보안 과제( ), 일반 과제(V) / 공개( ), 비공개( )발간등록번호()

국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종보고서

R&D / ○○○○-○○○○

지진에 의한 지반 액상화 현상 저항성 20% 증대를 위한 미생물의 탈질작용에 의한 지반개량 공법 개발 최종보고서

2020. 2. 20.

주관연구기관 / 한양대학교

국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘지진에 의한 지반 액상화 현상 저항성 20% 증대를 위한 미생물의 탈질작용에 의한 지반개량 공법 개발’(연구개발 기간 : 2018. 4. 18 ~ 2019. 12. 31) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2020. 2. 20.

주관연구기관명: 한양대학교 산학협력단 (대표자) 이수재 (인)

주관연구기관책임자: 장재원

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제 고유 번호</td><td>18CTAP-C142849-01</td><td>해당 단계 연구 기간</td><td>2019.1.1 ~ 2019.12.31</td><td>단계구분</td><td>2차연도/2차</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구사업명</td><td>중사업명</td><td colspan="4">국토교통기술촉진연구사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>대과제명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">지진에 의한 지반 액상화 현상 저항성 20% 증대를 위한 미생물의 탈질작용에 의한 지반개량 공법 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구책임자</td><td rowspan="2"></td><td>해당단계 참여연구원 수</td><td>총: 9명
내부: 9명
외부: 0명</td><td>해당단계 연구비</td><td>정부:186,000천원
민간: 0천원
정부외: 0천원
상대국: 0천원
계:186,000천원</td></tr>
<tr><td>총 연구기간 참여연구원 수</td><td>총: 9명
내부: 9명
외부: 0명</td><td>총 연구비</td><td>정부:334,000천원
민간: 0천원
정부외: 0천원
상대국: 0천원
계:334,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및 소속 부서명</td><td colspan="3">한양대학교 산학협력단</td><td colspan="2">참여기업명: 해당없음</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">해당없음</td><td colspan="2">해당없음</td></tr>
<tr><td>위탁연구</td><td colspan="3">해당없음</td><td colspan="2">해당없음</td></tr>
</table>

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 갈음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	해당없음

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설·장비	기술요약 정보	소프트웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명정보	생물자원	정보	실물
등록·기탁 번호											

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

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

지반 내에 존재하는 박테리아를 이용하여 지반의 포화도 저감을 유도하고, 효소를 이요하여 지반내 미네랄을 침전시켜 지진에 의한 액상화 현상에 대한 저항성을 증진.	보고서 면수

연구의 목적 및 내용	지반 내에 존재하는 박테리아를 이용하여 흙 입자사이에 탄산칼슘 침전 및 박테리아의 활동으로 인하여 지반의 포화도 저감을 유도. 이를 통하여 지진에 의한 액상화 현상에 대한 저항성을 증진.				
연구개발성과	박테리아 배양에 효과적인 배양법 개발 생성되는 가스방울의 분포 형태를 실험을 통해 실증 진동대 실험을 통해 액상화 저항성(과잉공극수압 발달정도) 증대 확인				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	지진 발생이 예상되는 지역 중심으로 기존 구조물의 기초 하부 밑 국가 중요 시설물, 예를 들어, 천연가스 저장탱크, 원자력 발전소 하부, 댐, 항만 등에 본 기술을 적용함으로써 지진에 의한 피해(액상화, 지반침하)를 예방 가능.				
핵심어 (5개 이내)	박테리아	탈질작용	액상화 저항성		

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	Precipitation of calcium carbonates (calcite) in soil particles and induction of de-saturation via bacteria activity in soils. Increase in the resistance to the liquefaction by earthquake				
Results	Development of effective method to cultivate bacteria Identification of gas bubble distribution pattern through experiment Confirmation of increase in liquefaction resistance by shaking table tests				
Expected Contribution	In the area where earthquake is expected, it is possible to reduce or prevent damage by liquefaction by applying the technique developed in this research project to the foundation of existing structures, important national infrastructures such as natural gas reservoir tank, nuclear power plant foundation, dam, and port				
Keywords	Bacteria	Denitrification	Liquefaction resistance		

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 6

2. 국내외 기술 개발 현황 ····· 6

3. 연구수행내용 및 성과 ····· 7

4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 42

5. 연구개발성과의 활용 계획 ····· 42

6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 ····· 43

7. 연구개발성과의 보안등급 ····· 43

8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설 · 장비 현황 ····· 43

9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적 ····· 43

10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적 ····· 45

11. 기타 사항 ····· 45

12. 참고 문헌 ····· 45

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

박테리아를 이용하여 지반 내에 포화도 감소를 유도하고, 효소를 이용하여 미네랄을 침전시켜 지반의 역학적 성능을 개량하는 기술개발

2. 연구개발의 필요성

기후변화로 인한 극한 하중(강우, 강설, 해수면 변화)과 주기적으로 발생되는 지진 하중에 대비하기 위하여, 기존에 시공된 사회 기반 시설의 보강/보수가 필요. 본 연구의 결과는 신규 시설물뿐만 아니라, 기존에 시공된 시설물들의 하부 기초지반, 절토/성토 사면, 도로/철도 노반, 댐/제방, 터널, 간척지, 석탄재 매립장, 폐광산 지표침하, 누수가 예상되는 상하수도관 주변지반의 도로함몰 방지등 다양한 분야에 적용이 가능. 또한, 기존의 시멘트 몰탈 그라우팅의 경우에는 시공과정에서 많은 비용과 환경오염 문제를 수반하지만, 본 연구는 친환경적이며, 경제적인 방식으로 기존의 시설물들을 보수/보강하는 해법을 제공.

한번 생성된 가스방울은 오랜 시간 동안 지반 내에 존재할 수 있음. 모래다짐말뚝의 시공 중에 수반되는 공기 주입으로 인하여, 낮아진 지반의 포화도는 오랜 세월이 지나도 여전히 낮은 포화도를 유지하고 있다는 기존 연구결과를 토대로 미루어 볼 때, 탈질작용으로 인해 낮아진 지반의 포화도는 오랜 시간 지속되어서, 추후 발생가능한 지진에 대한 액상화 현상의 저항력을 증진시킬 것으로 예상됨.

지난 10년간 발생된 큰 규모의 지진(예를 들어, 아이티, 칠레, 네팔, 뉴질랜드)에서 보듯, 지진에 의한 재산과 인명의 피해는 굉장히 큰 규모임. 본 연구의 결과는, 이러한 피해규모가 굉장히 큰 지진에 대한 재난을 효과적으로 방지할 수 있을 것으로 예상됨.

3. 연구개발 범위

세부적인 연구개발 범위는 아래에 기술됨.

- 미생물의 탈질작용을 통해, 지반의 포화도 저감 유도
- 요소분해 효소를 이용한 지반 내에 미네랄 침전
- 포화도 저감으로 인한 지반의 외부하중에 대한 저항력 증가 유도

제2장. 국내외 기술 개발 현황

○ 국내현황

국내에서 수행된 유사한 연구과제에서는, 주로 미생물을 이용하여 지반 내에 탄산칼슘을 침전시킴으로써 흙의 고결화를 통하여 흙의 정적하중에 대한 저항성을 증대하였고, 지반 토착 박테리아 활동에 의한 바이오 필름을 생성시킴으로써 흙의 침식 저항성을 증대시키는 연구를 수행하였음. 선행 연구과제 현황을 파악하여 아래 표와 같이 정리하였음.

부처명	사업명	과제명	예산
연구재단	신진연구 지원사업	지반 토착박테리아 활동에 의한 흙의 침식저항성 증진 이해 및 생물학적 지반보강 기술 연구	1.5억초과 ~3억이하
국토부 진흥원	국토교통기술 촉진연구사업	노후 수변구조물의 누수 보강 및 내부 침식 방지를 위한 지반 토착박테리아를 활용한 생물학적 지반보강 원천기술의 개발	3억
연구재단	신진연구 지원사업	미생물을 이용한 지반재료 표면 보호 방법	1.4억
국토부 진흥원	건설교통기술 촉진연구	미생물을 이용한 친환경 지반고결제 개발	8.4억
연구재단	신진연구 지원사업	미생물을 이용한 흙의 고결화(cementation) 특성 규명 및 지반개량 신공법 개발	2억

또한, LH공사에서는 박테리아에서 생성되는 효소를 직접 이용하여, 탄산칼슘을 지반표면에 침전시켜, 공사장내 비산먼지 저감을 위한 연구를 수행하고 있음.

○ 국외현황

요소의 가수분해를 통한 미네랄 침전을 이용한 지반개량 방법은 전 세계적으로 최근 15년 사이에 널리 연구가 이루어지고 있음. 현재는, 미네랄 침전으로 인한 지반의 강도 증진, 투수계수에 대한 영향, 오염물질 고착, 및 조립토/세립토 유동방지 등에 대한 연구가 활발히 진행중임. 특히 미국의 경우, 아리조나 주립대 내에 위치한 Center for Bio-mediated & Bio-inspired Geotechnics (CBBG)라는 Engineering Research Center (ERC)는 미국 연구재단(National Science Foundation)으로부터 $18.5million의 연구비를 지원받아 2015년부터 미생물과 효소의 역할, 그리고 현장적용 방안에 대한 연구를 다른 자매 대학들 (University of California at Davis, Georgia Institute of Technology, New Mexico State University)과 활발히 진행 중임.

유럽에서는, 네덜란드 Delft 공대에서도 미생물을 위한 영양분을 지반에 주입함으로써 지반을 개량하는 프로젝트를 진행하고 있음. 특히 최근에는 스위스 로잔 연방공과대학교 (EPFL)에서도 Biomediated Geomaterial Strengthening이라는 연구주제로 박ㅌ리아를 이용한 지반개량 연구를 2018년도 11월부터 시작하였음.

최근 개최되는 학회(ACEM2018, INTERPORE2019등)에서 바이오 지반보강 개량공법이라는 주제로 미니 심포지엄 등 연구 세션이 많이 열리는 것을 확인할 수 있음.

제3장. 연구수행내용 및 성과

○ 연구 내용 및 결과

1. 연구배경

박테리아를 직접 이용하거나 박테리아의 활동을 모방하여 지반을 개량하는 방법은 아래와 같다.

- 박테리아를 이용한 탄산칼슘 침전 (Microbial-Induced Calcite Precipitation, MICP)

$$CO(NH_2)_2 + H_2O \rightarrow CO_3^{2-} + 2NH_4^+ \quad \text{(식 1-1)}$$

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3 \quad \text{(식 1-2)}$$

  - 요소(urea $CO(NH_2)_2$)의 가수분해(urea hydrolysis)를 통해서 생성되는 탄산염(CO_3^{2-})과 외부에서 주입되는 칼슘이온의 반응을 통해서 탄산칼슘 생성 (식 1-1, 식 1-2).
  - 박테리아의 활동 과정에서 생성되는 요소 분해 효소(urea enzyme, urease)를 이용하여 요소의 가수분해를 촉진.
  - 흙 입자 사이에 침전된 탄산칼슘은 추후 박테리아의 생장에 관계없이 존재함.

- 효소를 이용한 탄산칼슘 침전 (Enzyme-Induced Calcite Precipitation,₩ EICP)
  - 외부에서 직접 효소를 주입하여 탄산칼슘 침전을 촉진.
  - 요소 분해 효소를 생성하는 박테리아를 활성화 시키는 단계가 필요 없음. 반응시간 단축

- 박테리아의 탈질작용(denitrification)으로 인한 지반 포화도 저감 (Microbial-Induced De-saturation Process)

$$NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO \rightarrow N_2O \rightarrow N_2 \quad \text{(식 1-3)}$$

$$CH_3COO^- + 2.6H^+ + 1.6NO_3^- \rightarrow 2CO_2 + 0.8N_2 + 2.8H_2O \quad \text{(식 1-4)}$$

  - 질산염(nitrate, NO_3^-)에서 최종 질소(N_2)상태로 환원되는 각 단계별로, 박테리아에서 생성되는 환원효소로 인하여 탈질작용이 진행된다 (식 1-3).

- 박테리아를 이용한 탈질작용으로 지반의 포화도 저감과 동시에, 탄산칼슘 침전을 유도할 수 있다. 식 1-4와 같이 아세트산을 주입하여 질산염과 반응을 유도하여, 질소 가스 생성과 동시에 이산화탄소 생성되며, 생성된 이산화탄소는 탄산염으로 되어 외부에서 주입된 칼슘이온과 반응하여 탄산칼슘 침전을 유도한다. 이러한 포화도 저감과 탄산칼슘 침전반응은 Microbial-Induced De-saturation and Precipitation (MIDP)이라고도 불리고 있다.

이러한 탄산칼슘 침전과 기체방울 생성으로 인해서 지반의 역학적 성능을 개선할 수 있으며, 이러한 박테리아를 이용한 지반개량에 대한 개요는 아래 그림 1에 요약되어 있다.

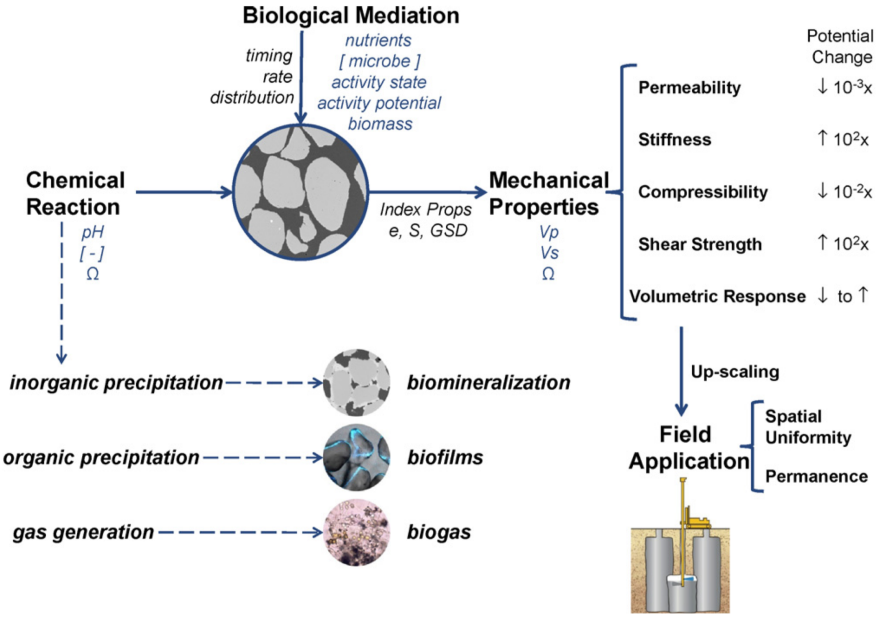


그림 1-1. 박테리아를 이용한 지반개량 (figure from DeJong et al.2010).

본 연구의 목적은 탈질작용으로 포화도 저감을 유도하고, 효소를 이용하여 탄산칼슘 침전시켜 지반의 역학적 성능을 개선하는 것이며, 세부 연구 주제에 따라 아래와 같이 주제별로 요약 정리되어 있다.

- 생성 기체의 양 및 분포형태
- EICP 처리를 통한 전단강도 향상
- EICP 처리된 지반의 하중 저항 특성
- 반응용액 주입 패턴
- 과잉공극 수압 발달정도 - 진동대 실험

2. 생성 기체의 양 및 분포형태

먼저 박테리아의 배양을 통해서, 생성되는 가스의 양과, 분포형태, 그리고 포화도에 미치는 상관관계에 대한 연구를 진행하였다. 박테리아의 종류는 성동구 중랑천 바닥의 흙을 채취한 후 배양시킨 토착박테리아와 Paracoccus denitrificans(ATCC designation 13543)이라는 탈질작용을 하는 박테리아 두 종류를 사용하였다. 활성화된 박테리아의 활동을 통해 생성되는 가스의 양을 시간에 따라 측정하고, 동시에 주입된 질산염의 감소되는 농도 측정과 박테리아의 증식 정도를 확인하기 위한 흡광도(optical density)측정을 병행하였다. 또한 투명한 미세유체칩(microfluidic chip)과 micro X-ray CT 실험을 통하여 생성되는 가스 방울의 크기와 분포 형태를 시각적으로 파악하였다.

2.1 박테리아 배양법 및 실험 시료

박테리아 활성화를 위하여 배양용액으로 사용된 화학성분은 다음과 같다: C_2H_5OH0.5g; KNO_3 1.01g; NH_4Cl 0.12g; KH_2PO_4 0.75g; K_2HPO_4 2.5g; $MgSO_4 \cdot 7H_2O$0.1g; $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.01g; $CaCl_2 \cdot 2H_2O$0.015g; trace element 용액 1ml (per 1 L of 초순수) .

Trace element 1 mL 용액에 포함된 화학성분과 농도는 다음과 같다: EDTA-2Na 10 mg; $MnCl_2$•$4H_2O$0.12 mg; $ZnSO_4$•$7H_2O$ 0.12 mg; $CuSO_4$•$5H_2O$,0.03 mg; $(NH_4)6Mo_7O_24$•$4H_2O$ 0.05 mg;$NiCl_2$•$6H_2O$ 0.1 mg; $COCl_3$•$6H_2O$ 0.1mg; $AlCl_3$•$6H_2O$ 0.05 mg; H_3BO_3. 0.05mg (Per 1mL of DI water).

박테리아 냉동샘플(frozen stock) 제조방법은 먼저 동결 건조된 paracoccus denitrifican(American Type Culture Collection, ATCC designation 13543)을 8g의 배지(Difco, Product # 23400)를 함유한 100mL 초순수와 혼합하여 30℃에서 24시간 동안 배양을 한 후, 배양액 0.5mL와 글리세롤(glycerol) 0.5mL을 혼합하여 -80℃에서 냉동보관하였다.

박테리아 배양 방법 및 순서는 다음과 같다.

① 채취된 흙 시료 100g과 배양용액 1L 혼합. 혹은 냉동된 박테리아 샘플(frozen stock) 1mL을 해동하여 위 배양용액 100mL과 혼합.
② 혼합된 샘플을 온도 30℃ 조건의 배양기에 넣고, 160rpm으로 교반.
③ 48시간 후, 용기 벽면 생성된 가스 방울 혹은 침전된 탄산칼슘의 관찰을 통하여 탈질작용의 유무를 확인.
④ 흙 시료와 섞인 첫 번째 배양용액에서 10mL의 용액을 추출하여, 새로운 배양액에 접종. 이후 앞선 2 ②, ③번 과정을 반복함으로써 박테리아 배양.
⑤ 위 4번의 과정을 3번 반복함으로써 탈질작용 박테리아를 활성화시킴.
⑥ 최종적으로 1g/L KNO_3를 위 배양액에 혼합함으로써, nitrate broth를 제조.
⑦ 위 ⑥번 항에서 제조된 nitrate broth를 원하는 medium에 주입.

사용된 시료의 경우 액상화 및 미네랄 침전의 영향을 알아보기 위하여 국내의 대표적인 모래인 주문진 표준사 및 규사 7호사를 사용하였다.

2.2 기체 발생량, 질산염 농도, 및 흡광도 측정

위에서 기술된 배양 방법에 따라 활성화된 두 종류의 박테리아 군을 사용하여 시간에 따른 기체 발생량을 모니터하고, 동시에 질산염(NO_3^-)의 농도는 분광기 (Thermo Scientific, GENESYS 30)를 이용하여 측정하였다. 또한 박테리아의 활성화 정도에 따른 흡광도(Optical density, OD)를 Water analyzer(HUMAS, HS1000 Plus)를 이용하여 주기적으로 측정하였다. 아래 그림 2-1에서 기체 발생량 측정에 사용된 실험 장치 개요도를 확인할 수 있다.

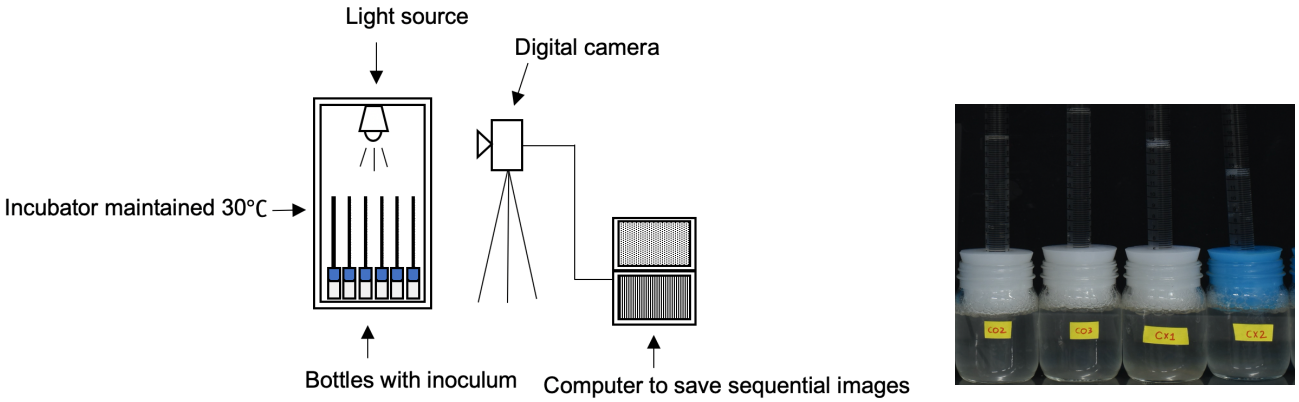


그림 2-1. 기체 발생량 측정 장치 개요.

그림 2 왼쪽에서 보이는 바와 같이 용량 110mL 용량의 시약병에 박테리아 배양액을 넣고, 고무 패킹으로 막은 다음 투명 뷰렛을 설치하여 배양액의 눈금을 확인할 수 있도록 하였다. 동일한 배양액을 담은 6개의 시약병을 준비하여, 온도가 30℃로 유지되는 배양기(incubator)에 넣고 배양 작업을 시작하였다. 이후, 배양기 창문을 통한 주기적인 모니터링을 통해, 기체방울 생성과 미네랄 침전을 확인하였다. 먼저 배양액에서 박테리아의 탈질 작용에 의해 기체가 생성되면, 부력에 의해 상승하여 고무패킹 바닥면에 모이게 되며, 생성된 기체로 인해서 투명 뷰렛에 있는 배양액의 눈금이 상승하게 된다. 이러한 뷰렛 메니스커스를 저속

촬영(time-lapse)하여 시간에 따른 기체 발생량을 실시간으로 측정하였다. 6개의 시약병중 3개의 시약병은 기체 발생량을 관찰하는데 사용되었고, 동일한 배양액으로 준비된 다른 3개의 시약병에서는 배양액 샘플을 추출하여, 질산염 농도 측정과 흡광도 측정을 실시하였다. 따라서 시간에 따른 기체 발생량과, 질산염 농도, 그리고 흡광도 결과를 얻을 수 있었다.

먼저, 박테리아의 활성도를 나타내는 흡광도는 배양을 시작한 직후부터 상승하기 시작하였으며, 가파른 상승을 시작한 후에 기체 발생이 관찰되었다. 성동구 중랑천에서 채취한 흙 시료로부터 배양된 박테리아 샘플에서는 30℃에서 배양을 시작한지 약 22시간이 지난 후부터 기체가 발생되었다 (그림 2-2). 그리고 paracoccus denitrificans 샘플에서는 약 13시간이 지난 후부터 기체 발생이 관찰되었다 (그림 2-3).

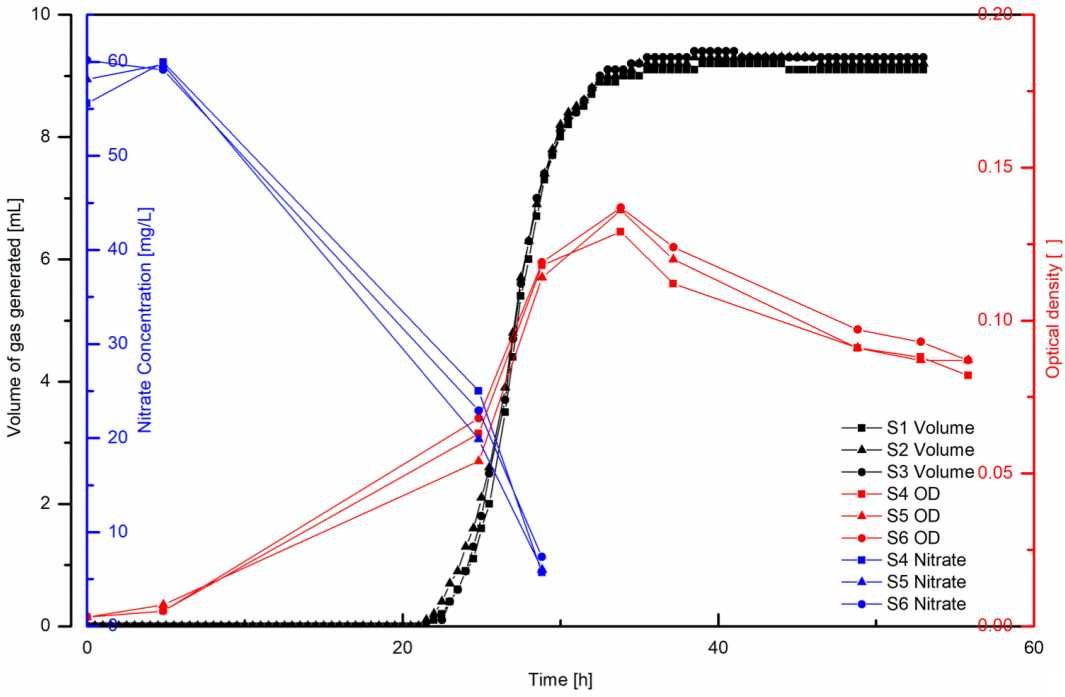


그림 2-2. 시간에 따른 기체 발생량, 질산염 농도 및 흡광도 - 성동구 중랑천 박테리아 샘플.

