creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사 학위논문

간척지 투수성 개선을 위한 **Bottom Ash**와 굴패각의 활용

Use of Bottom Ash and Oyster Shell
to Improve Permeability for Reclaimed land

2019년 2월

서울대학교 대학원
생태조경 · 지역시스템공학부
지역시스템공학 전공
김 태 진

간척지 투수성 개선을 위한 Bottom Ash와 굴패각의 활용

Use of Bottom Ash and Oyster Shell to Improve Permeability for Reclaimed land

지도교수 손 영 환

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2019년 1월

서울대학교 대학원

생태조경 · 지역시스템공학부

지역시스템공학 전공

김 태 진

김 태 진의 공학석사 학위논문을 인준함

2019년 1월

위 원 장 이 인 복 (인)

부위원장 손 영 환 (인)

위 원 최 원 (인)

국문초록

최근 농지 면적 감소로 인해 국내 농지 면적의 약 10%을 차지하고 있는 간척지의 다각적인 활용에 대한 필요성이 증대되고 있다. 간척지 이용의 가장 중요한 문제는 간척지 토양의 배수 성능과 염분 농도의 조절이다. 간척지는 바다와 가까워 지하수위가 높고 해수의 침투로 인하여 지하수의 염분 함량이 매우 높기 때문에 토양의 염분 농도가 높은 특성이 있다. 또한 주로 세립토로 이루어져 있어 배수 성능이 매우 불량하기 때문에 제염에 어려움이 있으며 염해피해가 빈번히 발생하고 있다. 따라서 간척지를 효율적으로 이용하기 위해서는 배수 성능의 개선과 제염을 통한 관리가 필수적이다. 간척지 토양의 제염은 토양 개량제를 이용하여 토양의 투수성을 증진시키거나, 배수시설을 설치하는 등의 방법을 통해 수행되고 있다.

한편 도시화, 산업화에 따라 다양한 산업 부산물이 대량으로 발생하고 있으며, 이를 재활용하는 것은 천연자원의 절약과 산업부산물의 친환경적 처리가 가능하다는 장점이 있다. 국내 화력발전소에서 산업 부산물인 석탄회가 매년 다량 발생하여 회사장에 매립되고 있으며, 굴, 조개류 등의 패각 또한 다량 방치되어 환경문제를 발생시키고 있다. 석탄회 중 Bottom ash는 입자가 크고 다공질이기 때문에 투수성이 높아 간척지 토양과 혼합 시 투수성의 개선을 기대할 수 있으며, 패각은 주로 석회질로 구성되어 토양 개량 시 사용되는 석회와 유사한 효과를 나타낼 수 있다.

따라서 본 연구에서는 Bottom ash와 굴패각을 간척지 토양과 혼합하여 투수성 개선 효과를 확인하고 혼합토를 이용하여 간척지 배수 성능을 개선하기 위한 실험 및 모델링을 수행하였다. 혼합토는 재료의 혼합비와 특성, 입경 등에 따라 투수성이 변화하므로 혼합비와 입경을 조절하여 간척지 토양의 투수성 변화를 확인하였다. 또한 이를 통해 간척지 토양의 제염을 위한 혼합비와 이용 방법을 제시하고 모델링을 수행하여 제염 효과를 분석하였다. 시험 결과를 통해 입경과 재료의 특성에 따른 혼합토의 투수계수 변화를 확인하였으며, 이를 이용한 간척지 배수 시설 모

델링 결과 산업부산물을 이용한 배수시설이 간척지 토양의 배수 및 제염 효과를 큰 폭으로 향상시키는 것으로 나타났다.

주요어 : 간척지, Bottom ash, 굴패각, 혼합토, 토양 투수성, 제염
학 번 : 2017-23927

목 차

제 1 장 서 론 ····· 1
제 2 장 연구사 ····· 3
2.1 간척지 토양 ····· 3
2.2 Bottom ash와 굴패각의 재활용 ····· 3
2.3 혼합토의 투수성 ····· 5
제 3 장 배경이론 ····· 6
3.1 간척지 토양의 개량 방법 ····· 6
3.2 흙의 투수계수 ····· 7
3.3 토양 내 염분 이동 ····· 9
제 4 장 재료 및 방법 ····· 11
4.1 실험 재료 ····· 11
4.1.1 물리적 특성 ····· 13
4.1.2 화학적 특성 ····· 14
4.2 실험 방법 ····· 15
4.2.1 혼합비 ····· 15
4.2.2 변수위 투수 시험 ····· 15
4.2.3 혼합토의 물성 시험 ····· 17
4.2.4 모델링 ····· 18
제 5 장 결과 및 고찰 ····· 20
5.1 실험 결과 ····· 20
5.1.1 다짐 시험 ····· 20
5.1.2 투수 시험 ····· 25
5.1.3 입도 분석 ····· 28
5.1.4 액성 한계 시험 ····· 31

5.2 실험 결과 분석 ····· 34
5.2.1 선형 회귀분석 ····· 34
5.2.2 비선형 회귀분석 ····· 39
5.3 모델링 ····· 45
5.3.1 모델링 소프트웨어의 검증 ····· 45
5.3.2 모델링 단면 설계 ····· 47
5.3.3 모델링 결과 ····· 52
제 6 장 요약 및 결론 ····· 59

참고문헌 ····· 61
부 록 ····· 66
Abstract ····· 81

표 목 차

Table 3.1 Permeability coefficient according to soil types 7
Table 4.1 Physical properties of experimental materials · 14
Table 4.2 Chemical properties of experimental materials 14
Table 4.3 Mixing materials and mixing ratio ····· 15
Table 5.1 Compaction test results of mixed soil ····· 22
Table 5.2 Void ratio of mixed soil ····· 24
Table 5.3 Permeability test results of mixed soil ····· 25
Table 5.4 D_{10}, D_{15}, D_{30}, D_{50}, D_{60} of mixed soil ····· 28
Table 5.5 Fall cone test results of mixed soil ····· 31
Table 5.6 Modification of fall cone test results of mixed soil ····· 32
Table 5.7 All experiment data ····· 37
Table 5.8 Correlation analysis result ····· 38
Table 5.9 Soil contamination and CEC of bottom ash mixture ····· 47
Table 5.10 Soil contamination and CEC of oyster shell mixture ····· 48
Table 5.11 Modeling case settings ····· 50
Table 5.12 Marks of graphs for each case ····· 52
Table 5.13 Modeling results (upper soil layer, depth = 0 - 1m) ····· 57
Table 5.14 Modeling results (lower soil layer, depth = 1 - 2m) ····· 58

그 림 목 차

Fig. 3.1 Structure of clay ····· 9
Fig. 4.1 Grain size distribution of reclaimed soil ····· 11
Fig. 4.2 Experimental material ····· 12
Fig. 4.3 Sampling location of experimental materials ····· 12
Fig. 4.4 Grain size distribution of experimental materials 13
Fig. 4.5 Falling head permeameter for soil ····· 16
Fig. 4.6 Fall cone test apparatus ····· 18
Fig. 5.1 Compaction curve of mixed soil ····· 22
Fig. 5.2 Maximum dry density according to mixing ratio ····· 23
Fig. 5.3 Void ratio according to mixing ratio ····· 24
Fig. 5.4 Void change in fine-coarse mixed soil ····· 25
Fig. 5.5 Permeability according to mixing ratio ····· 26
Fig. 5.6 Grain size distribution results ····· 30
Fig. 5.7 Liquid limit according to mixing ratio ····· 31
Fig. 5.8 Modified liquid limit according to mixing ratio 33
Fig. 5.9 Linear regression analysis using D_{30} and void ratio(e) ····· 35
Fig. 5.10 Linear regression analysis using D_{30} and void ratio($\frac{e^3}{1+e}$) ····· 36
Fig. 5.11 Non-linear regression analysis using void ratio(e) ····· 40
Fig. 5.12 Relationship between D_{30} and permeability coefficient ····· 41

Fig. 5.13 Relationship between LL and permeability coefficient ····· 42
Fig. 5.14 Non-linear regression analysis using void ratio(e) and LL ····· 43
Fig. 5.15 Non-linear regression analysis using void ratio(e), LL and contents of oyster shell ····· 44
Fig. 5.16 CyberScan PC300 ····· 45
Fig. 5.17 Verification results of modeling software ····· 46
Fig. 5.18 Design of modeling section ····· 51
Fig. 5.19 Modeling results (upper soil layer, depth = 0 - 1m) ····· 52
Fig. 5.20 Modeling results (lower soil layer, depth = 1 - 2m) ····· 54

제 1 장 서론

최근 도시화, 산업화에 따른 농지 면적 감소로 인해 국내 농지 면적의 약 10%를 차지하고 있는 간척지의 다각적인 활용에 대한 필요성이 증대되고 있다. 간척지를 농지로 이용할 경우 가장 중요한 문제는 간척지 토양의 배수 성능과 염분의 함량이다. 작물의 재배에는 토양의 함수비, 토양에 포함된 양이온의 조성 등이 문제가 될 수 있는데, 간척지 토양의 경우에는 작물 재배에 불리한 성질을 가지고 있다.

간척지 토양은 주로 세립토로 이루어져 있어 배수 성능이 매우 불량하고 바다와 가까워 지하수위가 높으며 염분이 높은 지하수의 침투로 인하여 염분의 함량이 매우 높다. 이로 인하여 제염에 오랜 시간이 걸리고, 제염 이후에도 염분의 상승으로 인한 재염화현상 등에 의해 간척지 관리 및 이용에 많은 어려움을 겪고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해서는 담수 공급에 의한 제염, 명거 및 암거배수와 같은 배수방법의 개량, 토양 개량 등의 다양한 처리와 지속적인 관리가 필요하다. 특히 토양 개량은 토양의 물리적 성질을 개선하여 즉각적이고 지속적인 효과를 기대할 수 있다.

간척지 토양의 개량은 주로 지반의 투수성을 개선하는 데에 목적이 있다. 지반의 투수성이 증가하면 염수의 하향 침투 및 수평 이동이 원활해지기 때문에 제염 효과가 증가한다. 또한 세립분이 많을수록 모세관 현상이 촉진되어 재염화 현상이 활발해 지는데, 토양 개량을 통해 입도분포를 개선한다면 이를 억제할 수 있다. 마찬가지로 지하수위가 높을수록 모관 상승이 빠르기 때문에 재염화 현상에 큰 피해를 입을 수 있으며, 배수시설을 이용하여 지하수위를 낮추는 것이 이에 대한 예방책이 될 수 있다.

본 연구에서는 간척지 토양의 제염 효율 증가 및 재염화 현상 억제를 위하여 산업부산물인 Bottom ash와 굴패각을 다양한 방법으로 이용하고자 하였다. Bottom ash와 굴패각은 대량으로 발생하고 있으며 이를 재활용하는 것은 천연자원의 절약, 산업부산물의 처리 등 경제적·환경적

이점을 동시에 가져올 수 있다.

Bottom ash는 석탄화력발전소에서 전력생산 시 발생하는 부산물로 Boiler 하부에 낙하되어 괴상으로 응집된다. 이는 석탄연소부산물 발생량의 약 25%를 차지하며, 한국에서는 연간 1.1 - 1.8 million ton에 달하는 Bottom ash가 발생하고 있다. 이 중 약 60%가 매립되어 처리되기 때문에 여러 환경 문제를 발생시키고 있다(Koh et al., 2010; Yun, 2015). 이를 파쇄하여 이용할 경우 입경이 큰 Bottom ash가 간척지 토양과 혼합되어 토양의 입도를 개선할 수 있으며, 이에 따른 투수성 향상을 기대할 수 있다. 또한 Bottom ash 입자는 내부에 많은 공극이 형성되어 있어 투수성 개선에 유리한 특성을 가지고 있다.

굴패각은 재활용률이 낮아 매립되거나 해안에 방치되어 큰 환경문제를 일으키고 있다. 해양수산부 2017년 통계에 따르면, 한국에서 연간 약 28만톤의 굴이 생산되고 있으며 이에 따라 연간 20만톤 내외의 굴패각이 발생되고 있다. 굴패각은 칼슘 성분 함량이 높아 토양 개량을 위해 사용되는 석회질 비료나 칼슘계 토양 개량제와 유사한 효과를 나타낼 수 있을 것으로 기대된다.

재료 혼합 시 입경과 혼합비에 따라 간척지 토양의 투수성 개선 효과가 달라질 수 있으며, 처리하는 방법에 따라 제염 효과에 상이한 결과를 가져올 수 있다. 따라서 본 연구에서는 혼합 재료의 입경과 혼합비에 따른 간척지 토양의 물리적 성질 변화를 분석하였고 이를 이용한 관계식을 도출하여 투수성 개선 효과를 분석하였다. 또한 투수성 개선에 의한 제염효과를 검증하고 효율적인 간척지의 제염 방안을 제시하기 위하여 모델링을 수행하였으며 Bottom ash와 굴패각을 이용한 간척지의 개량 방법을 제안하였다.

제 2 장 연구사

2.1 간척지 토양

우리나라 간척지는 식량증산을 목적으로 조성되어 벼 재배가 주를 이루고 있었지만, 최근에는 고소득 작물 생산기반을 통한 농업의 경쟁력 강화를 위해 밭작물 위주로 변화가 시도되고 있다(농촌진흥청, 2014). 하지만 벼 재배 시에는 담수관개를 통해 작물 생육 중 제염이 가능한 반면, 밭작물 재배 시에는 제염이 어렵고 재염화현상이 발생하기 쉽다.

이에 따라 작물 재배 시 간척지 염해 피해를 파악하고 최소화하기 위하여 주로 제염 (Son et al., 2016; Kim et al., 2015) 및 재염화 (Seo, 2011; Ryu et al., 2014), 간척지 토양 내 양이온의 영향 (Lee et al., 2003; Ryu et al., 2010) 등에 대한 연구가 수행되고 있다.

또한 간척지 토양을 개량하기 위하여 사용되는 토양 개량제에 관한 연구는 왕겨·볏짚 등의 유기물질, 벤토나이트·제올라이트 등의 광물질, 합성 고분자 물질 등 다양한 재료에 대하여 수행되고 있다(Son, 2014; Bang, 2006; Kim et al., 2005; Lee et al., 2016). 이러한 연구는 주로 토양 개량제의 처리에 따른 식물 생장성 및 토양의 이온 조성 변화에 초점을 맞추고 있으며 다양한 토양 개량제가 간척지 토질 개선에 효과가 있음을 입증하고 있다.

2.2 Bottom ash와 굴패각의 재활용

석탄 화력 발전소에서 산업 부산물로 발생하는 Bottom ash는 연간 약 200만톤 이상이 발생하여 주로 매립장에 매립되어 왔으며, 최근에는 다양한 연구를 통해 재활용률이 높아지고 있다. Bottom ash의 재활용은 건설재료로서의 이용이 대부분이며 이에 대한 연구가 수행되어 왔다.

Bottom ash를 콘크리트 골재의 대체재로 이용할 경우 물/시멘트/Bottom ash의 혼합비를 제시하여 강도 및 유동성 측면에서 충분한 성능을 가질 수 있도록 하였으며 (Kang et al., 2011; Bai et al., 2005) 혼합비에 따른 강도 특성 변화를 규명 (Andrade et al., 2007; Andrade et al., 2009; Mohd et al., 2010) 하였다.

Kim et al. (2015)는 성토재료로서 Bottom ash의 활용을 위하여 파쇄에 따른 투수계수의 변화를 확인하였으며, Bottom ash가 높은 투수성을 가지고 있음을 확인하였다. Bottom ash의 높은 투수성을 활용하기 위하여 Oh et al. (2013)과 Kim et al. (2014)은 경량 식생블럭에 관한 연구를 수행하였으며 Koh et al. (2004)는 석탄회를 연직배수공법의 대체재로서 이용한 연구를 수행한 바 있다.

한편 굴패각은 연간 약 28만톤의 굴이 생산되고 있으며 (해양수산부, 2017), 이에 따라 20만톤 내외의 굴패각이 발생하고 있다. 굴패각 발생량의 약 75%는 비료, 사료 등으로 재활용되고 있으나 처리 공정의 복잡성, 수요 부족 등으로 인하여 재활용률이 감소하고 있다. (Jeon et al. 2019)

토질·지반 분야에서 굴패각 재활용에 대한 연구는 Bottom ash에 비하여 비교적 미흡한 상태이나, 건설 재료로서 콘크리트 혼합재와 토양 혼합 시의 강도 및 투수특성의 변화와 관련한 연구가 꾸준히 수행되고 있다.

굴패각을 콘크리트의 잔골재 대체재로 이용하기 위한 연구로 Lee et al. (2007)과 Koo (2008)은 철근 콘크리트의 강도 및 거동을 분석하였고 Mikami (2007)은 수중 다짐말뚝의 채움재로 굴패각-모래 혼합토를 이용한 연구를 수행하였다. 또한 굴패각의 재활용을 위해서는 파쇄가 필요한데, Yoon et al. (2001)과 Yoon et al. (2004)은 파쇄 정도에 따른 물리적 성질과 재료의 거동 변화를 분석하여 실험을 통해 모래와 유사한 값을 얻었고 건설 재료로서 이용될 수 있을 것으로 기대하였다.

한편 토양과 굴패각의 혼합에 관한 연구는 Lee et al. (2001)이 굴패각 혼합토의 압밀 및 투수특성을 분석하였고 Son et al. (2003)이 굴패각 혼합토의 전단강도 특성을 분석한 바 있으나, 굴패각을 비료로 사용하여

토양의 화학적 성질을 개선하기 위한 연구가 대부분로 물리적 성질에 대한 연구는 부족한 상태이다.

2.3 혼합토의 투수성

토양의 투수성은 입도분포, 간극비, 밀도, 포화도, 공극의 크기 및 형상, 흙 입자의 형상, 흙의 구조 등 매우 다양한 요인에 의하여 영향을 받는다. 따라서 흙의 투수계수를 정확하게 예측하거나 계산하는 것은 매우 어려우며 투수계수 예측식을 개발하고 적용하기 위한 많은 연구가 수행되어왔다.

Hazen (1892)에 의하여 처음으로 투수계수를 산정하는 경험식이 제안되었고 이후로 Kozeny (1927)가 제안하고 Carman (1937, 1956) 에 의하여 수정된 Kozeny-Carman 식 (KC eq.)이 제안되어 현재 가장 많이 사용되고 있다. KC eq.는 간극비, 물의 점성, 간극비 등을 고려하여 투수계수를 예측한다.

KC eq.는 비소성 흙에 유효하며 점토에는 부적합하다고 알려져 있으나, Chapuis and Aubertin (2003) 는 다양한 연구자들의 많은 실험 결과를 종합하여 확인한 결과 KC eq.이 10^{-1} - 10^{-11} m/s 범위에서 투수계수를 잘 예측하는 것으로 확인하였으며 오차의 범위는 1/3 - 3 배로 산정되었다.

한편 비표면적을 측정하기 어려운 경우 KC eq.을 변형하여 특정 경우에 대한 투수계수 예측식을 제시하는 연구가 수행되고 있다. Park et al. (2006), Lim (2010) 등은 입도분포만을 이용한 투수계수 예측식을 제안하였다. Chung et al. (2018)은 세립토와 조립토 혼합 시 혼합비에 따른 최대건조밀도와 투수계수를 예측하는 방법을 제안하였고 Costa (2006)는 공극의 프랙탈 지수를 이용하여 Kozeny 계수와 프랙탈 지수만을 이용한 예측식을 제시하였다.

제 3 장 배경 이론

3.1 간척지 토양의 개량 방법

간척지는 강 하구와 해안의 경계지역에 방조제를 쌓거나 매립을 통해 형성되기 때문에 다른 토양에 비하여 일반적으로 토양 염분 농도가 높다. 토양 중 염류는 작물에 주요 환경 스트레스 요인으로 작용하고 있으며, 일반적으로 Na^+ 이온과 Cl^- 이온이 작물 생장에 큰 방해 요인이 되고 있다. 토양 내 염분은 작물 생장 저해 요인일 뿐만 아니라 pH, 토양 구조 등에도 영향을 미쳐 물리·화학적으로 토양의 질이 저하되므로 간척지의 이용을 위하여 제염은 필수적이라고 할 수 있다.

또한 제염 이후에도 높은 지하수위와 모세관 현상으로 인한 재염화 현상이 발생하기 쉽다. 재염화 현상은 지표면의 수분이 증발하고, 지하수위로부터 지표면으로 염분을 함유한 수분이 공극을 통해 이동하여 상부 토양에 염분이 집적되는 현상을 말한다. 따라서 지표면에 강우나 관개수가 공급되지 못할 경우에 재염화가 발생하기 쉬우므로 제염 이후에도 염분에 대한 지속적인 관리가 필요하다.

현재 간척지 토양의 제염 방법으로는 자연강우나 관개 설비를 이용한 관수 제염법, 지반을 교반하여 경반층을 파쇄하고 대공극을 형성하여 토양의 물리성을 개선하는 심토 반전법, 토양 개량제를 처리하여 토질을 개선하는 토양 개량법 등이 있다.

토양 개량법은 토양의 물리·화학적 성질을 개선하기 위하여 모래, 비료, 석고, 유기물 등 다양한 물질을 토양에 혼합하는 방법이다. 주로 토양 개량제 처리는 pH, 양이온 치환 용량 등을 조절하여 화학적 성질을 개선하거나 토양의 투수성, 통기성을 높여 물리적 성질을 개선하는 것을 목적으로 한다.

3.2 투수계수

흙 속의 물은 공극을 통해서 이동하며 이러한 흙 속의 물의 흐름을 투수계수 K (cm/s)로 나타낼 수 있다. 대표적인 흙의 투수계수는 Table 3.1 과 같다.

Table 3.1 Permeability coefficient according to soil types

흙의 종류	투수계수 (cm/sec)
굵은 자갈	$1 \sim 10^{2}$
가는 자갈 또는 중간 모래	$10^{-3} \sim 1$
가는 모래 또는 느슨한 실트	$10^{-5} \sim 10^{-3}$
촘촘한 실트 또는 점토질 실트	$10^{-6} \sim 10^{-5}$
실트질 점토 또는 점토	$10^{-9} \sim 10^{-6}$

흙 속의 물의 흐름은 난류가 발생할 만큼 유속이 빠르지 않기 때문에 층류로 간주할 수 있다. 층류에서의 물의 흐름은 Darcy의 법칙을 따르게 되며 식 (1), (2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q = kiA \quad (1)$$

$$v = ki \quad (2)$$

여기서, q : 유량 (cm^3/s)
k : 투수계수 (cm/s)
i : 동수경사
A : 단면적 (cm^2)
v : 유속 (cm/s)

식 (1)을 Darcy의 법칙이라고 하며 침투수량은 동수경사에 비례함을 알 수 있다. 투수계수 k는 흙의 종류나 밀도, 간극비, 공극의 크기나 형상, 입도분포, 흙의 구조 등 매우 다양한 조건에 의해 값이 변화하는 상

수로서 흙의 투수성을 나타낸다.

