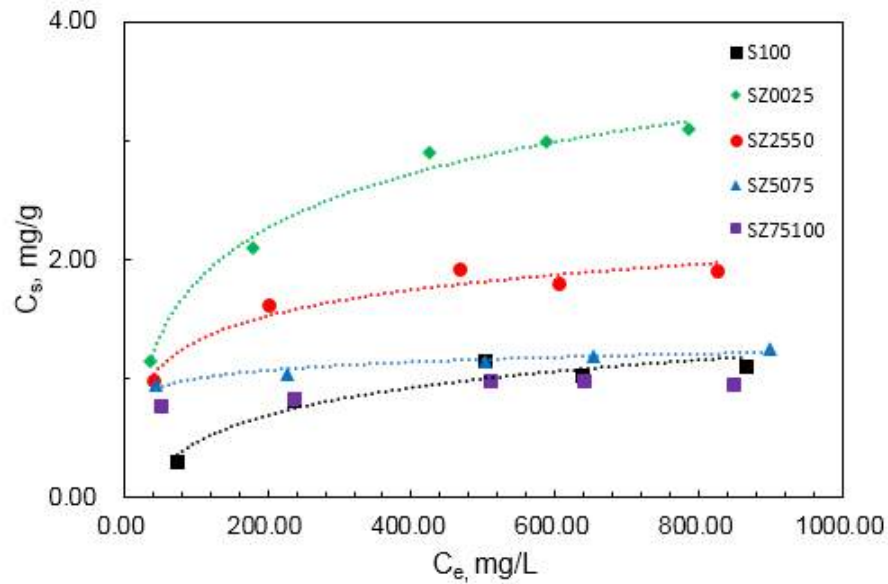
<입도별 부분치환 시료의 전단 강도 정수>

	S100	SZ00-25	SZ25-50	SZ50-75	SZ75-100
치환 입경	-	< 0.075mm	0.075mm - 0.6mm	0.6mm - 2mm	2mm - 4.75mm
ϕ	<u>42.00</u>	<u>35.50</u>	<u>40.83</u>	<u>38.38</u>	<u>44.89</u>
c	34.44	45.46	15.15	38.57	22.04

- 화학적 특성

부분 치환한 시료의 아연과 납에 대한 등온흡착실험 결과를 도시하였으며, 앞서 수행한 실험과 동일하게 흡착기작은 Langmuir model과 Freundlich model로 평가하였다. 앞선 실험의 결과를 바탕으로 유추했듯이 세립 분을 치환했을 때 흡착능이 가장 많이 증가했으며 상대적으로 큰 입경의 제올라이트를 치환했을 때 흡착능이 향상되는 정도가 줄어들었다.

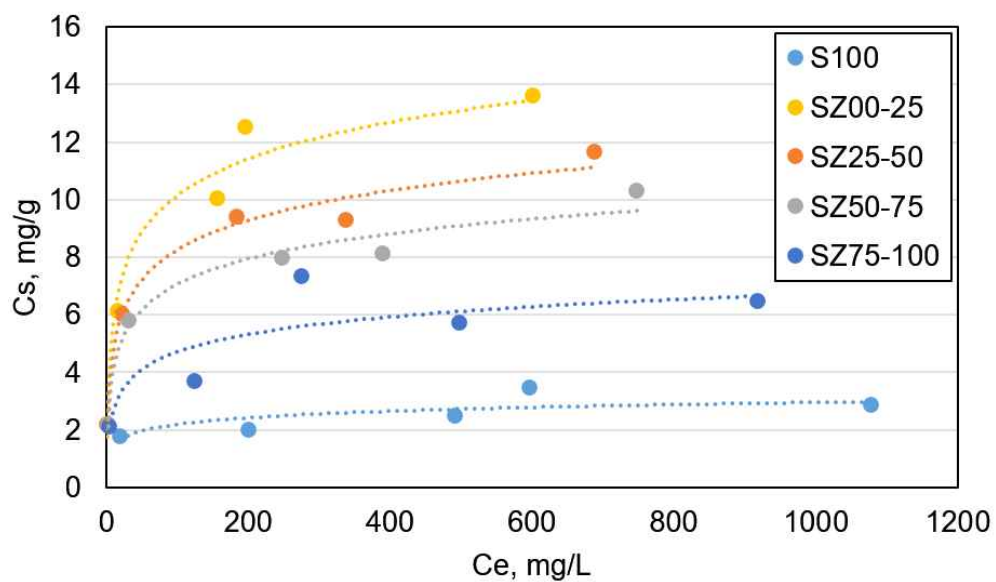
아연은 앞서 문헌연구에 정리한 Zamzow 등 (1992)의 연구와 동일하게 납보다 흡착이 잘 되지 않는 것을 확인 할 수 있었다. 본 연구의 최종 목표는 강우 시 오염물이 용해되어 지중 내로 침투할 때의 오염 심도의 저감효과를 확인하는 것으로 회분식 반응은 차년도 실험의 토대가 되는 자료이다. 하지만 회분식 반응으로는 오염 심도 저감효과를 정성적으로만 유추할 수 있으므로 차년도에는 컬럼, 강우 모사 실험 등을 수행해 더욱 정량적으로 목표한 연구결과를 도출할 계획이다.



<부분치환 입경 별 아연 이온 등온흡착 실험>

<입도별 부분치환 시료의 아연 이온 흡착 모델 분석결과>

Zn(II)	Langmuir model			Freundlich model		
시료	Q_L (mg/g)	K_L (L/g)	R^2	K_F (L/g)	$1/n$	R^2
S100	1.406	0.005	0.963	0.036	0.531	0.897
SZ00-25	3.448	0.011	0.883	0.361	0.333	0.959
SZ25-50	1.988	0.024	0.997	0.448	0.225	0.768
SZ50-75	1.279	0.027	0.997	0.651	0.093	0.960
SZ75-100	0.998	0.041	0.997	0.518	0.095	0.897



<부분치환 입경별 납 등온흡착 실험>

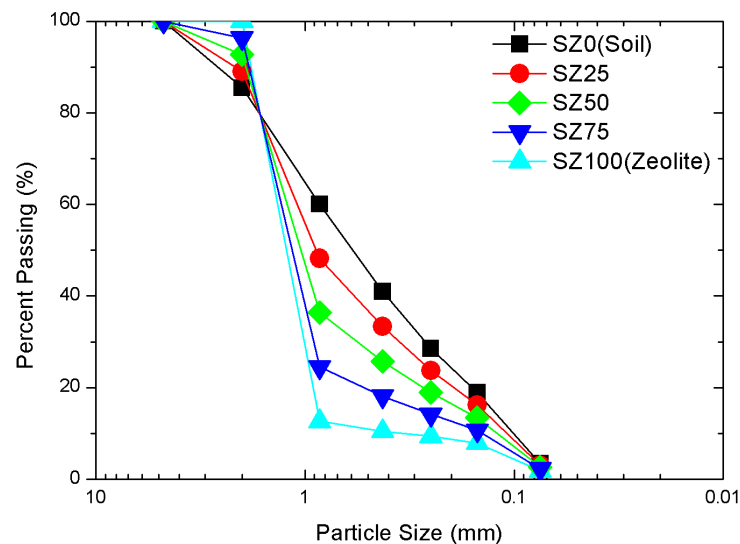
<입도별 부분치환 시료의 납 이온 흡착 모델 분석결과>

Pb(II)	Langmuir model			Freundlich model		
시료	Q_L (mg/g)	K_L (L/g)	R^2	K_F (L/g)	$1/n$	R^2
S100	<u>3.070</u>	0.021	0.965	1.122	0.140	0.676
SZ00-25	<u>13.986</u>	0.039	0.993	2.362	0.293	0.959
SZ25-50	<u>11.696</u>	0.031	0.985	2.162	0.267	0.768
SZ50-75	<u>10.299</u>	0.024	0.989	2.004	0.250	0.960
SZ75-100	<u>6.636</u>	0.026	0.979	1.502	0.225	0.897

3) 일정 입경이하의 제올라이트와 풍화토 혼합

- 물리적 특성

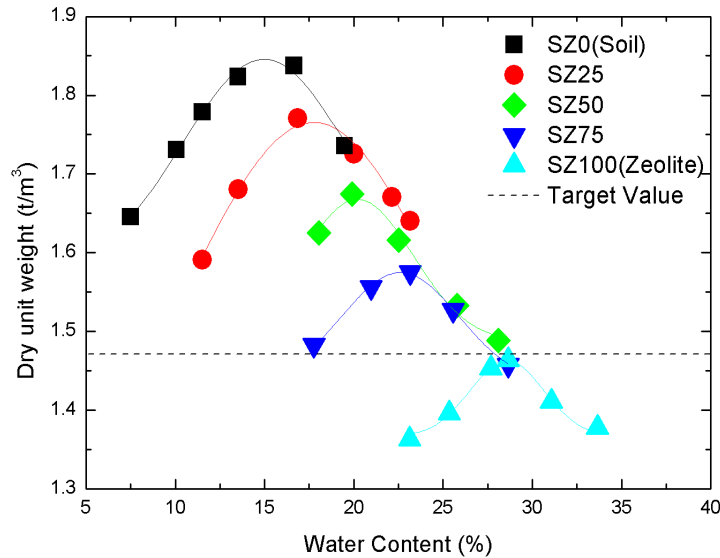
동일 입경이나 부분치환의 경우, 현장에서 실제로 시공하기에 적합하지 않다고 판단된다. 이에 동일 입경 혼합한 결과, 1mm 이하의 제올라이트만 사용해 혼합한다면 혼합 성토재의 흡착능을 보다 효율적으로 증가시킬 수 있을 것으로 판단되어 1mm 이하의 제올라이트와 기존의 풍화토와 혼합해 시험을 진행하였다. 다음 그림은 풍화토와 제올라이트 함량을 증가시키며 혼합한 시료들의 입도 분포표이다.



<일정 입경 이하 배합 배합비별 입도 분포표>

제올라이트 배합비를 25~100%까지 증가시키며 연구를 진행하였으며, 각 시료는 제올라이트 비율에 따라 25%의 제올라이트 함량일 때 SZ25로 명명하였다. 다음 그림은 다짐시험 결과이다. 제올라이트의 함량이 증가함에 따라 최적함수비가 증가하고, 최대건조단위 중량이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 도로 토공 흡쌍기 재료에서 규정된 노체의 최대건조단위 중량 기준은 14.71kN/m³이다. 제올라이트를 포함한 모든 시료가 규정보다 높은 값을 나타냈으나 실제로 시공 시에는 최대가 아닌 다짐도 90%로 시공한다. 따라서, 제올라이트 함량이 75%인 SZ75부터는 규정을 만족하지 못한다고 판단된다.

표는 일정 입경 이하 혼합비율별 직접 전단시험 결과이다. 제올라이트의 비율이 증가함에 따라 마찰각이 감소하는 경향을 확인할 수 있으나, 성토재의 재료 요건은 만족한다.



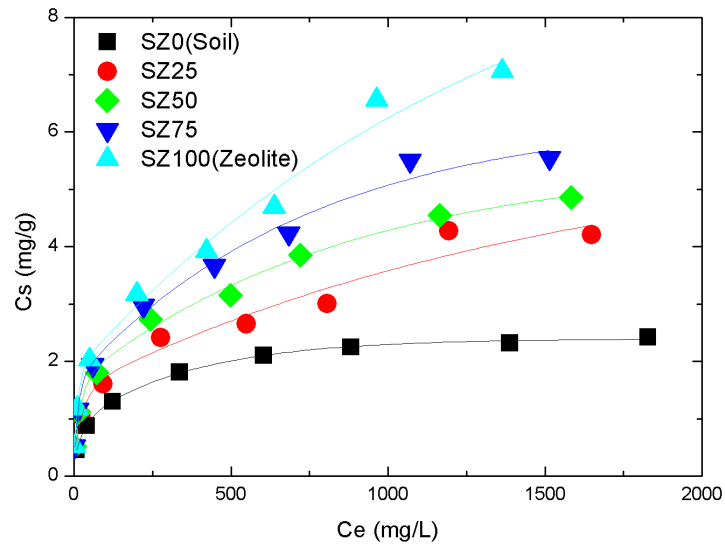
<일정 입경 이하 제올라이트-풍화토 배합비별 다짐시험 결과>

<일정 입경 이하 제올라이트-풍화토 배합비별 전단 강도 정수>

	SZ0	SZ25	SZ50	SZ75	SZ100
ϕ	<u>40.2</u>	<u>37.3</u>	<u>35.8</u>	<u>31.7</u>	<u>31.6</u>
c	18.3	30.6	32.5	31.2	34.6