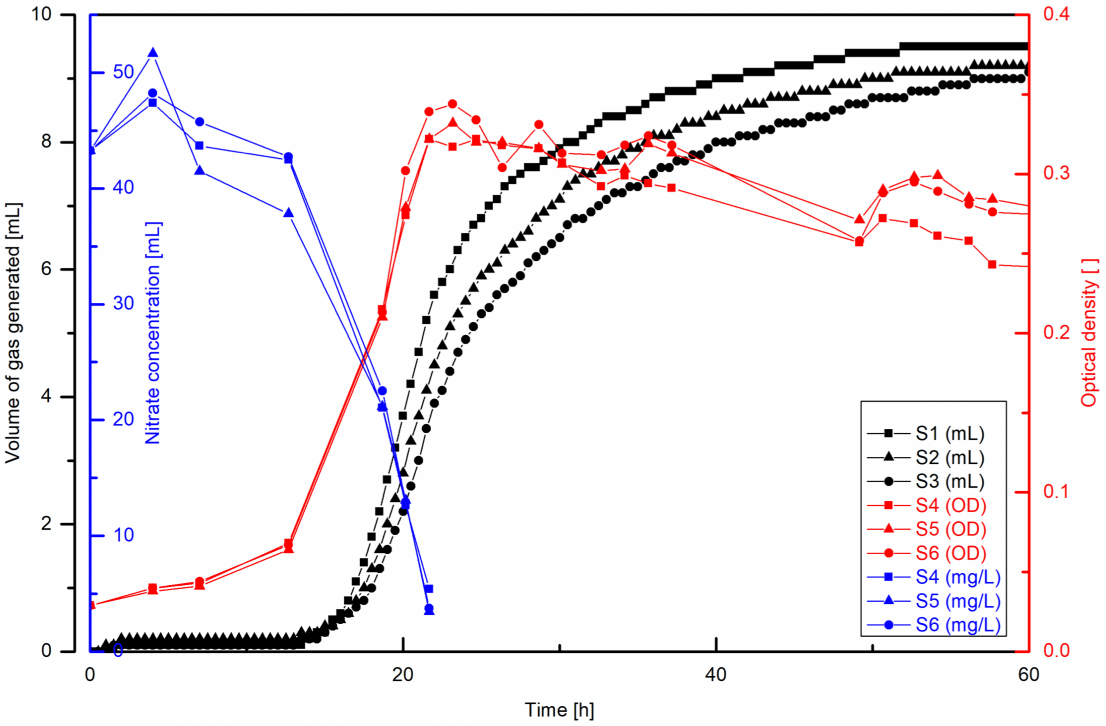


그림 2-3. 시간에 따른 기체 발생량, 질산염 농도 및 흡광도 - paracoccus denitrificans.

박테리아의 활동 정도가 높아짐에 따라 초기에 주입된 질산염의 농도는 떨어지기 시작하였으며, 질산염의 농도가 20 ~ 30mg/L로 낮아졌을 때 기체 발생이 관찰되었다. 약 20~30시간 후 질산염 농도 5mg/L보다 낮아졌을때는, 사용된 기계의 분해능의 한계로 인해서 더 낮은 질산염의 농도는 측정이 불가능하였다. 기체 발생은 배양 시작후 약 40시간이 지난 후부터는 점차 수렴하였으며, 최종 기체 발생량은 두 박테리아 샘플모두 약 9mL 정도로 확인되었다 (그림 2-2, 그림 2-3). 따라서, 흙 시료 내에 박테리아 배양액을 주입시 약 8.1%의 포화도 감소 효과를 유도 할 것으로 예상된다.

2.3 발생기체 형태분석 - 미세유체칩 실험을 통한 2차원 분석

성동구 중랑천 박테리아 용액을 투명한 미세유체칩(microfluidic chip)에 주입하여 발생되는 기체의 분포 형태를 파악하였다. 사용된 미세유체칩의 크기는 가로 세로 약 14mm x 8 mm 정도이며, pore throat의 크기는 140 micron, 공극 깊이는 50 micron으로 제작되었다 (그림 2-4). 재질은 polydimethylsiloxane (PDMS)로 제작되었고, 바닥면은 현미경용 슬라이드 글라스를 PDMS바닥에 부착되었다. 제일 왼쪽과 오른쪽에 보이는 삼각형 모양의 좌, 우측 구멍을 통해 사용되는 유체가 주입되며, 지반의 공극 부분을 모사하는 가운데 부분을 통해서 유체가 흐르게 된다. 미세유체칩의 가운데 부분에 있는 부분은 351개의 원형 기둥으로 이루어져 있으며, 그 원형 기둥의 지름은 500 micron이다. 주입되는 유체는 이 원형 기둥 사이의 공극을 통해 흘러가게 된다.

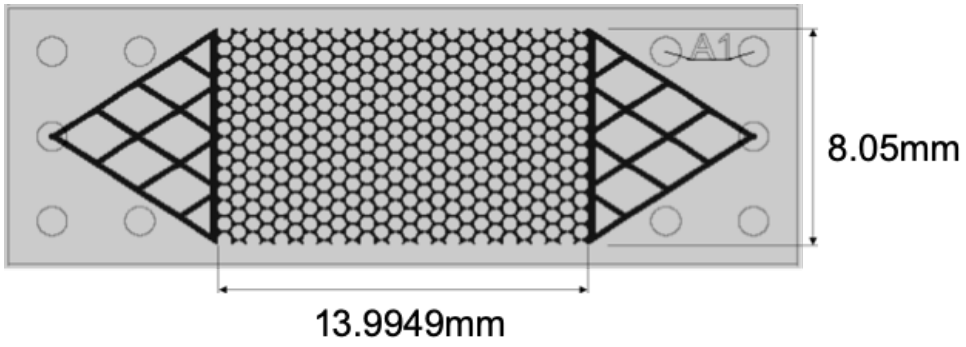


그림 2-4. 미세유체칩 도면.

본 연구에서는 박테리아 배양액(중랑천 샘플)을 미세유체칩 내에 주입한 후에, 저속촬영으로 기체 발생을 관찰하였다. 사용된 실험장치 개요는 아래 그림 2-5에서와 같이 미세유체칩 외에도 온도 조절을 위한 배양기, 저속촬영을 위한 카메라, 촬영을 위한 조명, 그리고 컴퓨터로 이루어져 있다.

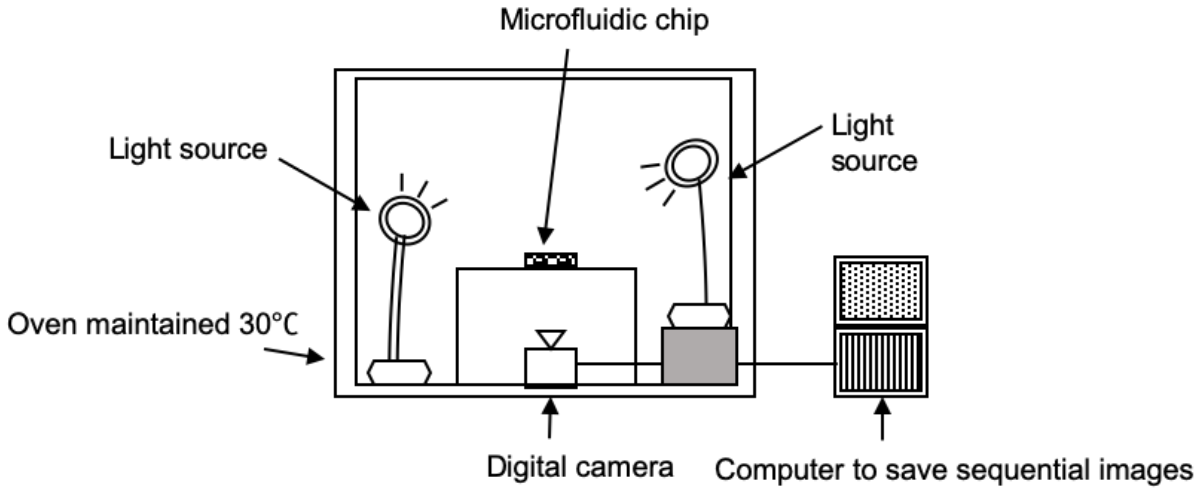


그림 2-5. 미세유체칩 실험을 위한 실험 장치도.
- 기체 발생은 미세유체칩의 바닥면, 즉 slide glass쪽을 통해 관찰 -

이전 시약병 실험에서는 약 22시간이 지난 후부터 기체 발생이 관찰되었으나, 미세유체칩 실험에서는 약

2.5시간 이후부터 기체 발생이 관찰되었다 (그림 2-6). 또한 약 14시간의 배양시간동안 포화도 감소는 약 43% 정도가 일어난 것으로 촬영된 사진을 이용한 이미지 분석을 통해 확인되었다. 기체 발생시간과 최종 발생량의 차이는 배양기내에 설치된 조명으로 인해 시약병 실험에서 사용된 온도보다 더 높은 온도에서 실험이 이루어졌던 것으로 추정된다. 따라서 추후 후속 연구에서는 온도에 따른 박테리아의 활성화 정도 연구도 고려해야할 것으로 판단된다.

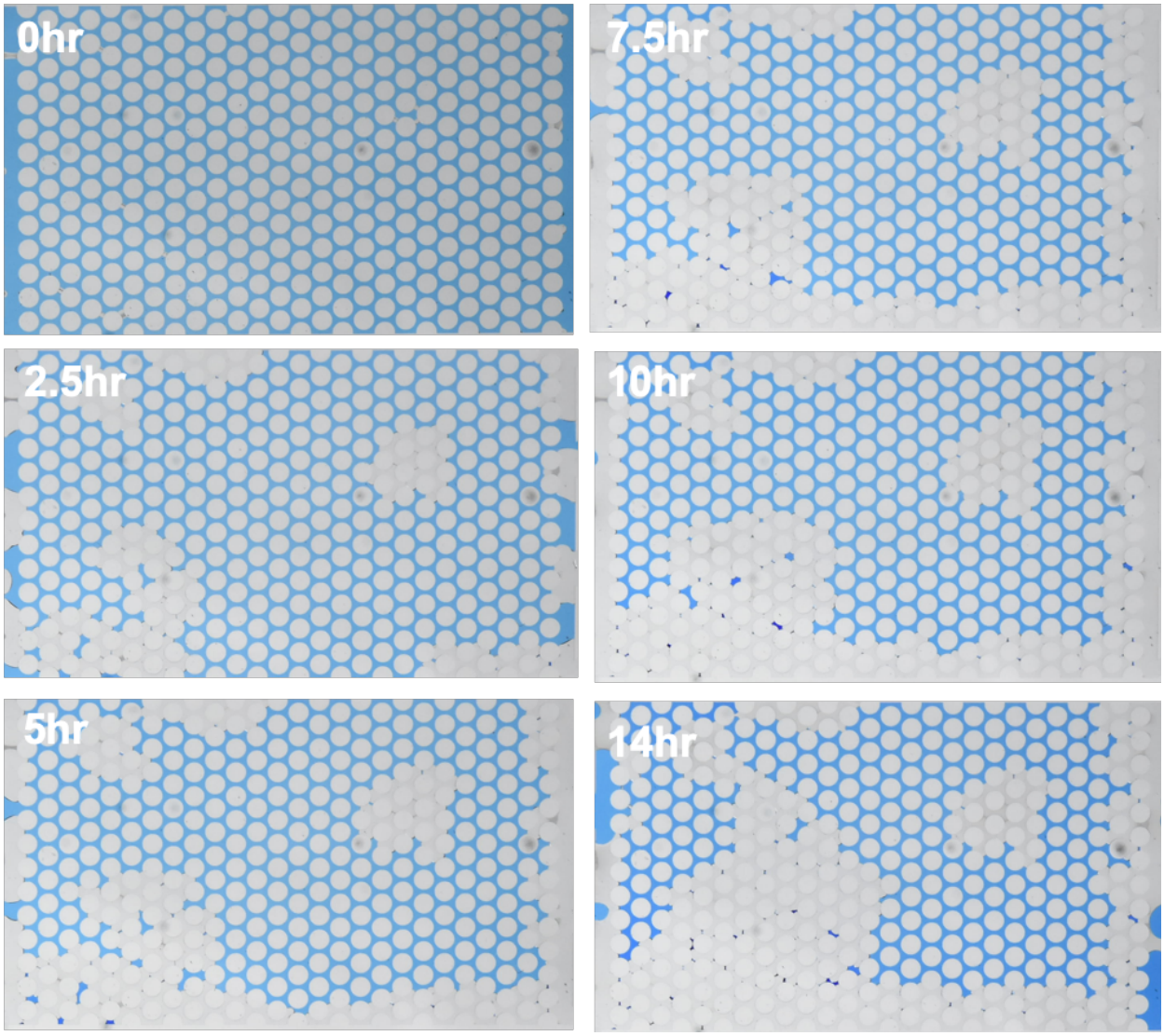


그림 2-6. 시간에 따른 발생 기체의 분포 형태.

2.4 발생기체 분석 - X-ray micro CT 촬영을 통한 3차원 분석

실제 지반에서 탈질작용을 유도할 때 발생되는 기체의 분포 형태를 파악하기 위하여 X-ray 촬영을 실시하였다. 사용된 흙 시료는 주문진사이며, 발생되는 기체의 형태를 분석하기 위하여, 작은 크기(내경 11㎜)의 유리병이 사용되었다. 사용된 박테리아는 paracoccus denitrificans이며, 앞에서 설명된 방법으로 배양된 후에, 주문진사와 함께 유리병에 주입되었다. 삽입된 시료의 높이는 20㎜이며, 유리병 내부 위쪽의 부분은 배양액으로 채워졌다 (그림 2-7). 이후 뚜껑을 닫은 후에는, 뚜껑에 달린 셉타(septa)를 통해 주사기를 찔러 넣고, 주사기 실린더 내부의 아래쪽은 배양액으로 채워서, 발생되는 기체의 양을 주사기 내부 배양액의 높이 관찰을 통해서 파악할 수 있게 하였다.

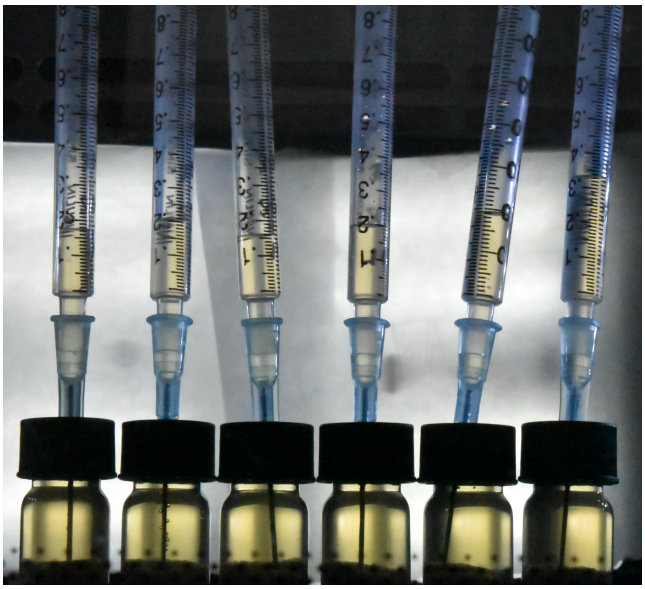


그림 2-7. X-ray 촬영용 샘플 사진.

X-ray 촬영 전에 제조된 샘플을 이용하여 기체 발생량을 파악하였다 (그림 2-8). 앞의 시약병 실험에서와 마찬가지로 온도 30도 조건에서는 약 12시간 이후부터 기체 발생이 관찰되었으며, 최종 발생 기체량은 평균 약 0.35mL로 측정되었다.

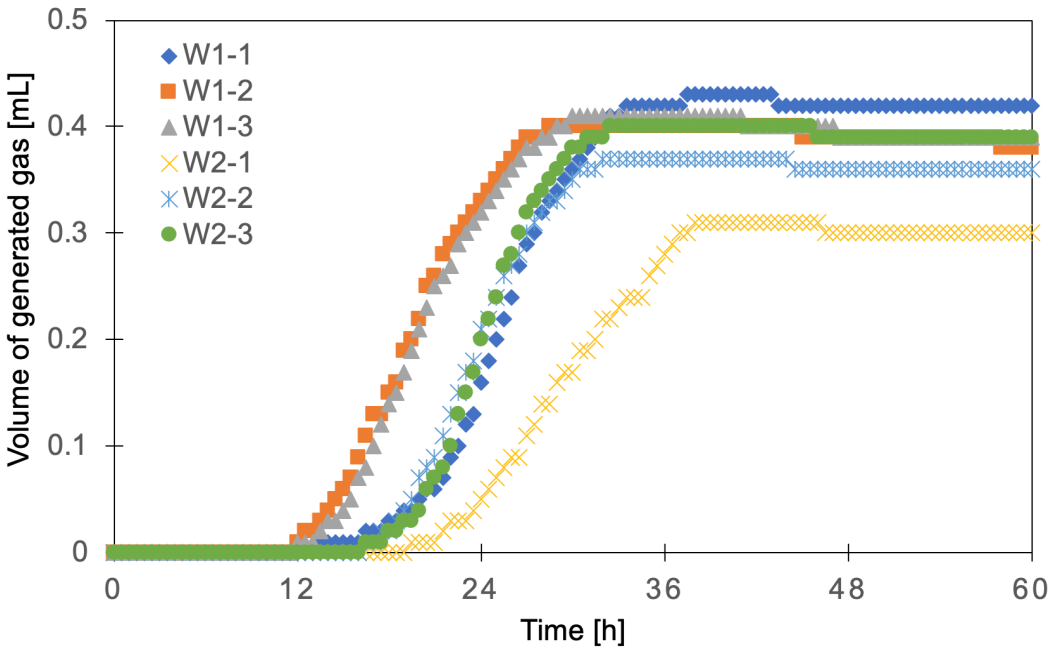


그림 2-8. 탈질작용으로 인한 기체발생량 - paracoccus denitrificans.

이후에는, X-ray 촬영용 시료를 제조하였다. 이전 박테리아 샘플 실험과 다른 점은, 박테리아 배양을 위한 실험실과 X-ray장비가 있는 실험실의 거리로 인해서, 박테리아 배양액과 흙 시료 주입 직후부터 X-ray가 있는 실험실까지 이동시간(약 1시간 30분)동안 30℃의 온도 조건 유지는 불가능하였다. X-ray 장비가 있는 실험실 도착 후에는 제조된 샘플을 배양기 내에 넣어서, 온도 조건이 유지되었다. 아래 그림 2-9에서 보는 바와 같이, 3회에 걸쳐서 X-ray 촬영이 실시하여, 3차원 형태로 기체의 분포 형태를 파악하였다. 먼저 좌측 그림은 시료를 제조하여 X-ray촬영 장소까지 이동 직후에 촬영된 사진으로서, 그림에서 보이는 바와 같이 초기에 많은 양의 공기방울이 함유되어 있다. 삼축압축셀을 이용한 방법이 아닌, 일반적인 주입 방법으로 100%의 포화도를 얻기는 매우 어렵다. 이후 중간 사진에서는 약 12시간이 경과 후 기체 방울의 분포 상태를 보여주고 있다. 대체적으로 위쪽의 작은 공기방울들은 부력에 의해서 흙 시료 외부로 사라져 버린 상태이며, 아래쪽의 공기방울들도 상대적으로 큰 공기방울들만 남아 있는 상태이다. 이후 약 72시간이 경과 후 촬영한 우측 사진은, 큰 기체 방울들이 발달되어 있는 상태를 보여준다.

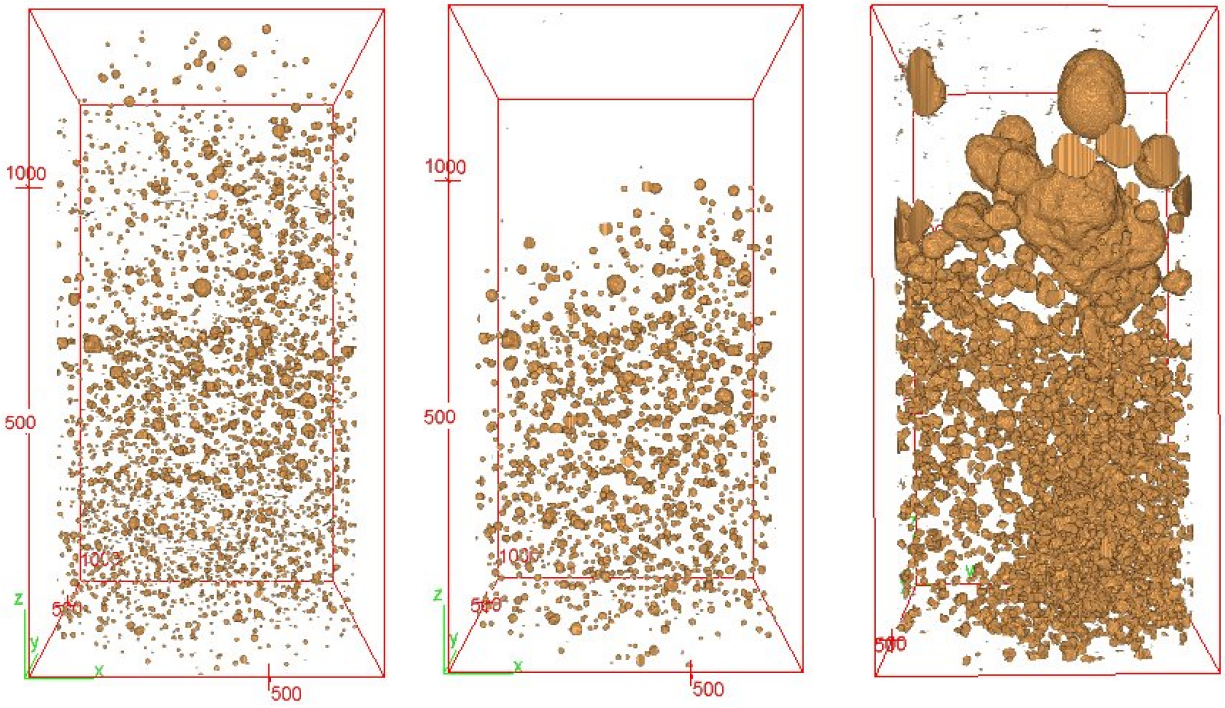


그림 2-9. 발생된 기체 분포 형태 - X-ray 촬영을 통한 3차원 분포 형태 파악.
(좌) 시료 주입후 2시간 경과후, (중) 시료 주입 후 12시간 경과, (우) 약 72시간 경과

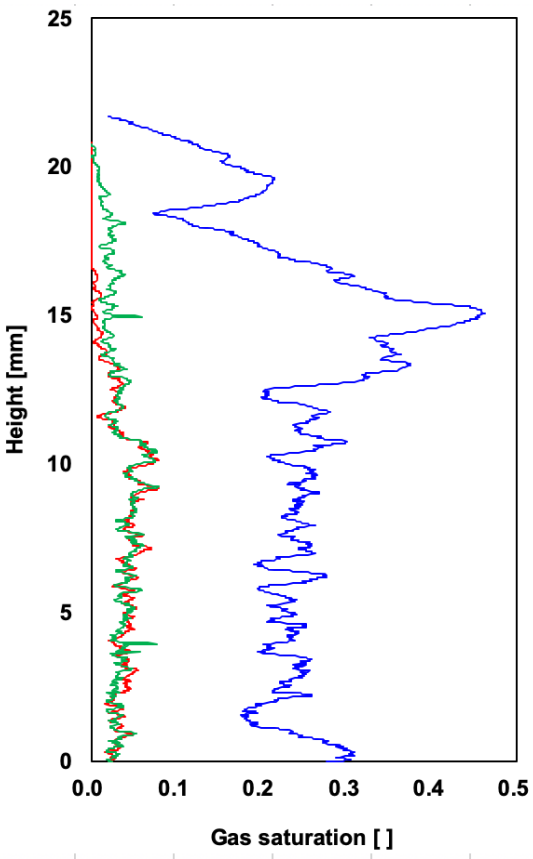


그림 2-10. 시료의 내부 높이별 기체의 포화도 (gas saturation) 분포. (녹색) 시료 제조 후 2시간 경과후, (빨간색) 시료 주입 후 12시간 경과 후, (파란색) 시료 제조 후 72시간 경과 후.

그림 2-9에서는 시료 내에 함유된 기체만 보여주는 사진이며, 모래 입자는 표시되어 있지 않다. 모래입자

의 부피를 고려한, 시료 내부의 각 높이 별로 기체의 포화도(gas saturation)를 분석하였다 (그림 2-10). 그림 2-10에서 보이는 바와 같이 파란색 선에서는 발생된 기체방울들로 인해서 기체의 포화도(gas saturation) 증가가 약 30%임을 확인할 수 있다.

또한, 특이한 점으로 기체 발생으로 인해서, 발생된 기체가 부력으로 인해서 주변 모래의 분포 형태를 아래 그림 2-11와 같이 변형되게 하였다. 아래 우측 그림 상단에서 보이는 바와 같이 검은색으로 표현된 기체가 모래 입자 사이에 갇혀 있고, 아래에는 검은 회색으로 표현된 배양액이 자리하고 있다. 또한, 시료의 위쪽에 구속응력을 가하는 장치가 없기 때문에, 발생된 기체가 모래 입자를 위로 밀어 올려 전체적인 시료의 높이도 약간 증가하였다. 반면에, 시료의 아래쪽 부분은 시료 자체에서 가해지는 구속 응력으로 인해서 모래 입자 사이의 공극은 거의 변형되지 않았고, 발생된 기체는 원래 상태의 공극 모양을 유지하면서 모래 입자의 공극 내에 존재하고 있다. 만약 시료의 위쪽에 구속응력을 주는 장비가 있었다면, 발생되는 기체의 분포 형태는 시료의 아래쪽과 비슷해 질 것으로 예상된다.

