

토양 미생물의 바이오폴리머를 이용한 사질토층의 액상화 저항 강도 증진 원천기술 개발 최종보고서

2020

2021.02.16.

주관연구기관 / 한국과학기술원

토양 미생물의 바이오폴리머를 이용한 사질토층의
액상화 저항 강도 증진 원천기술 개발 최종보고서
2020
국토교통과학기술진흥원

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통기술진흥원 귀하

'토양 미생물의 바이오폴리머를 이용한 사질토층의 액상화 저항 강도 증진 원천기술 개발' (연구 개발 기간 : 2019. 04. 15. ~ 2020. 12. 31.) 과제의 최종보고서 2부를 제출합니다.

2021 . 02 . 16 .

주관연구기관명 : 한국과학기술원 (대표자) 신성철 (인)



주관연구기관책임자: 권태혁

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

제 출 문

국토교통기술진흥원 귀하

‘토양 미생물의 바이오폴리머를 이용한 사질토층의 액상화 저항 강도 증진 원천기술 개발’ (연구 개발 기간 : 2019. 04. 15. ~ 2020. 12. 31.) 과제의 최종보고서 2부를 제출합니다.

2021 . 02 . 16 .

주관연구기관명 : 한국과학기술원 (대표자) 신성철 (인)

주관연구기관책임자: 권태혁

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	1615011199	해당 단계 연구 기간	2020.01.01. ~ 2020.12.31	단계구분	2/2 (해당단계)/ (총단계)
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초원천			
연구과제명	대과제명	대과제가 있을 경우 기재합니다(단위과제일 경우에는 아래에 기재합니다)			
	세부과제명	토양 미생물의 바이오폴리머를 이용한 사질토층의 액상화 저항 강도 증진 원천기술 개발			
연구책임자		해당단계 참여연구원 수	총: 12명 내부: 12명 외부: 0명	해당단계 연구비	정부: 180,000 천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 13명 내부: 13명 외부: 0명	총 연구비	정부: 300,000 천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 천원
연구기관명 및 소속 부서명	한국과학기술원 건설 및 환경공학과			참여기업명	없음
국제공동연구	상대국명: 없음			상대국 연구기관명:	없음
위탁연구	연구기관명: 없음			연구책임자:	없음

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반등급
-------------------------	------

9대 성과 등록·기탁번호

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

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

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

본 연구과제에서는 토양 미생물이 생성하는 바이오폴리머를 이용해 사질토층의 액상화 저항 강도를 증진시키고자 연구를 수행하였다.

1차년도에는 미생물의 배양 환경에 따른 바이오폴리머의 생성량을 정량화하여 모델 박테리아를 선정하였고 실제실험을 통해 바이오폴리머 처리된 사질토의 동적 물성 변화를 관찰하였다. 또 H-B-C 연계 모델을 이용해 지반 내 미생물 배양액 주입 시 투수계수 감소 효과 예측 시뮬레이션을 수행하였다.

2차년도에는 생성된 바이오폴리머의 영률, 전단탄성계수를 측정하고 0.1~100 Hz 구간에서 유변학적 물성을 규명하였다. 또 반복 단순 전단시험과 40 g 가속도의 센트리퓨지 실험을 통해 바이오폴리머 처리 사질토의 액상화 저항 강도 증진효과를 확인하였다. 마지막으로 H-B-C 연계 모델을 통해 바이오폴리머 생성 분포, 공극률 감소 효과 분석을 진행하였으며 유체 주입 시뮬레이션을 통해 지반의 투수계수 이방성에 따른 유체 침투 형상 및 유효 반경 분석, 주입 가이드라인을 설립하였다.

보고서 면수
57 쪽

요약문

연구의 목적 및 내용	본 제안연구의 최종목표는 토양 미생물의 발효반응 기반 바이오폴리머를 이용한 사질토층의 액상화 저항 강도 증진 원천기술 개발이다. 이를 위한 세부목표는 다음과 같다. 1. 포화사질토 환경 하 이형/동형젖산균(hetero-/homo-lactic acid bacteria)의 발효 반응으로 인한 바이오폴리머 생성 특성 및 생성된 바이오폴리머의 물성 규명 (수행과제1-1) 이형/동형젖산균의 성장 특성 및 발효 반응 시 바이오폴리머 생성 특성 규명 및 최적 모델 미생물 선정 (수행과제1-2) 모델 미생물에 의해 생성된 바이오폴리머의 물리화학적, 유변학적 물성 규명 2. 미생물에 의해 바이오폴리머 생성 시 느슨한 포화 사질토의 동적 거동 및 액상화 저항 강도 증진효과 규명 (수행과제2-1) 지진파대역에서의 바이오폴리머 생성 사질토의 압축 및 비틀 전단 강성, 감쇠 계수 및 액상화 저항강도 보강효과 규명 (수행과제2-2) 진동대-센트리퓨지 실험 및 수치모델을 통한 바이오폴리머 보강된 지반의 지진 시 동적 거동 및 액상화 저항 성능 규명 3. 대상 지반의 액상화 보강을 위한 미생물 접종액 및 배양액의 최적 주입 전략 및 가이드라인 개발 (수행과제3-1) 주입된 지반 내 미생물 성장 및 바이오폴리머 생성 분포 예측을 위한 Hydro-bio-chemical 연계 모델링 기법 개발 (수행과제3-2) 액상화 보강을 위한 미생물 접종액 및 배양액 최적 주입 전략 및 가이드라인 개발				
연구개발성과	본 제안연구에서는 다음 3가지의 핵심 연구 개발 성과를 설정하였다. 1. 최적 미생물과 배양액 선정 및 바이오폴리머 동적 물성 규명 2. 바이오폴리머의 사질토 지반 액상화 저항강도 보강효과 규명 3. 지반 내 바이오폴리머 생성 분포 예측 모델링 기법 개발 및 액상화 보강을 위한 미생물 접종액과 배양액 주입 가이드라인 설립				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	• 바이오폴리머의 지진 감쇠 효과 규명 • 친환경적인 액상화 보강 공법 개발로 인한 사회적 비용 절감 • 저비용 공법 개발로 인한 시공비용 절감 • 지반 내 유체 주입 및 생물학적 지반 보강 시 효율 증진 • 수변 포화지반 안정화를 통해 사회 인프라 시설의 안전성 증진 • 토양 미생물학, 생태학 등 다양한 분야와 융합연구를 위한 토대를 제공				
핵심어 (5개 이내)	바이오폴리머	액상화	감쇠 계수	액상화 저항강도	H-B-C연계모델

< SUMMARY >

Purpose & Contents	The objectives of the proposed research is “development of biological soil improvement technique using biopolymer produced by soil bacteria for liquefaction-prone sands” The specific aims are as follows: (Aim1) Identify characteristics of biopolymer formation and properties produced by hetero-/homo-lactic acid bacteria in saturated sands (Task1-1) Identification of characteristics of biopolymer production by hetero-/homo-lactic acid bacteria and determination the model bacterium (Task1-2) Characterization of physicochemical and rheological properties of the model biopolymer (Aim2) Examine the effect of biopolymer in dynamic response and liquefaction resistance improvement of liquefaction-prone sands (Task2-1) Examination the extent of improvement in dynamic shear/torsional strength, damping ratio, and liquefaction resistance in seismic frequency caused by biopolymer in sands (Task2-2) Examination the extent of improvement in liquefaction resistance caused by biopolymer using centrifuge test (Aim3) Develop the optimal bacteria and growth media injection strategy to mitigate the liquefaction (Task3-1) Development of the Hydro-Bio-Thermal coupled model to predict the bacterial growth and biopolymer formation distribution at the injection site (Task3-2) Development of the optimal bacteria and growth media injection strategy to mitigate the liquefaction				
Results	Expected development products are as follows: 1. Determine the optimal model bacteria and identify the dynamic properties of biopolymer 2. Examine the liquefaction resistance improvement effect of biopolymer 3. Develop the biopolymer distribution predicting model and the optimal bacteria and growth media injection strategy to improve liquefaction-prone sand				
Expected Contribution	• Verification the extent of improvement in liquefaction resistance induced by biopolymer • Social cost reduction by developing eco-friendly soil improvement technique • Development of low cost soil improvement technique • Improvement efficiency of fluid injection and bio-treatment in soil • Enhancement of safety of social infrastructure by stabilize highly saturated soil • Contribution to soil ecology and soil microbiology				
Keywords	Biopolymer	Liquefaction	Damping coefficient	Liquefaction resistance	H-B-C coupled model

< CONTENTS >

1. Project overview	1
2. Previous literature and current technology review	4
3. Research results	6
4. Achievements and expected contribution	49
5. Application	51
6. Collected information from outside Korea	53
7. Security grade of R&D achievement	54
8. Research facilities and equipments registered in R&D system	54
9. Safety action	54
10. Research archives	55
11. Miscellaneous	56
12. Reference	56

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
2. 국내외 기술 개발 현황	4
3. 연구수행내용 및 성과	6
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	49
5. 연구개발성과의 활용 계획	51
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	53
7. 연구개발성과의 보안등급	54
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	54
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	54
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	55
11. 기타 사항	56
12. 참고 문헌	56

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적 및 필요성

- 지하수 등으로 포화된 사질토 지반에 지진과 같은 강한 하중이 작용하였을 때, 입자들이 재배열되며 지반은 수축하고 입자 사이의 간극수압의 증가하게 된다. 이에 따라 **사질토 지반 층의 강도가 크게 감소하고 사질토가 액체처럼 움직이게 되는데, 이를 액상화**라 한다. 액상화는 지진에 의한 대표적인 지반 공학적 현상이며, 사회적, 경제적으로 많은 피해를 야기해왔다. 대표적으로 1964년 니이가타 지진 및 알래스카 지진, 1976년 중국의 탕산 지진, 1995년 일본의 한신 대지진, 2011년 일본의 동일본 대지진, 2011년 뉴질랜드의 크라이스트처치 지진 때 관측되었고, 그에 따른 피해로는 건축물의 전도, 철로의 손상 등이 보고되었다. 중약진 대역으로 지진에 대한 피해가 상대적으로 적을 것으로 예상된 국내에서도, 2017년 포항 지진 때 처음으로 액상화 현상이 관측된 바 있다 (그림 1). **처음 관측된 피해 이후로 액상화에 대한 연구 및 피해 저감을 위한 노력이 지속되어 오고 있다.**

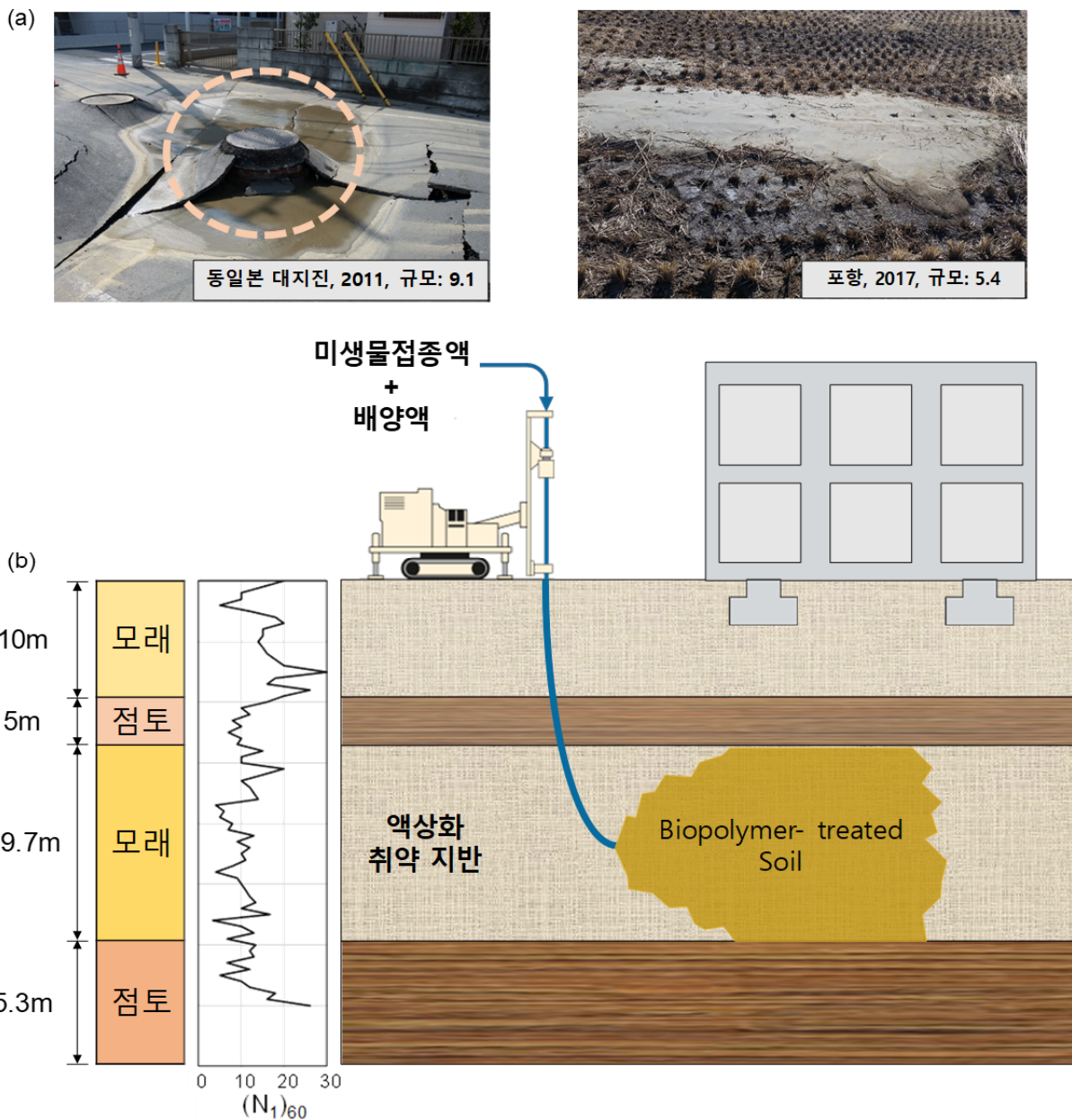


그림 1. (a) 액상화 피해 사례, (b) 액상화 취약 지반의 미생물 보강 기법 모식도

- 액상화된 사질토는 증가된 수압에 따라 땅 위로 상승하여 밖으로 분출되며, **이에 따라 생성된 지하공간으로 인해 지반 침하로 이어지기도 한다.** 도심지에서의 지반 침하는 심각한 인명피해로 이어질 수 있기 때문에 액상화 피해가 예상되는 느슨한 포화 사질토층의 보강 및 액상화 저항 강도를 증진하는 것이 매

우 중요하다. 액상화 보강 공법으로는 크게 물리적 가공기법, 고화/고밀도화, 간극수압 방출법, 기초 보강 등이 있다 (JGS, 1998). 그 중 가장 많이 사용되는 방법은 고화/고밀도화 방법이며, 전세계적으로 50%가 넘는 프로젝트에서 사용되고 있다. 고화/고밀도화 방법의 예로는 동다짐공법, 진동다짐공법, 모래 다짐말뚝공법 및 다양한 그라우팅공법 등이 있다

- 위에서 언급된 다짐공법들 같은 경우 적용가능 깊이의 제한, 지나친 유통비, 진동에 의한 주변건물에 피해 등의 문제점이 있으며, 그라우팅 공법의 경우 대부분 시멘트같은 화학제품을 이용하는 것이 대부분이기에 비용과 환경적인 한계점을 가지고 있다 (Mitchell, 2008). 이러한 기존 방법들의 한계점 때문에, **액상화 재해 보강 및 액상화 저항 강도 증진을 위한 저비용/친환경적인 생물학적 보강공법에 대한 기술적/사회적 수요가 높아지고 있다** (그림1).
- 최근 지반 공학 분야에서 미생물 활동의 활용이 관심을 받게 된 이유는 자연적인 지반시스템 어디서나 흔하게 발견된다는 점과 지반 공학 분야에서의 다재다능한 적용성 때문이다. 특히 젖산균은 발효반응을 통하여 부산물중 하나인 가접착성 (Pseudo-glue)의 바이오폴리머를 생성함이 밝혀짐으로써 지반 공학 분야에서의 적용 가능성을 보였다. 이러한 바이오폴리머는 박테리아가 존재하는 모든 흙의 공극 내부에 생성되어 축적된다. 흙 내부에서의 바이오폴리머 생성 및 축적은 두 가지 물리적 현상의 원인이 된다. (1) 흙 입자 내부에 축적되며 지반매질의 공극을 감소시키고 공극의 막힘 (바이오클로깅, Bioclogging) 현상을 일으키며 (Baveye et al., 1998; Bouwer et al., 2000; Dunsmore et al., 2004), (2) 흙 입자 표면이 가접착성의 바이오폴리머로 코팅되어 지반의 강도를 증진시킨다 (Chang and Cho, 2012).

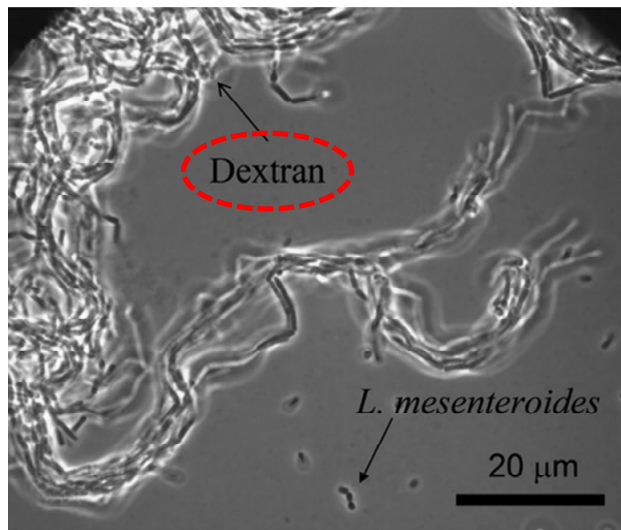


그림 2. 바이오폴리머와 미생물 cell 의 SEM 이미지(Kwon and Ajo-Franklin, 2013).

- 본 연구진은 선행 연구를 통하여 흙에서의 미생물적 바이오폴리머의 축적이 투수성, 침식 저항성, 전단 강도, P- / S- 파 감쇠, 유체 점성 등 흙 물성에 미치는 영향을 밝혀냈다 (그림3; Kwon and Ajo-Franklin, 2013; Noh et al., 2016; Ham et al., 2018).

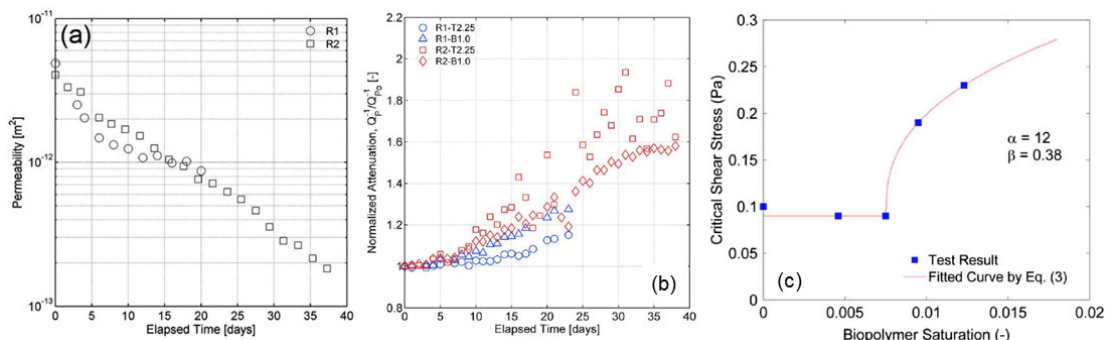


그림 3. 본 연구진의 바이오폴리머 관련 선행 연구 결과: (a) 모래의 투수성 감소, (b) P-wave 감쇠 증가, (c) 침식 저항성 증가

- 현재까지 미생물에 대한 지반 공학적 연구들은 모델박테리아를 이용하여 탄산염의 침전과 지반 고결화를

중심으로 이루어졌으며 (Dejong et al., 2006; Armstrong and Ajo-Franklin, 2011; Lin et al., 2014), 미생물적 바이오폴리머 또한 다양한 과학 및 공학 분야에서 적용되고 있다 (Dejong et al., 2010; Ivanov and Chu, 2008). 그러나 지진에 의한 반복하중 시, 가접착성의 바이오폴리머와 흙 입자가 어떻게 상호작용하는지에 대한 근본적 이해는 여전히 초기단계에 있다. 뿐만 아니라, 바이오폴리머의 축적이 지진 하중 하의 흙의 거동에 어떠한 영향을 미치는지 또한 밝혀진바 없다. 따라서 본 연구진은 토양 미생물의 발효반응 기반 바이오폴리머를 이용한 사질토층의 액상화 저항 강도 증진 원천 기술 개발을 하고자 한다. 본 제안된 연구에서는 포화사질토 환경 하에서 이형젖산균(hetero-lactic acid bacteria) 및 동형젖산균(homo-lactic acid bacteria)의 발효 반응으로 생성된 바이오폴리머의 생성 특성 및 물성을 규명하고, 바이오폴리머의 생성이 느슨한 포화 사질토의 동적 거동 및 액상화 저항 강도에 미치는 효과를 규명하고자 한다. 마지막으로 대상 지반의 액상화 보강을 위한 박테리아 접종액 및 배양액의 최적 주입 가이드라인을 제시하고자 한다.

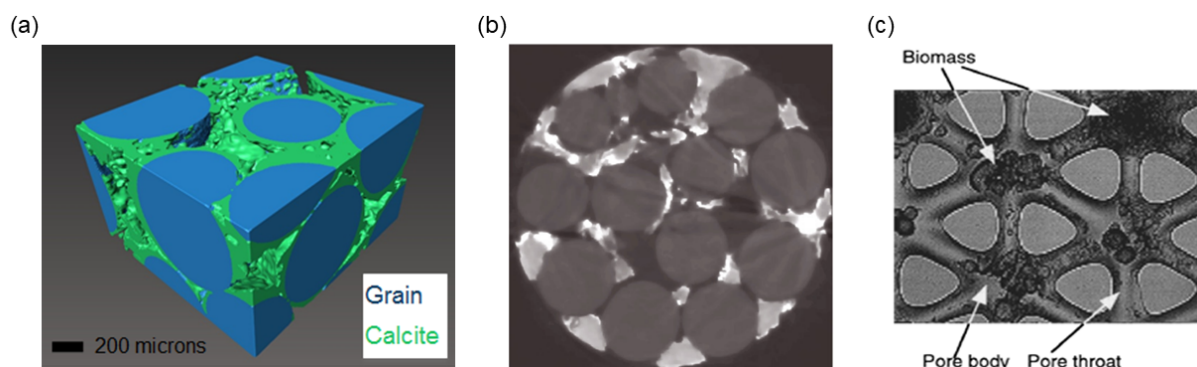


그림 4. (a) Glass beads 내 박테리아로 인한 탄산염의 고결화의 Xray-CT 이미지(Armstrong and Ajo-Franklin, 2011), (b) Glass beads 주변에 생성된 바이오필름 (Ostvar et al., 2018), (c)공극 내에 축적된 바이오매스로에 대한 이미지(Kim and Fogler, 2000).

2. 연구개발 범위

- 본 연구는 이론적 연구를 통하여 이론적 개념을 정립한 후(1차 년도), 최종적으로 실험실 성능평가를 증명하는 단계(2차 년도)로 정의된다(TRL1-TRL2-TRL3-TRL4).
- 바이오폴리머를 이용한 흙의 투수성 저감 및 토양 안정화에 대한 연구는 국내외적으로 늘어나는 추세이나 바이오폴리머 처리된 지반의 전단파 속도 및 감쇠계수 등 동적 물성 변화에 대해서는 연구가 매우 부족한 실정이다
- 특히 지진과 같이 동적 하중에 의한 지반의 액상화 저항 강도 증진 효과에 대한 연구는 거의 진행된 바가 없다.
- 또 실제 현장 적용을 위한 설계 단계에서 활용할 유체 주입 형상 및 영향 범위에 대한 연구, 나아가 주입 가이드라인에 대한 정보 또한 매우 부족하다.
- 그 동안 대부분의 액상화 취약지반 보강 공법이 그라우팅 공법처럼 화학물질을 사용하여 지반 보강을 수행한 반면 토양 미생물을 이용하여 친환경적으로 지반의 액상화 위험도를 감소시키는 연구라는 점에서 창의도전연구(기초 원천기술)의 성격에 매우 잘 부합한다고 판단된다.

구분		연구착수	연구종료	단계별 설명	
기초연구 단계	TRL 1	☒	☒	TRL 1	이론적 연구단계
	TRL 2	☐	☒	TRL 2	기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	☐	☒	TRL 3	실험적 증명 단계
	TRL 4	☐	☒	TRL 4	실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	☐	☐	TRL 5	유사환경 시험 단계
	TRL 6	☐	☐	TRL 6	유사환경 기술시험 단계
실용화 단계	TRL 7	☐	☐	TRL 7	실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	☐	☐	TRL 8	시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	☐	☐	TRL 9	현장적용/사업화 단계

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 국내 현황

- 국내에서 액상화에 대한 연구는 1980년대 후반 처음 시작되었으나, 대부분의 지역이 중약진 지역으로 평가되어오던 국내 실정에 따라 액상화 평가 방법 개발 (고재만, 1991; 이익호 외 2003; 최재순 외 2007), 수치해석 모델링 (김문겸 외, 2002; 최재순 외, 2002; 송치용 외, 2004; 박성식 외 2005), 및 물리화학적 개량방법 (박종관, 1992; 김종국과 채영수, 2006; 권영철, 2007) 에 집중되어있었다. 반면에 미생물, 특히 박테리아의 활동과 부산물을 이용하여 흙의 물리 역학적 특성의 변화를 본 연구들은 표 1과 같이 2011년부터 결과가 나오고 있을 정도로 매우 초기 단계에 있다. 또한, 이 결과들 마저도 직접적으로 박테리아를 이용한 방법이 아닌 탄산염에 의한 흙의 고결화나 이미 생성된 바이오폴리머를 이용한 연구가 대부분인 실정이며, 특히 지진에 의한 액상화 재해 보강에 미생물을 이용한 연구는 없었다.

표 1. 박테리아에 의한 지반 물성 변화에 대한 대표적인 국내 연구 현황

박테리아의 기능	연구 내용	저자 (연도)
흙의 물성 변화	흙 속의 박테리아가 액소성 한계에 미치는 영향	박성식과 농전전 (2012)
바이오폴리머	바이오폴리머(글루칸)을 이용한 화강풍화토의 강도 증진에 대한 연구	Chang and Cho (2012)
	모델 박테리아가 생산하는 바이오 폴리머를 이용한 흙의 투수계수 저감	Noh et al. (2016)
	박테리아 부산물인 바이오폴리머가 흙의 침식율을 증진시키는 것을 실험적으로 확인함.	Ham et al. (2018)
고결화 작용 (Biocementation)	박테리아를 이용한 실트와 모래의 고결화	박경호와 김대현 (2012)
	박테리아에 의해 생성된 광물질이 고결모래의 강도에 미치는 영향	Kim et al. (2015)
	바이오그라우팅 공법의 주입재 배합비에 따른 적용성 연구	임춘호 (2017)

2. 국외 현황

- 액상화는 지진에 의해 흔히 발생하는 현상이다. 때문에 지진피해가 상대적으로 많은 나라들에서는 이 액상화에 대한 연구 및 지반 보강 방법에 대한 연구를 활발하게 진행해왔다. 표 2는 대표적인 보강 방법 및 특징에 대해 보여주고 있다 (Mitchell, 2008).

표 2. 대표적인 액상화 보강 공법 (Mitchell, 2008)

보강 공법	적용 지반	유효 깊이	장점	단점
동다짐 공법	포화 모래 및 실트 지반; 부분포화 흙	10m	1) 저비용; 2) 단순성, 3) 대면적에 용이	1) 낮은 유효깊이; 2) 지나친 유통비; 3) 주변 건축물에 피해
압밀 그라우팅	빠르게 압밀/압축 가능한 지반	제한 없음	1) 조절가능한 보강 위치; 2) 세립자 포함 지반에서 효과적	1) 느림; 2) 고비용
침투 그라우팅	모래, 조립토 지반, 암반	제한 없음	1) 과잉 간극수압 유발되지 않음; 2) 보강 지역의 국지화 가능	1) 고비용; 2) 과한 세립비 때문에 대부분의 지반에서 이용이 제한됨
미생물이용 침투바이오그라우팅	모래, 조립토 지반	제한 없음	1) 친환경; 2) 저비용	1) 외부 환경에 영향을 받음.

- 최근 저비용/친환경적인 방법의 개발을 위해 미생물을 이용한 보강 공법 또한 진행되어 왔다. 특히, 지반공학 분야에서는 미국의 한 대학에서 시작한 미생물에 의한 탄산염 고결화에 대한 연구(DeJong et al., 2006)를 그 시발점으로 보고 있다.
- 그 이후, 박테리아에 의한 지반의 물성 변화의 경우, 탄산염을 이용한 고결화 작용(그림 4 참조; Armstrong and Ajo-Franklin, 2011; Lin et al., 2014; Soon et al., 2014), 질소가스의 생성을 통한 액상화 방지(Rebata-Landa and Santamarina, 2011), 바이오필름으로 인한 투수성 감소(그림 4 참조; Yasuhara et al., 2012; Cheng, 2013)를 중심으로 연구가 진행되어왔다. 정리된 표 3에서 볼 수 있듯이, 지반공학 분야에서는 탄산염 고결화에 대해 대부분의 연구가 수행되어왔으며, 바이오 폴리머 및 바이오필름에 대한 연구는 거시적인 투수성 저하에 대한 연구만 수행되었을 뿐, 흙 입자와의 상호작용에 대한 연구는 진행된 바 없는 것으로 나타났다. 특히 침식저항성 증진에 대한 연구는 그 선행연구의 사례가 극히 드물다.