- 화학적 특성

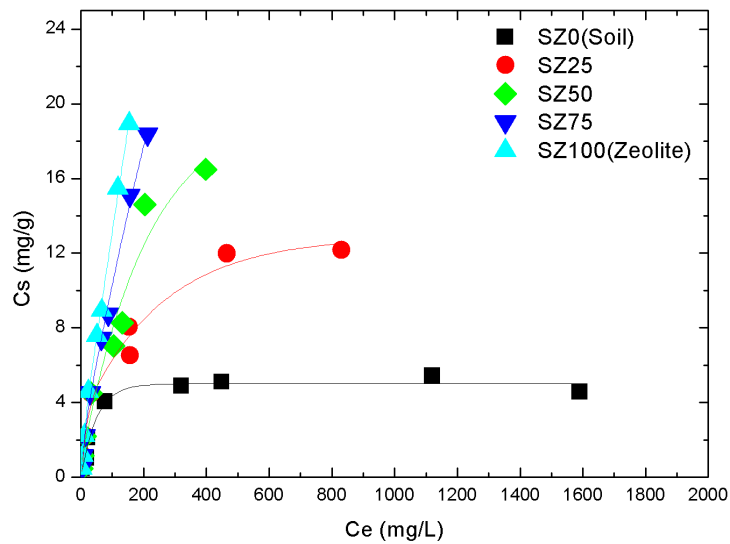
일정 입경 이하의 제올라이트와 기존의 풍화토를 배합한 시료의 아연과 납에 대한 등온흡착실험 결과를 도시하였으며, 앞서 수행한 실험과 동일하게 흡착기작은 Langmuir model과 Freundlich model로 평가하였다. 혼합물들의 아연과 납 흡착 곡선은 아래 그림들과 같다. 아연과 납 수용액 모두 제올라이트의 함량이 높아짐에 따라 높아졌다. 이는 제올라이트의 양이온 교환능력이 흙 시료보다 상대적으로 높기 때문으로 보인다. 납과 아연의 흡착 그래프를 비교해봤을 때, 흙과 제올라이트 모두 납의 흡착률이 아연보다 월등히 높은 것을 알 수 있다. 이는 납의 수화이온반경이 아연에 비해 작으므로 제올라이트 및 토양의 양이온과 교환이 더 잘 이루어져서라고 생각된다. 이러한 경향은 흙과 제올라이트 모두, 앞서 문헌 조사를 통해 연구한 다른 여러 연구자의 결과와 같은 경향을 보인다(Lim, 1999, Perić et al., 2004, Zamzow and Murphy, 1992). 아연의 경우, 랭뮤어 식보다는 프로인틀리히식에 더 비슷한 경향을 보이는 것을 확인했다. 혼합물들의 납 흡착에 있어서 SZ0과 SZ25의 경우는 랭뮤어가, 나머지 혼합물 및 SZ100(제올라이트)의 경우에는 프로인틀리히식과 더 비슷한 경향을 나타냈다. 이는 Erdem등(2004)이나 Ören등(2006)과는 다른결과인데, 이는 낮은 농도에서는 랭뮤어식이 더 정확하나 본 연구에서는 낮은농도 뿐만아니라 2000mg/L 까지의 고농도로 실험을 진행하여 프로인틀리히 식과 더 비슷한 결과를 얻은 것으로 보이며 이러한 결과는 Shin등(2014)의 실험결과와 일치한다. 납의 흡착능의 경우 아연보다 월등히 뛰어남을 알 수 있다. 이러한 결과는 Perić등이나 Zamzow and Murphy의 연구결과와 일치한 결과이다. 회분식 시험의 경우 오염물질에 대한 제올라이트-풍화토의 흡착능의 정성적으로만 유추할 수 있으므로, 2차연도에서 1-D 우수조건에서의 컬럼시험과 대형토조 시험을 통해 보다 현장과 유사한 조건에서의 오염 침투 저감효과를 검토했다.



<일정 입경 이하 제올라이트-풍화토 배합비별 아연 이온 등온흡착 실험>

<일정 입경 이하 제올라이트-풍화토 배합비별 아연 이온 흡착 모델 분석결과>

Zn(II)	Langmuir Model			Freundlich Model		
배합비(시료명)	Q_L (mg/g)	K_L (L/g)	R^2	K_F (L/g)	$1/n$	R^2
SZ0	<u>2.44</u>	0.011	0.96	0.32	0.26	0.96
SZ25	<u>4.44</u>	0.005	0.86	0.36	0.33	0.96
SZ50	<u>4.98</u>	0.006	0.91	0.37	0.34	1.00
SZ75	<u>5.96</u>	0.005	0.91	0.44	0.35	0.99
SZ100	<u>8.63</u>	0.003	0.90	0.47	0.41	0.98



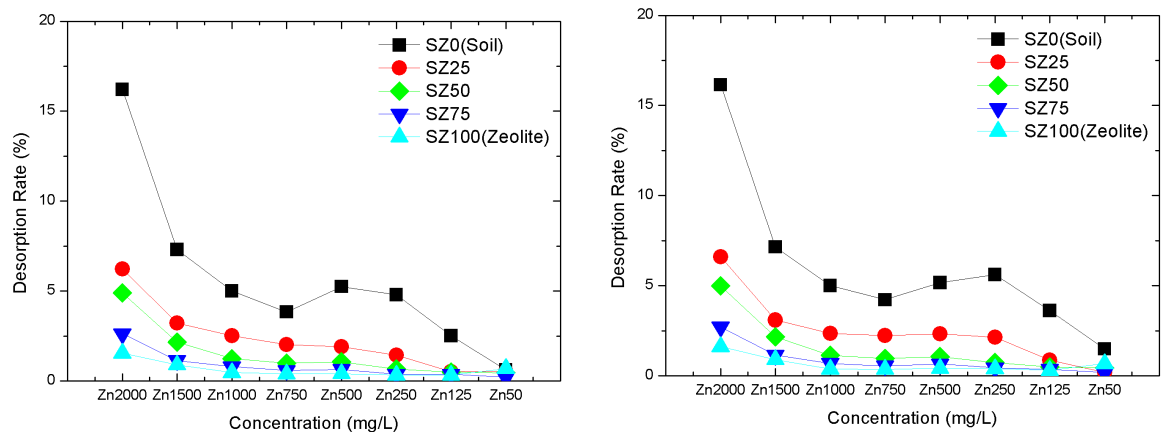
<일정 입경 이하 제올라이트-풍화토 배합비별 납 등온흡착 실험>

<일정 입경 이하 제올라이트-풍화토 배합비별 납 이온 흡착 모델 분석결과>

Pb(II)	Langmuir Model			Freundlich Model		
배합비(시료명)	Q_L (mg/g)	K_L (L/g)	R^2	K_F (L/g)	$1/n$	R^2
SZ0	<u>4.92</u>	0.055	0.99	0.32	0.49	0.89
SZ25	<u>13.57</u>	0.011	0.99	0.38	0.57	0.94
SZ50	<u>22.08</u>	0.007	0.90	0.28	0.71	0.97
SZ75	<u>33.78</u>	0.005	0.88	0.24	0.82	0.99
SZ100	<u>45.87</u>	0.004	0.88	0.24	0.88	0.99

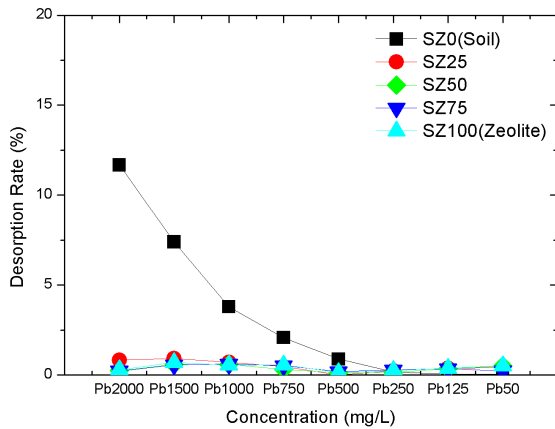
추후 오염물질이 흡착된 혼합물의 유해성을 평가하기 위해 아연과 납으로 오염된 혼합물들을 이용하여 탈착 시험을 수행하였다. 탈착 시험은 각각 증류수와 산성용액으로 수행하였으나 증류수와 산성용액 사이의 결과는 큰 차이를 보이지 않았다. 탈착율은 흡착시험에서 계산한 흡착된 양을 바탕으로 계산하였으며 계산한 식은 다음과 같다. 아연의 경우, 기존 풍화토의 경우 탈착율이 거의 모든 농도에서 5% 이상을 유지했으나 제올라이트와 혼합한 혼합물의 경우 최소 50% 이하로 급격하게 탈착율이 감소한 것을 알 수 있다. 납의 경우에는 고농도로 실험했을 경우 풍화토에서 탈착이 많이 일어났으나 저농도에서는 탈착이 많이 일어나지 않았으며, 제올라이트의 혼합한 혼합물의 경우 탈착이 거의 일어나지 않았다. 납이 아연보다 탈착이 잘 이루어지지 않는 이러한 시험결과와 Martinez(2000)가 제시한 시험결과와 비슷한 경향이다. Plassard(2000)에 따르면 풍화토의 경우 흡착되는 양에 비하여 탈착이 많이 일어나며 이는 본 연구의 실험결과와 유사한 경향을 보인다. 이러한 경향은 풍화토가 탈착으로 인한 추가오염에 취약하다고 판단된다. 시험결과 제올라이트-풍화토 혼합물은 탈착에 대한 저항성이 기존의 풍화토에 비해 월등함으로 이를 사용했을 경우, 오염물질 유출을 통한 추가오염에 대한 위험성을 효과적으로 줄일 수 있다고 판단된다.

$$\text{탈착율} = \frac{C_s(\text{탈착된 양})}{C_s(\text{흡착된 양})}$$

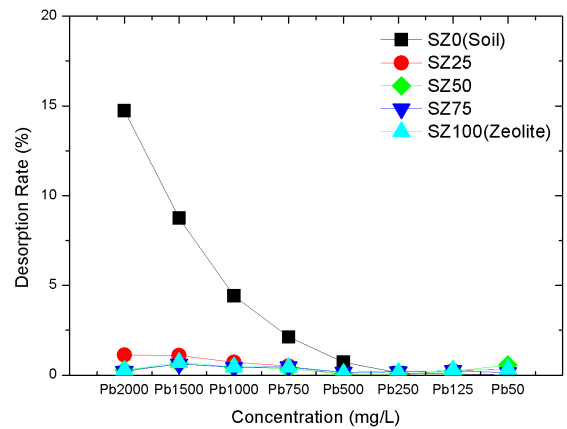


(a) (b)
<일정 입경 이하 제올라이트-풍화토 배합비별 아연 등온 탈착 실험>

(a) 증류수 (b) 산성용액



(a)



(b)

<일정 입경 이하 제올라이트-풍화토 배합비별 납 등온 탈착 실험>

(a) 증류수 (b) 산성용액

○ 요약

다양한 흡착 후보 물질의 흡착능을 평가한 결과, 본 연구에서 등온흡착실험을 수행한 흡착제는 모두 성토재와 혼합해 충분한 흡착능을 발현할 것으로 판단된다. 하지만, 굴폐각은 그간 제기되어 온 악취문제와 폐색효과뿐 만 아니라 성토재가 요구하는 강도적인 측면에서 부족하다. 또한, 활성탄, 톱밥, 땅콩껍질 역시 충분한 흡착능은 보여주지만 성토재의 기본 조건인 지지력을 발휘하기 힘들다. 따라서 이러한 물질들은 혼합성토재료로 혼합 여부를 재고해야 할 여지가 있다. 성토재 재료의 규정 중 유기물 함유량을 제한하는 조항과 더불어 공학적 안정성을 저해할 우려로 인해 사용 가능성은 장기적 실험을 통해 제시해야 할 것으로 판단된다. 제올라이트의 경우 천연광물임으로 전술한 사항에 저촉되는 사항이 없으므로 풍화토와 다양한 혼합방법과 혼합비율별로 성토재로서의 활용 가능성을 평가하였으며, 일정 입경이하의 제올라이트와 결합한 실험결과 기존의 풍화토와 비교했을 때 25%로 배합한 SZ25의 경우 기존 성토재인 풍화토보다, 아연흡착은 1.82배, 납 흡착은 2.76배 증가하였다. 또한, 오염물질이 흡착된 혼합물의 유해성을 검토한 결과 제올라이트를 함유한 혼합물은 기존의 풍화토에 비해 아연은 탈착률이 50% 이하로 감소하였으며, 납은 풍화토는 탈착이 일어났지만, 혼합물은 탈착이 거의 일어나지 않았다.

경제성 또한 고려하지 않을 수 없는 요소이다. 천연 제올라이트는 재료 단가, 운송비용을 고려한다면 동일 입경 혼합법으로 50% 이상 혼합하는 것은 경제적이지 않은 방법으로 사료된다. 현장 시공성을 고려했을 때, 풍화토와 제올라이트를 동일 입경으로 현장에서 배합하기는 쉽지 않으며 같은 크기의 풍화토를 치환하는 것 역시 현장에서 사용하기엔 어려울 것으로 보인다. 극히 미량의 세립 분을 함유한 풍화토가 아니라면 세립 분을 치환하는 방법은 현실적인 방안이 아니며 현장에서 어떠한 크기를 가진 풍화토를 구분하는 것은 실용적인 방법이 아니다. 실험결과 제올라이트의 흡착능은 일정크기 이하의 입자에서 수렴하는 경향을 보이므로, 일정크기 이하의 제올라이트와 기존의 풍화토를 혼합하는 것이 가장 실용적인 것으로 판단된다. 실험결과, 제올라이트-풍화토 혼합물은 전단 저항, 최대건조단위 중량, 흡착능 모두 본 연구에서 목표한 수치 이상의 값을 확보할 수 있는 것으로 확인하였다. 경제성, 시공성, 공학적 안정성 및 흡착능을 고려했을 때, 일정 입경 이하의 제올라이트와 기존의 풍화토를 배합비 25%로 혼합하는 것이 가장 최적의 방법이라 판단된다.

나. 2차 연도

○ 풍화토 및 흡착제 등온흡착실험(유류)

1차연도는 오염물질 중 중금속에 대한 실험만을 진행하였으나 국내 산업단지의 경우 중금속뿐만 아니라 유류오염에도 많이 노출되어 있다. 이에 유류오염에 대한 실험을 추가로 실시하였다. 그러나 중금속과 다르게 제올라이트는 유류 흡착에 적합한 물질이 아니다. 따라서 제올라이트가 아닌

새로운 흡착제를 선정해 상부의 산업단지 종류에 따라 적합한 흡착제를 혼합한 성토재를 사용하는 것이 합리적이라 판단된다.

1) 활성탄

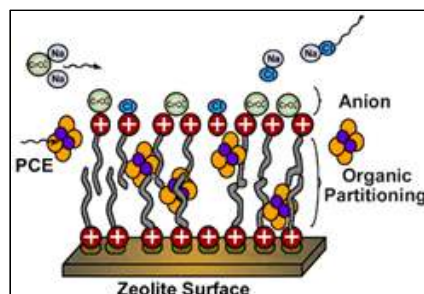
활성탄의 경우 1차연도에서 중금속오염에 관해서 검토한 바가 있다. 활성탄은 특히 유기화합물에 대한 흡착능이 우수한 것으로 알려져 있으며 많은 연구가 진행되었다. 그러나 활성탄의 경우 앞서 중금속 시험에서 언급한 바처럼 지중에서 분해되거나 성토재로써 사용하기에는 강도가 매우 약하고 밀도가 매우 작아 적합하지 않다고 판단된다.