투수계수에 영향을 미치는 요소를 분석하고 투수계수를 추정하기 위하여 다양한 방법들이 시도되었는데 대표적으로 Taylor식, Kozeny-Carman식 등이 있다. Taylor (1948)는 입도분포와 간극비, 물의 영향을 고려하여 식 (3)을 제시하였다.

$$k = D_s^2 \frac{\gamma_w}{\eta} \frac{e^3}{1+e} C \quad (3)$$

여기서, k : 투수계수
D_s : 유효지름
γ_w : 물의 단위중량
η : 물의 점성계수
e : 간극비
C : 형상계수

한편 Kozeny에 의해 제안되고 Carman에 의해 수정된 Kozeny-Carman 식이 식 (4)와 같이 제시되었다.

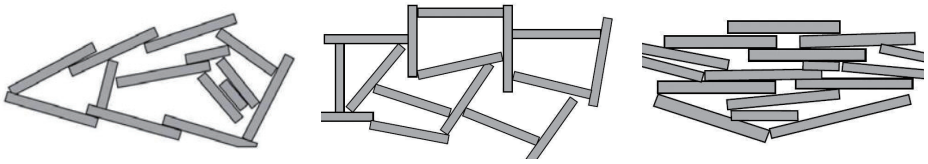
$$k = \frac{1}{k_0 S^2} \frac{\gamma_w}{\eta} \frac{e^3}{1+e} \quad (4)$$

여기서, k_0 : 간극의 형상과 두 점 사이의 거리에 대한 실제 흐름의 길이에 의존하는 계수
S : 비표면적

두 식은 각각 입도분포와 비표면적을 고려한 식의 형태를 가지고 있으나 두 식 모두 간극비가 $\frac{e^3}{1+e}$의 형태로 투수계수와 비례하는 형태를 가지고 있음을 나타내고 있다. Lamb와 Whitman(1969) 또한 k와 $\frac{e^3}{1+e}$가 비례함을 실험적으로 보이기도 하였다.

점토의 경우에는 흡착 이온과 흙 입자의 구조가 투수계수에 큰 영향

을 미친다. 특히 Na+이온이 흡착되어 있다면 다른 흡착 이온에 비하여 동일한 간극비에서 최소의 투수계수를 보인다(Lambe and Whitman, 1969). 또한 점토가 이산구조로 퇴적될 경우 면모구조에 비하여 투수계수가 더 낮아진다. 이산구조와 면모구조는 Fig. 3.1과 같으며, 이산구조의 경우 흐름의 경로가 길어지기 때문에 투수계수가 더 낮게 나타나게 된다. 간척지 토양의 경우에는 세립분이 많고 점토 함유량이 많기 때문에 이러한 점토의 효과를 고려하여 투수계수의 변화를 분석하고 추정식을 제시할 필요가 있다.



(a) Flocculated structure - saltwater (b) Flocculated structure - fresh water (c) Dispersed structure

Fig. 3.1 Structure of clay

3.3 토양 내 염분 이동

토양 내 염분 이동의 기본적인 과정은 물의 이동에 따라 염분이 이동하는 advection과 화학적 농도차이로 일어나는 dispersion으로 설명할 수 있으며, 이는 모두 물의 흐름과 함께 일어난다. 따라서 흙 속의 물의 이동과 물 속에서 염분의 이동을 모두 고려해야한다.

흙 속의 물의 이동은 Richards equation을 지배방정식으로 하여 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[K(h)\left(\frac{\partial h}{\partial z}+1\right)\right] \quad (5)$$

여기서, θ : 체적함수비 (%)
t : 시간
$K(h)$: 토양수리전도도
h : 토양수분포텐셜

한편, 염분의 이동은 상수값으로 된 계수로 표현되며 dispersion과 diffusion을 고려한 다음과 같은 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$D = \alpha v + D^* \quad (6)$$

여기서, D : 동수역학적 분산계수
v : 유속
α : 분산지수
D^* : 분자 확산계수

두 식 모두 일차원에 대한 방정식이기 때문에 염분의 상향·하향 침투에 대한 모의가 가능하며, 이를 이용하여 2차원 이상의 염분 이동을 해석할 경우에는 수치해석 방법을 이용하여 모의할 수 있다.

제 4 장 재료 및 방법

4.1 실험 재료

본 연구에 사용된 간척지 토양은 국내 간척지 중 화옹지구의 토양(Soil)을 채취하여 이용하였다. 화옹지구의 토양은 Fig. 4.1과 같이 다른 간척지구의 토양에 비하여 세립분과 점토성분이 많아 배수 및 제염에 불리한 성질을 가지고 있다.

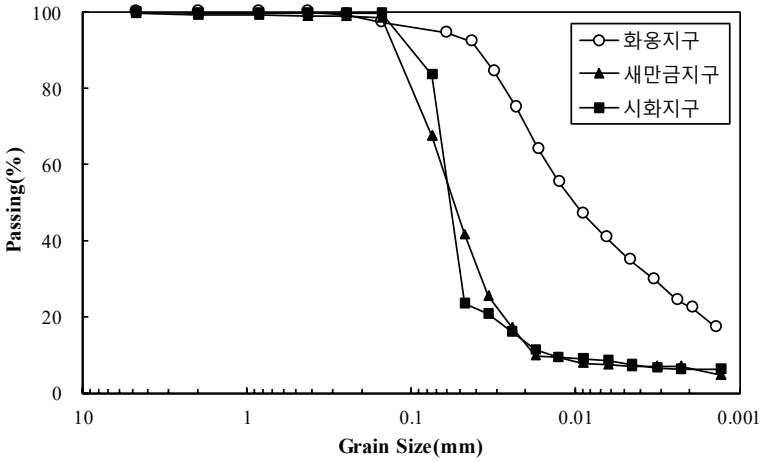
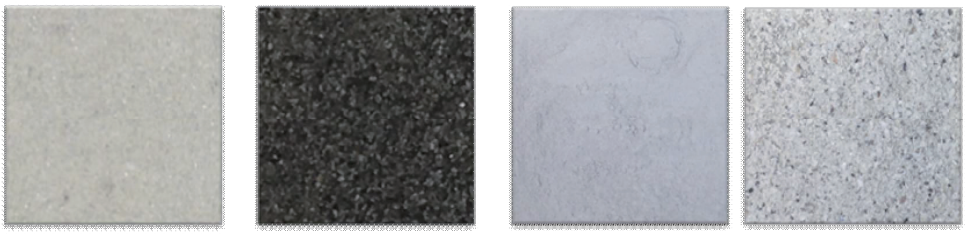


Fig. 4.1 Grain size distribution of reclaimed soil

Bottom ash (BA)는 국내 석탄화력발전소 중 영흥 화력발전소에서 분쇄 후 입경 별로 선별하여 1mm 미만으로 입도 조정된 시료를 이용하였다. 패각은 통영 해안에 위치한 굴패각 야적장에서 직접 채취하여 세척·분쇄 후 2mm 미만의 입경을 선별하여 조립질 패각(Coarse Oyster shell, CO)으로 하고, 0.15mm 미만의 입경을 선별하여 세립질 패각(Fine Oyster shell, FO)으로 이용하였다. 사용한 재료들의 사진은 Fig. 4.2 와 같으며 수급 위치는 Fig. 4.3 에 도시하였다.



(a) 간척지토양 (Soil) (b) Bottom ash (BA) (c) 세립질 패각 (FO) (d) 조립질 패각 (CO)

Fig. 4.2 Experimental material

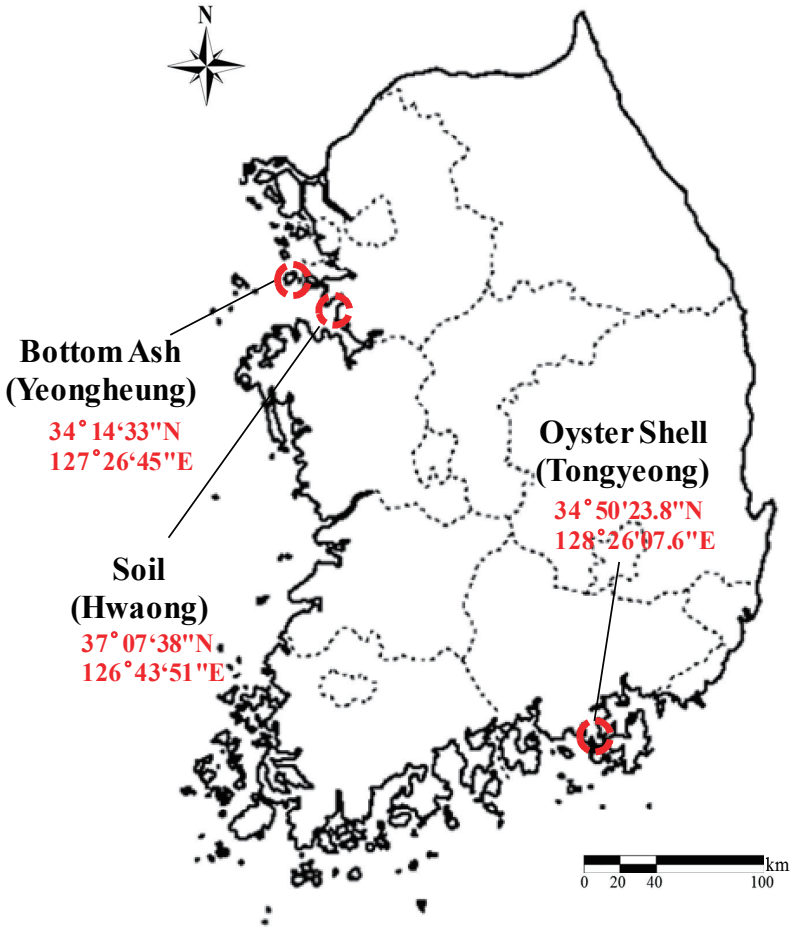


Fig. 4.3 Sampling location of experimental materials

4.1.1 물리적 특성

각 재료들의 입도분포는 Fig. 4.4와 같으며 물리적 특성은 Table 4.1에 나타내었다. 분석 결과 Soil과 FO의 입도분포가 유사하며 BA와 CO의 입도분포가 유사하게 나타났다. Soil의 0.075mm 통과 백분율은 95.55%로 세립분이 매우 많은 비율을 차지하고 있으며 이에 따라 투수계수가 매우 낮게 나타났다.

한편 입자의 비중은 BA가 2.21, FO/CO가 2.31로 흙에 비하여 매우 낮게 나타났으며 투수계수는 BA와 CO가 Soil과 FO에 비하여 100배 이상 큰 것으로 나타났다.

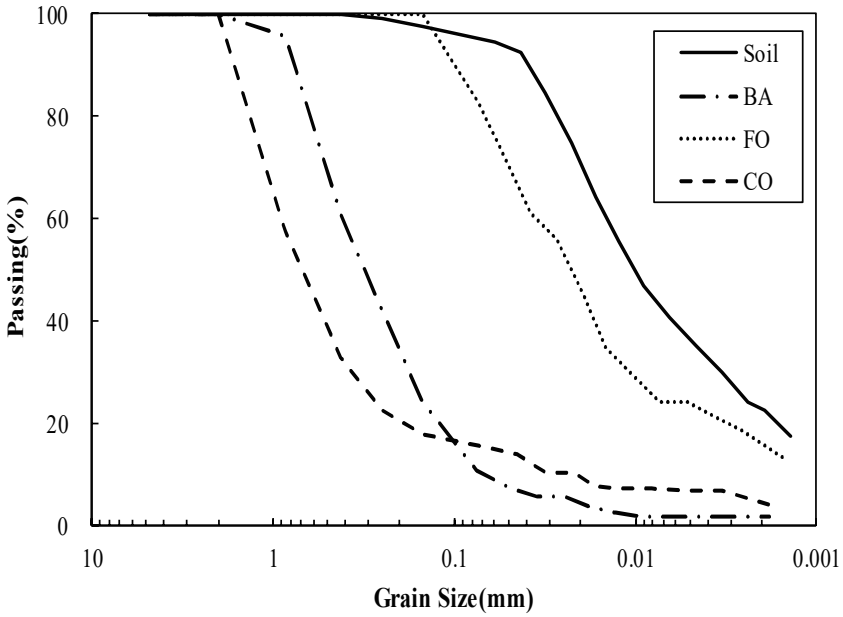


Fig. 4.4 Grain size distribution of experimental materials

Table 4.1 Physical properties of experimental materials

	Passing % finer than		D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{50} (mm)	D_{60} (mm)	Cu	Cg	Gs	K (cm/s)
	4.75 mm	0.075 mm								
Soil	100	95.55	-	0.004	0.014	0.021	-	-	2.62	1.18E-06
BA	100	10.6	0.070	0.182	0.323	0.419	6	1.1	2.21	4.94E-03
FO	100	82.6	-	0.011	0.023	0.036	-	-	2.31	6.87E-05
CO	100	17.5	0.039	0.259	0.639	0.846	21.9	2.1	2.31	2.96E-03

4.1.2 화학적 특성

각 재료들의 구성 성분에 대한 확인을 위하여 XRF (X-Ray Flourescence Spectrometry) 시험을 수행 하였으며 시험 결과는 Table 4.2에 정리하였다. XRF 분석 결과 Soil과 BA의 구성 비율이 비슷하게 나타나고 있으며 SiO_2와 Al_2O_3의 함량이 약 90%를 차지함을 확인할 수 있다. 반면 패각(FO/CO)의 경우 강열감량 (Loss on Ignition, LOI)이 52%로 매우 높아 유기물을 다량 함유하고 있음을 알 수 있으며, 구성 성분 중 CaO의 함량이 43.52%로 이를 이용하여 탄산칼슘($CaCO_3$)의 중량비를 계산하면 77.7%의 중량비를 얻을 수 있다.

Table 4.2 Chemical properties of experimental materials

	구분	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	Na_2O	MgO	CaO	Cl	TiO_2	SO_3
Soil	함량 (%)	66.99	15.62	4.99	3.93	2.27	1.95	1.40	0.96	0.82	0.63
	구분	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	TiO_2	Na_2O	K_2O	P_2O_5	BaO
BA	함량 (%)	59.76	19.69	8.13	6.13	2.04	1.09	1.00	0.82	0.47	0.34
	구분	LOI	CaO	Na_2O	SiO_2	Cl	MgO	Al_2O_3	SO_3	P_2O_5	Fe_2O_3
FO /CO	함량 (%)	52.01	43.52	1.07	0.95	0.58	0.53	0.53	0.45	0.13	0.11

4.2 실험 방법

4.2.1 혼합비

혼합 재료의 혼합비에 따른 투수계수 변화를 확인하고 투수계수 변화의 원인을 분석하기 위하여 넓은 범위의 혼합비를 적용하였다. 간척지 토양은 세립토이고 혼합 재료는 다양한 입경과 특성을 가지고 있기 때문에 투수계수 변화의 메커니즘이 각각 다를 수 있다. 따라서 본 연구에서는 각각의 재료에 대하여 20% 간격으로 0 - 100%의 중량 혼합비를 적용하였으며, 혼합토의 물리적 성질이 급격하게 변화하는 구간에서는 혼합비 간격을 더 나누어 실험 및 분석을 수행하였다. 혼합 재료와 혼합비는 Table 4.3와 같으며 총 18가지 시료에 대한 시험 및 분석을 수행하였다.

Table 4.3 Mixing materials and mixing ratio

혼합 재료	Bottom ash (BA) 조립질 패각 (CO) 세립질 패각 (FO)					
혼합비 (%)	0	20	40	60	80	100

4.2.2 변수위 투수 시험

투수계수는 간극비의 영향을 크게 받으며 간극비는 같은 흙에서도 밀도에 따라 변화하기 때문에 투수 시험 시 현장의 밀도를 고려하여 공시체를 제작하고 시험을 수행해야 적절한 투수계수를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 다양한 혼합토를 이용하기 때문에 각각의 간극비 및 밀도가 서로 다르게 나타나고, 각각의 투수계수를 비교하기 위해서는 이를 조절하여 같은 조건으로 만들어야 한다. 따라서 혼합비 0%의 Soil 시료는 현장

의 밀도를 고려하여 공시체를 제작하였으며 나머지 혼합토는 혼합비에 따라 다짐시험을 수행한 후 현장의 다짐도를 적용하여 공시체를 제작하였다.

간척지 토양은 세립분이 매우 많기 때문에 투수계수가 매우 낮으며, 따라서 변수위 투수 시험 (KS F 2322)을 통하여 투수계수 시험을 수행하였다. 변수위 투수시험기의 형태는 Fig. 4.5 와 같다.

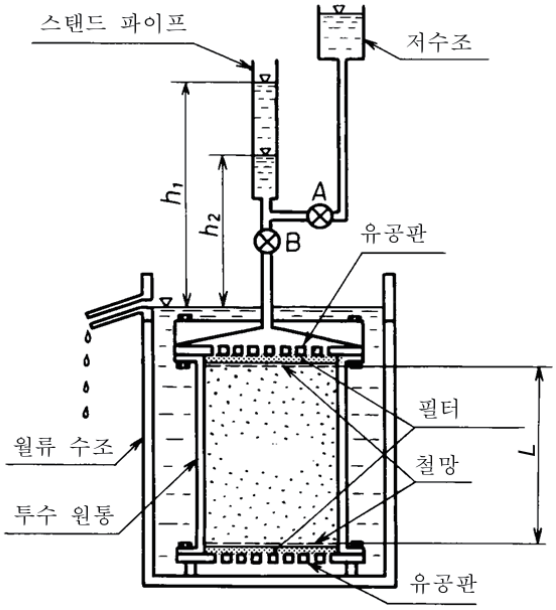


Fig. 4.5 Falling head permeameter for soil

이 때, 측정 온도 T(℃)에서의 투수계수 k_T는 식 (6)와 같이 계산된다.

$$k_T = 2.303\frac{aL}{A(t_2 - t_1)}log_{10}\frac{h_1}{h_2} \quad (6)$$

여기서, k_T : T(℃)에서의 투수계수 (cm/s)
a : 스탠드 파이프의 단면적 (cm^2)
L : 공시체의 길이 (cm)
A : 공시체의 단면적 (cm^2)
$t_2 - t_1$: 측정 시간 (s)
h_1, h_2 : 시간 t_1, t_2에서의 수위차 (cm)

4.2.3 혼합토의 물성 시험

혼합토의 물성 시험은 다짐시험, 입도분석, 액성한계시험을 수행하였다. 다짐시험은 4.2.2 절에서 제시한 현장의 상대다짐도를 고려한 투수시험 공시체의 제작을 위하여 상대다짐도를 산정한 후 적용하기 위한 목적으로 수행하였다. KS F 2312에 따라 시험을 수행하였으며 표준 A 다짐 방법을 적용하였다. 또한 건조밀도를 이용하여 식 (7)와 같이 간극비를 산정할 수 있으며 이렇게 산정한 간극비를 결과 분석에 이용하였다.

$$e = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_d} - 1 \quad (7)$$

여기서, e : 간극비
G_s : 흙의 비중
γ_w : 물의 단위중량 (t/m^3)
γ_d : 흙의 단위중량 (t/m^3)

입도분석 시험은 토양 및 혼합토의 입도분포와 투수계수의 관계를 파악하고 토양과 혼합재료의 혼합 전·후 입단화와 같은 화학적 반응의 유무를 확인하기 위하여 수행하였다. KS F 2302에 따라 체가름 시험과 비중계 시험을 수행하였다.

또한 간척지 토양에 점토질 입자가 많기 때문에 점성의 변화에 의한 투수계수 변화가 있을 것으로 판단하여 Fall cone test에 의한 액성한계 시험을 수행하였다. Fall cone test는 KS, ASTM 등 표준 규격에 등재

되어 있지는 않지만 영국, 스웨덴, 캐나다에서는 이를 이용하여 액성한계를 결정하는 방법을 관련 규정에 포함시키고 있다(Son et al., 2007). 또한 Koumoto et al. (2001), Christaras (1991), Cabalar and Mustafa (2015) 등 많은 연구자들에 의하여 전통적 액성한계 측정 방법인 Cassagrande 방법의 대체 가능성이 제시되고 있다. 본 연구에서는 Fall cone test가 Cassagrande 방법에 비하여 시료 조제, 시험 시 개인오차가 작게 나타나기 때문에 Fall cone test를 이용하였다. Fall cone test의 시험 기구는 Fig. 4.6과 같다.

Fig. 4.6 Fall cone test apparatus

4.2.4 모델링

혼합토양의 투수 특성에 따른 수분 및 염분의 이동을 확인하고 간척지 토양의 제염 효과를 분석하기 위하여 모델링을 수행하였다. 두 소프트웨

어는 모두 유한요소법을 이용하며 흙, 암석과 같은 다공성 매체에서 각각 용매와 용질의 이동을 2차원으로 모의한다. 본 연구에서는 Geoslope 社의 SEEP/W와 CTRAN/W를 이용하여 각각 수분과 염분의 이동을 모의하였다.

SEEP/W에서 수행할 수 있는 침투해석은 정상류(steady state)와 비정상류(transient)로 구분된다. 정상류 해석은 유입량과 유출량이 동일한 평형상태에 대한 해석이고 비정상류 해석은 수두차 또는 유량이 존재하는 경우의 시간에 따른 해석이다. 본 연구에서는 시간에 따른 침투 현상을 확인하기 위하여 비정상류 해석을 적용하였다. 비정상류 해석의 지배방정식은 식 (8)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial H}{\partial y}\right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (8)$$

여기서,
H : 전수두 (m)
k_x, k_y : x, y 방향의 투수계수 (m/s)
Q : 단위 체적·시간 당 유출량 $(m^3/m^3 \cdot s)$
θ : 체적함수비
t : 시간 (s)

CTRAN/W는 지하수에서 용질의 이동을 모델링하는 소프트웨어로, SEEP/W와 연계하여 물의 흐름에 따른 용질의 이동을 모의할 수 있다. 용질 이동의 기본적인 과정은 advection과 dispersion이며 CTRAN/W는 이를 모두 고려할 수 있다. 해석의 지배방정식은 식 (9)와 같다.

$$\theta \frac{\partial C}{\partial t} = \theta D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - U \frac{\partial C}{\partial x} \quad (9)$$

여기서,
θ : 체적함수비
C : 농도 (g/m^3)
D : 수리분산계수
U : 비유량 (m^3/s)

제 5 장 결과 및 고찰

5.1 실험 결과

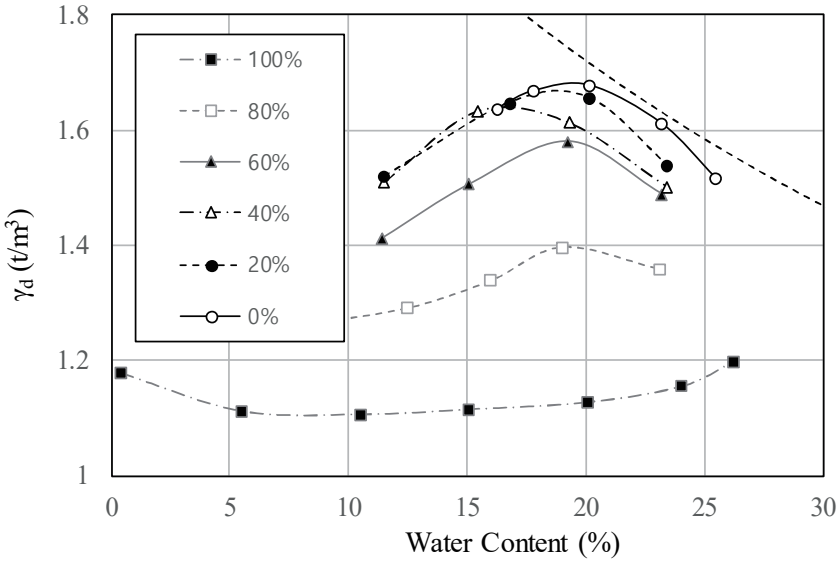
혼합 시료에 대하여 다짐시험, 투수시험, 입도분석, 액성한계 시험을 수행한 후 혼합비에 따른 분석을 수행하고, 각각의 재료에 대하여 투수계수에 미치는 영향을 분석하였다.