표 3. 박테리아에 의한 지반 물성 변화에 대한 대표적인 국외 연구 현황

박테리아의 기능	연구 내용	저자 (연도)
가스 생성 (Gas generation)	포화 지반에서 토양 박테리아에 의해 발생된 기포로 인해 포화도가 감소하면서, 액상화 저항 능력이 증가함을 제안.	Rebata-Landa and Santamarina (2011)
투수성 감소 (Bioclogging)	바이오필름이 생성되는 과정을 탄성파와 전기비저항을 이용하여 모니터링하는 연구를 수행	Davis et al. (2010)
	가수분해효소 부산물을 이용해 생성된 탄산염이 사질토의 투수성에 미치는 영향을 연구	Yasuhara et al.(2012)
	박테리아에 의해 생성된 탄산염이 사질토의 포화도에 따라 투수성에 미치는 영향을 연구	Cheng (2013)
고결화 작용 (Biocementation)	마이크로 X-ray CT를 이용하여 탄산염이 고결화 되는 과정을 영상화에 성공함.	Armstrong and Ajo-Franklin (2011)
	토양 미생물에 의해 생성된 탄산염이 강도에 미치는 영향을 연구	Soon et al. (2014)
	두 개의 유리구슬사이에 박테리아를 이용하여 탄산염 고결 작용 후, 인장강도와 전단강도의 증진을 연구함.	Lin et al. (2014)

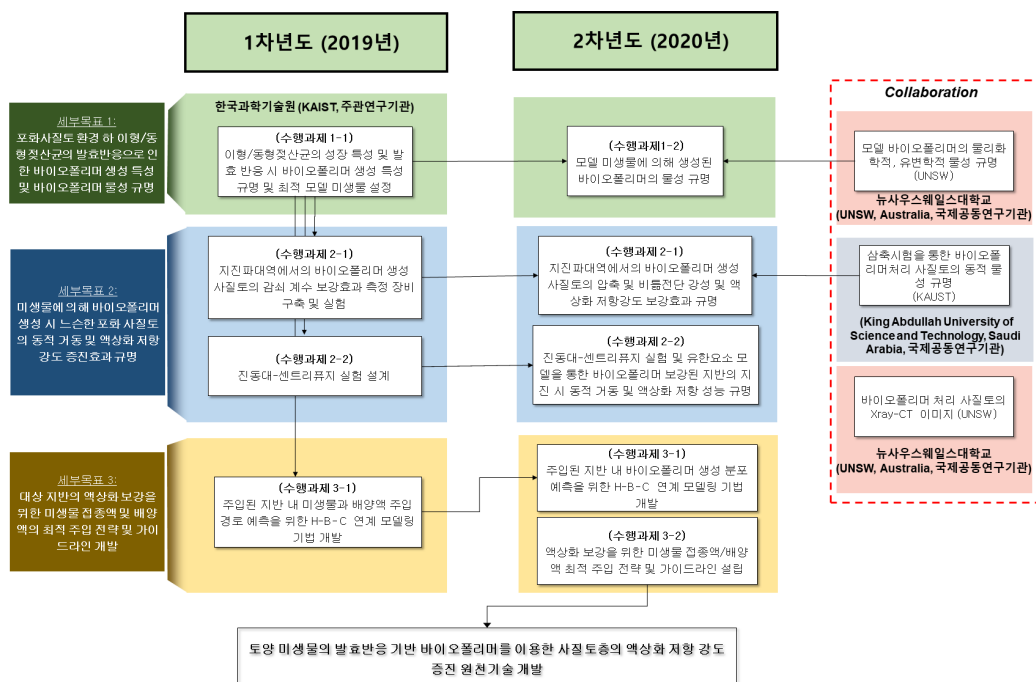
제3장. 연구수행내용 및 성과

1. 연구 개발 수행 내용

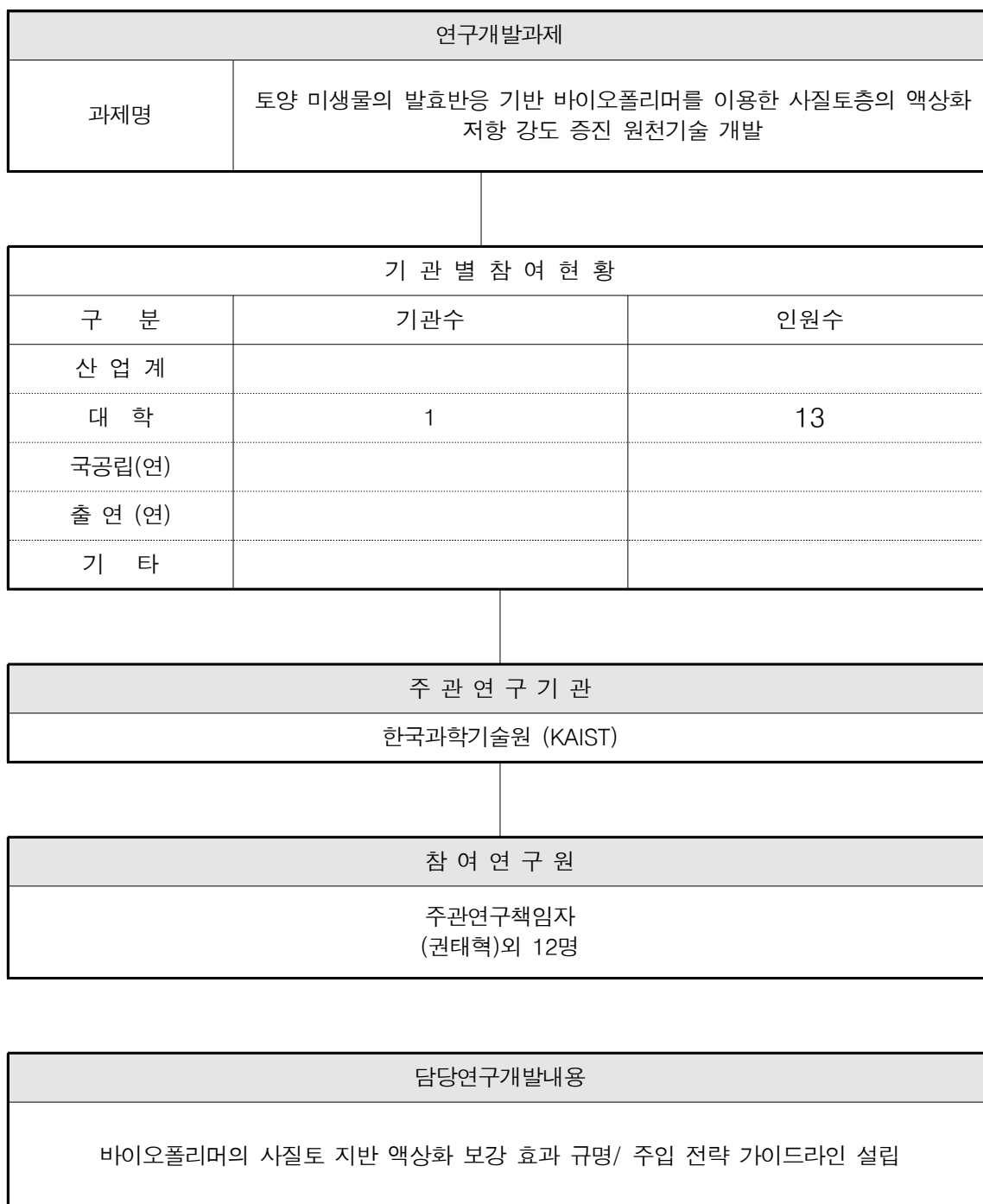
최종목표	토양 미생물의 발효 반응 기반 바이오폴리머를 이용한 사질토층의 액상화 저항 강도 증진 원천기술 개발	
핵심성과물	세부 연구 목표	
【핵심 성과 1】 최적 미생물과 배양액 선정 및 바이오폴리머 동적 물성 규명	단위성과 (1-1)	포화 사질토 환경 하 이형/동형젖산균의 발효 반응으로 인한 바이오폴리머 생성 특성 및 생성된 바이오폴리머의 물성 규명 •액상화 보강을 위한 최적의 미생물 및 배양 조건 선정
	단위성과 (1-2)	모델 미생물에 의해 생성된 바이오폴리머의 물리화학적, 유변학적 물성 규명 •바이오폴리머의 지진 물성 및 전단 거동 분석
【핵심 성과 2】 바이오폴리머의 사질토 지반 액상화 저항 강도 보강 효과 규명	단위성과 (2-1)	지진파대역에서의 바이오폴리머 생성 사질토의 압축 및 비틀전단 강성, 감쇠 계수 및 액상화 저항강도 보강효과 규명 •공진주시험, 반복전단실험을 통한 액상화 보강 효과 측정 및 X-ray CT 이미지 분석
	단위성과 (2-2)	진동대-센트리퓨지 실험 및 수치모델을 통한 바이오폴리머 보강된 지반의 지진 시 동적 거동 및 액상화 저항 성능 규명 •진동대-센트리퓨지 실험을 통한 현장 응력 조건에서의 액상화 보강 효과 확인
【핵심 성과 3】 액상화 보강을 위한 미생물 접종액과 배양액 주입 가이드라인 설정	단위성과 (3-1)	주입된 지반 내 미생물 성장 및 바이오폴리머 생성 분포 예측을 위한 H-B-C 연계 모델링 기법 개발 •수치해석 프로그램을 이용한 H-B-C 연계 미생물 주입 및 바이오필름 분포 분석 모델 개발
	단위성과 (3-2)	액상화 보강을 위한 미생물 접종액 및 배양액 최적 주입 전략 및 가이드라인 개발 •효율적인 액상화 보강을 위한 미생물 접종액/배양액의 주입 조건 설정

2. 연구 개발의 추진전략·방법 및 추진체계

- 본 연구진은 제안된 ‘토양 미생물의 바이오폴리머를 이용한 사질토층의 액상화 저항 강도 증진 원천기술’을 개발하기 위하여 1년 9개월간의 연구기간을 설정하고, 각각 연차별 단기 목표를 설정하여 연구를 수행하였다. 제안된 연구는 미생물분야와 지반공학 분야의 융합 연구이며, 따라서 각 분야에서의 전문가들과의 연계가 필수적이다. 이에 국내외 연구진과 연계해서 연구개발을 추진하였다. 연구 추진체계를 도표화 하면 다음과 같다.



○ 연구수행 체계도



○ 추진인정

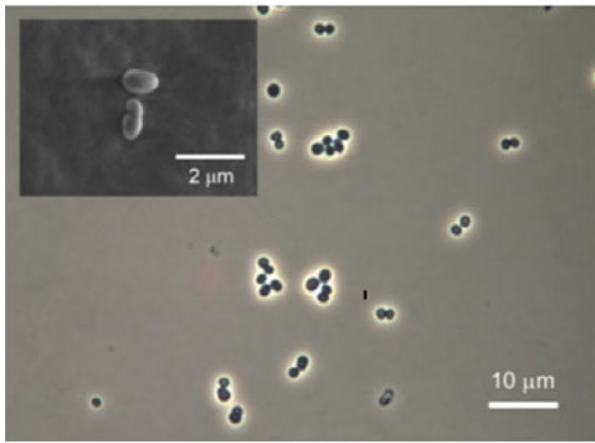
구분	연구과제명 (연구수행기관)	관련 성과목표/지표			세부추진내용 (연구수행 Activity)	Activity별 산출물	소요 연구비 (백만원)	1차년도			2차년도			
		핵심성과	단위성과	질적 성과지표				2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4
주관	KAIST(U NSW 참여)	1	1-1	1-1-①	이형/동형젖산균의 성장특성 및 발효반응 시 바이오폴리머 생성특성 규명 및 최적 모델 미생물 선정	보고서								
주관	KAIST	2	2-1	2-1-①	지진파대역에서의 바이오폴리머 생성 사질토의 압축 및 비틀전단 강성, 감쇠 계수 및 액상화 저항강도 보강효과 규명	실험								
주관	KAIST	3	3-1	3-1-①	주입된 지반 내 미생물 성장 및 바이오폴리머 생성 분포 예측을 위한 H-B-C 연계 모델링 기법 개발	모델링 코드								
주관	KAIST(U NSW 참여)	1	1-2	1-2-①	모델 미생물에 의해 생성된 바이오폴리머의 물리화학적, 유변학적 물성 규명	실험, 보고서								
주관	KAIST (KU 참여)	2	2-2	2-2-①	진동대-센터리퓨지 실험 및 수치모델을 통한 바이오폴리머 보강된 지반의 지진시 동적 거동 및 액상화 저항 성능 규명	실험, 모델링 코드								
주관	KAIST	3	3-2	3-2-①	액상화 보강을 위한 미생물 접종액 및 배양액 최적 주입 전략 및 가이드라인 개발	보고서								

3. 연구 내용 및 결과

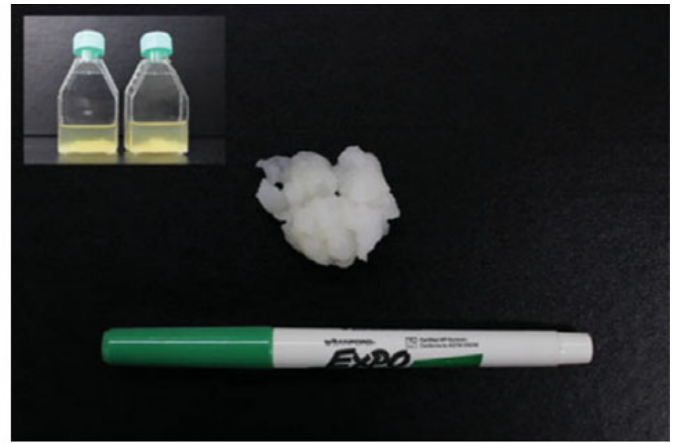
3-1. 포화사질토 환경 하 이형/동형젖산균의 발효 반응으로 인한 바이오폴리머 생성 특성 및 생성된 바이오폴리머의 물성 규명 (세부목표 1)

3-1-1. 이형/동형젖산균의 성장 특성 및 발효반응 시 바이오폴리머 생성특성 규명 및 최적 모델 미생물 선정 (수행과제 1-1)

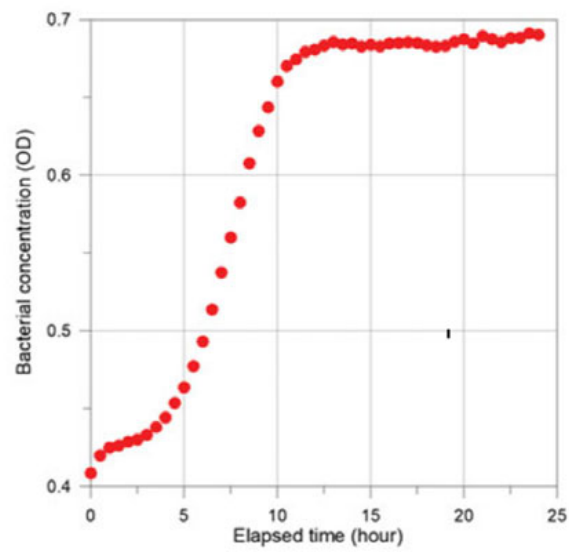
- 본 연구에서는 *Leuconostoc mesenteroides*를 모델 박테리아로 선정하였다. 선행 연구를 통해 해당 박테리아가 물에 녹지 않는 바이오폴리머를 생성함으로써 사암이나 흙으로 이루어진 시료의 공극을 막는 것이 실험적으로 규명되어왔다. 또한 성장 모델과 반응 구조가 잘 규명되어 있으며 혐기와 호기 상태 모두에서 자랄 수 있기 때문에 실험에 이용하기 용이하다는 장점이 있다. *L.mesenteroides*는 그림 5(a)와 같이 타원형의 형태를 가지며 약 $\sim 1\mu\text{m}$ 의 크기를 갖는다. 또한 이당류인 Sucrose가 공급될 경우, 대사를 통해 바이오폴리머의 일종인 덱스트란을 생성할 수 있다 (그림 5(b)).
- 미생물의 성장 과정은 크게 Lag / Exponential growth / Stationary 세 가지 단계로 나뉠 수 있다. Lag 구간에서는 미생물은 자기 복제를 준비한다. Exponential growth 구간은 미생물 세포가 기하급수적으로 증가하는 구간이다. 미생물 세포의 급격한 증가는 영양분이 고갈될 때 까지 계속된다. 영양분의 고갈과 함께 세포 밀도는 포화가 되는데 이 구간을 Stationary 구간이라고 한다. 본 연구에서는 광학 밀도 측정을 통해 모델 박테리아인 *L.mesenteroides*의 세 가지 성장 단계를 확인할 수 있었다 (그림 5(c)).
- 또한, 바이오폴리머 생성을 위한 Sucrose의 농도를 40, 80, 150, 300 g/L로 달리하면서 영양분 함유량에 따른 바이오폴리머의 생성 특성을 확인하였다 (그림 6). 실험에 이용된 미생물 배지의 조성은 표 4과 같다. 이당류인 Sucrose의 농도가 증가할수록 생성되는 바이오폴리머의 양 또한 증가함을 확인할 수 있었다. 그러나 Sucrose의 농도가 증가할수록 g당 생성되는 바이오폴리머의 생성량은 감소하는 경향을 보였다 (표 5).



(a)



(b)



(c)

그림 5. (a) 광학 현미경을 이용한 모델 박테리아 *Leuconostoc mesenteroides*의 모습과 (b) 생성 후 여과된 불용성 덱스트란의 모습. (c) 광학 밀도를 이용한 모델 박테리아의 세포 밀도 측정 결과.

표 4. 미생물 배양에 이용된 배지의 조성

조성	농도
Sucrose	40, 80, 150, 300 g/L
Yeast extract	10 g/L
1M Monobasic (KH_2PO_4)	41 mL/L
1M Dibasic (K_2HPO_4)	59 mL/L

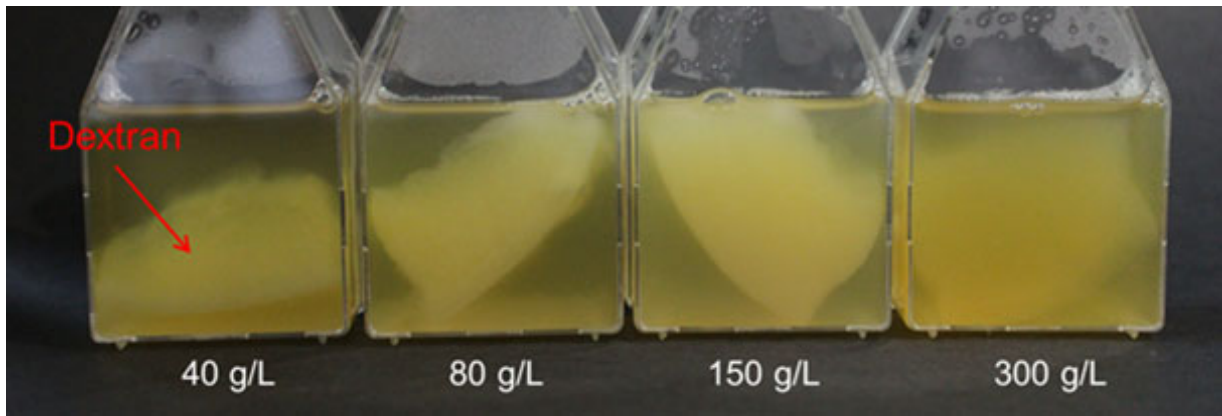


그림 6. 서로 다른 영양분 함유량에 따른 덱스트란 생성량의 변화.

표 5. Sucrose 농도에 따른 바이오폴리머의 생성량

	REF	S40	S80	S150	S300
여과된 바이오폴리머의 질량 (g / 44 cm ³)	0	0.3	0.47	0.59	0.74
1g의 Sucrose당 생성된 바이오폴리머의 질량	0	0.17	0.13	0.089	0.056

3-1-2. 모델 미생물에 의해 생성된 바이오폴리머의 물리 화학적, 유변학적 물성 규명 (수행과제 1-2)

○ 바이오폴리머를 모사한 젤라틴의 물리 화학적 물성 규명.

- 바이오폴리머를 모사한 점탄성의 젤라틴을 이용하여 개략적인 바이오폴리머의 물리 화학적 물성을 규명하였다. 젤라틴은 물-혼합비와 양생 환경(온도, 습도, 양생 시간) 등에 따라 다양한 물리적 특성을 보인다. 모든 시료는 젤라틴을 물에 완전히 녹이기 위해 60° C 이상의 온도에서 조성되었다. 젤라틴의 양생은 주변 온도가 20~21° C 인 상태에서 24시간 동안 진행되었다. 젤라틴 농도는 질량을 기준으로 0, 8, 12, 16, 20%로 조절되었다. 예를 들어 20%의 젤라틴 농도는 20 g의 젤라틴과 80 g의 물이 혼합된 것을 말한다.
- 젤라틴 시료의 물리적 특성은 젤라틴 농도를 변화시키며 일축 압축 강도와 탄성 계수를 측정하였다. 영률(E)과 전단 탄성 계수(G)는 각각 0-55 kPa, 0-25 kPa의 범위를 가졌으며, 젤라틴 농도가 증가할수록 계수의 값 또한 증가하였다 (그림 7, 8).

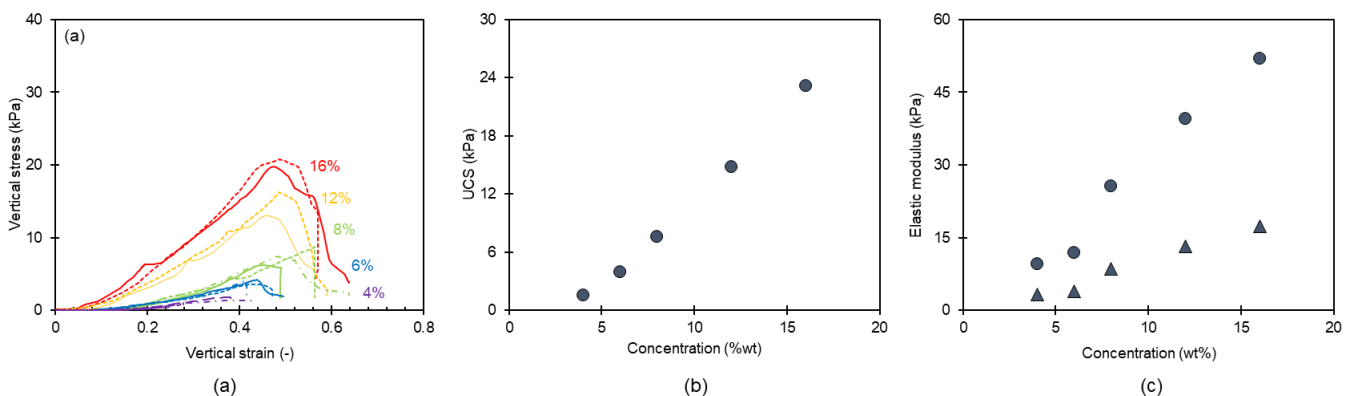


그림 7. 농도에 따른 젤라틴의 물리적 특성 변화: (a) 일축 압축 실험을 통해 얻은 응력-변형률 곡선, (b) 일축 압축 강도, (c) 영률(E)과 전단강도(G).

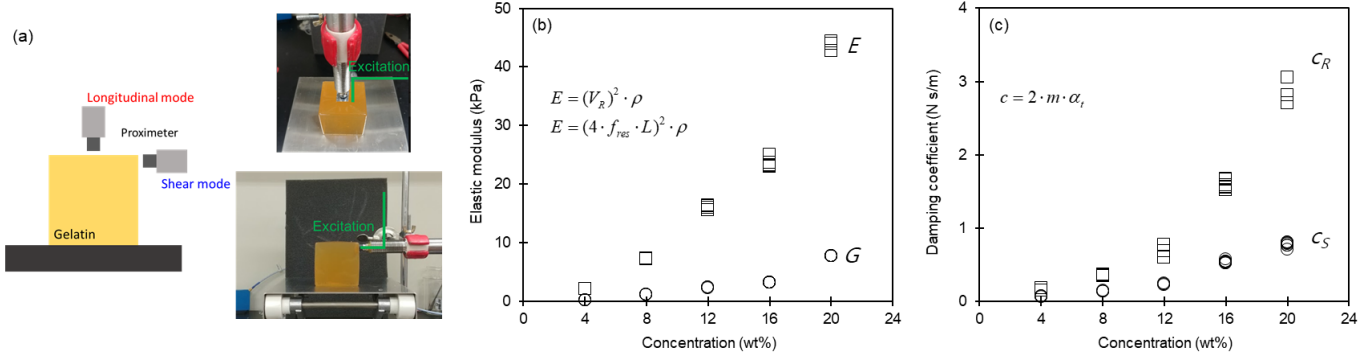


그림 8. 고정-자유단 조건에서의 젤라틴의 공진 실험 구성 및 이를 통해 얻은 (b) 젤라틴의 영률(E)과 전단 탄성 계수 (G), 그리고 (c) 감쇠율.

○ 바이오폴리머의 유변학적 물성 규명

- 본 연구에서는 모델 박테리아(*Leuconostoc mesenteroides*)가 생성한 덱스트란의 유변학적 물성을 규명하기 위해 입자추적-미세유변학적 (particle-tracking microrheology) 기법을 사용하였다. 토양 내 모델 박테리아가 생성한 덱스트란과 흙 미네랄 사이의 역학적 상호작용을 파악하기 위해서는 local modulus를 측정해야 하는데 기존의 상용 레오미터 (rheometer)는 bulk modulus만 측정할 수 있다는 단점을 가지고 있다. 또한 상용 레오미터로 물질의 유변학적 물성을 측정하기 위해서는 시료 준비에 많은 시간과 높은 비용이 수반된다. 이러한 단점을 극복하기 위해 열에너지에 의해 브라운 운동을 하는 아주 작은 입자(particle)의 움직임을 추적하여 유변학적 물성을 측정하는 입자 추적-미세유변학 기법 (particle-tracking microrheology)을 사용하였다.

- 입자 추적-미세유변학 기법의 순서는 다음과 같다. 시간에 따른 입자의 궤도를 추적하면 Mean square displacement(MSD)를 아래의 식을 이용하여 계산할 수있다.

$$\langle \Delta r^2(\tau) \rangle = \langle [r(t+\tau) - r(t)]^2 \rangle,$$

- 이때, r 은 입자의 위치이다. Stokes-Einstein relation을 이용하면 Diffusion coefficient를 구할 수 있고 이를 이용하면 유변학적 물성 (G' , G'')을 구할 수 있다. 아래 식은 MSD 그래프의 피팅 상수를 이용하여 유변학적 물성을 구하는 식이다.

$$G(\omega) = \frac{k_B T}{\pi a \langle \Delta r(1/\omega) \rangle^2 \Gamma(1 + \alpha(\omega)) [1 + \beta(\omega)/2]},$$

$$G'(\omega) = G(\omega) \frac{1}{1 + \beta'(\omega)} \cos\left[\frac{\pi}{2} \alpha'(\omega) - \beta'(\omega) \alpha'(\omega) \left(\frac{\pi}{2} - 1\right)\right], \text{ and}$$

$$G''(\omega) = G(\omega) \frac{1}{1 + \beta'(\omega)} \sin\left[\frac{\pi}{2} \alpha'(\omega) - \beta'(\omega) [1 - \alpha'(\omega)] \left(\frac{\pi}{2} - 1\right)\right],$$

- $\alpha(\omega)$: first-order logarithmic time derivatives of MSD
 $\beta(\omega)$ second-order logarithmic time derivatives of MSD
 $\alpha'(\omega)$: local first-order logarithmic derivatives of $G(\omega)$
 $\beta'(\omega)$ local second-order logarithmic derivatives of $G(\omega)$
- 다음 그림 9는 측정을 위한 덱스트란 시료를 준비하는 과정이다. 슬라이드 글라스 위에 투명한 Agar plate를 만들고 그 위에 모델 박테리아를 넣고 기른 후 덱스트란이 생기기 시작할 때부터 2시간에 한 번씩 12시간 동안 희석한 형광 비드 ($< 1 \mu m$)를 넣어주어 덱스트란 매트릭스 사이에 입자가 잘 분포되도록 하였다. 만들어진 시료는 마지막에 커버 슬라이드로 덮고 뒤집어서 형광 현미경과 CCD를 이용하여 입자의 움직임을 관찰하였다.

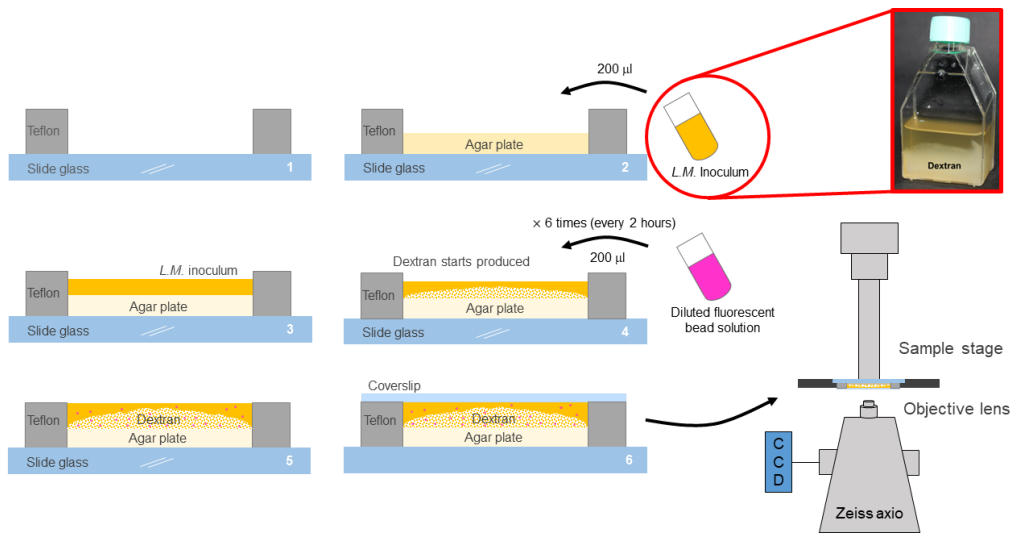


그림 9. 덱스트란 샘플 준비과정

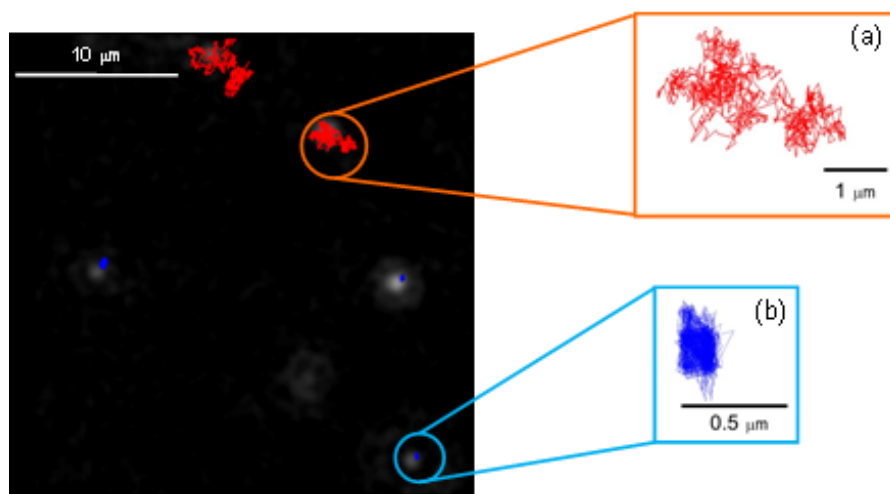


그림 10. 덱스트란 내의 형광비드의 이동 경로

- 덱스트란 내 형광 비드의 움직임을 추적하면 그림 10과 같이 입자의 움직임이 매우 큰 경우와 (타입 a) 그보다는 작은 범위에서 이동하는 경우 (타입 b)로 나눌 수 있다.
- 그림 11은 ESEM과 TEM을 통해 준비한 덱스트란 시료를 이미징한 것이다. ESEM을 통해 관측하면 덱스트란이 다공성 물질이라는 것을 확인할 수 있고(그림 11a) 이미지 분석을 통해 얻은 공극 크기 분포는 그림 11b와 같다. TEM을 이용하여 샘플을 촬영하면 비드가 그림 11c와 같이 공극 속에 위치할 때도 있고 (타입 a), 그림 11d와 같이 덱스트란 매트릭스 내에 위치할 때(타입 b)가 있다.
- 입자의 움직임을 추적한 결과를 가지고 위 식을 이용하면 각 입자의 MSD를 구할 수 있다. MSD가 t^α 에 비례한다고 가정하면 α 는 시간에 따른 MSD값을 로그 스케일로 그렸을 때의 기울기이다. 타입 a의 비드는 α 값은 0.88으로 순수한 액체의 α 값이 1이라는 것을 고려했을 때 거의 유체의 물성을 나타낸다(그림 12a). 이러한 결과를 나타내는 형광 비드는 덱스트란의 큰 공극에 위치하고 있다는 것을 유추할 수 있다. 이 경우 입자의 움직임이 덱스트란의 유변학적 성질을 나타내는 것이 아니라 모델 박테리아의 영양분을 공급해주는 medium과 soluble dextran의 유변학적 성질을 나타낸다.

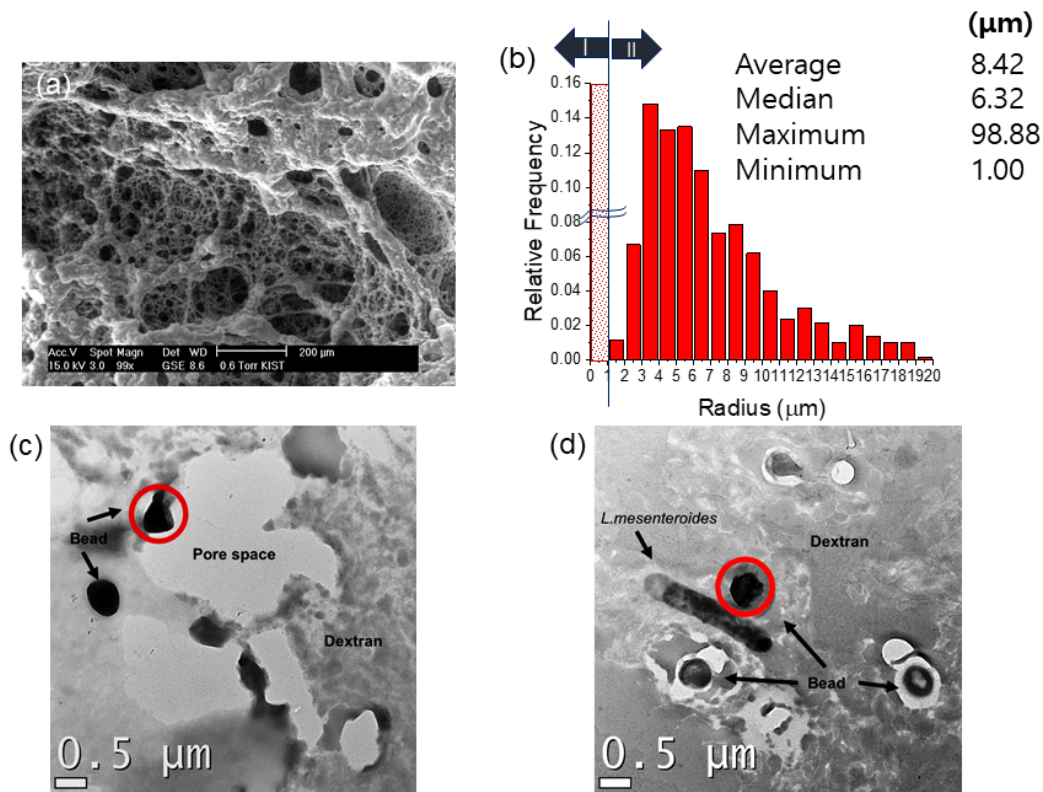


그림 11. (a) 텍스트란의 ESEM 이미지, (b) ESEM 이미지 분석을 통한 공극 크기 분포, (c,d) 텍스트란 시료의 TEM 이미지

- 타입 a와 달리 타입 b의 MSD를 피팅한 결과는 α 값이 0.1초에서 5초 사이에는 0.015, 5초에서 30초 사이에는 0.14, 40초에서 80초 사이에는 0.88로 시간에 따라 증가하였다. 이는 주파수 영역에 따라 변화하는 텍스트란의 유변학적 성질을 대변한다. 즉, 높은 주파수 영역에서 텍스트란은 Elastic한 거동을 보이다가 주파수가 낮아질수록 viscoelastic한 거동을 보인다.
- MSD결과와 TEM이미지에 따르면 불용성 텍스트란의 유변학적 특성은 타입 b의 입자의 움직임을 통해 얻을 수 있다. 측정된 MSD를 위의 식을 이용하여 유변학적 물성 (G' , G'')으로 변환하면 그림 13와 같은 결과를 얻게 된다. 0.2 Hz보다 큰 주파수 영역에서 텍스트란의 G' (storage shear modulus)은 frequency의 영향을 크게 받지 않으며 G'' (loss shear modulus)보다 약 10배 이상 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이를 통해 텍스트란이 0.1-100 Hz 구간에서는 점성적인 특징보다 탄성적인 특징이 좀 더 두드러진다는 것을 알 수 있다($G' \sim 0.1$ Pa, $G'' \sim 0.003$ Pa at 1Hz). 주파수가 0.2Hz 미만일 때는 G'' 와 G' 의 값이 거의 비슷해지며 심지어 G'' 이 G' 보다 커지기도 하는 viscoelastic한 거동을 나타낸다.
- Complex viscosity값은 주파수에 따라 점점 감소하는 shear thinning 현상을 나타내는데 이는 non-Newtonian fluids의 전형적인 특징이다.