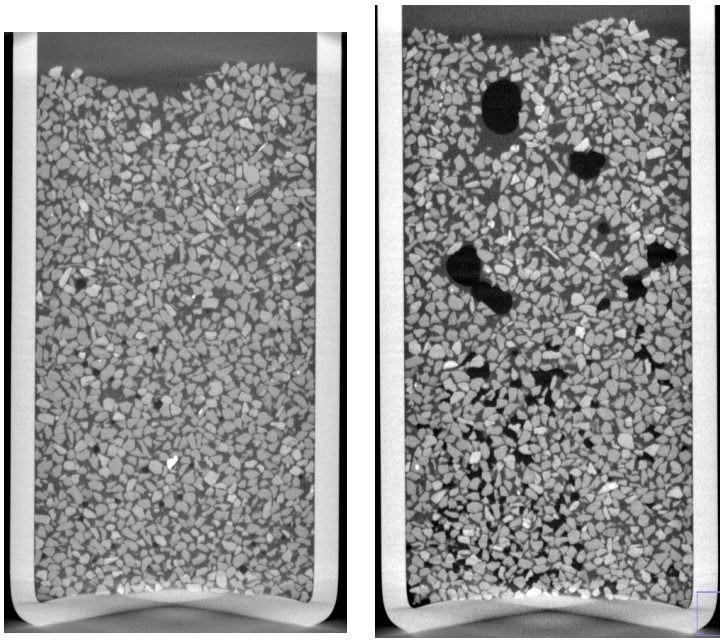


그림 2-11. 시료의 X-ray 촬영 사진. (좌) 기체 발생 전, (우) 기체 발생 후.

3. EICP 처리를 통한 전단강도 향상

지반 개량의 목적은 강도, 투수성, 건습 내구성, 환경 저항성의 향상에 있다 [Sherwood, 1993]. 지반 개량은 일반적으로 물리적 방식과 화학적 방식 두 가지로 크게 나뉜다. 지반 개량의 물리적 방식에서는 다짐 혹은 진동을 통해 지반의 밀도를 향상시키거나 토목 섬유로 외부 하중 및 물질 유입에 대응한다. 화학적 방식에서는 지반 내 화학 반응을 유도하여 흙 입자 사이의 결합력 향상을 발생시킨다 [Sherwood, 1993]. 건설 현장에서 지반 안정화를 위해 시멘트 혼화, 비산재 그라우팅, 화학 그라우팅 등의 화학적 개량 방식이 빈번히 활용된다 [Karol, 2003]. 특히 시멘트가 그라우팅 재료로써 가장 널리 사용되지만, 작업 시 상당한 이산화탄소 배출 및 지하수 오염을 유발하는 단점들이 존재한다 [Shi etal., 2011].

최근에 환경 친화적 건설 기법의 개발에 대한 관심이 증대하면서 탄산칼슘 혹은 바이오폴리머 같은 바이오 재료들을 지반 개량에 적용하려는 시도가 늘고 있다. 바이폴리머는 물과 접촉 시 팽창하여 강도가 저하되는 큰 단점이 존재하지만 [Changet al., 2015], 탄산칼슘을 활용하는 방식은 시멘트가 흙 입자들 간의 결속을 유도하는 메커니즘과 상당히 유사해 시멘트 그라우팅의 대체재로 유망하다. 탄산칼슘은 요소 가수분해, 광합성, 탈질소, 암모니아화, 황산 환원, 메탄 산화 등의 다양한 화학 반응으로 생성 가능하다 [Kalantary and Kahani, 2019; Zhu andDittrich, 2016]. 이 중에서, 요소 가수분해 방식이 탄산칼슘의 빠른 생성속도로 인해 대부분 연구자들이 지반 개량을 위한 탄산칼슘 생성 방식으로 채택하였다 [Van

Paassen et al., 2010]. 요소 가수분해에서는 아래 식에 따라 요소($CO(NH_2)_2$)가 분해될 때 생성되는 탄산염(CO_3^{2-})이 칼슘 이온(Ca^{2+})과 결합하여 탄산칼슘($CaCO_3$)를 생성시킨다.

$CaCl_2 + 2H_2O + CO(NH_2)_2 ==> CaCO_3 + 2NH_4Cl$

이렇게 지반 내 침전된 탄산칼슘은 흙 입자들을 결속하여 전단 강성도를 및 강도를 향상시킨다 [Cui et al., 2017; DeJong et al., 2006; Gaoet al., 2019]. 요소 가수분해 방식은 촉매제로 효소(예로, urease) 혹은 박테리아(예로, Sporosarcina pasteurii)를 사용하는가에 따라 EICP(Enzyme Induced Carbonate Precipitation)와 MICP(MicrobialInduced Carbonate Precipitation)로 나뉜다. MICP 방법은 박테리아의 배양을 위해 소요되는 시간이 필요한 반면, 배양 과정이 생략되는 EICP 방법은 용액 처리를 통해 탄산칼슘을 신속히 생성시키는 장점이 있다 [Hamdan and Kavazanjian Jr, 2016]. 이러한 EICP 방법의 장점에도 불구하고, 탄산칼슘 침전에 의한 지반 개량 연구는 현재까지 MICP 방법의 개발에 상당히 집중되어 있다. 본 연구에서는 EICP 처리된 시료의 전단강성도 및 강도의 증진효과를 조사하였다. 먼저, EICP 반응에서탄산칼슘 생성량을 최대로 하도록 EICP 용액의 주 재료인 요소, 우레아제, 염화칼슘간의 최적혼합비를 산정하였다. 다음으로, 조밀한모래 시료에 EICP 처리를 한 후 전단파 속도측정과 삼축압축 실험을 수행하였다. 전단파 속도 측정은 EICP 반응 동안 주기적으로 수행되어 처리된 시료의 전단강성도가 발달하는 과정을 조사하였다. 삼축압축 실험은 EICP 처리된 시료와 처리되지 않은 시료에 대하여 압밀배수 조건에서 수행되어 전단파괴 양상 및 강도계수들을 비교하였다. 최종적으로, X-ray CT 및 SEM 조사를 통해 EICP 처리된 시료 내 탄산칼슘의 시각적 조사를 하였다.

3.1 EICP 용액의 최적 혼합비 산정

EICP 반응에서 탄산칼슘 생성량을 최대로 하는 EICP 용액의 최적 혼합비를 산정하기 위하여 실내 실험을 수행하였다. 이를 위해 EICP 용액의 주 재료인 요소, 염화칼슘, 우레아제의 농도를 달리했을 때 생성되는 탄산칼슘의 양을 측정하였다.

EICP 용액의 재료로 요소(urea, U5378, Sigma Aldrich), 염화칼슘($CaCl_2$,C3881, Sigma aldrich), 우레아제(urease, U1500,Sigma aldrich), 수산화나트륨(NaOH, Duksan)을 선택하였다. EICP 용액 제작 시 먼저 우레아제 용액과 염화칼슘-요소 용액을 특정 농도로 따로 준비하였다. 이때, EICP 반응은 pH 7.5-9.5의 범위에서 탄산칼슘의 침전이 잘 일어나므로 [Knorr, 2014], EICP용액의 pH가 8-9가 되도록 염화칼슘-요소 용액에 $1.5 \cdot 10^{-4}$M의 수산화나트륨을 첨가하였다. 두 용액은 각각 균질한 섞임을 위해 교반기(MTOPS, HSD180)에서 1분간 300rpm으로 저어진 후 15ml의 코니컬 튜브에 7.5ml씩 주입하였다. EICP 용액이 담긴 코니컬 튜브를 뚜껑이 닫힌 체 3회를 흔든 다음 상온(20±1.5℃)에서 7일간 EICP 반응시켰다. 반응이 종결된 EICP 용액의 상층액을 제거하였으며 나머지 침전된 탄산칼슘은 오븐에서 80℃의 온도로 24시간 건조시켰다. 건조된 탄산칼슘의 질량은 ASTM D4373의 기준에 의해 측정하였다.

EICP 용액 제작 조건은 요소/염화칼슘 몰농도비와 우레아제 농도에 따라 두 가지 경우로 나뉜다. 첫번째는 0.5M 혹은 1M의 염화칼슘 농도에 요소/염화칼슘 몰농도비를 1.00,1.25, 1.50, 1.75, 2.00 의 다섯 가지로 다르게 하여 EICP 용액을 제작하였다. 이때, 우레아제의 농도는 0.5g/L로 고정하였다. 두번째는 0.5M 혹은 1M의 염화칼슘 농도에 우레아제의 농도를 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 g/L로 다르게 하여 EICP 용액을 제작하였다. 요소/염화칼슘 몰농도비는 1.50로 통일하였다.

그림 3-1은 7일의 EICP 반응 시간 동안 코니컬 튜브 내 탄산칼슘의 형성 과정을 시각적으로 보여준다. 흰색의 탄산칼슘은 초기 용액 내 부유하며, 시간이 지날수록 중력에 의해 가라앉는다. 4H 이후부터 탄산칼슘은 완전히 가라앉았으며 추가적인 생성은 없는 것으로 보인다.

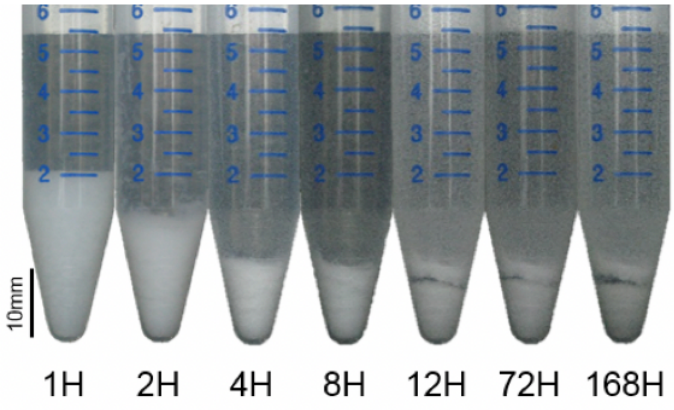


그림 3-1. 시간에 따른 탄산칼슘 침전.

요소/염화칼슘 몰농도비와 우레아제 농도에 따른 탄산칼슘 생성효율은 아래 그림 3-2에서 확인된다. 탄산칼슘의 생성효율은 실제 탄산칼슘 생성량($CaCO_3$)을 이론상 최대 탄산칼슘 생성량(Max $CaCO_3$)으로 정규화한 값으로 정의하였다. 최대 탄산칼슘 생성량은 EICP 용액을 구성하는 재료들의 혼합비에서 이론적으로 생성될 수 있는 탄산칼슘 양을 나타낸다. 먼저, EICP 용액의 요소/염화칼슘 몰농도비가 1.5까지 증가할 때 탄산칼슘 생성효율은 점점 향상되어 최대에 도달한다. 하지만 요소/염화칼슘 몰농도비가 1.5 이상이 될 때 0.5M 염화칼슘 농도의 경우 탄산칼슘 생성효율이 최대값을 유지하는 반면, 1M 염화칼슘 농도의 경우에서는 오히려 생성효율이 미소하게 감소하며 이는 염석 효과(salting out effect)에 의한 것으로 판단된다. 염석 효과는 용액 내 이온의 농도가 일정 수준 이상이 되면 단백질(우레아제)의 용해도가 감소하여 침전되는 현상이다. 즉, 높은 1M 염화칼슘 농도로 인해 EICP 용액 내 우레아제 침전이 발생하여 탄산칼슘 생성량이 감소한 것이다. 다음으로, 탄산칼슘 생성효율은 우레아제 농도가 증가함에 따라 지속적으로 향상되었다. 0.5M과 1M의 염화칼슘 농도를 사용한 두 경우에서 각각 우레아제 농도가 0.5와 0.9g/L 일 때 생성효율이 최대에 도달하였다. 정리하면, 탄산칼슘 생성량을 최대로 하는 EICP 용액의 최적 혼합비는 요소/염화칼슘 몰농도비와 우레아제 농도가 0.5M 염화칼슘 농도의 경우 1.5와 0.5g/L, 1M 염화칼슘 농도의 경우 1.5와 0.9g/L로 도출되었다.

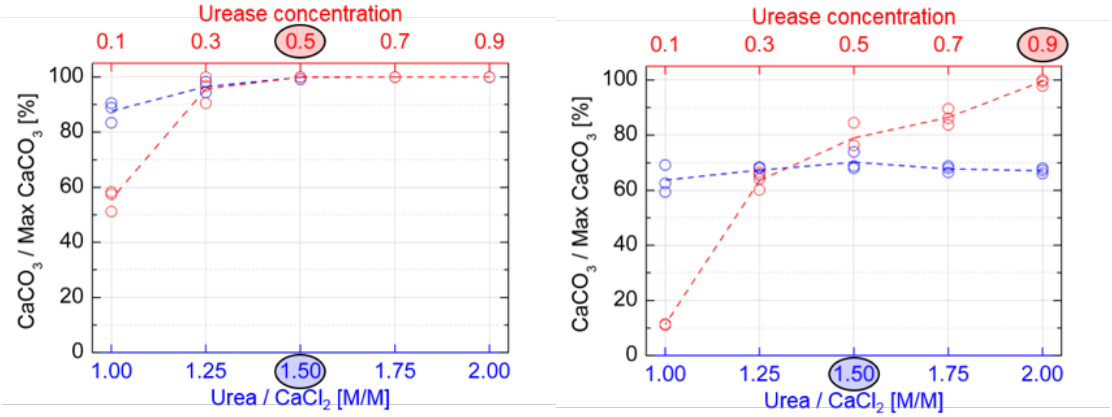


그림 3-2, 배양액 농도비에 따른 탄산칼슘 침전 효율. (좌) 0.5M $CaCl_2$ 용액. (우) 1.0M $CaCl_2$ 용액.

3.2 EICP 처리된 사질토의 전단 강성도 및 강도

EICP 처리된 모래 시료의 강성도와 강도를 평가하기 위하여 전단파 속도측정과 삼축압축 실험을 수행하였다. 모래 시료는 주문진 표준사(D_{50} = 0.542mm, e_{min} = 0.6, e_{max}= 0.897)를 선택하였으며 상대밀도가 70% 되도록 조성하였다. EICP 처리를 위한 용액의 제작 조건은 0.5M과 1M 염화칼슘 농도의 두 경우로 나뉘었으며, 앞서 구한 최적혼합비를 사용하였다. 전단파 속도 측정에서는 EICP 반응 동안 처리된 모래 시료의 전단 강성도가 발달하는 것을 관찰하였다. 또한, 삼축압축 실험을 통하여 EICP 처리된 그리고 처리되지 않은 시료들의 전단 강도 변수들을 비교하였다.

전단파 속도 측정을 위해 아래 그림과 같이 직경과 높이가 70mm와 80mm인 원통형 셀을 준비하였다 (그림

3-3). 빈 셀에 EICP 용액을 붓고 주문진 표준사를 가득 채운 다음, 탬핑(tamping) 방식으로 목표하는 상대밀도를 조성하였다. 셀의 상부와 하부의 캡에는 측정을 위한 벤더 엘리먼트(benderelement)를 장착하였다. 신호발생기(signal generator,33220A, Agilent)가 생성한 50Hz의 사각파(square wave)는 상단의 벤더 엘리먼트를 통해 시료에 기계적 진동을 유발시켰다. 하단의 벤더 엘리먼트는 시료를 전파한 기계적 진동을 수신하여 전기 신호로 변환하였다. 변환된 신호는 필터 증폭기(filter-Amplifier,3944, Krohn-hite, HP = 50 Hz, LP = 500 kHz)에서 불필요한 신호가 제거됨과 동시에 여과된 신호는 증폭되어 오실로스코프(oscilloscope, DSO5014A,Agilent)로 전달되었다. 최종적으로 전단파 속도는 시료 높이를 'first after bump'를 기준으로 결정한 전단파 이동시간으로 나누어 계산하였다 [Lee and Santamarina, 2005]. 전단파 속도 측정은 시료 상부에 12kPa의 수직 응력이 가해진 상태에서 EICP 반응 시작부터 30시간동안 주기적으로 수행되었다.

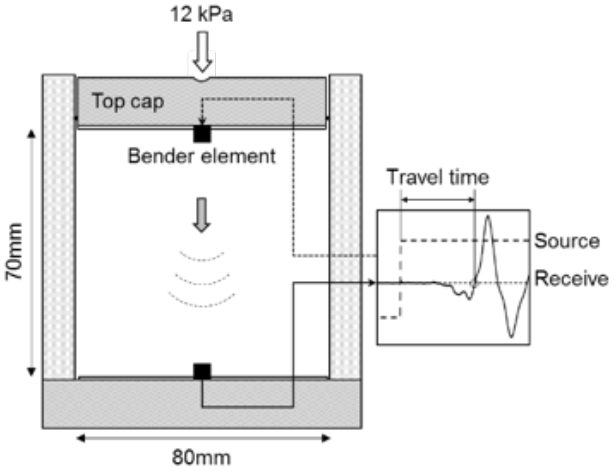


그림 3-3. 전단파 속도측정 장비

강도 측정을 위한 삼축압축 실험은 압밀배수 조건에서 삼축압축 시험기(LoadTrac II, FlowTrac II,Geocomp)를 사용하여 수행되었다. 먼저, 셀 내부에 EICP 용액을 붓고 주문진 표준사를 채운 다음, 탬핑 방식을 통하여 상대밀도, 직경, 높이가 70%, 72mm, 145mm인 시료를 조성하였다. EICP 반응은 셀압 조절기(cell pressure controller)에 의해 시료 외부에 구속압이 가해진 상태에서 30시간 동안 진행되었다. EICP 반응 종료 후 기존 구속압을 유지하면서 샘플압력 조절기(sample pressure controller)로 공극 부피 2배에 해당하는 탈이온수(deionized water)를 시료 내부에서 순환시켜 침전된 탄산칼슘을 제외한 EICP 용액을 제거하였다. 이어서, Skempton B-value 값이 0.95가 되도록 시료 내부를 탈이온수로 포화하였다. 축차응력은 0.1 %/min의 변형율 속도로 변형율이 20%가 될 때까지 시료에 가하여 전단 파괴를 유도하였다. 실험은 50kPa, 100kPa, 150kPa의 구속압에서 각각 수행하여 최종적으로 마찰각과 점착력을 구하였다.

EICP 반응이 진행됨에 따라 시료 하단의 벤더 엘리먼트에 전단파가 도달하는 시간이 점점 단축된다. 이는 측정 동안 전단파 이동거리는 변하지 않기 때문에 EICP 반응에 의해 전단파 속도가 증가한다는 것을 말한다. 전단 강성도는 아래 식에 의하면 전단파 속도의 함수이다.

$$G = \rho \cdot V_s^2 \qquad \text{(식 3-1)}$$

위 식 3-1에서 G = 전단강성도, ρ = 부피밀도, V_s = 전단파속도를 나타낸다. 즉, 실험에서 전단파 속도의 증가는 EICP 반응에 의한 시료내 탄산칼슘의 침전이 전단강성도를 향상시켰다는 것을 의미한다.

아래 그림 3-4은 0.5M과1M 염화칼슘농도로 EICP 처리를 한 경우에 EICP 반응 동안 측정한 전단파 속도를 보여준다. 두 경우에서 전단파 속도는 반응시간이 지남에 따라 거의선형으로 증가하며 최대 전단파 속도에 도달한 이후에는 일정한 속도를 유지한다. 0.5M과1M 염화칼슘농도의 경우 전단파 속도는 각각 EICP 반응이 4시간과 6시간 경과했을 때 최대 전단파속도인 686m/s와880m/s에 도달한다. 더 나아가, 측정한 최대 전단

파속도로부터 전단 강성도를 계산하였을 때, 0.5M과1M 염화칼슘농도의 경우 EICP 처리가 전단 강성도를 각각 19배와 31배 증가시켰다. 정리하면, 본 실험의 조건에서는 EICP 처리가 전단 강성도를 상당히 향상시켰으며, 최대전단 강성도 도달 시간에 따르면 EICP 반응시간은 6시간 이내에 종료되었다.

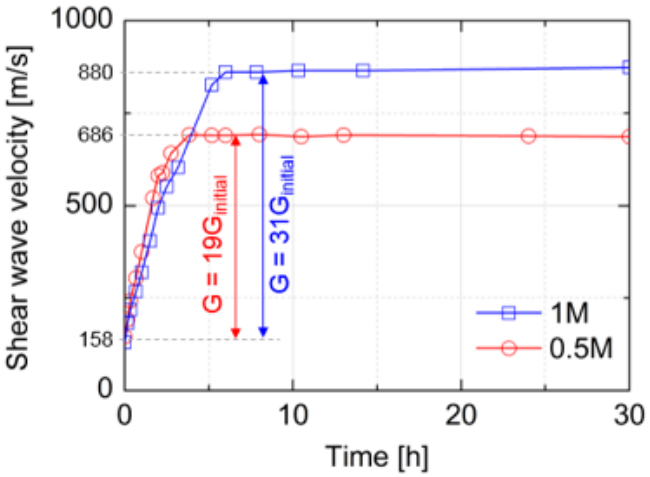


그림 3-4. 전단파 속도 변화

아래 그림 3-5은 처리되지 않은 시료와 0.5M과 1M 염화칼슘 농도의 EICP 용액으로 처리된 시료들에 대한 삼축압축 실험의 결과를 보여준다. 처리되지 않은 모래 시료에서는 수직 변형률(vertical strain)이 증가함에 따라 축차 응력(deviatoric stress)이 서서히 증가하다가 첨두 강도(peak shear strength)에 도달 한 후, 완만히 감소하여 잔류 강도(residual strength)에 수렴한다. 반면, EICP 처리된 시료에서는 초기에 축차 응력이 급격히 증가하여 작은 수직 변형률에 첨두 강도에 도달한다. 여기서 관찰되는 EICP 처리된 시료의 큰 강성도는 전단파 속도 측정에서의 결과와 상응한다. 또한, EICP 처리는 시료의 첨두 강도를 각 구속압 조건에서 크게 향상시켰다. 특히, 높은 1M 염화칼슘 농도의 경우 첨두 강도가 더 증가하였으며 첨두 이후의 축차 응력 감소가 급격하였다. 1M 염화칼슘 농도의 경우에서 첨두 전후에 관찰되는 축차 응력의 급격한 증가와 감소는 취성 재료에서의 파괴 양상과 상당히 유사하며 [Lockner et al., 1991; Wong, 1982], 입상토(granular soil)에서는 흔하지 않은 현상이다. 그러므로, 첨두 이후의 축차 응력의 급격한 감소는 시료 내 탄산칼슘과 모래 입자 결합의 분리로 인한 것으로 판단되며, 따라서 첨두 강도의 증가에는 탄산칼슘-모래 결합력이 크게 기여한 것으로 보인다. 반면, EICP 처리된 시료에서 축차 응력은 첨두 강도 이후에 처리되지 않은 시료의 잔류 강도로 수렴한다. 입상토의 잔류 강도는 입자 형상 및 크기 분포에 의해 주로 결정된다고 잘 알려져 있다 [Yang and Luo, 2018]. 이로부터 EICP 처리된 시료는 축차 응력이 잔류 강도에 도달했을 때 시료 내 탄산칼슘-모래 결합을 완전히 상실하여 처리되지 않은 시료와 동일한 상태가 되었음을 알 수 있다. 완전포화 상태에서 공극수의 변화량으로 측정된 체적 변형률 결과를 보면 모래 시료가 조밀하게 조성되었기 때문에 전단이 진행됨에 따라 체적 팽창(dilation)이 발생한다. 특히, EICP 처리된 시편들에서 그리고 염화칼슘 농도가 클 때 dilation이 더 발생하였다.