5.1.1 다짐 시험

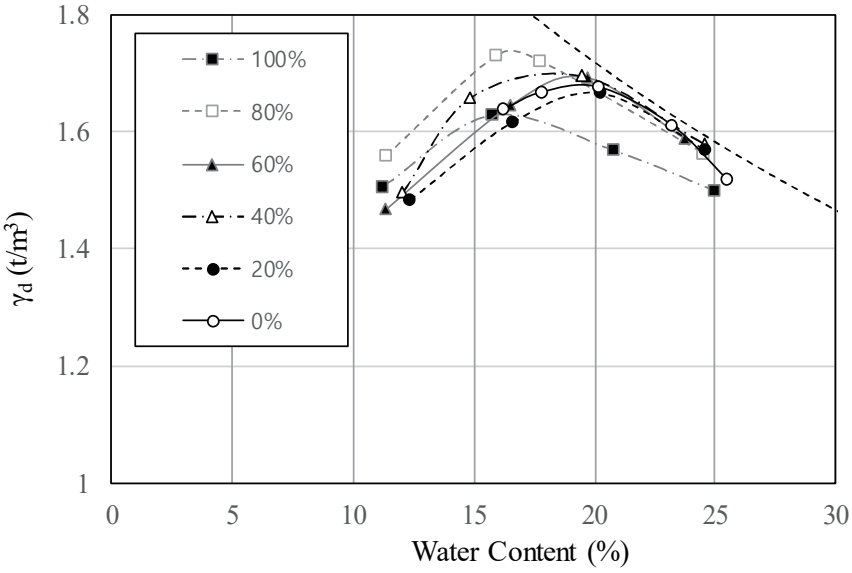
혼합토의 혼합비에 따른 다짐곡선은 Fig. 5.1과 같으며 Table 5.1과 Fig. 5.2는 각 혼합 재료 별 혼합비에 따른 최대건조밀도를 나타낸 것이다. 다짐시험 결과 BA와 CO 혼합토는 혼합비가 커질수록 다짐곡선이 아래로 이동하였으며 FO 혼합토는 다짐곡선의 이동이 거의 없는 것으로 나타났다.

BA 혼합토에서 최대건조밀도는 혼합비 0%부터 60%까지 조금씩 감소하다가 이후 크게 감소하며, 최적 함수비는 뚜렷한 경향성을 나타내지 않았다. FO 혼합토는 혼합비 0%부터 60%까지 다짐특성이 거의 일정하며 이후 혼합비 80%와 100%에서 변화를 보였다. CO 혼합토는 혼합비가 증가함에 따라 최대건조밀도가 BA 혼합토와 비슷하게 감소하며 최적 함수비가 증가하는 경향이 나타났다.

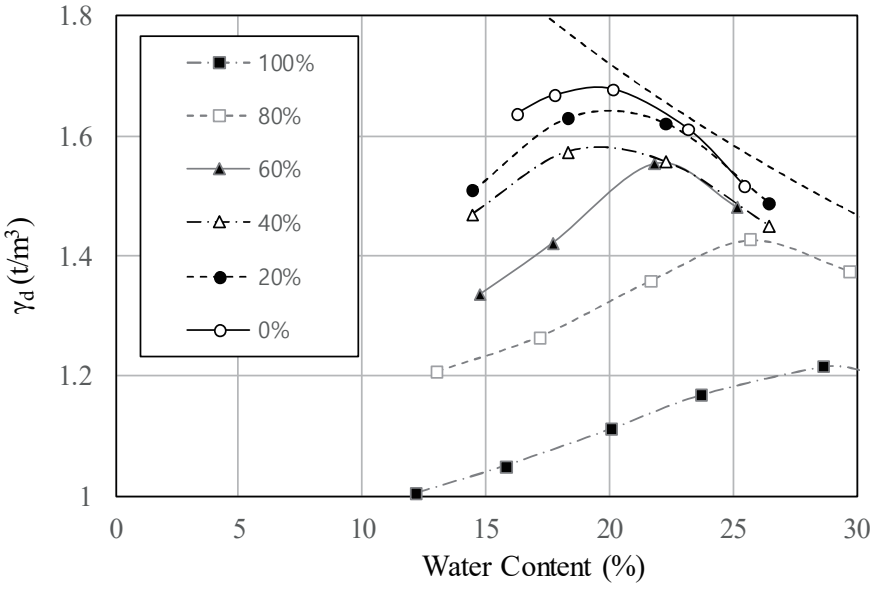
다짐곡선의 분석 결과 BA와 CO 혼합토는 혼합비 80% 이상에서 입도가 나쁜 모래와 같이 최대건조밀도가 작고 다짐곡선이 완만하게 나타났다. 이는 다짐에너지에 따라 혼합토의 밀도가 크게 변화하지 않으며 따라서 간극비의 변화가 작음을 의미한다. 한편 FO 혼합토는 혼합비 100%를 제외하고 다짐곡선의 형태가 거의 유사하게 나타나고 있으며 다짐특성의 특별한 경향이 나타나지 않았다.



(a) BA 혼합토



(b) FO 혼합토



(c) CO 혼합토

Fig. 5.1 Compaction curve of mixed soil

Table 5.1 Compaction test result of mixed soil

		$\gamma_{d\cdot\max}$ (t/m^3)		
		BA	CO	FO
Mixing ratio (%)	0	1.68	1.68	1.68
	20	1.66	1.63	1.67
	40	1.63	1.58	1.69
	60	1.58	1.55	1.69
	80	1.4	1.43	1.74
	100	1.2	1.25	1.64

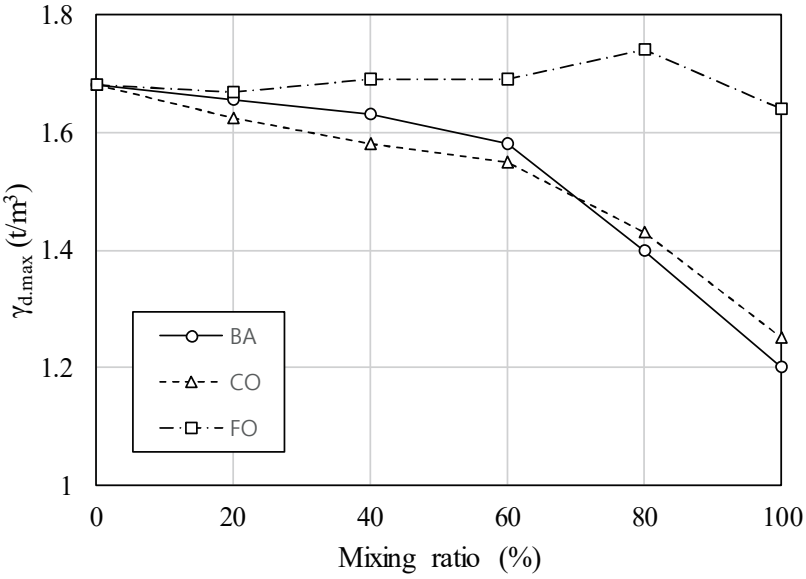


Fig. 5.2 Maximum dry density according to mixing ratio

다짐시험을 통해 얻은 Soil의 최대건조밀도와 화옹지구의 시료 채취 구역에서 획득한 현장밀도를 이용하여 상대다짐도(Relative Compaction)를 산정하였다. 상대다짐도는 식 (10)과 같이 계산된다.

$$R(\%) = \frac{\gamma_{d.field}}{\gamma_{d.\max}} \times 100 \quad (10)$$

여기서, R : 상대다짐도

$\gamma_{d.field}$: 현장밀도 (t/m^3)

$\gamma_{d.\max}$: 최대건조밀도 (t/m^3)

Soil의 현장밀도는 1.4 t/m^{3}이며 실험실에서 측정한 최대건조밀도는 1.68 t/m^{3}로 측정되어 상대다짐도는 식 (10)에 따라 83.4%로 계산되었다. 이에 따라 모든 혼합토에 대하여 83.4%의 상대다짐도를 적용하였다.

또한 혼합토 별 적용된 건조밀도를 이용하여 투수 시험 시료의 간극비를 계산하였다. 간극비는 식 (7)에 따라 계산하였으며 결과는 Table 5.2

와 Fig. 5.3에 나타내었다.

Table 5.2 Void ratio of mixed soil

		e		
		BA	CO	FO
Mixing ratio (%)	0	0.870	0.870	0.870
	20	0.839	0.887	0.837
	40	0.807	0.894	0.771
	60	0.802	0.883	0.727
	80	0.963	0.989	0.635
	100	1.208	1.216	0.689

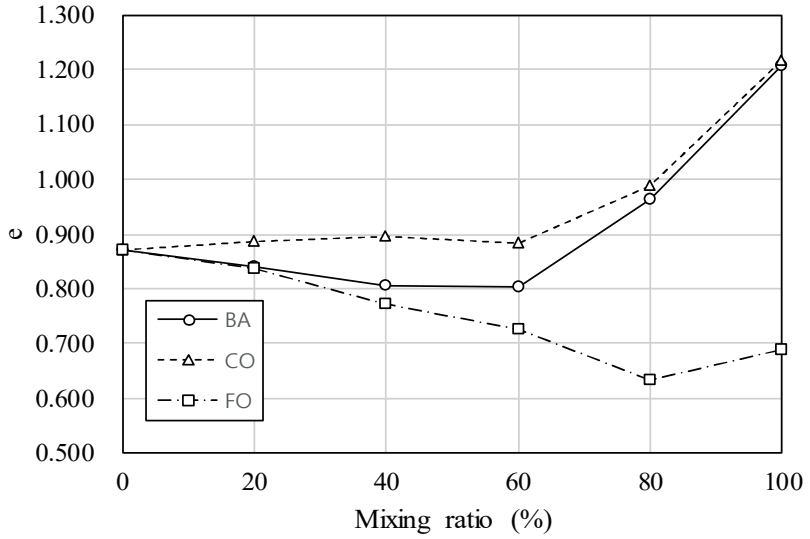


Fig. 5.3 Void ratio according to mixing ratio

간극비의 변화는 조립토와 세립토를 혼합한 경우의 기존 연구 결과와 일치하는 결과이며 흙 속의 간극의 변화는 Fig. 5.4와 같다. 이 때, 간극비의 경향이 변화하는 시점은 조립토가 가장 조밀한 구조를 가질 때, 조립토 사이의 빈 간극을 세립토가 채우는 형태인 (c)와 같을 것으로 판단된다.

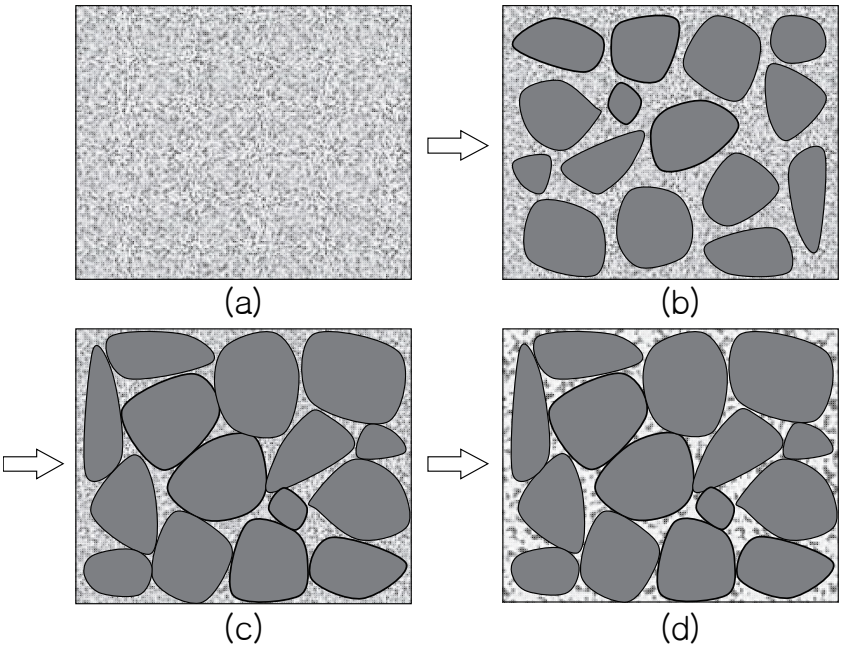


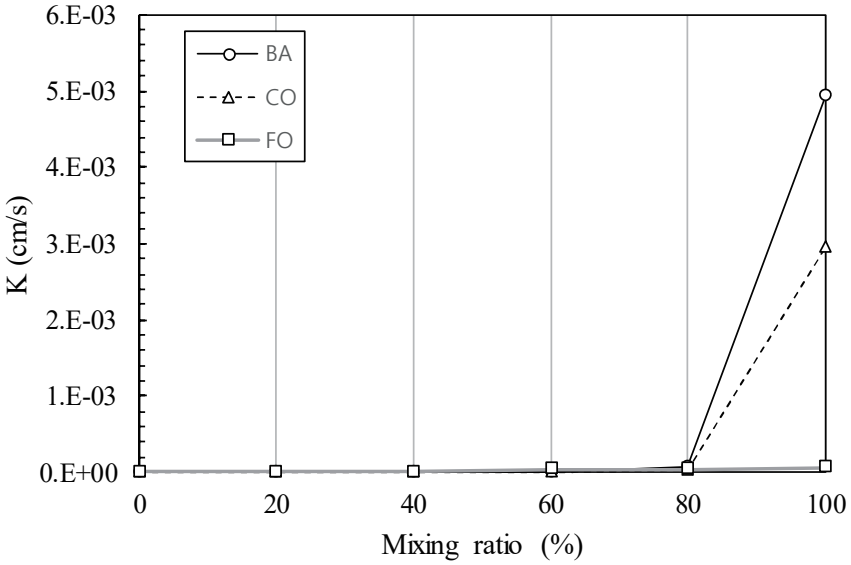
Fig. 5.4 Void change in fine-coarse mixed soil

5.1.2 투수시험

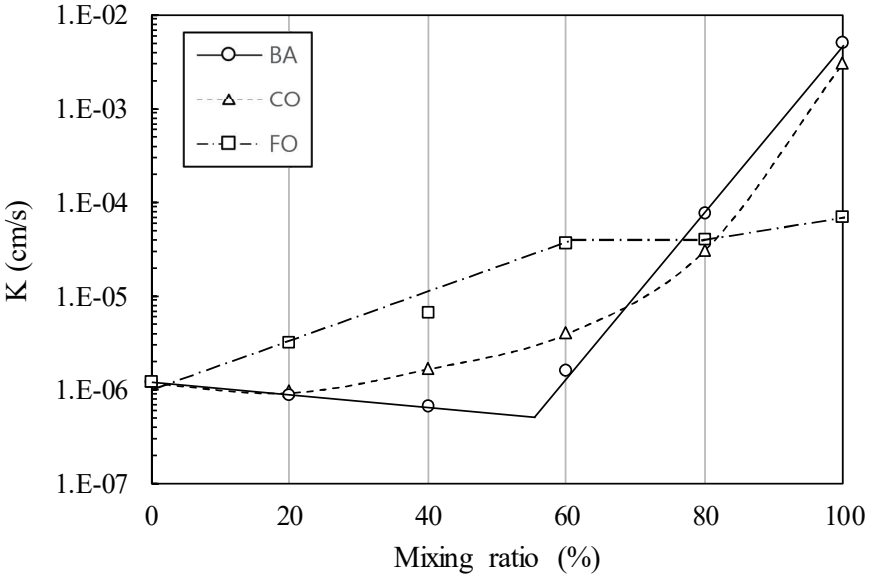
투수 시험은 변수위 투수 시험을 적용하였으며 시험 결과는 Table 5.3 및 Fig. 5.5와 같다.

Table 5.3 Permeability test results of mixed soil

		K (cm/s)		
		BA	CO	FO
Mixing ratio (%)	0	1.181E-06	1.181E-06	1.181E-06
	20	8.870E-07	9.372E-07	3.174E-06
	40	6.707E-07	1.671E-06	6.479E-06
	60	1.611E-06	3.934E-06	3.609E-05
	80	7.626E-05	3.022E-05	3.881E-05
	100	4.940E-03	2.945E-03	6.871E-05



(a) Permeability of soil mixture



(b) Permeability of soil mixture (semi-log scale)

Fig. 5.5 Permeability according to mixing ratio

먼저, BA 혼합토의 경우 투수계수가 혼합비 약 55%까지 감소하다가 이후 급격하게 증가하는 경향이 나타났으며, 간극비 변화의 경향과 일치하는 것으로 보인다. 하지만 투수계수 그래프는 semi-log scale로, 간극비의 증가에 비하여 투수계수의 증가폭이 매우 큰 것을 알 수 있다. 이는 동일한 시료에 대하여 간극비와 투수계수가 비례하는 형태를 가지는데, 본 연구에서는 혼합비에 따른 실험을 수행하였기 때문에 간극비 이외에 다른 요인이 작용하여 나타나는 결과로 볼 수 있다.

FO 혼합토의 투수계수는 semi-log scale에서 60%까지 일정하게 증가하다가 이후 큰 변화를 보이지 않는다. 이를 간극비와 비교하면 간극비는 80%까지 지속적으로 감소하다가 이후 약간 증가하는 경향을 나타내는 것과 반대의 경향이라 할 수 있다. 일반적인 흙에서 간극비와 투수계수는 비례의 관계를 갖지만, FO 혼합토는 간극비와 투수계수가 비례하지 않기 때문에 세립질 패각이 가지는 다른 성질로 인하여 투수계수가 감소하는 것으로 판단된다. 특히 모든 혼합비 구간에서 간극비가 BA, CO 혼합토에 비하여 같거나 작음에도 불구하고 혼합비 약 75%까지 최대 15배 이상 더 큰 투수계수를 갖는다. 이는 낮은 혼합비에서 세립질 패각이 투수계수에 미치는 영향이 매우 큼을 의미한다.

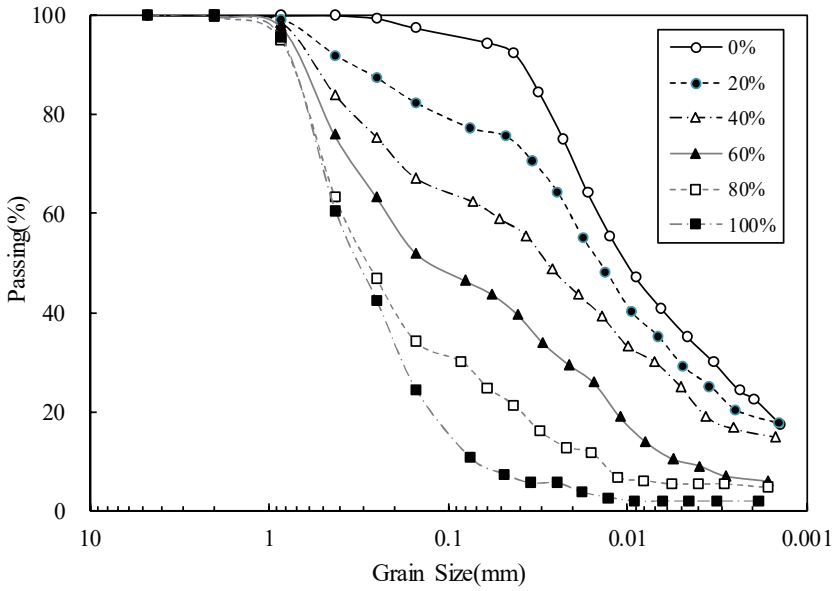
CO 혼합토는 전체적인 투수계수의 변화 양상이 BA 혼합토와 유사한데, 혼합비 20 - 70% 구간에서 BA 혼합토에 비해 더 큰 투수계수를 가지고 이후 역전되는 것으로 나타났다. CO 혼합토의 간극비와 투수계수를 비교하면 간극비가 거의 일정한 혼합비 60%까지 투수계수는 감소하다가 증가하며, 이후에는 BA 혼합토와 마찬가지로 급격하게 증가한다. 간극비와 투수계수의 경향이 일치하지 않는 구간이 있는 것은 FO 혼합토에서 혼합비가 증가할수록 투수계수가 증가하는 것과 같이 굴패각이 가지는 성질에 의한 것으로 생각된다.

5.1.3 입도분석 시험

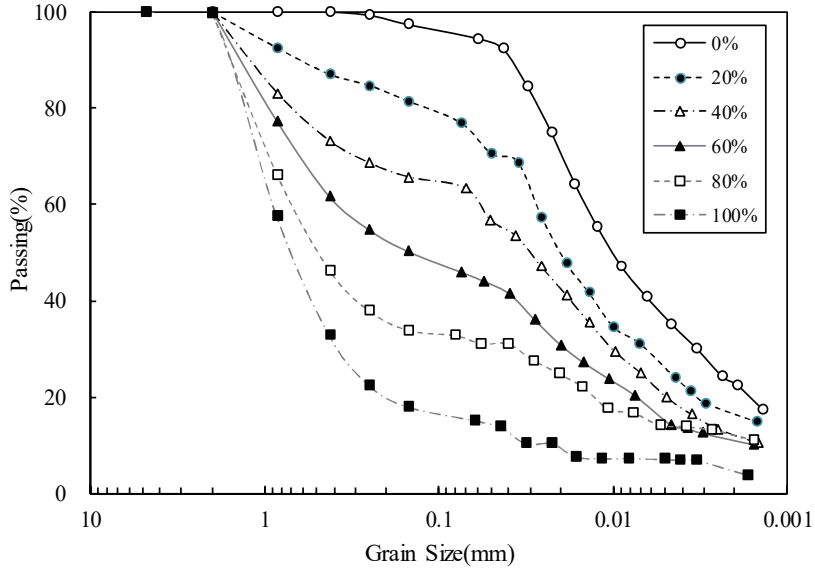
입도분포가 투수계수에 미치는 영향을 분석하고 혼합비에 따른 입도분포의 변화를 확인하기 위하여 입도분석 시험을 수행하였다. 모든 혼합재료와 혼합비에 대하여 시험을 각각 수행하고 통과 비율 별 입경을 산정하였으며 그 결과는 Table 5.4 및 Fig. 5.6과 같다.