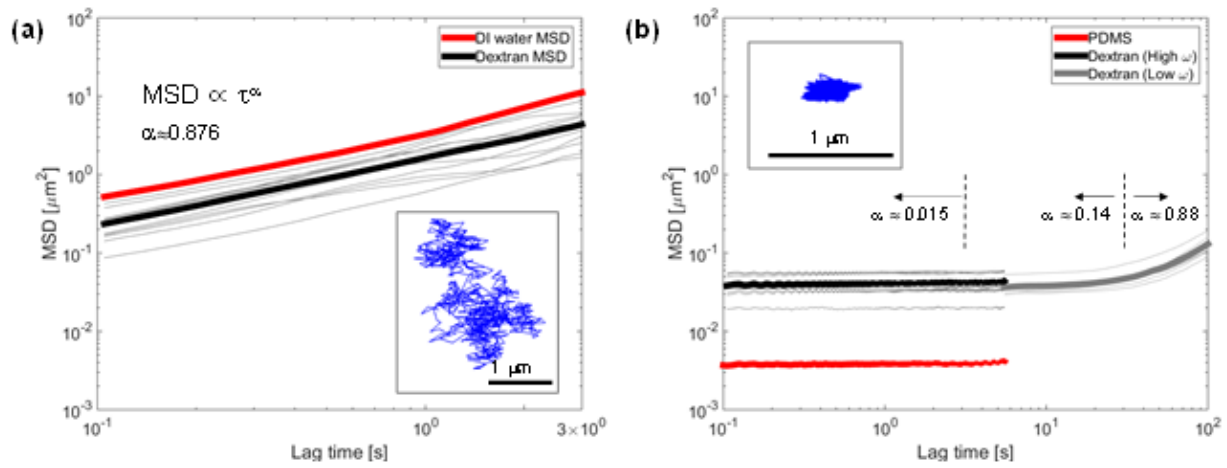


그림 12. 덱스트란 내 입자의 Mean square displacement(MSD)

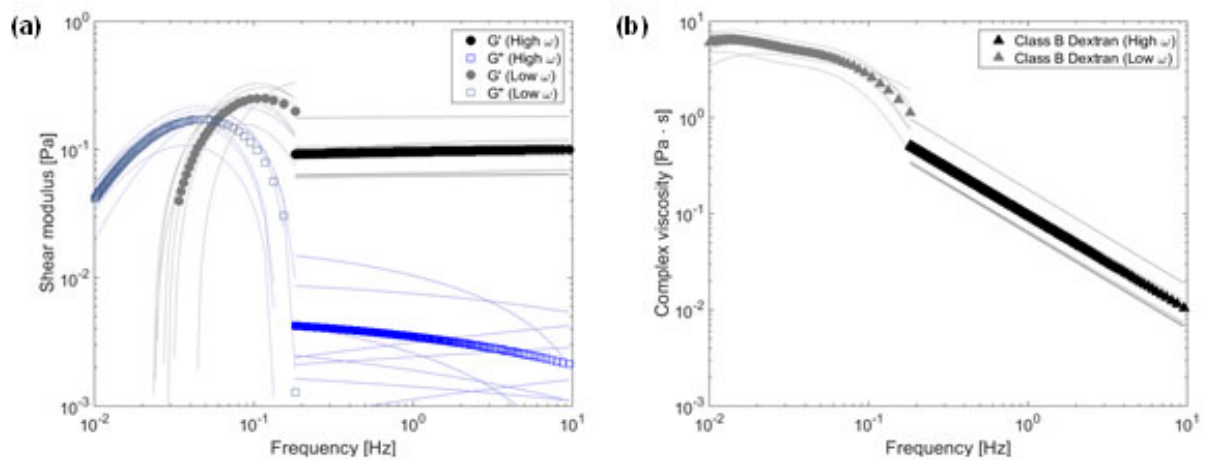


그림 13. 불용성 덱스트란의 유변학적 성질

3-2. 미생물에 의해 바이오폴리머 생성 시 느슨한 포화 사질토의 동적 거동 및 액상화 저항 강도 증진 효과 규명 (세부목표 2)

3-2-1. 지진파 대역 (0.1-20 Hz)에서의 바이오폴리머 생성 사질토의 압축 및 비틀 전단 강성, 감쇠 계수 및 액상화 저항 강도 보강 효과 규명 (수행과제 2-1)

○ 박테리아에 의해 생성된 바이오폴리머의 축적 및 투수계수 변화에 대한 모니터링

- 미생물의 성장과 활동은 바이오폴리머 형성을 통해 다공성 매질의 투과성을 감소시키고, 유압 흐름 시스템을 변화시키는 것으로 알려져 있다[Taylor and Jaffé, 1990]. 흙 속에서의 박테리아 성장과 활동에 대한 모니터링은 박테리아와 생성된 바이오폴리머가 흙의 투수성 저하에 미치는 영향을 정량화할 수 있다는 점에서 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 바이오폴리머 축적 및 투수계수 변화에 대한 모니터링 및 공극 내 바이오폴리머 축적 모델에 대한 연구를 수행하였다.

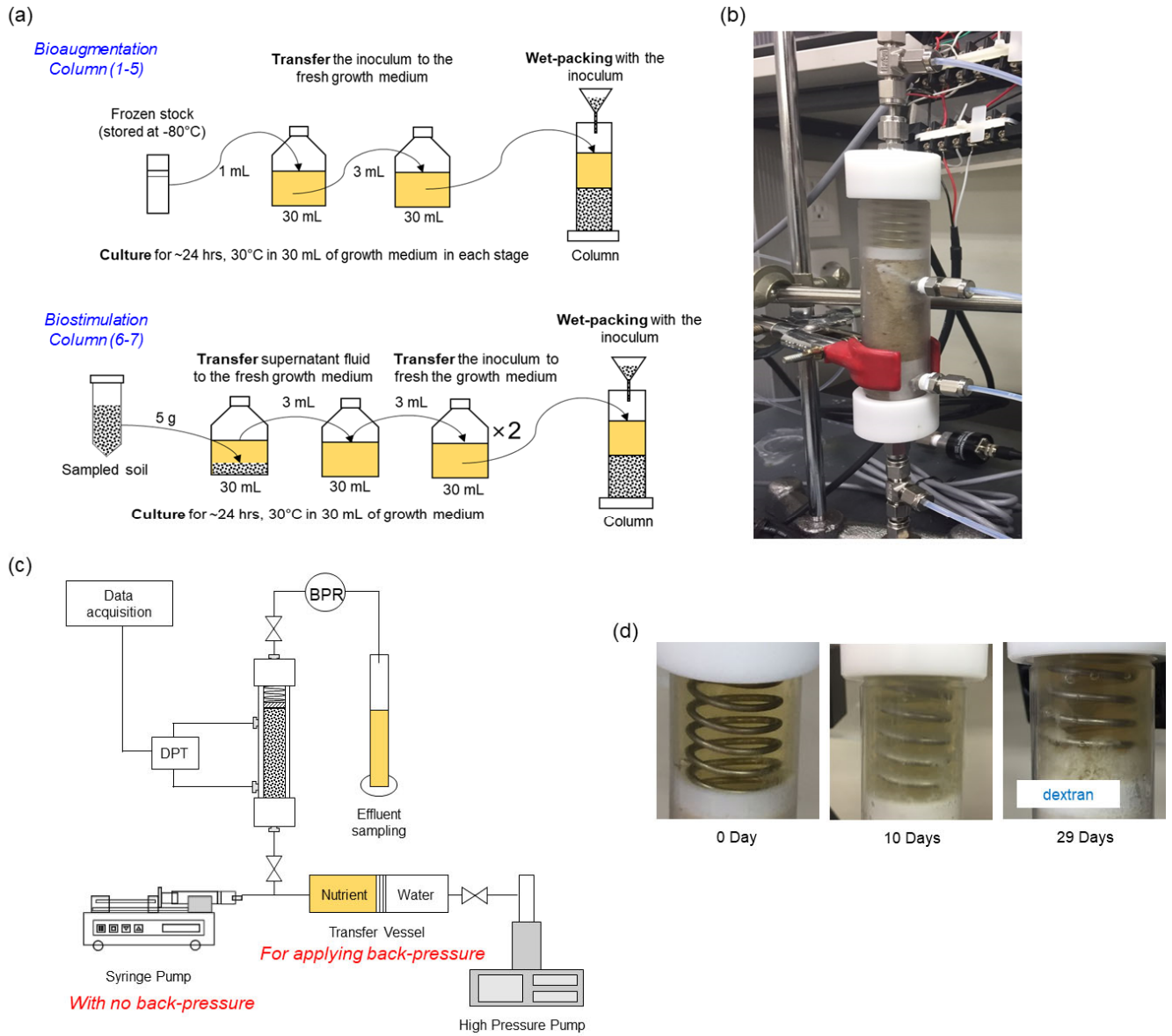


그림 14. (a) 실험에 사용된 미생물, 미생물 배양액, 사질토 시료의 준비 과정, (b) 준비된 시료의 사진, (c) 실험 구성 모식도, (d) 시간에 따른 바이오폴리머 생성 사진.

- 본 실험에서는 Ottawa 20/30 사질토를 사용하였으며 모델 미생물로 선정된 *L.mesenteroides*이 생성하는 바이오폴리머인 덱스트란으로 연구를 수행하였다. 멸균된 상태의 흙 시료와 배양액은 wet packing을 통해 시료를 조성하였으며 투수계수 측정용 소형 원통형 토조에 차압 센서 (differential pressure transducer)를 설치하여 바이오폴리머 생성에 따른 차압을 측정하여 Darcy의 법칙을 통해 시료의 투수계수 변화를 모니터링 하였다 (그림 14). 본 연구에서 투수계수 측정을 위해 사용한 식은 다음과 같다.

$$K = \frac{QL\mu}{A\Delta P}$$

- 미생물 배양액의 조건 및 성장 환경에 의한 바이오폴리머 생성 및 투수계수 저감 효과를 관찰하기 위해 pH, 압력 조건을 달리하며 실험을 수행하였다. 더 나아가 실제 국내에 서식하는 토양 미생물을 활용하여 총 5번의 실험을 수행하였다 (표 6).

표 6. 각 실험에 대한 실험 조건.

Test#	Bacteria	Soil	Test condition (Refilling strategy)	Testing period
Column 3			Pulsed mode, without buffer (60 mL at an interval 72-96 h)	65 days
Column 4	<i>Leuconostoc mesenteroides</i>	Coarse sand	Pulsed mode, with buffer (60 mL at an interval 72-96 h)	
Column 5			Pulsed mode, with buffer 300 kPa of backpressure (60 mL at an interval 72-96 h)	66 days
Column 6	Biostimulation (soil from Gochang)	Coarse sand	Constant mode (0.1 mL/min)	47 days
Column 7	Biostimulation (soil from Cheongju)	Coarse sand	Pulsed mode (60 mL at an interval 72-96 h)	28 days

- 그림 15와 표 7는 미생물의 생장 조건에 의한 투수계수 감소 효과에 대한 실험 결과이다. Column3과 4의 결과는 미생물 배양액 내 pH 완충용액의 유무에 의한 차이로 최종 pH는 각각 4와 7이다. 미생물 배양액에 완충용액을 넣어 중성의 pH를 유지해주는 경우에는(column 4) 미생물의 생장 및 바이오폴리머 생성이 시간이 지나도 활발하게 이루어지면서 투수계수가 99% 이상 감소하지만 ($5.5 \times 10^{-4} \rightarrow 2.1 \times 10^{-6}$ m/s) pH를 중성으로 유지해주지 않아 미생물의 발효반응에 의해 배양액이 산성도를 띄게 되는 경우에는 (column 3) 59%의 투수계수 감소 이후로 ($5 \times 10^{-4} \rightarrow 2.1 \times 10^{-4}$ m/s) 더 감소하지 않고 수렴하였다.

표 7. pH 완충용액 유무 및 시료에 작용하는 압력에 따른 투수계수 감소 실험 결과.

Test#	Initial (m/s)	Final (m/s)	Normalized reduction	Duration (Days)
Column 3	5.05×10^{-4}	2.09×10^{-4}	58.7%	65
Column 4	5.51×10^{-4}	2.11×10^{-6}	99.3%	
Column 5	2.22×10^{-3}	2.23×10^{-7}	99.99%	66

- Column 4와 5의 결과는 시료에 작용하는 압력의 유무에 따른 투수계수 변화 결과이다. Column 4의 경우 압력이 없는 상태에서 진행되었으며 column 5는 시료에 300 kPa의 수압이 작용하는 상태에서 실험을 수행하였다. 이 두 실험의 가장 큰 차이는 공극 내 기포의 존재 유무이다. 미생물의 발효반응이 진행되면 그에 따라 미생물은 배양액 내에 있는 영양분 (탄소)를 섭취하고 이를 이산화탄소의 형태로 배출하게 된다. 이러한 이유로 일반적으로 지반 내 미생물이 서식하는 경우에는 그에 따른 이산화탄소가 기체의 형태로 공극 사이에 존재한다. 따라서 생성된 이산화탄소의 부피만큼 지반의 포화도가 감소하게 되고 이는 시료 내 영양분의 양을 감소시켜 미생물의 생장 및 바이오폴리머 생성을 저해하게 된다. 하지만 column 5의 경우처럼 수압을 가해주는 경우에는 압력이 높아짐에 따라 이산화탄소의 용해도가 증가하게 되고 때문에 발생한 이산화탄소 기체가 공극수에 모두 녹아 기체형태의 이산화탄소가 모두 사라지게 된다. 본 실험에서도 pH를 중성으로 유지해주고 수압을 가해준 경우 (column 5) 99.99.%로 ($2.2 \times 10^{-3} \rightarrow 2.2 \times 10^{-7}$ m/s) 가장 높은 수준의 투수계수 저감 효과를 보였다.
- 본 실험에서는 생성된 바이오폴리머의 양을 정량화하기 위해 loss on ignition (LOI) 방법을 사용하였다. 이는 바이오폴리머 처리된 흙 시료를 소량 채취하여 375℃의 고온으로 16시간 가열하여 손실되는 유기탄소의 양을 측정해 바이오폴리머의 양을 계산하는 방법이다. 이를 통해 바이오폴리머의 포화도에 따른 투수계수의 변화를 측정할 수 있으며 그 결과는 그림 15c와 같다. 이를 통해 시료 내 이산화탄소 기체의 유무에 따라 바이오폴리머 포화도에 따른 투수계수 저감효과가 변하는 것을 확인할 수 있다.

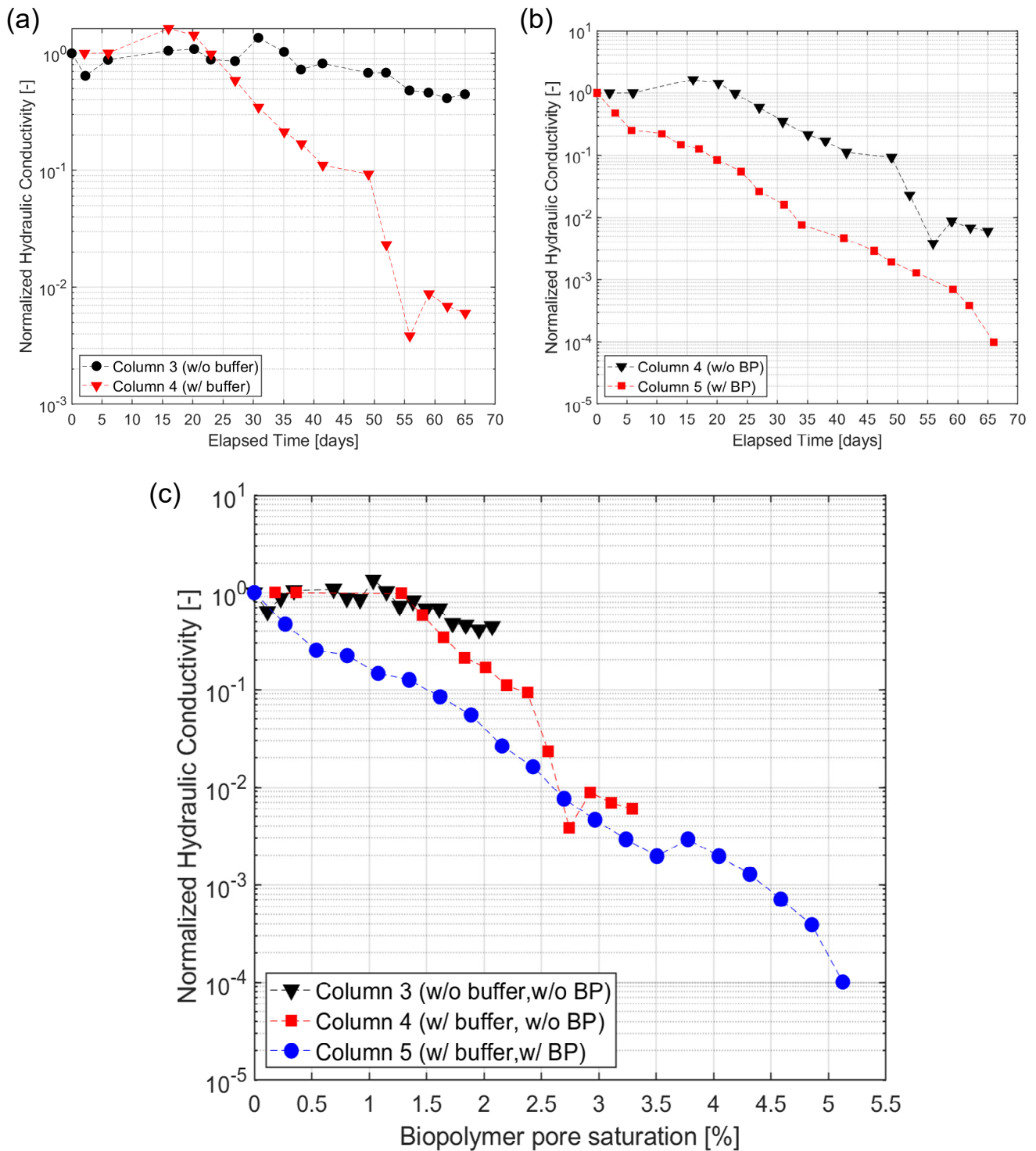


그림 15. (a) pH 완충용액 유무, (b) 시료에 작용하는 압력에 따른 투수계수 감소 실험 결과와 (c) 공극 내 바이오폴리머의 포화도에 따른 투수계수 변화 결과.

- 이 결과를 토대로 본 연구과제에서는 사질토 지반에서 공극 내 바이오폴리머 축적 매커니즘을 규명하고자 하였다. 그림 16a는 선행 연구에서 제시된 다공성 매질에서 바이오폴리머의 축적 매커니즘과 그에 따른 투수계수 감소 모델이다. 선행 연구에 따르면 바이오폴리머가 다공성 매질에서 축적되는 매커니즘은 크게 두 가지로 흙 입자를 코팅하는 형태와 공극에 축적되는 형태가 있다. 본 연구에서는 이러한 선행 모델들을 바탕으로 바이오폴리머의 포화도와 투수계수 변화의 상관관계를 설명하는 ‘Generalized model’을 제시하였으며 본 실험 뿐 아니라 선행 실험 결과에 대해서도 높은 정확도로 바이오폴리머의 포화도에 따른 투수계수 변화를 확인할 수 있었다.

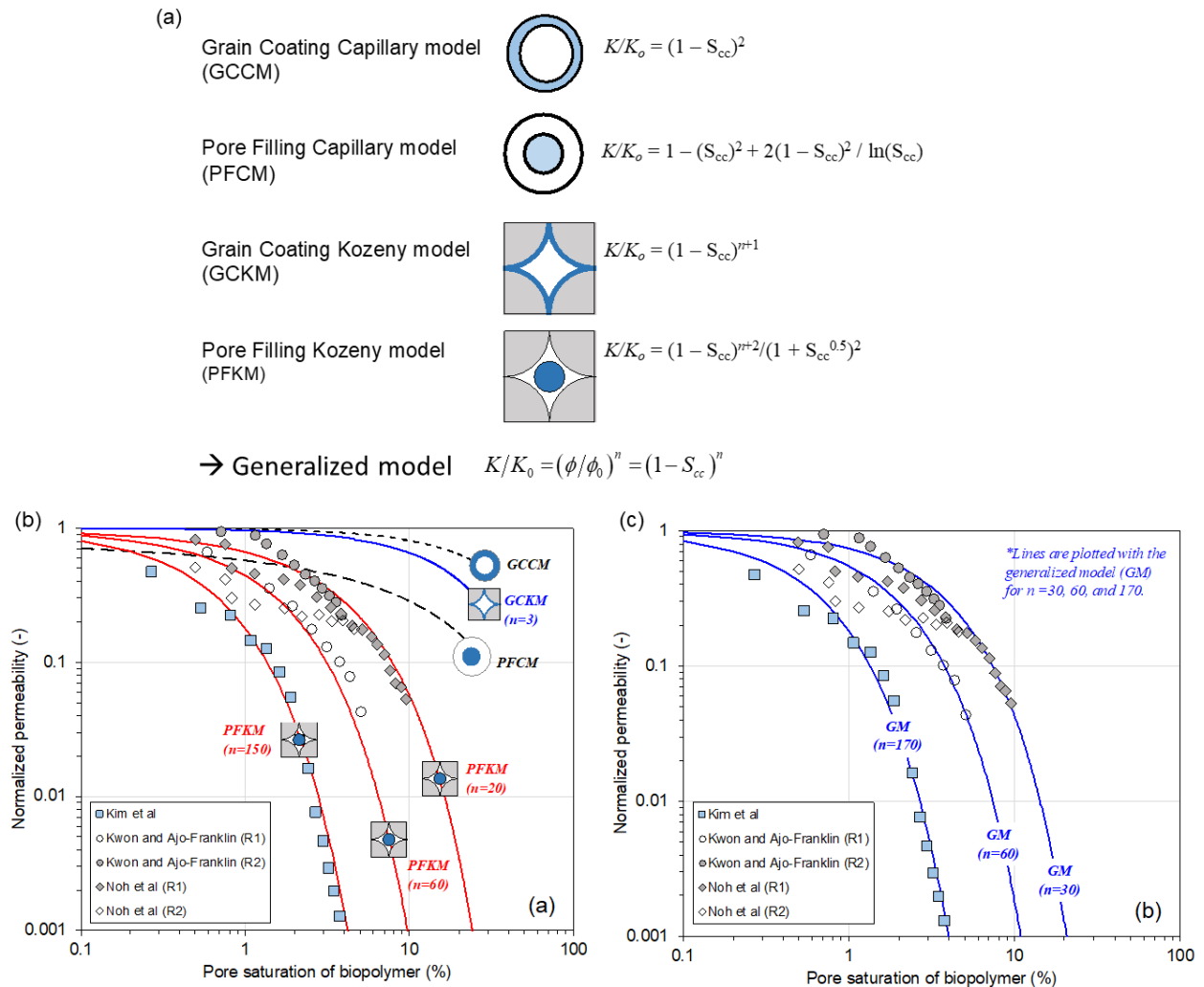


그림 16. 바이오폴리머의 포화도에 따른 투수계수 감소 모델: (a) 선행 연구에 의한 모델과 본 연구에서 제시한 ‘Generalized model’, (b) 선행 연구 및 본 연구의 실험 결과와 선행 모델, (c) 선행 연구 및 본 연구의 실험 결과와 본 연구에서 제시한 모델,

- 본 연구에서는 실제 국내 서식하는 미생물에 의한 지반 투수계수 효과를 확인하였다. 국내에 서식하는 토양 미생물을 수집하기 위해 전라북도 고창군과 충청북도 청주시에서 수변 토양의 샘플을 수집하여 토양 미생물을 추출하였다. 미생물 군집 분석은 new generation sequencing (NGS)를 통해 이뤄졌으며 두 경우 모두 대부분 *Enterobacter*, *Pseudomonas*, *Xanthomonas*, *Leuconostoc* 미생물이 군집을 형성하였다 (그림 17). 또 채취한 미생물 군집을 실험실에서 배양한 결과 바이오폴리머를 생성하는 것이 확인되었으며 이를 통해 사질토에서 바이오폴리머 생성에 따른 투수계수 변화 실험을 수행하였다 (column 6, 7).

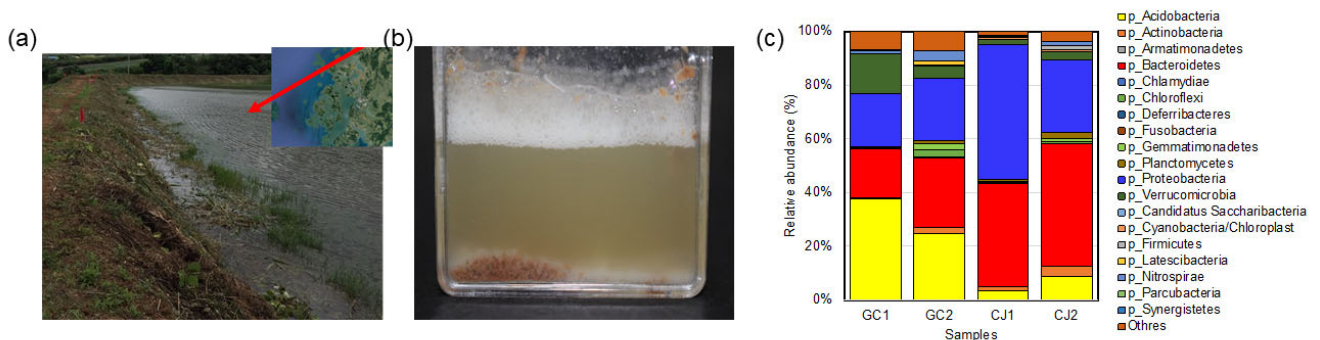


그림 17. 국내에 서식하는 토양 미생물 수집: (a) 수집 장소 (전라북도 고창군), (b) 실험실 배양, (c) NGS 분석을 통한 고창군 (GC1, GC2)과 청주시 (CJ1, CJ2) 샘플의 서식 미생물 군집 분석.

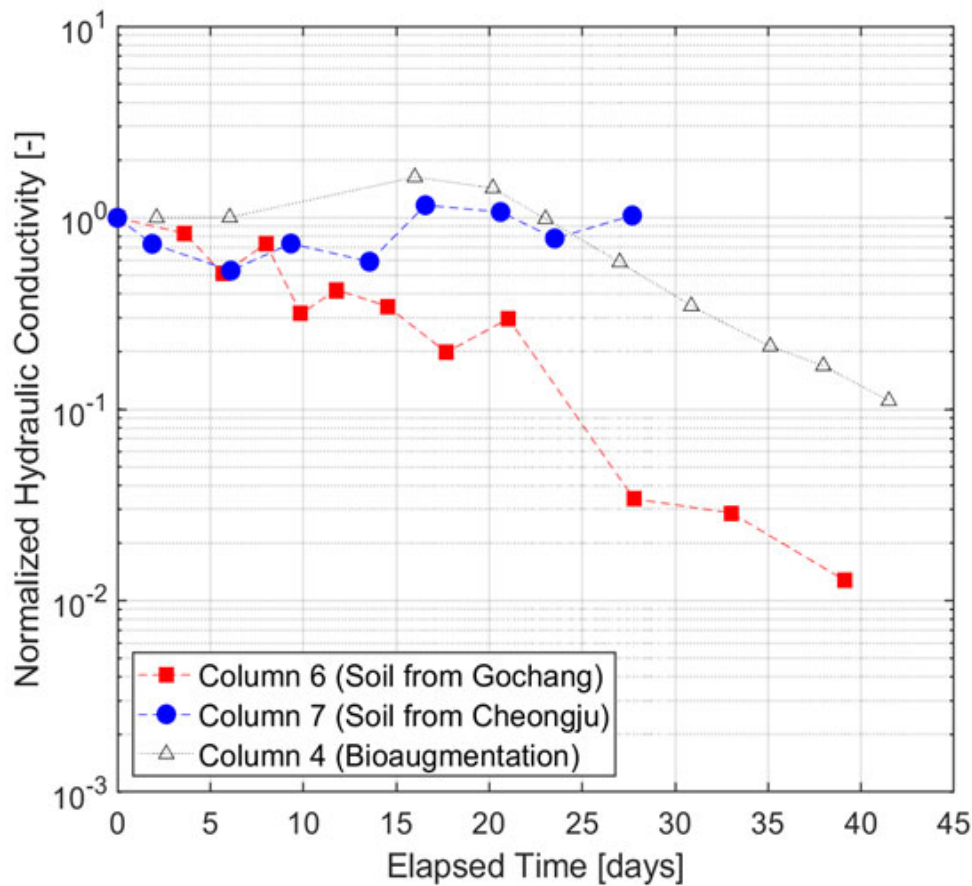


그림 18. 토양 미생물을 이용한 투수계수 변화 실험.

- 실험 결과 고창에서 수집한 토양 미생물의 경우 실제 실험에서 사용된 모델 미생물을 이용한 실험보다 더 높은 수준의 투수계수 감소 효과를 보였으며 청주에서 채취한 토양 미생물 역시 모델 미생물과 유사한 수준의 투수계수 감소효과를 보였다 (그림 18). 이를 통해 실제 토양 미생물의 바이오폴리머를 이용한 지반 개량 가능성을 확인할 수 있다.

○ 흙 속에서의 바이오필름 생성에 의한 전단파 속도 및 감쇠 특성 변화

- 모든 실험에는 조립질의 규사(Ottawa F110)가 사용되었다. 이 모래는 주로 석영(>99%)으로 구성되며, 입자의 밀도는 $2,650 \text{ kg/m}^3$ 이다. 입자의 크기는 약 $50\text{--}360 \text{ }\mu\text{m}$ 사이였으며 모양은 약간 각진 형태를 가졌다. 자세한 물리적 특성은 다음과 같다. 최소 간극비 $e_{\min} = 0.535$, 최대 간극비 $e_{\max} = 0.848$, $D_{50} = 0.12\text{mm}$, $D_{10} = 0.081\text{mm}$, $C_u = 1.62$ 및 $C_c = 0$.
- 서로 다른 두 종의 모델 박테리아가 선택되었는데, *L.mesenteroides* (ATCC14935)는 덱스트란이라 불리는 바이오폴리머를 형성하기 위해, *S.oneidensis* MR1은 바이오 필름을 형성하기 위해 선택되었다. 바이오폴리머와 바이오필름은 모두 부드럽고 점탄성의 물질이기 때문에 포화된 사질토의 내진 및 역학적 반응에 영향을 미칠 수 있다.
- *L.mesenteroides*의 생장과 덱스트란이라 불리는 EPS의 생산을 촉진하기 위해 Yeast extract, Sucrose, Phosphate buffer를 포함하는 배지를 사용하였다. 표 8은 본 연구에 사용된 *L.mesenteroides*의 배양을 위해 사용된 배지의 조성을 보여준다. Yeast extract는 탄소원, 성장 영양소원으로 함유되었다. 덱스트란이라 불리는 다당류의 EPS는 Sucrose의 세포외 분해를 통해 생성된 Glucose의 결합을 통해 만들어진 다. *L.mesenteroides*는 준비된 배지를 이용하여 상온 및 대기압 조건에서 배양되었으며, 단시간 내에 젤 형태의 불용성 덱스트란을 생성하였다.