각 구속압 조건에서 파괴 시 응력 상태를 나타내는 Mohr's circles에 대하여 Mohr-Coulomb파괴포락선을 피팅하여 전단 계수인 마찰각(friction angle, ϕ)과 점착력(cohesion, c)을 계산하였다 (그림 3-6). 처리되지 않은 시료는 사질토로만 구성되었기 때문에 점착력이 0이지만, EICP 처리된 시료에서는 탄산칼슘-모래 결합으로 인해 0.5M과 1M 염화칼슘 농도의 경우 27.8kPa과 176.1kPa을 기록하였다. 높은 1M 염화칼슘 농도로 처리된 시료의 점착력이 더 큰 것은 탄산칼슘-모래 결합력이 더 크기 때문으로 판단된다. 반면, EICP 처리된 시료에서는 각 구속압 조건에서 처리되지 않은 시료에 비해 첨두 강도가 증가하였지만, 구속압의 증가에 따른 첨두 강도의 증가가 크지 않기 때문에 낮은 마찰각을 기록하였다. 또한, 1M 염화칼슘 농도로 처리 시 마찰각이 더 크게 감소하였다. 아래 그림은 여기서 구한 마찰각과 점착력을 탄산칼슘/모래시료 중량비에 대하여 보여준다. 탄산칼슘 생성량($CaCO_3$)은 100kPa 구속압 조건의 시료에서 측정한 것이다. 실험결과, 탄산칼슘 생성량이 증가함에 따라 마찰각은 감소하고, 점착력은 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

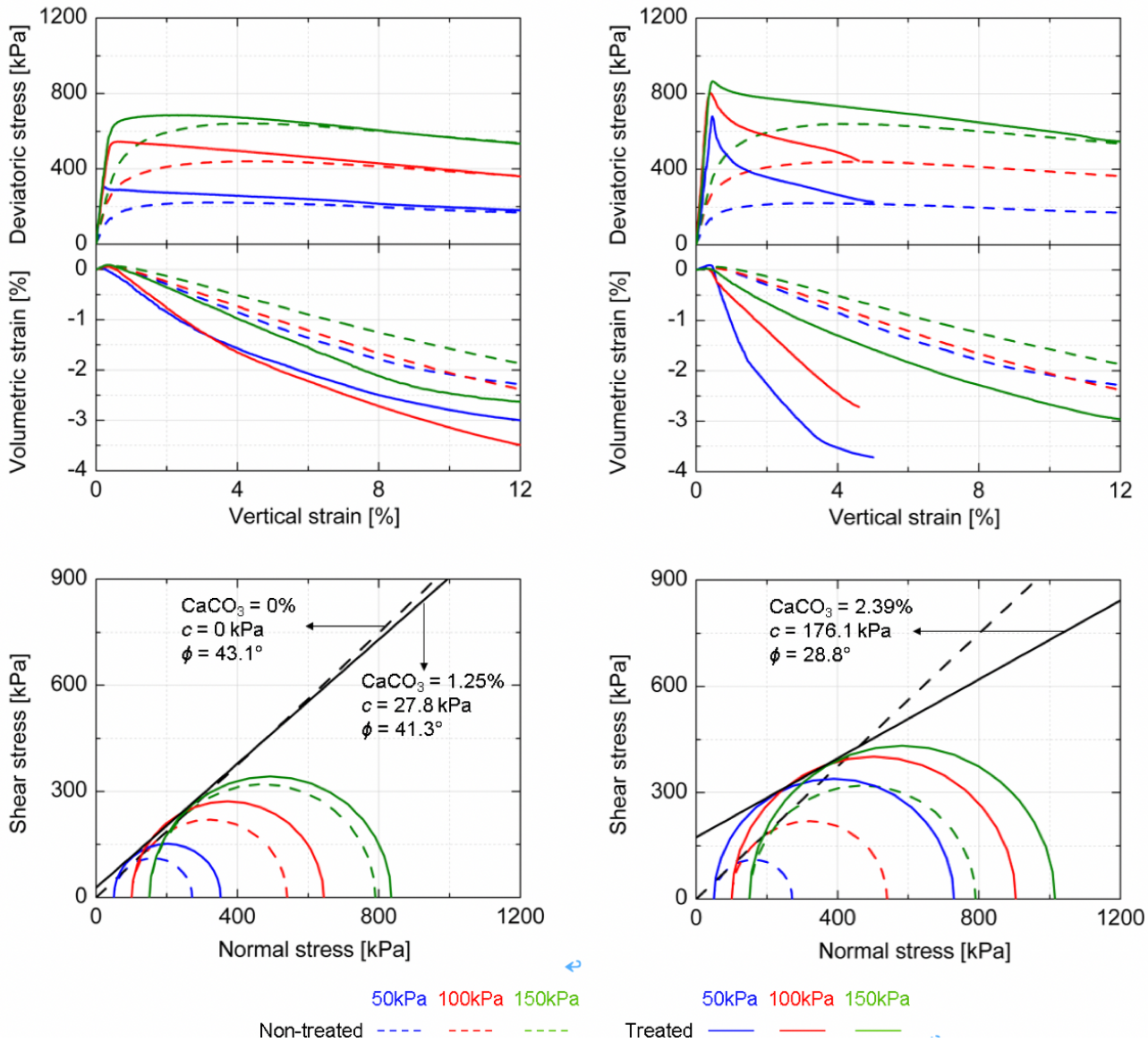


그림 3-5. 응력-변형률 및 부피 변형률. (좌) 0.5M $CaCl_2$ 용액. (우) 1.0M $CaCl_2$ 용액

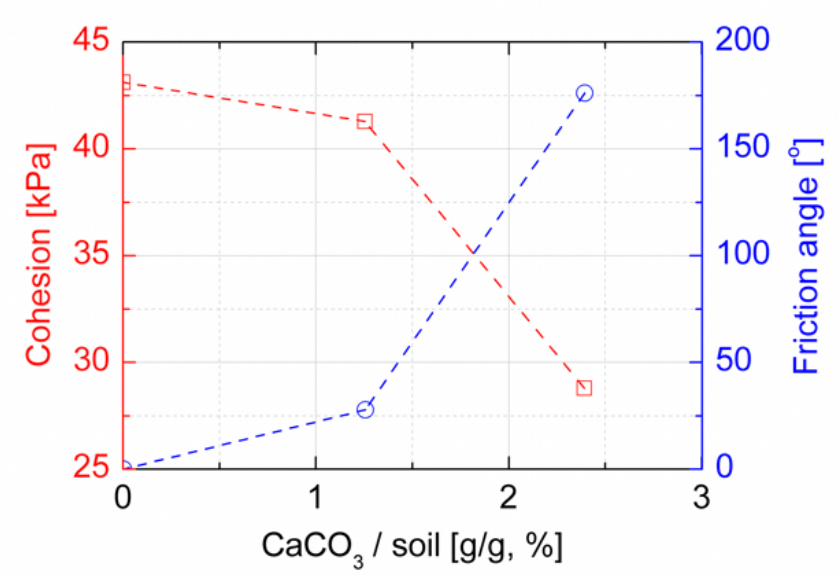


그림 3-6. 침전된 탄산칼슘 양에 따른 점착력과 마찰각의 변화

아래 그림 3-7는 탄산칼슘이 침전된 모래 시료에 대해 압밀배수 조건에서 삼축압축 실험을 수행한 기존 및 본 연구 결과들을 보여 준다 [Feng and Montoya, 2015; Lin et al., 2015]. 기존 연구들에서는 본 연구와 마찬가지로 구속압이 가해진 상태에서 시료 내 탄산칼슘이 침전되었다. 탄산칼슘 침전에 의한 지반 개량 시 탄산칼슘 생성량이 증가할수록 점착력은 증가하고 마찰각은 감소하는 것이 공통적으로 확인된다.

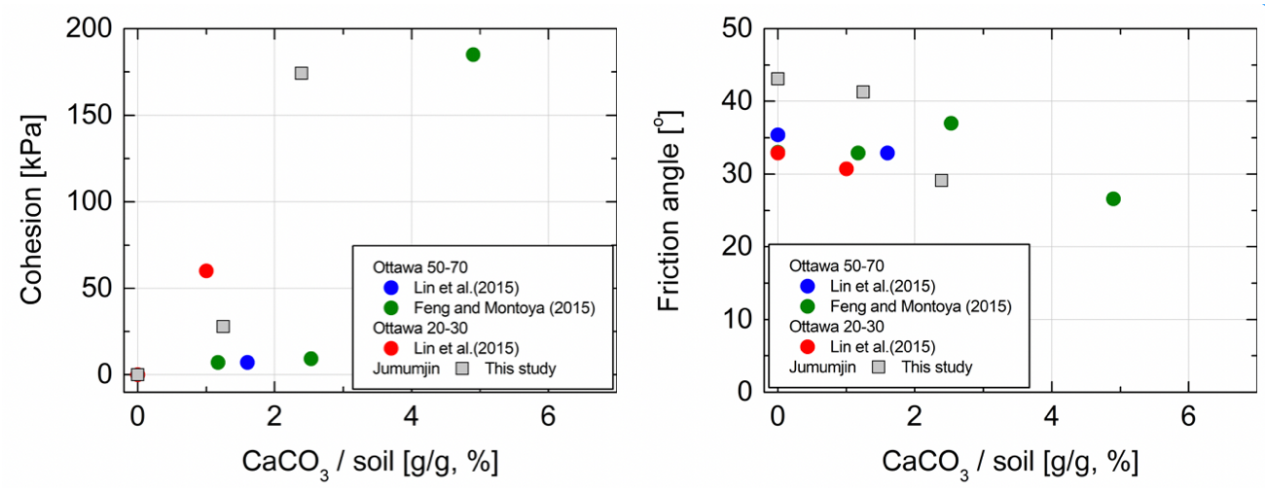


그림 3-7. 침전된 탄산칼슘 양에 따른 (좌) 점차가력 변화, (우) 마찰각 변화

3.3 침전된 $CaCO_3$의 X-ray 및 주사전자현미경 이미지

EICP 처리된 시료 내 침전된 탄산칼슘의 시각적 조사를 위해 X-ray CT 및 주사전자현미경(SEM)을 활용하였다. 아래 그림 3-8에서는 0.5M과 1M 염화칼슘 농도로 처리된 시료의 2D X-ray CT 이미지들을 보여준다. 산업용 X-ray 시스템(X-eye Micro CT, SEC)으로 획득한 이미지들은 5㎛/pixel의 해상도를 가진다. 이미지 내에 흰색, 밝은 회색, 어두운 회색을 띄는 객체들은 각각 탄산칼슘, 모래 입자, 공극을 나타낸다. 탄산칼슘은 모래 입자와 공극에 비해 이미지 내 차지하는 면적과 그 결정의 크기 또한 상당히 작다. 탄산칼슘 결정의 평균 직경은 0.5M과 1M 염화칼슘 농도의 경우 각각 약 25㎛과 65㎛이다. 1M 염화칼슘 농도로 처리했을 때의 탄산칼슘 생성량의 증가는 탄산칼슘 결정의 수보다 크기에 더 기여한 것으로 보인다. 반면, 탄산칼슘 결정의 대부분은 모래 입자 표면에 위치하고 있으며, 이중 일부는 모래 입자들 사이에서 지지대 역할을 하고 있다.

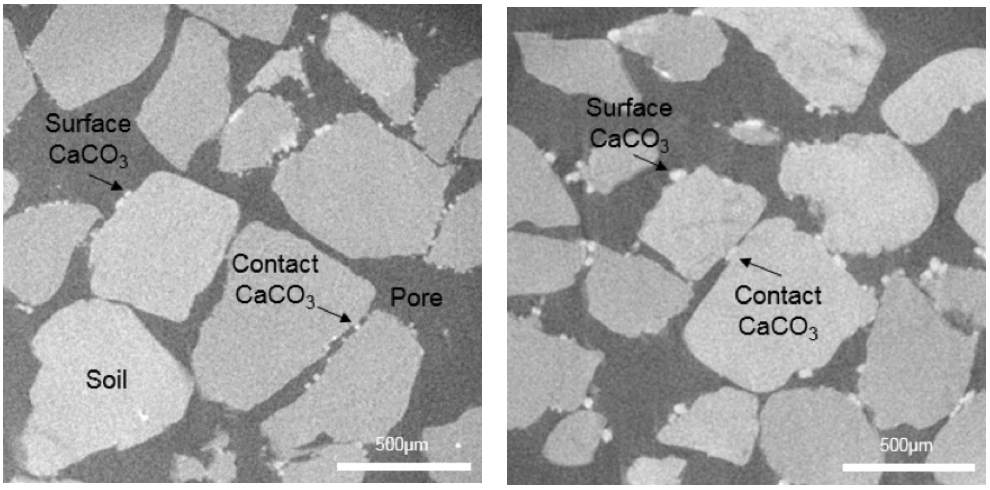


그림 3-8. X-ray 촬영 사진. (좌) 0.5M $CaCl_2$ 용액. (우) 1.0M $CaCl_2$ 용액.

아래 그림 3-9은 위 시료에 대한 SEM 이미지를 보여주며 이는 시료 표면을 더욱 입체적으로 관찰할 수 있게 하였다. 1M 염화칼슘 농도의 경우 0.5M 염화칼슘 농도의 경우에 비해 모래 입자 표면에 위치하는 탄산칼슘 결정의 크기가 전반적으로 크게 증가하여서, 표면의 상당 부분을 탄산칼슘이 덮고 있는 상태이다. 즉, 1M 염화칼슘 농도에서는 탄산칼슘-모래 결합 구조가 전단 강성도 및 강도에 크게 영향을 줄 것으로 예상할 수 있다.

앞선 수행된 삼축압축 실험의 결과로 1M 염화칼슘 농도의 경우 0.5M의 경우에 비해 큰 첨두 강도를 기록한 것은 탄산칼슘 결정의 크기 때문으로 판단된다. 모래 입자들 사이에서 지지대 역할을 하는 탄산칼슘 결정은 그 크기가 클수록 모래 입자와의 접촉 면적이 넓다. 즉, 동일한 외력이 시료에 가해질 때 큰 접촉 면적을 가진 탄산칼슘-모래 결합에 전달되는 유효 응력은 감소할 것이며, 결합을 분리시키기 위해서는 더 큰 외력이 필요할 것이다. 또한, 탄산칼슘 결정의 크기는 dilation에도 크게 영향을 미친 것으로 보인다. 1M 염화칼슘 농도의 경우 모래 입자 표면을 크게 덮은 탄산칼슘으로 인해 시료를 구성하는 입자들의 크기가 커졌다고 할 수 있다. 그러므로, 1M 염화칼슘 농도로 처리된 시료에서는 전단 시 입자들이 이동하기 위해 인근의 큰 입자를 누르고 넘어가야 하므로 상대적으로 dilation이 더 크게 발생한 것으로 판단된다.

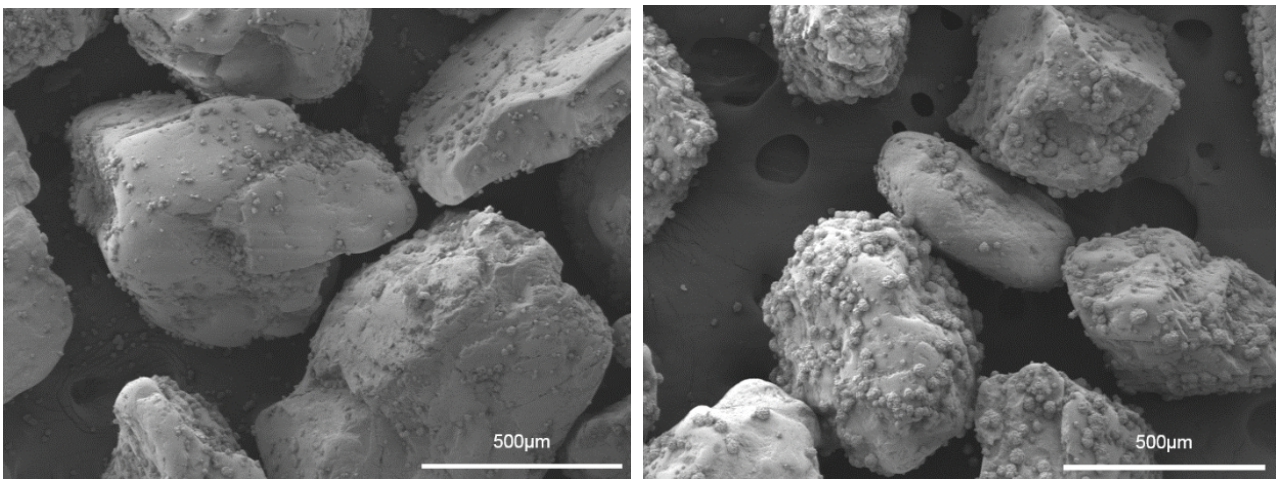


그림 3-9. 주사전자현미경 이미지. (좌) 0.5M $CaCl_2$ 용액. (우) 1.0M $CaCl_2$ 용액

본 세부연구에서는 ECIP 처리된 시료의 전단 강성도 및 강도를 평가하기 위해 실내 실험을 수행하였다. 먼저, 0.5M과 1M 염화칼슘 농도의 EICP 용액에 대해 탄산칼슘 생성량을 최대로 하는 최적 혼합비를 산정하였다. 다음으로, 산정한 최적 혼합비의 EICP 용액으로 처리한 모래 시료의 전단 강성도 및 전단 강도 변수들을 전단파 속도 측정과 삼축압축실험을 통해 획득하였다. 마지막으로, X-ray CT 및 SEM 촬영을 통해 시료 내 침전된 탄산칼슘의 분포상태를 분석 하였다. 본 세부 연구의 결론은 다음과 같다.

- 탄산칼슘 생성을 최대로 하는 EICP 용액의 최적 혼합비는 요소/염화칼슘 농도비와 우레아제 농도가 0.5M 염화칼슘 농도의 경우 1.5와 0.5g/L이고, 1M 염화칼슘 농도에서는 1.5와 0.9g/L로 도출되었다.

- EICP 처리된 시료에서 전단 강성도는 EICP 반응 시작 후 서서히 증가하다가 4~6시간 지났을 때 최대값에 도달한다. 0.5M과 1M 염화칼슘 농도의 EICP 용액으로 처리하는 경우 전단 강성도가 각각 19배와 31배까지 증가하였다.

- 삼축압축 실험에서 EICP 처리된 시료의 첨두 강도는 증가하였으며 이는 탄산칼슘-모래 결합으로 인한 것이다. 또한, 처리된 시료에서는 축차 응력이 큰 수직 변형률에서 처리되지 않은 시료의 잔류 강도로 수렴하며, 결국 탄산칼슘-모래 결합을 완전히 상실한 것으로 보인다. 더불어, 처리된 시료에서는 처리되지 않은 경우에 비해 dilation이 크게 발생하였다.

- EICP 처리 시 탄산칼슘 생성량이 증가할수록 마찰각이 감소하고 점착력은 증가하였다. 이는 기존 연구들을 참고하였을 때 탄산칼슘 침전에 의한 지반 개량에서 공통적으로 관찰되는 경향으로 확인되었다.

- X-ray CT 및 SEM 조사 결과, 시료 내 탄산칼슘은 모래 입자의 표면에 대부분 위치하였으며 일부는 모래 입자들 사이에서 지지대 역할을 하였다. 또한, 1M 염화칼슘 농도의 경우 0.5M의 경우에 비해 탄산칼슘 결정의 크기가 전반적으로 2-3배 컸다. 이 탄산칼슘 결정의 크기 차이가 EICP 처리된 시료의 전단 파괴에 주요하게 영향을 미치는 것으로 판단된다.

4. EICP 처리된 지반의 하중 저항 특성

탄산칼슘에 의해 개량된 지반은 시공 중에 구조물의 추가로 인한 하중 재하 및 흙 굴착과정에서 응력 완화 등 다양한 하중 재하 제거 시나리오를 경험하게 된다. 이러한 과정에서 고결된 결합 형태의 변화로 강성의 손실이 발생할 뿐만 아니라 구조적 변화가 유도된다. 또한 고결 효과는 초기 응력에 따라 고결 효과에 의존 (cementation-dependent)하거나, 또는 응력에 의존(stress-dependent)하게 된다. 따라서, 고결 효과에 대한 적절한 연구가 필요하다.

4.1 하중재하 실험 방법.

2장에서 기술된 전단파 속도 측정장치와 결합된 압밀장비를 이용하여 실험을 수행하였다 (그림 4-1). 고결 시 초기 응력을 가한 상태에서 30시간 동안 반응을 진행하였다. 다양한 하중 시나리오와 시료의 조건에 따른 강성도의 변화를 보기 위하여 그림 4-2에서와 같이 실험 조건을 계획하였다: 1) 상대 밀도 30% 및 70%에서 0.5M 용액 및 1.0M 용액을 처리한 경우, 2) 4개의 초기 응력(12kPa, 90kPa, 180kPa, 532kPa)에서 하중 재하시 변화, 3) 4개의 초기 응력(90kPa, 180kPa, 532kP, 1062kPa)에서 하중 제거시 변화, 4) 반복하중을 가할 때 변화. 1) 번 실험을 제외하고, 모든 시료는 0.5M의 용액 및 상대 밀도 70%의 시료를 통하여 실험을 진행하였다.

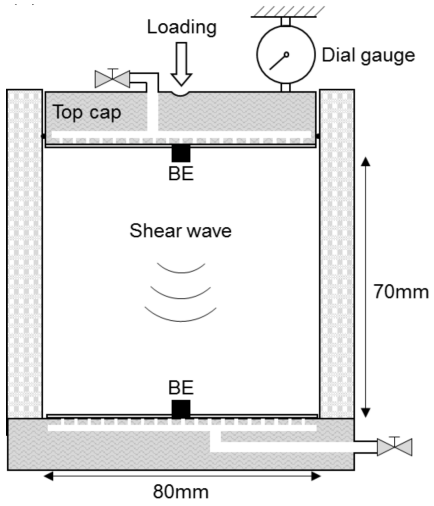


그림 4-1. 하중재하/전단파 속도 측정 장비

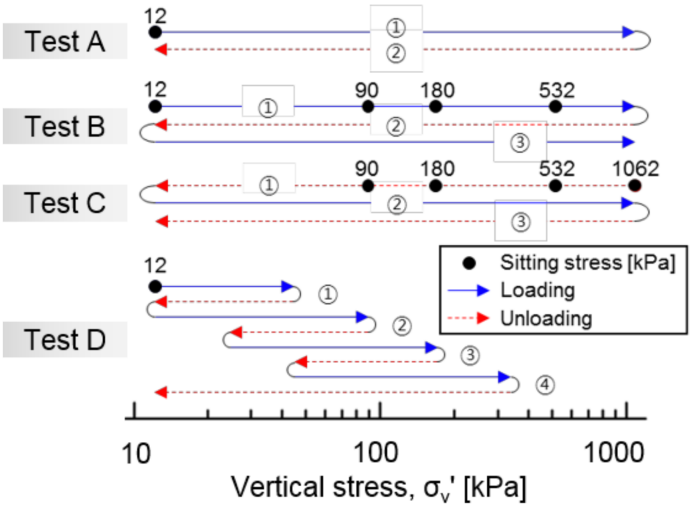


그림 4-2. 하중 재하 시나리오.

4.2 하중 시나리오에 대한 강성 변화

처리되지 않은 시료의 전단파 속도 및 공극은 그림 4-3에 나타난 바와 같다. 처리되지 않은 시료의 경우에는, 수직응력의 증가는 입자간의 접촉면적을 증진시켜, 전단파 속도는 증가된다. 동일 하중에서 전단파의 속도는 하중 제거시 하중이 가해진 경우보다 높으며, 이는 하중 재하시에 발생한 공극의 변화로 기인한다. 또한 조밀한 시료는 느슨한 시료보다 높은 전단파 속도를 보이며 다음과 같은 하중-전단파 속도의 관계를 가지고 있다.

$$V_s = \alpha \, \sigma_v'^{\beta} \qquad (식\ 4-1)$$

여기서 alpha, beta는 매개변수이며, sigmaV'은 수직방향 유효응력을 나타낸다. 매개변수는 조밀한 모래에서는 alpha=98, beta=0.19이며 느슨한 모래에서는 alpha=61, beta=0.25의 값을 보이며 이는 일반적인 모래의 값이다.

농도 0.5M의 용액으로 처리된 시편의 경우, 12kPa에서 양생된 느슨한 시편과 조밀한 시편 모두에서 전단파 속도의 상당한 증가를 보인다. 하중 재하시 전단파 속도는 조밀한 흙과 느슨한 흙에서 각각 ~180kPa, ~46kPa까지 일정하게 유지된다. 이 하중 단계보다 더 높은 하중이 가해지면, 전단파의 속도는 크게 감소한

다. ~1MPa까지 하중 재하 시 전단파 속도는 서서히 감소하며 일정한 값으로 수렴한다. 하중 제거시에는 전단파 속도는 서서히 감소하며 공극률도 감소한다.

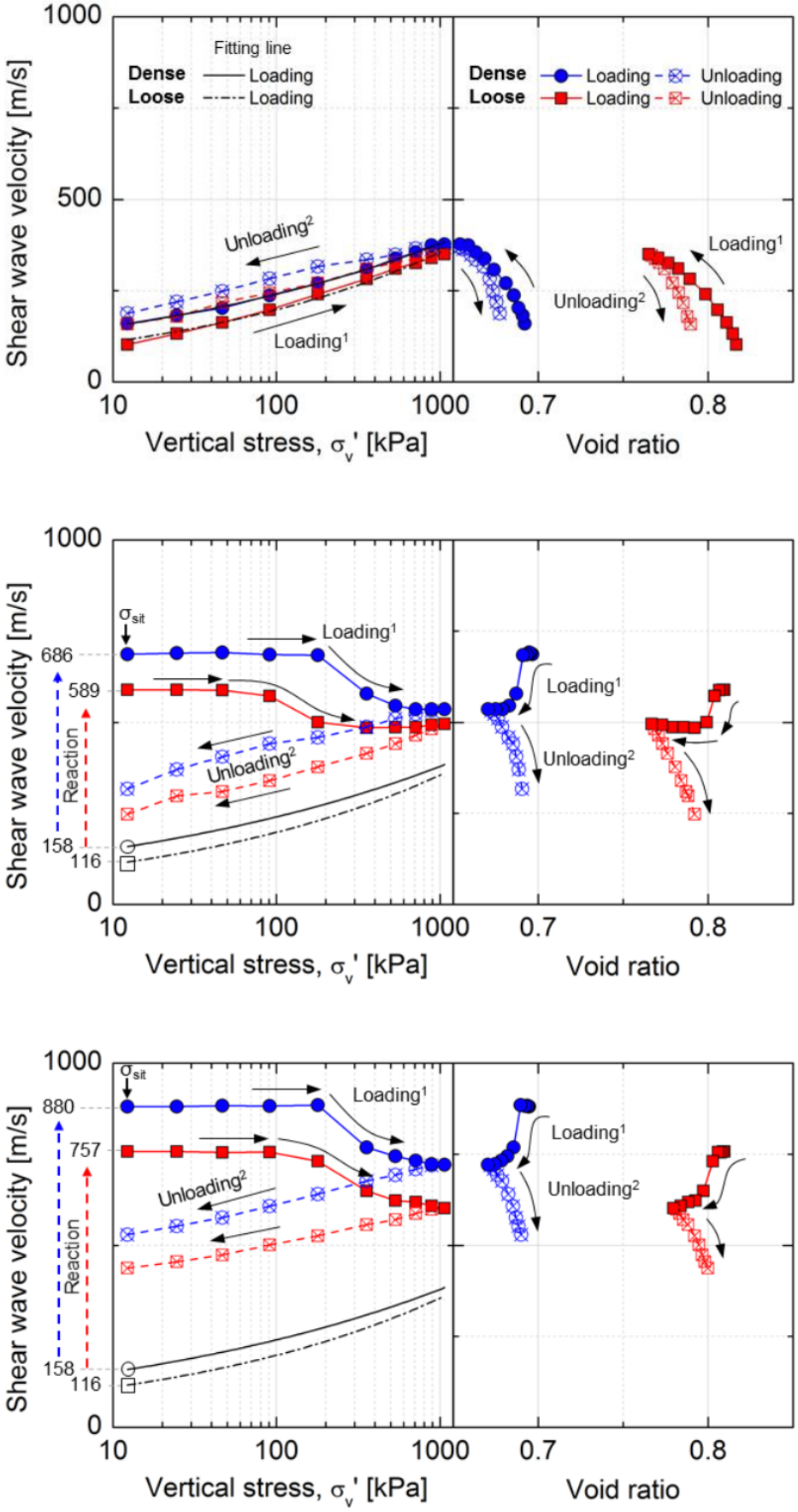


그림 4-3. 수직응력에 따른 전단파 속도 변화 및 공극비 변화. (상) 처리되지 않은 시료. (중) 0.5M 용액으로 처리된 시료. (하) 1.0M 용액으로 처리된 시료.

농도 1.0M의 용액으로 처리된 시편의 경우, 12kPa에서 처리된 느슨한 상태의 시편과 조밀한 상태의 시편 모두 0.5M 용액으로 처리된 시편보다 더 높은 전단파 속도를 나타낸다. 하중 재하 시 느슨한 흙은 ~90kPa에서, 조밀한 흙은 ~180kPa에서 전단파 속도가 감소한다. 처리된 시편의 전단파 속도변화에서는 탄산칼슘의 탈락현상이 유추되나, 공극의 변화는 처리되지 않은 흙의 거동과 유사하다. 결론적으로, 강성 손실을 유발하는 수직하중은 조밀한 흙에서는 처리 용액의 농도에 영향을 받지 않지만, 느슨한 흙에서는 처리용액의 농도가 높아짐에 따라서 증가한다.