<활성탄의 유류 흡착에 관한 기존 연구>

연구자	활성탄 종류(재료)	연구결과
Daifullah and Girgis(2003)	왕겨탄(Rice husk)으로 활성탄 제조	벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌에 대한 흡착능 각각 8.8, 5.0, 5.6, 6.2 (mg/g) 발현
Daifullah and Girgis(2003)	복숭아씨로 활성탄 제조	5벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌에 대한 흡착능 각각 4.76, 5.50, 6.75, 7.33 (mg/g) 발현
Wibowo et al.(2007)	기존의 상업활성탄에 열처리	벤젠과 톨루엔에 대한 흡착능 각각 268.9, 279.16 (mg/g) 발현
Jodeh et al.(2015)	야자 활성탄	벤젠, 톨루엔, 자일렌에 대한 흡착능 각각 5.47, 5.53, 5.19 (mg/g) 발현

2) 계면활성제를 이용한 제올라이트 표면 개질

제올라이트의 경우, 중금속이온에 대한 흡착능은 뛰어나지만 유류흡착에는 취약한 특성을 지니고 있다. 이에 계면활성제(HDTMA, CPB등)를 활용하여 제올라이트의 표면 개질을 해 유류흡착능을 높인다면 유류 흡착성 성토재료로써 사용 가능할 것으로 보인다. 제올라이트의 계면활성제를 이용한 표면 개질은 Bowman(2003), Sullivan(1998), Li(1999) 등 많은 연구가 진행된 바가 있다. 제올라이트의 표면 개질은 제올라이트 표면의 양이온들을 HDTMA, CPB등 계면활성제를 부착하고 이러한 계면활성제가 유류와 흡착을 하게 만들어 유류에 대한 흡착능을 증가시킨다. 그러나 성토재료로써 개질된 제올라이트를 사용하기에는 제올라이트 표면 개질에 사용하는 계면활성제가 탈착될 경우 오히려 이로 인하여 환경오염이 일어날 위험이 있으며 실험에 사용된 HDTMA, CPB등 계면활성제가 상대적으로 고가이며 제올라이트 역시 구매해야 하므로 경제적으로 적합하지 않다. 만약, 저렴한 계 제올라이트를 개질하거나 재활용자원을 개질해 사용한다면 좋은 대책이 되리라 판단된다.



<계면활성제를 이용한 제올라이트 표면 개질>

3) 페타이어

국토교통부에 따르면 한국에서 한해에 발생하는 페타이어들은 3000만 개에 이르며, 페타이어를 처리하는 것은 국가적인 문제로 대두되고 있다. 페타이어를 활용한다면 재활용자원을 활용한다는 측면과 경제적으로 매우 저렴해 흡착능이 뛰어나다면 성토재료로써 사용하기에 매우 적합하다고 판단된다. 국내외적으로 페타이어연구는 활발하게 진행되고 있으며 Tiwari(2012), Lee(1999), Zornberg(2004) 등이 제시한 바에 따르면, 페타이어의 압축성과 투수성등이 뛰어나며, Ghazavi (2004)는 옹벽에 가벼운 뒷채움제로 페타이어를 제시한 바가 있다. 그 외에 유류 흡착에 대한 연구와 순환골재를 성토재료 사용하기 위한 기준은 아래의 표와 같다.

<페타이어의 유류 흡착에 관한 기존 연구>

연구자	연구내용	연구결과
Bolglaienko and Tansel (2017)	분쇄한 페타이어를 활용한 유류 흡착	입자 크기 0.115mm의 타이어를 활용하여 흡착능 4.4mg/g 발현 (활성탄 5.00mg/g)
Alamo-Nole et al. (2011)	타이어를 이용해 톨루엔과 자일렌 제거	50ppm에서 톨루엔과 자일렌 각각 60%, 81% 제거
Kershaw et al. (1997)	타이어를 활용해 벤젠과 자일렌 제거	벤젠과 자일렌에 대한 흡착능 각각 1.3mg/g, 8.2mg/g
Lin et al. (2008)	분말 타이어를 활용해 유출된 유류에 대한 흡착	2.2g/g의 유류흡착능 발현

<흙쌓기용 순환 골재의 품질기준>

(도로공사표준시방서, 2016)

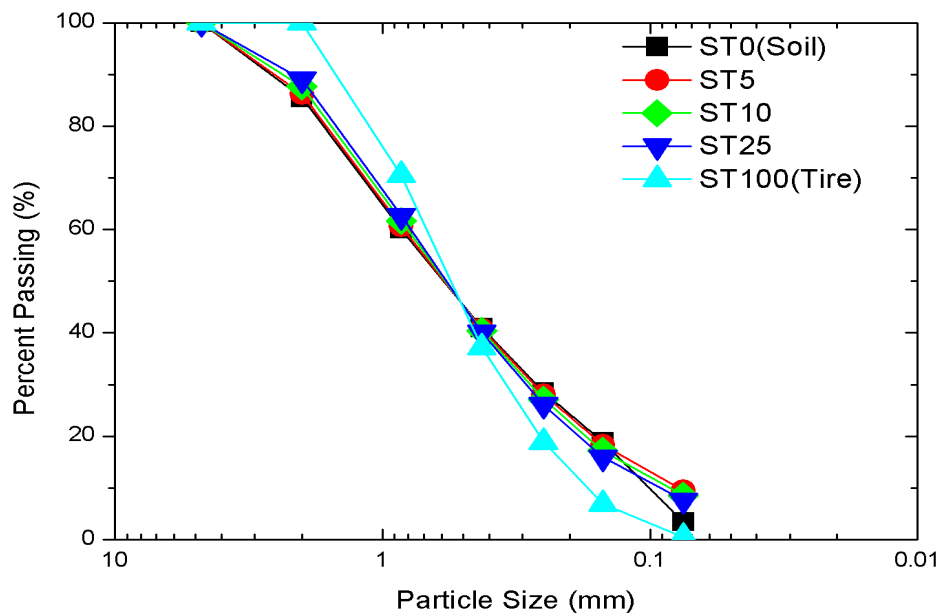
품질목표	노체	노상	비 고
최 대 치 수 (mm)		100 이하	-
수 정 CBR (시방다짐)	2.5 이상	10 이상	KS F 2320
5 mm 체 통 과 율 (%)		25~100	-
0.08 mm 체 통 과 율 (%)		0~25	KS F 2301, KS F 2309
소 성 지 수 (PI)		10 이하	KS F 2303
유기이물질 (용적비, %)	1 이하	1 이하	KS F 2576(용적비)

<성토용 순환 골재의 품질기준 (도로교 설계기준, 2016)>

구 분	흙쌓기의 최상부면 으로부터 100cm 이내의 하부	흙쌓기의 최상부면 으로부터 100cm 이상의 하부	시험방법
최대치수(mm)	100 이하	100 이하	-
수정 CBR(시방다짐)	10 이상	2.5 이상	KS F 2320
5mm 체 통과율(%)	25 ~ 100	-	KS F 2502
0.08mm 체 통과율(%)	0 ~ 25	-	KS F 2301, KS F 2309
소성지수	10 이하	-	KS F 2303
다짐후 건조밀도(t/m^3)	-	1.5 이상	KS F 2312
이물질 함유량(%) (유기이물질)	1.0 이하(용적)		KS F 2576

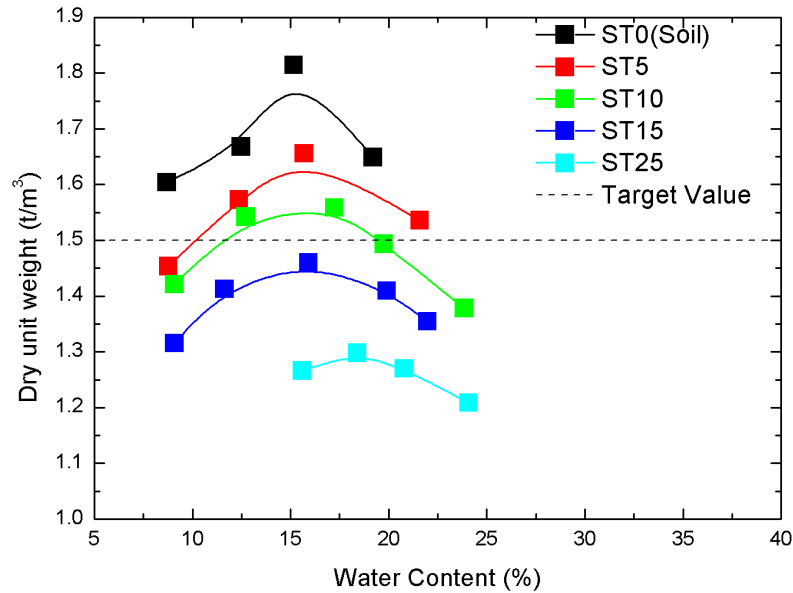
- 물리적 특성

제올라이트와 마찬가지로 일정 입경이 하의 페타이어와 기존의 풍화토를 배합하여 혼합 성토재를 구성하였다. 다음 그림은 연구에 사용한 페타이어의 입도 분포표이다. 페타이어와 풍화토의 배합비는 제올라이트와 마찬가지로 페타이어의 함량에 따라 명명했으며 비율은 0, 5, 15, 25, 100까지 배합하여 진행하였다. 페타이어의 함량이 적어 입도 분포에는 큰 변화가 없는 것을 확인했다.



<페타이어-풍화토 배합비별 입도 분포표>

다음 그림은 다짐시험 결과이다. 페타이어의 함량이 증가함에 따라 최적함수비가 증가하고, 최대건조단위 중량이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 도로교 설계기준에서 규정된 순환 골재의 최대건조단위 중량은 $1.5t/m^3$ 이다. 페타이어의 함량이 15%인 ST15부터 규정 값보다 낮은 값을 나타냈다. 따라서, 페타이어의 함량이 15%인 시료부터는 규정을 만족하지 못한다고 판단된다. 또한, 직접 전단시험결과 페타이어-풍화토 혼합물은 모두 35° 이상의 내부마찰각을 가지고 있어 성토재로 사용하기에 적절한 지지력을 가지고 있다고 판단된다.



<일정 입경 이하 페타이어-풍화토 배합비별 다짐시험 결과>

<일정 입경 이하 페타이어-풍화토 배합비별 전단 강도 정수>

	ST0(Soil)	ST5	ST10	ST15	ST25
ϕ	<u>40.2</u>	<u>39.9</u>	<u>38.3</u>	<u>37.0</u>	<u>35.0</u>
c	18.3	21.4	32.5	18.6	16.2

- 화학적 특성

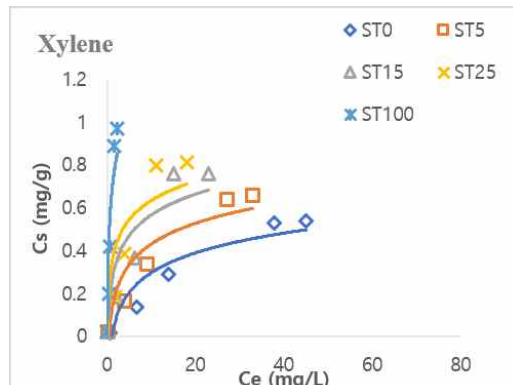
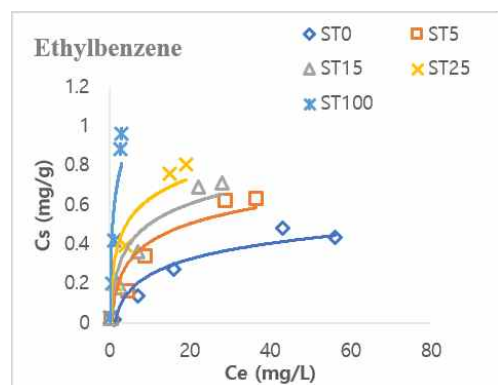
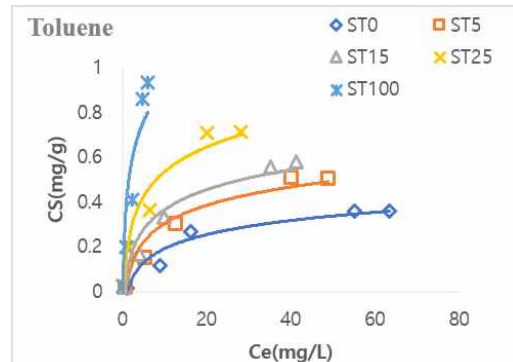
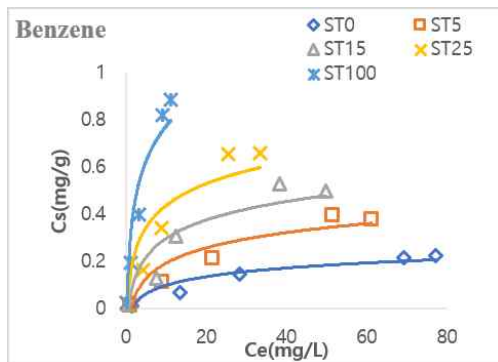
흡착능 실험을 진행하기 위해 앞서 원소분석기(Elemental Analyzer)를 통해 페타이어와 풍화토 내에 존재하는 원소에 대한 함량을 분석하였다. 분석결과는 아래 표에 제시되어있으며, 분석결과 풍화토에는 탄소가 거의 존재하지 않으며 타이어의 80%는 탄소로 이루어져 있는 것을 확인하였다. 이를 통해 풍화토보다 탄소가 유류흡착능이 높을 것이라 예상된다. 본 연구에서는 유류오염 물질로 산업단지 유류오염의 대표적인 물질로 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌(BTEX)을 사용해 실험을 진행하였다. 실험방법은 중금속오염과 마찬가지로 회분식 시험으로 진행하였으며 측정은 가스크로마토그래피를 이용하여 잔류 용액의 농도를 측정하였다. 혼합비율별로 BTEX에 대한 흡착능을 확인한 결과 예상한 바와 같이 페타이어의 함량이 증가할수록 증가하는 경향을 보이는 것을 확인할 수 있었습니다. BTEX의 흡착능을 각기 비교해 보면 자일렌 > 에틸벤젠 > 톨루엔 > 벤젠 순으로 흡착이 잘 일어나는 것을 확인하였으며 각각의 페타이어에 의한 제거율은 다음과 같다. (자일렌 96%, 에틸벤젠 93%, 톨루엔 83%, 벤젠 78%). 이는 이전 Zhang(2013), Alamo-Nole(2011)의 연구결과와 비슷한 경향성을 보여준다. 페타이어-풍화토 혼합물의 흡착능이 아래 그림과 같이 풍화토에 비해 뛰어나다는 것을 알 수 있다. 다짐시험 결과, 페타이어 함량이 10% 전후로 사용한다면 충분한 강도, 흡착능, 경제성을 확보할 수 있으리라 판단된다. 또한, 페타이어와 같은 재활용한 시료를 성토재료로써 사용하기 위해서는 환경 안정성을 평가해야 한다. 이에 여러 가지 pH의 용액과 페타이어를 24시간 반응 후 여과시킨 용액을 측정하여 안정성을 평가하였다. 시험결과는 아래 표로 제시하였으며 시험결과 페타이어는 모든 pH에서 기준치 이하의 값을 나타내었으므로 환경적으로 안정하다고 판단된다.