표 8. *L.mesenteroides*의 배양을 위한 배지의 조성

Compound	Concentration
Yeast extract	10 g/L
Sucrose	15 g/L
Monobasic - KH_2PO_4	13.609 g/L
Dibasic - K_2HPO_4	17.418 g/L

- *S. oneidensis* MR-1은 혐기/호기 조건에서 모두 생물학적으로 인체에 무해하기 때문에 모델 박테리아로 선택되었다. 이 박테리아는 해양 퇴적물에서 발견되는 Gram-negative의 기능성 박테리아이며, 바이오필름을 형성하고 광범위한 금속과 유기 화합물을 환원시킬 수 있는 능력을 가지고 있다. *S. oneidensis* MR-1은 호기 및 약 22~24° C의 상온에서 준비된 배지를 이용해 배양되었다. *S. oneidensis* MR-1의 배지는 박테리아의 성장과 Biofilm 생성을 촉진하기 위해 조성되었으며, 표 9와 같이 Tryptic soy broth, Phosphate monobasic, Phosphate dibasic, sodium fumarate dibasic으로 구성되었다.

표 9. *S. oneidensis*의 배양을 위한 배지의 조성

Compound	Concentration
Tryptic soy broth	30 g/L
Sodium fumarate dibasic	16 g/L
Monobasic - KH_2PO_4	13.609 g/L
Dibasic - K_2HPO_4	17.418 g/L

- 실험을 위한 모래 시료는 조밀한 상태를 달성하고 시험 중 공극비 변화를 최소화하기 위해 air-pluviation 방법을 통해 준비되었다. 모래는 깔때기를 통해 진공을 통해 고정된 라텍스 막이 씌워진 시료 성형 틀에 낙사하였으며 매 2cm 마다 다짐을 하였다. 원통형 시료는 직경 70 mm, 길이 140 mm였으며 *L. mesenteroides*를 이용한 첫 번째 실험의 경우 간극비 $e = 0.526$, *S. oneidensis*를 이용한 두 번째 실험의 경우 간극비 $e = 0.54$ 이었다. 시료 성형틀을 제거하고 공진주 실험을 위한 시스템을 조립할 수 있도록 10~15 kPa의 진공을 가하였다. 구속 응력을 가하기 위해 물이 채워진 실린더에 시료를 삽입하였다 (그림 19b). 드라이브 플레이트가 시료의 상단 캡(그림 19c)에 장착된 후, 40 kPa의 압력이 셀에 적용되었다(그림 19d).

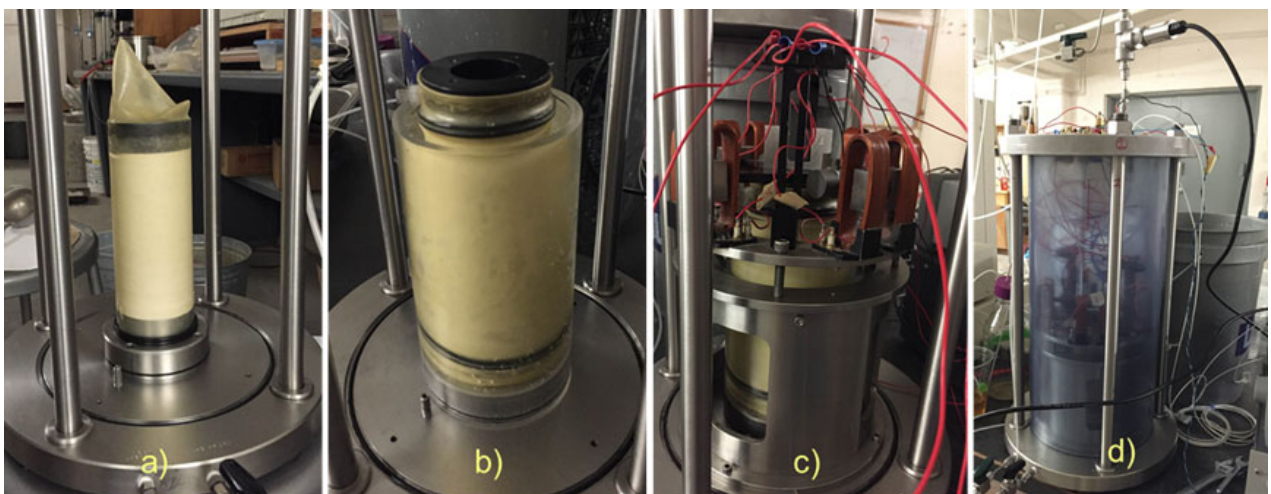


그림 19. 시료 준비 과정. a) 시료의 다짐, b) Water base에 시료 삽입, c) Drive plate에 Top cap 설치, d) 조립된 시스템.

- 먼저 시료 내의 공기를 치환하기 위하여 이산화탄소 기체가 약 10분 동안 시료에 주입되었다. 그 이후, 20 mL의 호기 상태에서 약 24시간 동안 배양된 세포 밀도 10^6 – 10^7 의 박테리아 접종액과 200 mL 배지를 섞어 배양액을 준비하였다. 준비된 250 mL의 접종액 중 150 mL의 접종액이 Syringe 펌프를 통해 시료 내부로 주입되었으며, 박테리아 세포가 성장하고 흡 입자 표면에 부착할 시간을 주기 위해 약 12 시간 동안 시료를 두었다.
- 시료의 완전포화를 위해 박테리아 세포가 없는 배지를 추가적으로 주입했다. 이때의 간극수압은 약 20 kPa로 설정되었으며 100 kPa의 유효 응력을 가하기 위해 셀의 압력을 120 kPa까지 증가시켰다. 약 24 시간의 배지 주입 후, 셀의 압력과 간극수압을 각각 210 kPa과 110 kPa까지 증가시켰다. 간극수압을 가함으로써 미생물에 의한 기포 생성을 억제하였다. 이 과정 동안 시료의 초기 포화도를 평가하기 위해 Skempton' s B-value 를 측정하였으며 두 실험 모두에서 시료의 완전한 포화를 의미하는 0.99가 측정되었다.
- 마지막으로, 지속적인 배지의 공급을 위하여 배지 주입 유량을 0.2 mL/min 로 설정하였다. 배지의 주입은 실험이 수행된 약 20일 동안 지속되었으며 실제 흡 속에서 자연 발생하는 바이오필름을 모사하기 이러한 방법을 고안하였다.
- 실험에 사용된 공진주는 시료에 비틀뿐만 아니라 휨도 함께 가하기 위하여 Stokoe 공진주를 개량하여 제작되었다. 공진주의 자세한 모습은 아래와 같다.
- 비틀 또는 휨은 시료의 가장 윗부분의 드라이브 코일에 사인파의 전압을 가함으로써 행해졌다. 이러한 자극은 코일의 전자기장과 드라이브 플레이트에 고정된 자석과의 상호작용에 의해 시료의 윗부분에 붙어있는 자석과 코일 드라이브의 진동을 발생시킨다. 드라이브 진동수는 전단 변형률의 범위를 선형 거동 한계인 $10^{-4}\%$ 에서 $10^{-3}\%$ 로 고정시킨 후 0.2 Hz 에서 170 Hz 까지 증가시켰다. 시료의 공진 주파수는 주파수 스위핑 동안 드라이브 플레이트에 설치된 가속도계의 반응으로 결정되었다. 가해진 전압의 주파수와 가속도계의 반응을 함께 그림으로써, 공진 주파수가 쉽게 확인되었다. 측정은 매 24 시간마다 수행되었으며 두 실험 모두 20일 동안 지속되었다.
- RC 실험에 이용된 장비의 개략도는 그림 20과 같다. 드라이빙 코일에 입력되는 신호는 신호 발생기에 의해 발생되었다. 시료의 반응은 두 개의 가속도계를 이용하여 측정하였다. 출력 신호는 신호 조절기와 필터를 이용해 조절되고 증폭되었으며 오실로스코프를 이용해 기록되었다. 폴리카보네이트로 만들어진 투명한 용기를 시린지 펌프에 연결하였으며 일정한 유량으로 물을 주입함으로써 시료 내부로 배지를 주입하였다. 셀 압력은 고압의 공기 주입 시스템을 이용하여 가해졌으며 공극압은 배압 조절기를 이용하여 조절하였다.

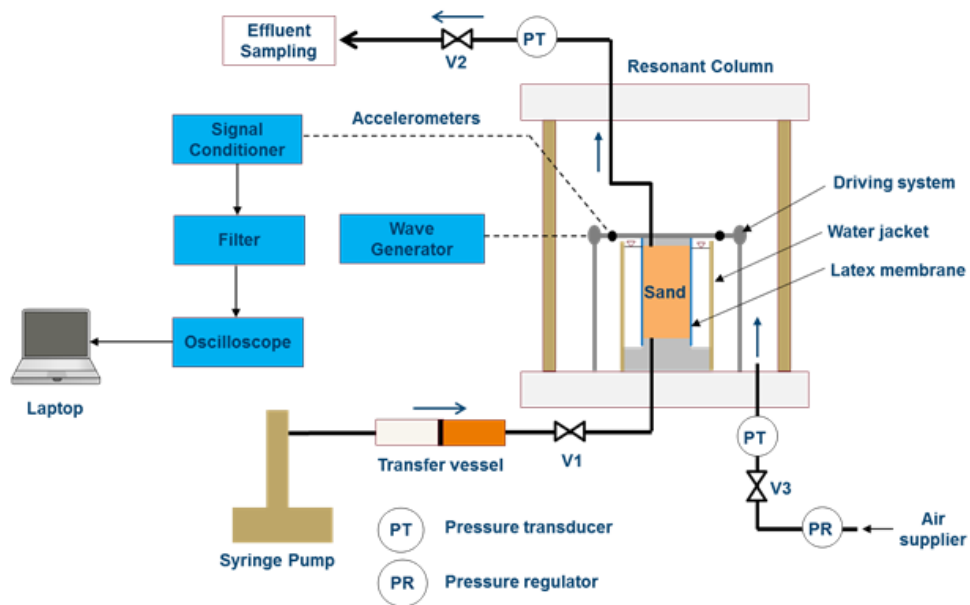


그림 20. 공진주 실험의 개략도.

- 비틀 모드에서의 공진 주파수를 이용해, 전단파 속도 V_s , 전단 감쇠비 D_s , 를 얻었다. 공진주파수는 가속도계에서 가장 높은 전압이 출력되는 주파수로 결정했다. 공진 주파수가 결정된 이후에는 하프파워법 (half-power bandwidth method)을 이용하여 감쇠비를 결정하였다.
- 전단파 속도 V_s 는 각각 시료의 비틀 진동으로부터 얻을 수 있다. 그림 21은 서로 다른 박테리아에 의한 전단파 속도 V_s 의 변화를 보여준다. 전단파 속도 V_s 는 서로 다른 박테리아를 이용한 실험에서 각각 약 6.1%의 감소 (Run1, *L.mesenteroides*)와 약 3%의 감소 (Run2, *S.oneidensis*)를 보였다.
- 감쇠비는 하프파워법을 이용해 결정됐다. 그림 22은 전단 감쇠비의 상당한 증가를 보여준다. 각각 EPS와 바이오필름의 축적 때문에 Run 1에서의 전단감쇠비는 약 0.6에서 2% 까지 증가하였으며 Run 2에서는 약 0.5에서 1.5% 증가하였다. 감쇠비의 값은 12일까지 지속적으로 증가한 후에 일정하게 유지되었다. 이는 바이오 필름 생성 메커니즘의 질량 평형에 의해 설명될 수 있다.

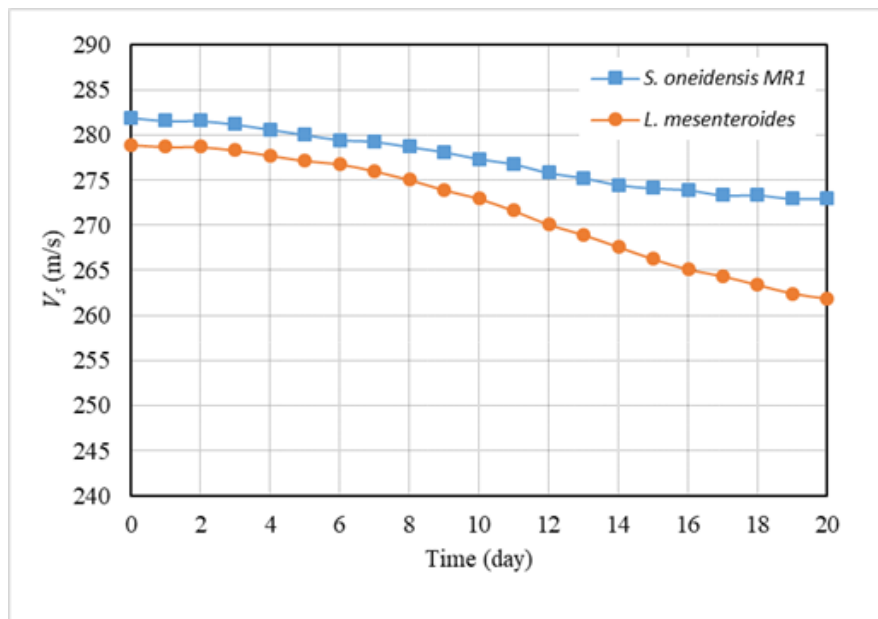


그림 21. 공진주 실험을 통해 얻어진 전단파 속도의 변화

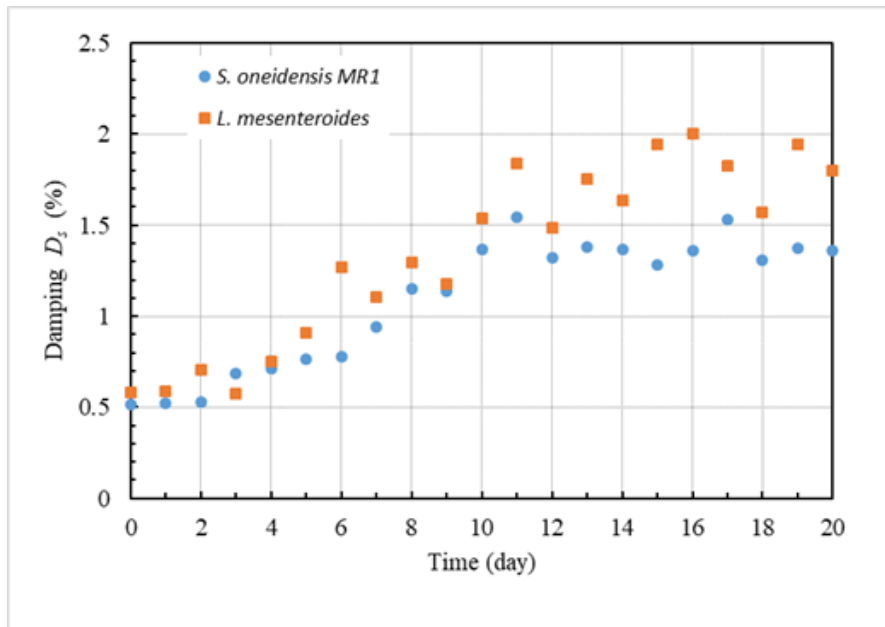


그림 22. 바이오필름 생성에 따른 전단 감쇠비의 변화

- 본 연구에서는 서로 다른 박테리아의 바이오필름이 생성된 시료에서 공진주 실험을 수행하였다. 바이오필름이 생성되었을 때의 전단파와 속도변화 및 감쇠비를 측정하기 위해 비틀림 자극 모드가 가해졌다.
- 공진주 실험으로부터 얻어진 약간의 전파 속도 감소는 바이오필름의 생성이 포화된 모래의 전파 속도에 명확한 효과가 없음을 보여준다. 이는 바이오필름이 생성이 진동 스트레스를 직접 전달하지 않으며 공극 유체로서 기여함을 설명한다.
- 그러나 비틀림 모드에서의 감쇠비는 시료 내의 바이오필름 축적과 함께 상당한 증가를 보였다. 이러한 증가는 파가 모래 프레임을 통해 전달될 때 발생하는 유체의 흐름에 의한 것이다. 모래 프레임 내의 바이오필름의 존재는 공극 탄력성과 유체와 고체사이의 표면적을 증가시킴으로써 에너지 손실을 증가시키는 것으로 보인다.

○ Xray-CT 촬영을 통한 바이오폴리머 처리 사질토 가시화 (UNSW 공동연구)

- 본 연구과제에서는 Xray-CT 촬영을 통해 사질토 지반에서 바이오폴리머 생성 구조를 가시화하였다 (그림 23).
- 이를 통해 사질토 입자와 바이오폴리머 구조의 역학적 상호작용에 대한 모델을 설정하여 바이오폴리머 처리 사질토의 동적 물성 변화에 관한 연구를 수행하였다.

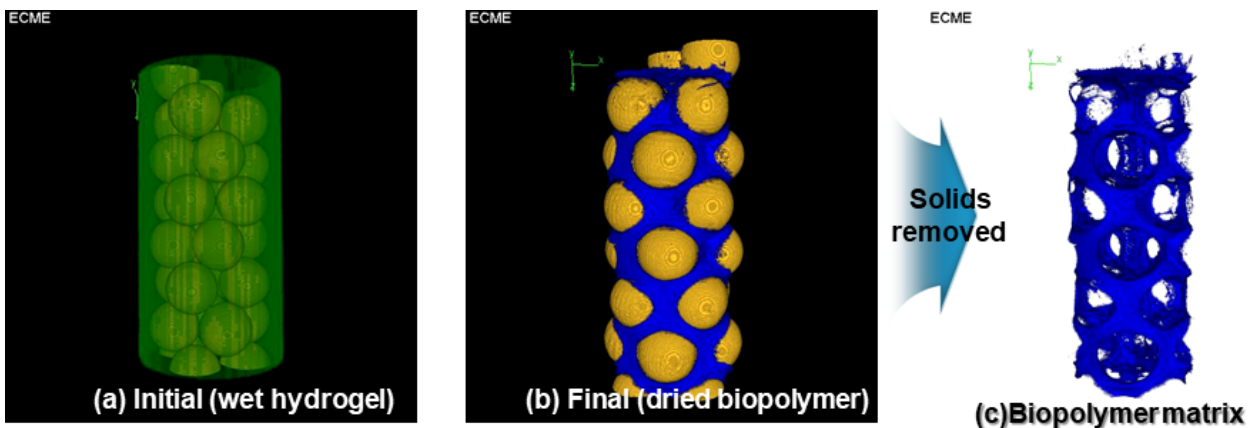


그림 23. Xray-CT 촬영을 이용한 바이오폴리머 처리된 사질토의 이미지: (a) 포화상태, (b) 건조상태, (c) 추출한 바이오폴리머 이미지.

○ 미소 변형에서의 점탄성 물질로 처리한 사질토의 동적 물성에 관한 연구

- 미소변형에서 점탄성물질에 의한 사질토의 동적물성의 변화를 연구하기 위해 공진주시험을 실시하였다 (그림 24). 점탄성 물질로써 젤라틴을 사용하였으며, 사질토를 0%, 8%, 12%, 16%, 20%의 젤라틴 농도로 처리하여 동적 물성을 관찰하였다. 조성된 시료에 50 kPa의 유효응력을 가하였으며, 젤라틴의 완전한 젤화를 위해서 24시간동안 양생하였다. 양생 동안 비틀림에 대한 공진데이타를 측정하였다. 젤라틴이 양생되면서 탄성과 속도는 일정하게 유지되었고, 감쇠비는 증가하다 일정해지는 양상을 확인하였다 (그림 25).

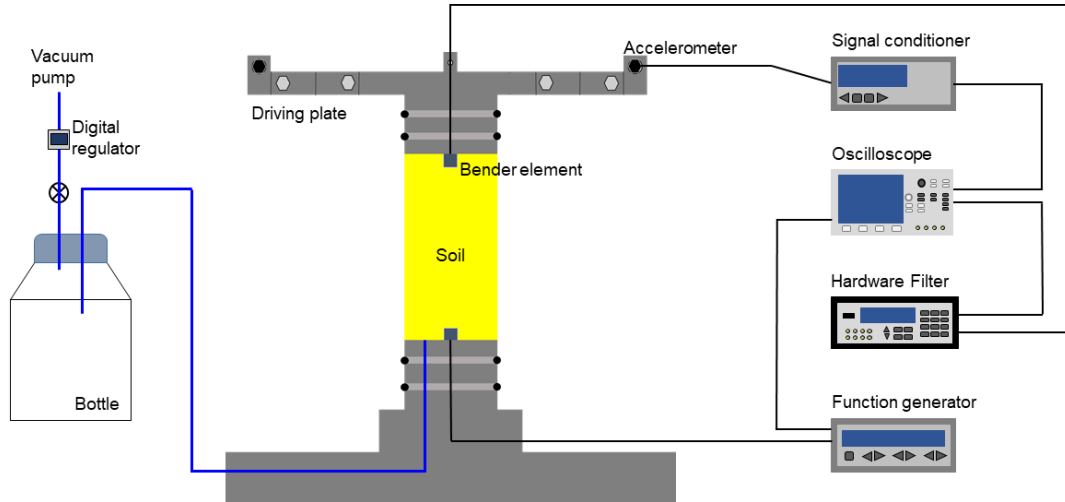


그림 24. 젤라틴 처리된 사질토 시료의 공진주시험 셋업 모식도.

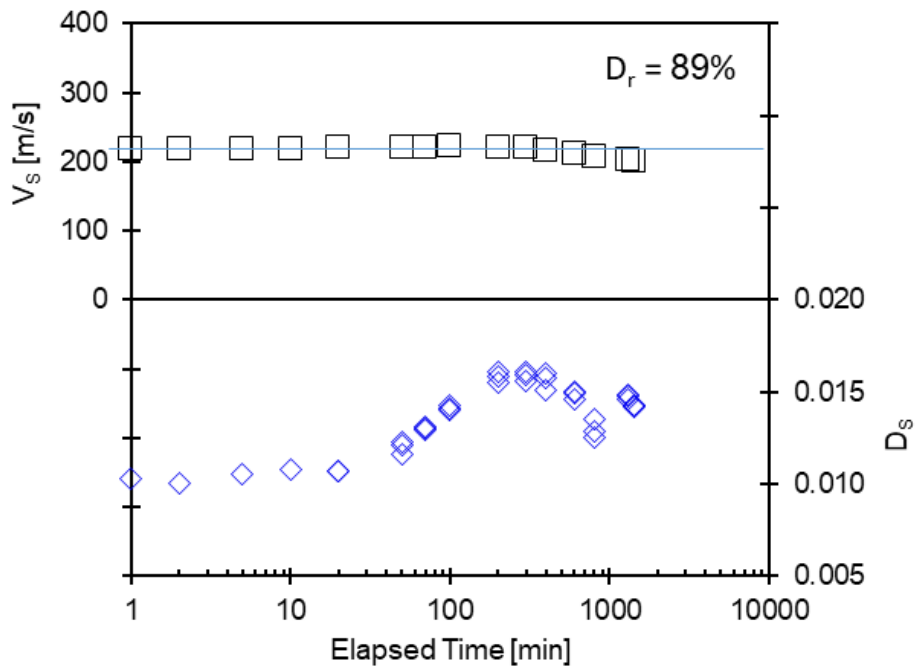


그림 25. 젤라틴의 양생동안 사질토의 동적물성변화 (젤라틴 농도 20%).

- 양생 이후에 변형률을 증가시키면서 실험하였다. 젤라틴의 양생에 따라, 젤라틴의 농도에 따라 감쇠비가 증가하는 현상을 확인할 수 있었다 (그림 26).

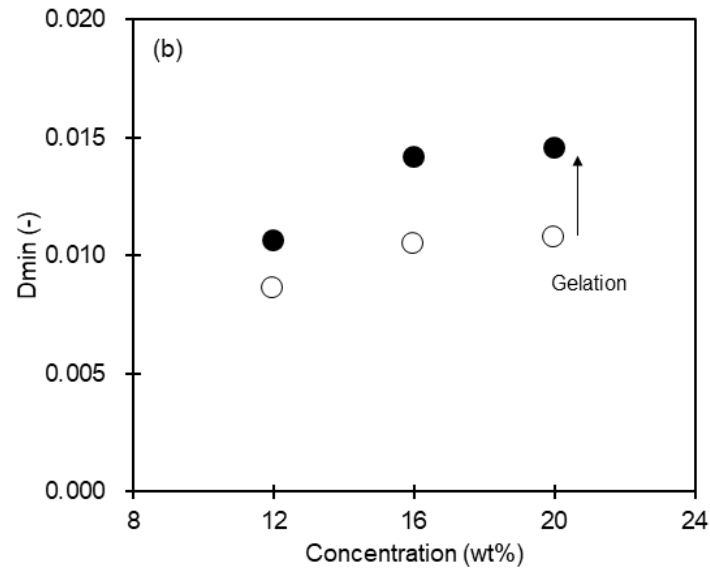


그림 26. 전단변형 증가에 따른 젤라틴 처리에 의한 사질토의 감쇠비 변화.

○ 바이오폴리머 생성이 수축성 모래의 비배수 전단 거동에 미치는 영향

- 포화된 느슨한 모래는 비배수 하중에 의해 발생하는 과잉간극 수압에 의해 수축성 파괴가 발생하기 쉽다. 최근에는 바이오폴리머와 같은 점탄성의 생물학적 부산물이 지반 보강을 위한 대체 바이오-그라우트 물질로 주목을 받고 있다. 그러나 부드러운 점탄성의 바이오폴리머가 흙의 비배수 반응에 미치는 영향에 대한 이해는 매우 부족한 실정이다.
- 본 실험에서는 바이오폴리머를 젤라틴으로 대체하여 비배수 하중에 의한 젤라틴이 처리된 흙의 수축성 거동을 살펴보았다. 응력-변형률의 상관관계를 얻기 위해서 젤라틴이 처리된 느슨한 수축성의 모래에 일련의 비배수 압밀 압축 실험을 수행하였다.
- 그림 27는 실험에 사용된 삼축 압축 장비를 나타낸다. 일정한 변위 속도로 수직 하중을 가하는 하중 프레임 안에 압력 셀을 배치하였다. 셀의 압력과 공극 압력, 유효 응력은 압력 패널을 이용하여 제어했다. 1개의 로드 셀과 1개의 선형 전압 변위 변환기(LVDT)를 이용하여 각각 Deviatoric loading 시의 수직 하중과 수직 변위를 측정했다.

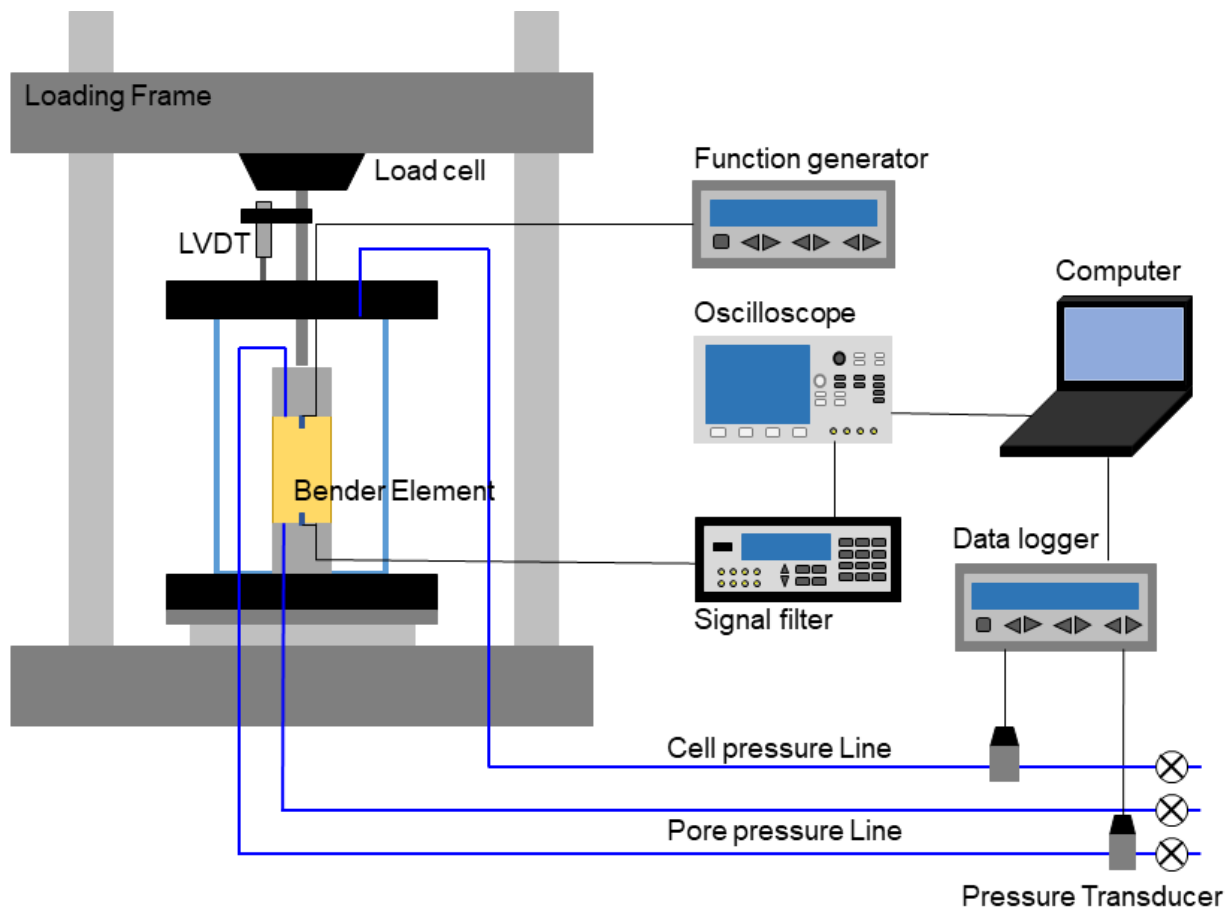


그림 27 실험에 이용된 장비 구성.

- 실험에는 비중 $G_s = 2.65$, 평균 입자 크기 $D_{50} = 0.72 \text{ mm}$, 최대 공극비 $e_{\max} = 0.742$, 최소 공극비 $e_{\min} = 0.502$ 의 물리적 특성을 갖는 조립질의 규사(KAUST 20/30)를 사용하였다. 젤라틴이 처리되지 않은 시료와 젤라틴이 처리된 시료에 대한 실험이 수행되었다.
- 대조군 실험을 위한 젤라틴이 처리되지 않은 시료는 다음과 같이 준비했다. 시료의 상대 밀도(D_r)는 관찰하고자 하는 거동에 따라 다르게 설정되었으며, 수축 반응의 경우 50% 미만, 팽창 반응의 경우 50% 이상으로 설정하였다. Air-pluviation을 통해 시료를 조성하였으며 표본의 지름은 50 mm, 높이는 100 mm, 높이/지름비는 2, 시료의 최종 상대밀도(D_r)는 압밀 후 31-61% 범위의 값을 가졌다.
- 바이오폐리머가 처리된 시료는 앞서 설명한 것과 같은 절차에 젤라틴 샘플을 첨가하여 조성되었다. 60° C 이상의 젤라틴 용액을 약 20-21° C 에서 경화시켰다. 경화 중인 젤라틴 위로 규사를 낙사하는 Wet pluviation 방법을 통해 젤라틴 용액과 모래 알갱이가 균질 혼합 및 완전 포화 되도록 하였으며, 시료의 최종 상대 밀도(D_r)는 압밀 후 32-48% 범위의 값을 가졌다.
- 응력이 가해진 상태에서의 바이오피름 생성에 따른 사질토의 동적 거동 변화를 살피기 위하여 구속 응력에 의해 흙 시료가 먼저 결합된 후 공극을 차지하고 있는 젤라틴이 경화되어 굳어지는 과정의 실험 (Consolidation before Gelation, CbG)을 수행하였다.
- 경화 전 압밀(CbG): 시료를 젤라틴 용액으로 포화시킨 후 젤라틴을 경화시켰다. 그 후, 구속 응력을 가하기 전 굳은 젤라틴의 용해를 위해 약 75° C의 온수로 삼축압 셀을 채웠으며 젤라틴이 녹은 동안에도 시료가 자립할 수 있도록 압력 조절기를 사용하여 셀의 압력을 약 40 kPa로 상승시켰다. 그 후 구속 응력을 목표 초기 구속 응력인 100 kPa 또는 400 kPa로 증가시켰다. 이후, 젤라틴 처리된 시료는 일정한 셀 압력을 유지하면서 주변 온도가 20~21° C인 상태에서 24시간 동안 경화되었다.
- 변위 하중을 이용한 전단: 공극 압력 밸브는 축차 하중을 가하기 전, 비배수 하중 및 일정한 체적 조건을 달성하기 위해 닫아놓았다. 축차 하중 속도는 1 mm/min으로 일정하게 유지되었으며, 이는 1%/min의

수직 변형률에 해당한다. 전단은 수직 변형이 약 25%가 될 때까지 계속되었다.