아래 그림 4-4는 각기 다른 하중단계에서 처리된 시료가 loading, unloading, reloading의 순서로 하중을 받았을 때, 전단파 속도의 변화 양상을 보여준다. 수직 하중이 증가함에 따라 시편은 압축된다. 초기 수직하중이 12kPa, 90kPa에서는 유사한 전단파 속도를 보이며 ~180kPa까지는 일정한 전단파 속도를 보여준다. 이후, 보다 큰 수직하중에서는 전단파 속도는 서서히 감소하며, 이어지는 unloading 및 realoading시에는 전단파 속도변화에서 나타나듯이, 탄산칼슘의 탈락이 발생하여 더 이상 입자간 bonding에는 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 초기 수직하중이 180kPa, 532kPa의 경우에는 loading시에 전단파 속도가 급격히 감소되는 경향을 보인다. 초기 수직하중 532 kPa의 경우에는 unloading 및 reloading시에, 동일한 하중에서 전단파 속도의 차이를 보였으며, 이는 부분적인 탄산칼슘의 탈락현상 때문인 것으로 판단된다. 그림 4-4(a)~(c)에서 나타나듯이, 초기하중과 관계없이 탄산칼슘의 탈락현상은 수직응력 ~180kPa에서 나타났다.

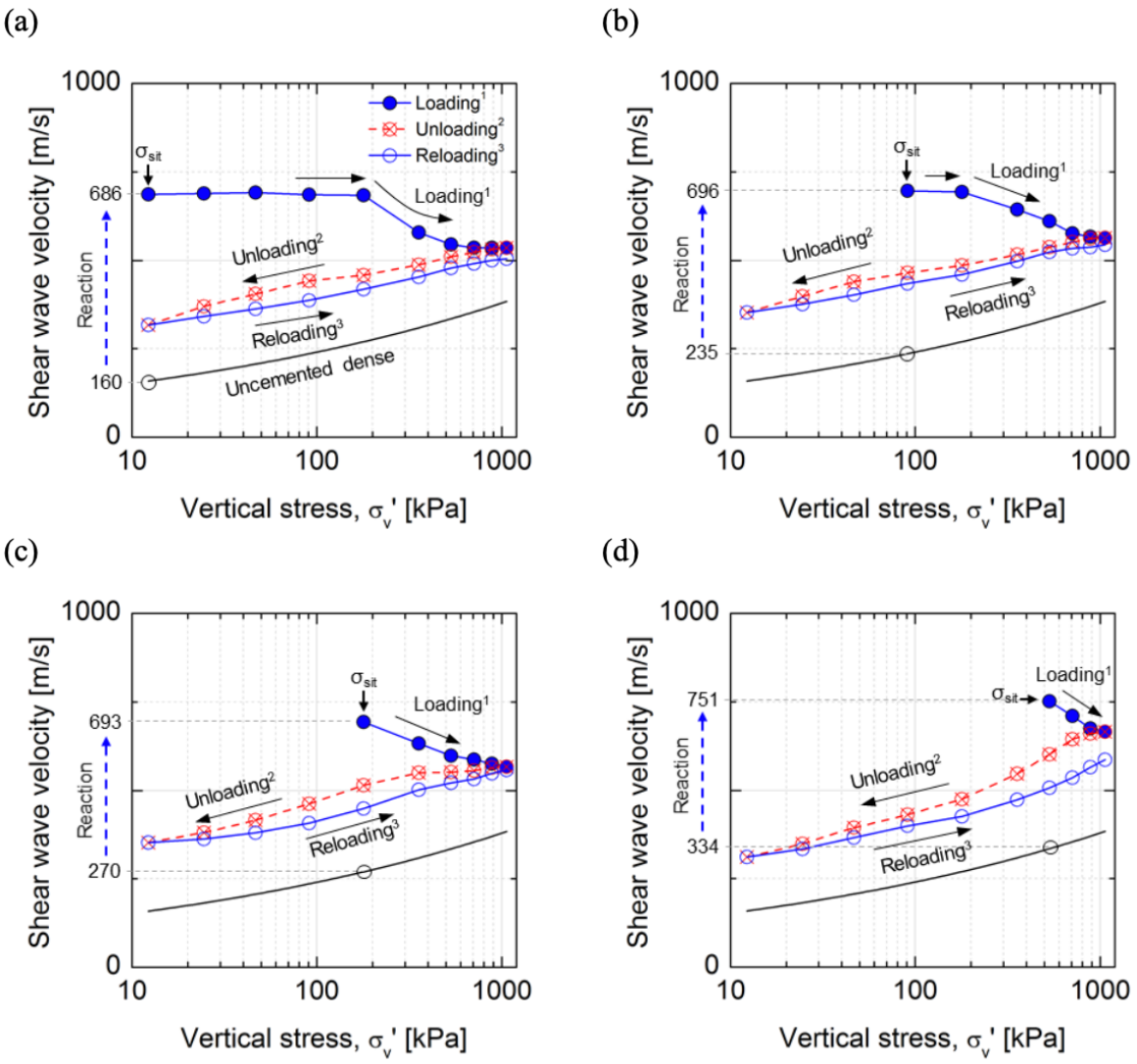


그림 4-4. 하중 재하시 초기 응력에 따른 전단파 속도 변화. (a) 초기응력 12kPa. (b) 초기응력 90kPa. (c) 초기응력 180kPa. (d) 초기응력 532kPa.

그림 4-5에서는 unloading, loading, unloading의 순서로 전단파 속도의 변화 양상을 보여준다. 초기 수직응력 90kPa을 가한 시편에서는, unloading시 급격한 전단파 속도의 감소가 나타났다 (그림 4-5a). 이어지

는 loading단계에서는 수직 응력 180kPa 단계까지 초기 전단파 속도의 약 95%까지 증가하였다가, 추가적인 loading에서는 전단파 속도는 다시 감소하였다. 이어지는 unloading단계에서는 전 구간에 걸쳐 전단파 속도가 서서히 감소하였다. 초기 수직 응력 180kPa가 가해진 시편도 하중 시나리오에 따라 90kPa 시편과 유사한 양상을 보인다 (그림 4-5b). 이러한 결과에서 보여지듯, unloading단계에서도 응력 완화로 인해 탄산칼슘의 탈락현상이 야기되며, 이어지는 loading단계에서도 추가적인 탈락이 발생한 것으로 판단된다. 이보다 더 큰 초기 수직 응력을 받은 시편에서는, unloading단계에서 탄산칼슘의 완전한 탈락을 유도함으로, 이어지는 loading단계에서의 추가적인 탈락현상을 발견되지 않았다. 이러한 결과에서 보여지듯, 오직 unloading에 의해서도 탄산칼슘의 탈락을 유도할 수 있어, 개량된 강성이 저하될 수 있음을 의미한다.

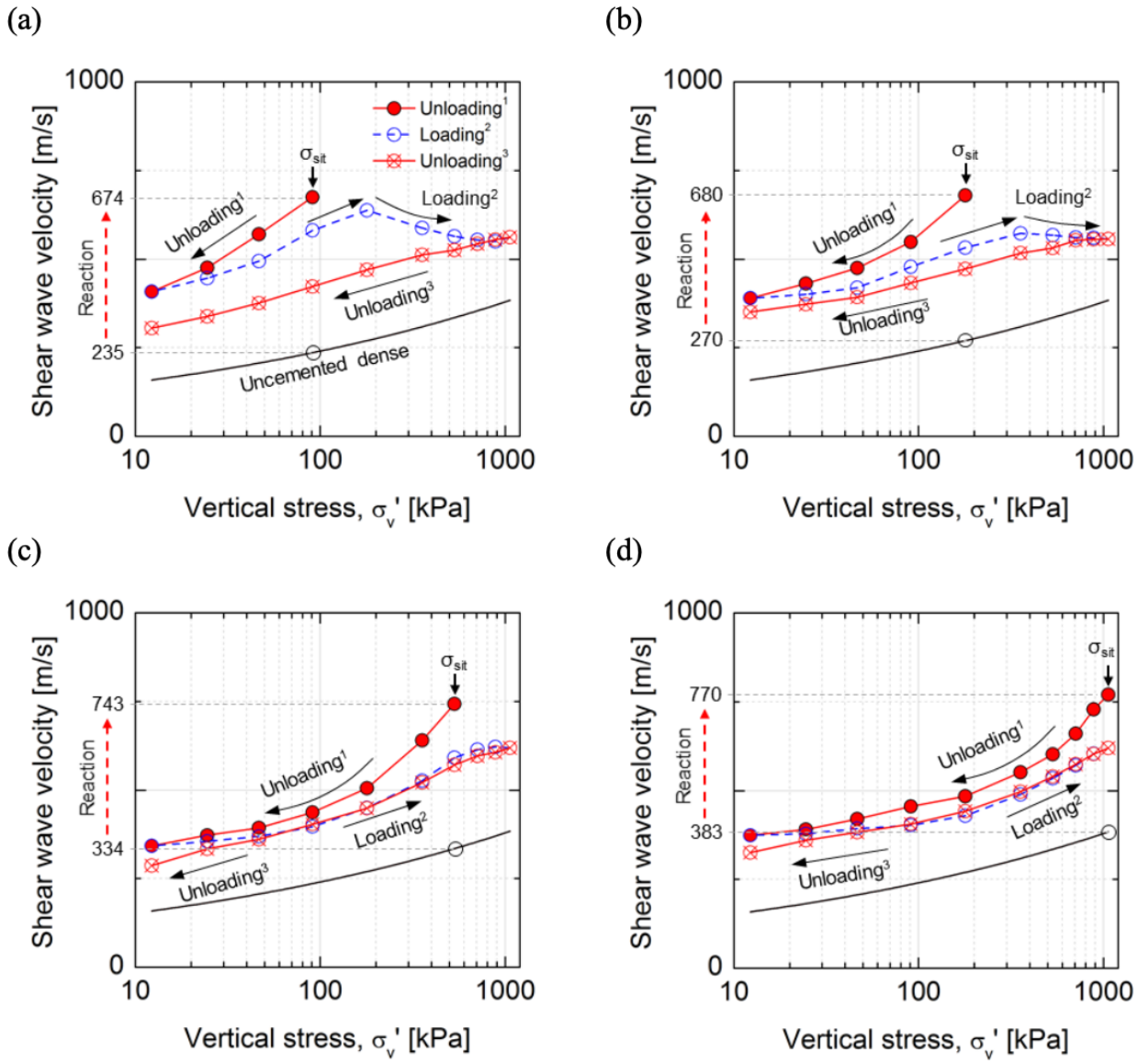


그림 4-5. 하중 제거시 초기응력에 따른 전단파 속도 변화. (a) 90kPa. (b) 180kPa, (c) 532kPa, (d) 1062kPa

그림 4-6(a)와 4-6(b)에서는 초기 수직응력 12kPa에서 처리된 시료가 반복하중을 받을 때 전단파 속도 변화 및 공극비의 변화를 나타낸다. 전단파 속도는 두 번째 반복하중 단계 즉, 수직응력 12kPa ~ 90kPa사이에서는 ~667m/s의 전단파 속도는 일정하게 유지된다. 하지만, 세 번째 하중단계에서는 이전 실험에서 관찰된 ~180kPa보다 낮은 ~90kPa에서 전단파의 속도가 감소됨을 보인다. 이는 반복되는 하중의 변화에 의해서 탄산칼슘의 탈락이 유도될 수 있음을 의미한다. 네 번째 하중 단계에서는, 전단파 속도는 수직응력 180kPa까지 조금씩 증가하다가, 더 높은 하중에서는 감소하는 경향을 보인다. 그림 4-6(c)는 공극비-수직응력의 관계를 보여준다. 주목해야 할 점은 ~1.4%의 공극의 수축이 발생할 때 전단파 속도의 감소를 보인다. 따라서 강성의 감소를 일으키는 하중 이하로 반복 하중을 가할시 탄산칼슘의 침전효율을 감소시킬 수 있으나 강성의 손실은 발생하지 않을 수 있다.

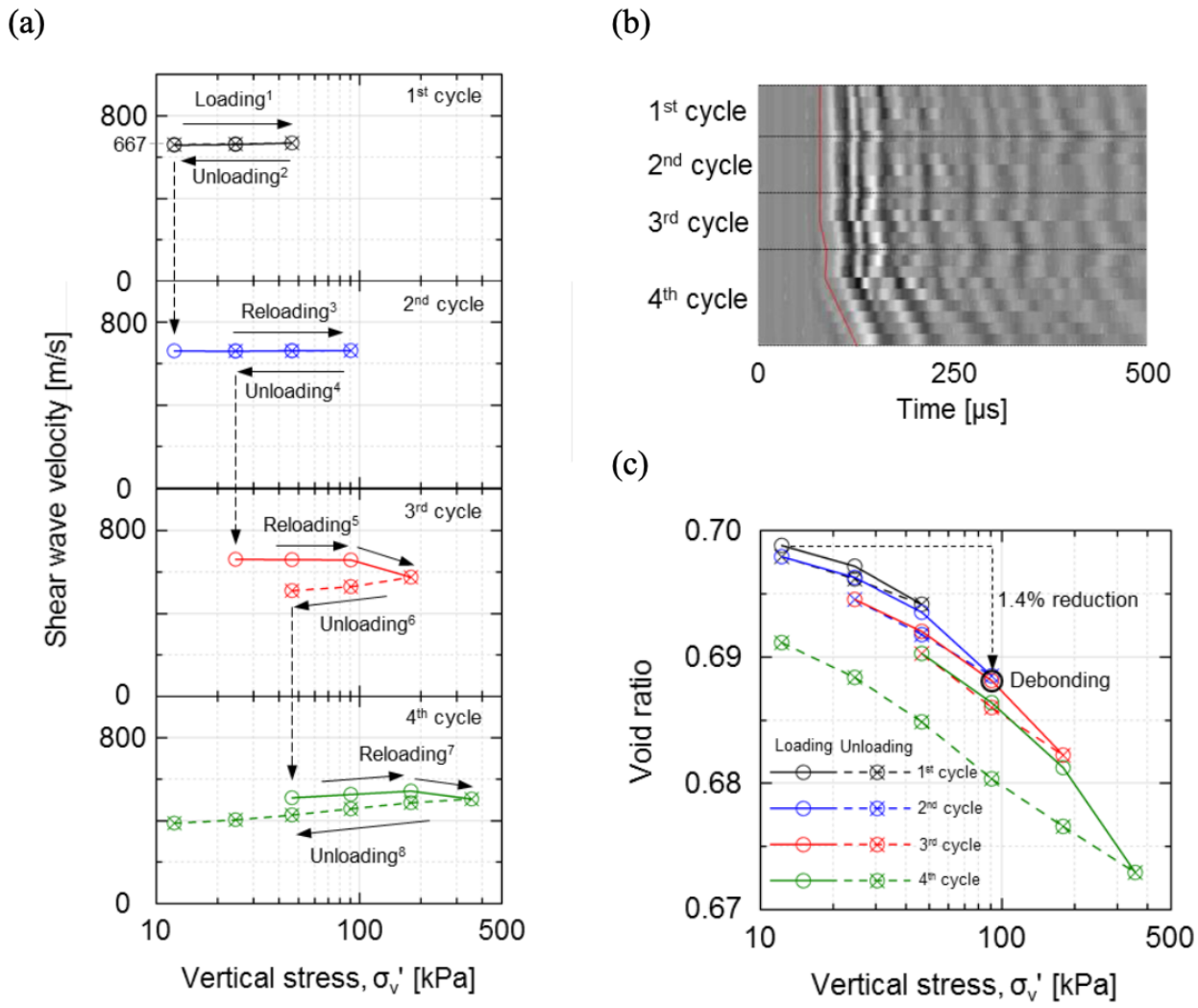


그림 4-6. 반복하중에 의한 (a)~(b) 전단파 속도변화, (c) 공극비 변화

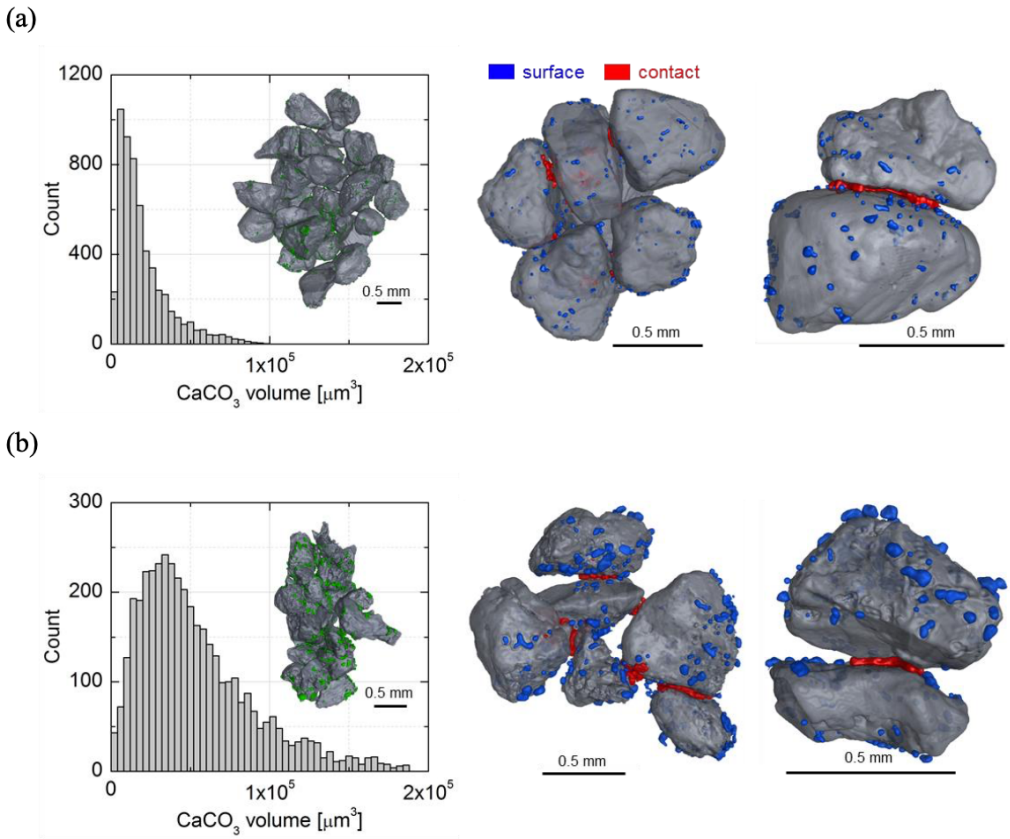


그림 4-7. 탄산칼슘의 입도 분포 및 시각화. (a) 0.5M 농도 용액. (b) 1.0M 농도 용액

4.3 X-ray 촬영을 통한 탄산칼슘 시각화

아래 그림 4-7은 탄산칼슘의 입자 크기별 분포를 나타낸 것이다. 생성된 탄산칵슘의 총 부피는 0.5M에서 1.18 x 10^8 μm^3, 1M 에서는 0.5M에서 생성된 부피의 약 2배인 2.19 x 10^8 μm^3가 생성되었다. 탄산칼슘의 평균 크기는 1M에서 53,066μm^3로 0.5M에서 생성된 부피인 20,126μm^3보다 약 2.6배 큰 것으로 나타났다. 0.5M의 용액은 비교적 많은 수의 작은 탄산칼슘을 생성하는 반면, 보다 적은 수를 가지며 큰 입자의 탄산칼슘이 1M의 용액에서 생성되었다. Al Qabany et al. (2011)에서 요소/염화칼슘의 농도가 높아질수록 탄산칼슘의 크기가 커지는 경향을 보이며 본 결과와 유사한 경향성을 보이고 있다. 1M 용액은 0.5M 용액보다 요소의 가수분해 결과로 높은 농도의 탄산염을 생산하기 때문에, 고농도의 탄산염에서는 탄산칼슘을 성장시키는데 주로 이용되는 반면 저농도의 탄산염에서는 탄산칼슘의 핵을 형성하는 것으로 판단된다 [Somani et al., 2006].

본 세부연구에서는 다양한 하중재하 시나리오에 따른 EICP용액이 처리된 흙에 대한 전단파 속도 및 부피 변화의 양상에 대한 내용을 파악하였다. 또한, 탄산칼슘의 침전 특성을 평가하기 위해 X-ray CT 분석을 실시하였다. 이에 따른 결론은 다음과 같다.

- 탄산칼슘의 침전은 흙의 강성을 증진시키며 0.5M과 1.0M의 용액이 처리된 조밀한 흙에서는 ~180kPa에서 강성의 감소가 발생하며, 느슨한 흙에서는 이보다 낮은 하중에서 강성의 감소가 발생하였다. 또한, 조밀한 흙에서 고결시 초기하중과 관계없이 ~180kPa에서 강성이 감소한다. 고결시 비교적 낮은 초기하중(< 180kPa)에서 하중 제거시 부분적 탄산칼슘의 탈락으로 즉시 강성 손실이 발생하며 추가적인 하중 재하시 2차적 탄산칼슘의 탈락이 발생하였다.
- 높은 초기하중 (532kPa, 1062kPa)에서 고결된 시편은 하중 제거시 완전한 탄산칼슘의 탈락이 발생하여 재하중에도 추가적인 탈락이 발생하지 않았다. 반복하중을 가할시 저하중에서 강성의 변화는 없으나, 공극의 변화로 탄산칼슘의 결합 품질이 저하되며 예측한 응력보다 낮은 응력에서 강성의 손실이 발생할 수 있다.
- 0.5M 용액에서는 비교적 작고 다량의 탄산칼슘이 생성된 반면, 1M 용액에서는 크고 소량의 탄산칼슘이 생성되었다.

5. 반응용액 주입 패턴

실내 실험의 결과를 현장 지반에 적용하기 위해서는, 박테리아 용액 혹은 배양액 용액의 주입이 필수적으로 수반된다. 일반적인 지반개량을 위한 그라우팅 용액 주입에서 나타나는 현상과 마찬가지로, 공간적으로 골고루 주입해야 효율적으로 지반개량을 유도할 수 있으며, 용액을 주입하는 속도(주입율)와 주입되는 용액의 점성도에 따라 주입된 용액의 지반내 분포 형태가 달라진다. 본 세부연구에서는 최적의 주입 조건을 산정하기 위해서 Pore-network model을 이용한 수치해석을 통해 주입 효율을 모사하였다.

서로 섞이지 않는 유체의 흐름은 오일/가스 생산, 이산화탄소 지중저장, 토질 개선등 많은 엔지니어링 분야에서 관찰된다. 한 종류의 유체로 포화된 다공성 매체에 다른 종류의 유체가 침투할 때, 침투하는 유체가 반대편 배수공에 도달할 때까지, 다공성 매체를 채우고 있던 기존 유체는 배수된다. 이때 침투하는 유체는 preferential flow path를 형성하며, 두 유체의 점성도비, 주입속도, wettability 및 다공성 매체의 특징에 따라 침투패턴과 침투율이 결정된다 [Lenormand et al., 1988].

Viscosity ratio M과 capillary number C는 주입되는 유체 (μ_{inv})와 기존 유체의 점성도(μ_{def})를 사용하여 아래와 같이 정의된다.

$$M = \frac{\mu_{inv}}{\mu_{def}} \quad \text{(식 5-1)}$$

$$C = \frac{q\,\mu_{inv}}{A\,T_s \cos\theta} \qquad \text{(식 5-2)}$$

여기에서 q [m^3/s]는 주입되는 유체의 유량을 나타내며, A[m^2]는 유체가 흐르는 매체의 단면넓이를 나타내며, T_s[N/m]는 주입되는 유체와 기존 유체 사이의 표면장력을 나타낸다. 마지막으로 θ는 주입되는 유체와 기존 유체가 다공매체 공극 표면에서 이루는 접촉각(contact angle)을 나타낸다.

기존의 연구에서 보면, 그림 5-1에서 확인되는 바와 같이, 주입되는 유체에 의한 displacement pattern은 logM-logC 도표에서 크게 세 부분으로 나뉘어져있다 (Lenormand et al., 1988; Liu et al., 2013, Zhang et al., 2011). 세가지 주입패턴의 경계면들이 그림 5-1위에 표시되어 있다. Viscous fingering은 주입되는 유체의 점성도가 기존에 다공매체 내에 있던 유체의 점성도보다 작을 때 일어난다. 즉 logM값은 음의 값이며, 그림 5-1에서 수평축 좌측에 위치한다. 이 경우 주로 나무 모양의 주입패턴이 나타나며, 이러한 주입패턴(viscous fingering)을 일으키는 주요 원인은 다공매체에 원래 존재하던 유체의 점성 때문이다. Capillary fingering의 경우에는 낮은 capillary number C 조건에서 나타난다. 낮은 주입 속도에서는 유체의 점성도에 의한 영향을 미미해지기 때문이다. 이 경우, 주입용액은 모든 방향으로 발달되는 finger를 형성하고, 때로는 원래 공극 속에 존재하고 있던 유체를 고립시킨다. Stable displacement 패턴은 비교적 높은 viscosity ratio와 capillary number에서 관찰된다. 이러한 조건에서 주입형태는 비교적 빠른 속도로 주입되는 유체의 점성에 의한 점성력에 의해 좌우되기 때문이다. 이러한 주입패턴의 특징은 주입용액이 매우 균질하게 골고루 기존 공극의 유체를 배수시킨다.