Table 5.4 D_{10}, D_{15}, D_{30}, D_{50}, D_{60} of mixed soil

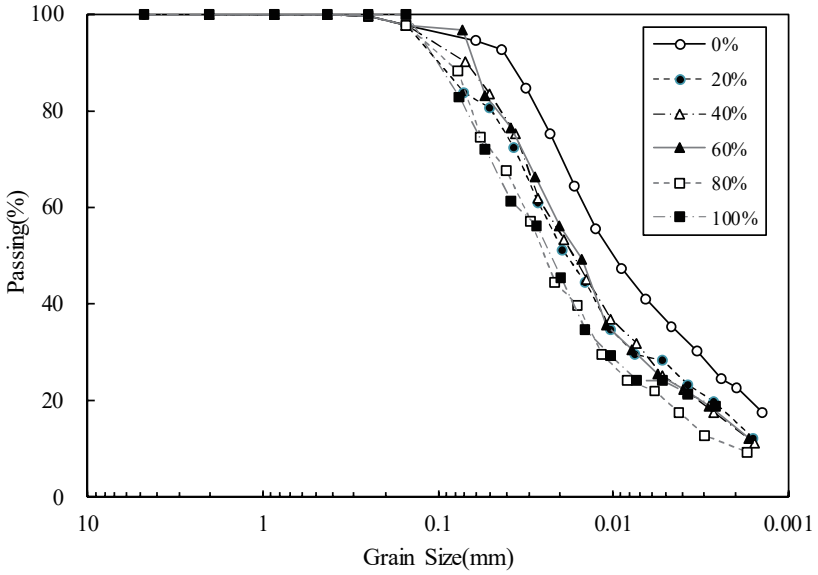
	Mixing ratio (%)	D_{10} (mm)	D_{15} (mm)	D_{30} (mm)	D_{50} (mm)	D_{60} (mm)
BA	0	-	-	0.003	0.010	0.015
	20	-	-	0.005	0.014	0.021
	40	-	0.002	0.007	0.028	0.058
	60	0.005	0.009	0.022	0.126	0.221
	80	0.014	0.028	0.083	0.283	0.389
	100	0.070	0.099	0.182	0.323	0.419
CO	0	-	-	0.003	0.010	0.015
	20	-	0.002	0.007	0.020	0.028
	40	-	0.003	0.010	0.031	0.060
	60	-	0.005	0.019	0.147	0.386
	80	-	0.006	0.043	0.503	0.717
	100	0.026	0.060	0.376	0.717	0.912
FO	0	-	-	0.003	0.010	0.015
	20	-	0.002	0.008	0.019	0.026
	40	-	0.002	0.007	0.017	0.025
	60	-	0.002	0.008	0.016	0.023
	80	-	0.004	0.012	0.025	0.033
	100	-	0.002	0.011	0.023	0.036



(a) BA 혼합토



(b) CO 혼합토



(c) FO 혼합토

Fig. 5.6 Grain size distribution results

입도분석 시험 결과 BA, CO 혼합토는 입도분포가 혼합비에 따라 균일하게 변화하는 것으로 나타났다. 이는 일반적인 혼합토와 같은 결과이며 응집, 입단화 등 혼합토에 특별한 화학적 반응이 일어나지 않는 것으로 판단된다. FO 혼합토는 흙과 세립질 패각의 입도분포가 큰 차이가 없기 때문에 입도분포곡선이 큰 폭으로 이동하지 않았다. 또한 세립질 패각이 20 - 60% 혼합된 경우 입도분포가 거의 일치하며, 세립질 패각이 80 - 100%인 경우 입도분포가 거의 일치하는 것으로 나타났다. 이는 비중계 시험 시 입자가 일부 응집되어 빠르게 침강한 것으로 판단된다.

5.1.4 액성한계 시험

흙의 점성이 투수계수에 미치는 영향을 분석하기 위하여 점성을 간접적으로 나타낼 수 있는 액성한계 시험을 수행하였다. 또한 Kozeny-Carman 식의 한 인자인 비표면적은 액성한계와 비례관계가 있다고 알려져 있기 때문에 (Chapuis and Aubertin, 2003) 액성한계와 투수계수가 큰 상관성을 가질 것으로 판단하였다. Fall cone (British)를 이용하여 시험을 수행하였으며 시험 결과는 Table 5.5 및 Fig. 5.7와 같다.

Table 5.5 Fall cone test result of mixed soil

		Liquid limit (%)		
		BA	FO	CO
Mixing ratio (%)	0	39.60	39.60	39.60
	20	35.50	37.60	36.91
	40	29.38	35.48	35.30
	60	29.31	32.57	34.90
	80	36.81	32.65	41.54
	100	44.21	30.24	48.06

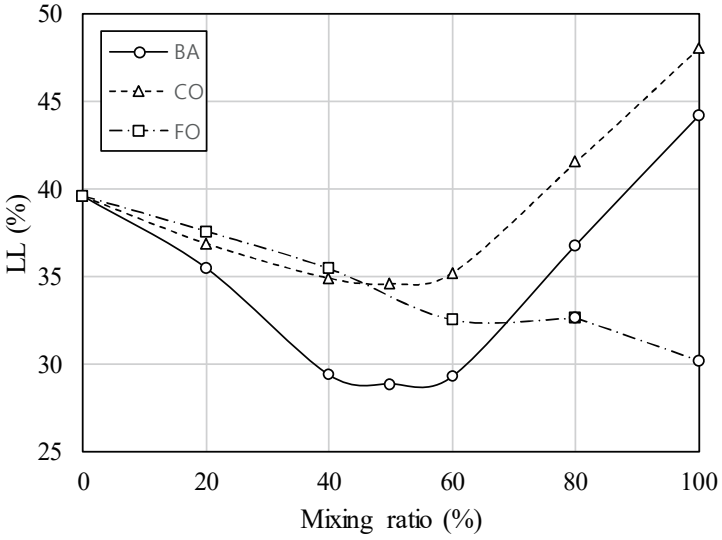


Fig. 5.7 Liquid limit according to mixing ratio

먼저, BA와 CO 혼합토는 혼합비 40%까지 액성한계가 감소한 후 60%까지 일정하다가 이후 크게 증가한다. 이 때, 액성한계가 감소하는 구간은 실제 액성한계의 감소로 인한 것이지만 액성한계가 증가하는 구간은 입도분포 및 토성의 변화에 의한 강도 증가로 인한 것이다. Fall cone test에서 cone의 관입량은 흙의 전단강도에 반비례하는데, 점토질 흙에서 전단강도는 대부분 점착력에 의한 것이다. 따라서 점성이 감소할수록 액성한계도 낮게 나타나지만, 본 시험에서는 조립질 재료의 혼합비가 늘어날수록 혼합토의 내부마찰각이 증가하여 Fall cone test 에서의 관입량이 감소하였으며 이에 따라 액성한계가 증가하는 것처럼 나타났다. 점성의 변화는 점토 성분의 함량에 따라 나타나기 때문에, 이를 점성에만 관계된 데이터로 이용하기 위하여 Table 5.6 및 Fig. 5.8와 같이 40% 이후로 액성한계가 일정하게 감소하는 것으로 간주하고 분석을 수행하였다.

Table 5.6 Modification of fall cone test result of mixed soil

		Liquid limit (%)		
		BA	FO	CO
Mixing ratio (%)	0	39.60	39.60	39.60
	20	35.50	36.91	37.60
	40	29.38	35.30	35.48
	60	24.38	33.20	32.57
	80	19.38	31.10	32.65
	100	14.38	29.00	30.24

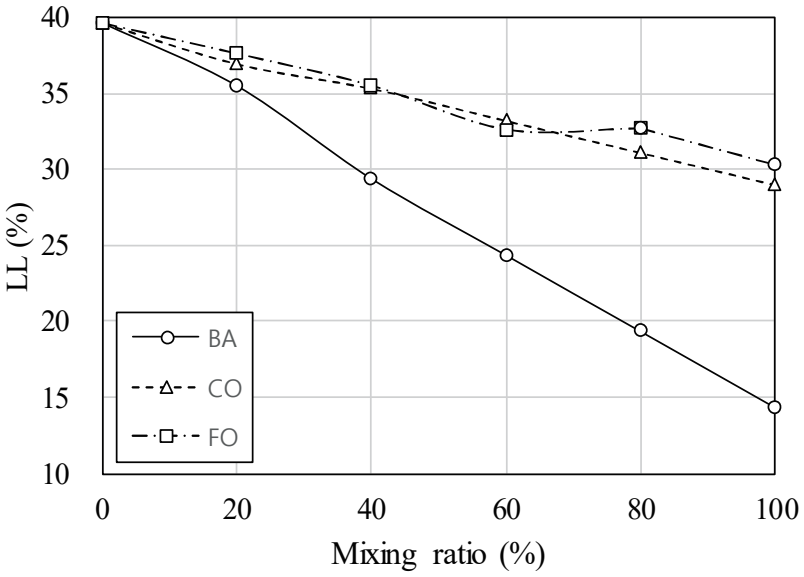


Fig. 5.8 Modified liquid limit according to mixing ratio

FO 혼합토는 혼합비 60%까지 액성한계가 감소하고, 80%까지 일정하다가 이후 감소하는 것으로 나타났다. 입도분석 시 입도분포에 큰 변화는 없었기 때문에 혼합비에 따른 내부마찰각의 변화는 크지 않을 것으로 생각되며 따라서 이는 혼합토의 점성 변화에 따른 것으로 판단된다. FO 혼합토의 액성한계 시험 결과와 투수시험 결과를 비교하면 액성한계와 투수계수가 반비례의 관계를 가짐을 확인할 수 있다. 이는 세립질 패각 혼합 시 투수계수가 액성한계 즉, 흙의 점성에 큰 영향을 받는다는 것을 의미한다.

5.2 실험 결과 분석

5.2.1 선형회귀분석

실험 결과를 종합하여 분석하고 관계식 생성을 위한 상관성 분석을 수행하였다. 전체 데이터는 Table 5.7에 나타내었으며 이들에 대한 상관성 분석 결과는 Table 5.8과 같다. 상관성 분석 시 투수계수에 대한 상관성은 간극비와 D_{30}이 각각 0.780과 0.788로 가장 크게 나타났다. 이에 따라 간극비와 D_{30}을 독립변수로 하여 선형 회귀분석을 통해 관계식 (11)을 구하였다.

$$\log_{10}K = -1.529e + 11.893D30 - 4.206 \quad (11)$$

선형 회귀식 생성 시 투수계수 $K(cm/s)$의 값이 간극비와 D_{30}에 비하여 매우 작고 편차 또한 매우 작기 때문에 로그값을 이용하여 회귀식을 구성하였다. 분석 결과 R^2는 0.635로 나타났으며 결과를 Fig. 5.9에 도시하였다. 추정값과 실측값의 정확도를 판단하기 위하여 RMSE (Root Mean Square Deviation)를 계산하였는데, 이 때 투수계수 증가폭이 혼합비에 따라 기하급수적으로 증가함을 고려하여 $\log K$의 RMSE를 산정하였다. $\log K$의 RMSE는 0.69로 산정되었으며 이는 추정값과 실측값의 차이가 평균적으로 $10^{0.69}$배 즉, 약 4.91배 차이가 날 수 있음을 의미한다. 이를 통하여 식 (11)가 간극비와 입도분포를 이용하여 약 4.91배의 오차로 투수계수를 추정할 수 있음을 확인하였다.

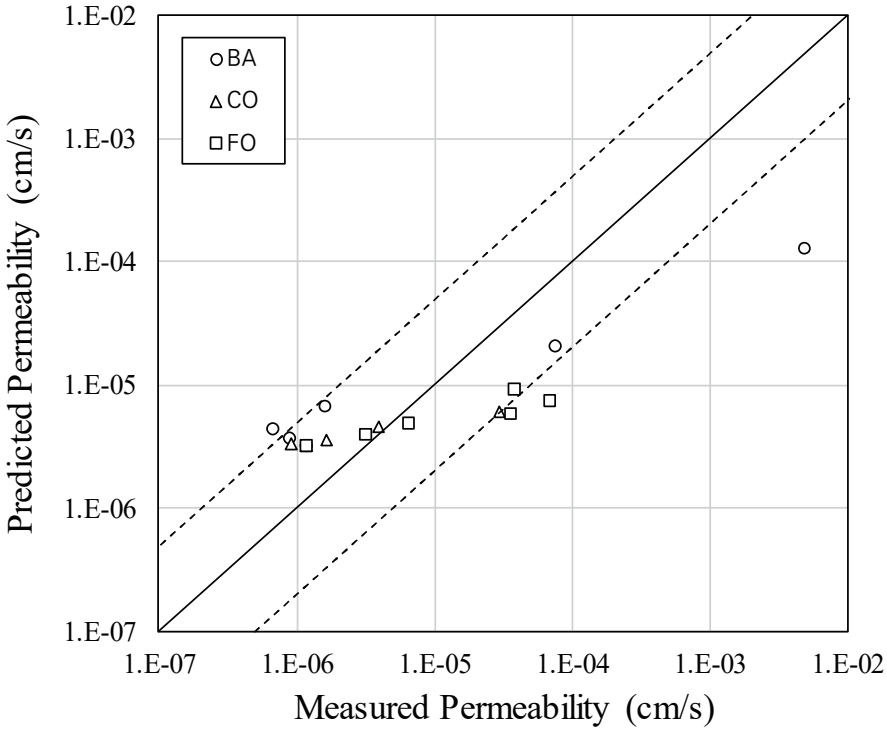


Fig. 5.9 Linear regression analysis using D_{30} and void ratio(e)

많은 선행연구를 통하여 간극비는 $\frac{e^3}{1+e}$의 형태로 투수계수와 높은 상관성이 있음이 알려져 있으므로 e 대신에 $\frac{e^3}{1+e}$를 이용하여 회귀분석을 수행하였으며 결과를 Fig. 5.10에 도시하였다.

$$\log_{10}K = 2.928\frac{e^3}{1+e} + 9.841D_{30} - 6.553 \quad (12)$$

관계식은 식 (12)와 같으며 분석 결과 R^2는 0.814로 나타났으며 $\log K$의 RMSE는 0.87로, 추정값과 실측값의 평균적인 차이는 약 7.49배로 계산되었다. 이 때, Fig. 5.10에서 BA 와 CO 혼합토의 오차가 작게 나타났

지만, FO 혼합토는 오차가 크고 투수계수가 커질수록 즉 혼합비가 높아질수록 오차가 점점 커짐을 확인할 수 있었다. 이는 FO 혼합토의 경우 간극비와 입도분포만으로 투수계수를 추정할 수 없으며 다른 요인을 고려해야한다는 것을 의미한다.

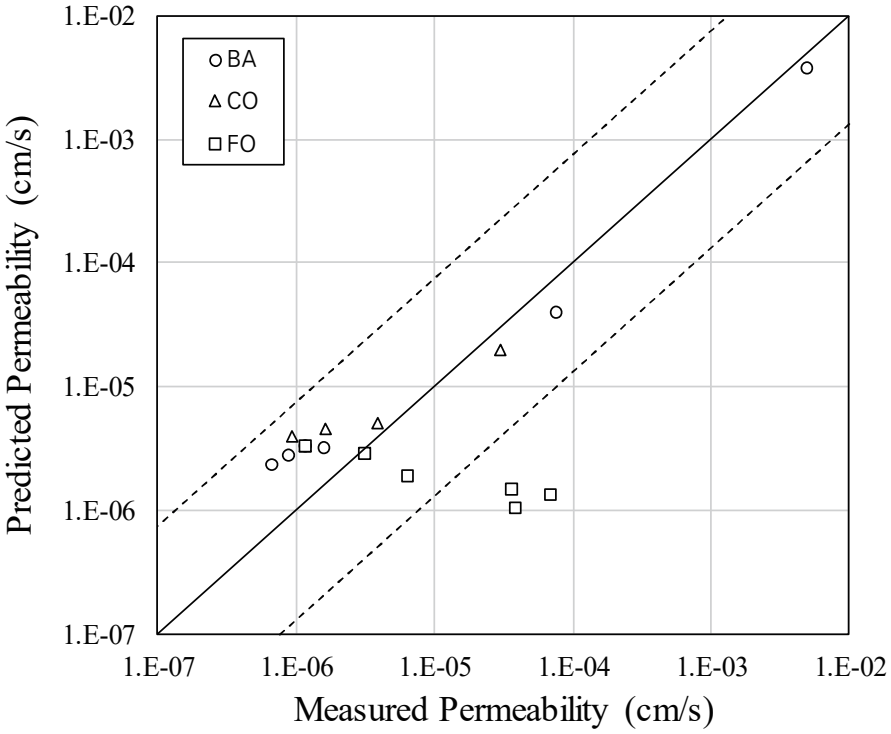


Fig. 5.10 Linear regression analysis using D_{30} and void ratio($\frac{e^3}{1+e}$)

Table 5.7 All experiment data

Mixing ratio		G_s	LL (%)	e	D_{10} (mm)	D_{15} (mm)	D_{30} (mm)	D_{50} (mm)	D_{60} (mm)	Passing % finer than 0.075 (mm)	Passing % finer than 0.002 (mm)	K (cm/s)
BA	0	2.62	39.6	0.870	-	-	0.003305	0.010142	0.014544	94.1%	70.0%	1.18E-06
	20	2.54	35.5	0.839	-	-	0.005178	0.014366	0.021415	77.2%	59.0%	8.87E-07
	40	2.46	29.4	0.807	-	0.001556	0.007003	0.028121	0.057950	62.5%	45.0%	6.71E-07
	60	2.37	29.3	0.802	0.005192	0.008589	0.022205	0.125669	0.220619	46.2%	28.0%	1.61E-06
	80	2.29	36.8	0.963	0.014311	0.027875	0.083452	0.283042	0.389293	29.0%	13.0%	7.63E-05
	100	2.21	-	1.208	0.069941	0.099016	0.181559	0.322887	0.419129	10.6%	5.0%	0.00494
CO	0	2.62	39.6	0.870	-	-	0.003305	0.010142	0.014544	94.1%	70.0%	1.18E-06
	20	2.56	36.9	0.887	-	0.001581	0.006617	0.020158	0.027856	77.0%	50.0%	9.37E-07
	40	2.50	35.3	0.894	-	0.003095	0.010219	0.030647	0.060456	63.5%	42.0%	1.67E-06
	60	2.43	34.9	0.883	-	0.004976	0.018778	0.146969	0.385500	46.0%	31.0%	3.93E-06
	80	2.37	41.5	0.989	-	0.006167	0.042514	0.503234	0.717355	32.5%	25.0%	3.02E-05
	100	2.31	-	1.216	0.025627	0.060350	0.376177	0.717355	0.911646	15.5%	10.0%	2.94E-03
FO	0	2.62	39.6	0.870	-	-	0.003305	0.010142	0.014544	94.1%	70.0%	1.18E-06
	20	2.56	37.6	0.837	-	0.001971	0.007628	0.018556	0.026022	84.0%	51.0%	3.17E-06
	40	2.50	35.5	0.771	-	0.002243	0.006761	0.017056	0.024875	92.0%	53.0%	6.48E-06
	60	2.43	32.6	0.727	-	0.002186	0.007537	0.015522	0.023109	97.0%	56.0%	3.61E-05
	80	2.37	32.6	0.635	0.001948	0.003525	0.011656	0.024998	0.032598	88.0%	43.0%	3.88E-05
	100	2.31	-	0.689	-	0.001859	0.010834	0.022942	0.035609	82.6%	45.0%	6.87E-05

Table 5.8 Correlation analysis result

Correlation coefficient (R)		LL (%)	e	D_{30} (mm)	D_{50} (mm)	D_{60} (mm)	Passing % finer than 0.075 (mm)	Passing % finer than 0.002 (mm)	K (cm/s)
LL (%)		1	0.840	0.692	0.669	0.611	-0.423	-0.155	0.623
e			1	0.801	0.789	0.761	-0.786	-0.473	0.780
D_{30} (mm)				1	0.861	0.802	-0.716	-0.626	0.788
D_{50} (mm)					1	0.984	-0.837	-0.656	0.596
D_{60} (mm)						1	-0.863	-0.660	0.541
Passing % finer than	0.075 (mm)			Symmetric			1	0.820	-0.652
	0.002 (mm)							1	-0.599
K (cm/s)									1

5.2.2 비선형 회귀분석

회귀분석을 통하여 투수계수 추정식을 생성하고 정확도를 평가하였으며, 이는 추정값과 예측값 사이에 평균적으로 약 4.91배의 오차를 발생시키며 표본의 수가 적다는 한계점이 있다. 또한 투수계수 예측에 관련된 많은 선행 연구가 존재하며 개발된 예측식들은 선형 방정식이 아닌 일정한 형태의 비선형 방정식으로 이루어져있다. 따라서 본 연구에서도 이를 고려하여 비선형 회귀분석을 통해 관계식을 개발하였다.

비선형 방정식은 여러 가지 형태를 취할 수 있으며 그 형태가 무한하기 때문에 비선형 회귀분석을 위한 기대 함수를 지정한 후 분석을 수행해야 한다. 따라서 추정 결과값에 영향을 미치는 영향 인자에 대한 이해가 필요하고 이를 이용한 최적의 방정식 형태를 지정할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 투수계수와 투수계수에 영향을 미치는 인자들의 관계를 파악하기 위하여 분석을 수행하였다.