[실험 결과]

- 응력-변형률 반응: 그림 28는 0-20% 범위의 5가지 다른 젤라틴 농도에 대한 CU 삼축 시험을 통해 얻은 응력-변형률 거동을 보여준다. 바이오폴리머의 영향을 확인하기 위해 바이오폴리머가 처리되지 않은 시료와 바이오폴리머가 처리된 시료의 응력-변형률 곡선을 중첩해 그렸다. 응력-변형률 곡선의 축차 응력 q 는 최대 축차 주응력의 절반으로 다음과 같이 정의된다.

$$q = (\sigma_1 - \sigma_3)/2 = \sigma_d/2$$

- 여기서 σ_1 은 최대주응력, σ_3 는 최소주응력, σ_d 는 피스톤에 의해 가해지는 추가적인 수직 응력이다. 표 10은 모든 실험의 실험 조건과 결과를 상세히 보여준다.

표 10. 젤라틴을 이용한 삼축 압축 실험 조건

Loading history	Effective confining stress, kPa	Gelatin concentration, %	Relative density, %	Undrained strength, kPa
Consolidation before Gelation (CbG)	100	8	48	108
		12	49	122
		16	46	127
		20	46	144
	400	8	39	149
		12	39	201
		16	45	261
		20	41	269
Biopolymer-free sand (Reference)	100	0	42	15
		0	53	255
	400	0	40	38
		0	45	55
		0	61	395

- 경화 전 압밀: 그림 28(a)는 CbG 시료와 바이오폴리머가 처리되지 않은 시료의 응력-변형률 거동을 보여준다. $\sigma'_c = 100$ kPa의 일 때, 바이오폴리머가 처리되지 않은 느슨하게 다짐된 포화 시료 ($D_r = 42\%$)의 비배수 시 발생하는 양의 과잉간극수압으로 인해 Post-peak 연화와 관련된 수축 거동을 보인다(그림 28a와 28b). 반면에, $D_r = 53\%$ 인 바이오폴리머가 처리되지 않은 시료는 $\sigma'_c = 100$ kPa 에서 음의 과잉간극수압에 의한 팽창 거동을 보인다. 바이오폴리머가 처리된 시료의 경우, 비배수 전단 중 비수축적 거동을 의미하는 관찰되는 최소 Post-peak 연화가 관찰된다. 서로 다른 농도의 바이오폴리머가 처리된 시료를 비교할 경우, 큰 변형률에서의 비배수 전단 강도는 젤라틴 농도의 증가와 함께 증가하는 것을 볼 수 있다.

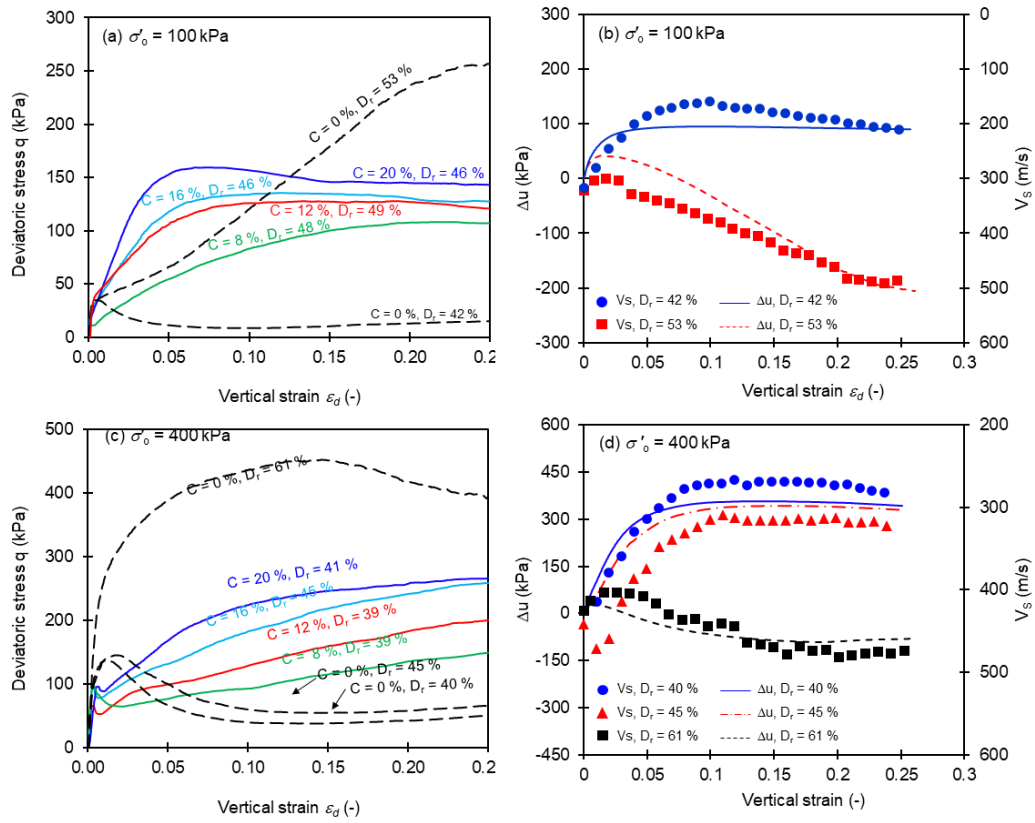


그림 28. CbG 조건에서 유효 구속 응력 (a) 100 kPa, (c) 400 kPa 일 때의 응력 변형률 거동 및 바이오폐리머가 처리되지 않은 조건에서 유효 구속응력 (b) 100 kPa, (d) 400 kPa 일 때의 간극 수압 및 전단파 속도 변화

- 모래는 평균 유효 응력이 증가할수록 수축성이 더 강해지는 경향이 있다. $\sigma'_c = 400$ kPa 의 경우, 그림 28c와 28d와 같이, $D_r = 40\%$ 와 45% 의 바이오폐리머가 처리되지 않은 시료는 Post-peak 연화 및 양의 과잉간극수압 발생과 함께 수축 거동을 보인다. $D_r = 61\%$ 인 바이오폐리머가 처리되지 않은 시료는 $\sigma'_c = 400$ kPa 미만에서 음의 과잉간극수압에 의한 팽창 거동을 보인다.
- 반면에, 바이오폐리머가 처리된 시료의 응력-변형률 곡선은 Post-peak 연화가 발생하지 않고 오히려 복잡한 하중-변형률 거동을 보인다. 초기에 작은 변형률 수준에서는 입자 간 마찰로 인해 축차 응력이 증가하나, 입자가 다시 배열되어 수축하려고 하자 축차 응력이 Peak 값에 도달한 후 감소하는 거동을 보인다. 그러나 바이오폐리머를 처리할 경우, 공극 내에 바이오폐리머가 존재함에 따라 축차 응력이 점진적으로 증가하는 경향을 보였다. 바이오폐리머가 처리된 시료 사이의 비교 결과, $\sigma'_c = 400$ kPa에서 젤라틴 농도가 상승함에 따라 큰 변형률에서의 강도 또한 증가했다. 이것은 공극 내 바이오폐리머 (젤라틴)가 비배수 전단 강도를 증가시키고 느슨한 모래의 수축 거동을 예방함을 보여준다.
- 비배수 전단 강도 S_u 는 20-25%의 수직 변형률 범위에서 도달된 축차 응력 q 로 정의된다. 그림 29는 다양한 초기 유효 구속 응력과 하중 이력 하에서 젤라틴 농도에 따른 비배수 전단 강도의 변화를 보여준다. 바이오폐리머가 처리된 모래의 비배수 전단 강도는 모두 젤라틴 농도 증가에 의한 젤라틴 강성과 강도 증가와 함께 증가한다(그림 29a). 즉, 강성이 높은 바이오폐리머가 모래의 수축 거동을 막고 하중에 대한 골격 프레임에 더 큰 지지를 제공하는 것으로 나타났다. 본 연구의 결과는 베타 글루칸 또는 Xanthan 바이오폐리머를 사용하여 흙의 강도를 증가시켰던 여러 이전 연구들과 일치한다. 그림 29b는 유효 구속 응력에 의해 정규화된 비배수 전단 강도를 나타낸다. 이것은 비배수 전단 강도에 대한 바이오폐리머의 영향이 낮은 유효 구속 응력에서 더 우세하다는 것을 보여준다. 이러한 결과는 유효 응력이 증가함에 따라 강도에 대한 경화 효과가 감소한다고 보고한 이전의 연구 결과와 일치한다.

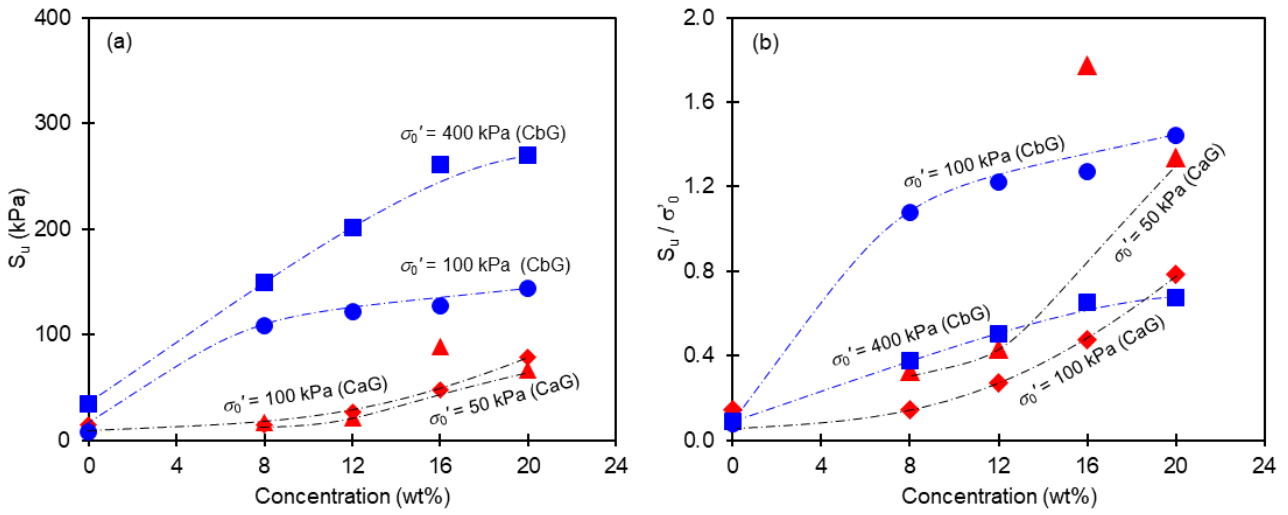


그림 29. (a) 젤라틴 농도에 따른 비배수 전단 강도 및 (b) 정규화된 전단 강도의 변화

- 느슨한 조립질 모래는 종종 큰 공극을 포함하며 낮은 Coordination number를 갖는 경향이 있어 골격 프레임에 아치형 구조를 초래한다. 이러한 아치형 구조는 그림 30a와 같이 외부 하중 시 측면 지지의 부재로 좌굴에 의해 파괴되기 쉽다. 가해진 하중이 입자 알갱이 사이의 마찰 저항을 초과할 경우 입자들이 서로 미끄러지면서 느슨하게 다짐된 모래의 내부 좌굴 붕괴를 일으킨다. 이러한 수축 변형은 과잉간극수압을 발생시킬 수 있으며 결과적으로 비배수 조건에서 수축 파괴를 초래할 수 있다.
- 바이오폴리머(젤라틴)를 모래에 첨가할 경우, 모래의 공극을 채우며 점탄성 특성 때문에 Spring-Dashpot 시스템과 유사하게 거동한다 (그림 30b). 젤라틴의 "Spring" 부분은 각 입자의 움직임에 대해 직접 저항력을 가하며, "Dashpot" 부분은 입자 속도에 비례하여 각 입자 변위에 대한 점성 항력을 제공할 수 있다. Spring-Dashpot과 같은 바이오폴리머는 입자 사슬에 측면 보강을 제공하고 수축성 파괴를 억제하며 결과적으로 비배수 전단 강도를 향상시킨다. 나아가 입자 알갱이 보강에 대한 스프링과 점성 감쇠의 상대적 기여도는 재하되는 하중의 속도에 따라 다르다. 바이오폴리머에 의해 제공되는 보강은 하중 속도가 빠를 때 바이오폴리머의 강성과 점성 감쇠에 기인한다. 반면에 하중 재하 속도가 느릴 때의 보강 효과는 오직 바이오폴리머의 강성에만 기인한다. 젤라틴 농도의 증가는 젤라틴의 탄성 계수뿐만 아니라 점성 감쇠 계수 모두의 증가를 유발한다. 그러므로 젤라틴 농도가 증가하면 더 단단한 스프링과 더 큰 감쇠가 발생하여 골격 프레임에 더 큰 측면 보강을 제공할 것이다. 결과적으로 젤라틴 농도의 증가로 인한 젤라틴의 강성과 감쇠의 상승은 CbG 시료의 비배수 전단 강도의 증가를 설명할 수 있다.

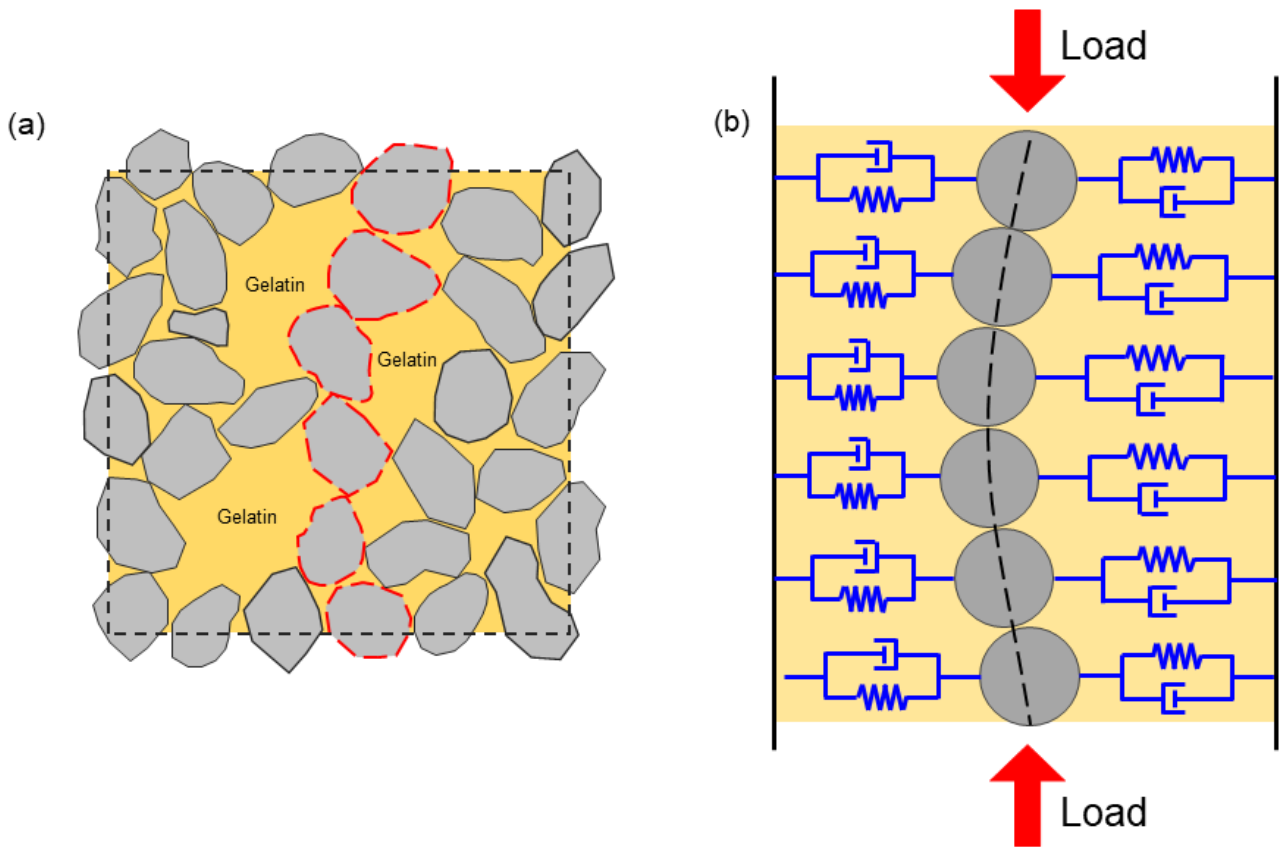


그림 30. 비배수 하중 중, 점탄성의 바이오폴리머가 모래의 수축성 거동에 미치는 영향.

- 그림 31a, 31b 는 CbG 및 바이오폴리머가 처리되지 않은 시료의 비배수 하중 시 유효 응력 경로를 나타낸다. 바이오폴리머가 처리된 모래 시료의 유효 응력 경로는 밀도가 높은 모래와 유사하다. 바이오폴리머가 처리되지 않은 느슨한 시료는 비배수 시 과잉간극수압의 발생으로 인해 p' 가 감소하는 모습을 보인다. 느슨하지만 바이오폴리머가 처리된 시료는 바이오폴리머로 인해 p' 가 증가한다. 젤라틴 농도가 16%를 할 경우, CbG 시료의 임계 상태 선 기울기에 거의 영향을 미치지 않는다. 그러나 젤라틴 농도가 16% 미만일 경우, 임계 상태의 마찰각이 약간 감소하는 것으로 나타났다.

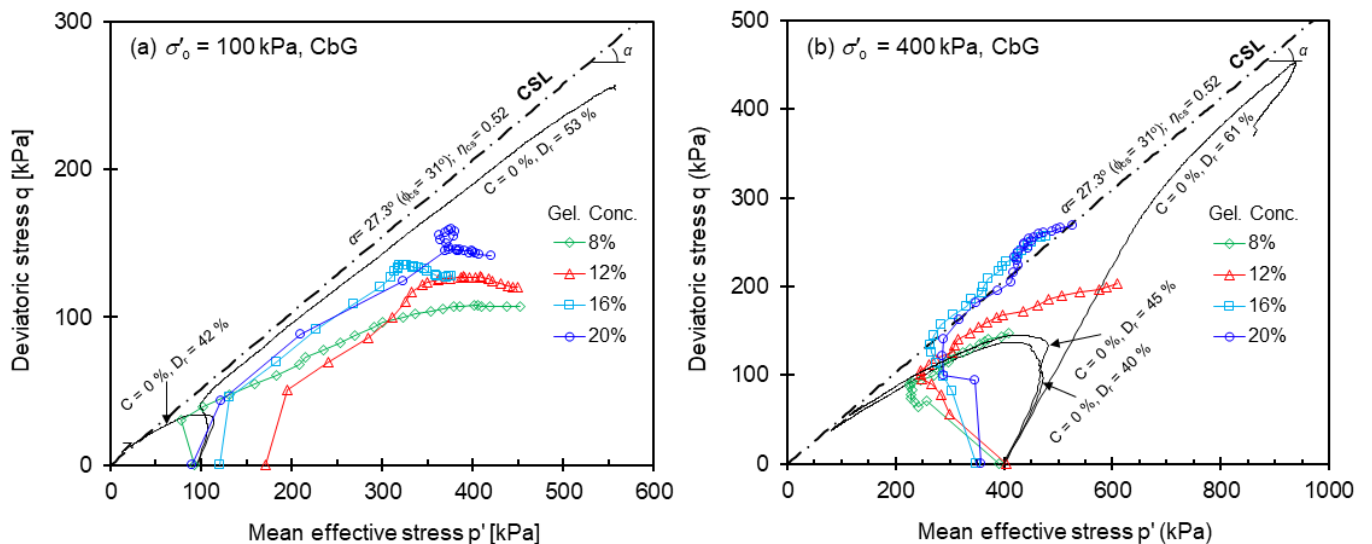


그림 31. CbG 조건에서 (a) $\sigma'_0 = 100$ kPa, (b) $\sigma'_0 = 400$ kPa 일때의 유효 응력 경로.

- 하중 이력은 비배수 전단 강도에 현저한 영향을 미친다. 특히 골격에 의해 지탱되는 응력의 범위는 하중 이력과 함께 변화하며, 이는 다시 비배수 전단 강도에 영향을 미친다. CbG의 경우, 액체 젤라틴 용액으로 채워진 모래 시료가 경화 전에 구속되고, 골격 프레임은 가해진 유효 구속 응력의 전체 부분을 지탱한다. 따라서, CbG 시료의 비배수 전단 강도는 초기 유효 구속 응력과 함께 증가한다. 한편, CaG의 경우, 구속되기 전에 젤라틴이 먼저 경화되므로, 경화된 젤라틴 자체가 모래 알갱이의 압밀을 제약하

고, 적용되는 유효 구속 응력에 부분적인 보강을 제공한다. 결과적으로, 초기 유효 구속 응력의 증가는 CaG 시료의 비배수 전단 강도에 영향을 영향이 없거나, 영향을 미치더라도 최소의 영향만을 미친다. 한편, 젤라틴 농도나 젤라틴 강도는 CbG 케이스에 비해 CaG 케이스의 비배수 전단 강도에 더 뚜렷한 영향을 준다. 이 연구는 공극을 채우는 물질의 경화가 낮은 구속 응력하에서 흙의 역학적 거동에 상당한 영향을 미침을 확인했다.

- CaG 조건과 비교했을 때 CbG 조건에서의 비배수 전단 강도의 개선은 바이오폴리머 그라우트 주입의 현장 적용에 중요한 암시를 한다. 지반 개량 사례에서, 화학적 그라우트 주입은 특정 수준의 상재 하중이 있는 깊이에서 사용된다. 유체 주입은 공극 압력의 증가를 유발하여 유효 응력을 감소시킨다. 한편, 과잉간극수압의 소산이 경화에 필요한 시간보다 훨씬 빠를 때, 과잉간극수압은 쉽게 소멸되고 원래의 상재 하중의 전체 범위는 아마도 완전한 젤화에 앞서 토양 골격 프레임에 의해 지지된다. CbG 조건(경화 전 구속)은 이 조건을 나타낸다. 한편, 과잉 간극 수압의 소산에 필요한 시간보다 경화 시간이 상대적으로 빠를 때, 경화된 바이오폴리머(예: 젤라틴)는 상재 하중에 부분적인 지지를 제공한다. 따라서 흙의 알갱이는 원래 상재 응력의 일부를 받게 되는데, 이는 CaG 상태(경화 후 구속)에 해당한다. 따라서 현장에서 바이오폴리머 그라우트 주입의 투과 유형을 구현할 때 CaG 조건과 관련된 비효과적인 바이오폴리머 처리의 위험이 있다.
- 바이오폴리머 용액은 표면 보호를 위해 지면에 분사될 수 있다. 분사된 바이오폴리머 용액이 상부 토양에 스며들 경우, 최소의 유효 상재 응력으로 인해 CbG 상태를 따를 것으로 예상된다. 분사된 층에서 바이오폴리머가 경화되면, 바이오폴리머로 코팅된 상단 토층은 투수 계수가 현저하게 낮아지고 하중-변형 거동은 비압밀 비배수 전단 거동을 따를 것으로 예상된다. 따라서, 현장 구현 전에 바이오폴리머의 경화 시간, 공극압 소산 속도, 주입량 또는 주입 방법 사이의 상호작용을 고려할 필요가 있다.

○ 점탄성 물질을 이용한 액상화 전위 향상에 관한 연구

- 진동에 의한 점탄성 물질로 처리된 지반의 액상화 전위 향상 가능성을 평가하기 위해 진동 단순 전단 시험기(Cyclic simple shear device)를 이용하였다 (그림 32). 본 장비는 사질토를 사용하는 실험에 있어 유체의 포화과정이 생략되기 때문에 기존 삼축 압밀 시험기보다 실험에 편리성이 있다. 점탄성 물질을 구현하기 위해서 젤라틴을 선정하였고, 젤라틴의 농도를 0, 8, 12, 20%로 사질토를 처리하여 실험하였다. 실험 조건은 응력비 = 0.12, 진동 주파수 = 0.1 Hz, 유효 수직응력 = 100, 400kPa 이다. 시료는 직경 63.5 mm, 높이 20 mm로 D/H 비율을 3.2로 하여 시료 수치에 대한 실의 강성과 감쇠에 대한 변화가 없도록 하였다. 모든 시료의 상대밀도는 55-65% 가 되도록 조성하였다.

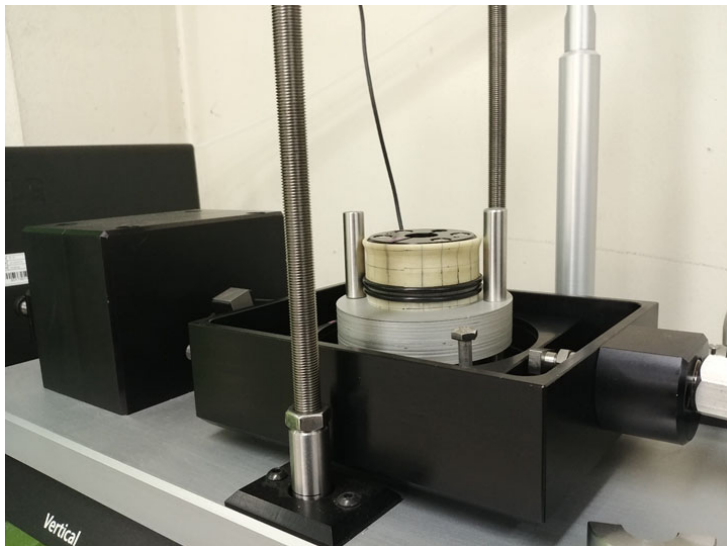


그림 32. 진동 단순 전단시험기

- 실험결과 유효수직 응력 100kPa에서 젤라틴으로 처리하지 않은 순수한 사질토에서 진동수가 11회에서 전단 변형률의 이중진폭이 7.5%를 초과하며(진동 액상화 발생 기준), 이는 실험에서 사용한 사질토의 유효 응력 100kPa 내에서의 진동저항응력비(Cyclic resistance ratio)는 ~0.12 보다 작은 값을 가지는 것을 의미한다. 유효 수직 응력이 400kPa에서 같은 상대밀도를 가진 사질토는 100kPa 보다 더 큰 비배수 압축 거동을 보이게 된다. 실험결과에서도 7회에 액상화가 발생하였다. 순수한 사질토의 경우 전단 변형률이 액상화 발생기준에 도달하였을 때 과잉간극수압이 가해진 유효수직 응력에 도달하게 되어 시료의 유효응력이 0에 가까이 가는 것을 확인할 수 있다 (그림 33).
- 유효수직응력이 100kPa에서의 젤라틴으로 처리한 사질토의 경우 젤라틴의 농도가 증가하면서 진동동안 전단변형률이 감소하였으며, 진동수 150회 동안 진동변형률이 일정하게 유지되는 것을 확인하였다. 과잉간극수압의 경우 진동수가 증가함에 따라 초기 10회 이내에서 큰 증가량을 보였으며 그 이후에 점차 증가하는 경향을 보였다. 과잉간극수압은 진동수 150회에 도달동안 점차 증가하였지만, 과잉공극수압은 순수한 사질토의 과잉간극수압 경향과 달리 100 kPa 에 도달하지 않았다. 이는 점탄성 물질이 사질토 입자들의 배열이 무너지지 않고 유지할 수 있도록 도와준다는 것을 의미한다 (그림 34a, 34b, 34c).
- 유효응력이 400kPa에서의 전단 거동에서는 100kPa에서 보다 큰 비배수 압축 거동이 일어났으며, 그 결과 젤라틴 농도가 8%로 처리된 시료에서도 큰 전단변형률이 일어났으며 액상화가 일어날 것으로 보인다. 하지만 진동수 증가에 따른 12%, 20%로 젤라틴 농도의 증가에 따라 전단변형률이 줄어들며 과잉간극수압이 감소하였다 (그림 34d, 34e, 34f).

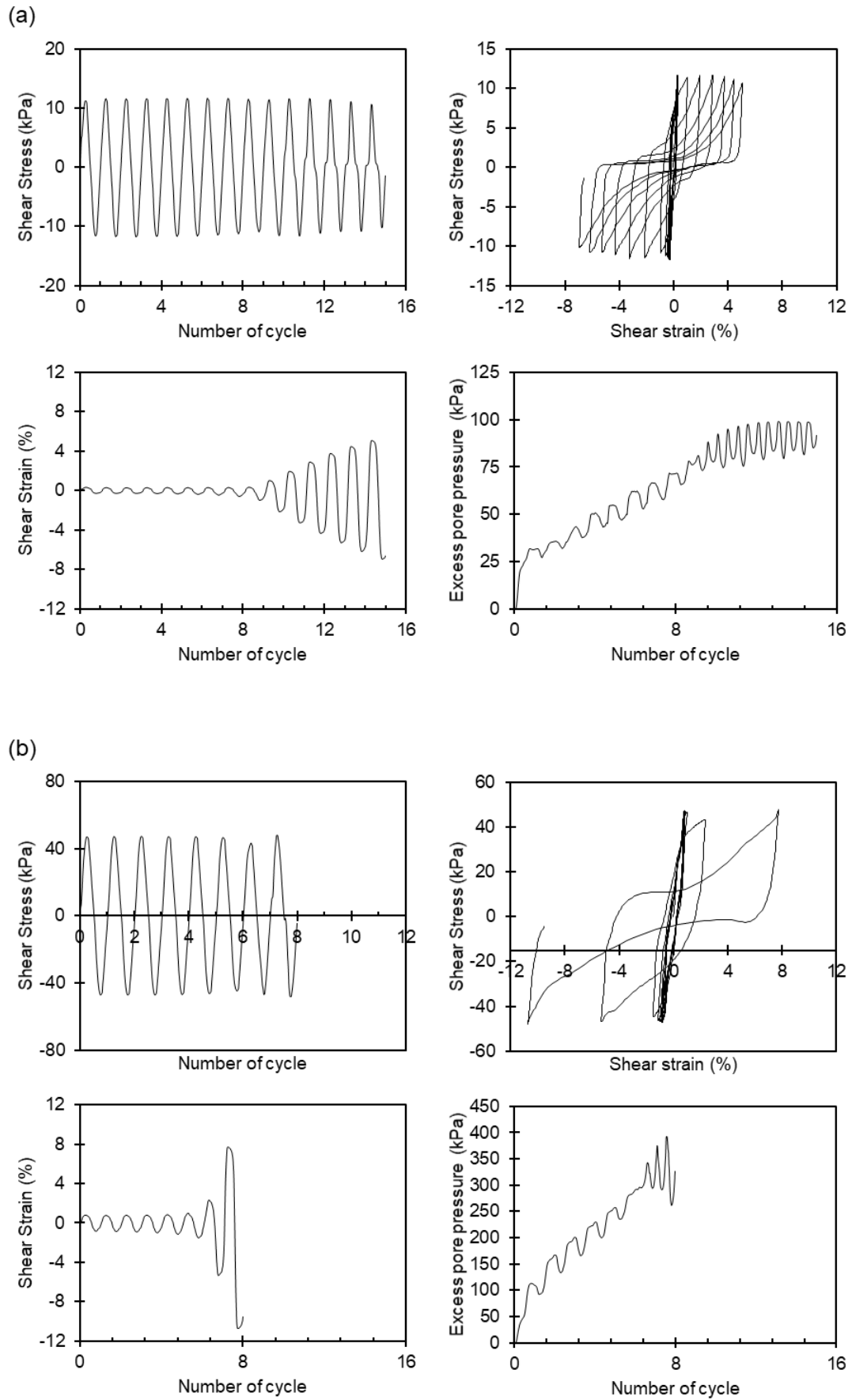


그림 33. 순수한 사질토의 진동 단순 전단 시험기를 이용한 순수한 사질토에서의 constant volume 상태에서의 전단 거동 (a) 유효수직응력 100kPa, (b) 유효수직응력 400kPa.