<페타이어와 풍화토의 원소분석결과>

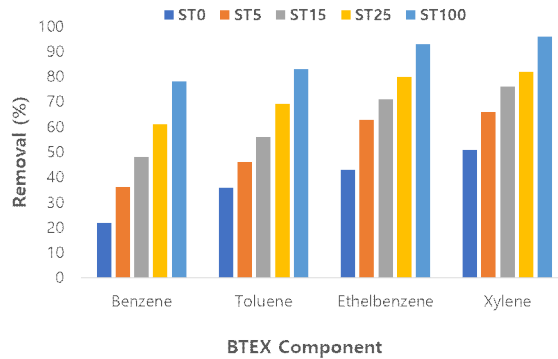
시료명	질소	탄소	수소	황	산소
페타이어	0.47	<u>81.38</u>	7.42	2.39	3.03
풍화토	n.d	<u>0.06</u>	0.57	n.d	1.93

<페타이어의 환경 안정성 평가결과>

용액농도 (ppm=mg/kg)	용액의 pH 농도				토양오염 우려 기준
	1	4	7	10	
Cu	15.52	0.0014	0.0009	0.0010	150
Zn	126.85	4.83	3.67	2.26	300
Pb	0.45	0.0007	ND	ND	200
As	ND	ND	ND	ND	25
Cd	ND	ND	ND	ND	4



<페타이어-풍화토 배합비별 유류(BTEX) 등온흡착 실험>



<페타이어-풍화토 배합비별 유류(BTEX) 제거율>

○ 제올라이트-풍화토 혼합물의 등온흡착실험(중금속)

2차연도에서는 기존 1차연도의 연구결과를 바탕으로 제올라이트-풍화토 혼합물의 여러 가지 특성 및 오염 심도 저감효과를 1-D flow 컬럼과 대형 토조실험을 통해 보다 정량적으로 연구결과를 도출하며 이를 통해 연구결과의 현장적용성 평가를 하고자 한다.

○ 변수위 투수시험

제올라이트-풍화토 혼합물을 흡착 층으로 성토재에 사용하기 위한 설계 정수로 투수 계수를 제시하고자 변수위 투수시험을 수행하였다. 흡착에 있어서 오염물질과 흡착제 간의 접촉시간은 흡착되는 오염물질의 양을 결정하는 데 있어서 중요한 요소인 만큼 투수 계수는 추후 상부 산업단지의 오염물질 사용농도 등을 고려하여 흡착성토층의 두께를 결정할 때 중요한 설계 정수로 판단된다.

본 연구에서 사용된 제올라이트-풍화토 혼합물들은 1차연도에서 시행한 다짐시험 결과를 바탕으로 최대건조단위 중량의 90%로 시료를 다져서 진행하였다. 다진 시료는 투수성이 매우 낮아 정수위 투수시험보다는 변수위 투수시험에 보다 적합하다. 실험에 사용한 몰드의 크기는 직경 8cm, 높이 16cm 크기를 사용하였다.

<제올라이트-풍화토 배합비별 투수 계수와 유효경>

	SZ0	SZ25	SZ50	SZ75	SZ100
k(cm/s)	1.0×10^{-4}	6.0×10^{-4}	1.3×10^{-3}	6.1×10^{-3}	2.2×10^{-3}
D ₁₀ (mm)	0.075	0.094	0.115	0.150	0.351

투수시험결과, 제올라이트의 함량이 높아질수록 대체로 투수 계수가 증가하는 경향을 보이는데 이는 투수 계수가 D_{10}^2 에 비례한다는 기존의 연구결과와 유사한 결과를 보여준다. 그러나, 제올라이트의 경우 시료를 다지기 위한 수분의 함량이 투수 계수에 영향을 준다는 Ören(2013)의 연구결과를 참고했을 때, 제올라이트의 높은 용수량으로 인하여 제올라이트 내부의 수분이 물의 흐름을 방해해 투수 계수가 저하된 것으로 판단된다.

○ 1-D flow 컬럼시험

오염 심도 저감효과를 보다 정량적으로 알아보하고자 컬럼시험을 수행하였다. 일반적으로 흡착컬럼시험을 수행할 때에 유입용액을 아래에서부터 주입해 완전포화상태를 가정하며 실험을 수행한다. 그러나 본 연구의 경우 성토재료로서의 특성을 검토하기 위해 유입용액을 위에서부터 주입하였다. 이는 성토재는 지하수위 위에 위치하여 불포화층을 형성하는 것을 반영하였다. 컬럼시험에서 사용한 중금속은 아연으로 1차연도 시험결과 납의 경우는 흡착능이 너무 뛰어나며 아연과 비교하면 상대적으로 이동성이 떨어져 흐름 시험에 적합하지 않다. 기존의 배합비 중 SZ75(75% 제올라이트)의 경우 다짐시

험 결과 성토재료로써 규정을 만족하게 하지 못해 배제하였다. 컬럼시험에서 사용한 컬럼의 크기는 직경 5cm 높이 30cm를 사용했으며 상부와 하부에 모래를 배치해 시료유실방지 및 유입용액이 골고루 분배하고자 했다. 실험에서 사용한 아연의 농도는 500mg/L를 사용하였는데 이는 1차연도 회분식 시험 결과 500mg/L에서부터 시료에 흡착한 양이 환경부에서 제시한 토양오염 우려 기준을 넘어 500mg/L로 수행하였으며 토양오염 우려 기준은 다음 표와 같다. 컬럼시험에서 유량은 펌프를 사용해 2mL/min으로 시험을 수행하였으며 실험은 유출용액이 유입용액의 농도와 같아질 때까지 수행하였다. 실험 진행 모습 및 모식도는 다음 그림과 같다.

토양오염 우려 기준(제1조의5 관련)

(단위: mg/kg)

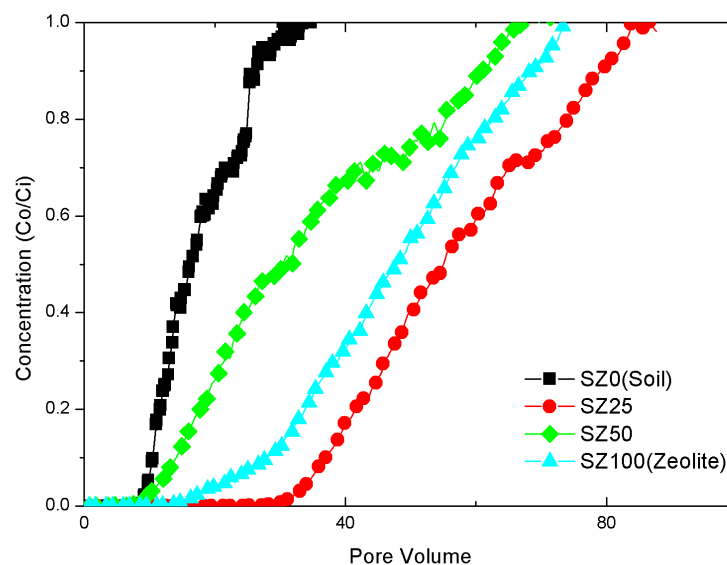
물질	1 지역	2 지역	3 지역
카드뮴	4	10	60
구리	150	500	2,000
비소	25	50	200
수은	4	10	20
납	200	400	700
6가 크롬	5	15	40
아연	300	600	2,000
니켈	100	200	500
불소	400	400	800
유기인화합물	10	10	30
폴리클로리네이티드비페닐	1	4	12
시안	2	2	120
페놀	4	4	20
벤젠	1	1	3
톨루엔	20	20	60
에틸벤젠	50	50	340
크실렌	15	15	45
석유계총탄화수소(TPH)	500	800	2,000
트리클로로에틸렌(TCE)	8	8	40
테트라클로로에틸렌(PCE)	4	4	25
벤조(a)피렌	0.7	2	7



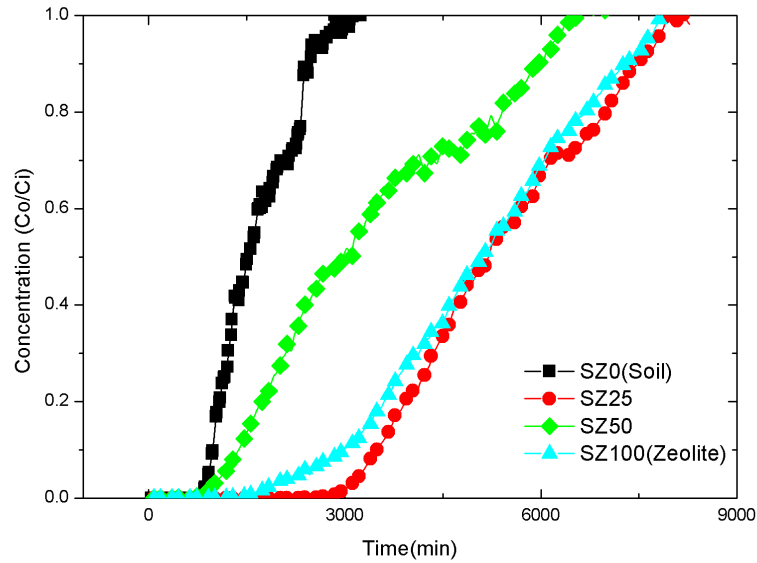
<제올라이트-풍화토 혼합물 컬럼시험 사진 및 개요도>

제올라이트-풍화토 혼합물의 컬럼시험결과인 출현곡선을 도시하였다. 앞서 수행한 회분식 시험결과와 대조해보았을 때 결과가 많은 차이를 보인다. 제올라이트의 함량과 상대농도(C_o/C_i)가 비례하지 않는 것을 확인하였다. 시간을 기준으로 SZ100과 SZ25는 SZ0보다 상대농도 0.5에서 약 3.5배 늦게 아연 유출이 측정되었으며 SZ50은 약 2배로 오히려 SZ25보다도 아연의 유출이 빨리 일어났다. 이는 먼저 흡착에 영향을 주는 요인인 농도와 접촉시간에 대한 영향이라 판단된다. Ho(2000), Gode(2006)에 따르면 흡착평형에 도달하기 위해 일정 시간이 필요하며 일정 시간 이하에서는 흡착능을 제대로 발휘하기 힘들다. Darcy의 법칙에 의하면 유속은 투수 계수와 비례한 경향을 보이는데, 본 연구에서 사용한 시료들의 투수 계수는 그 차이가 최대 22배로 이에 대한 영향으로 높은 흡착능을 가졌으나 투수성이 좋은 SZ100의 경우 그 흡착능을 제대로 발휘하지 못하는 것으로 판단된다. 또한, SZ50의 경우 회분식 시험결과 SZ25와 흡착능이 비슷하게 나왔으나 투수 계수는 SZ25와 비교하였을 때 약 2배 정도 큰 값을 가지고 있다. SZ50의 아연 유출이 약 2배 정도 빠른 것으로 보았을 때, 흡착은 투수 계수와 반비례한다고 판단된다. Malkoc(2006)에 따르면 흡착은 농도가 높을수록 중금속 유출이 빨라지며 일정유량이 넘어가면 급격하게 유출이 빨라진다고 제시하였다. 아래의 표에는 상대농도 0.5, 0.9에 도달할 때의 시간과 공극 부피 그리고 그때의 흡착능을 나타내었다. 오염심도는 오염물의 전체 질량, 강수량, 농도에 따라 가변함에 따라 현재 연구단계에서는 정확한 값을 제시할 수 없다. 하지만, 출현곡선으로 계산한 흡착능으로 예상 및 비교분석이 가능하다. 흡착능은 아래의 식을 통해 도출되었다(Mondal 2009). 흡착능은 $SZ100 > SZ25 > SZ50 > SZ0$ 순으로 나타났으며 회분식 시험결과와는 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 이는, Plassard(2000)에 따르면 회분식 시험결과와 컬럼시험결과가 유사한 경향을 보이려면 유입속도가 느려야 한다고 제시하고 있으나 본 연구에서는 강수량을 반영하여 다소 높은 유량 값을 사용해 1차연도의 회분식 시험결과와 차이가 발생했다고 판단된다. 또한 Zorpas(2002)에 따르면 제올라이트 표면에 모래 등 다른 이물질이 함께 존재할 경우 오히려 제올라이트의 흡착을 방해한다고 제시하고 있다. 컬럼시험결과 SZ25의 경우, 낮은 투수계수로 다른 혼합물에 비해 중금속 수용액과 접촉시간이 길어 낮은 제올라이트 함량에 비하여 높은 흡착능을 가지고 있다고 판단된다. 이와 같은 컬럼 실험을 통해 구한 값을 실제 설계에 적용 시 50% 상대농도일 때의 흡착능을 기준으로 설계하는 것이 합당하다. 이는 상대농도 50% 이상인 경우, 흡착 층을 통과하는 용액의 농도가 높아 추가오염을 줄이고자 하는 본 연구의 목적에 어긋난다고 판단된다. SZ25를 상대농도 50%의 흡착능을 기준으로 계산한 결과 10cm의 두께당 약 10,600mg/L의 아연을 흡착할 수 있으며 이를 기준으로 제올라이트-풍화토 흡착 층을 사용할 산업단지의 폐액농도와 설계연도에 맞는 성토재의 두께를 구할 수 있다.

$$50\% \text{ 상대농도일 때의 흡착능} = [\text{소요시간}(h)] \times \text{유량}(l/h) \times \text{유입농도/전체시료양}(g)$$



<제올라이트-풍화토 혼합물 흡착컬럼시험 결과 그래프>
(Pore Volume 기준)