먼저, 간극비와 투수계수의 관계는 선행 연구들로부터 알려져 있듯이 $K \propto \frac{e^3}{1+e}$의 관계가 성립하므로 이를 이용하여 기존의 투수계수 예측식과 같이 식 (13)와 같은 형태로 관계식을 구성하였으며 그 결과는 Fig. 5.11과 같다. 상수값은 혼합비 0%일 경우의 투수계수와 간극비를 이용하여 계산하였다.

$$k\,(cm/s) = 3.35 \times 10^{-6} \frac{e^3}{1+e} \quad (13)$$

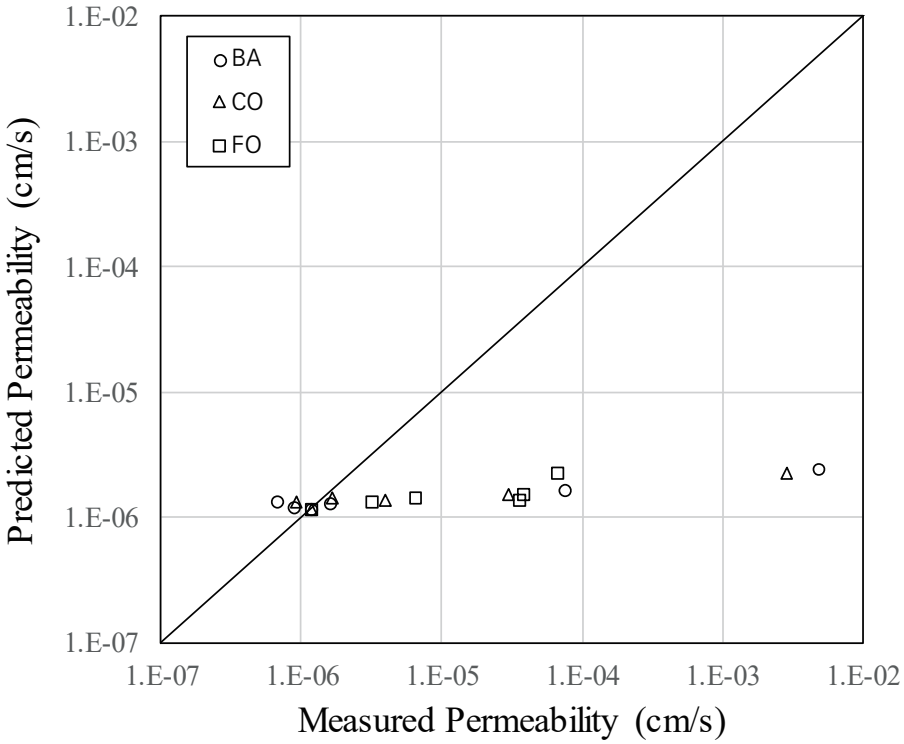


Fig. 5.11 Non-linear regression analysis using void ratio(e)

실측값과 예측값은 잘 일치하지 않는 것으로 나타났다. 가장 작은 투수계수와 가장 큰 투수계수는 약 10000배의 차이가 발생하였고, 간극비의 변화는 약 1.5배의 차이만이 발생하였기 때문에 간극비만으로는 투수계수의 변화를 설명할 수 없는 것으로 판단된다. 이는 예측식에서 $\frac{e^3}{1+e}$의 계수는 동일한 흙에서 동일한 값을 가지는데, 혼합비가 변화하면서 계수가 동일한 값을 가지지 않기 때문에 이를 하나의 상수 값으로 적용할 경우 큰 오차가 발생하기 때문이다. 본 시험에서는 조립질 재료의 혼합 시 입도분포가 변화하며, 점토성분이 많은 Soil이 혼합비가 증가하면서 점토성분이 줄어들기 때문에 전기적 성질 및 흙의 구조 등이 투수계수에 영향을 미쳐 이와 같은 결과가 나타난 것으로 판단된다.

따라서 비선형 방정식의 구성을 위해 입도분포와 액성한계의 영향을 다음과 같이 나타내고 분석하였다. Fig. 5.12는 투수계수와의 상관성이 가장 높았던 D_{30}과 투수계수의 그래프이고 Fig. 5.13는 액성한계와 투수계수의 그래프이다.

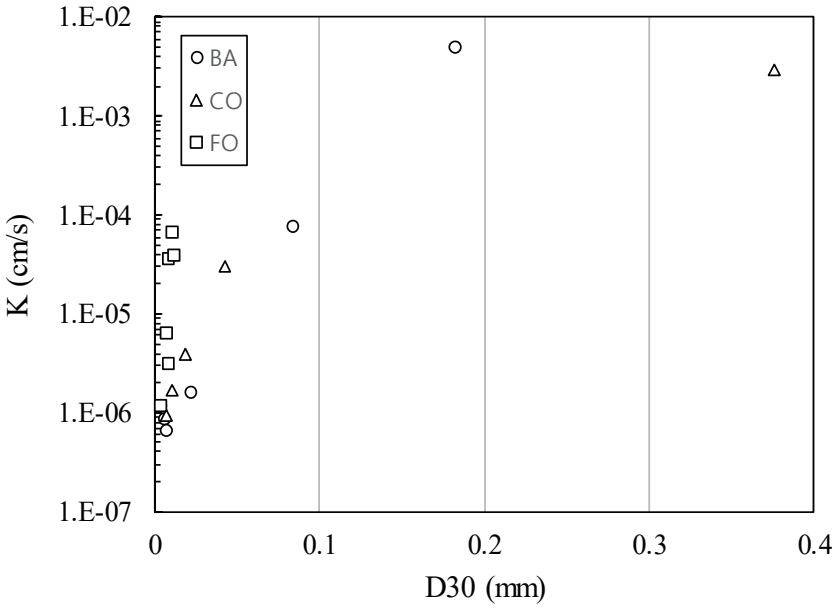


Fig. 5.12 Relationship between D_{30} and permeability coefficient

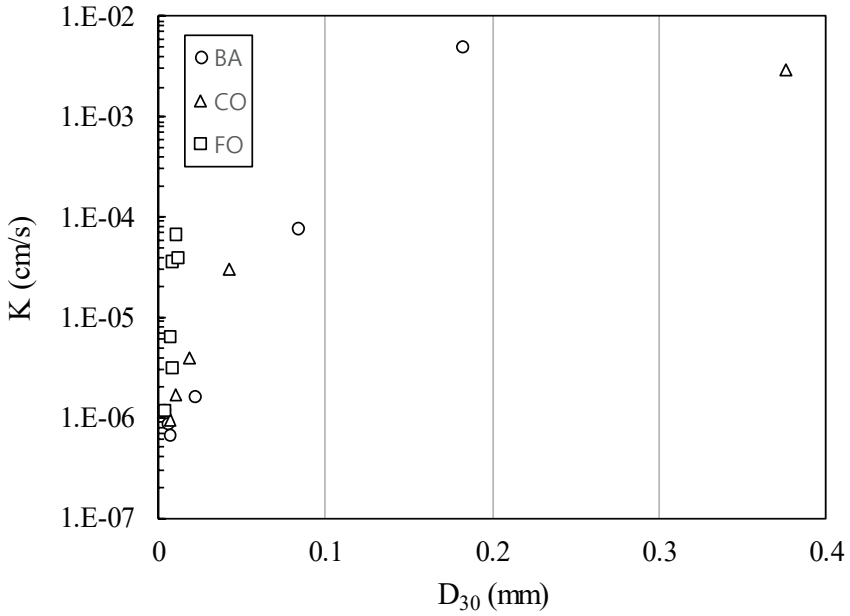


Fig. 5.13 Relationship between LL and permeability coefficient

D_{30}과 투수계수의 관계를 살펴보면, 상관성 분석 시 상관성이 높은 것으로 나왔음에도 불구하고, BA와 CO 혼합토는 D_{30}이 증가할수록 투수계수가 증가하지만 FO 혼합토는 D_{30}에 변화가 없어 뚜렷한 관계를 확인할 수 없었다. 따라서 본 연구에서의 관계식 형성에 입도분포를 제외하였다.

액성한계는 증가할수록 투수계수는 감소함을 확인할 수 있으며 이는 반비례 관계로 판단된다. 또한 Fig. 5.13에서 투수계수는 log 형태이기 때문에 방정식 구성 시 액성한계를 LL^c 형태로 이용하였다. 구성한 추정식은 식 (14)와 같으며 이 때 결과는 Fig. 5.14와 같다.

$$K = 2.88 \times 10^{-8} \frac{e^3}{1+e} \frac{1}{LL^{5.97}} \quad (14)$$

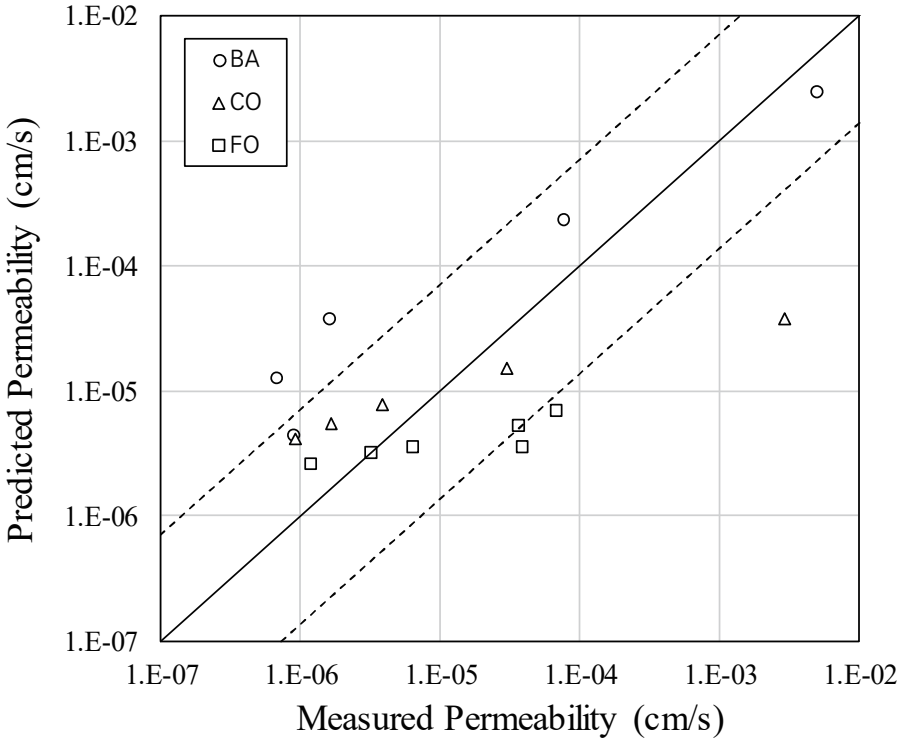


Fig. 5.14 Non-linear regression analysis using void ratio(e) and LL

분석 결과 log K의 RMSE는 0.854로 나타났으며, 이는 이 추정값이 실측값과 평균적으로 7.15배의 차이를 나타낸다는 것을 의미한다. Fig 5.14에서 BA 혼합토는 실측값에 비하여 추정값이 크게 나타나고 CO와 FO 혼합토는 실측값에 비하여 추정값이 작게 나타난다. 또한 CO와 FO 혼합토는 투수계수가 커질수록 추정값이 실측값을 따라가지 못하는 것을 확인할 수 있다. 이는 5.1.2절에서 제시하였던 패각의 투수성 증진 효과를 고려하지 못한 것으로 판단된다.

따라서 이를 보정하기 위하여 패각의 혼합비를 이용하여 비선형 방정식을 구성하였다. 방정식 구성 시 패각의 혼합비가 0%인 경우 이와 관련된 항은 투수계수 값에 영향을 주지 않아야 한다. 따라서 패각의 혼합비를 지수의 형태로 하여 $C^{(\text{패각 함량})}$으로 이용하였다. 구성한 추정식은

식 (15)와 같으며 이 때 결과는 Fig. 15와 같다.

$$K = 7.49 \times 10^{-10} \frac{e^3}{1+e} \frac{1}{LL^{7.57}} 1.047^{(Contents\ of\ Oyster\ shell)} \quad (15)$$

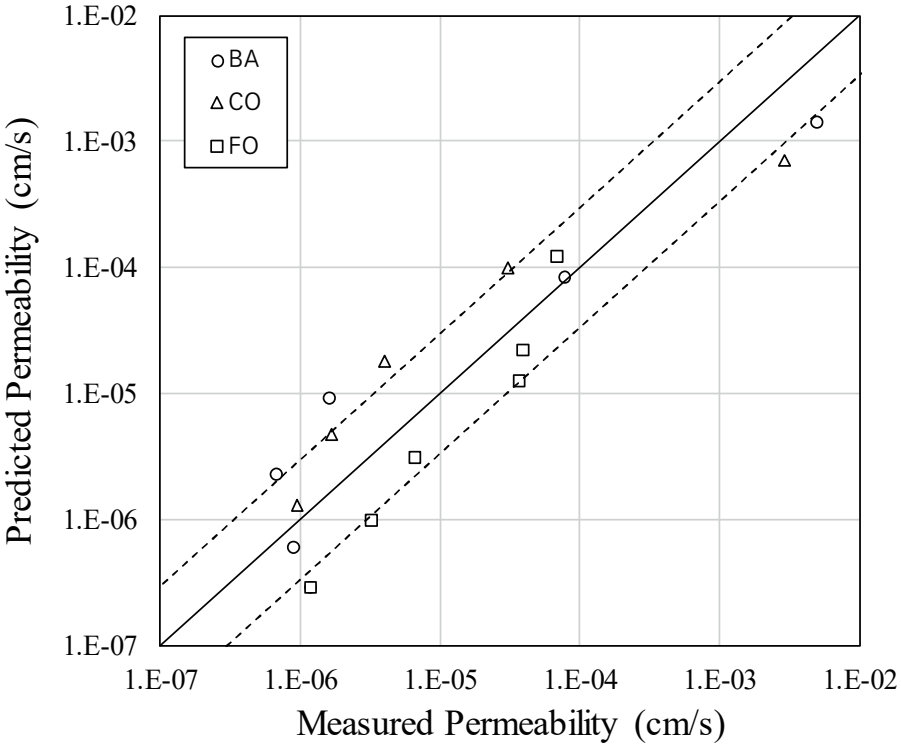


Fig. 5.15 Non-linear regression analysis using void ratio(e), LL and contents of oyster shell

분석 결과 log K의 RMSE는 0.47로 나타났으며, 이는 이 추정값이 실측값과 평균적으로 약 2.97배의 오차를 나타낼 수 있음을 의미한다. 굴패각의 함량을 추정식에 적용한 결과 CO와 FO의 투수계수 추정값이 실측값을 잘 따라가고 있음을 확인할 수 있다. 결론적으로, 간극비, 액성한계, 굴패각 함량을 이용하여 투수계수 추정식을 구성하였으며 이는 높은 정확도를 보여, 위 영향 인자들이 투수계수에 미치는 영향을 확인하였다.

5.3 모델링

본 연구에서는 실내 시험을 통하여 Bottom ash와 굴패각 혼합토의 투수계수 변화를 확인하고 이를 분석하였다. 따라서 혼합토를 이용할 경우 이러한 투수계수 변화에 따른 간척지 제염 효과를 검증하기 위하여 모델링을 수행하였다.

5.3.1 모델링 소프트웨어의 검증

간척지 토양에 대하여 물의 이동에 따른 염분의 이동 및 용탈 시험을 수행하고 이를 모델링하여 모델링 결과와 비교하였다. 용탈 시험은 투수시험기를 이용하였으며 단위면적당 100mm에 대하여 시험을 수행하고 10, 30, 50, 70, 90, 100mm 용출 시 염분농도를 각각 측정하였다. Fig. 5.16는 염분농도 측정에 사용한 CyberScan PC300이며, 이는 dS/m 단위의 전기전도도를 측정할 수 있다. 이를 %농도 및 g/m^3 단위로 환산하여 이용하였다.

Fig. 5.16 CyberScan PC300

초기 흙의 전기전도도는 10.8dS/m로, 이를 환산하면 흙 속의 염분의 총량이 5.67g이며 농도는 8294.4g/m^3 이다. Fig. 5.17는 실험 결과 및 염분 이동 모델링 결과를 도시한 것으로, 측정 결과와 예측 결과가 거의 일치함을 보여주고 있다.

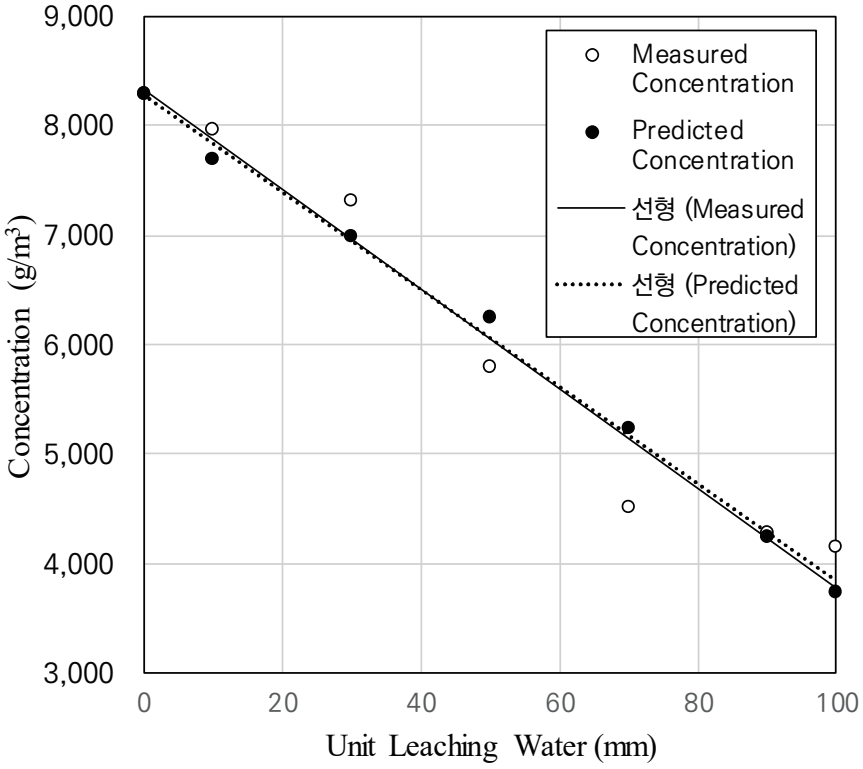


Fig. 5.17 Verification results of modeling software

5.3.2 모델링 단면 설계

Bottom ash와 굴패각의 혼합을 통한 혼합토의 투수성 변화가 실제로 간척지 제염에 미치는 영향을 파악하기 위하여 모델링을 수행하였다. 혼합 재료에 따라 각각의 물리·화학적 특성이 다르며, 투수계수의 변화 경향과 변화 폭이 다르기 때문에 혼합토의 이용 방법이 각각 달라져야 할 것으로 판단된다. 또한 작물 생장을 위해서는 토양 개량 시 토양 오염도와 토양의 비옥도를 나타내는 CEC(Cation Exchange Capacity) 등에 대한 고려가 필요하다. Table 5.9 와 Table 5.10 는 각각 Bottom ash와 굴패각의 혼합비에 따른 토양오염도와 CEC를 나타낸 것이다.

Table 5.9 Soil contamination and CEC of bottom ash mixture

Bottom ash	0%	20%	40%	60%	80%	100%	우려 기준	대책 기준
Cr6+ (mg/kg)	0	0	0	0	0	0	5	15
Pb (mg/kg)	17	14.68	12.36	10.04	7.72	5.4	200	600
Cd (mg/kg)	0	0	0	0	0	0	4	12
As (mg/kg)	5.75	4.6	3.45	2.3	1.15	0	25	75
Hg (mg/kg)	0	0	0	0	0	0	4	12
Cu (mg/kg)	14.9	20.36	25.82	31.28	36.74	42.2	150	450
Zn (mg/kg)	58.6	49.06	39.52	29.98	20.44	10.9	300	900
Ni (mg/kg)	21	18.6	16.2	13.8	11.4	9	100	300
CEC $(cmol/kg)$	16.21	13.13	10.04	6.97	3.87	0.79		

Table 5.10 Soil contamination and CEC of oyster shell mixture

굴패각	0%	20%	40%	60%	80%	100%	우려 기준	대책 기준
Cr6+ (mg/kg)	0	0	0	0	0	0	5	15
Pb (mg/kg)	17	15.02	13.04	11.06	9.08	7.1	200	600
Cd (mg/kg)	0	0	0	0	0	0	4	12
As (mg/kg)	5.75	4.6	3.45	2.3	1.15	0	25	75
Hg (mg/kg)	0	0	0	0	0	0	4	12
Cu (mg/kg)	14.9	55.22	95.54	135.86	176.18	216.5	150	450
Zn (mg/kg)	58.6	51.16	43.72	36.28	28.84	21.4	300	900
Ni (mg/kg)	21	25.06	29.12	33.18	37.24	41.3	100	300
CEC ($cmol/kg$)	16.21	14.382	12.554	10.726	8.898	7.07		

두 재료 모두 토양 오염의 위험이 적지만, 굴패각의 경우 약 70% 이상 혼합될 경우 Cu 성분에 의한 오염이 기준치를 넘게 된다. 혼합비 증가에 따라 CEC는 감소하는데, 토양 CEC는 약 12-15 $cmol/kg$ 이상을 권장하고 있다. 60% 이상의 혼합비에서는 이에 미치지 못한다. 따라서 혼합비를 이 이하로 조절하여 사용할 필요가 있다. 또한 투수계수 시험 결과, 세립질 패각의 혼합비가 60%까지 증가하면서 투수계수가 꾸준하게 증가하기 때문에 상부 토양에 세립질 패각을 혼합하여 간척지 토양의 제염 효과를 높일 수 있을 것으로 판단하였다. Bottom ash 혼합토는 토양 오염도가 기준치를 넘지 않지만, 혼합비가 높아질수록 토양 비옥도를 나타내는 CEC가 매우 낮아진다. 또한 투수계수 시험 결과, Bottom ash 혼

합토는 혼합비 약 55%까지 투수계수가 감소하기 때문에 토양 개량에 적합하지 않다. 하지만 이후 투수계수가 기하급수적으로 높아지기 때문에 작물의 뿌리 깊이 아래에서 사용될 경우 배수층으로 사용될 수 있는 가능성이 있다. 따라서 모델링 시 상부 토양의 개량은 세립질 패각 20%, 40% 혼합토를 이용하였고 배수층은 Bottom ash 100%를 이용하였다.

배수층 및 배수로 설계는 국가건설기준센터의 설계기준 및 표준시방서에서 농지배수 및 용배수로에 대하여 제시된 기준을 참고하였다. 본 연구에서는 Bottom ash를 이용한 배수층 설치를 통해 지표배수와 지하배수를 동시에 실시하므로 기준에 따라 배수로 깊이를 지표면보다 1.2m 낮게 설계하였다. 또한 배수로의 간격에 따라 제염 효과가 달라질 수 있기 때문에 배수로를 50m 당 1개, 25m 당 1개로 조절하여 모델링을 수행하였으며 모델링 케이스와 도면은 각각 Table 5.11 및 Fig. 5.18과 같다.

Steady-state 해석을 통해 초기상태를 설정하고, 침투해석과 용질이동에 대한 해석을 수행하였다. 토양의 초기 염도는 시료에 대한 측정 결과 10.8 dS/m로, 이를 환산하여 약 8000 g/m^{3}으로 설정하였고 제염을 위한 용수는 1mm/hour로 설정하여 10일 간의 변화를 모의하였다.