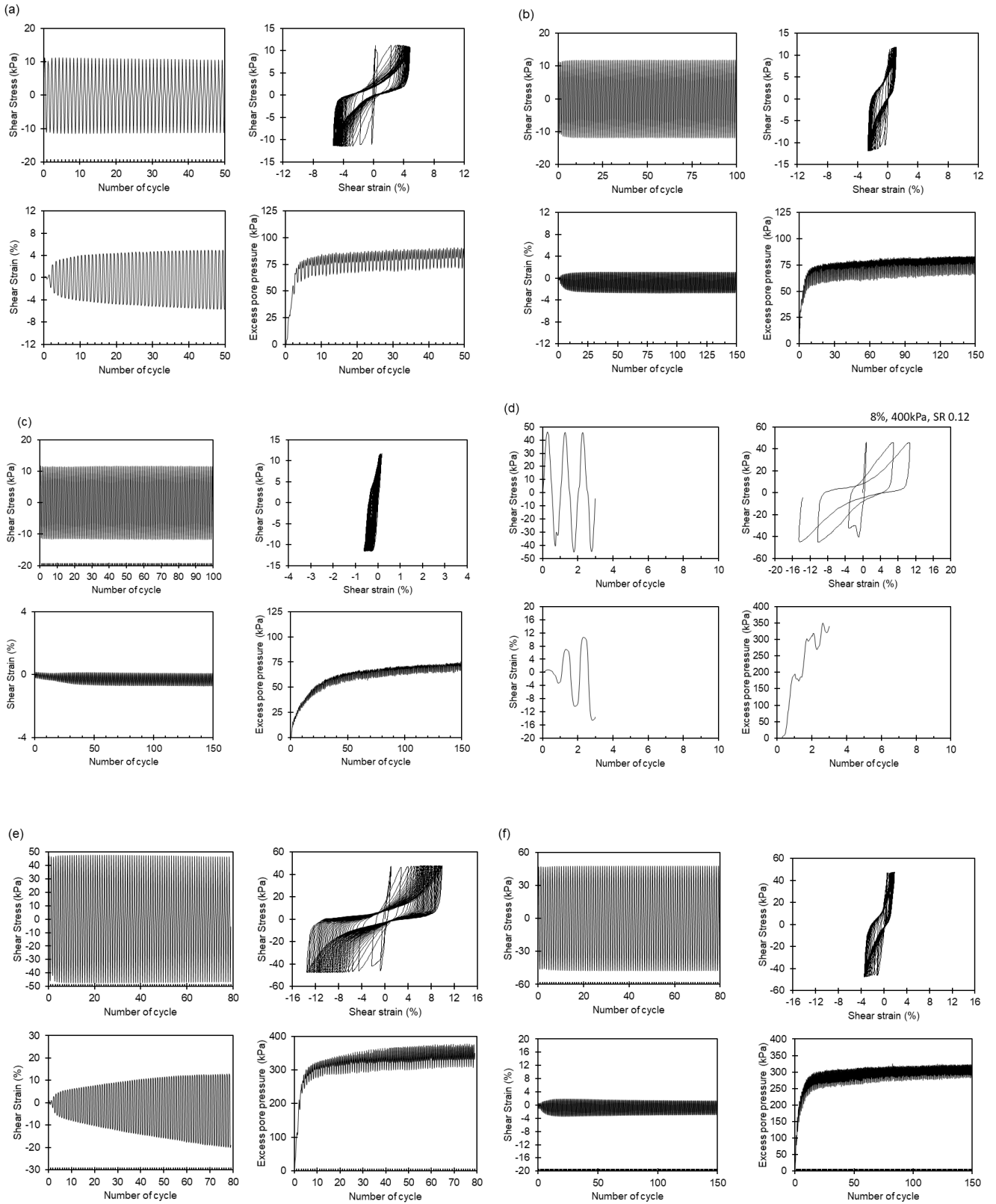


그림 34. 점탄성 물질인 젤라틴으로 처리한 사질토의 진동 단순 전단 시험기를 이용한 순수한 사질토에서의 constant volume 상태에서의 전단 거동 (a) 젤라틴 농도 8%, 유효수직응력 100kPa, (b) 젤라틴 농도 12%, 유효수직응력 100kPa, (c) 젤라틴 농도 20%, 유효수직응력 100kPa, (d) 젤라틴 농도 8%, 유효수직응력 400kPa, (e) 젤라틴 농도 12%, 유효수직응력 400kPa, (f) 젤라틴 농도 20%, 유효수직응력 400kPa.

3-2-2. 진동대-센트리퓨지 실험 및 수치모델을 통한 바이오폴리머 보강된 지반의 지진 시 동적 거동 및 액상화 저항 성능 규명 (수행과제 2-2)

○ 진동대-센트리퓨지 실험을 통한 바이오폴리머 처리 사질토의 동적거동 연구

- 본 연구과제에서는 현장조건에서 바이오폴리머 처리 사질토의 동적 물성 변화를 확인하기 위해 진동대-센트리퓨지 실험을 수행하였다 (그림 35).
- 본 실험에서는 Ottawa F110 사질토 시료를 사용하였으며 모델 미생물로 선정된 *L. mesenteroides*를 이용하여 바이오폴리머인 덱스트란을 생성하였다 (그림 36).
- 또 바이오폴리머 처리하지 않은 사질토 시료와 처리한 사질토에 벤더를 설치하여 (그림 37) 전단파 속도를 측정하여 미소변형 (0.0001-0.001 %)에서의 전단탄성계수를 측정하고 가속도계를 이용하여 비선형 변형 대역 (0.001-0.01 %)에서 전단 변형률에 따른 전단 탄성 계수를 측정하였다.
- 센트리퓨지를 40 g 로 가속하여 현장조건을 모사하였으며 진동대를 이용해 0.07-0.2 g 규모의 지진파를 가해주었다 (표 11).

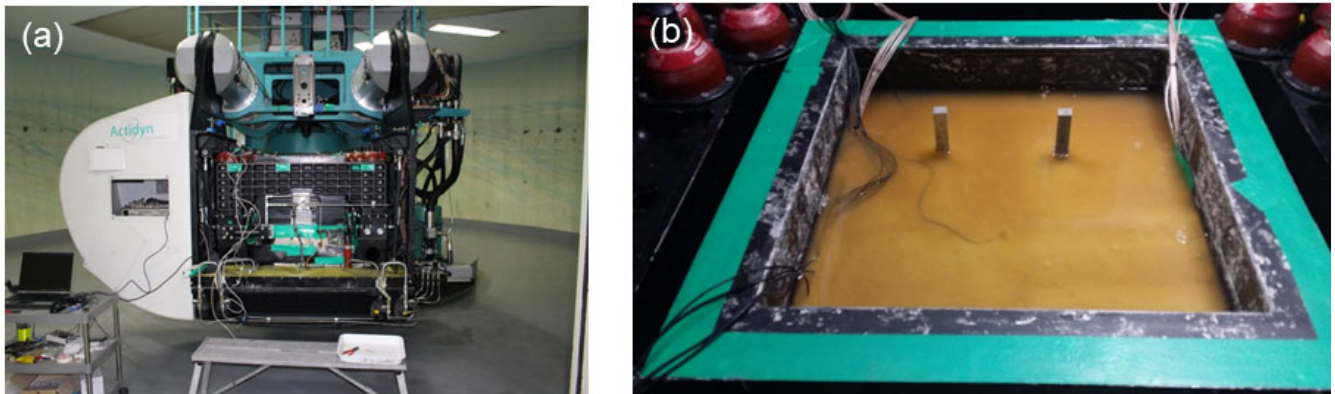


그림 35. (a) 진동대-센트리퓨지 실험 장비와 (b) 미생물 배양액으로 포화된 사질토 시료.

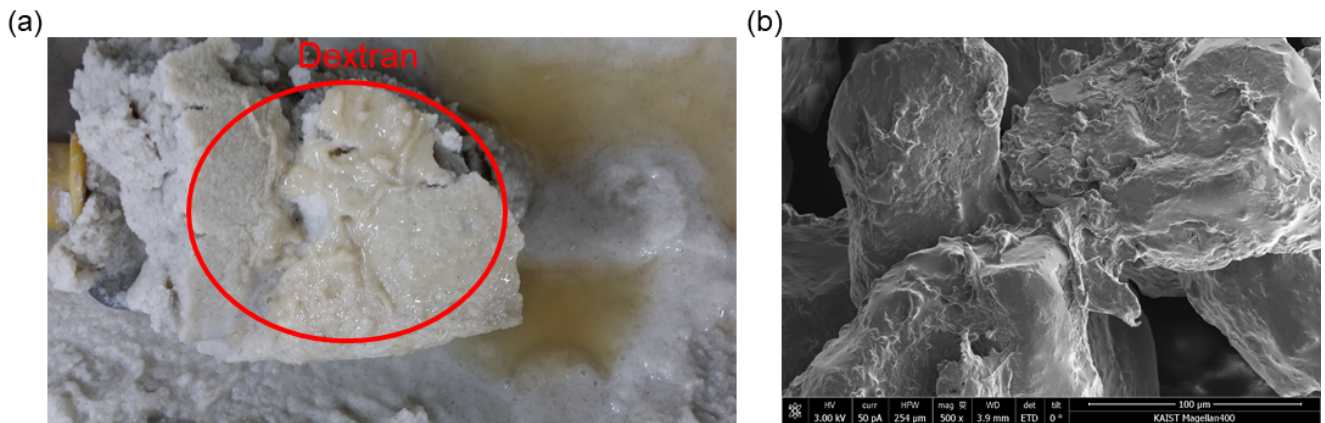


그림 36. (a) *L. mesenteroides*에 의해 바이오폴리머(덱스트란)이 생성된 Ottawa F110 사질토 사진과 (b) SEM 이미지.

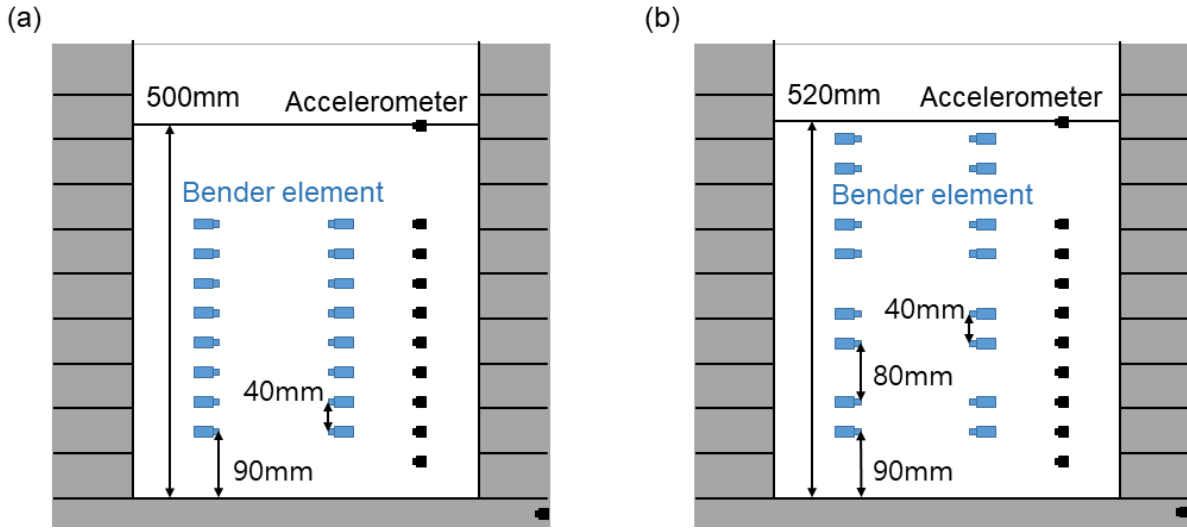


그림 37. 실험에 사용된 시료와 가속도계 및 벤더의 배치: (a) 바이오폴리머 처리를 하지 않은 사질토와 (b) 바이오폴리머 처리를 한 사질토 시료.

표 11. 각 실험의 실험조건.

Case	Unit Weight (KN/m ³)	Relative density	Input motion			G-level (g)
			Signal type	Frequency (Hz)	Acceleration (g)	
Only Ottawa F110 sand	19.75	0.92	sine wave	2, 3, 4	0.07-0.2	40
Ottawa F110 sand treated by biopolymer	19.51	0.83	sine wave	2, 3, 4	0.02-0.2	40

- 본 실험에서 가속도계와 벤더로 측정한 측정값을 지반의 동적 물성인 전단탄성계수와 감쇠비로 변환하는 과정은 다음과 같다 (그림 38).

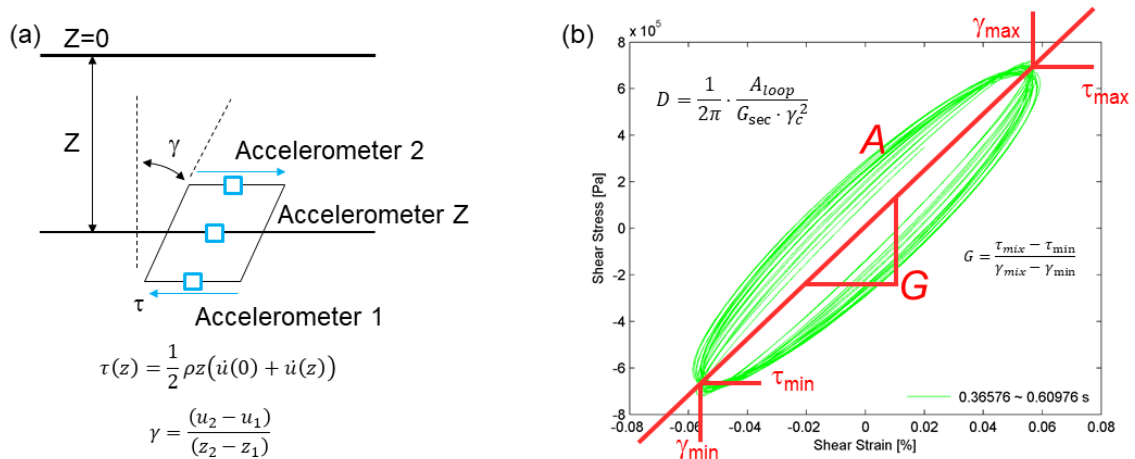


그림 38. (a) 가속도 측정을 통한 전단 응력 및 전단 변형률 계산, (b) 계산된 전단 응력과 전단 변형률을 이용해 전단 탄성 계수와 감쇠비 계산에 대한 모식도.

- 본 실험을 통해 얻은 사질토의 바이오폴리머 처리 유무에 따른 미소변형 전단탄성계수와 전단변형률-전단탄성계수 관계는 그림 39와 같다.
- 토층의 깊이가 8 m 이하로 얕은 지반 조건에 대해서는 바이오폴리머 처리 사질토 지반의 미소변형에서의 전단탄성계수가 오히려 더 낮게 측정되었지만 8 m 이상의 심도 조건에서는 미소변형 전단탄성계수가 점차 증가하여 그 차이는 응력 조건이 높아짐에 따라 점차적으로 증가하였다.

- 80 kPa 이하의 응력조건에서 전단변형률-전단탄성계수 관계를 측정하였을 때 역시 바이오폴리머 처리한 사질토 지반에서 같은 전단변형률 조건에서 더 높은 전단탄성계수를 가졌다. 이를 통해 바이오폴리머가 실제 지진 조건에서 사질토의 동적 물성을 향상시킨다는 것을 확인하였다.

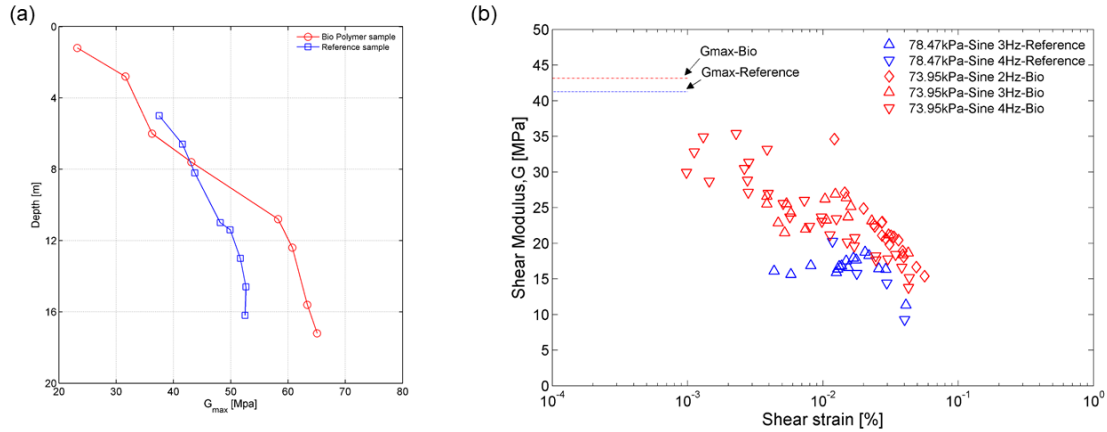


그림 39. 사질토의 바이오폴리머 처리 유무에 따른 (a) 깊이에 따른 미소변형 전단탄성계수와 (b) 80 kPa 이하의 응력조건에서 전단변형률-전단탄성계수 결과.

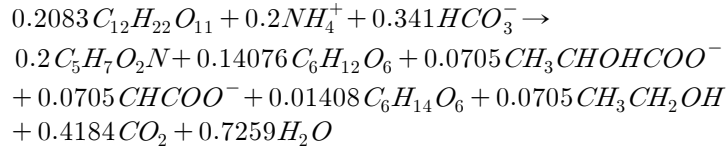
표 12. 바이오폴리머 처리 사질토의 동적 물성 증진 효과

시험종류	박테리아	보강물질	시험조건	보강 효과
투수시험	<i>L.mesenteroides</i>	덱스트란 (바이오폴리머)	포화사질토 pH ~ 7	투수계수 감소 최대 99.99%
공진주시험	<i>L.mesenteroides</i>	덱스트란 (바이오폴리머)	110kPa 구속압 10^{-4} ~ 10^{-3} % 변형	감쇠비 333%증가
	<i>S.oneidensis</i> MR-1	바이오필름	주파수 0.2~170Hz	감쇠비 300%증가
미소 변형 공진주시험	-	젤라틴 (바이오폴리머)	유효응력 50kPa 비틀림 거동	감쇠비 50%증가
삼축시험	-	젤라틴 (바이오폴리머)	상대밀도 31~61% 100,400kPa 구속압 1%/min 수직변형 비배수 전단 거동	비배수전단강도 최대 960% 증가
진동 단순 전단시험	-	젤라틴 (바이오폴리머)	유효응력 100,400kPa 상대밀도 55~65% 응력비 0.12 주파수 0.1Hz 비배수 전단 거동	전단변형률감소 액상화발생 X
센터리퓨지 시험	<i>L.mesenteroides</i>	덱스트란 (바이오폴리머)	40g 가속도 0.07~0.2g 지진파	전단탄성계수 최대 167% 증가

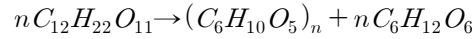
3-3. 대상 지반의 액상화 보강을 위한 미생물 접종액 및 배양액의 최적 주입 전략 및 가이드라인 개발 (세부목표 3)

3-3-1. 주입된 지반 내 미생물 성장 및 바이오폴리머 생성 분포 예측을 위한 Hydro-bio-chemical 연계 모델링 기법 개발 (수행과제 3-1)

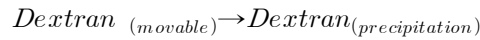
- 모델 박테리아로 선정된 *L.mesenteroides*의 생물학적 활동은 크게 3가지로 나뉜다: (a) 박테리아의 성장, (b) 덱스트란 생성, (c) 덱스트란 침전. 각 반응의 상세한 화학식은 다음과 같다.
- (a) 박테리아의 성장: *L.mesenteroides*의 성장을 위한 화학식은 Vilcaez et al.(2013)에 의해 제안된 화학적 반응에 따르면 반응 에너지와 세포 합성에 기반한다.



- 이때, 반응에 포함된 대표적인 종은 Sucrose ($C_{12}H_{22}O_{11}$), L.mesenteroides ($C_5H_7O_2N$), Fructose ($C_6H_{12}O_6$), Lactate ($CH_3CHOHCOO^-$), acetate ($CHCOO^-$), mannito ($C_6H_{14}O_6$), 그리고 ethanol (CH_3CH_2OH)이다.
- (b) 덱스트란 생성: Sucrose가 풍부한 조건에서 L.mesenteroides를 배양할 때, 박테리아는 Dextranase 라는 효소를 생성한다. 이 Dextranase는 glucosidic 사슬을 연결할 수 있게 하는데, 이를 통해 다당류 바이오폴리머의 일종인 덱스트란이 효소 반응을 통해 생성된다. 덱스트란 생성의 화학반응식은 다음과 같이 나타낼 수 있다 (Santos et al., 2000):



- 모델링을 위해서 n을 가정했는데, 생성되는 덱스트란의 분자량이 대략 10000g/mol이기 때문에 6.2로 가정하였다.
- (c) 덱스트란 침전: 모델 박테리아에 의해 생성되는 덱스트란은 물에서 매우 낮은 용해성을 갖는다고 알려져 있기 때문에 주로 물과 섞였을 때 불용성 고체로 간주된다. 이 고체 덱스트란은 흙의 투수성 감소에 기여한다. 본 연구에서는, 생성된 덱스트란이 불용성이라고 가정하였으며, 생성된 덱스트란의 침전을 위한 반응식을 다음과 같이 표현하였다. 각각의 항은 이동 가능한 덱스트란과 침전된 덱스트란을 의미한다.



- 위에 묘사된 반응식 (박테리아 성장, 덱스트란 생성, 덱스트란 침전)은 일반적으로 반응과 반응물의 농도의 영향을 받는다. 그러므로 각 반응의 속도는 널리 이용되는 Arrhenius exponential 식으로 표현될 수 있다.

$$r = F_{Freq} \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \prod_{i=1}^{n_c} c_i$$

- r은 반응 속도 ($mol\ m^{-3}\ day^{-1}$), F_{Freq} 는 빈도 계수 (day^{-1}), E_a 는 반응 에너지 ($J\ mol^{-1}$), R은 기체 상수, T는 온도 (K), c_i 는 요소의 농도 ($mol\ m^{-3}$)를 의미한다.
- 특히, 박테리아의 성장 식은 세가지 다른 단계 즉, Lag, exponential growth, stationary 단계로 표현될 수 있다 (그림 5(c)). 본 연구에서는, 박테리아의 성장식에 각각의 단계를 묘사하기 위한 분류율을 포함하여 모델링 하였다. 분류율 F_{div} 는 다음과 같다.

$$F_{div} = (1 + Ax_{sucrose})^B$$

- 위의 식에서 F_{div} 는 분류율, $x_{sucrose}$ 는 수용액 상태에서의 Sucrose의 몰 분율, 그리고 A와 B는 상수를 의미한다. 반응 에너지의 영향은 반응계의 등온 조건으로 인해 중요하지 않다고 가정되었다. 그러므로 박테리아 성장을 위한 수정된 반응식, r_{div} 는 다음과 같다.

$$r_{div} = \frac{F_{Freq}}{F_{div}} \prod_{i=1}^{n_c} c_i = \frac{F_{Freq}}{(1 + Ax_{sucrose})^B} \prod_{i=1}^{n_c} c_i$$

- 이 식은 다양한 반응식에 이용될 수 있는 모델이기 때문에 박테리아의 성장뿐 아니라, 이동 가능한 덱스트란의 생성, 덱스트란 침전을 묘사하기 위해서도 사용되었다.
- 위에서 개발된 모델은 박테리아의 성장, 이동 가능한 덱스트란의 생성, 덱스트란 침전을 각각 정의하기 위하여 세 가지 매개변수 (F_{Freq} , A, B)를 이용한다. 이러한 매개변수들은 배치 실험 결과와 모델을 맞추므로써 얻어졌다. 배치 실험에서는 모델 박테리아인 *L.mesenteroides* 를 Sucrose 농도가 15 g/L인 배양액에 접종 하였으며, 나아가 덱스트란 생성을 위해 24 ° C의 호기 상태에서 배양하였다. 배양액의 조성은 다음과 같다: Sucrose 15 g/L, Yeast extract 10 g/L, pH를 7로 유지하기 위한 0.1M phosphate buffer. 그림 5(c)는 접종된 모델 박테리아의 성장 동안 얻어진 광학 밀도 데이터를 보여준다. 지수기 성장에서의 배가 시간은 6.7 시간으로 측정되었으며 생성된 불용성 덱스트란의 최종 농도는 약 2.5 g/L였다.
- 배치 모델은 10개의 격자무늬 블록을 이용하여 개발하였으며 배치 모델의 부피는 1L, 초기 Sucrose 농도는 배치 실험과 동일한 15 g/L로 설정하였다. 배치 모델을 위한 기본적인 데이터와 특성은 표 13과 같다. 박테리아의 생장은 24시간 동안 모사되었으며 이 기간동안 추가적인 영양분은 주입되지 않았다.

표 13. 배치 모델 시뮬레이션을 위한 초기 조건 및 영양분 조건.

Initial model condition	
Size (mm ³)	100 × 100 × 100
Pressure (kPa)	101.3
Temperature (°C)	24
Initial growth media composition (mole fraction)	
Sucrose	0.000789
NH ₄ ⁺	0.000133
HCO ₃ ⁻	0.000219
Bacteria	2.92×10^{-5}
H ₂ O	0.99883

- 그림 40은 배치 실험과 배치 모델 시뮬레이션 데이터로부터 얻어진 박테리아 세포의 성장을 보여준다. 배치 실험의 경우, 박테리아 세포의 그림 5(c)의 물분율은 광학 밀도로부터 계산되었다. 배치 모델 시뮬레이션을 통해 얻어진 성장 곡선은 미생물의 Lag, Exponential 단계를 잘 보여주고 있다. 그림 35(b)는 배치 실험과 배치 시뮬레이션에서 생성된 불용성 덱스트란의 농도를 보여준다. 약 24시간 후, 불용성 덱스트란의 농도는 약 2.567 g/L로 추정되었다. 배치 실험 결과와 가장 유사한 결과를 보인 배치 시뮬레이션의 경우 약 1.2%의 차이만을 보였다. 각각의 반응에서 얻어진 상응 매개변수는 표 14와 같다.

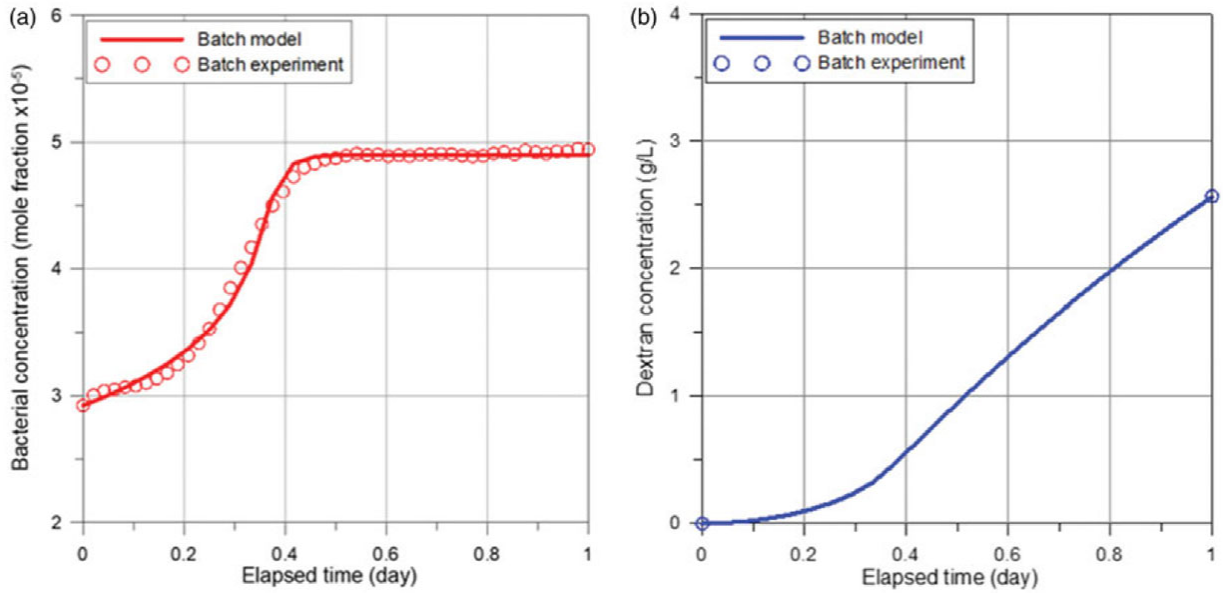


그림 40. 배치 모델 시뮬레이션 결과: (a) 박테리아 셀 성장, (b) 불용성 덱스트란 생성.

표 14. 배치 실험결과와 매칭을 통해 배치 시뮬레이션으로부터 얻어진 매개변수.

	Bacterial growth	Dextran production	Dextran _(aq) →Dextran _(s)
$F_{\text{freq}}(\text{day}^{-1})$	0.085	12.1	0.75
A(-)	684.3	1321.6	0
B(-)	9.2	6.7	0

- 생성된 불용성 덱스트란은 부분적인 고체 상태로 간주되기 때문에 결과적으로 공극의 공극율을 감소시킨다. 불용성 덱스트란의 생성으로부터 유발되는 공극률과 투수율의 변화는 각각 다음과 같이 모델링된다.

$$\varphi_f = \varphi_o \left(1 - \frac{c_s}{\rho_s} \right)$$

$$k_f = k_o \exp \left[k_{\mu l} \left(\frac{\varphi_f - \varphi_o}{1 - \varphi_o} \right) \right]$$

- 위의 식에서 φ_f 는 최종적인 공극율, φ_o 는 초기 공극율, c_s 는 불용성 덱스트란의 단위 공극 부피당 농도 (g L^{-1}), ρ_s 는 덱스트란의 밀도 (g L^{-1}), k_f 와 k_o 는 최종과 초기의 투수율을 의미하며, $k_{\mu l}$ 은 multiplier factor를 의미한다.
- 배치 모델 시뮬레이션으로부터 얻어진 박테리아 성장과 불용성 덱스트란 생성 모델은 모델 박테리아에 의해 유발된 다공성 물질의 투수감소 감소를 관찰하기 위한 흡으로 다짐된 시료의 시뮬레이션을 위해 확장되어 적용되었다. Noh et al.(2016)에 의해 행해진 흡으로 다짐된 시료에서의 투수 계수 감소 실험 결과와 모델링을 위한 실험 데이터로 이용되었다. 실험에서는 모델 박테리아 *L.mesenteroides*가 흡 속에서의 덱스트란 생성을 위해 다짐된 흡 시료 내에서 38일간 배양되었으며, Sucrose가 풍부한 460 mL의 배양액이 2일 간격으로 주입되었다. 흡의 투수 계수는 약 10%의 불용성 덱스트란 공극 포화도와 함께 약 $4.1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ 에서 $1.8 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ 까지 감소하였다.
- 흡으로 다짐된 모델은 흡으로 다짐된 시료에서의 실험결과와의 비교를 통해 투수 계수 감소 매개변수 $k_{\mu l}$ 를 추출하기 위해 모델링 되었다. 이를 위해 차압 데이터가 투수 계수의 변화의 지표로 이용되었다. 시뮬레이션을 위한 흡 다짐 모델은 1차원의 영역을 갖는 20개의 블록을 포함하였으며, 자세한 조건

은 표 15과 같다. 흠 다짐 시료를 이용한 실험과의 정확한 비교를 위하여 영양 배지가 20회 주입되었다. 각각의 주입마다 15 g/L의 Sucrose 농도를 갖는 영양분이 4시간 동안 2 mL/min의 일정한 유량으로 주입되었다. 영양분 주입 후에는, 44 시간동안 유체의 흐름이 없는 상태에서 덱스트란 생성을 위한 시간을 가졌는데 영양분 주입과 그 이후의 48시간을 1회로 정의하였다. 그림 41은 실험과 비교를 통해 시뮬레이션으로부터 얻어진 차압 데이터를 보여준다. 투수 계수 감소 매개변수 k_{mul} 은 93.8로 결정되었으며 실험 데이터와의 오차는 2.1 %에 불과했다.

- 그림 42는 흠 다짐 모델의 중간 높이에서 측정된 Sucrose, 박테리아, 덱스트란과 같은 대사산물의 농도를 보여준다. Sucrose 물분율은 영양분 주입 때문에 매 2일 마다 빠르게 증가하였다. 영양분 주입 기간 동안에는 박테리아 세포가 유체의 흐름에 의해 밖으로 배출되었기 때문에 박테리아의 농도가 약간 감소하는 모습을 보였다. 그러나, 흠 다짐 모델 내에서의 불용성 덱스트란의 농도는 지속적으로 증가하였다. 그림 42(b)는 각각의 주입 과정마다 대사산물의 변화를 보여준다. 주입 기간에는 Sucrose의 농도가 증가하는 반면 박테리아의 농도는 감소한다. 주입이 끝나고 유체의 흐름이 없는 시기가 시작되면, 박테리아 활동에 의해 Sucrose 농도의 감소와 함께 이동 가능한 덱스트란이 생성되었다. 박테리아가 박테리아의 농도 증가와 수용성 상태의 덱스트란 생성을 수반하는 Sucrose의 소모를 시작하면 수용성 덱스트란이 점차적으로 침전되었다.

표 15. 흠 다짐 모델의 초기 조건과 주입 유체의 구성.