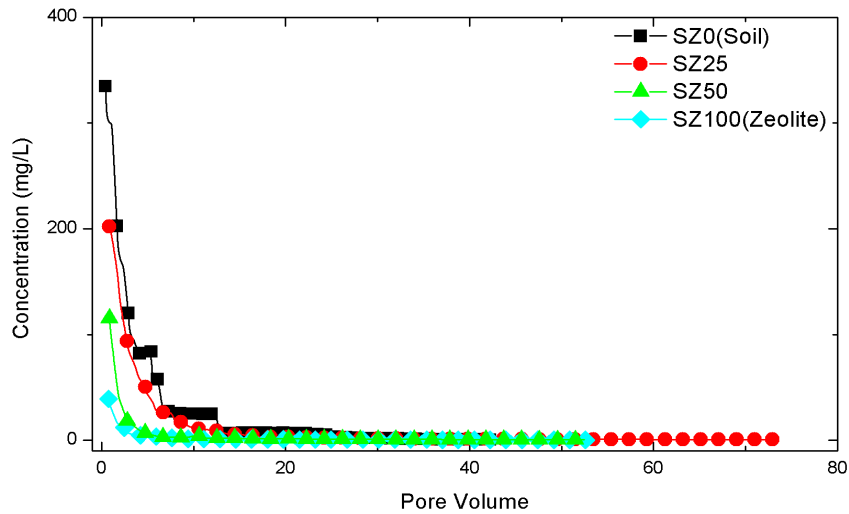


<제올라이트-풍화토 혼합물 흡착컬럼시험 결과 그래프>
(시간 기준)

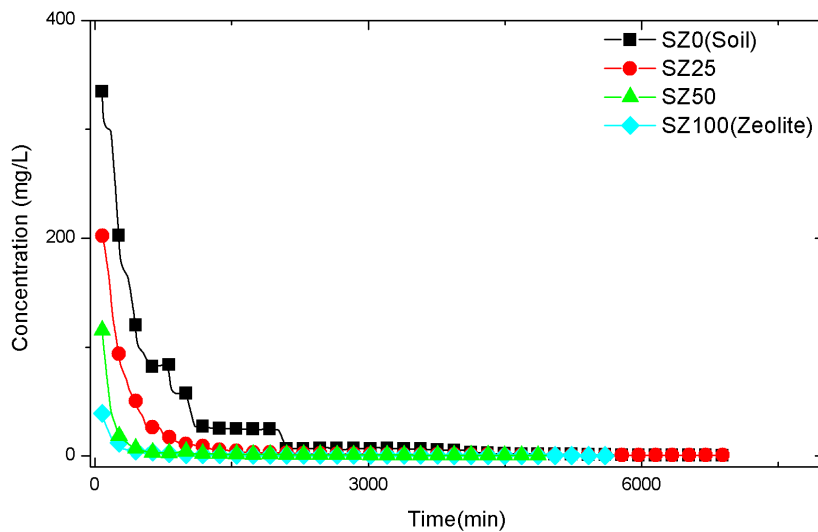
<제올라이트-풍화토 혼합물 컬럼시험 결과>

	SZ0	SZ25	SZ50	SZ100
$C_o/C_i=0.5$ (pore volume)	16.1	55.2	30.5	48.2
$C_o/C_i=0.9$ (pore volume)	26.1	79.5	60.1	69.2
$C_o/C_i=0.5$ (time, min)	1504	5232	2940	5140
$C_o/C_i=0.9$ (time, min)	2486	7532	5884	7348
t=0.5일 때 흡착능(mg/g)	1.85	6.64	4.05	7.94
t=0.9일 때 흡착능(mg/g)	3.01	9.58	7.95	11.35

추후 우수 등 물의 영향으로 인한 오염물질이 부착된 성토재료의 유해성을 검토하기 위해 탈착 시험을 수행하였다. 흡착시험과 마찬가지로 탈착 시험 역시 불포화 층인 성토재의 특성을 고려하여 우수와 같은 조건인 위에서 증류수를 유입시키며 실험을 진행하였다. 탈착 시험을 수행하기에 앞서 흡착실험이 끝난 시료에 공기펌프를 약 2일간 가하여 최대한 내부의 잔류 용액을 제거하였다. 기존의 회분식흡착시험 결과 증류수와 산성용액 간의 탈착률 차이가 크지 않아 증류수로 실험을 진행하였으며 실험 유량은 흡착시험과 동일하게 진행하였다. 실험시간은 환경부가 제시한 지하수 처리기준인 3mg/L 이하로 유출용액의 아연농도가 도달했을 때까지 진행하였다. 탈착 시험결과는 다음 그림과 같다.



<제올라이트-풍화토 혼합물 탈착 컬럼시험 결과 그래프>
(Pore Volume 기준)



<제올라이트-풍화토 혼합물 탈착 컬럼시험 결과 그래프>
(시간 기준)

<제올라이트-풍화토 혼합물 탈착 컬럼시험 결과>

	SZ0	SZ25	SZ50	SZ100
3mg/L 이하 도달 (pore volume)	<u>25.4</u>	<u>15.8</u>	<u>10.7</u>	<u>6.8</u>

탈착 시험결과는 위의 그림과 표에서 나타내었다. 탈착 시험은 흡착시험과 달리 시간과 공극 부피 기준 간의 차이가 크지 않았다. 시험결과, 제올라이트 함량이 증가할수록 탈착이 잘 일어나지 않아 적은 유입량에도 지하수 처리기준인 3mg/L 이하로 유출용액의 농도가 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 1차연도의 시험결과와 마찬가지로 제올라이트와 혼합한 풍화토의 경우 기존의 풍화토에 비해 상대적으로 추가오염에 대한 저항성이 뛰어나다고 판단된다.

○ 직접 전단시험

컬럼실험을 시행한 후 시료를 건조한 후 직접 전단시험을 수행해 제올라이트-풍화토 혼합물의 장기적 안정성 평가를 하고자 한다. 컬럼실험을 수행한 전과 후의 강도 정수를 비교해 장기적으로 오염물질

이 성토재의 거동에 미치는 영향을 판단하였다. 실험결과, 일부 혼합물에서 내부마찰각이 다소 감소한 때도 있지만, 그 차이가 크지 않았으며 성토재의 재료 요건인 30~45° 사이의 값을 나타냈다. 중금속 흡착과 탈착이 제올라이트-풍화토 혼합물은 미비하며 이에 장기적으로 안정하다고 판단된다. Yukselen-Aksoy(2010)가 제시한 제올라이트의 내부마찰각인 34°, 36.5° 보다는 다소 낮은 값을 보인다. 이는 천연 제올라이트의 종류가 다양하고 그 함량에 따라 어느 정도 강도 같은 특성이나 화학적 특성이 달라지기 때문이라 판단된다. 또한, Yukselen-Akso(2010)의 제올라이트 압밀시험결과 제올라이트의 압밀계수는 풍화토와 비슷한 값인 0.02cm²/min을 나타냈으며 팽창성이 낮다고 제시하고 있다. 이러한 경향은 기존의 Sivapulliaiah 등 (1987), 이나 Seed 등(1962)이 제시한 식을 통한 결과와도 일치하고 있다. Savas(2016)에서는 분산성 토양과 제올라이트를 혼합한 시료가 기존의 토양에 비해 압밀이 적게 일어나며 팽창에 대한 저항성도 늘어났다고 제시하였다. 이러한 기존의 연구와 본 연구에서 실험한 결과를 바탕으로 제올라이트-풍화토를 배합한 시료의 경우 장기적으로 압밀뿐만 아니라 팽창에 대해서도 안전하며 강도가 저하되지 않을 것으로 판단된다.

< 제올라이트-풍화토 배합비별 전단 강도 정수(전)>

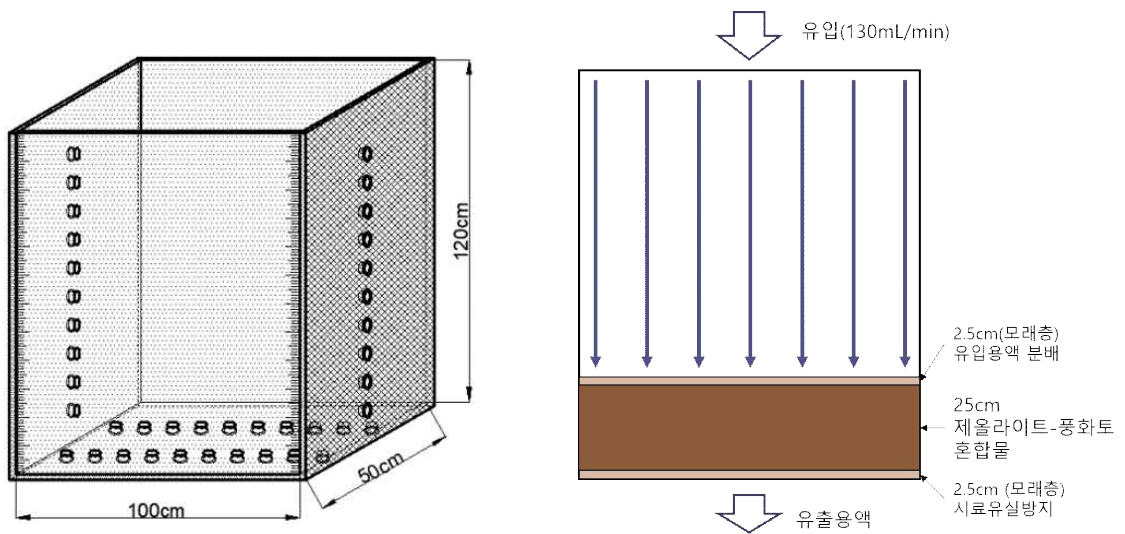
	SZ0	SZ25	SZ50	SZ75	SZ100
$\phi(^{\circ})$	<u>40.2</u>	<u>37.3</u>	<u>35.8</u>	<u>31.7</u>	<u>31.6</u>
c(kPa)	18.3	30.6	32.5	31.2	34.6

< 제올라이트-풍화토 배합비별 전단 강도 정수(후)>

	SZ0	SZ25	SZ50	SZ75
$\phi(^{\circ})$	<u>39.3</u>	<u>37.4</u>	<u>35.5</u>	<u>30.4</u>
c(kPa)	22.9	28.0	34.1	42

○ 대형토조실험

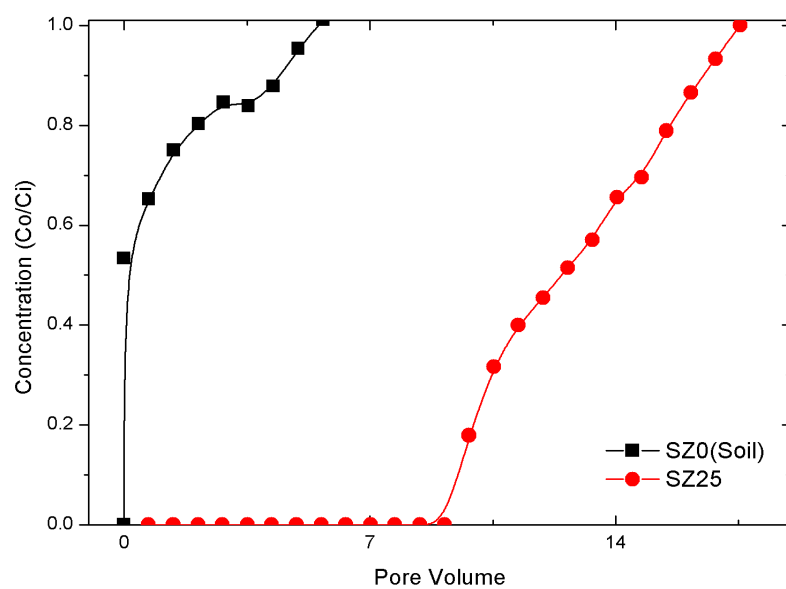
본 연구에서 제시하는 연구는 산업단지 하부지반을 조성하는데 사용할 수 있는 성토재료를 제시하고자 함으로 더욱 현장과 유사한 환경에서 실험을 진행하고자 대형토조 실험을 수행하였다. 1차원도의 실험 결과와 마찬가지로 컬럼실험 및 직접 전단시험 수행결과 SZ25가 공학적 뿐만 아니라 경제적으로도 가장 우수한 결과를 나타냈다. 따라서, SZ25와 기존의 풍화토를 비교하여 실험을 수행하였다. 토조의 크기는 폭이 50cm x 100cm며 높이는 120cm로 제작하였다. 컬럼실험과 마찬가지로 상부와 하부에 모래층을 배치하여 유입용액을 고르게 분배하고 시료의 유실을 방지하였다. 시료의 총 높이는 30cm로 25cm의 흡착 층과 총 5cm의 모래층으로 구성했다. 우수를 묘사하고자 토조 상부에 분사기를 달아 총 130mL/min의 용액을 분사해 실험을 수행하였다. 실험에 사용한 토조사진 및 모식도는 다음과 같다.