Table 5.11 Modeling case settings

Case	Interval of drainage ditches (m)	Drainage layer	Improvement of soil layer	Notes
1	No drainage ditches	x	x	Drainage layer - Using bottom ash 100% BA : 4.94E-03 cm/s Soil layer - Mixing oyster shell Soil : 1.18E-06 cm/s FO 20% : 3.17E-06 cm/s FO 40% : 6.48E-06 cm/s
2			FO 20%	
3			FO 40%	
4	50	x	x	
5			FO 20%	
6			FO 40%	
7		o	x	
8			FO 20%	
9			FO 40%	
10	25	x	x	
11			FO 20%	
12			FO 40%	
13		o	x	
14			FO 20%	
15			FO 40%	

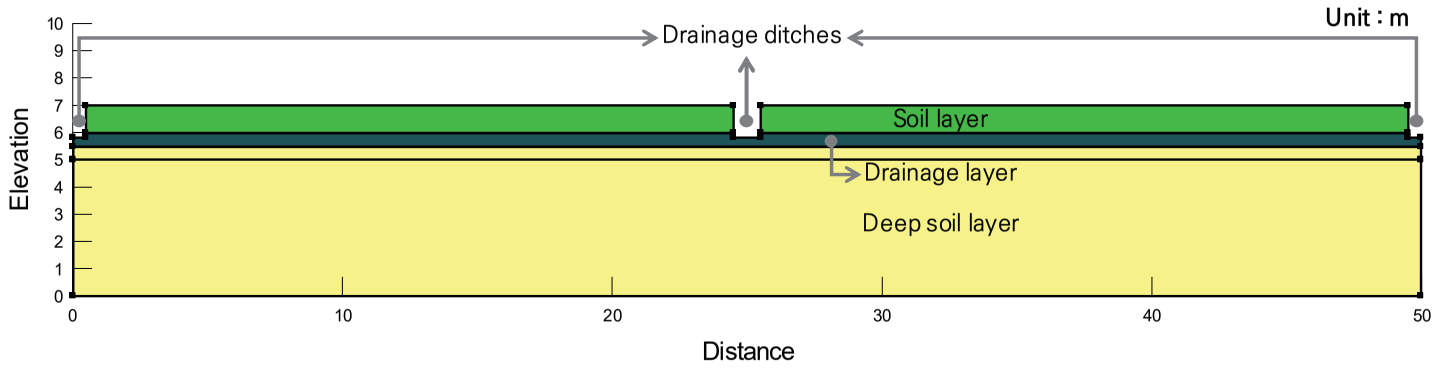


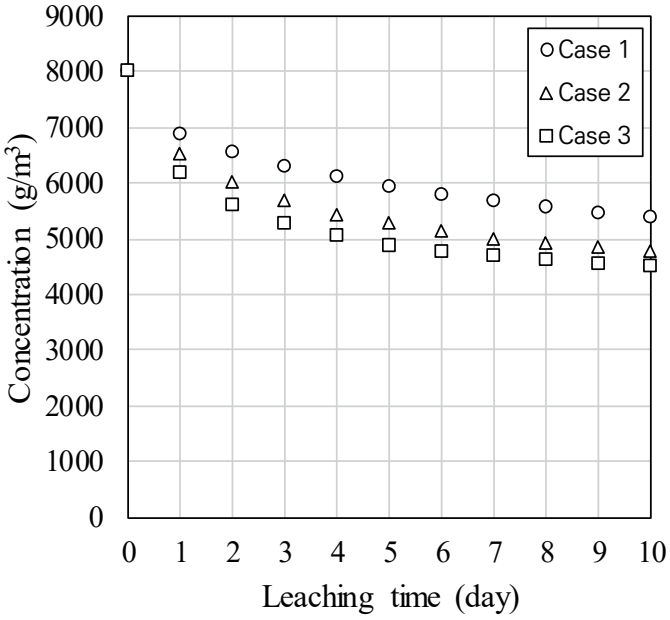
Fig. 5.18 Design of modeling section

5.3.3 모델링 결과

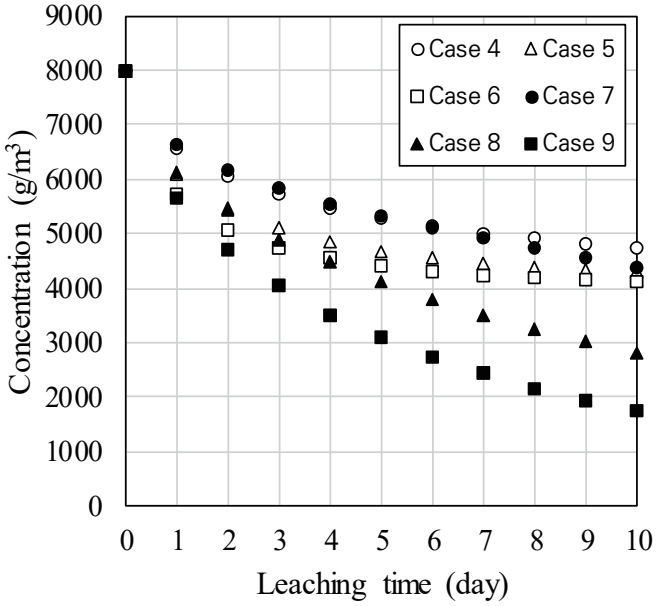
모델링 결과는 제염 시작 후 1일, 4일, 7일, 10일째의 상태를 부록에 도시하였다. 평균 토양 염분 농도는 토양 상부층과 하부층을 나누어 그래프로 도시하였으며, 그래프는 Table 5.12 와 같이 표식을 지정하였다. 평균 염분 농도는 Fig. 5.19, Fig. 5.20 및 Table 5.13, Table 5.14와 같다.

Table 5.12 Marks of the graph for each case

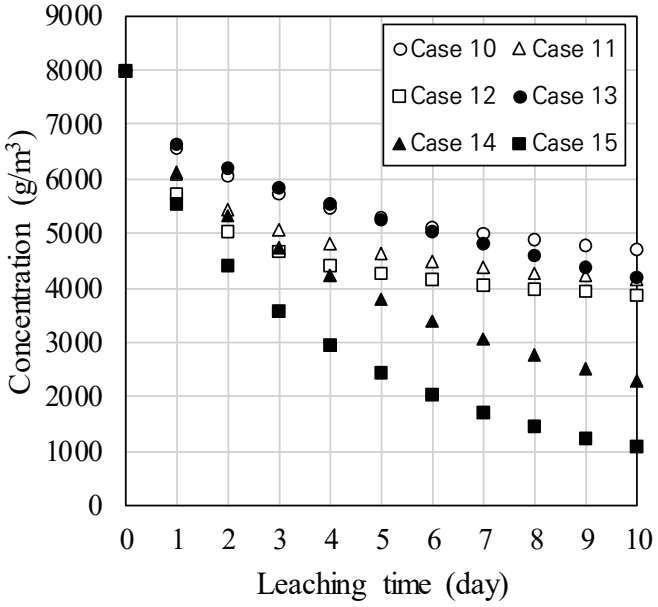
		Soil layer		
		Soil	FO 20%	FO 40%
Drainage layer	X	○	△	□
	Bottom ash	●	▲	■



(a) Case 1 - 3

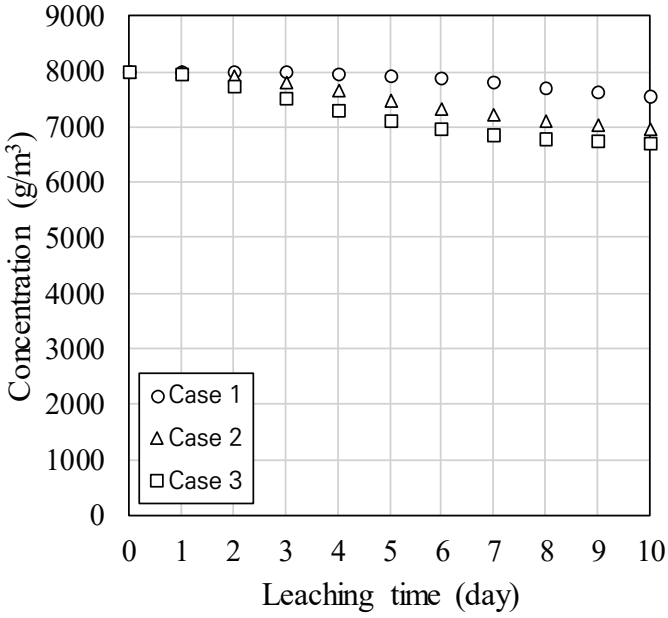


(b) Case 4 - 9

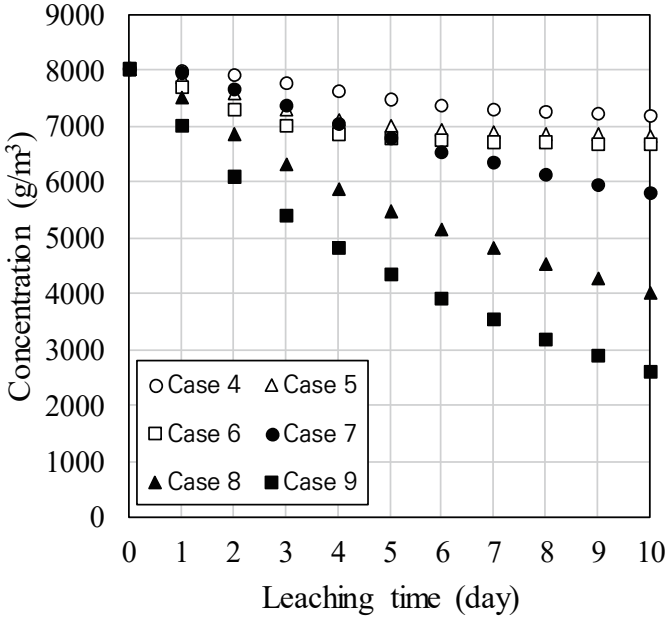


(c) Case 10 - 15

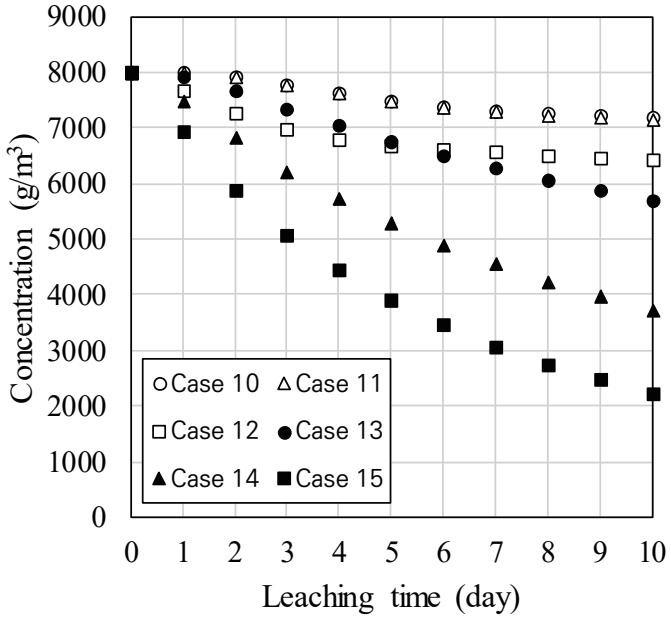
Fig. 5.20 Modeling results (upper soil layer, depth = 0 - 1m)



(a) Case 1 - 3



(b) Case 4 - 9



(c) Case 10 - 15

Fig. 5.20 Modeling results (lower soil layer, depth = 1 - 2m)

해석 결과 배수로가 설치되지 않은 Case 1, 2, 3은 지속적인 강우에도 제염이 거의 되지 않는 것으로 나타났으며, Case 8, 9, 14, 15의 제염 효율이 가장 높은 것으로 나타났다.

Case 1, 2, 3은 배수로가 존재하지 않은 곳으로, 제염 효율이 매우 낮으며 염분의 배출이 느리고 염분이 하부에 집적되었다가 건조 시 재염화 발생의 위험이 있다. 배수로를 설치한 경우인 Case 4, 5, 6, 10, 11, 12는 배수로를 설치하고 배수로 간격이 좁아짐에 따라 제염 효율이 증가하는 모습을 보여주지만 증가폭이 작은 것을 확인할 수 있다. 제염 10일차의 Case 1과 Case 2, 3, Case 4, 10을 비교하면 상부 토양에 개량만 실시한 경우와 배수로만 설치한 경우의 제염 효율이 거의 유사함을 알 수 있다.

배수로와 함께 상부 토양의 개량을 실시한 경우인 Case 5, 6, 11, 12는 제염 2일차까지 제염 효율이 가장 높게 나타난 Case 8, 9, 14, 15와 유사한 상부 토양의 초기 제염 효율을 보이고 있다. 하지만 하부 토양에서는

이에 미치지 못하고 있으며, 상부 토양 개량 시 제염 효과가 하부까지 미치지 못함을 알 수 있다.

검정색 점으로 도시된 Case 7, 13은 배수로와 배수층을 함께 설치한 경우로, 배수층을 설치하지 않은 Case 4, 10에 비하여 초기 제염 효율은 유사하지만 제염 7일차부터 차이가 발생하여 장기적인 제염 효율이 높아지는 것을 확인할 수 있다. 이 때 장기 제염 효율은 배수로와 함께 토양 개량을 실시한 Case 5, 6, 11, 12와 유사하게 나타난다. 또한 하부 토양에서는 배수로와 배수층을 설치한 경우가 배수로와 토양 개량을 실시한 경우보다 제염 효율이 현저히 증가하고 있다.

배수로, 배수층과 함께 상부 토양의 개량을 실시한 경우인 Case 8, 9, 14, 15는 다른 Case들에 비하여 제염 효율이 매우 높아진 것을 확인할 수 있으며, 이는 하부 토양에서 더 극단적인 차이를 보인다.

작물 생육을 위한 염분 농도는 약 1500 - 2000 g/m^{3}인데, Case 9, 15에서 각각 9일차, 6일차에 이에 도달한 것으로 나타났다. 또한 Case 8, 14에서도 이에 근접한 염분 농도에 도달하였다. 이는 제염 용수를 충분히 공급할 경우 이와 같은 배수 시설 설계 시 약 10일 만에 작물 생육이 가능한 수준으로 제염이 가능함을 보여준다.

Table 5.13 Modeling results (upper soil layer, depth = 0 - 1m)

case	Leaching time (day)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	8000.0	6869.0	6567.4	6311.4	6101.3	5927.2	5781.6	5658.2	5552.2	5459.7	5377.8
2	8000.0	6520.2	6020.0	5680.1	5438.3	5256.8	5114.5	4999.2	4903.5	4822.9	4754.2
3	8000.0	6193.9	5604.2	5260.3	5037.6	4881.4	4765.7	4676.5	4605.8	4548.5	4501.5
4	8000.0	6562.6	6073.2	5731.6	5483.0	5292.9	5141.9	5019.2	4918.1	4834.0	4763.7
5	8000.0	6094.7	5466.7	5100.3	4860.1	4691.4	4567.6	4474.2	4401.9	4344.8	4298.9
6	8000.0	5743.7	5092.1	4758.1	4556.6	4422.1	4326.1	4254.3	4198.4	4153.6	4116.9
7	8000.0	6633.4	6181.6	5841.5	5564.7	5325.5	5111.1	4914.8	4732.6	4562.3	4402.2
8	8000.0	6145.9	5430.4	4905.9	4477.5	4111.1	3790.7	3507.1	3253.7	3025.6	2818.9
9	8000.0	5650.5	4706.3	4039.3	3517.5	3091.7	2735.5	2432.4	2170.7	1942.4	1741.6
10	8000.0	6565.1	6074.2	5728.9	5475.3	5279.5	5122.7	4993.9	4886.6	4796.3	4719.8
11	8000.0	6089.9	5447.4	5064.7	4808.4	4624.1	4485.6	4378.2	4292.9	4223.5	4165.9
12	8000.0	5719.4	5033.5	4667.5	4437.3	4277.5	4159.2	4067.5	3993.9	3933.0	3881.6
13	8000.0	6658.9	6194.2	5837.7	5539.3	5275.1	5033.6	4809.5	4599.6	4402.3	4216.1
14	8000.0	6135.9	5350.7	4742.6	4231.8	3791.1	3407.3	3071.6	2776.9	2517.4	2288.4
15	8000.0	5547.9	4423.8	3597.0	2956.4	2452.4	2052.2	1731.8	1473.1	1262.5	1089.7

Table 5.14 Modeling results (lower soil layer, depth = 1 - 2m)

case	Leaching time (day)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	8000.0	8000.0	7999.7	7993.2	7965.8	7920.4	7860.1	7788.4	7709.1	7625.1	7539.0
2	8000.0	7995.0	7927.2	7802.9	7648.7	7488.6	7339.0	7209.6	7103.7	7020.8	6957.7
3	8000.0	7933.7	7742.7	7506.6	7281.7	7093.8	6950.2	6847.0	6775.9	6728.4	6697.6
4	8000.0	7994.6	7914.0	7773.7	7615.8	7475.8	7368.1	7292.0	7240.9	7207.6	7186.2
5	8000.0	7862.4	7571.9	7301.8	7113.5	6996.7	6926.9	6885.0	6859.3	6842.9	6831.7
6	8000.0	7678.2	7273.9	7001.5	6849.8	6769.6	6727.0	6703.3	6688.9	6678.6	6669.8
7	8000.0	7941.5	7666.7	7347.4	7042.9	6773.0	6535.8	6324.3	6131.9	5953.7	5786.3
8	8000.0	7504.1	6853.2	6308.5	5861.2	5476.2	5131.8	4817.1	4526.3	4256.0	4003.9
9	8000.0	6999.7	6082.7	5386.3	4818.9	4331.3	3902.3	3520.9	3180.0	2874.2	2599.4
10	8000.0	7994.6	7919.1	7786.9	7636.7	7501.5	7394.7	7316.2	7260.3	7220.5	7191.7
11	8000.0	7994.4	7915.8	7778.3	7622.0	7481.4	7370.7	7289.6	7232.3	7191.9	7163.1
12	8000.0	7679.5	7265.3	6972.1	6794.0	6685.4	6613.9	6561.2	6518.2	6479.7	6443.5
13	8000.0	7924.4	7674.1	7359.0	7049.9	6768.2	6514.8	6284.6	6072.9	5875.8	5690.6
14	8000.0	7500.8	6819.3	6226.1	5725.5	5291.7	4907.5	4562.7	4251.1	3968.3	3710.7
15	8000.0	6933.3	5898.9	5091.2	4442.1	3905.9	3456.0	3074.7	2749.0	2468.7	2225.8

제 6 장 요약 및 결론

본 연구에서는 산업부산물을 이용한 간척지 토양 개량의 효과를 분석하기 위한 실험을 수행하고 이를 이용하여 배수시설 설계 및 설계도에 따른 간척지 제염을 모델링하였다. 혼합 재료의 입경과 혼합비를 조절하여 실험을 수행하고 실험 결과를 이용하여 혼합에 따른 투수계수의 변화를 분석하였으며, 모델링 결과로부터 배수 및 제염 효율의 향상을 확인하였다. 이를 요약하면 다음과 같다.

1. 간척지 토양의 투수성을 높이기 위하여 산업부산물인 Bottom ash와 굴패각을 분쇄하여 토양에 혼합하였다. 투수계수 변화의 원인을 파악하기 위하여 간극비, 입도분포, 액성한계를 이용한 분석을 수행하였다.
2. 입도분포는 일정한 비율로 변화하며 재료에 따른 차이는 크게 나타나지 않았다. 간극비는 Bottom ash와 조립질 패각을 혼합한 경우, 혼합비 60%까지 거의 일정하다가 이후 급격히 증가하였다. 반면, 세립질 패각 혼합토의 경우 혼합비 80%까지 간극비가 감소하였다. 액성한계는 모두 40%까지 감소하며 이후 N.P.로 나타났다.
3. Bottom ash 혼합토의 투수계수는 혼합비 약 55%까지 조금씩 감소하다가 55% 이후로 급격하게 증가하였다. 이는 세립-조립 혼합토에서 간극비의 변화와 관련된 것으로, 조립토가 일정 비율 이상 많아질 때 간극비와 간극의 크기가 급격하게 증가하기 때문인 것으로 판단된다.
4. 세립질 패각 혼합토의 투수계수는 혼합비 60%까지 서서히 증가하고 이후 큰 변화를 보이지 않는 것으로 나타났다. 간극비가 감소하였음에도 투수계수가 증가하는 것은 액성한계 변화를 고려할 때, 굴패각 입자가 전기적 성질을 가지지 않아 혼합토의 점성이 감소하여 간극에서 물의 이동이 자유로워지기 때문인 것으로 판단된다.
5. 조립질 패각 혼합토의 투수계수는 세립질 패각 혼합토에 비하여 간극비가 더 크고 액성한계가 유사하지만 투수계수는 혼합비 80%까지 더 작게 나타났다. 또한 Bottom ash 혼합토에 비하여 투수계수가 낮은

혼합비부터 증가하고 약 60% 이후부터 급격하게 증가하였다. 이를 통하여 패각 입자의 함량이 많을수록 투수계수가 높아지는 것을 알 수 있다.

6. 간극비, 액성한계, 패각 함량을 이용하여 투수계수 추정식을 제안하였으며 $\log_{10}K$의 RMSE는 0.47로 평균 2.97배의 오차를 나타냈다. 제안한 추정식은 다음과 같다.

$$K = 7.49 \times 10^{-10} \frac{e^3}{1+e} \frac{1}{LL^{7.57}} 1.047^{(Contents\ of\ Oyster\ shell)}$$

7. Bottom ash와 굴패각을 배수시설의 재료로 이용하기 위해 투수계수 및 토양오염도와 CEC를 분석한 결과, Bottom ash는 배수층의 재료로 이용 가능하며 굴패각은 세립질로 가공하여 60% 미만의 혼합비로 토양 개량에 이용 가능한 것으로 나타났다.
8. 토양 개량, 배수로, 배수층에 따른 제염 효율 분석 결과, 배수로가 없는 경우 제염 효율이 가장 낮고 토양 개량 시 초기 제염 효율이 매우 높아지며 배수층이 있는 경우 장기적 제염에 효과를 발휘하는 것으로 나타났다. 토양 개량, 배수로, 배수층을 모두 적용할 경우 제염 용수가 충분하다면 10일 만에 작물 생육이 가능한 수준으로 제염이 가능함을 확인하였다.
9. 연구 결과, 산업부산물인 Bottom ash와 굴패각은 간척지 토양의 투수성 개량에 높은 효과를 가지는 것으로 판단된다. 또한 재료의 특성을 고려한 배수 시설 설계 시 간척지 토양의 제염효과가 크게 향상되는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

Andrade, L., Rocha, J., & Cheriaf, M. (2009). Influence of coal bottom ash as fine aggregate on fresh properties of concrete. *Construction Building materials, 23*(2), 609-614.

Andrade, L. B., Rocha, J., & Cheriaf, M. (2007). Evaluation of concrete incorporating bottom ash as a natural aggregates replacement. *Waste Management, 27*(9), 1190-1199.

Bai, Y., Darcy, F., & Basheer, P. (2005). Strength and drying shrinkage properties of concrete containing furnace bottom ash as fine aggregate. *Construction Building materials, 19*(9), 691-697.

Bang, S. (2006). Effect of Soil Conditioner on Soil Properties and Growth of Plants in Reclaimed Tidal Land. *Unpublished master dissertation, Hankyong National University, Gyeonggi-do, Korea*.