	Model condition	
	Size (mm ³)	62.1 × 62.1 × 160
	Initial porosity	0.38
	Initial permeability (md)	4,150
	Injector location	1, 1, 20 (bottom block)
	Producer location	1, 1, 1 (top block)
	Pressure measurement	(1, 1, 8) and (1, 1, 13)
Injection fluid composition (mole fraction)		
	Sucrose	0.000789
	NH ₄ ⁺	0.000133
	HCO ₃ ⁻	0.000219
	H ₂ O	0.998859

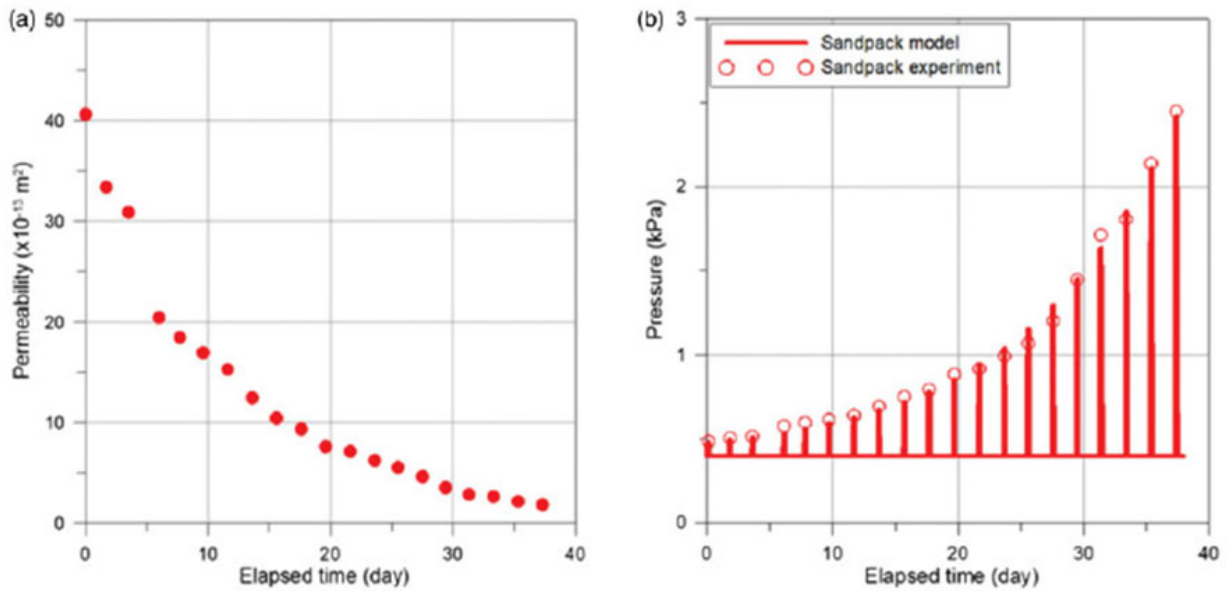


그림 41. (a) 실험을 통한 투수 계수 감소와 (b) 실험과 모델링의 비교를 통해 얻어진 차압 데이터

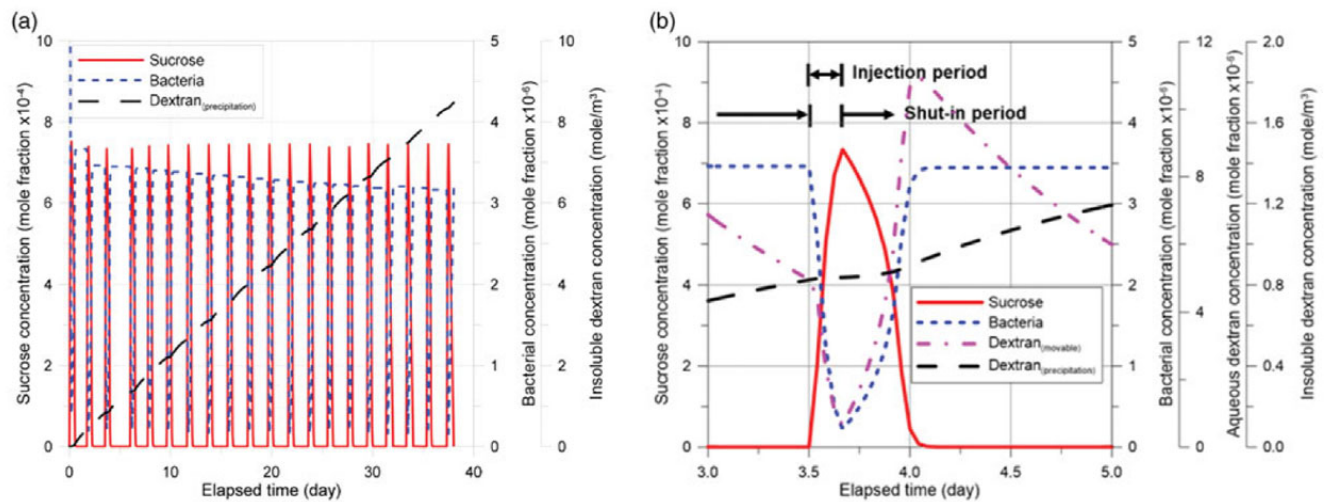


그림 42. 흙 다짐 시뮬레이션 중의 대사산물의 농도 변화: (a) 전체 기간의 결과와 (b) 특정 주입 기간 동안의 결과.

- 그림 43은 38일간의 시뮬레이션의 끝에서 덱스트란 농도, 공극율, 투수계수의 공간적인 분포를 보여준다. 덱스트란 농도는 약 8.2~8.5%의 농도를 가졌다. 덱스트란의 분포는 덱스트란의 농도가 주입구와 배출구에서 가장 낮은 것으로 나타났다 (그림 43(a)). 가장 높은 농도는 중간 높이보다 약간 배출구에 가까운 곳에서 나타났다. 이는 덱스트란 침전의 전구물인 이동 가능한 덱스트란에 의한 것으로, 위쪽으로 향하는 유체의 흐름에 의해 유체 주입 기간 동안 이동되었기 때문으로 보인다. 그 후에, 이동 가능한 덱스트란은 침전된 덱스트란의 형태로 변형되었다. 결과적인 덱스트란은 침전된 지역에서 이동을 멈추었으며 결과적으로 평균 공극율을 0.38에서 0.358까지 감소시켰다. 평균적인 투수계수는 4.14 D 에서 0.166 D 까지 감소하였다. (그림 43(b)). 시뮬레이션으로부터 얻어진 투수 계수 결과는 약 0.182 D의 최종 투수 계수를 보인 실험 결과와 약 7%의 오차를 보였다.

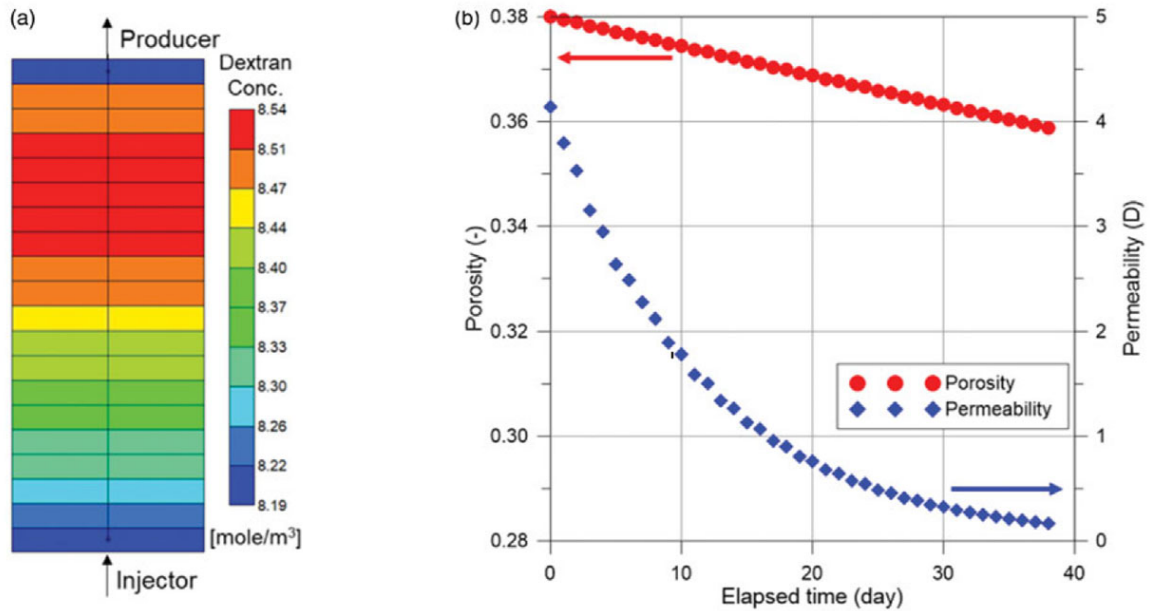


그림 43. 흙 다짐 시료에서의 38일간의 시뮬레이션 결과: (a) 덱스트란 농도, (b) 평균 공극율과 투수계수의 변화.

3-3-2. 액상화 보강을 위한 미생물 접종액 및 배양액 최적 주입 전략 및 가이드라인 개발 (수행과제 3-2)

○ 지반 내 유체 (보강액) 주입 모델링

- 액상화 취약 사질토 지반 내 보강액 주입 수치해석을 위해 본 연구과제에서는 유한요소법 기반의 COMSOL Multiphysics를 사용하였다 (그림 44).
- 본 수치해석을 위해 사용되는 입력 변수들은 표 16와 같다. 각각의 변수들은 현장에서 통상적으로 쓰이는 보강액의 값을 이용하였다. 대상층의 공극률은 0.4, 암반층의 공극률은 0.05로 차이를 두었다. 투수계수의 경우, 대상층의 투수계수를 암반층 투수계수보다 더 높은값으로 가정하였다.

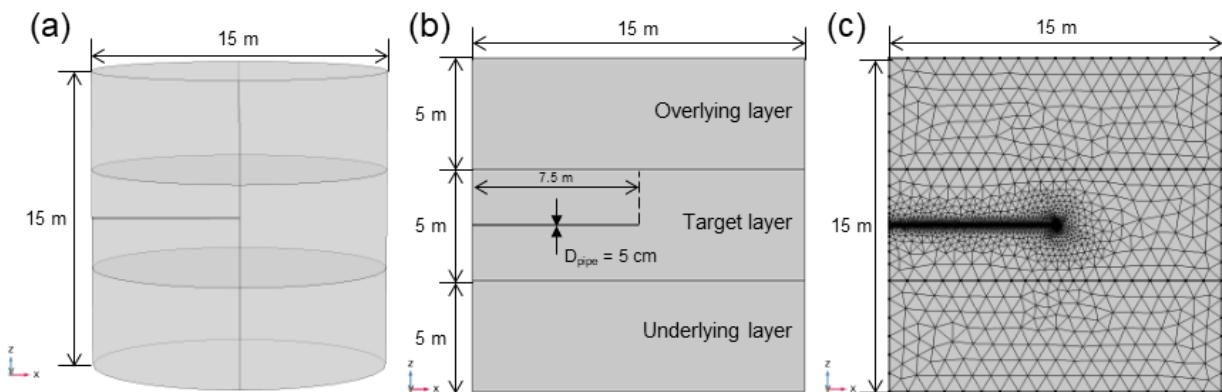


그림 44. 보강액 주입 수치해석 모델: (a) 3차원 모델, (b) 모델 단면도, (c) 단면의 메쉬 설정.

- 지반 내 유체 주입 시 다양한 주입 조건과 지반 조건이 유체의 유효 반경에 주는 영향을 보기 위해 배치 프로세스를 사용했다. 3개의 대상 지반 공극률, 5개의 투수계수 이방성(k_h/k_v)을 각각 해석함으로써, 총 15 경우에 대하여 해석을 진행했다.

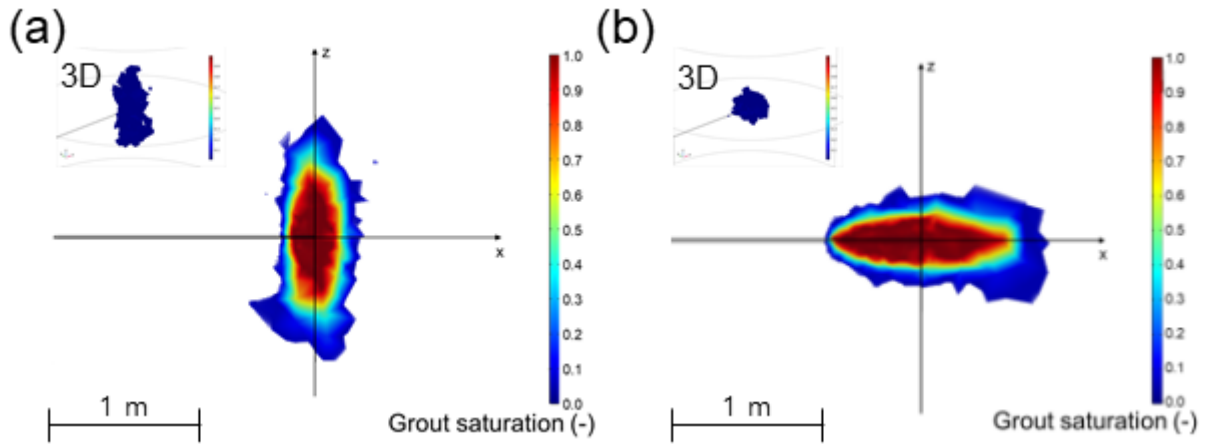


그림 45. 공극률 0.4의 지반에서 지반의 투수계수 이방성에 따른 유체 주입 형의 단면 (a) $k_h/k_v = 0.01$, (b) $k_h/k_v = 100$.

표 16. 수치해석 분석 입력 변수.

Geotechnical properties				
Layer	Flow rate	Injection/simulation time (mins)	Capillary Diffusion D_c [m ² /s]	Boundary
Target layer	20 L/min	10/20	10^{-10}	Constant pressure
Underlying and overlying layers	-	10/20	10^{-10}	Constant pressure
Fluid properties (Note: 1 indicates pore-water, and 2 indicates injected grout)				
Layer	Density ρ_1, ρ_2 [kg·m ³]	Fluid dynamic viscosity μ_1, μ_2 [Pa·s]	Relative permeability k_{r1}, k_{r2}	Initial fluid saturation s_1, s_2 [-]
Target layer	$\rho_1 = 1000$ $\rho_2 = 1190$	$\mu_1 = 0.001$ $\mu_2 = 0.01$	Brooks-Corey model	$s_1 = 1$ $s_2 = 0$
Underlying and overlying layers	$\rho_1 = 1000$ $\rho_2 = 1190$	$\mu_1 = 0.001$ $\mu_2 = 0.01$	Brooks-Corey model	$s_1 = 1$ $s_2 = 0$
Injection parameters for batch processing				
Layer	Porosity ϵ_p [-]	Horizontal permeability k_h [m ²]	Vertical permeability k_v [m ²]	k_h/k_v [m ²]
Target layer	0.3	10^{-14}	10^{-12}	0.01
		10^{-13}		0.1
	0.4	10^{-12}		1
		10^{-11}		10
	0.5	10^{-10}		100
Underlying and overlying layers	0.01	10^{-16}	10^{-16}	1

- 그림 45은 공극률 0.4의 지반에 대하여 지반의 수평/수직 투수계수의 비가 0.01과 100인 경우 지반에 유체를 주입하였을 때 그 형상의 단면을 나타낸 것이다. 이를 통해 지반에 유체를 주입할 때 투수계수가 높은 방향으로 주입액이 침투함을 확인할 수 있다.

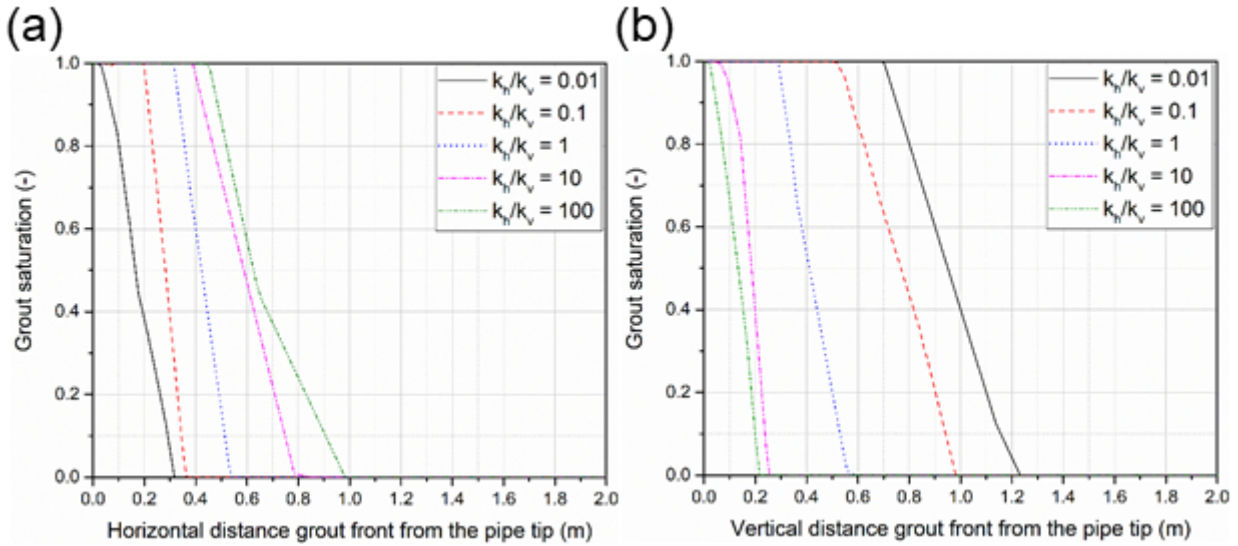


그림 46. 지반의 투수계수 이방성에 따른 (a) 수평, (b) 수직방향 유체 침투 범위.

- 그림 46은 공극률 0.4의 지반에 대하여 지반의 투수계수 이방성에 따른 수평방향과 수직방향의 유체 침투 범위 분석 결과이다. 지반에 유체를 주입할 때 투수계수가 높은 방향으로 주입액의 유효 반경이 증가함을 확인할 수 있다. 수평/수직 방향 투수계수비(k_h/k_v)가 0.01일 때 0.29m, 100일 때 0.9m로 약 210% 상승함을 확인했다. 수직 방향 유효 반경 또한 수직 방향으로의 투수계수가 높아질수록 유효 반경이 0.2m에서 1.15m로 약 475%의 상승했다. 따라서, 수평 혹은 수직 방향으로의 투수계수의 상승은 동일한 방향으로의 유체의 침투 거리 상승을 유발했다.

○ 지반 내 유체 (보강액) 주입 영향 반경

- 본 연구과제에서는 지반 보강 목적에 따른 주입 전략을 설정하기 위해 지반 내 보강액의 임계포화도에 따른 유체의 주입 유효 반경을 분석하였다 (그림 47). 지반 개량의 목적에 따라 각각 10, 50, 90 %의 임계 포화도를 설정하였으며 그에 따른 수평방향과 수직방향의 유효 반경을 구하였다.

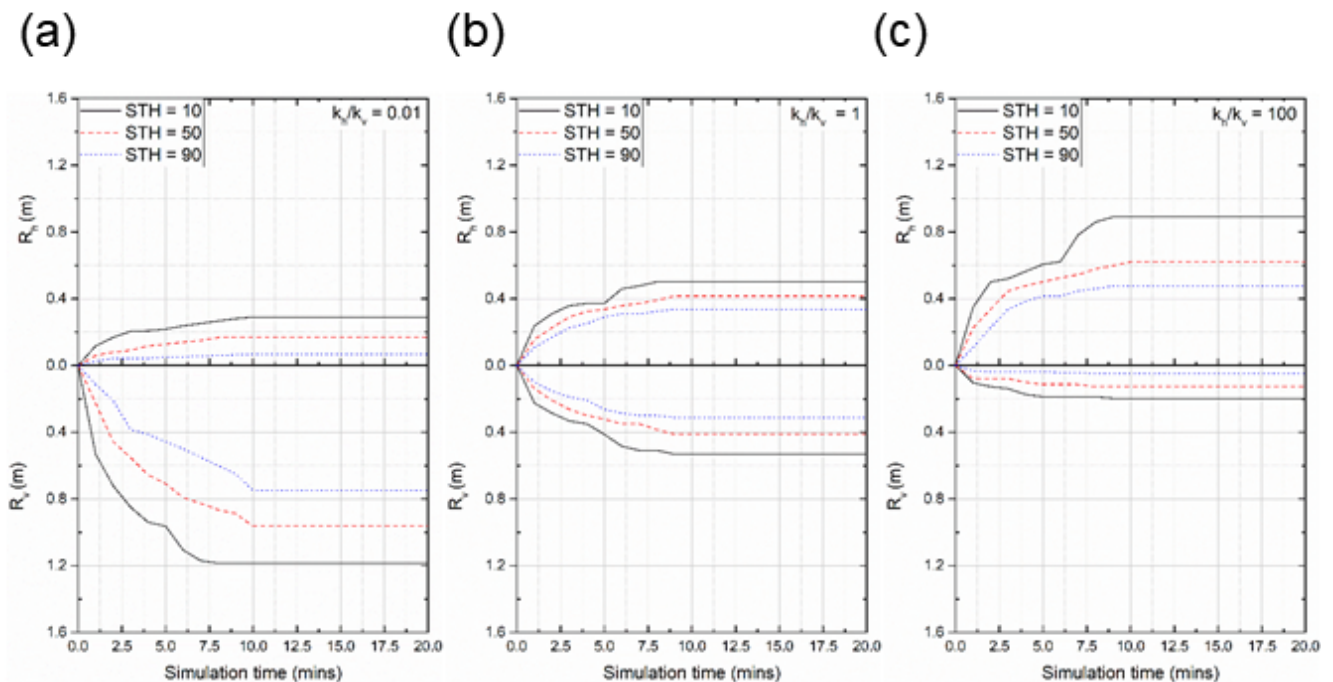


그림 47. 지반 내 유체의 임계 포화도에 따른 수평·수직 유효 반경 분석 결과: (a) $k_h/k_v = 0.01$, (b) $k_h/k_v = 1$, (c) $k_h/k_v = 100$.

- 이 결과를 통해 본 연구과제에서는 지반의 투수계수 이방성에 따라 수평 · 수직 유효 반경을 예측할 수 있는 관계식을 도출했으며 그 식은 다음과 같다.

$$R_h/R_o = a \times \log\left(\frac{k_h}{k_v}\right) + b$$

$$R_v/R_o = -a' \times \log\left(\frac{k_h}{k_v}\right) + b'$$

- 위 식의 계수는 임계포화도에 따라 a 는 0.2144 - 0.3289, b 는 1.1388 - 0.6451의 범위로 나타났고, a' 은 0.5873 - 0.1710, b' 은 1.3244 - 0.7517의 범위를 가졌다 (그림 48).

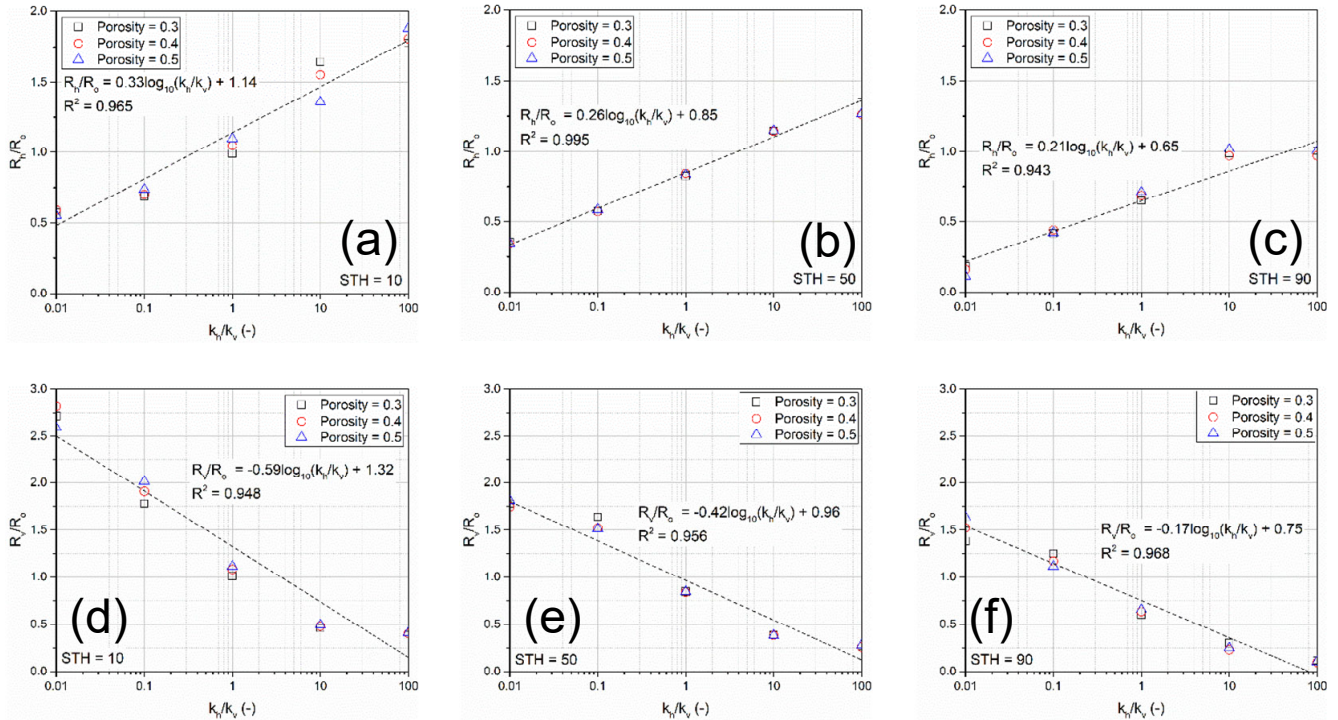


그림 48. 지반의 투수계수 이방성에 따른 수평(a-c)·수직(d-f) 방향 유효 반경 결과: 임계포화도 (a,d) 10%, (b,e) 50%, (c,f) 90%.

- 이를 통해 지반 내 보강액을 주입할 때 지반 보강 목적에 따른 주입 가이드라인을 세울 수 있다.
- 예를 들어, 차수 목적의 지반 보강을 설계 할 때는 공극 내 유체의 흐름을 완전히 막아야 하기 때문에 90%의 임계 포화도로 설계를 하여야 한다.
- 액상화 취약지반 보강의 경우에는 지반의 전단강도를 증진시켜야 한다. 이 경우 차수를 목적으로 한 보강에 비해 상대적으로 낮은 수준의 보강이 요구되며 본 연구에서는 임계포화도 50%를 적정 기준으로 제안한다.
- 지반 내 액상화 보강을 목적으로한 유체 주입 시 본 연구과제에서 제시한 식을 이용해 주입 간격을 설계할 수 있다. 지반에 수직방향으로 유체를 주입할 때 주입구 사이 간격은 해당 지반의 투수계수 이방성에 따라 계산한 수직방향 영향 반경의 2배로 설정하면 된다. 또 주입공 사이의 수평 간격은 동일한 방법으로 계산한 수평방향 영향 반경의 2배로 설정하면 된다. 예를 들어 $k_h/k_v = 0.01$ 인 지반에 액상화 보강을 위해 주입구당 200 L의 보강액을 주입하는 경우 수직·수평 영향반경은 각각 501, 214 mm가 된다. 이를 통해 주입구의 수직간격과 주입공의 수평간격을 설계하면 각각 1004 mm, 429 mm 가 된다.

○ 액상화 취약지반 보강을 위한 지반 내 미생물 접종액 및 배양액 주입 가이드라인 개발

- 토양 미생물: *Leuconostoc mesenteroides*
 - 실제 토양에 서식하는 미생물이며 전라북도 고창군과 충청북도 청주시 수변 토양의 미생물 군집 분석을 통해 실제 국내 토양에 서식하는 미생물임을 확인하였다.
 - 혐기와 호기 상태 모두에서 생존이 가능해 산소가 부족한 환경에서도 생존할 수 있다.
 - 이당류인 sucrose가 공급될 경우 물에 녹지 않는 바이오폴리머인 덱스트란을 생성할 수 있다.
 - Bio-safety level 1의 미생물로 유해성이 없고 안전하다.

• 미생물 배양액

- 액상화 취약지반 보강을 위한 미생물 배양액은 바이오폴리머 생성을 위한 sucrose, 미생물 생장을 위한 yeast extract, 최적의 미생물 성장 pH(pH~7)를 맞춰주기 위한 완충용액(KH₂PO₄, K₂HPO₄ 용액)으로 구성한다.
- 미생물 배양액은 1 L 미생물 배양액을 기준으로 40 g sucrose, yeast extract 10 g, 1 M KH₂PO₄ 용액 41 mL, 1 M K₂HPO₄ 용액 59 mL를 혼합하여 사용한다(표4). Sucrose 농도의 경우 바이오폴리머 생성 효율이 가장 높은 농도인 40 g/L 만큼 첨가한다(표5). 만약 보강 지역이 매우 넓거나 너무 높은 주입 횟수가 요구되는 조건에서는 80 g/L 의 농도를 사용해 주입 횟수를 줄일 수 있다.
- 해당 미생물 배양액에 *Leuconostoc mesenteroides*를 첨가하여 미생물 접종액을 만든다. 미생물 접종은 미생물의 생장이 활발하게 일어나는 exponential growth 상태(미생물 배양 후 3-8 시간 후)인 접종하는 것이 가장 효과적이다(그림 5c).
- 바이오폴리머 생성 과정 동안 미생물을 exponential growth 상태로 유지하기 위해 미생물 접종액을 주입공당 100 L씩 10 - 15시간 간격으로 공극 내 바이오폴리머의 포화도가 3%가 될 때까지 주입한다. 이때 바이오폴리머의 포화도는 부피 포화도를 기준으로 한다 (바이오폴리머의 밀도 =1.5g/cm³).

• 미생물 접종액 주입 간격

- 미생물 주입 간격은 주입 지반의 수평 · 수직 투수계수의 비에 의해 결정된다. 액상화 취약 사질토 지반에 미생물 접종액을 주입하는 경우 아래의 식을 통해 수평 · 수직 방향 유효 반격을 구할 수 있다.

$$R_h/R_o = a \times \log\left(\frac{k_h}{k_v}\right) + b$$

$$R_v/R_o = -a' \times \log\left(\frac{k_h}{k_v}\right) + b'$$

- 위 식의 계수는 공극 임계포화도에 따라 a 는 0.2144 - 0.3289, b 는 1.1388 - 0.6451의 범위로 나타났고, a' 은 0.5873 - 0.1710, b' 은 1.3244 - 0.7517의 범위를 가진다. 액상화 취약 사질토 지반의 보강을 위해서 지반의 동적 물성을 증진시켜야 하므로 본 연구과제에서는 50%의 공극 포화도로 지반을 보강하는 것을 제안한다. 이때 a , b , a' , b' 값은 각각 0.26, 0.85, 0.42, 0.96 이다.
- 이를 통해 지반의 공극률과 투수계수 조건에 따른 미생물 배양액 최적 주입 횟수, 주입공 내 주입구의 수직 간격, 주입공 사이의 수평 간격을 계산할 수 있으며 그 결과는 표 17와 같다.