<대형토조 모식도 및 실험 개요도>

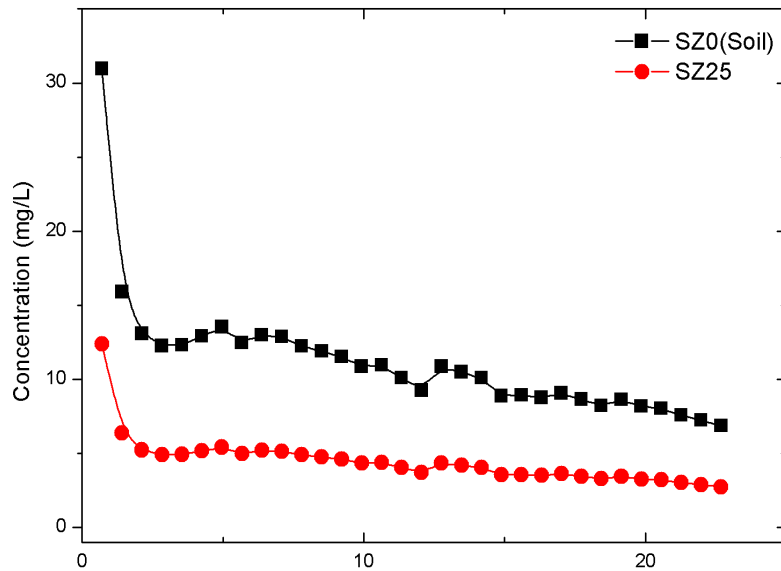


<대형토조 정면 및 후면사진>

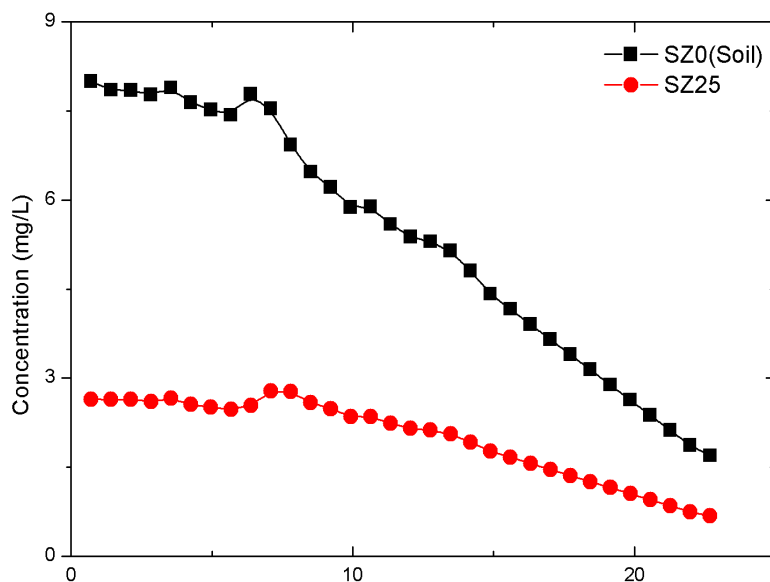


<제올라이트-풍화토 혼합물 대형토조실험 결과 그래프>

제올라이트-풍화토의 대형토조실험결과 얻어진 출현곡선을 도시하였다. 앞서 수행한 컬럼시험결과와 마찬가지로 SZ25가 SZ0에 비해 흡착능이 뛰어난 것을 확인할 수 있다. 상대농도 0.9일때의 공극부피의 차이는 3.32배로 약 3.5배였던 컬럼시험결과와 유사한 경향을 보였다. 대형토조실험 수행 시 동수경사가 아닌 펌프로 유량을 조절했기 때문에 현장에서보다는 빠른 유속으로 실험을 진행하였다. 컬럼시험과 비교했을 때, 더 적은 유량에서 중금속이온이 검출되기 시작했는데 이는 대형토조는 컬럼에 비하여 높이 대비 직경이 커서 공극 내부에 수용액이 더 잘 스며들어서라고 생각된다.



<제올라이트-풍화토 혼합물 탈착 컬럼시험 결과 그래프>
(1차 탈착)



<제올라이트-풍화토 혼합물 탈착 컬럼시험 결과 그래프>
(2차 탈착)

추후 유해성 검토를 위해 토조에서 역시 탈착 실험을 진행하였다. 더 이상 탈착이 일어나지 않을 때까지 탈착실험을 반복 수행하였다. SZ0의 경우 1차 탈착실험에서는 모두 기준치(3mg/L)를 초과 하였으며 2차탈착에서부터 탈착이 일어나지 않았다. SZ25의 경우 1차 탈착실험 중부터 기준치이하의 값을 나타냈다. 컬럼실험보다 토조실험의 경우, 탈착되는 중금속이온의 농도가 낮았다. 컬럼의

경우 높이에 비해 직경이 작아 내부 공극에 남아있는 잔류 중금속수용액이 있어 중금속 농도가 높게 측정된 것으로 보인다. 반면에 토조의 경우 면적이 넓어 내부에 잔류해있는 중금속용액이 적어 농도가 낮은 것으로 판단된다. 이에 기존의 실험결과와 마찬가지로 제올라이트와 혼합한 풍화토의 경우 기존의 풍화토에 비해 상대적으로 추가 유출에 의한 오염이 적다고 판단된다.

○ 요약

산업단지 하부지반의 경우 1차연도에 진행한 중금속오염뿐만 아니라 유류오염에도 많이 노출되어 있다. 이에 대한 대책으로 상부의 구조물의 용도에 따라 유류와 중금속 각각에 대한 흡착능이 뛰어난 흡착제를 혼합한 성토재를 사용하는 것이 합리적이라 판단된다. 유류오염에 대한 흡착제의 후보군은 활성탄, 표면 개질 제올라이트, 페타이어였으나 활성탄은 강도 적으로 취약하며 표면 개질 제올라이트는 경제적으로 적합하지 않아 페타이어로 실험을 수행하였다. 페타이어로 직접 전단 및 표준다짐시험을 진행한 결과 페타이어 함량이 10% 전후로 사용한다면 충분한 지지력을 확보할 수 있다. 또한, BTEX에 관한 회분식흡착시험을 진행한 결과 페타이어-풍화토 배합비 10%의 경우 기존의 페타이어에 비해 약 2배 이상의 흡착능을 나타내었으며 환경 안정성 평가를 통해 환경적으로 안정하다는 것을 증명하였다. 따라서 페타이어를 혼합한 혼합물의 경우 공학적, 환경적, 경제적으로 우수하다고 판단된다.

1-D flow 흡착 컬럼시험을 수행한 결과, 흡착능은 SZ100> SZ25> SZ50> SZ0 순으로 나타났으며, SZ25는 SZ0보다 3배 이상의 뛰어난 흡착능을 발휘하였다. 또한, 탈착 시험결과 SZ25가 기준치이하로 탈착에 도달할 때까지 걸린 공극부피는 기존의 풍화토에 비해 약 0.6배로 줄어든 결과를 확인하였다. 컬럼시험을 시행한 후 오염물질로 인한 지지력 감소를 검토하기 위해 직접 전단시험을 수행하였다. 시험결과 내부마찰각과 점착력 모두 거의 변하지 않아 장기적으로 안정하다고 판단된다. 1차연도의 실험 결과와 마찬가지로 컬럼시험 및 직접 전단시험 결과 SZ25가 가장 최적 배합비에 적합하다고 판단된다.

토조 실험을 수행한 결과 1-D flow 흡착실험 결과와 마찬가지로 SZ25가 SZ0에 비해 약 3.32배가량 뛰어난 흡착능을 발휘했으며 탈착으로 인한 추가오염에 대한 저항성 역시 더 뛰어나다고 판단된다.

본 연구 결과, 일정 입경이 하의 제올라이트와 풍화토를 혼합하는 것이 가장 효과적이며 그중에서도 배합비 **25%인 시료**가 경제적, 공학적, 환경적으로 가장 최적의 배합비라고 판단된다.

본 연구를 바탕으로 현장에 적용하기 위해서는 보다 큰 현장 상태의 묘사실험을 통해 검증이 필요하다.

3-5. 연구개발성과(해당되는 성과만 기재)

가. 국내외 논문 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일	등록번호
1	Swelling Capacity and Hydraulic Conductivity of PolymerModified Bentonite under Saline Water Conditions	Applied Sciences	Xin Xu	8	스위스	MDPI	SCI(E)학술지	20180622	2076-3417
2	Microplastics pollution in different aquatic environments and biota: A review of recent studies	Marine Pollution Bulletin	Shahabaldin Rezania; Junboum Park	133	영국	ELSEVIER	SCI(E)학술지	20180525	0025-326X
3	Performance of a salt-resistant mixture of bentonite and field soil as impermeable material in solid waste landfills	Materials Testing	Xin Xu; Junboum Park; Y. Frank Chen	12	독일	HANSER eLibrary	SCI(E)학술지	20181206	0025-5300
4	Adsorption properties of heavy metal ions in landfill leachate by Na-bentonite	Materials Testing	Xin Xu, Junboum Park	1	독일	HANSER eLibrary	SCI(E)학술지	20190106	0025-5300
5	산업단지에서의 흡착 성토재로써 제올라이트 토양혼합물의 특성평가	대한토목학회 논문집	권재우	1	대한민국	대한토목학회	비SCI	201902	2287-934X

나. 국내 및 국제학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	Geoenvironmental Engineering and Recycling 2017	유효봉	2017-11-24	도쿄	일본
2	한국지하수토양환경 학회 2018 춘계학술대회	유효봉	2018-04-13	서울	대한민국
3	2018 한국지반공학회 봄학술발표회 및 정기총회	라힘	2018-03-15	여수	대한민국
4	17th Global Joint Seminar on Geo-Environmental Engineering	권재우	2018-05-25	후쿠오카	일본
5	17th Global Joint Seminar on Geo-Environmental Engineering	라힘	2018-05-25	후쿠오카	일본
6	17th Global Joint Seminar on Geo-Environmental Engineering	유효봉	2018-05-25	후쿠오카	일본
7	Geoenvironmental Engineering and Recycling 2018	라힘	2018-09-10	산시성	중국
8	Geoenvironmental Engineering and Recycling 2018	권재우	2018-09-10	산시성	중국
9	Geoenvironmental Engineering and Recycling 2018	유효봉	2018-09-10	산시성	중국
10	대한토목학회	권재우	2018-09-18	경주	대한민국

다. 생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물

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

라. 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신제품, 프로그램)

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록				기여율
			출원인	출원일	출원번호	등록번호*	등록인	등록일	등록번호	등록번호*	
1	성토재	대한민국	서울대학교산학협력단	2018. 11.12.	10-2018-0138326						100

* 연구개발성과 관리·유통 전담 기관에 등록된 번호 기재

마. 저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록 번호	저작권자명	기여율

바. 전문 연구 인력 양성

번호	분류	기준 연도	현황										
			학위별			성별			지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
1	박사	2017	1						1				

사. 산업 기술 인력 양성

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

아. 기술 거래(이전) 등

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료 (해당 연도 발생액)	누적 징수 현황

자. 사업화 투자 실적

번호	연구개발 투자	설비 투자	기타 투자	합계	투자 자금 성격

차. 사업화 현황

(단위: 명, 년)

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

카. 표준화

번호	수행 기관명	표준화 주제	표준화 기구	표준화 단계	관련 번호	제출(채택)일	국가
						yyyy.mm.dd	

타. 기술요약정보

연도	기술명	요약 내용	기술 완성도	등록 번호

파. 보고서 원문

연도	보고서 구분	발간일	등록 번호

하. 기타

4. 연구개발 목표의 달성도 및 자체 평가

가. 연구개발성과 및 평가 방법

[총괄]

구분		핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준						양적 성과 건수
						질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	가중치	
주관	1	고흡착성 하 이브리드 성 토재 개발	1-1 하 이 브 리 드 성 토 재 조 합 법 연구: 강 도, 흡 착 능, 기 본 물 성 치 평 가	①	마찰각	30°	37.3°	Mohr-Co ulomb 파괴포락 선에서 산정	삼축압축 시험	20%	특허: 출원 1건 등록 1건 일반 학술지: 1건 SQ 급 학술지: 1건 사제품: 1건 S/W: 1건	
				②	흡착능	5 mg/g	13.6 mg/g	Langmuir model로 산정	화분식 시험	20%		
			1-2 하 이 브 리 드 성 토 재 성 능 연구: 1-D 흐 름 조 건 으 로 의 강 도 및 오 염 물 질 거 동 평 가	①	지중 유출수 농도 감소	50%	38%	effluent 농도측정	1-D column test	25%	특허: 출원 1건 등록 1건 일반 학술지: 1건 SQ 급 학술지: 4건 사제품: 1건 S/W: 1건	
				②	오염심도 저 감	50%	350%	흡시료 농도측정	1-D column test	25%		
				③	흐름 조건에 서의 강도 변화	10%	0.3%	실험전후 강도변화 평가	삼축압축 시험	10%		
계										100	특허: 출원 1건 등록 1건 일반 학술지: 1건 SQ 급 학술지: 4건 사제품: 1건 S/W: 1건	

○ 핵심 연구성과

연번	핵심성과 (CTE)	핵심성과 설명	성과유형 ¹⁾	연구기관	해당 연차	TRL
1	고흡착성 하이브리드 성토재료 개발 및 실험실 수준 검증	– 풍화토를 기반으로 한 고흡착성 하이브리드 재료를 제조하는 방법: 재료의 기능성을 높이기 위하여 첨가해야 할 재료의 종류 및 양, 그리고 방법에 대한 연구 – 제조된 고흡착성 하이브리드 재료의 특성 분석 및 적용성 평가: 기본적인 지반공학&지반환경공학적 특성 파악 및 실험실 수준의 실험을 통해 재료의 적용가능성 평가	재료·자재	서울대학교	1, 2	4

○ 핵심 연구성과별 설명

핵심성과 1	고흡착성 하이브리드 성토재료 개발 및 실험실 수준에서의 검증	
정의	강도와 흡착능을 동시에 갖는 고흡착성 하이브리드 성토재료의 제조 방법 및 성능을 보고서형태로 제시	
목적	- 산업단지 및 철도부지의 운영을 통해 지반의 오염이 필수적으로 발생함 - 발생된 오염은 어떤 형태로든 비용 손실을 초래 (ex, 용산역세권개발사업) - 본 성과물에 제시된 기술이 궁극적으로 현장에 적용되는 경우 비용 손실을 최소화할 수 있음 (1. 주변으로의 오염확산 방지, 2. 오염범위 최소화) - 서로 다른 특성을 가진 흙의 조합에 따른 특성을 과학적으로 관찰 (다른 특성 연구에 기초자료로써 활용 가능)	
성능목표	(기존기술 수준) 강도 : 일반 풍화토급(마찰각 30°~45°) /흡착능 : 거의 없음 (개발기술 수준) 강도 : 일반 풍화토급 유지(마찰각 30°~45°) /흡착능 : 5 mg/g 이상	
성과달성 책임자 (소속기관)	박준범(서울대학교)	
소요기간	'17.07 ~ '18.12 (18개월)	
성과달성 확인방법	1. 개발 재료의 마찰각 및 흡착능 확인 (삼축압축시험 및 회분식 평형흡착시험) 2. 1-D 흐름 조건에서의 오염제어 성능평가 (1-D column test 수행 전, 후 흡시료를 채취하여 특성평가)	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	[출원 : 1건]
	논문	[SCI(E) : 4건, 학술지 : 1건]
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