Çabalar, A. F., & Mustafa, W. S. (2015). Fall cone tests on clay–sand mixtures. *Engineering Geology, 192*, 154-165.

Carman, P. C. (1937). Fluid flow through granular beds. *Trans. Inst. Chem. Eng., 15*, 150-166.

Carman, P. C. (1956). Flow of gases through porous media. *Doctoral dissertation, The Ohio State University, Ohio, United States of America*.

Chapuis, R. P., & Aubertin, M. (2003). On the use of the Kozeny Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils. *Canadian Geotechnical Journal, 40*(3), 616-628.

Christaras, B. (1991). A comparison of the Casagrande and fall cone penetrometer methods for liquid limit determination in marls from Crete, Greece. *Engineering Geology, 31*(2), 131-142.

Chung, C.K., Kim, J.H., Kim, J.Y., & Kim, T.S. (2018). Hydraulic Conductivity Variation of Coarse-Fine Soil Mixture upon Mixing

Ratio. *Advances in Civil Engineering, 2018*.

Costa, A. (2006). Permeability-porosity relationship: A reexamination of the Kozeny-Carman equation based on a fractal pore-space geometry assumption. *Geophysical research letters, 33*(2).

Hazen, A. (1893). Some physical properties of sands and gravels with special reference to their filtration. Lawrence, Mass. *Massachusetts State Board of Health. 24th Annual Report.*

Jeon, J.H., Son, Y.H., Kim, D.G., & Kim, T.J. (2018). Life Cycle CO2 Assessment of the Drainage Material for Reclaimed Land Using Oyster Shell. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, 60*(6), 21-29.

Kang, S.T., Ryu, G.S., Koh, K.T., & Lee, J.H. (2011). Optimum mix design of alkali-activated cement mortar using bottom ash as binder. *Journal of the Korea Concrete Institut, 23*(4), 487-494.

Kim, D.G., Son, Y.H., Park, J.S., & Bong, T.H. (2015). Breakage Index and Changes in Permeability of Bottom Ash for Use as Fill Material. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, 57*(6), 107-115.

Kim, H.T., Seo, D.U., Yoo, C.H., & Kim, S.Y. (2015). Theoretical Analysis of Soil Desalination Characteristics for Underdrain System at Reclaimed Tidal Land. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, 57*(3), 87-92.

Kim, J.G., Oh, J.H., Huh, Y.K., Moon, J.W., & Ahn, Y.C. (2014). Production and construction manual development for economical· lightweight green-roof system using lightweight vegetative BA block. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure Construction Building materials, 30*(12), 61-68.

Kim, S.J., Baek, S.H., Lee, S.U., Kim, D.G., & Na, Y.J. (2005). Effect of gypsum, popped rice hull and zeolite on soil aggregation in

reclaimed tideland. *Korean Journal of Soil Science Fertilizer, 38*(5), 231-237.

Koh, T. H., Lee, S. J., Shin, M. H., Kim, B. S., Lee, J. K., & Lee, T. Y. (2010). Evaluation for contents of contaminants and leaching characteristics of bottom ash. *Journal of the Korean Geoenvironmental Society, 11*(6), 77-83.

Koumoto, T., & Houlsby, G. (2001). Theory and practice of the fall cone test. *Géotechnique, 51*(8), 701-712.

Kozeny, J. (1927). Uber kapillare leitung der wasser in boden. *Royal Academy of Science, Vienna, Proc. Class I, 136*, 271-306.

Lee, J.E., Seo, D.H., Ro, H.M., & Yun, S.I. (2016). Yield response of Chinese cabbage to compost, gypsum, and phosphate treatments under the saline-sodic soil conditions of reclaimed tidal land. *Korean Journal of Horticultural Science Technology, 34*(4), 587-595.

Lee, S.C., Woo, S.G., An, Y.D., Jun, H.S., & Koo, H.S. (2007). An Experimental Study on the Structural Characteristics of Reinforced Concrete Beams Containing Oyster Shells. *KIEAE Journal, 7*.

Lee, S.H., Hong, B.D., An, Y., & Ro, H.M. (2003). Relation between growth condition of six upland-crops and soil salinity in reclaimed land. *Korean Journal of Soil Science Fertilizer*.

Mikami, K., & Okumura, T. (2007). *Underwater soil improvement for port facilities by compaction piles of oyster shell-sand mixture.* Paper presented at the Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies, 2007. Symposium on.

Ministry of Oceans and Fisheries. 2017. Statistical yearbook of Oceans & Fisheries. pp. 212, 222. (in Korean)

Oh, J.H., Ahn, H.R., Kim, K.U., Ahn, Y.C., & Moon, J.W. (2013). Experimental study on planning soil depth of green roof system

using light-weight greening block. *KIEAE Journal, 13*(3), 105-110.

Park, J.S., Chang, P.W., Son, Y.H., & Kim, S.P. (2006). Estimation of permeability coefficient using fractal dimension of particle size distribution curve in granular soils. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, 48*(4), 41-49.

Ryu, J.H., Chung, D.Y., Ha, S.K., Lee, S.B., Kim, S.J., Kim, M.T., Park, K.D., Kang, H.W. (2014). Capillary Characteristics of Water and Cations in Multi-layered Reclaimed Soil with Macroporous Subsurface Layer Utilizing Coal Bottom Ash. *한국토양비료학회지, 47*(6), 406-411.

Ryu, J.H., Chung, D.Y., Hwang, S.W., Lee, K.D., Lee, S.B., Choi, W.Y., Kim, S.J. (2010). Patterns of leaching and distribution of cations in reclaimed soil according to gypsum incorporation rate. *Korean Journal of Soil Science Fertilizer, 43*(5), 596-601.

Sani, M. S. H. M., Muftah, F., & Muda, Z. (2011). The properties of special concrete using washed bottom ash (WBA) as partial sand replacement. *International Journal of Sustainable Construction Engineering Technology, 1*(2), 65-76.

Seo, D.U. (2011). Salt transport model of unsaturated soil in reclaimed land. *Unpublished doctoral dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea*.

Son, H. (2014). Effect of polyacrylamide on physical properties of soils from reclaimed land. *Unpublished master dissertation, University of Seoul, Seoul, Korea*.

Son, J., Song, J., Shin, W., Lee, S., Ryu, J., & Cho, J. (2016). Properties and Disalinization of Salt-affected Soil. *Korean Journal of Organic Agriculture*.

Son, Y.H., Chang, P.W., & Kim, S.P. (2007). Estimation of Degree of Weathering in Residual Soil Using Water Content from Fall Cone

Test Result. *Journal of the Korean Geotechnical Society, 23*(12), 13-23.

Son, Y., Kim, K., & Mun, H. (2003). The Undrained Shear Strength Characteristics of Mixed Soil with Oyster Shells. *Korean Geotechnol. Soc, 19*(6), 7-14.

Yun, T. K., Son, Y. H., Park, J. S., Noh, S. K., Bong, T. H., & Kim, D. G. (2015). Changes in Shear Strength of Bottom ash through the Particle Breakage. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers, 57*(6), 99-105.

고용일, & 김홍택. (2004). 회사장 석탄재 (MA) 를 이용한 연직배수공법의 모래 대체재 개발에 대한 연구 Ⅰ. *한국지반환경공학회 학술발표회논문집*, 63-72.

구해식. (2008). 패각류를 잔골재 대체재로 사용한 철근콘크리트 기둥의 내력 및 거동에 관한 실험적 연구. *한국생태환경건축학회 논문집, 8*(3), 69-76.

윤길림, 권오순, 임영준, & 양은익. (2001). 굴패각 재활용을 위한 공학적 특성 연구. *대한토목학회논문집 C, 21*(4C), 421-431.

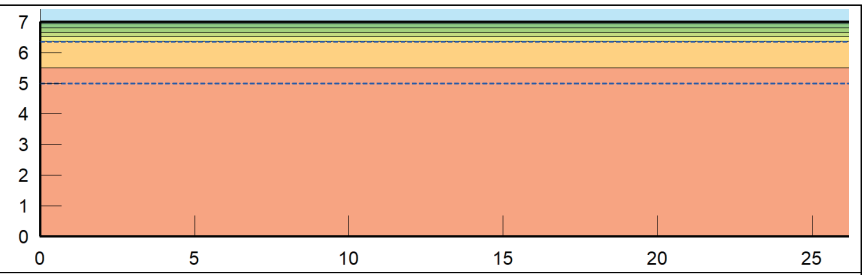
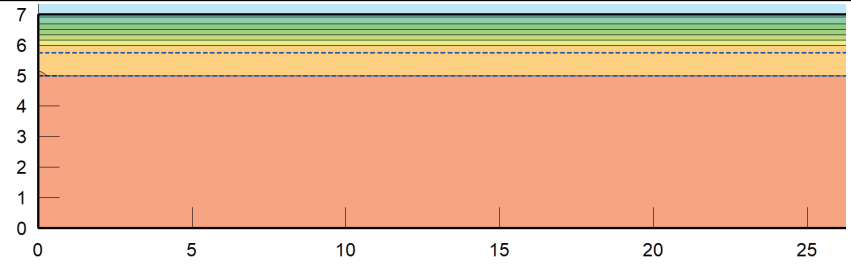
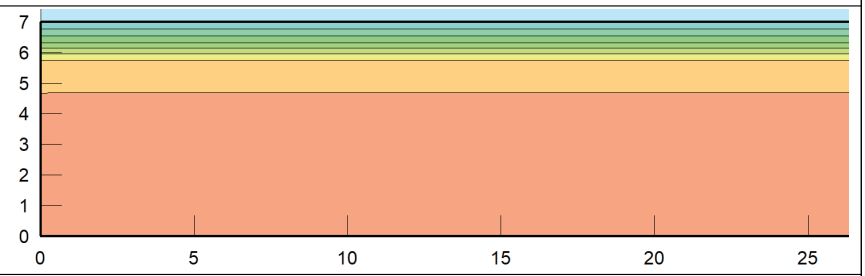
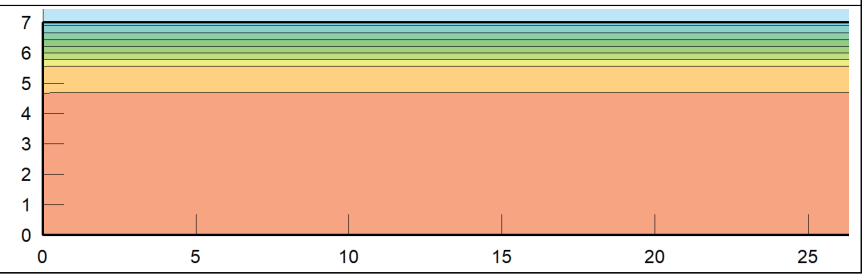
윤길림, 채광석, & 유한규. (2004). 굴패각-모래 혼합토의 실험적 특성 연구. *대한토목학회논문집 C, 24*(5C), 283-288.

이기호, & 한종옥. (2001). 굴패각 혼합토의 압밀 및 투수특성. *대한토목학회논문집 C, 21*(4C), 375-384.

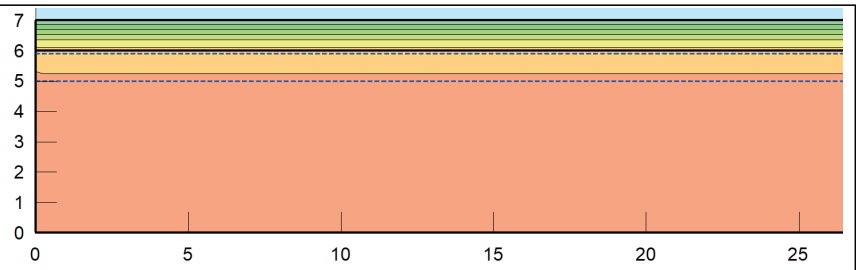
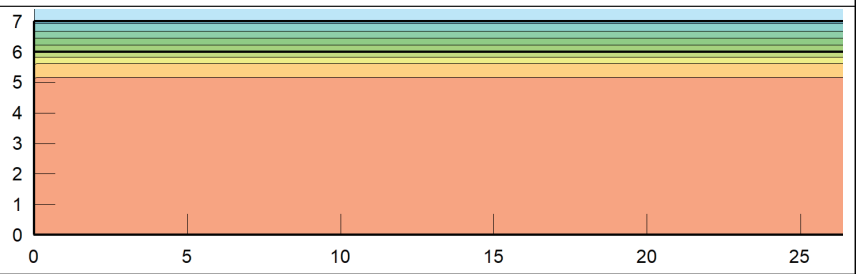
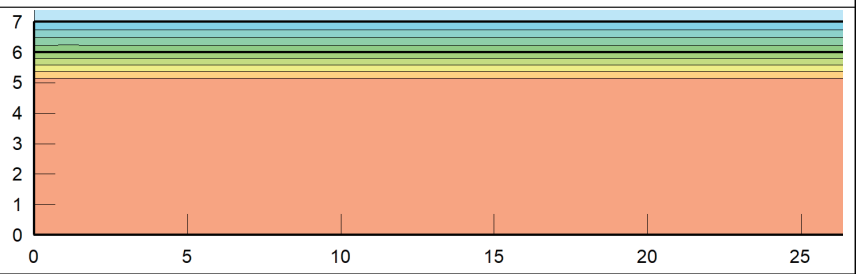
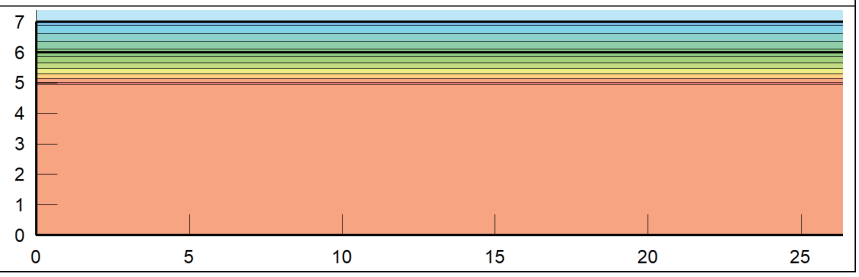
임동기. (2011). DIP 기법과 전기비저항을 이용한 투수계수의 예측 *Unpublished master dissertation, University of Ulsan, Ulsan, Korea*.

부 록

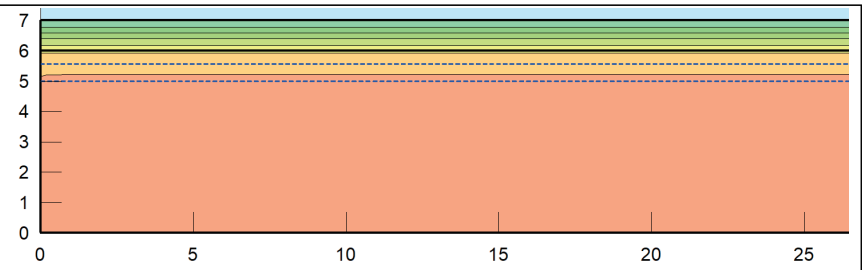
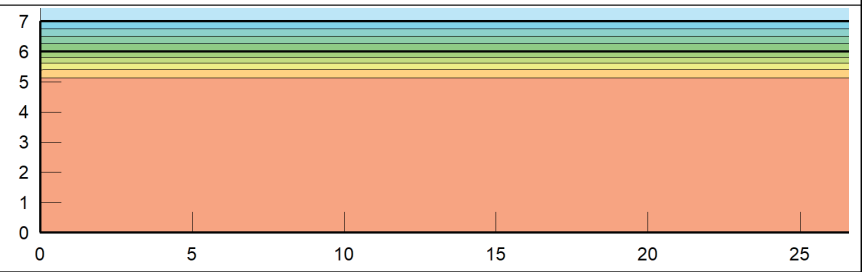
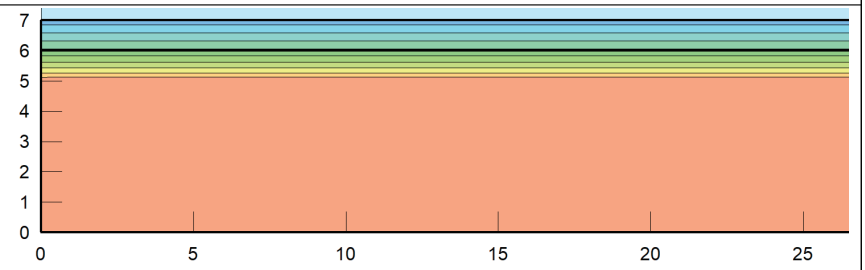
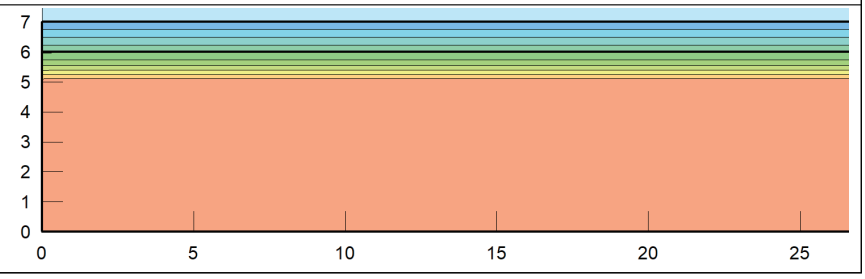
Case 1

1day	
4day	
7day	
10day	

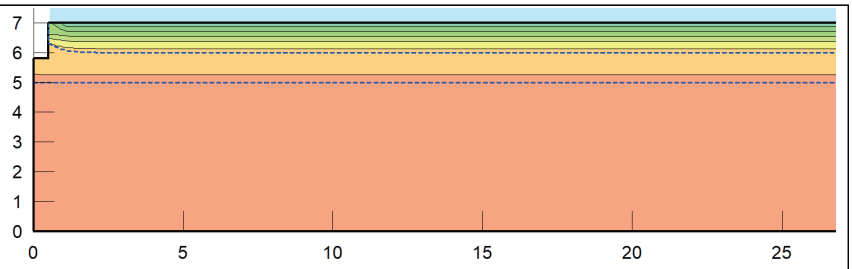
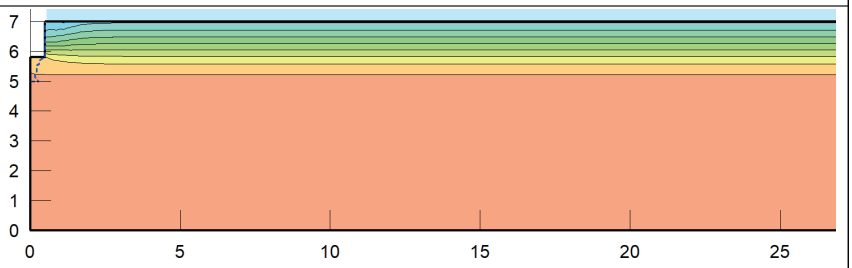
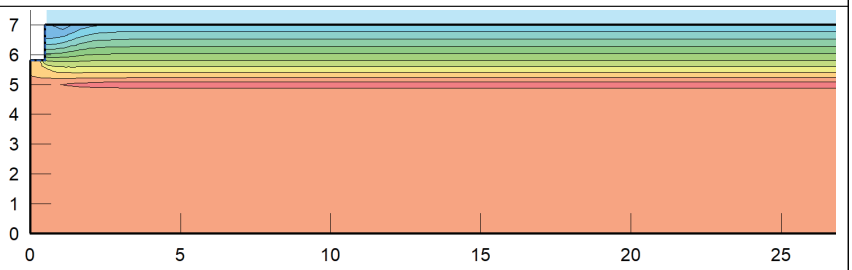
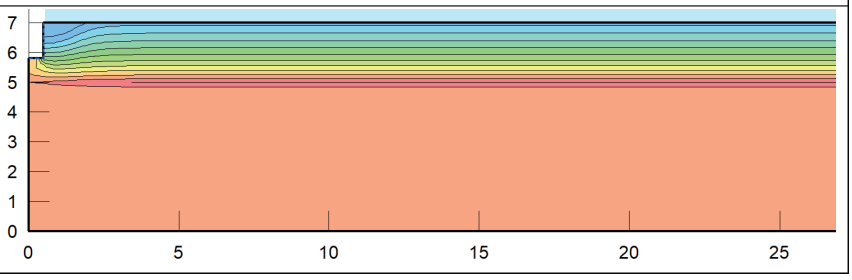
Case 2

1day	
4day	
7day	
10day	

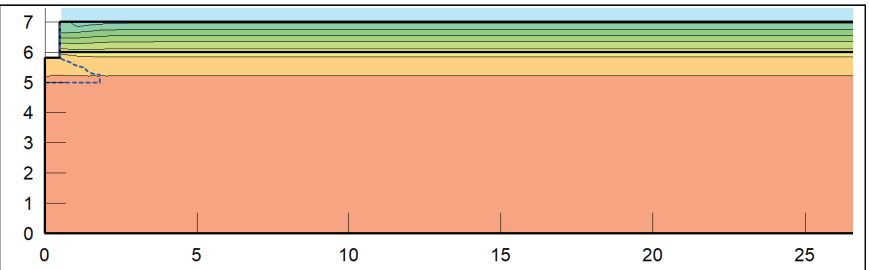
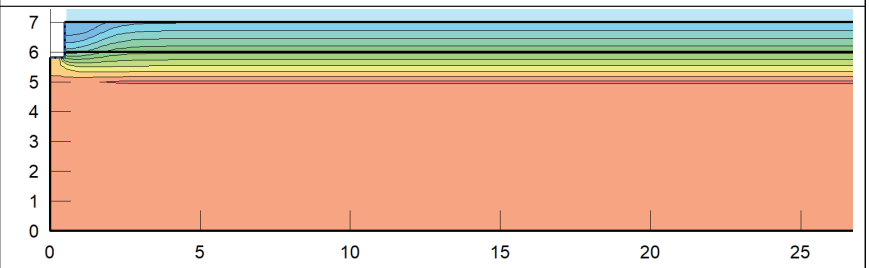
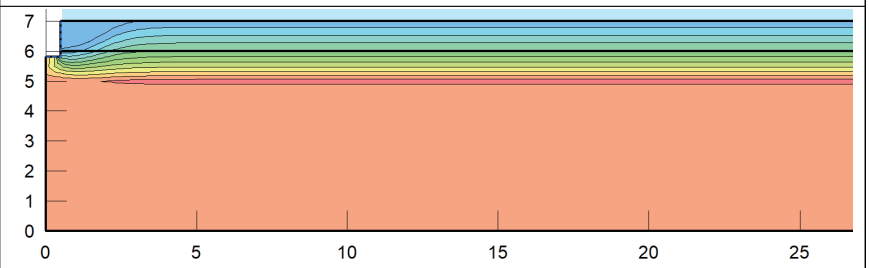
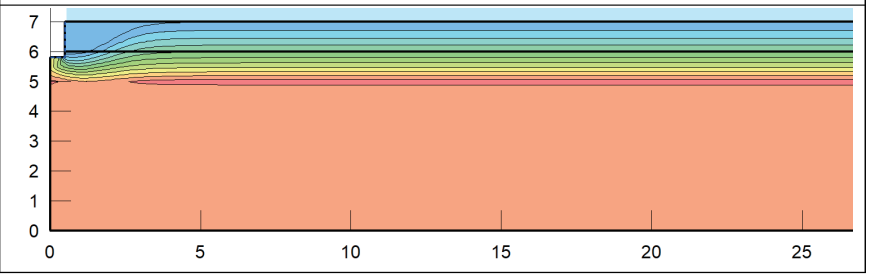
Case 3