표 17. 보강 지반의 수평 · 수직 투수계수 비에 따른 미생물 접종액 주입구 및 주입공 간격

Design factors	$k_h/k_v = 0.1$	$k_h/k_v = 1$	$k_h/k_v = 10$
공극 임계 포화도 (STH)		50%	
대상 지반 공극률		40%	
$R_h/R_o = a \times \log(k_h/k_v) + b$		$a = 0.26, b = 0.85$	
$R_v/R_o = -a' \times \log(k_h/k_v) + b'$		$a' = 0.42, b' = 0.96$	
주입공당 접종액 주입량 (L)		100	
R_o (mm)		720	
수직 유효반경, R_v (mm)	996	694	392
수평 유효반경, R_h (mm)	425	611	797
주입구 수직 간격, $2 \times R_v$ (m)	1.99	1.39	0.78
주입공 수평 간격, $2 \times R_h$ (m)	0.85	1.22	1.59
Sucrose 농도		40g/L	
바이오폴리머 생성효율		0.17g/1g sucrose	
주입당 바이오폴리머 생성량 (g)		680	
주입당 바이오폴리머 포화도		0.453%	
목표 바이오폴리머 포화도		3%	
주입 횟수, N		$3 \div 0.453 = 6.6 \rightarrow 7$	

4. 연구 개발 성과

가. 국내외 논문 게재

번호	구분 (논문)	논문명	소속 기관명	역할	논문 게재지	영향력 지수	논문 게재일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	Modification of interfacial tension and wettability in oil-brine-quartz system by in situ bacterial biosurfactant production at reservoir conditions: Implications to microbial enhanced oil recovery	한국과학기술원	주관	Energy & Fuels	3.021	2019.05.13	중복사사	SCI
2	논문	Review on geotechnical engineering properties of sands treated by microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) and biopolymers	한국과학기술원	주관	Construction & building materials	4.419	2020.02.22	중복사사	SCI
3	논문	Photoelastic observation of toughness-dominated hydraulic fracture propagation across an orthogonal discontinuity in soft, viscoelastic layered formations	한국과학기술원	주관	International journal of rock mechanics and mining sciences	3.780	2020.09.01	중복사사	SCI
4	논문	Effect of fluid-rock interactions on in situ bacterial alteration of interfacial properties and wettability of CO ₂ -brine-mineral systems for geologic carbon storage.	한국과학기술원	주관	Environmental Science & Technology	7.864	2020.12.10	중복사사	SCI
5	논문	상부 응력이 수평 압밀 그라우팅 구근 형상에 미치는 영향: 2차원 축소 모형 실험 연구	한국과학기술원	주관	한국지반공학 회논문집	-	2020.12.31	중복사사	비SCI

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

번호	구분 (특허)	특허명	소속 기관명	역할	특허 등록 국가	등록번호	특허 출원/등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항
1	특허	바이오폴리머 층을 포함한 비투명 채굴 시스템	한국과학 기술원	주관	대한민국	10-2150092-0000	2020.08.25	중복사사	특허등록
2	특허	미생물에서 추출한 효소를 이용한 지반 누수 보강, 차수 및 투수 저감 방법	한국과학 기술원	주관	대한민국	10-2192559-0000	2020.12.11	중복사사	특허등록
3	특허	셸드 TBM 버력 배 출 장비	한국과학 기술원	주관	대한민국	10-2020-0157453 (출원)	2020.11.23	중복사사	특허출원
4	특허	SIP 기법을 이용한 지반 내 미생물 생 장 및 바이오필름 생성 모니터링 방법 및 시스템	한국과학 기술원	주관	대한민국	10-2020-0173962 (출원)	2020.12.14	단독사사	특허출원

다. 전문 연구 인력 양성

번호	분류	기준 연도	현황										
			학위별			성별			지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
1	석사 졸업생	2020		1			1		1				
2	박사 졸업생	2020	1				1				1		

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

연 차	연구목표	주요 연구내용	연구수행기관	가중치	달성도 (%)
1차 년도	포화사질토 환경 하 이형/ 동형젖산균의 발효 반응으 로 인한 바이오폴리머 생성 특성 및 생성된 바이오폴리 머의 물성 규명	- 미생물 생장 조건에 따른 바이오폴리머 생 성량 측정 - 모델 미생물 및 미생물 배양액 선정	한국과학기술원	15	100
	미생물에 의해 바이오폴리 머 생성 시 느슨한 포화 사 질토의 동적 거동 및 액상 화 저항 강도 증진효과 규 명	- 공진주시험, 삼축시험을 통한 바이오폴리 머 생성 사질토의 동적물성 연구 - 공진주시험, 삼축시험을 통한 바이오폴리 머 생성 사질토의 저주파 감쇠계수 증가 연구		20	100
	대상 지반의 액상화 보강을 위한 미생물 접종액 및 배 양액의 최적 주입 전략 및 가이드라인 개발	H-B-C 연계모델을 통해 미생물 배양액 주입에 따른 지반의 투수계수 감소효과 예 측 시뮬레이션 수행		20	100
2차 년도	포화사질토 환경 하 이형/ 동형젖산균의 발효 반응으 로 인한 바이오폴리머 생성 특성 및 생성된 바이오폴리 머의 물성 규명	- 바이오폴리머의 물리화학적 물성 (영률, 전단탄성계수) 측정 연구 - 바이오폴리머의 유변학적 물성 (0.1-100 Hz) 측정		15	100

	미생물에 의해 바이오폴리머 생성 시 느슨한 포화 사질토의 동적 거동 및 액상화 저항 강도 증진효과 규명	- 반복단순전단시험을 통한 바이오폴리머 처리 사질토의 액상화 저항강도 증진 효과 검증 - 진동대-센트리퓨지 실험을 통한 바이오폴리머 처리 사질토의 동적 물성 연구 - Xray-CT 이미징을 통한 지반 내 바이오폴리머 생성 가시화		20	100
	대상 지반의 액상화 보강을 위한 미생물 접종액 및 배양액의 최적 주입 전략 및 가이드라인 개발	- H-B-C 연계모델을 통해 미생물 배양액 주입에 따른 바이오폴리머 생성 분포, 지반의 투수계수 및 공극률 감소효과 예측 시뮬레이션 수행 - 지반의 투수계수 이방성에 따른 유체 주입 형상 및 영향범위 분석을 통한 주입 가이드라인 설립		10	100

2. 관련 분야 기여도

- 바이오폴리머를 이용한 지반의 동적 물성 개량 및 액상화 보강에 대한 연구를 통해 점탄성물질의 동적 지진 하중 감쇠 효과에 대한 가능성을 제시함과 동시에 토양 미생물을 활용한 친환경적인 지반 보강 공법에 대한 토대를 마련하였다.
- 다양한 배양 환경에 따른 토양 미생물의 바이오폴리머 생성량 정량화 및 생성된 바이오폴리머의 물리화학적, 유변학적 물성 측정에 대한 방법 제시 및 측정 결과에 대한 연구자료를 확보하였다.
- 삼축 시험, 공진주 시험, 진동 단순 전단 시험, 진동대-센트리퓨지 실험 등 다양한 조건에서 측정한 바이오폴리머 처리된 사질토 지반의 동적 거동에 대한 연구를 통해 친환경적인 액상화 취약지반 보강을 위한 혁신적인 기술 개발의 토대를 마련함. 또 점탄성 물질과 지반의 상호작용에 대한 이해를 향상시켰다.
- H-B-C 연계 모델링을 통해 공극 내 바이오폴리머 생성에 대한 매커니즘 규명 및 유체 주입 모델링을 통해 지반 보강을 목적으로 지반 보강액을 주입하는 공법에 대한 이해를 증진시켰다.
- 2012년과 2014년 자료를 기준으로 발표된 Chang et al.(2016) 논문에 따르면 1 ton의 지반을 2.5 MPa 이상 강도로 발현하기 위해서 요구되는 비용은 바이오폴리머와 시멘트를 사용하였을 때 각각 13.5 USD와 9.85 USD로 시멘트를 이용한 보강이 경제적이지만 이산화탄소 처리비용을 포함한다면 각각 12.95 USD와 12.50 USD로 거의 동일하다. 이 결과를 2018년 재료비를 기준으로 분석한다면 화강풍화토 1m³를 강도를 5 MPa로 보강하기 위해 필요한 바이오폴리머와 시멘트의 이산화탄소 처리비용을 제외한 재료비를 비교하였을 때 각각 9 USD와 7.2 USD 이다. 분석에 사용된 바이오폴리머는 Xanthan gum으로 이미 상용화된 바이오폴리머이며 단가는 약 1500 USD/ton 이다. 시멘트의 단가는 60 USD/ton을 이용하였다. 국제적으로 시멘트의 이산화탄소 배출에 대한 문제가 대두됨에 따라 이산화탄소 처리비용이 증가하는 추세임을 감안하면 바이오폴리머를 이용한 액상화 취약지반 보강기술이 기존 기술과 비교해 적용 가능한 경제성을 가진다.

	시멘트	바이오폴리머 (Xanthan gum)
중량비 (%)	10	0.5
재료량 (kg)	120	6
재료비 (USD)	7.2	9
재료비 비율	1	1.25

- 기존의 액상화 취약지반 보강공법은 대부분 시멘트를 사용하는 공법이다. 하지만 시멘트에 의한 이산화탄소 방출량은 전체 이산화탄소 방출량의 7~8%로 환경적으로 매우 심각한 문제이다 (Chang et al., 2016). 토양 미생물의 바이오폴리머를 이용한 친환경 액상화 취약지반 보강을 통해 시멘트를 대체한다면 이산화탄소 배출량 저감을 통해 환경적인 파급 효과가 매우 클 것으로 기대된다.
- 시멘트의 생산 및 사용으로 인해 발생하는 이산화탄소의 총량은 1 ton의 시멘트당 0.95 ton이다 (Larson, 2011). 한국시멘트협회의 추산 결과에 따르면 2019년 국내 시멘트 총 출하량은 50,665,000 ton이며 그 중 내수용 시멘트 출하량은 49,483,000 ton 이다 (한국시멘트협회, 2020). 또 2017년 발간된 한국환경산업기술원의 보고서에 따르면 시멘트 사용으로부터 생성되는 이산화탄소의 회피비용은 국내에서

약 159 USD/CO₂ ton으로 집계된다 (한국환경산업기술원, 2017). 국내 시멘트 내수 출하량을 기준으로 본 연구를 통해 시멘트 사용량의 0.1%를 대체한다면 연간 약 81억원의 이산화탄소 처리비용 감소 효과를 얻을 수 있다. 그 외에도 화학물질 사용 보강기법으로 인해 발생한 지하수·토양오염 정화비용 절감 효과 또한 예상된다.

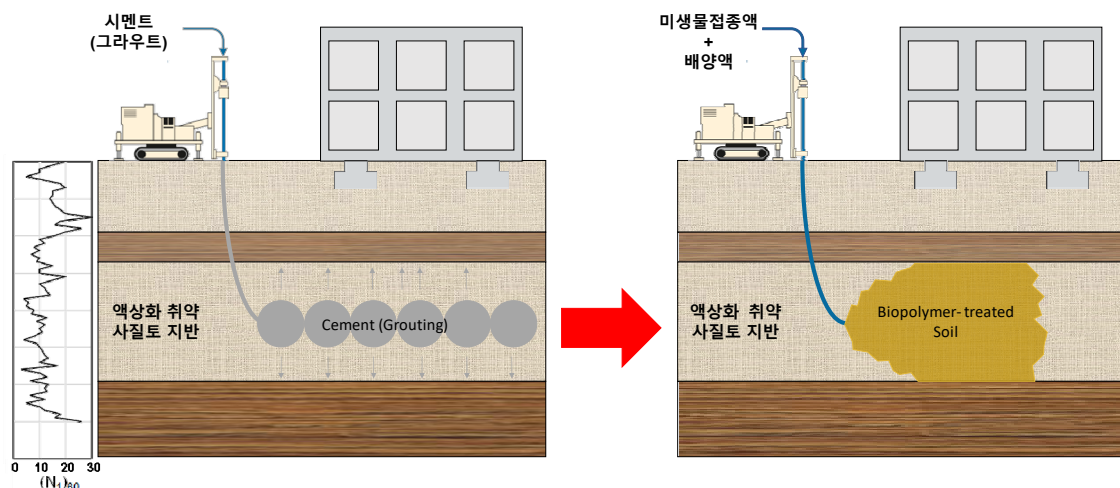
- 본 연구에서 제안한 바이오폴리머를 이용한 액상화 취약 사질토지반 보강공법은 1) 포화사질토의 동적 물성 보강 효과, 2) 시공 재료비, 3) 이산화탄소 회피비용 측면에서 기존의 시멘트를 이용한 공법과 비교하였을 때 충분한 경쟁력을 보인다. 특히 토착 박테리아를 이용한 친환경 공법이라는 점, 친환경 공법을 위한 바이오폴리머 상용화를 통해 재료비가 감소하는 추세라는 점, 국제적으로 이산화탄소 처리비용이 증가하는 추세라는 점을 고려하면 매우 효과적으로 기존의 시멘트를 사용한 공법을 대체할 수 있을 것으로 기대된다.
- 이번 연구를 통하여 수변 포화지반의 액상화 위험도 저감으로 인한 사회 인프라시설의 안정화와 함께 지반공학 분야의 문제 해결을 위한 친환경적이고 저비용의 공법 개발을 통해 사회적 비용이 절감될 것으로 기대됨.

3. 목표 미달성 시 원인 및 차후대책

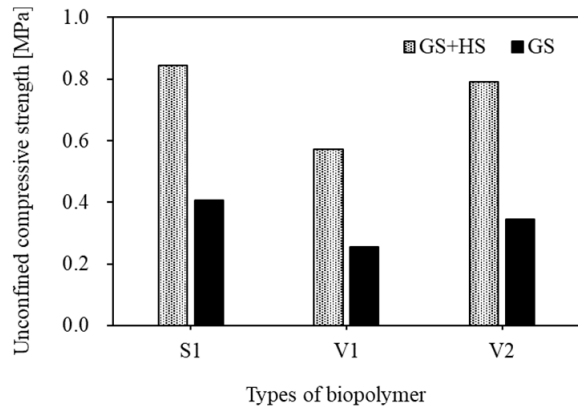
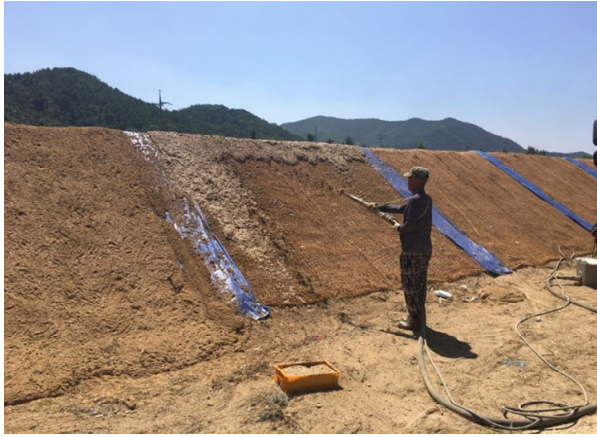
- 본 연구는 질적 성과물로서 SCI(E)급 학술지 게재 5편과 특허 출원 3건, 특허 등록 1건의 성과를 목표로 하였으나 목표치에 도달하지 못하였다.
- 4건의 SCI(E)급 학술지와 1건의 비SCI 학술지가 게재되었으며, 3건의 SCI(E)급 학술지가 심사 중에 있다. 현재 심사 중인 3건의 SCI(E)급 학술지는 1건은 수정 후 게재 승인 상태, 2건은 2020년 11월에 논문 심사 답변서를 제출한 상태이다.
- 특허 실적의 경우 초기 계획은 특허출원 3건 등록 1건이었지만 특허출원 2건 등록 2건으로 달성하였다.
- 인력양성 2명의 경우 초기 계획은 박사학위 2명이었지만 박사학위 1명, 석사학위 1명으로 총 2명 달성하였다.

제5장. 연구개발성과의 활용계획

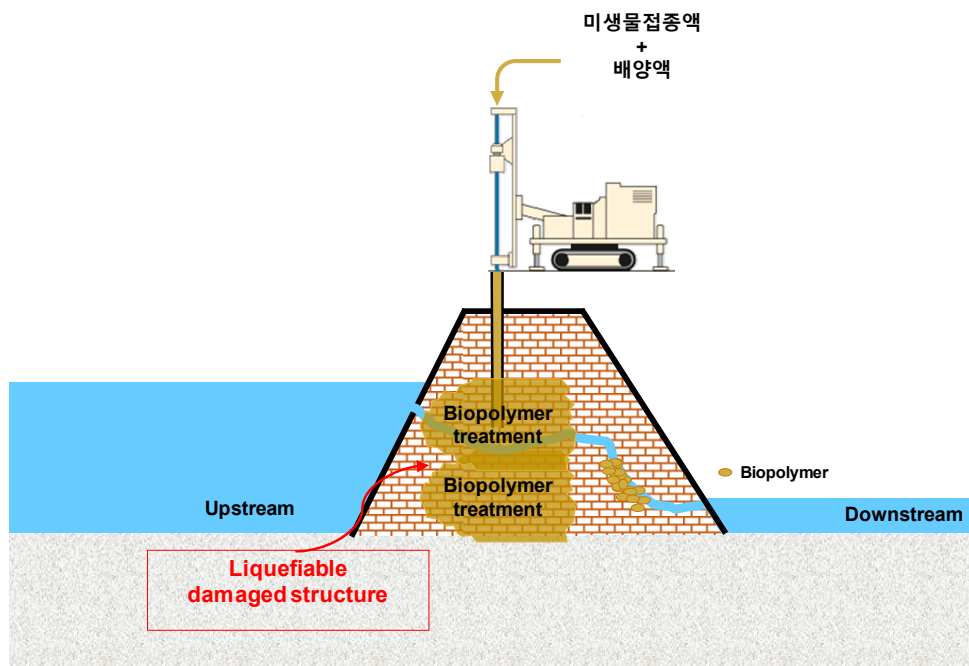
- 해당 연구의 결과를 지자체에서 관리 중인 수변 연약지반에 실제 적용해봄으로써 현장에서의 생물학적 방법을 이용한 액상화 취약 사질토 지반 보강 효과를 확인할 예정이다.
- 액상화 취약 사질토 지반 보강액 주입 시뮬레이션 및 가이드라인을 이용해 국가연구개발사업의 액상화 취약 사질토 지반(SPT-N치 20 이하) 보강 현장실험에 주입공당 보강액 주입량 및 주입 간격, 주입 유량 설계 참여할 예정이다. 이를 통해 실제 수치해석을 통해 예측한 유체 주입 형상과 영향범위를 확인하고 시공 후 관입시험을 통해 지반의 강도 보강 효과를 확인할 계획이다.



- 국토교통부에서 수행한 물관리연구사업의 광주과학기술원 주관 한국건설기술연구원 공동연구 ‘친환경 신소재를 이용한 고강도 제방 기술 개발(20AWMP-B114119-05)’에 따르면 바이오폐리머 표면 분사 공법을 통해 실제 현장에서 제방의 유동특성, 압축강도, 표면 강성이 증진되는 현상을 확인하였다. 해당 연구과제에서는 안동 하천시험센터의 미사토와 황토가 혼합된 비탈면에 대하여 연구를 수행하였다 (우효섭, 2020). 본 연구 과제에서는 추후 해당 과제의 연구진들과 협업을 통해 액상화에 취약한 수변 구조물에 바이오폐리머 접종액을 주입하여 구조물 표면이 아닌 구조물 내부 보강을 통해 액상화 저항 강도를 증진시키는 연구를 수행할 예정이다.



- 한국수자원공사, LH 한국토지주택공사 등 기관과의 협조를 통해 액상화에 취약한 수변 사질토~실트질 사질토 지반, 노후 수변 구조물 (제방, 농업용 저수지보 등) 보강 적용 사례를 늘려갈 예정



제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

- 액상화는 지진에 의해 흔히 발생하는 현상이다. 때문에 지진피해가 상대적으로 많은 나라들에서는 이 액상화에 대한 연구 및 지반 보강 방법에 대한 연구를 활발하게 진행해왔다. 표 2는 대표적인 보강 방법 및 특징에 대해 보여주고 있다 (Mitchell, 2008).

표 2. 대표적인 액상화 보강 공법 (Mitchell, 2008)

보강 공법	적용 지반	유효 깊이	장점	단점
동다짐 공법	포화 모래 및 실트 지반; 부분포화 흙	10m	1) 저비용; 2) 단순성, 3) 대면적에 용이	1) 낮은 유효깊이; 2) 지나친 유통비; 3) 주변 건축물에 피해
압밀 그라우팅	빠르게 압밀/압축 가능한 지반	제한 없음	1) 조절가능한 보강 위치; 2) 세립자 포함 지반에서 효과적	1) 느림; 2) 고비용
침투 그라우팅	모래, 조립토 지반, 암반	제한 없음	1) 과잉 간극수압 유발되지 않음; 2) 보강 지역의 국지화 가능	1) 고비용; 2) 과한 세립비 때문에 대부분의 지반에서 이용이 제한됨
미생물이용 침투바이오그라우팅	모래, 조립토 지반	제한 없음	1) 친환경; 2) 저비용	1) 외부 환경에 영향을 받음.

- 최근 저비용/친환경적인 방법의 개발을 위해 미생물을 이용한 보강 공법 또한 진행되어 왔다. 특히, 지반공학 분야에서는 미국의 한 대학에서 시작한 미생물에 의한 탄산염 고결화에 대한 연구(DeJong et al., 2006)를 그 시발점으로 보고 있다.
- 그 이후, 박테리아에 의한 지반의 물성 변화의 경우, 탄산염을 이용한 고결화 작용(그림 4 참조; Armstrong and Ajo-Franklin, 2011; Lin et al., 2014; Soon et al., 2014), 질소가스의 생성을 통한 액상화 방지(Rebata-Landa and Santamarina, 2011), 바이오필름으로 인한 투수성 감소(그림 4 참조; Yasuhara et al., 2012; Cheng, 2013)를 중심으로 연구가 진행되어왔다. 정리된 표 3에서 볼 수 있듯이, 지반공학 분야에서는 탄산염 고결화에 대해 대부분의 연구가 수행되어왔으며, 바이오 폴리머 및 바이오필름에 대한 연구는 거시적인 투수성 저하에 대한 연구만 수행되었을 뿐, 흙 입자와의 상호작용에 대한 연구는 진행된 바 없는 것으로 나타났다. 특히 침식저항성 증진에 대한 연구는 그 선행연구의 사례가 극히 드물다.

표 3. 박테리아에 의한 지반 물성 변화에 대한 대표적인 국외 연구 현황

박테리아의 기능	연구 내용	저자 (연도)
가스 생성 (Gas generation)	포화 지반에서 토양 박테리아에 의해 발생된 기포로 인해 포화도가 감소하면서, 액상화 저항 능력이 증가함을 제안.	Rebata-Landa and Santamarina (2011)
투수성 감소 (Bioclogging)	바이오필름이 생성되는 과정을 탄성파와 전기비저항을 이용하여 모니터링하는 연구를 수행	Davis et al. (2010)
	가수분해효소 부산물을 이용해 생성된 탄산염이 사질토의 투수성에 미치는 영향을 연구	Yasuhara et al.(2012)
	박테리아에 의해 생성된 탄산염이 사질토의 포화도에 따라 투수성에 미치는 영향을 연구	Cheng (2013)
고결화 작용 (Biocementation)	마이크로 X-ray CT를 이용하여 탄산염이 고결화되는 과정을 영상화에 성공함.	Armstrong and Ajo-Franklin (2011)
	토양 미생물에 의해 생성된 탄산염이 강도에 미치는 영향을 연구	Soon et al. (2014)
	두 개의 유리구슬사이에 박테리아를 이용하여 탄산염 고결 작용 후, 인장강도와 전단강도의 증진을 연구함.	Lin et al. (2014)

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		○
결정 사유	연구개발계획서 작성에 관한 안내에 의하면 ‘보안등급’은 전문기관에서 공고 시 게시한 보안등급에 준하여 작성하도록 되어있음에 따라 본 연구과제의 공고문에 의해 보안등급을 일반으로 설정함.	

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

- 모든 연구활동 종사자는 연구실 안전환경 조성에 관한 법률 시행규칙 제9조 제1항에 의거하여 KAIST 안전팀에서 지정한 안전교육을 정기적으로 수강한다. 해당 안전교육은 반기별 6시간 이상의 온라인 안전교육, 신규채용 연구자를 위한 10시간 이상의 안전교육, 특별 연구활동 종사자를 위한 2시간 이상의 특별안전교육 이수.
- 박테리아를 이용한 실험 진행 시, Biosafety level1종을 우선적으로 사용하여 병원균에 의한 인체 감염을 예방하고 실험 전후의 실험 환경 및 개인 위생 청결에 유의하여 실험을 진행.
- X-ray CT 장비 사용을 위해 해당 연구원 방사선작업 종사자 교육 이수.
- 센트리퓨지 장비 사용 시 담당 기술자의 관리감독 하 실험 수행.

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/특허/기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수/등록 번호	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
A-1	특허	바이오폴리머 층을 포함한 비투멘 채굴 시스템	한국과학 기술원	주관	대한민국	10-21500 92-0000	2020.08.25	중복사사	특허등록
A-2	특허	미생물에서 추출한 효소를 이용한 지반 누수 보강, 차수 및 투수 저감 방법	한국과학 기술원	주관	대한민국	10-21925 59-0000	2020.12.11	중복사사	특허등록
A-3	특허	월드 TBM 버력 배 출 장비	한국과학 기술원	주관	대한민국	10-2020- 0157453 (출원)	2020.11.23	중복사사	특허출원
A-4	특허	SIP 기법을 이용한 지반 내 미생물 생 장 및 바이오필름 생성 모니터링 방법 및 시스템	한국과학 기술원	주관	대한민국	10-2020- 0173962 (출원)	2020.12.14	단독사사	특허출원
B-1	논문	Modification of interfacial tension and wettability in oil-brine-quartz system by in situ bacterial biosurfactant production at reservoir conditions: Implications to microbial enhanced oil recovery	한국과학 기술원	주관	Energy & Fuels	3.021	2019.05.13	중복사사	SCI
B-2	논문	Review on geotechnical engineering properties of sands treated by microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) and biopolymers	한국과학 기술원	주관	Construction & building materials	4.419	2020.02.22	중복사사	SCI
B-3	논문	Photoelasticobserv ation of toughness-domina nt hydraulic fracture propagation across an orthogonal discontinuity in soft, viscoelastic layered formations	한국과학 기술원	주관	International journal of rock mechanics and mining sciences	3.780	2020.09.01	중복사사	SCI

B-4	논문	Effect of fluid-rock interactions on in situ bacterial alteration of interfacial properties and wettability of CO ₂ -brine-mineral systems for geologic carbon storage.	한국과학기술원	주관	Environmental Science & Technology	7.864	2020.12.10	중복사사	SCI
B-5	논문	상부 응력이 수평 압밀 그라우팅 구근 형상에 미치는 영향: 2차원 축소 모형 실험 연구	한국과학기술원	주관	한국지반공학 회논문집	-	2020.12.31	중복사사	비SCI

- 전문 연구 인력 양성

번호	분류	기준 연도	현황										
			학위별				성별		지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
1	석사 졸업생	2020		1			1		1				
2	박사 졸업생	2020	1				1				1		

제11장. 기타 사항

SCI급 논문 3편 심사중

- 1편 수정 후 게재 승인

1. Effect of soft viscoelastic biopolymer on the undrained shear behavior of loose sands, Journal of Geotech. and Geoenvironmental Eng.

- 2편 2020년 11월 논문 심사 답변서 제출 상태

2. Relaxation behavior in low frequency complex conductivity of sands caused by bacterial growth and biofilm formation by *shewanella oneidensis*, Geophysics.

3. Entrapment of clay particles enhance durability of bacterial biofilm associated bioclogging in sand, Acta Geotechnica.

제12장. 참고 문헌

권영철, 이봉직, & 배우석. (2007). 반복전단을 받는 고화 처리토의 강성저하와 일축압축강도. 한국지반환경공학회 논문집, 8(5), 23-29.

고재만, & 도덕현. (1991). 반복삼축압축시험 (反復三軸壓縮試驗) 에 의한 사질토 (砂質土) 의 액상화 (液狀化) 평가 (評價) 에 관한 연구 (研究). 한국농공학회지, 33(3), 51-62.

김문겸, 임윤목, 김태욱, & 박종현. (2002). 종방향 영구지반변형에 대한 지중 매설관로의 거동특성 해석. 한국지진공학회논문집, 6(2), 51-61.

김종국, & 채영수. (2006). 동다짐 공법이 적용된 준설패립지반의 개량효과 평가에 관한 연구. 한국지반공학회논문집, 22(5), 13-26.

박경호, 김대현 (2012). 박테리아를 이용한 실트와 모래의 고결화에 따른 탄산칼슘 확인. 한국지반공학회 논문집, 제 28권 제 6호, pp.53-61.

박성식, 김영수, & 김대만. (2005). 액상화 해석을 위한 간단한 구성모델. 한국지반공학회논문집, 21(8), 27-35.

박성식, 농전전 (2012). 흙 속의 미생물이 액성한계에 미치는 영향. 한국지반환경공학회 가을학술발표회, pp.190-193.

박종관. (1992). 항만구조물의 액상화 대책을 위한 진동대 실험에 대한 연구. 지반 (한국지반공학회지), 8(3), 37-49.

송치용, 천병식, & 김경민. (2004). 포화된 사질토의 동적 수치해석 기법. 한국지반공학회 춘계 학술대회, 2004, 746-756.

우효섭. (2020). 친환경 신소재를 이용한 고강도 제방 기술 개발. 국토교통부

이익호, 김동수, 김준석, 황지훈, & 서성호. (2003). 시편의 성형방법이 반복삼축압축시험을 이용한 지반의 액상화 평가에 미치는 영향에 관한 연구. 한국지반공학회논문집, 19(2), 57-64.

- 임춘호. (2017). 바이오그라우팅공법의 주입재 배합비에 따른 적용성. 박사학위논문, 조선대학교, 2017
- 최재순, 홍우석, 박인준, & 김수일. (2002). 지반의 동적특성에 기초한 액상화 평가법 (1): 이론제안. 한국지반공학회논문집, 18(1), 91-99.
- 최재순, 장서용, & 김수일. (2007). 다양한 진동하중의 액상화 시험을 통한 동적 과잉간극수압에 대한 상세분석. 한국지진공학회논문집, 11(2), 81-94.
- 한국시멘트협회 [웹사이트]. (2020). http://www.cement.or.kr/stati_2015/field_statistics.asp?sm=2_3_0
- 한국환경산업기술원. (2017). 탄소 포집 및 저장의 국제 비용. 환경부
- Armstrong, R., and Ajo-Franklin, J. (2011). Investigating biomineralization using synchrotron based X-ray computed microtomography. *Geophysical Research Letters*, Vol.38, L08406, doi: 10.1029/2011GL046916.
- Baveye, P., Vandevivere, P., Hoyle, B. L., DeLeo, P. C., & de Lozada, D. S. (1998). Environmental impact and mechanisms of the biological clogging of saturated soils and aquifer materials. *Critical reviews in environmental science and technology*, 28(2), 123-191.
- Bouwer, E., H. Rijnaarts, A. B. Cunningham, and R. Gerlach. (2000). Biofilms in porous media." In *Biofilms II: Process analysis and applications*, 123-158. New York: Wiley.
- Chang, I., & Cho, G. C. (2012). Strengthening of Korean residual soil with β -1, 3/1, 6-glucan biopolymer. *Construction and Building Materials*, 30, 30-35.
- Cheng, L., Cord-Ruwisch, R., & Shahin, M. A. (2013). Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation. *Canadian Geotechnical Journal*, 50(1), 81-90.
- Chang, I., Im, J., & Cho, G. C. (2016). Introduction of microbial biopolymers in soil treatment for future environmentally-friendly and sustainable geotechnical engineering. *Sustainability*, 8(3), 251.
- Davis, C.A., Pyrak-Nolte, L.J., Atekwana, E.A., Werkema Jr., D.D., and Haugen, M.E. (2010), Acoustic and electrical property changes due to microbial growth and biofilm formation in porous media, *Journal of Geophysical Research*, Vol.115, G00G06, doi:10.1029/2009JG001143.
- DeJong, J. T., Fritzges, M. B., & Nüsslein, K. (2006). Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(11), 1381-1392.
- DeJong, J.T., Mortensen, B.M., Martinez, B.C. and Nelson, D.C. (2010). Bio-mediated soil improvement. *Ecological Engineering*, 36(2), pp.197-210.
- Dunsmore, B. C., Bass, C. J., & Lappin-Scott, H. M. (2004). A novel approach to investigate biofilm accumulation and bacterial transport in porous matrices. *Environmental Microbiology*, 6(2), 183-187.
- Ham, S. M., Chang, I., Noh, D. H., Kwon, T. H., & Muhunthan, B. (2018). Improvement of Surface Erosion Resistance of Sand by Microbial Biopolymer Formation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(7), 06018004.
- Ivanov, V., & Chu, J. (2008). Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 7(2), 139-153.
- Kim, D. S., & Fogler, H. S. (2000). Biomass evolution in porous media and its effects on permeability under starvation conditions. *Biotechnology and Bioengineering*, 69(1), 47-56.
- Kim, D., Park, K. H., Kim, M. S., & Kim, S. H. (2015). A Study on the Effectiveness of Injection in Environmentally-Friendly Bio-grouting with Soil Conditions. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 16(6), 4276-4283.
- Kwon, T. H., & Ajo-Franklin, J. B. (2013). High-frequency seismic response during permeability reduction due to biopolymer clogging in unconsolidated porous media. *Geophysics*, 78(6), EN117-EN127.
- Larson, A. (2011). *Sustainability, Innovation, and Entrepreneurship*; University of Virginia: Charlottesville, VA, USA.
- Lin, H., Suleiman, M.T., Helm, J., and Brown, D. (2014) Measurement of bonding strength between glass beads treated by microbial-induced calcite precipitation (MICP). Presented at Geocongress 2014, ASCE, Atlanta, GA, U.S.A., Feb 24-26, 2014.
- Mitchell, J. K. (2008). Recent developments in ground improvement for mitigation of seismic risk to existing embankment dams. In *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV*, pp.1-20.
- Noh, D.H., Ajo-Franklin, J.B., Kwon, T.H. and Muhunthan, B. (2016). P and S wave responses of bacterial biopolymer formation in unconsolidated porous media, *Journal of Geophysical Research - Biogeoscience*, 121, pp.1158-1177.
- Ostvar, S., Iltis, G., Davit, Y., Schlüter, S., Andersson, L., Wood, B. D., & Wildenschild, D. (2018). Investigating the influence of flow rate on biofilm growth in three dimensions using microimaging. *Advances in Water Resources*, 117, 1-13.
- Rebata-Landa, V. and Santamarina, J. C. (2011). Mechanical Effects of Biogenic Nitrogen Gas Bubbles in Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.138, No.2, pp.128-137.
- Soon, N. W., Lee, L. M., Khun, T. C., & Ling, H. S. (2014). Factors affecting improvement in engineering properties of residual soil through microbial-induced calcite precipitation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(5), 04014006.
- The Japanese Geotechnical Society. (1998). Remedial measures against soil liquefaction, Balkema, 433p
- Yasuhara, H., Neupane, D., Hayashi, K., & Okamura, M. (2012). Experiments and predictions of physical properties of sand cemented by enzymatically-induced carbonate precipitation. *Soils and Foundations*, 52(3), 539-549.

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.