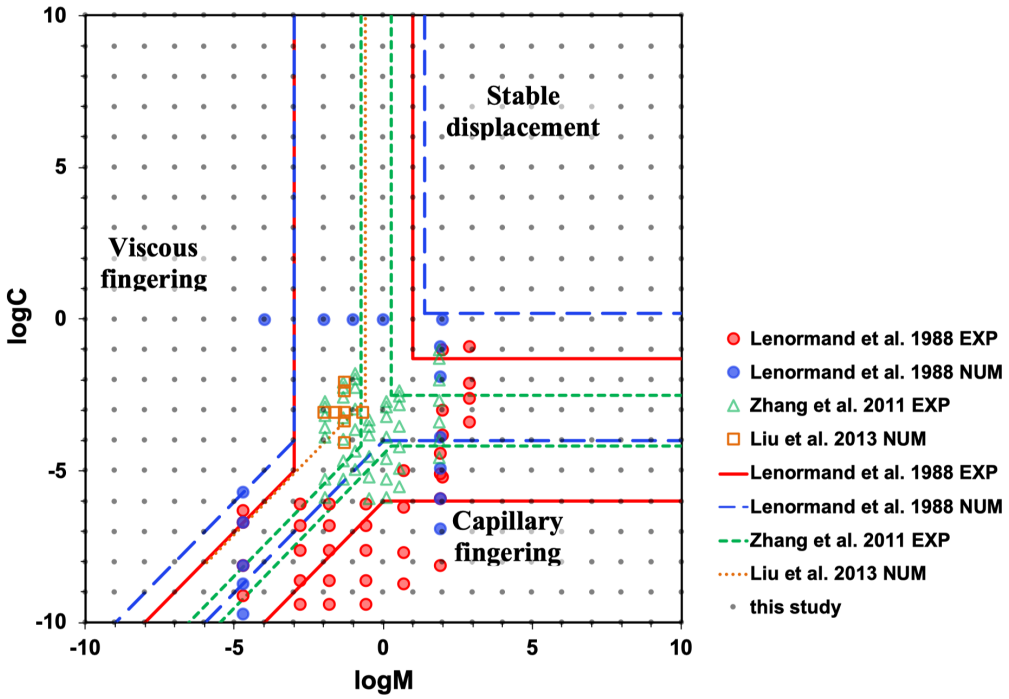


그림 5-1. 주입패턴의 경계면. 주입패턴과 주입효율에 따라서 세가지 영역으로 나뉜다: Stable displacement, capillary fingering, viscous fingering.

이러한 주입패턴은 유체의 점성도와 주입속도 이외에도, 공극의 형상이나 공간적 크기 분포, 유체와 공극 벽면과의 상호작용 (wettability)등에 의해서도 영향을 받는다. 실제 주입형태 실험에서는, 유체들의 성질을 조절하기가 어렵고, 수치해석의 경우에는, 특히 Navier-Stokes 공식의 해를 찾기 위해서 많은 노력(컴퓨터 사양과 계산시간)이 요구된다. 또한 Lattice Boltzmann 방법의 경우에는, 다양한 유체의 성질을 모델링하고, 경계조건을 적용하기가 어렵다. 이러한 어려운 점들로 인해서, 3차원 도메인에서 주입패턴을 연구하는 실험과 수치해석 결과는 찾아보기 힘들다. 따라서 본 세부연구에서는, 3차원 pore-network model을 이용하여, 다양한 capillary number와 viscosity ratio 조건에서, 주입패턴과 주입효율에 대한 연구를 진행하였다. 또한 공극의 크기분포와 연결성(connectivity)의 영향을 조사하였다.

5.1 수치해석 tool과 방법

수치해석을 진행하기 위하여 Tube-network 모델을 생성하였다. 아래 왼쪽 그림 5-2와 같이, 현장 채취시료를 X-ray CT imaging을 통해서 흙 입자와 공극을 표현하는 binary image를 얻고, 그 후 공극 이미지에 maximal ball algorithm을 적용하여, 가운데 그림과 같이 3차원 tube-network model을 추출하였다. Pore-network model을 생성하는 방법에 대한 자세한 설명은 다음 참고 문헌에서 확인할 수 있다 [Silin and Patzek, 2006; Mahabadi et al., 2018]. Maximal ball algorithm에서는 가상의 구체(sphere)를 X-ray 이미지에 fitting 시켜서 가장 큰 크기의 구체를 찾고, 이러한 큰 크기의 구체 중에서, 일정한 기준보다 크면 pore가 되고, 작으면 tube로 분류한다. 이렇게 분류된 pore와 tube를 이용해서 pore-network model이 생성된다.

실제 시료의 X-ray CT image에서 추출된 pore-network model은 실제 지반의 공극 크기 및 길이, 공극의 연결성등 특징적인 공극 형상 및 분포를 반영하고 있어서, 실제의 유체의 흐름을 수치 해석적으로 모사하기에 매우 적합한 모델이다. 추출된 모델에서는 pore와 tube 모두 부피를 갖지만, 본 세부연구에서는 수치해석의 목적에 따라 pore의 부피를 생략하고 tube의 길이와 부피만을 고려하여, 소위 tube-network model이라 불리는 network model을 생성하였다. 또한 이러한 tube-network model을 생성한 후, model을 구성하고 있는 tube들의 지름을 달리해서, 다양한 tube size distribution을 가진 세 개의 다른 tube-network 모델을 생성하였다. 이러한 네 개의 tube-network model은 공극 크기의 분포의 영향을 연구하는데 사용되었다.

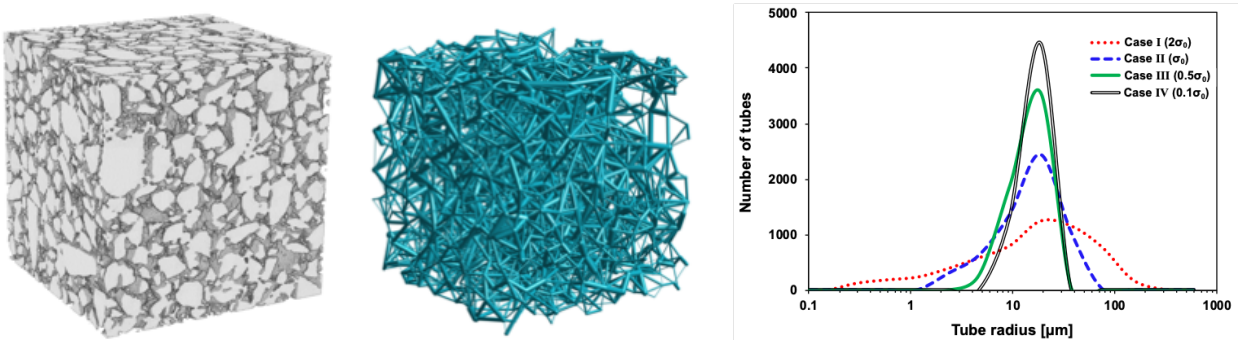


그림 5.2. (좌) 시료의 X-ray 이미지. (중) 생성된 tube-network 모델. (우) Tube size distributions

위 그림 5-2(우)에서는, 수치해석에 사용된 총 네 개의 tube size distribution을 보여준다. Tube-network model을 구성하고 있는 tube의 크기 평균 및 크기 순서는 똑같이 유지하면서, 표준 편차를 변경하면서 추가적인 3개의 distribution을 생성하였다. 원본 X-ray 이미지에서 추출된 tube-network의 tube 크기의 표준편차가 σ_0이고, 생성된 3개의 다른 tube size distribution은 표준 편차는 각각 $0.1\sigma_0$, $0.5\sigma_0$, $2\sigma_0$등이다. 처음에 이미지로부터 추출된 tube-network은 총 5775개의 tube로 구성되어 있고, tube의 평균 크기는 12 micron, 로그스케일 표준편차 0.31, tube 연결성(connectivity) 8.0의 특성을 가지고 있다. 또한, 원래의 tube-network model에서 점차적으로 모델내의 tube를 임의적으로 제거하여 연결성이 더 적은 tube-network model을 생성하였다. 생성된 3개의 다른 tube network model은 tube connectivity cn=6.2, 5.1, 그리고 4.6을 가진다. 따라서 원본 tube-network model이외에도, 3개의 다른 tube size distribution을 가지는 cn=8의 tube-networkㄴ, 그리고 3개의 다른 connectivity를 가지는 tube-networks이 수치해석에 사용되었다.

유체의 주입의 모사는 Aker et al.(1998)에 의해서 개발된 알고리듬을 사용하였다. 최초에 tube는 한 종류의 유체로 채워져 있고, 외부에서 다른 종류의 유체가 일정한 유량으로 주입된다. 두 유체는 서로 섞이지 않으며, 뚜렷한 경계면을 갖는다고 가정 하에, 주입되는 유체의 주입패턴이 시뮬레이션 되었다. Tube를 채우고 있는 유체를 배수시키기 위한 capillary pressure는 Young-Laplace equation에 의해 아래와 같이 표현된다.

$$P_c = \frac{2T_s}{R_T}\cos\theta \qquad \text{(식 5-3)}$$

여기서 T_s는 두 유체의 interfacial tension, R_T는 tube의 반지름, 그리고 Θ는 contact angle을 나타낸다.

Aker et al. (1998)은 위 Young-Laplace equation을 수정하여, 두 유체의 접촉면(meniscus)이 tube내에 있을때의 수정된 capillary pressure를 아래와 같이 제시하였다.

$$P_c = \frac{2T_s}{R_T}[1 - \cos(2\pi p)] \qquad \text{(식 5-4)}$$

여기서 p는 0과 1사이의 값으로서 tube내에서의 상대적인 위치를 나타낸다. 숫자 0이면 tube의 시작 쪽이며, 1이면 tube의 끝쪽에 위치한다. 위 식 5-4에서는 contact angle의 값은 0으로 가정되었다.

Tube를 통해 흐르는 유량 q는 Washburn equation을 통해 아래와 같이 나타난다.

$$q = \frac{-\pi R_T^4}{8\mu' d}(\Delta P - P_c) \qquad \text{(식 5-5)}$$

$$\mu' = \mu_{inv} p + \mu_{\mathrm{def}}(1-p) \qquad \text{(식 5-6)}$$

여기에서 μ′은 effective viscosity를 나타내며, △P는 tube 양쪽의 압력차이를 나타낸다.

질량보존의 법칙을 incompressible fluid의 경우에 적용하면,

$$\sum q_{ij} = 0 \qquad \text{(식 5-7)}$$

즉, 여러 tube가 연결된 한 지점(node)을 통해 들어오고 나가는 유체의 모든 유량을 더해 보면 0값이 되어야 한다. 위 식 5-7을 tube-network model내부의 전체 node에 적용하여, 각 node에서의 압력값을 계산한다. 일정한 유량이 흐를 때 압력 차이를 알 수 있다. Tube-network model을 흐르는 유량은 다음과 같이 구해 진다.

$$Q = A \cdot \Delta P + B \qquad \text{(식 5-8)}$$

위 식에서 A와 B는 유체의 성질과 공극의 형상에 따라 적용되는 매개변수이다. 이러한 매개변수들은 두 경우의 압력 차이 값($\triangle P_1$, $\triangle P_2$)을 사용하여 구할 수 있다. 매개 변수들이 구해진 다음에는, 일정 유량 하에서 압력 차이 값(△P)을 구할 수 있다.

Timestep △t는 tube-network model내부의 모든 tube중에서, 오직 하나의 tube내부의 meniscus가 이동해서 다른 쪽 tube 끝으로 이동할 수 있도록 아래와 같이 계산되었다.

$$\Delta t = \min[\frac{\Delta L_{ij}}{V_{ij}}] \qquad \text{(식 5-9)}$$

위 식에서 $\triangle L_{ij}$는 한 tube 내부의 meniscus에서 같은 tube의 다른 쪽 끝까지 거리이며, V_{ij}는 tube 내부의 유속을 의미한다. 각 timestep마다 최소의 △t값이 결정되고, 이후에 그 값이 시뮬레이션에 사용되어, 새로운 meniscus의 위치가 second-order Runge-Kutta scheme에 의해 계산된다.

5.2 대표적 주입패턴 특성

생성된 tube-network 모델을 이용하여 여러 주입조건에서 주입 시뮬레이션 실시하였다. 그림 5-3은 아홉개의 선택된 logC과 logM 조건에서 대표적인 주입 패턴 형상을 보여준다. 먼저 왼쪽 열(logM=-5)에서는, 나무 가지 모양의 주입패턴이 관찰되고, 하나의 대표적인 preferential flow path를 발견할 수 있다. 이

경우, logC값이 5에서 -5로 변할때, 주입유체의 포화도는 0.066에서 0.074로 약간 증가한다. 세 번째 마지막 행(logC=-5)에서는, logM값이 -5에서 5로 변할 때, 주입패턴은 viscous fingering에서 capillary fingering으로 변하게 된다. 비교적 높은 logC와 logM 조건(logC=5, logM=5)에서는 stable displacement 패턴이 관찰된다. 이 경우 주입유체의 최종 포화도는 0.7정도가 된다.

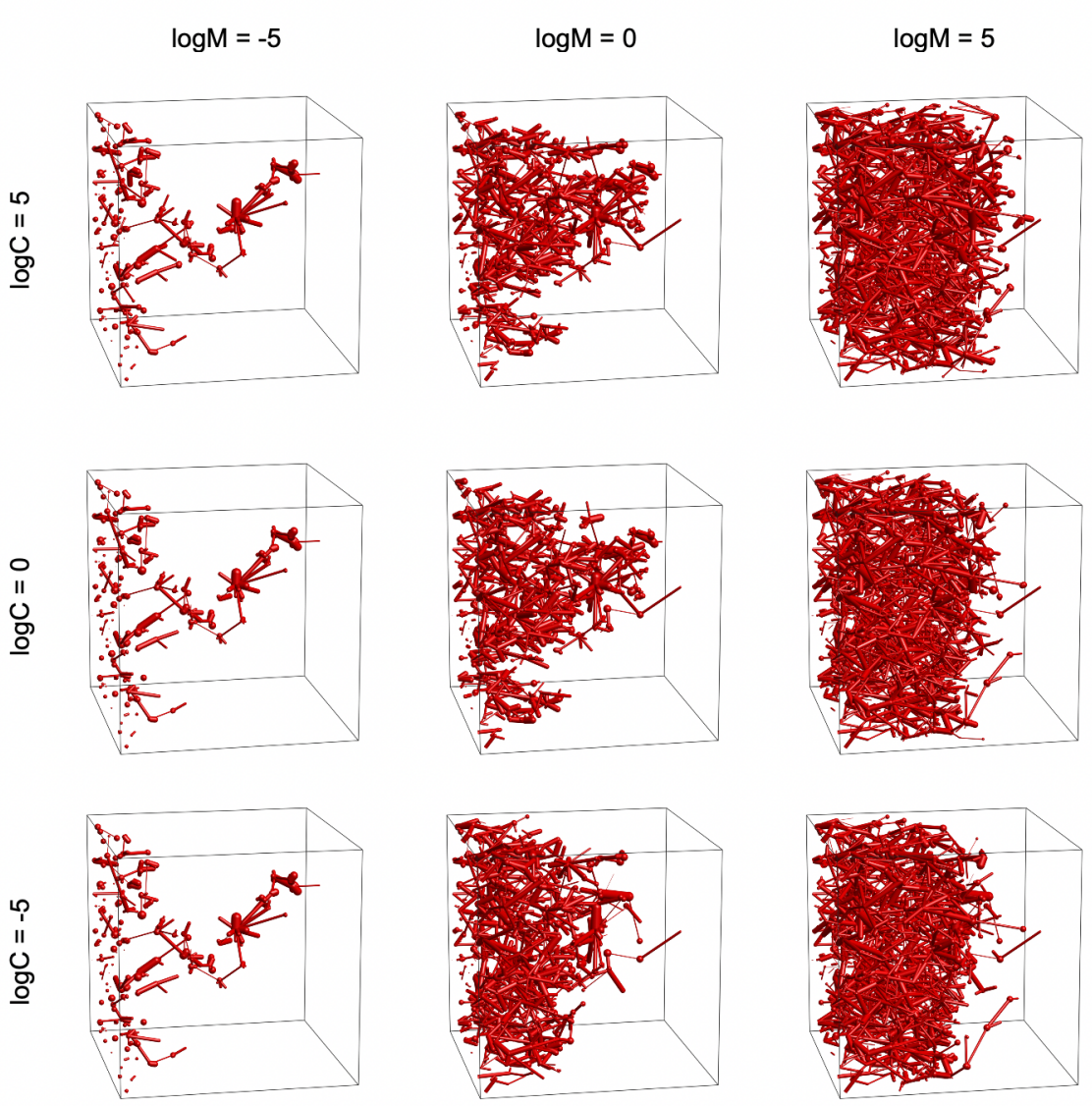


그림 5-3 선택된 logC와 logM값 조건에서 대표적인 주입패턴. 유체는 왼쪽에서 오른쪽 방향으로 주입된다.

주입되는 유체가 반대편 끝에 도달하면, 주입은 종료된다. 유체 투입이 끝나면, tube-network model을 그림 5-4(b)에서 보이는 바와 같이, 다섯 개의 작은 부분으로 나누고, 각 부분마다 포화도를 계산하였다 (그림 5-4b). 그림 5-4(a)에 표시된 9개의 부호들은 logC와 logM 조건들을 나타낸다. 다른 연구자들에 의해서 제시된 투입패턴의 경계들이 그림 5-4(a)에 표시되어 있다. 따라서 9개의 조건들은 세 개의 특징적인 패턴 중에 하나의 패턴에 속하게 된다. 그림 5-4(b)에 보이는 바와 같이 tube-network model 내부의 각 부분들의 포화도는 주입되는 쪽이 제일 크고, 배수되는 쪽으로 갈수록 적어진다. 이것은 'capillary end effect' 라고도 불리며, 일반적인 주입 패턴의 특징이다. Viscosity ratio logM=5의 경우(빨간색 세모, 네모 부호)에는, 두 번째 부분까지 주입유체의 포화도는 거의 100%이며 세 번째 이후로 지나갈수록 급격하게 떨어져서, 마지막 부분에서는 0.5%로 나타난다. Capillary number가 logC=-5에서 logC=5로 증가할 경우, 주입패턴은 capillary fingering에서 stable displacement로 바뀌며, 특히 세 번째, 네 번째 섹션에서는 포화도는 같은 logM 조건이라도 포화도는 조금씩 증가해서 전체적인 포화도도 증가하게 된다. 하지만 logM=0인 경우, 즉 intermediate zone 혹은 transition zone의 경우에는, capillary number가 logC=-5에서 logC=5로 증가할 경우, 내부 섹션의 포화도는 같은 logM 조건이라도 조금씩 감소하였다. 이러한 현상은 첫 번째에서 세 번째 내부 섹션까지 뚜렷하게 관찰된다.

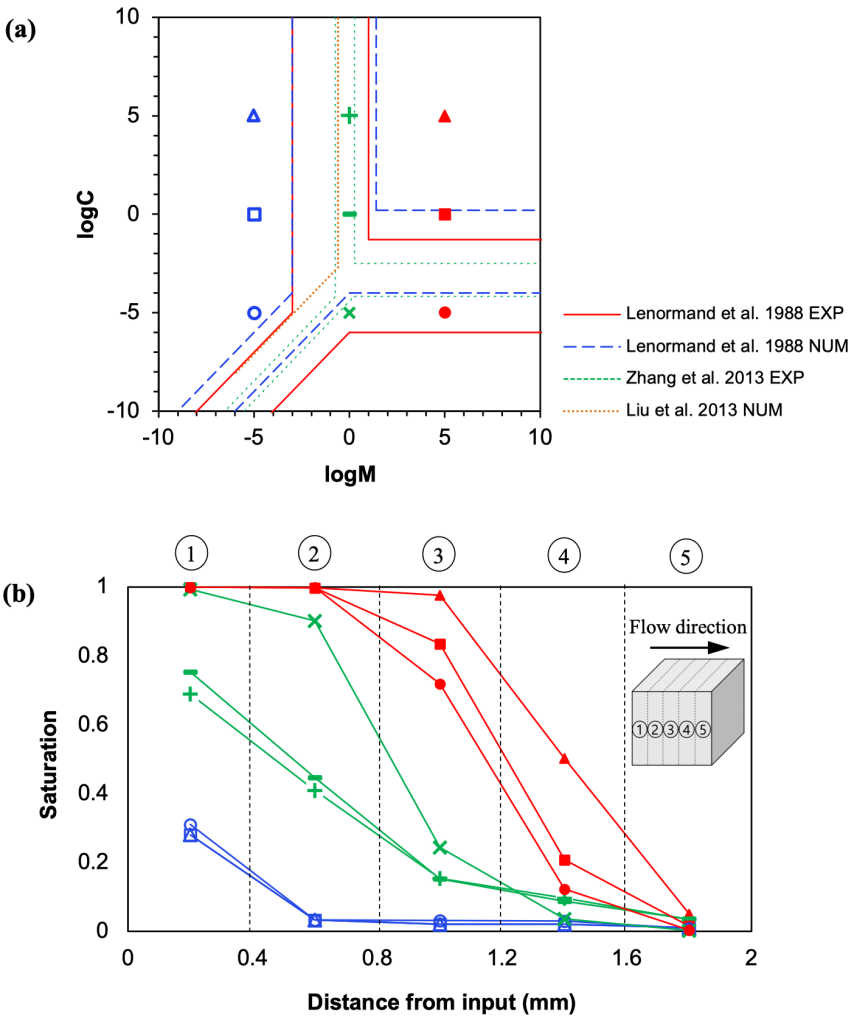


그림 5-4. Tube-network model 내부의 포화도 분포.

5.3 logC와 logM의 주입 효율에 대한 영향

넓은 범위(-10 ~ 10)의 viscosity ratio와 capillary number가 해석에 사용되었다. 따라서 21개의 logM 조건과 21개의 logC 조건에서, 총 441번의 시뮬레이션이 실시되었다. 시뮬레이션후 주입유체의 전체 포화도(주입효율)를 계산하여, 그림 5-5에서와 같이 logC값과 logM값에 따른 contour map을 작성하였다. 주입효율에 따라서도 대표적인 주입패턴 경계를 확인할 수 있다. Stable displacement "S" 구역에서 주입효율은 68%, capillary fingering "C"구에서는 53%, 그리고 viscous fingering "V"구역에서는 7%로 나타났다. 또한 기존 경계에서는 capillary fingering 구역으로 나뉘어져있던, viscous fingering 아래쪽 "V-C"구역이 처음으로 나타났으며, 이 구역에서는 17%의 주입효율이 계산되었다. 이 주입 효율은 각 경계 내부의 주입효율 값들의 평균으로 계산되었으며, 경계의 사이, 즉 transition zone 혹은 intermediate zone의 값들은 계산에 사용되지 않았다.

기존의 연구에서는 stable displacement와 capillary fingering 사이의 경계가 확실하게 표시되었으나, 주입효율만을 사용하여 판단하는 본 세부연구에서는, 두 패턴의 확실한 경계는 나타나지 않았고, 주입효율이 점진적으로 변하는 것을 확인할 수 있다.

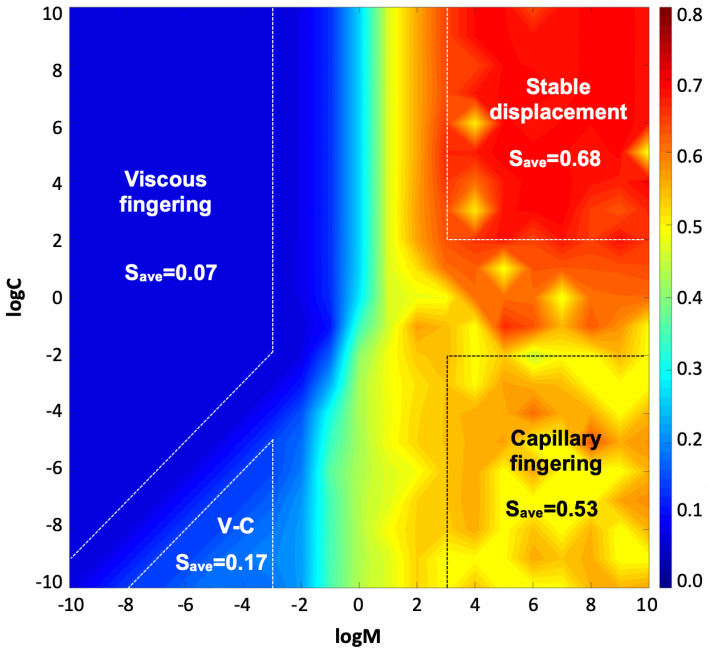


그림 5-5. Viscosity ratio와 capillary number에 따른 주입효율.

5.4 지반 공극 특성에 따른 주입효율 변화

지반의 공극 특성, 즉 tube size distribution과 connectivity의 영향을 알아보기 위하여, X-ray 이미지에서 추출된 tube-network model을 변형하여, 여러 조건의 tube-network model을 생성하였다. 다양한 조건을 가진 tube-network model을 이용하여 유체 주입을 모사하였다.

그림 5-6(a)에서는 tube size distribution에서 크기의 표준편차 값을 줄여가면서 해석한 결과를 보여주고 있다. Tube size distribution이 점점 uniform해 질 때, 주입효율은 stable displacement zone, viscous fingering zone, 그리고 "V-C" zone에서는 점점 감소하는 반면에, capillary fingering zone에서는 일치하는 경향이 발견되지 않는다. 크기의 표준 편차 값이 점점 줄어들수록, stable displacement zone과 capillary fingering zone에서 주입효율의 차이는 점점 감소한다. 또한 표준편차 값이 줄어들수록, stable displacement와 viscous fingering의 수직 경계는 점차 오른쪽, 즉 높은 logM쪽으로 움직이는 것을 확인할 수 있다. 그리고 동시에 "V-C" 영역의 주입효율은 감소하여, 표준편차가 원래 표준편차의 10%인 경우에는, 주입패턴 영역 경계를 logM=0을 기준으로 좌, 우로 나눌 수 있다. 이러한 변화는 그림 5-6(b)에 나타난 gradient값들을 통해서도 확인할 수 있다. 따라서, tube size distribution이 점점 uniform 해질 경우, capillary effect 보다는 주입유체의 viscosity ratio logM에 의해서 주입 패턴이 영향을 받는다.

그림 5-7에서는 tube connectivity의 영향이 나타나 있다. 원래 tube connectivity 값인 cn=8.0에서 connectivity 정도를 감소시키면서 해석하였다. connectivity 정도가 줄어들수록 주입효율은 세 개의 전통적인 영역 (stable displacement, capillary fingering, viscous fingering)에서 감소하였다. 하지만 "V-C" 영역에서는 주입효율이 증가하는 경향을 보였다. 그림 5-7(b)에서 보이는 바와 같이 connectivity 값이 줄어들수록, 주입 패턴의 경계는 기존 연구의 경계와 비슷한 양상을 보인다. 이는 기존의 연구는 2차원 실험과 수치해석이므로 connectivity=4.0일 때의 결과 값과 잘 맞는 것으로 판단된다.