나. 해당 연도 정량적 연구성과 목표 및 달성도

구분		목표	달성도(%)	비고
국외 논문 게재	SCI	2	100	초과달성(4건)
	비SCI			
	계	2	100	초과달성(4건)
국내 논문 게재	SCI			
	비SCI	3	33	SCI로 대체
	계	3	33	SCI로 대체
특허 출원	국내	1	100	
	국외			
	계	1	100	
특허 등록	국내			
	국외			
	계			
인력 양성	석사			
	박사	1	100	
	계	1	100	
기술 이전	계약 건수			
	계약액			
	징수액			
국제 표준화	기고서 제출			
	기고서 채택			
	표준안 채택			
국내 표준화	기고서 제출			
	기고서 채택			
	표준안 채택			
등록·기탁 대상 성과물	보고서 원문			
	연구시설·장비			
	기술요약정보			
	생명자원	생명정보		
		생물자원		
		신품종		
	소프트웨어			
기타	화학물			
	시제품			
	성과 홍보			
	일자리 창출			

다. 성과 목표에 대한 자체 평가

성과 목표	자체 평가
강도, 흡착능 기본물성치 평가를 통한 하이브리드 성토재 조합법 도출	- 고흡착성 하이브리드 성토재 개발을 위하여 국내 성토재 재료 요건(국가건설기준 표준시방서 흙쌓기(성토), 철도설계기준 흙 구조물편, 도로설계기준 도로토공)을 분석함
	- 국내외 흡착제 연구 분석을 통한 흡착 후보물질 도출
	- 제올라이트, 활성탄을 제외한 재활용가능 폐기물의 흡착제로서의 사용가능성 평가
	- 혼합법(단순혼합, 부분치환)에 따른 흡착능 및 강도정수 평가를 통한 적정 혼합비율 도출

5. 연구개발성과의 활용계획

5-1. 연구개발성과의 활용방안

○ 기술 수요처 및 현장 적용 방안

- 실험실 수준에서의 성능 평가를 마친 성토재료의 기술은 향후 현장규모의 보완 연구를 통해 다양한 국내 산업단지 개발 지역에서 적용이 가능 할 것으로 판단됨.
- 현재 국내에서는 1,201곳의 산업단지가 조성 및 개발되었으며, 그중 약 380여개의 단지를 현재 조성 중이거나 개발 계획상에 있는 것으로 조사되었음 (2015년 4분기 전국산업단지 현황 조사, 한국산업단지공단). 본 연구 성과물을 다양한 용도의 산업단지 조성 사업과 연계하여 진행할 수 있을 것으로 기대됨.
- 이를 통해 현재 개발되고 있는 산업단지의 성토재에 현장 실험 형태로 적용하여 추가적인 정보 획득이 가능할 것이며, 다양한 적용성 평가를 이용한 성과물의 추가적인 계량을 시도할 수도 있을 것으로 기대됨. 특히 국가 산업단지 조성 지역이 상대적으로 넓은 지역을 차지하고 있는 것에 따라서 국가차원에서 도움이 될 기술로 인정받을 가능성도 높을 것임.



그림 10. 현재 조성중이거나 개발 계획상에 있는 공업단지 (2015년4분기 전국산업단지 현황 조사, 한국산업단지공단)

○ 실용화, 제품화 방안

- 산업단지 성토재로 적용성 평가를 마친 제품의 특허 등록을 통해서 기술을 인정받을 수 있을 것이며, 국가산업단지 만이 아닌 다양한 농공, 첨단, 일반 산업 단지에 다양하게 사용할 수 있을 것임.
- 향후 운영기간이 긴 철도부지 조성 사업에서도 하부 재료로써 활용될 수 있을 것임.
- 특허 등록의 경우, 성토재료로 사용된 물질의 특성보다는 그 혼합과 특수성 등을 강조하여 물질의 혼합에서 그 방법적인 부분을 강조하여 원천 기술로서의 성토재 개발을 추진할 수 있음.
- 특히 국가 차원에서 필요성을 인정받을 경우, 제품의 필요성이 높아질 것으로 기대되는데, 이는 산업 단지나 철도부지 조성사업이 기간이 길고 많은 지역에서 동시 다발적으로 발생한다는 특징을 갖기 때문임.
- 하나의 단체에서 담당하기에는 그 범위가 넓고 대상도 다양하기 때문에 다양한 사업체 형성이 불가피할 것이며, 이에 따른 새로운 형태의 사업이 나타날 것으로 기대됨.

5-2. 기대효과

○ 기술적 측면

- 건설 분야의 환경적 관점은 친환경적 재료의 이용에 초점을 많이 맞추는 경향이 있었음
- 본 연구를 통해서 환경 정화의 기술들을 다양한 건설 재료들에 적용할 수 있다는 것을 보여 줄 수 있을 것이며, 이를 통해 건설 분야와 환경 분야의 융합이라는 국내외적으로 새로운 시도를 할 수

- 있는 계기가 될 것임
- 주거 지역 인근에서 발생하는 토양 유류 오염의 경우, 노후 주유소의 포장재 하부나 송유관 파손 등에 의해서도 많이 발생함
- 주유소는 주거 밀집 지역에 접한 경우가 많고 지하 매설물에 의해서 정화가 쉽지 않으며, 도심지 개발 계획 시 토양 오염에 의해 문제될 가능성이 높은 지역임
- 본 연구 성과는 주유소의 포장재 하부 지반 조성에도 충분히 활용하여, 도심지 오염 방지에 활용 할 수 있음
- 국내외에서 2000년대 후반부터 아스팔트 포장재 노면의 투수성을 확보하는 연구가 진행되고 있으며, 현재 일본, 미국 등의 선진국에서 많은 시험 사업들이 수행되었음
- 이러한 투수성 포장이나 투수성 아스팔트가 설치될 경우 발생할 수 있는 문제 중에서 가장 치명적인 문제가 바로 비점오염원의 침투 문제임
- 현재 개발하려는 곽습작성 토양 건설 재료는 결국 이러한 비점오염원 침투 문제를 도로 기층에서 해결할 수 있는 대책이 될 것이며, 기층에 건설되는 흡착층을 형성하는 주재료로 활용 가치가 높음

○ 학문적 측면

- 성토재와 흡착제는 각각 효율을 발휘하기 위한 적절한 물리적 특성이 다른 것으로 알려져 있으며, 그 특징은 상충되는 부분이 일부 존재함
- 성토재의 경우, 입도가 큰 토양에서 강도를 높게 유지할 수 있으며 화학적으로 안정적인 구조를 가지는 것으로 알려져 있음
- 흡착제의 경우, 비표면적이 큰 토양에서 화학적으로 변화가 많은 구조를 가지는 것으로 알려져 있음
- 두 상충되는 특징을 적절하게 융합시키기 위해서 구체적인 이론과 배합 혹은 개질을 하는 과정에서 나타나는 새로운 학문적 접근들이 필요하며, 이를 통해 건설 분야와 환경 분야에 관련 기술들을 한 단계 향상시키는데 큰 영향을 미칠 것으로 예상됨
- 뿐만 아니라 흡착제의 경우에는 지반공학적 특성을 파악한 연구가 거의 없으며 그 가능성에 대해서도 알려진 바가 없음
- 흡착제에 대한 지반 공학적 접근은 다른 분야의 연구에서도 흡착 환경 매질의 강도나 내구성을 확인하고 적용하는 것에 충분히 활용될 것으로 보임
- 산업단지나 철도부지의 오염은 상대적으로 오랜 기간 화학물질에 노출되어 있었기 때문에 면적이 나 심도 등 오염의 범위가 넓으며, 오염물질이 흡입자에 매우 강하게 붙어있어 정화가 어려운 특징이 있음
- 따라서 현재 국내외에서 집중적으로 연구되고 있는 실정임
- 본 연구는 이러한 유류 또는 중금속의 오염에 대한 흡착 능력을 평가하고 적합한 재료 파악을 통해 보다 오염토양 정화에 효과가 있는 재료를 제시할 수 있을 것이며, 이를 현재 토양 오염 정화 기술에도 적용 가능 할 것으로 보고 있음
- 현장 실증을 위한 현장 실험과 이를 비교하기 위한 수치 해석적 연구를 통해서 기존 연구보다 현장 조건에 맞춘 불포화대에서의 문제 대해서도 연구가 될 것이며, 이러한 연구를 바탕으로 국내외 적으로 부족한 불포화대에서의 오염물질 거동 및 지반 강도에 대한 이론을 정립 하는 것이 가능할 것임
- 상대적으로 복잡한 불포화대에서의 흡착특성과 강도를 복합적으로 파악하는 것은 현재 불포화대에서의 지반의 문제에 대한 다양한 연구들을 선도해 나갈 수 있을 것임

○ 경제적 · 산업적 측면

- 현재 국내외에서 친환경성과 에너지 절감을 골자로 하는 녹색 건축 인프라 건설 시장의 확대가 기대되고 있는 상황에서 본 연구 과제는 그러한 시장에 부합되는 적절한 기술성을 가지고 있음
- 세계 건설 시장에서 녹색 건축 분야가 차지하는 비중은 약 5%에 불과하지만, 2030년에는 30% 이상의 시장을 형성할 것이며, 이 규모는 약 4조8000억 달러 정도를 형성할 것으로 예상됨 (‘2012 녹색 건축 한마당’ 세미나)
- 특히 건축물에 적용되는 저탄소나 제로 에너지 같은 부분은 녹색건축 인프라 요소 기술을 갖추고 있다고 평가 받고 있지만, 토목 구조물이나 토목 관련 기술은 그러한 부분에서 부족한 부분이 많음
- 본 연구를 통한 지반 분야의 녹색 건축 인프라를 위한 기술을 개발함으로써 보다 새로운 형태로 시장에 적응할 수 있을 것으로 기대 되며, 경제적으로 효과적인 방법으로 접근이 가능 할 것으로

기대됨

- 이러한 국내외의 환경적인 부분을 강조하는 부분의 집중 뿐 아니라 기존의 정화 시장에서도 중국이라는 거대한 시장이 등장하여 전망을 밝게 하고 있음
- 지금 중국은 환경오염에 대한 법률적인 접근 및 조치를 최근에서야 정립해 나가는 단계임에도 불구하고, 굉장히 많은 자본을 환경적인 부분에 투자하고 있음
- 2015년에 약 13조원 규모의 토양 정화 시장이 형성되었으며, 중국 정부 방침에 따르면 2020년까지 국가토양환경보호 시스템을 구축하여 토양환경을 개선해 나갈 예정임
- 이러한 공격적인 환경 정책으로 인해서 2020년에 토양 정화 시장은 2199억 위안, 원화 기준으로 약 38조원에 해당되는 엄청난 시장으로 성장할 가능성을 가지고 있지만, 현재 예방적 차원의 시도는 이루어지고 있지 않음
- 본 연구에서 개발하는 기술은 이러한 성장하고 있는 중국 시장에 진출하기도 좋으며, 국내에 비해서 산업단지의 수나 산업단지의 넓이가 비교가 안되기 때문에 아주 효과적으로 시장을 형성하기에 좋을 것으로 기대됨
- 특히 본 연구에서 초점을 맞추고 있는 공업단지, 기업 소유의 부지들이 주된 오염 지역으로 보고되고 있는 바 이 역시 기술 개발에 긍정적인 요소가 될 것으로 보임



그림 11. 2014-2020년 중국 토양정화 시장 예상 규모(중국통계국, 중국산업 정보방)

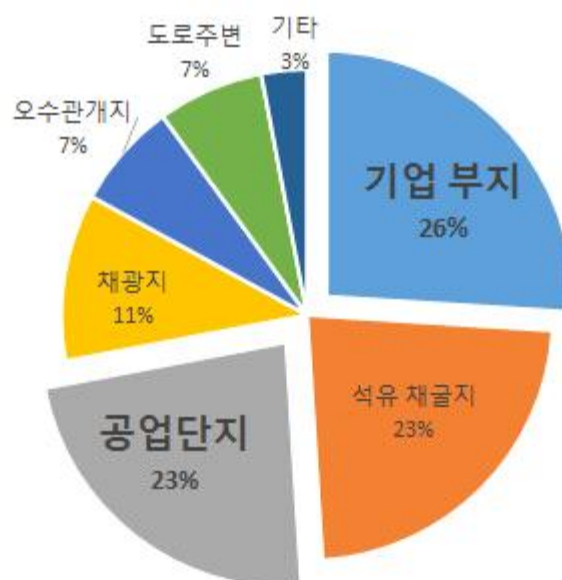


그림 12. 중국의 오염토양 유형 및 비율(KOTRA 우한 무역관 자체조사)

- 최근 이란과의 경제협정을 통해 플랜트 및 철도건설 등의 수출이 논의되고 있는데, 이러한 시설의 운영에 오염을 고려하지 않는다면, 향후 토양오염문제가 크게 불거질 가능성이 있음

- 만약 그대로 방치된 지반이 각종 화학물질들로 오염이 된다면, 향후 토양오염 정화에 막대한 비용이 투입되어야 할 수 있음
- 지속가능한 운영의 관점에서 고흡착성 하이브리드 성토재가 현장에 적용될 필요가 있으며, 그에 따라 경제적 손실을 최소화함으로써 이익을 얻을 수 있음

○ 사회적 측면

- 인류가 어떤 재료를 이용하여 집을 짓고 생활을 영위해 온 이래 ‘흙’이라는 건설재료는 그 활용의 역사가 매우 오래되고 깊다고 할 수 있다. 따라서 흙이라는 건설재료에 대한 개발 연구는 방대한 경험 자료를 토대로 탄탄한 학문의 정립이 이루어져, 일견 혁신이 일어나기는 쉽지 않은 것으로 보일 수도 있다. 그러나 의외로 흙을 다루는 토질역학 학문의 태동은 생각보다 그리 오래되지 않았으며, 아직도 진화하고 있는 단계로 볼 수 있다. 특히 흙은 ‘입자’로 구성된 물질로써, 그 ‘입자’를 무엇으로, 어떻게 구성하느냐에 따라 무궁무진한 기능을 발휘할 수 있는 것으로 보인다.
- 최근 ‘지속가능한 개발’이라는 기치 아래 건설 분야의 흐름이 보다 친환경적인 방향으로 움직이고 있는 것은 자명하다. 이제는 흙이라는 건설재료가 그 입자의 구성을 변화시킴으로써, 보다 환경친화적인 방향으로 나아가야 할 때이다. 그러나 의외로 ‘흙’과 ‘환경’은 접점을 찾지 못하여 왔다. 일반 사람들에게 ‘토양 오염’이란 시각, 청각, 촉각 등 관능적으로 파악이 어려우며, 그 심각성 역시 매우 작게 인식되어 왔으며, 현재도 그러하다. 그러나 사회 전반적으로 토양오염은 의외로 생각보다 만연하며, 그에 따른 다양한 문제점들이 서서히 노출되는 단계이다. 하나의 예로 산업단지, 철도부지 등의 오염을 들 수 있으며, 이러한 문제를 ‘건설’의 관점에서도 다가가야 할 것으로 본다.
- 건설 분야에서 흙이 갖는 기본적인 기능은 흙의 높은 강도를 통한 충분한 지지력이다. 여기에 환경적인 측면을 가미하여 기능을 부과하는 것이 필요하다고 판단된다. 현재까지 건설재료로써의 ‘흙’에 흡착능과 같은 환경적 기능성을 고려한 연구는 전무하다. 지금이라도 ‘지속가능한 개발’ 관점에서 환경적 기능성을 갖는 건설재료의 개발이 필요하다.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