본 연구의 결과를 현장 적용하기 위해서는 다음과 같은 점을 고려하여야 한다. 먼저 본 연구에 사용된 tube-network model은 굉장히 작은 dimension을 나타내며, 현장의 공간적인 불균질성은 반영하지 않는다. 또한 capillary end effect로 인해서, tube-network model이 굉장히 작은 dimension에서의 유체 주입을 모사하지만, 모델 내부에서도 주입 유체의 포화도가 변화한다. 또한 tube-network model에 사용된 tube의 단면형상은 원형으로서 실제 지반의 공극 모양과는 차이가 있다.

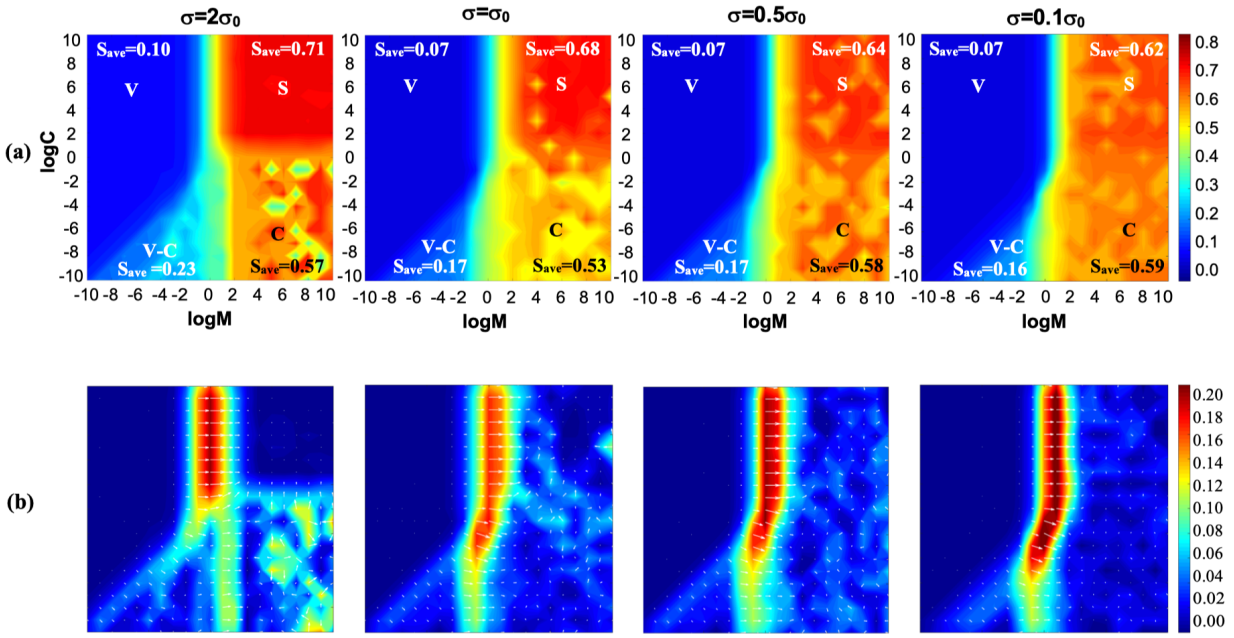


그림 5-6. tube size distribution의 영향. (a) 주입효율. (b) 주입효율 변화도(gradient in displacement efficiency).

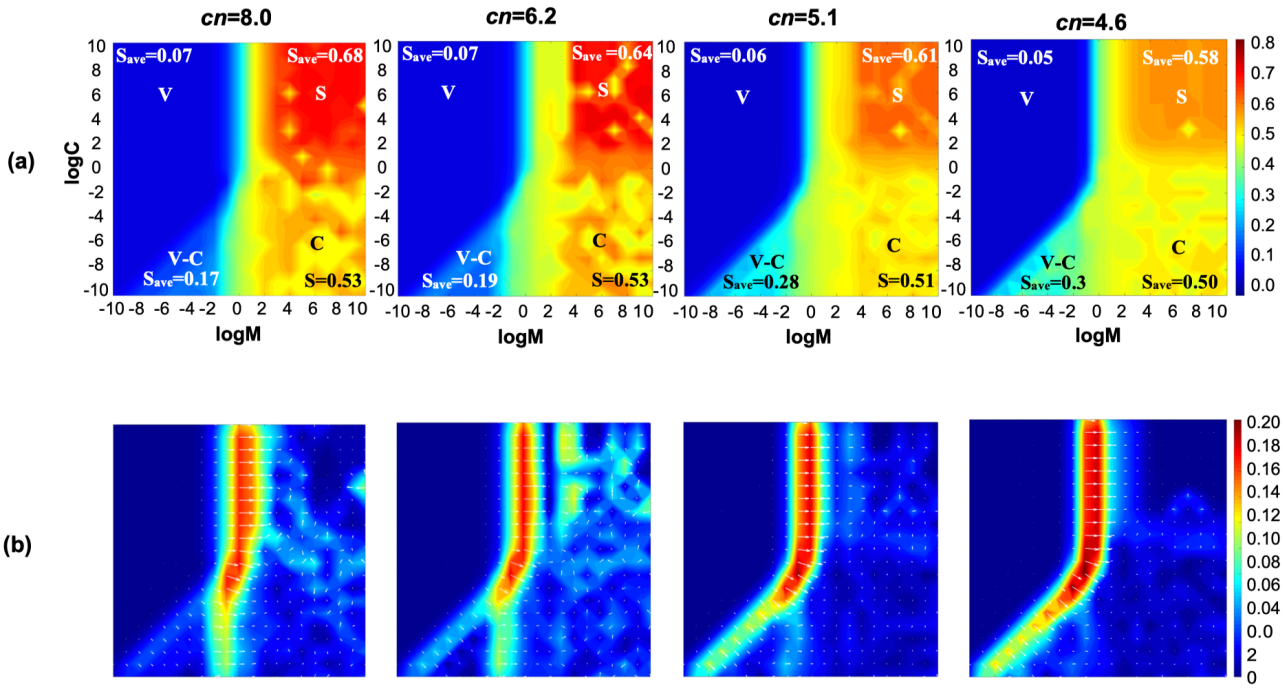


그림 5-7. Tube connectivity (coordination number)의 영향. (a) 주입효율. (b) 주입효율 변화도(gradient in displacement efficiency).

본 세부연구에서는 다양한 범위의 logM과 logC 값들에 대해서 3차원 tube-network model을 이용하여 주입효율을 모사하였다. 또한 공극의 특성을 변화시키면서 주입효율에 미치는 영향을 연구하였다. 다음과 같은 세부 결론을 얻을 수 있다.

- 동적인 유체주입은 tube-network model내에서도 포화도 차이를 유발한다. 일반적으로 주입되는 부분에서는 포화도가 높고, 배수되는 쪽에서는 낮은 포화도를 보인다.
- 기존의 연구에서 확인된 바와 같이, 본 연구에서도 세 개의 대표적인 주입패턴이 확인되었다. 추가적으로 viscous fingering과 capillary fingering 사이 부분에서, 원래 capillary fingering 영역의 일부였던 부분이, 새롭게 “V-C” 영역으로 발견되었다. 이는 주입효율 값을 이용해서 영역의 경계를 확인한 것으로서, capillary fingering과 viscous fingering 영역의 주입효율의 중간정도의 주입효율을 보여주고

있다.

- 3차원 tube-network model을 이용하여 얻어진 주입효율은 stable displacement에서는 68%, capillary fingering 영역에서는 17%, viscous fingering 영역에서는 7%이다.
- Tube size distribution이 점점 균질해짐에 따라서, stable displacement 영역과 capillary fingering 영역의 경계 및 capillary fingering 영역과 "V-C" 영역의 경계가 점점 불명확해졌다. 또한 viscous fingering영역과 stable displacement 영역의 경계는 점점 더 높은 logM 쪽으로 이동하였다. Tube size distribution이 점점 균질해질수록, 주입효율은 점차 감소하였다.
- Tube의 연결성 (connectivity, cn)이 줄어들수록, viscous fingering 영역과 "V-C" 영역의 경계가 점차 뚜렷해졌다. 이는 기존에 발표된 연구결과와 비슷한 형상을 보이는 것으로 기존의 연구들이 대체적으로 2차원 모델, 즉 connectivity가 4인 모델을 사용해서 얻었기 때문인 것으로 판단된다. Connectivity가 감소할수록, 주입효율도 감소하였다.
- 실제 지반 적용 시에는 본 tube-network model 해석이 가지고 있는 한계점을 잘 고려하여야 한다.

6. 과잉공극 수압 발달정도 - 진동대 실험

박테리아의 활동에 따른 포화도 감소의 효과를 확인하기 위하여 본 연구에서는 진동대를 이용한 간극수압의 발달정도를 실험을 통하여 분석하였다.

6.1 진동대 도입, 설치, 운용 연구원 교육

도입된 진동 테이블은 Quanser에서 제작한 bench-scale의 Shake Table II 제품으로서, 1방향의 진동을 가할 수 있다. 아래 그림 6-1과 같이 진동 테이블은 원활한 진동을 가하기 위하여 실험실 바닥에 볼트로 고정을 시켰고, 진동대를 운용하기 위한 데이터 취득 시스템과 별도의 컴퓨터를 구비하였다. 진동대의 최대 이동 거리는 ±7.6cm이며, 가속도 2.5g를 가할 수 있는 최대 하중은 7.5kg이다. 하중 7.5kg이 가해졌을 때 최대 속도는 0.665m/s이다. 적용 가능한 최대 주파수는 10Hz이다. 운용을 위한 소프트웨어는 Quarc로서 Matlab/Simulink와 연동되어 작동된다.

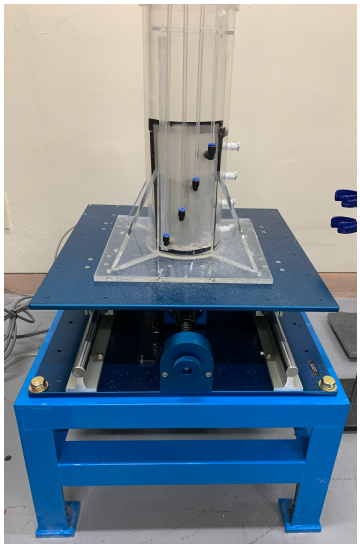


그림 6-1. 진동대 도입 및 설치.

6.2 과잉공극 수압 측정용 셀 및 적용된 진동

위 설치된 진동대위에 위치할 원통형 실험셀을 아래 그림 6-2와 같이 제작하였다. 재질은 아크릴로 제작되었으며, 내경은 12cm이며, 높이는 50cm이다. 셀 옆쪽 벽면에는 일렬로 네 개의 quick connector를 연결하여 pressure transducer PT (Omega, PX309-001G5V)와 탈부착이 용이하도록 하였다. 따라서 진동 실험 중 네 군데의 다른 위치에서 공극 수압을 측정하였다. Pressure transducer를 구동하기 위한 DC supply

(Agilent) 및 측정된 공극 수압 값을 컴퓨터에 저장하기 위한 Data logger (Agilent, 37320)가 사용되었다. 그림 6-2에서 보이는 바와 같이, 셀 앞쪽에 네 개의 투명한 튜브를 pressure transducer가 연결된 같은 높이에 연결하여 내부의 수압을 시각적으로 확인할 수 있도록 하였다.

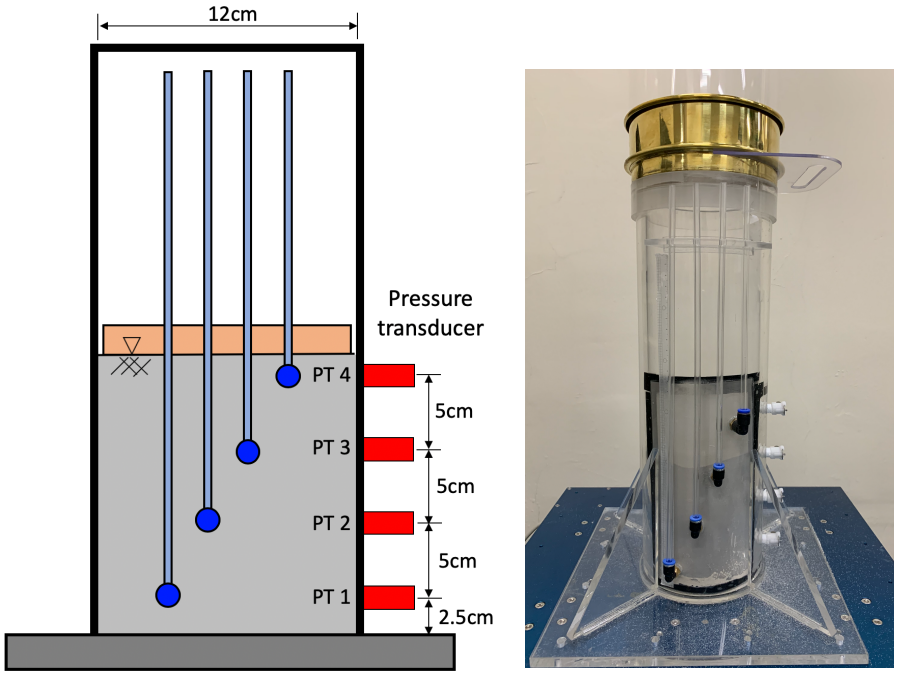


그림 6-2. 과잉공극 수압 측정용 셀 및 모래 강사 장비

제작된 셀은 축소모형으로서, 2016년 9월 경주 및 2017년 11월 포항 지진파를 입력하면 과잉공극 수압이 관찰되지 않았다. 따라서 최대 가속도를 확인한 바, 경주 지진의 경우 순간 최대가속도는 0.496g (울산 기상청 관측소 측정), 포항 지진의 경우는 0.306g (포항 기상청 관측소 측정)으로 나타났다. 따라서, 진동대에 입력된 진동 변수는 7㎜ 진폭의 정현파를 사용하였고, 주파수는 2㎐~5㎐를 사용하여, 순간 최대가속도는 0.113~0.704g로 입력되어 경주와 포항 지진파의 PGA를 포함하는 값을 사용하였다.

6.3 과잉공극 수압 - 포화 시료

여러 진동 조건에서 실험을 실시하여 과잉간극 수압의 발달정도를 측정하였다. 먼저, 모래는 7호 표준사를 사용하였으며, 실험셀 내부에 물을 먼저 채운후, 최대한 느슨한 상태의 시료를 얻기 위하여, 그림 6-2 우측에 보이는 강사 장비를 이용하여, 모래를 투하하였다. 모래 투하 후, 시료 표면에 구멍이 뚫린 플라스틱 디스크 형태의 원판을 덮어, 진동에 따른 시료의 과도한 변형을 방지하였다.

시료를 제조한 후, 진동을 가하기 전에는, 투명 튜브에서 보이는 물기둥의 높이는, 실험셀 내부에 있는 시료의 수위와 동일하였다. 또한, pressure transducer에서 측정되는 수압과 물기둥의 높이는 동일함을 확인하였다.

진동대를 구동하기 위한 input 조건은 정현파(sinusoidal wave)를 사용하였으며, 진폭은 0.7㎝, 진동수는 2㎐, 3㎐, 4㎐, 5㎐를 각각 사용하였다. 진동 주기에 따른, 간극 수압의 발달을 아래 그림 6-3과 같이 확인할 수 있었다. 초기 압력게이지에서 측정되는 수압은 세 가지 실험 모두 동일하게 측정되었으며, 진동이 가해 진 직후부터 간극 수압의 상승을 확인할 수 있다. 특히 3㎐, 4㎐, 5㎐ 실험의 경우, 진동이 시작된 후, 간극 수압이 점진적으로 증가해서 약 5~6초후에는 발달된 간극 수압이 최대치에 도달하고, 이후에는 진동이 계속되더라도, 점차적으로 발달된 간극 수압이 소산되는 경향을 보였다. 또한 진동수가 증가할수록 측정되는 압력값에 노이즈도 증가함을 확인할 수 있다.

시간 1초간의 압력 평균값을 구하여, 노이즈를 제거한 후, 초기 압력과 최대 압력과의 차이를 계산하여, 발달된 최대 간극 수압을 아래 그림 6-4에 표현하였다. 그림 6-3에서 유추할 수 있듯이, 진동수가 증가함에 따라서 발달되는 과잉 간극 수압의 크기도 증가하였고, 또한, 시료의 각 높이별 간극 수압 간에도 차이가 점차 증가함을 확인할 수 있다.

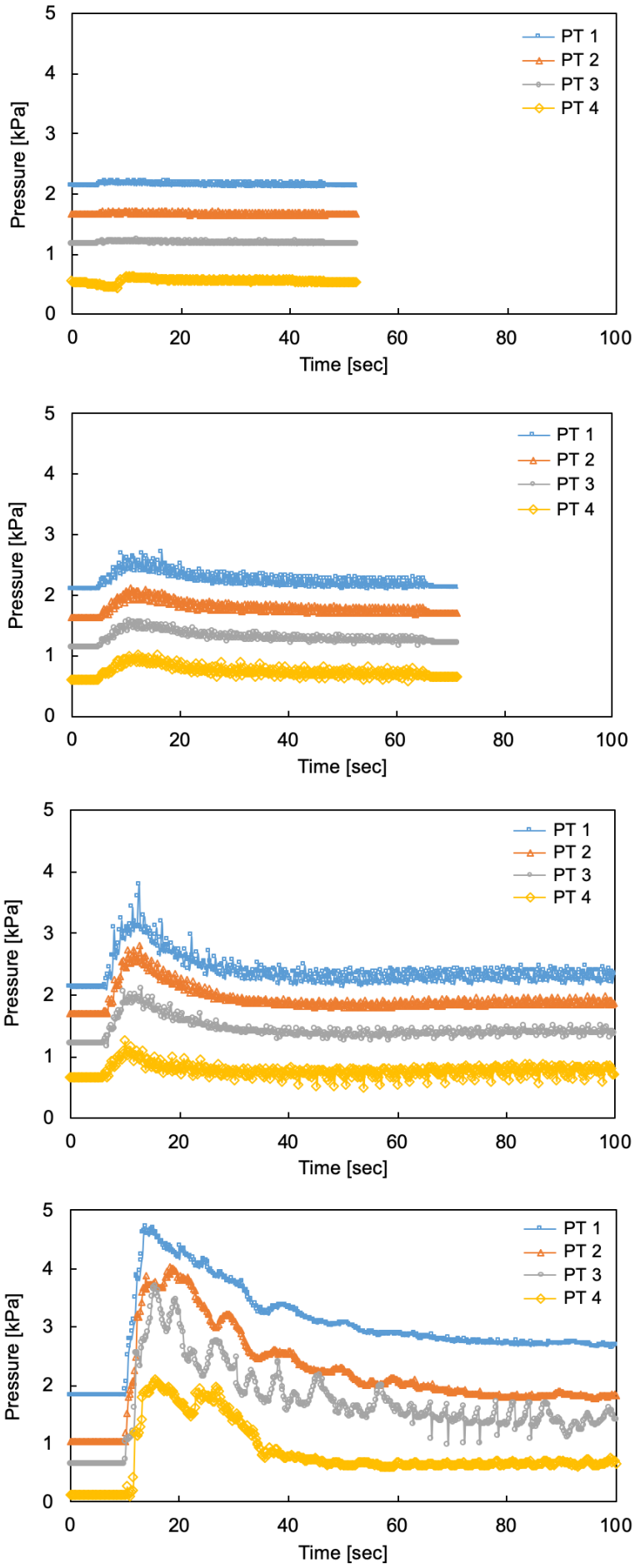


그림 6-3. 진동에 따른 과잉공극 수압 발달. (a) 진동수 2Hz. (b) 진동수 3Hz. (c) 진동수 4Hz. (d) 진동수 5Hz.

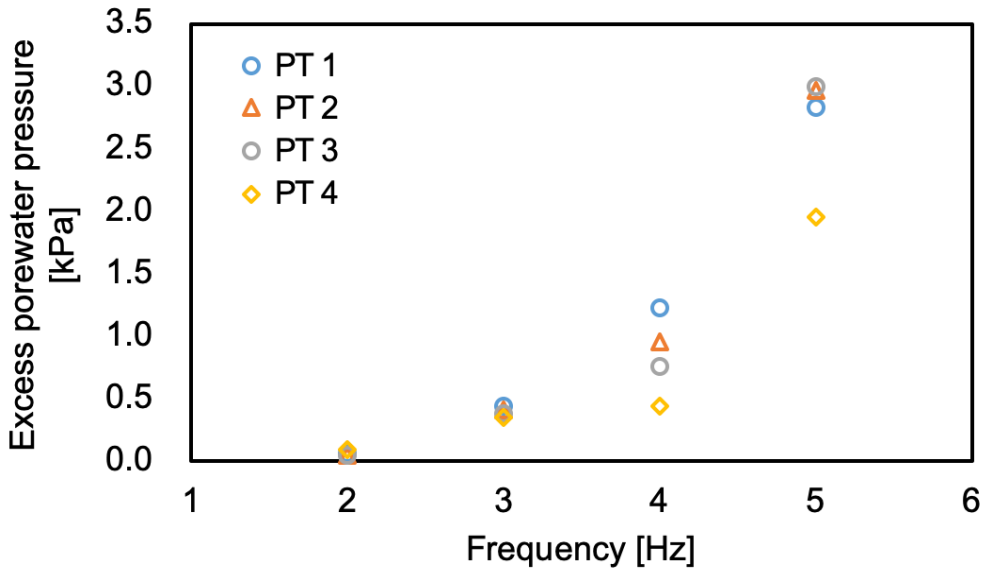


그림 6-4. 진동수에 따른 발달된 과잉간극 수압.

그림 6-4에서는 발달된 간극 수압 값을 나타내며, 이러한 값들을 초기 간극수압 값으로 나누어, 초기 간극수압 대비, 진동중 발달한 간극 수압 정도를 아래 그림 6-5와 같이 나타내었다. 위 그림 6-4의 경향과 마찬가지로 진동수가 증가할수록 증가되는 간극 수압의 정도는 점점 증가한다. 특히 pressure transducer 1번의 경우에는 시료의 제일 위 쪽에 발생되는 수압을 측정하는 것으로서, 시료 표면의 움직임에 의해 영향을 많이 받는 것을 확인할 수 있다. Pressure transducer 2번~4번 값들의 평균을 보면, 간극 수압 증가는 2Hz에서 3%, 3Hz에서 26%, 그리고 4Hz에서 60% 정도 증가했음을 확인할 수 있다. 진동수 2Hz, 3Hz, 4Hz의 경우에는, 시료의 제일 높은 위치에서 측정된 가장 낮은 간극 수압만 제외하면 나머지 pressure transducer 2, 3, 4번에서 증가된 간극 수압 발달 정도는 같은 진동수내에서는 큰 차이를 보이지 않는다.

하지만 5Hz의 경우에는 제일 바닥에 있는 pressure transducer PT1번은 156%, PT 2번은 287% 증가하였다. PT 3번과 PT 4번의 경우에는 각각 557%와 1906%증가하여, 그림 6-5에는 포함되지 않았다. 특이한 점은, 5Hz 진동수의 경우에는, 간극 수압 발달이 매우 높아서, 실험셀에 설치된 투명튜브를 통해 간극수가 넘치는 것을 관찰할 수 있었다. 이 때문에 PT 1에서 측정된 간극수압이 실제로 발생된 것보다 조금 더 측정되었을 가능성이 있다.

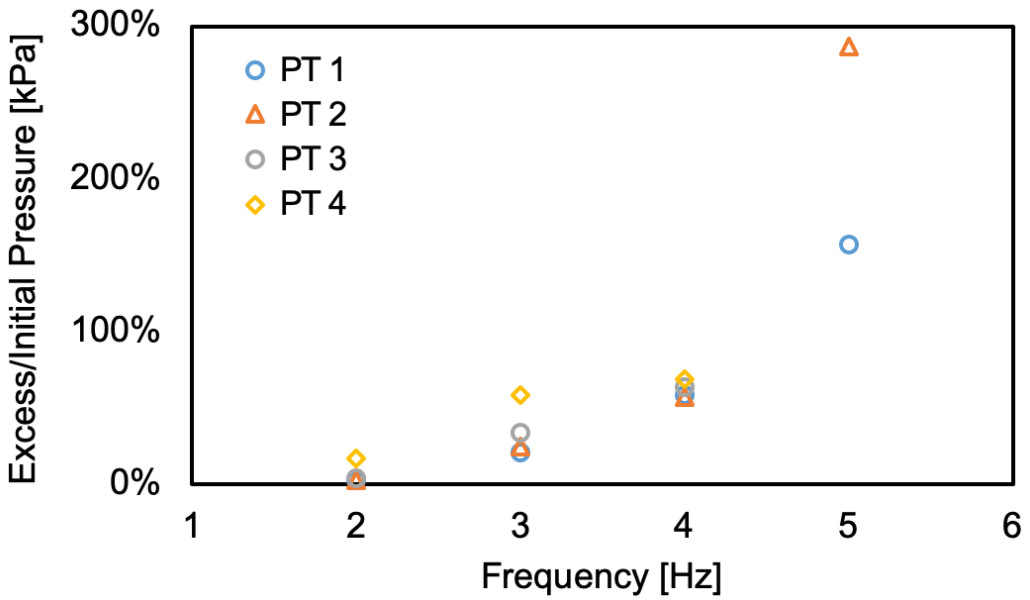


그림 6-5. 초기 간극 수압 대비 진동수에 따른 발달된 과잉간극 수압 정도

6.4 과잉공극 수압 – 박테리아 배양액 처리 시료와의 비교

박테리아의 탈질 작용에 의한 포화도 감소의 영향을 알아보기 위하여, 동일한 박테리아의 배양액을 사용하여 실험을 실시하였다. 탈질작용 박테리아(paracoccus denitrificans)를 2장에서 설명된 방법으로 배양을 실시하였다. 이후 동일한 실험셀 2개를 준비하여, 1개의 실험셀은 순수물을 사용하여 시료를 만들고, 다른 1개의 실험셀에는 3회에 걸쳐서 활성화된 박테리아 배양액을 사용하여 시료를 조성하였다. 시료 조성 직후, 비닐 커버를 설치하여, 간극수의 증발을 억제하였다.