제7장. 연구개발성과의 보안등급

일반

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

I. 연구실 안전 담당 기관: 서울대학교 환경안전원(T.02-880-5500)

II. 서울대학교 안전조치 이행계획

1. 연구활동종사자 환경안전교육 실시

가. 신규교육 및 정기교육

- 석/박사 신규교육: 매년 2월, 8월 (매 학기 이틀 간 14시간)
- 석/박사 정기교육: 서울대학교 환경안전원 홈페이지에 사고사례 및 안전교육 동영상 공개
- 학부생 신규교육: 신입생 오리엔테이션에서 환경안전교육 진행, 실험실 안전 동영상 제공
- 학부생 정기교육: 연구개발인력교육원에서 개발한 연구실 안전 온라인 콘텐츠를 서울대 온라인 강좌 기반 시스템에 접목하여 실시

나. 수시교육: 수시(기관의 요청에 의해 실시)

다. 병원체 및 LMO 실험실 안전교육

라. 방사선 안전교육

2. 실험실 안전점검

- 실험 특성에 따라 유형별로 분류하여 일상점검, 정기점검, 특별안전점검, 정밀안전진단을 실시

3. 실험실 안전사고 대응 및 예방

가. 실험실 안전사고 대응조직을 설치하여 대응 및 처리 매뉴얼 보완 및 사고 대응 훈련 실시하여 유사 사고 발생 시 대응능력 향상

나. 실험실 안전사고에 대한 경각심을 높이고 유사사고를 예방하기 위하여 사고사례를 이메일을 통해 전파

다. 실험실 사고처리 흐름도 및 비상연락스티커 제작 배포

4. 실험실 환경개선사업 실시

- 화학약품 적정보관 유도를 위한 밀폐형시약장과 인화성 화학약품 저장 캐비닛을 각 기관에 배포하여 실험실 환경 개선 유도

5. 실험폐기물관리 강화

- 실험실에서 발생하는 실험폐수 관리를 위해 처리의뢰부터 반출까지의 이력을 추적 관리하는 실험폐수 처리의뢰 프로그램 구축하고 실험폐기물 발생 저감을 위해 환경안전교육 실시

6. 공기오염도 조사 실시

- 내용: 미세먼지, 휘발성유기화합물, 포름알데히드, 이산화탄소 등 7가지 항목

7. 연구활동종사자 특수건강검진 실시 및 보험가입

- 「연구실 안전환경 조성에 관한 법률」 제18조 4항에 따라 「산업안전보건법 시행령」 제29조 및 동법 시행규칙 별표 12의2 「특수건강진단 대상 유해인자」 및 바이러스 등에 노출될 위험성이 있는 연구활동종사자를 모니터링하여 특수건강검진 실시
- 매년 정기적으로 보험가입 및 갱신처리를 지속적으로 이행함

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명 /기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인 용 횟수 등)
1	논문	산업단지에서 의 흡착 성토재로써 제올라이트 토양혼합물의 특성평가	서울대학교	주저자	대한토목 학회 논문집	-	201902	단독사사	

제12장. 참고 문헌

- Abdulkarim, M. and Al-Rub, F.A., (2004) “Adsorption of lead ions from aqueous solution onto activated carbon and chemically-modified activated carbon prepared from date pits.” *Adsorption Science & Technology*, 22(2), pp.119-134.
- Alamo-Nole, L.A., Perales-Perez, O. and Roman-Velazquez, F.R., (2011) “Sorption study of toluene and xylene in aqueous solutions by recycled tires crumb rubber.” *Journal of hazardous materials*, 185(1), pp.107-111.
- Bansode, R.R., Losso, J.N., Marshall, W.E., Rao, R.M. and Portier, R.J., 2003. Adsorption of volatile organic compounds by pecan shell-and almond shell-based granular activated carbons. *Bioresource Technology*, 90(2), pp.175-184.
- Boglaienko, D. and Tansel, B., (2017) “Wicking of light hydrophobic liquid phase from water by pulverized rubber: Theoretical and experimental analyses.” *Journal of hazardous materials*, 325, pp.189-197.
- Bowman, R.S., (2003) “Applications of surfactant-modified zeolites to environmental remediation” *Microporous and Mesoporous Materials*, Vol. 61 pp 43-56
- Brown, P., Jefcoat, I.A., Parrish, D., Gill, S. and Graham, E., 2000. Evaluation of the adsorptive capacity of peanut hull pellets for heavy metals in solution. *Advances in Environmental Research*, 4(1), pp.19-29
- Daifullah, A.A.M. and Girgis, B.S., (2003) “Impact of surface characteristics of activated carbon on adsorption of BTEX” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 214(1-3), pp.181-193.
- Erdem, E., Karapinar, N., and Donat, R. (2004). “The removal of heavy metal cations by natural zeolites.” *Journal of colloid and interface science*, Vol. 280, No. 2 , pp. 309-314. DOI : 10.1016/j.jcis.2004.08.028
- Gode, F., Pehlivan, E., (2006) “ Removal of chromium(III) from aqueous solutions using Lewatit S 100: The effect of pH, time, metal concentration and temperature” *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 136 pp 330-337
- Ghazavi, M., 2004. Shear strength characteristics of sand-mixed with granular rubber. *Geotechnical & Geological Engineering*, 22(3), pp.401-416.
- Guan, H., Bestland, E., Zhu, C., Zhu, H., Albertsdottir D., Hutson, J., Simmons, C.T., Milena, G-M., Tao, X., Ellis, A.V. (2010) “Variation in performance of surfactant loading and resulting nitrate removal among four selected natural zeolites.” *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 183, pp 616-621
- Hellferich, F., Kunin, R. (1963) “Ion exchange.” *Journal of the electrochemical society*, Vol. 110, No. 6 , pp.121C
- Ho, Y.S, and McKay, G., (2000) “The kinetics of sorption of divalent metal ions onto sphagnum moss

- Imamoglu, M. and Tekir, O., 2008. Removal of copper (II) and lead (II) ions from aqueous solutions by adsorption on activated carbon from a new precursor hazelnut husks. *Desalination*, 228(1-3), pp.108–113.
- Issabayeva, G., Aroua, M.K. and Sulaiman, N.M.N., 2006. Removal of lead from aqueous solutions on palm shell activated carbon. *Bioresource technology*, 97(18), pp.2350–2355.
- Jodeh, S., Ahmad, R., Suleiman, M., Radi, S., Emran, K.M., Salghi, R., Warad, I. and Hadda, T.B., (2015) “Kinetics, Thermodynamics and Adsorption of BTX Removal From Aqueous Solution via Date-Palm Pits Carbonization Using SPME/GC-MS” *Journal of Materials and Environmental Science*, 6(10), pp.2853–2870.
- Johns, M.M., Marshall, W.E. and Toles, C.A., 1998. Agricultural by-products as granular activated carbons for adsorbing dissolved metals and organics. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental AND Clean Technology*, 71(2), pp.131–140.
- Kershaw, D.S., Kulik, B.C. and Pamukcu, S., (1997) “Ground rubber: sorption media for ground water containing benzene and o-xylene.” *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 123(4), pp.324–334.
- Kikuchi, Y., Qian, Q., Machida, M. and Tatsumoto, H., 2006. “Effect of ZnO loading to activated carbon on Pb (II) adsorption from aqueous solution” *Carbon*, 44(2), pp.195–202.
- Kim, S.k., Kim, H.K., Baek, K.T, Lim, W.T, (2015) “Characterization of Natural Zeolite and Study of Adsorption Properties of Heavy Metal Ions for Development of Zeolite Mine” *Journal of Miner Society of Korea*, Vol. 28, No. 4, pp 299–308
- Lee, J.H., Salgado, R., Bernal, A. and Lovell, C.W., 1999. Shredded tires and rubber-sand as lightweight backfill. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 125(2), pp.132–141.
- Li, Z., (1999) “Sorption Kinetics of Hexadecyltrimethylammonium on Natural Clinoptilolite” *American Chemical Society*, Vol. 15, No. 19, pp 6438–6445
- Lim, K., (1999). “Adsorption of heavy metal ions from wastewater used zeolites.” *Journal of Korean Society of Environmental Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 437–448 (in Korean)
- Lin, C., Huang, C.L. and Shern, C.C., (2008) “Recycling waste tire powder for the recovery of oil spills.” *Resources, Conservation and Recycling*, 52(10), pp.1162–1166.
- Malkoc, E., Nuhoglu, Y., (2006) “Removal of Ni(II) ions from aqueous solutions using waste of tea factory: Adsorption on a fixed-bed column” *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 135 pp 328–336
- Malliou, E., Loizidou, M., Spyrellis, N., (1994) “ Uptake of lead and cadmium by clinoptilolite” *The Science of the Total Environment*, Vol. 149, pp 139–144
- Martinez, C.E., Motto, H.L., (2000) “ Solubility of lead, zinc and copper added to mineral soils” *Environmental pollution*, Vol. 107, pp 153–158
- Mondal, M.K., (2009) “Removal of Pb(II) ions from aqueous solution using activated tea waste:
-

-
- Adsorption on a fixed-bed column” *Journal of Environmental Management*, Vol. 90 pp 3266-3271
- Ören, A. H., and Kaya, A. (2006). “Factors affecting adsorption characteristics of Zn²⁺ on two natural zeolites.” *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 131, No. 1-3, pp. 59-65. DOI : doi:10.1016/j.jhazmat.2005.09.027
- Ören, A. H., and Özdamar, T., (2013) “Hydraulic conductivity of compacted zeolites” *Waste Management & Research*, Vol. 31, No. 6 pp 634-640
- Perić, J., Trgo, M., and Medvidović, N. V. (2004). “Removal of zinc, copper and lead by natural zeolite—a comparison of adsorption isotherms.” *Water research*, Vol. 38, No. 7, pp. 1893-1899. DOI : 10.1016/j.watres.2003.12.035
- Plassard, G., Winiarski, T., Petit-Ramel, M., (2000) “Retention and distribution of three heavy metals in a carbonated soil: comparison between batch and unsaturated column studies” *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol. 42, pp 99-111
- Savas, H., (2016) “Consolidation and swell characteristics of dispersive soils stabilized with lime and natural zeolite” *Science and Engineering of Composite Materials*, Vol. 23, No. 6, pp 589-598
- Seed, B., Woodward, R.J., Lundgren, R., (1962) “Prediction of swelling potential for compacted clays. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division” *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 88, No. 3, pp 53-87.
- Shang, H.(2015) “Geotechnical laboratory characterization of sandzeolite mixtures” Doctoral dissertation in the University of Louisville
- Shin, E.-C., Park, J.-J., Jeong, C.-G., Kim, S.-H., (2014) “Adsorption characteristics evaluation of natural zeolite for heavy-metal contaminated material remediation” *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol. 13, No. 2, pp 59-67
- Sivapullaiah, P.V., Sitharam, T.G., Rao, K.S.S., 1987. Modified free swell index for clays. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 10, 80-85
- Sullivan, E., Hunter, D.B., Bowman, R.S., (1998) “Fourier Transform Raman Spectroscopy of Sorbed HDTMA and the Mechanism of Chromate Sorption to Surfactant-Modified Clinoptilolite” *ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY*, VOL. 32, NO. 13, pp 1948-1955
- Tiwari, B., Ajmera, B., Moubayed, S., Lemmon, A. and Styler, K., 2012. Soil modification with shredded rubber tires. In *GeoCongress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering* (pp. 3701-3708).
- Vilar, V.J., Botelho, C.M. and Boaventura, R.A., 2005. Influence of pH, ionic strength and temperature on lead biosorption by *Gelidium* and agar extraction algal waste. *Process Biochemistry*, 40(10), pp.3267-3275.
- Wang, L., Zhang, J., Zhao, R., Li, Y., Li, C. and Zhang, C., 2010. Adsorption of Pb (II) on activated carbon prepared from *Polygonum orientale* Linn.: kinetics, isotherms, pH, and ionic strength studies. *Bioresource technology*, 101(15), pp.5808-5814.
- Wibowo, N., Setyadhi, L., Wibowo, D., Setiawan, J. and Ismadi, S., (2007) “Adsorption of benzene and toluene from aqueous solutions onto activated carbon and its acid and heat treated forms: influence of surface chemistry on adsorption.” *Journal of Hazardous Materials*, 146(1-2),
-

pp.237-242.

Yukselen-Aksoy, Y. (2010) "Characterization of two natural zeolites for geotechnical and geoenvironmental applications" *Applied Clay Science*, Vol. 50, pp. 130-136.

Zamzow, M.J., Murphy, J.E., (1992) "Removal of metal cations from water using zeolites" *Separation Science and Technology*, Vol. 27, No. 14, pp 1969-1984 DOI: 10.1080/01496399208019459

Zornberg, J.G., Cabral, A.R. and Viratjandr, C., 2004. Behaviour of tire shred sand mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(2), pp.227-241.

Zorpas, A.A, Inglezakis, V., Loizidou, M., Grigoropoulou, H., (2002) "Particle Size Effects on Uptake of Heavy Metals from Sewage Sludge Compost Using Natural Zeolite Clinoptilolite" *Journal of Colloid and Interface Science* Vol. 250, pp 1-4