이후 두 실험셀 모두 온도 30도 조건의 오븐에 넣어, 3일 동안 박테리아 용액으로 조성된 시료내의 탈질 작용을 유도하였다. 앞서 2장에서의 시약병 실험에서는 배양액 조성 후 약 60시간 후에는 기체 발생이 완료되는 것으로 파악되어서, 본 실험에서는 72시간의 박테리아 활동 기간을 허용하였다. 3일후, 박테리아 용액으로 조성된 시료에서는 투명한 실험셀 벽면을 통해 기체 발생이 관찰되었으며, 발생된 기체가 모래 시료 내에 갇혀 있음으로 인해서, 박테리아의 용액으로 조성된 시료의 내부 수위는 초기 시료 조성 직후보다 약 2㎝정도 상승하였다.

두 시료 모두 진폭 0.7㎝와 진동수 4㎐를 사용하여 진동시키면서 간극 수압의 변화를 측정하였다. 그림 6-6에서 보이는 바와 같이, 순수 물로 처리된 시료는 진동을 가한 직후부터 간극 수압의 상승에 관찰되었다. 발달된 간극 수압은 초기 간극 수압 대비 60%이상의 간극 수압이 발생되었지만, 박테리아로 처리된 시료의 경우에는, 진동으로 인한 시료의 출렁거림으로 인해서 간극 수압의 변동만이 관찰될 뿐, 점진적으로 증가하는 경향은 관찰되지 않았다.

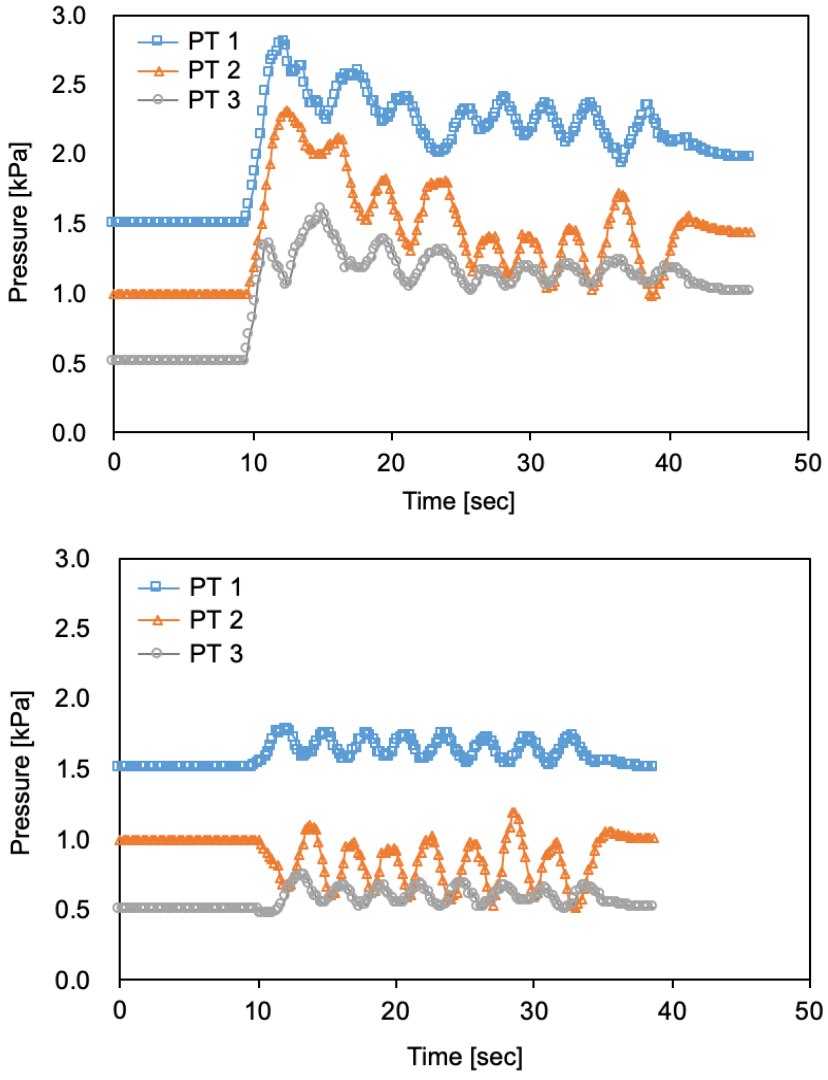


그림 6-6. 간극 수압 발달 정도. (상) 순수물을 사용하여 조성된 시료의 거동. (하) 박테리아 배양액을

사용하여 조성된 시료의 거동.

그림 6-6에서 측정된 간극 수압을 사용하여, 그림 6-7에서와 같이 발달된 과잉간극 수압을 순수물을 사용한 시료와 박테리아 배양액을 사용한 시료를 서로 비교하였다. 그림 6-7 위쪽 그림은 발생된 간극 수압의 절대값을 나타낸다. 박테리아 배양액을 사용한 시료에서는 순수물을 사용한 시료 대비, 최대 15%의 과잉간극 수압만이 발생되었다.

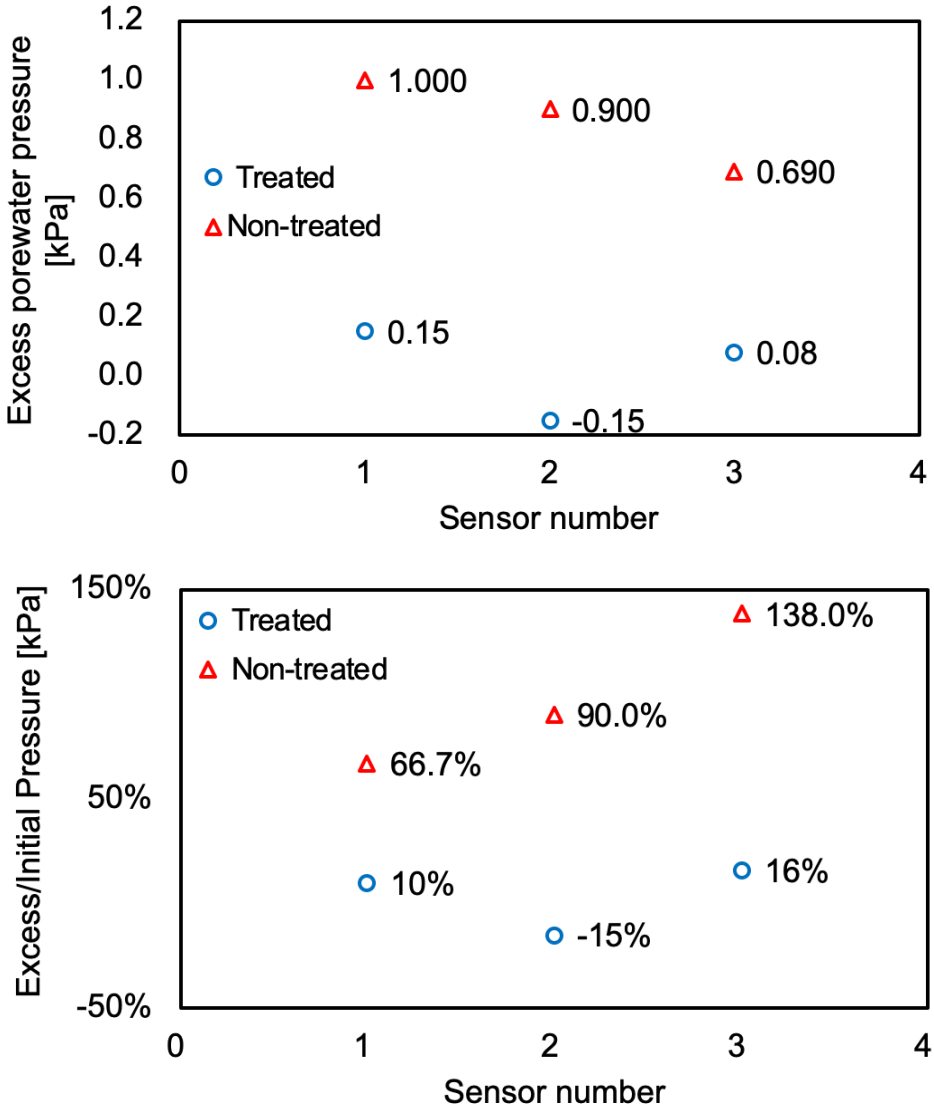


그림 6-7. 간극 수압 발달정도 비교. (상) 발생된 절대 간극 수압. (하) 초기 간극 수압 대비 발생된 간극 수압 정도

◯ 연구 개발 성과

논문 게재

SCI논문 - Published/Accepted

[1] Zheng, X. and Jang, J. (2019) Impacts of wettability on immiscible fluid flow pattern-Microfluidic chip experiment, *China Petroleum Processing and Petrochemical Technology*, 21(1), 80-89.

[2] Mahabadi, N., Dai, S., Seol, Y., and Jang, J. (2019), Impacts of hydrate saturation on water permeability in hydrate-bearing sediments, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 174, 696-703.

[3] Kim, J.-Y., Jang, J., and Yun, T.S. (2019), Effect of input signal type and time delay in sensors on wave velocity in rock specimens, *Engineering Geology*, 260, 105225.

[4] Song, J.Y., Sim, Y., Jang, J., Hong, W.-T., and Yun, T.S. (2019), Near-surface soil stabilization by enzyme-induced carbonate precipitation for fugitive dust suppression, *Acta Geotechnica*, In press.
[5] Kim, K., Jang, J., Kim, K.Y., and Yun, T.S. (2020), Characterization of anisotropic nature of cleavage planes in granitic rock, *Engineering Geology*, 265, 105432.

SCI논문 - under review

[6] Song, J.Y., Sim, Y., Yeom, S., Jang, J., and Yun, T.S. (2019), Stiffness loss in enzyme-induced carbonate precipitated sand, *Geomechanics and Engineering*, under 2nd review.
[7] Mahabadi, N., van Paassen, L., Battiato, I., Yun, T.S., Choo, H., and Jang, J. (2020), Impact of pore-scale characteristics on immiscible fluid displacement, *Geofluids*, submitted.

SCI논문 - in preparation

[8] Han, J., Batista, R., Kim, D., Park, T., Kwon, T.-H., Yun, T.S., and Jang, J., Evolution of gas generation in pore space via denitrification process.
[9] Han, J., Batista, R., Kim, D., Kwon, T.-H., and Jang, J. The effect of grain size distribution and mean pore size of sediments on gas evolution and P-wave velocity.

국내

[1] 송준영, 하성준, 장재원, 윤태섭, EICP 방법으로 처리된 사질토의 전단 강성도 및 강도 증가 분석. 한국지반공학회지, 제출완료, 심사중
[2] 한주희, 송준영, 윤태섭, 장재원. 중랑천 바닥 박테리아를 이용한 가스방울 생성 형상 연구. 한국지반공학회, 제출 준비중.

특허

흙 입자 내에 탄산칼슘 미네랄 침전 양상을 조정할 수 있는 기술.
한양대 산학협력단 발명신고 완료. 해움특허법인 선행기술조사 완료. 추가 실험후 출원예정

○ 연구 결과

- 기술적 성과

- 다양한 영양분 주입용액의 농도와 양, 그리고 배양횟수 및 trace metal의 종류 및 양을 조절하여 최적의 배양액 배합비 산정
- 탈질작용으로 인해서 생성되는 가스방울 시각적 확인 및 3차원 시료에서 분포형태 확인
- 진동대 실험을 통해서 포화된 시료의 과잉공극 수압 발달 확인 및 불포화 시료의 공극 수압 변화 없음을 확인
- SCI논문 출판 성과: 5편 published/accepted. 2편 under review, 2편 추가 투고 준비중.
- 국내 논문 출판 성과: 1편 심사중, 1편 투고 준비중
- 특허 출원 준비 중 - 미네랄 침전 양상 조절 기술

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

핵심 성과물에 대한 목표 달성도

- 포화도 감소
  - 기체방울 생성으로 포화도 저감(2%) => 목표치 초과 달성 (8% 저감)
- 외부 하중에 대한 저항력 향상

- 미네랄 침전에 의한 전단강도 증진 목표치(5% 증가) => 목표치 초과 달성 (평균 20% 증대)

- 액상화 저항력 향상 검증
  - 외부 진동에 의한 과잉공극 수압 발달정도 저감 20% 저감
    => 목표치 초과 달성 (과잉 공극 수압 관찰 되지 않음)

2. 관련 분야 기여도

○ 기술적 측면

기후변화로 인한 극한 하중(강우, 강설, 해수면 변화)과 주기적으로 발생되는 지진 하중에 대비하기 위하여, 기존에 시공된 사회 기반 시설의 보강/보수가 필요. 본 연구의 결과로, 새로 건설되는 시설물뿐만 아니라, 기존에 건설된 시설물들의 하부 기초지반, 절토/성토 사면, 도로/철도 노반, 댐/제방, 터널, 간척지, 석탄재 매립장, 폐광산 지표침하, 누수가 예상되는 상하수도관 주변지반의 도로함몰 방지등에 널리 적용이 가능한 기술을 제공.

○ 경제적 .산업적 측면

기존의 시멘트 몰탈 그라우팅의 경우에는 시공과정에서 많은 비용과 환경오염 문제를 수반하지만, 본 연구 결과는 친환경적이며, 경제적인 방식으로 기존의 시설물들을 보수/보강하는 해법을 제공

○ 사회적 측면

사회적 재난 대비 효과 측면에서 고려해 보면, 낮은 빈도의 예상치 못함 지진 재해에 대비, 적은 비용으로도 고효율의 효과(포화도 저감에 의한 액상화 방지)를 얻을 수 있어, 이재민 발생 방지 등 사회적 안정에 파급효과가 매우 큼.

3. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)

○ 미달성된 국내논문 1편 출판은, SCI논문 추가 출판으로 대체

○ 미달성된 국내 특허 출원 1건은, 현재 변리사(해움특허법인)와 1회 미팅 후, 추가 실험 진행후 출원하는 것으로 협의.

제5장. 연구개발성과의 활용계획

○ 본 연구에서는 연구실내에서 작은 규모의 실험을 통하여, 최적의 배합비 및 기술의 실현 가능성을 검증하였음. 향수, 보다 큰 규모의 실험, 혹은 현장적용 실험이 필요함. 따라서 본 연구의 결과를 바탕으로 현장 적용을 위한 연구 제안서를 작성 예정.

○ 탈질작용을 이용한 액상화 현상 방지 기술이 현장적용 실험을 통하여 성공적으로 검증이 되면, 지진의 피해가 잦은 지역(예를 들어, 미국 동부 해안, 일본, 필리핀, 파키스탄등)에 적용이 가능. 특허 출원/등록후에 기술자문등의 형태로 수출도 가능할 것으로 사료됨.

○ 본 연구의 결과는 액상화 저항성 향상 뿐만 아니라, 다른 분야에도 적용이 가능할 것으로 예상됨. 투수계수 저감, 미네랄 침전등을 이용하여, 지반내 오염물질의 확산 방지, 비산먼지 억제, 사면 안정, 구조물 기초 지반 개량등 적용범위는 무궁무진하며, 이에 대한 케이스별 연구가 필요함.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

제2장 국내외 기술개발 현황(page 1~2) 참조

제7장. 연구개발성과의 보안등급

해당사항 없음

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 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

(1) 안전점검

(가) 연구실 일일안전점검(매일실시)

1) 점검범위 : 학부생 실습실 및 대학원 연구실(이론연구실 제외)
2) 점검시기 : 매일(단, 실습실(연구실)을 사용하지 않는 날은 제외)
3) 점검내용 : 기계, 기구, 전기, 약품, 병원체 등의 유해요소 이상유무의 일상(육안)적인 점검
4) 점검자 : 실습실 조교 및 각 연구실 안전관리담당자(책임자)
5) 점검결과 및 후속조치 사항을 기록하여 연구실 외부에 게시 및 부착

(나) 연구실 정밀안전진단

1) 점검범위 : 교내 전체 연구실
2) 점검시기 : (학사일정 고려하여 조정)
3) 점검내용 : 기계, 기구, 전기, 약품, 병원체 등의 육안 및 정밀측정기를 이용한 점검
4) 점검자 : 미래창조과학부 허가기관(입찰을 통하여 선정)

(다) 연구실 정밀안전진단 개선조치 확인점검

1) 점검법위 : 교내 이공계열 연구.실습실 전체
2) 점검시기 : 정밀안전진단실시 후 ~ 차기년도 안전진단 시 까지 지속점검 및 재개선 통보(1회 이상)
3) 점검내용 : 안전진단 미비점 개선조치 여부확인 및 피드백
4) 점검자 : 관재팀

(라) 소방정밀안전진단

1) 점검범위 : 교내 건물 전체
2) 점검시기 : 2016년 04월 중순 ~ 2016년 06월 중순
3) 점검내용 : 소방시설물 점검(설비, 펌프, 탱크, 소화기, 감지기 등)
4) 점 검 자 : 법정안전점검 전문기관

(2) 교육훈련(법정교육)

(가) 온라인 정기안전교육

1) 교육대상 : 이공계열 전체 연구활동종사자(교원, 직원, 연구원(보조원 포함), 대학원생, 학부생, 기타 실험에 참여하는 모든 자)
2) 교육주기 : 학기당 6시간(1학기 : 03월 ~ 08월, 2학기 : 09월 ~ 02월)
3) 교육방법 : 온라인 안전교육시스템 http://safetyedu.hanyang.ac.kr
4) 교육내용 : 연안법에 정하는 모든 사항(기본 6시간 + 심화 2시간)

(나) 오프라인 안전교육/훈련

1) 교육대상 : 연구실 안전책임자/담당자/연구활동종사자
2) 교육주기 : 년 1회이상(1시간 이상)
3) 교육방법 : 집체교육, 대피훈련(화학물질 방재요령, 심폐소생술 및 소화기/소화전 사용요령)

(다) 신규 연구활동종사자 교육

1) 교육대상 : 신규 연구활동종사자(신규 입학자, 복학자, 신규직원)

2) 교육시간 : (입.복학자 : 2시간, 신규채용자 : 8시간)

3) 교육방법 : 안전관리자 표준교안 작성배포 및 연구실 안전책임자(지도교수, 연구소장, 연구센터장)이 교육실시

4) 교육내용 : 표준교안 활용 및 연구프로젝트별 (사용기계, 기구, 취급물질등) 연구실 현장에 맞는 안전교육실시

(3) 연구활동종사자 건강검진

(가) 검진대상 : 유해인자178종에 노출된 연구실을 이용하는 연구활동종사자

(나) 검진시기 : 매년 1회 실시(1학기 : 4월 ~ 6월, 2학기 10월 ~ 11월)

(다) 검진방법 : 일반건강검진 및 유해인자에 따른 특수건강검진 시행

(라) 검진기관 : 산안법에 허가된 특수건강검진 전문기관(본교 대학병원)

(마) 검진형태 : 교내 출장검진(3일) 및 원내검진(미수검자 검진)

(바) 검진절차 : 유해인자 및 인원조사→검진대상자 및 유해인자 선정→검진→미수검자 추적검진→결과통보 및 의사진료

(4) 연구활동종사자 보험가입

(가) 대상범위 : 이공계열 학부생, 대학원생, 연구원(재학생/재직자)

※ 산재보험 및 사학연금 법에 의해 가입된(교원,교직원,계약직)제외

(나) 보 험 명 : 연구활동종사자 상해보험(안전공제)

대상	주관부서	갱신시기
학부생, 대학원생	관재팀	매년 06월
연구원, 연구보조원	산학협력단 연구진흥팀	매년 02월

(다) 보장내용 : 사망/휴유장해(1급시) : 100,000,000원, 상해 : 10,000,000원

(5) 2017학년도 연구실 안전 환경 개선

1) 실험종사자 건강검진 및 보험 추가가입	1. 건강검진(특수실험실) 2. 상해보험추가가입검토(특수실험실)
2) 실험실 공기질 관리, 환기	유해물질농도 측정관리, 환기대책수립
3) 실험실 환경개선공사	노후 실험실 개선공사 시행
4) 특수위험 실험실에 별도의 소화설비 설치	위험성이 큰 실험실에 별도의 특수소화 설비를 설치하여 사고 확산을 예방
5) 유기용매 보관시설 설치 및 액체질소 통합관리	1. 보관창고를 설치하여 통합관리 2. 액체질소를 시약센터에서 통합관리
6) 실험실 환경안전지침 작성	보완작성
7) 고압가스 안전관리	안전시설 설치
8) 안전보호장비 시설 보완	안전보호장비와 안전표지 설치

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분	논문명	소속 기관	역할	논문 게재지	영향력 지수	논문 게재일	사사 여부	특기 사항
1	논문	Impacts of wettability on immiscible fluid flow pattern - Microfluidic chip experiment	한양대	교신 저자	China Petroleum Processing & Petrochemical Tech.	0.600	2019.3.30	단독	SCI
2		Impacts of hydrate saturation on water permeability in hydrate-bearing sediments		교신 저자	Journal of Petroleum Science and Eng.	2.886	2019.3	중복	SCI
3		Effect of input signal type and time delay in sensors on wave velocity in rock specimens		참여 저자	Engineering Geology	3.909	2019.10.3	중복	SCI
4		Near-surface soil stabilitzation by enzyme induced carbonate precipitation for fugitive dust suppression		참여 저자	Acta Geotechnica	3.247	2019.11.21 .(온라인)	중복	SCI
5		Characterization of anisotropic nature of cleavage planes in granitic rock		참여 저자	Engineering Geology	3.909	2020.2	중복	SCI

제11장. 기타 사항

- 없음

제12장. 참고 문헌

Al Qabany, A., Soga, K., and Santamarina, J. C. (2011), Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(8), 992-1001.

Chang, I., Prasidhi, A. K., Im, J., Cho, G.-C. (2015), Soil strengthening using thermo-gelation biopolymers, *Construction and Building Materials*, 77, 430-438.

Cui, M.-J., Zheng, J.-J., Zhang, R.-J., Lai, H.-J., Zhang, J. (2017), Influence of cementationlevel on the strength behaviour of bio-cemented sand, *Acta Geotechnica*, 12(5), 971-986.

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, 197-210.

Feng, K., Montoya,B. (2015), Influence of confinement and cementation level on the behavior of microbial-induced calcite precipitated sands under monotonic drained loading, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(1), 04015057.

Gao, Y., Hang, L., He, J., Chu, J. (2019), Mechanical behaviour of biocemented sands at various treatment levels and relative densities, *Acta Geotechnica*, 14(3), 697-707.

Hamdan, N., Kavazanjian Jr, E. (2016), Enzyme-induced carbonate mineral precipitation forfugitive dust control, *Géotechnique*, 66(7), 546-555.

Kalantary, F., Kahani, M. (2019), Optimization of the biological soil improvement procedure, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(8), 4231-4240.

Karol, R. H.(2003). Chemical grouting and soil stabilization, revised and expanded. CRC Press.

Knorr, B. (2014). Enzyme-induced carbonate precipitation for the mitigation of fugitive dust. Arizona State University.

Lee, J.-S., Santamarina, J. C. (2005), Bender elements: performance and signal interpretation, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 131(9), 1063-1070.

Lenormand, R., Touboul, E., and Zarcone, C. (1988), Numerical models and experiments on immiscible displacements in porous media, *Journal of Fluid Mechanics*, 189, 165-187.

Lin, H., Suleiman, M. T., Brown, D. G., Kavazanjian Jr, E. (2015), Mechanical behavior of sands treated by microbially induced carbonate precipitation, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(2), 04015066.

Liu, H., Valocchi, A.J., Knag, Q., and Werth, C. (2013), Pore-scale simulations of gas displacing liquid in a homogeneous pore network using the Lattice Boltzmann method, *Transport in Porous Media*, 99(3), 555-580.

Lockner, D.,Byerlee, J., Kuksenko, V., Ponomarev, A., Sidorin, A. (1991), Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite, *Nature*, 350, 39-42.

Mahabadi, N., Zheng, X., Yun, T.S., van Paassen, L., and Jang, J. (2018), Gas bubble migration and trapping in porous media - Pore-scale simulation, J*ournal of Geophysical Research - Solid Earth*, 123(2), 1060-1071.

Sherwood, P.(1993). Soil stabilization with cement and lime.

Shi, C., Jiménez,A. F., Palomo, A. (2011), New cements for the 21st century: The pursuit of analternative to Portland cement, *Cement and concrete research*, Vol.41, No.7, pp.750-763.

Silin, D. and Patzek, T. (2006), Pore space morphology analysis using maximal inscribed spheres, *Physica A*, 371, 336-360.

Somani, R.S., Patel, K.S., Mehta, A.R., and Jasra, R.V. (2006), Examination of the polymorphs and particle size of calcium carbonate precipitated using still effluent of soda ash manufacturing process. Industrial and Engineering Chemistry Research, 45(15), 5223-5230.

Van Paassen, L.A., Daza, C. M., Staal, M., Sorokin, D. Y., van der Zon, W., van Loosdrecht, M.C. (2010), Potential soil reinforcement by biological denitrification, *Ecological Engineering*, Vol.36, No.2,pp.168-175.

Wong, T.-F.(1982), Micromechanics of faulting in Westerly granite, *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*, Vol.19, No.2, pp.49-64.

Yang, J., Luo, X.(2018), The critical state friction angle of granular materials: does it dependon grading?, *Acta Geotechnica*, Vol.13, No.3, pp.535-547.

Zhang, C., Oostrom, M., Wietsma, T.W., Grate, J.W., and Warner, M.G. (2011), Influence of viscous and capillary forces on immiscible fluid displacement: pore-scale experimental study in a water-wet micromodel demonstrating viscous and capillary fingering, *Energy & Fuels*, 25(8), 3493-3505.

Zhu, T., Dittrich,M. (2016), Carbonate precipitation through microbial activities in natural environment, and their potential in biotechnology: a review, *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, Vol.4, pp.4.

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.