1day	
4day	
7day	
10day	

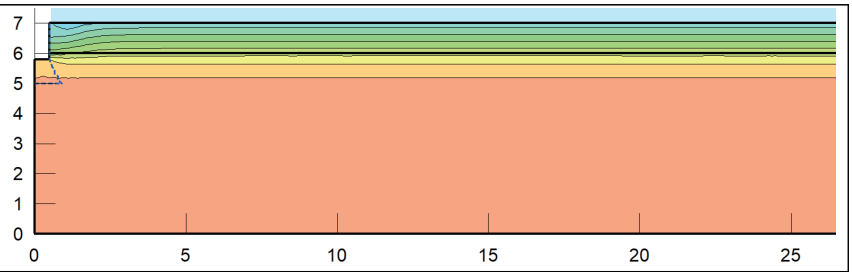
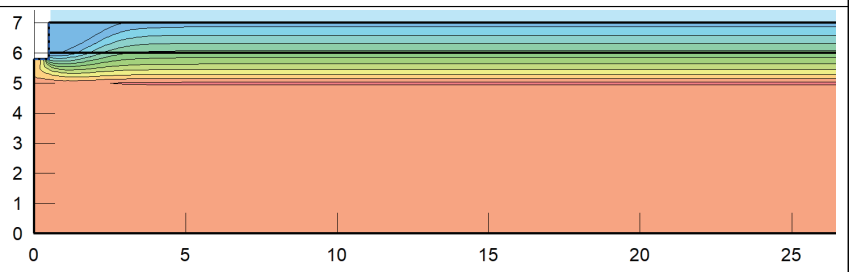
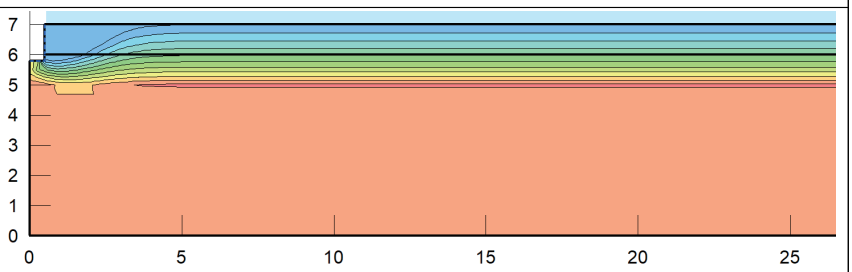
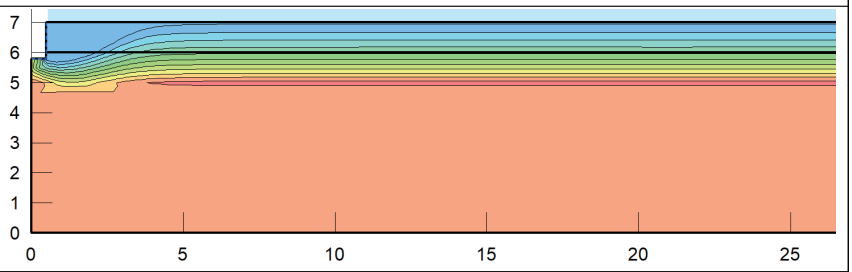
Case 4

1day	
4day	
7day	
10day	

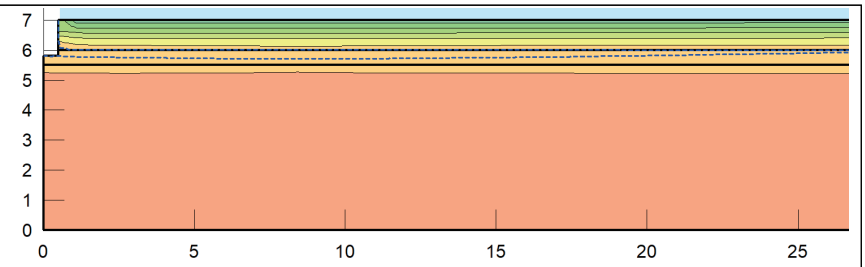
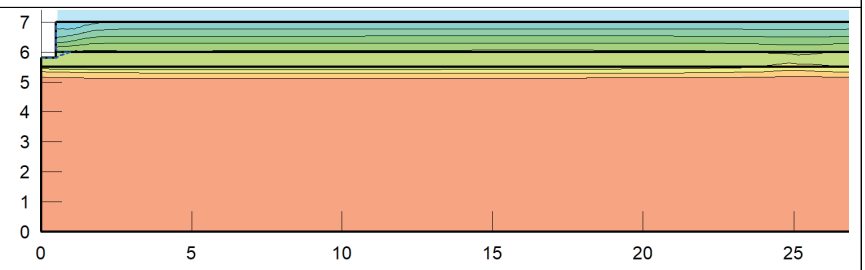
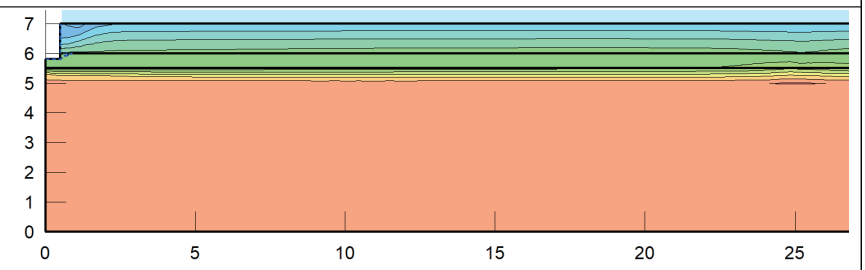
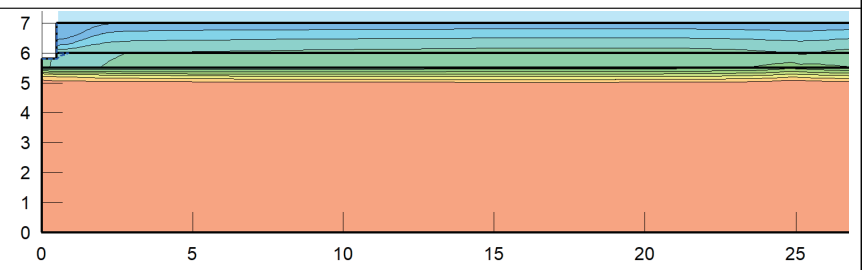
Case 5

1day	
4day	
7day	
10day	

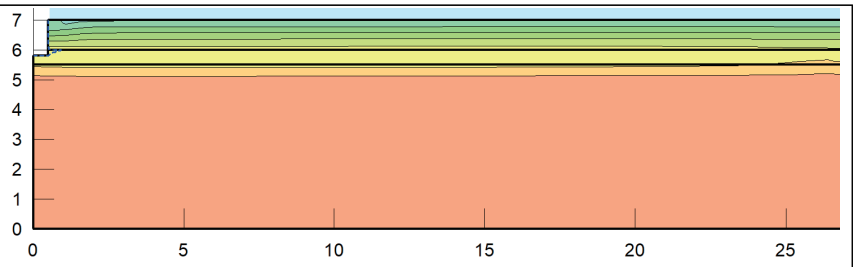
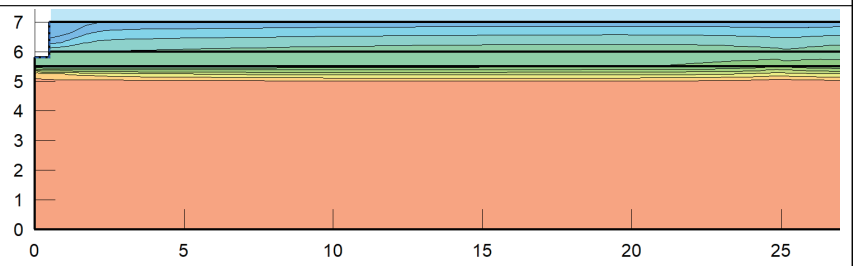
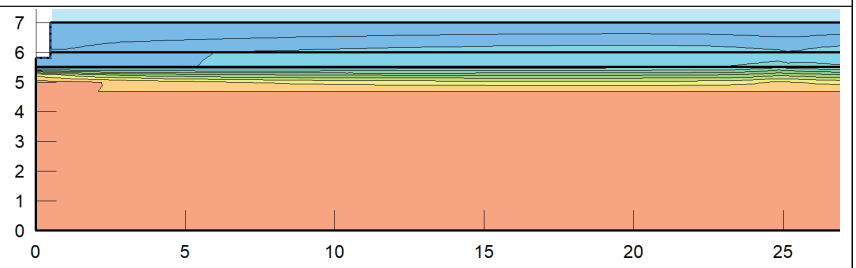
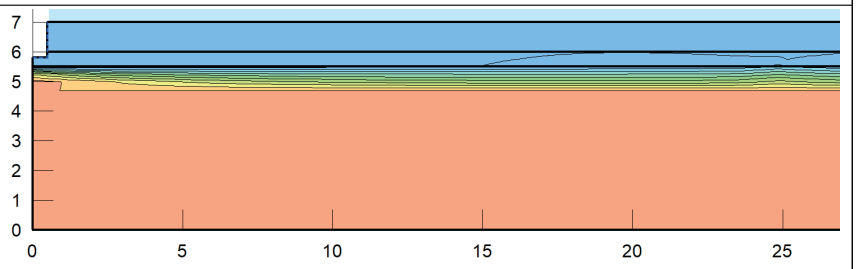
Case 6

1day	
4day	
7day	
10day	

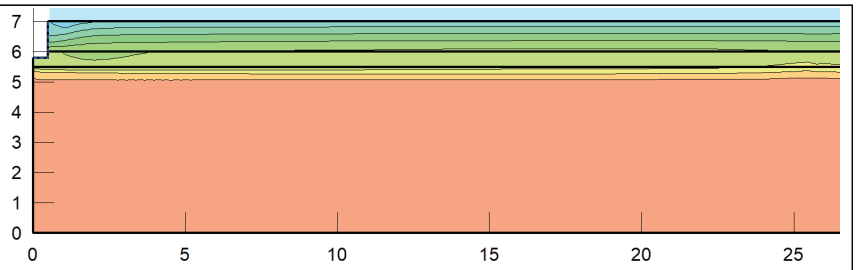
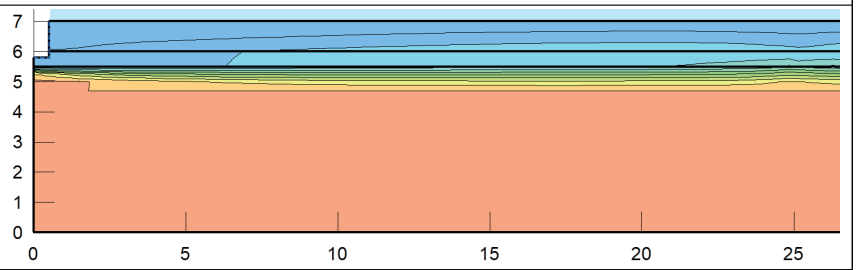
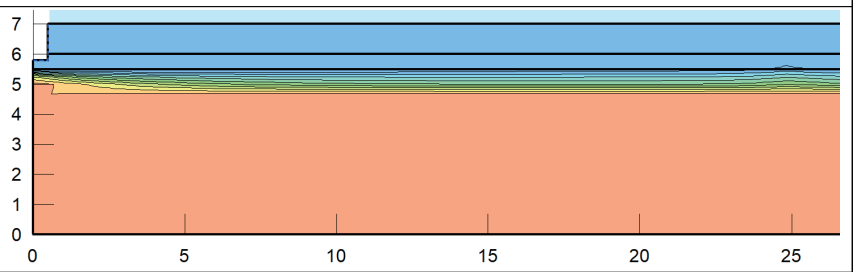
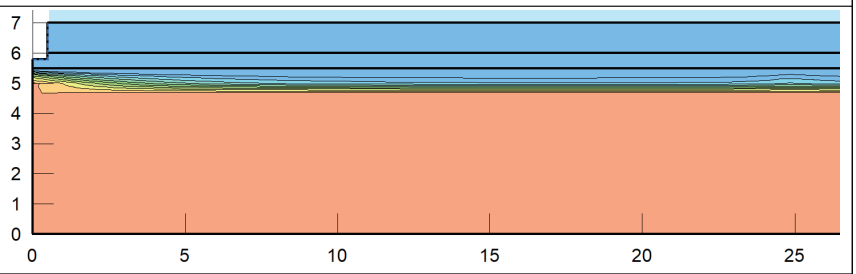
Case 7

1day	
4day	
7day	
10day	

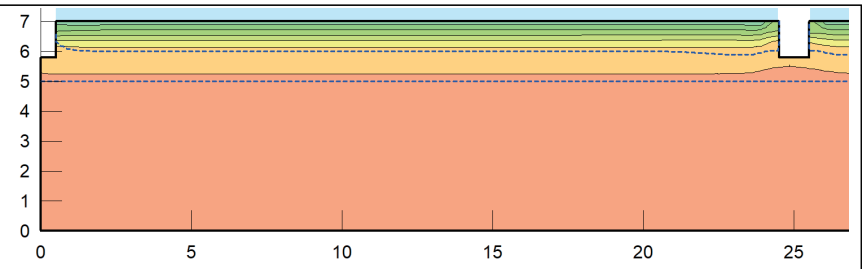
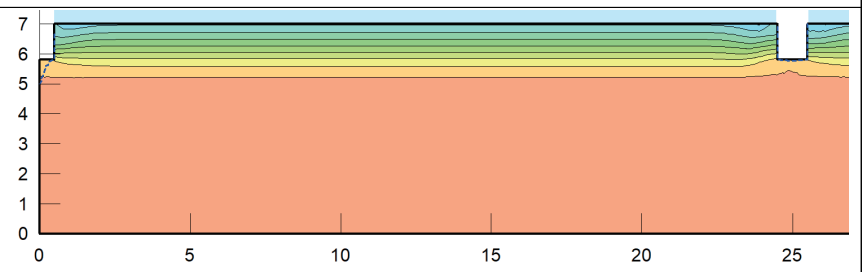
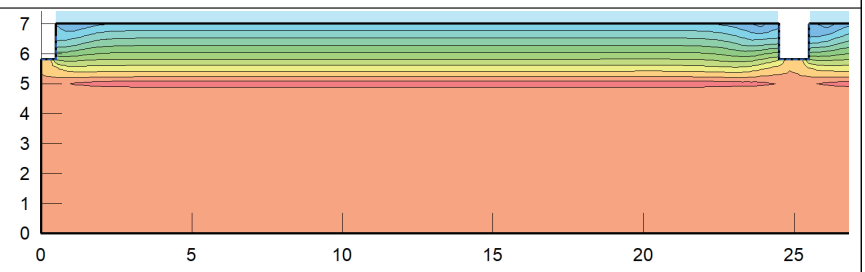
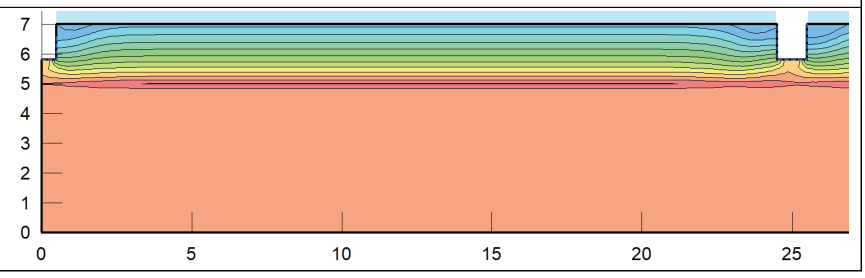
Case 8

1day	
4day	
7day	
10day	

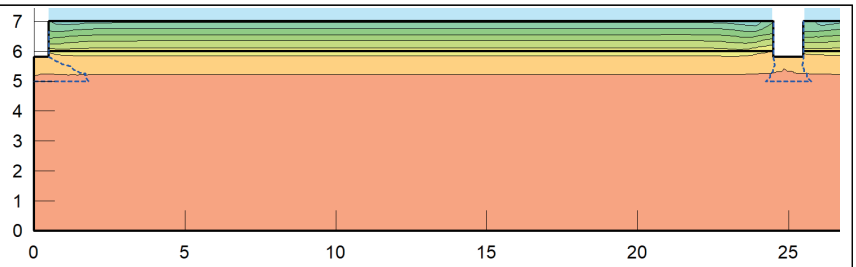
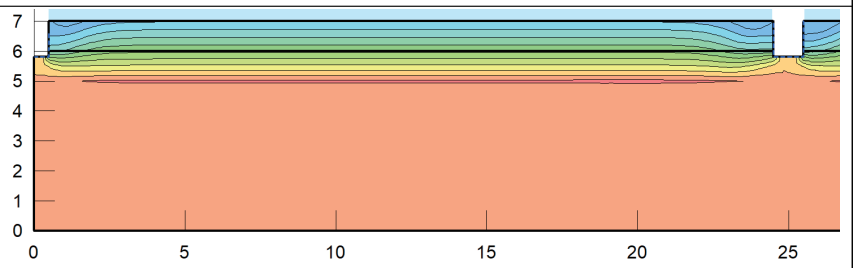
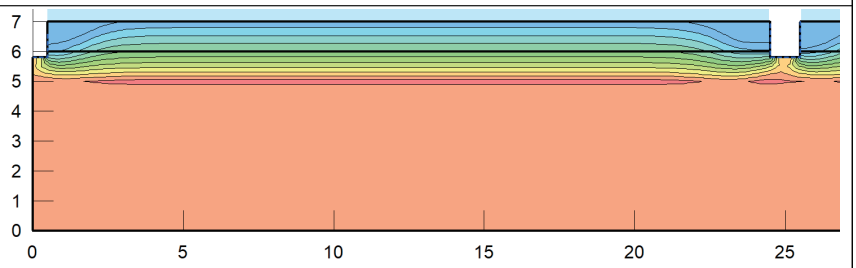
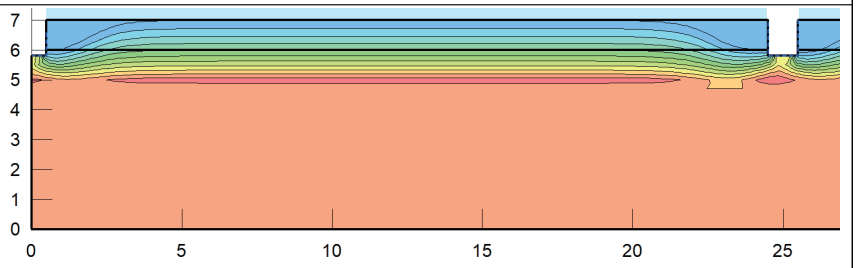
Case 9

1day	
4day	
7day	
10day	

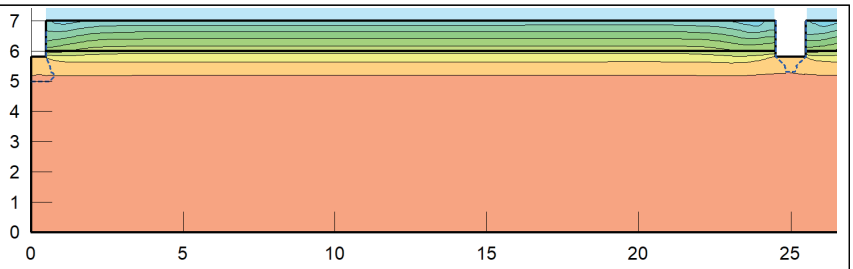
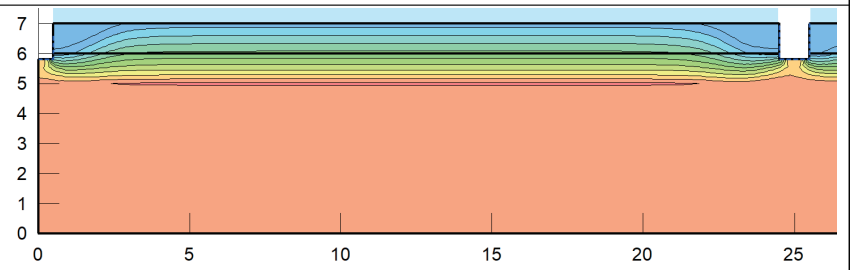
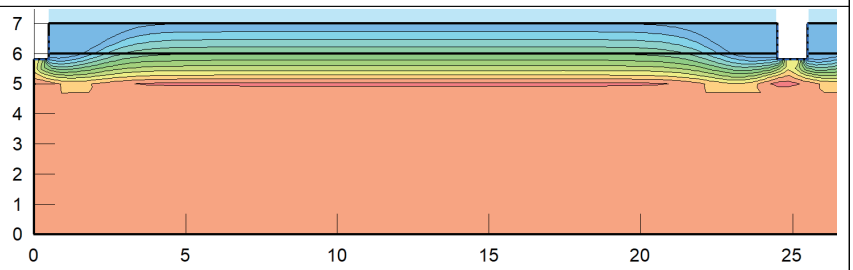
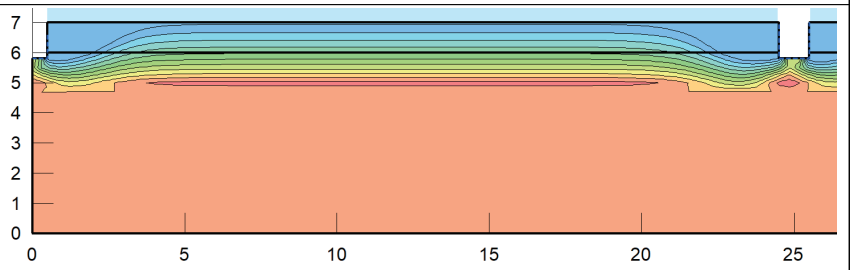
Case 10

1day	
4day	
7day	
10day	

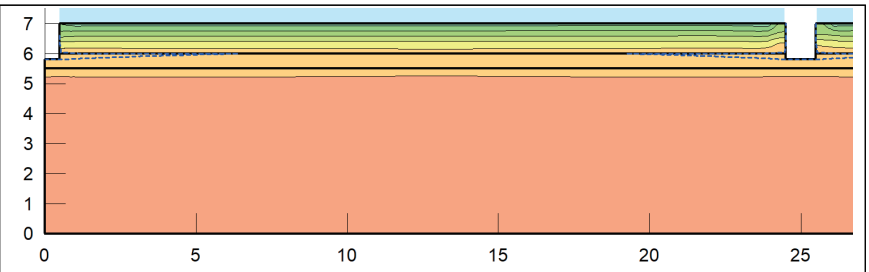
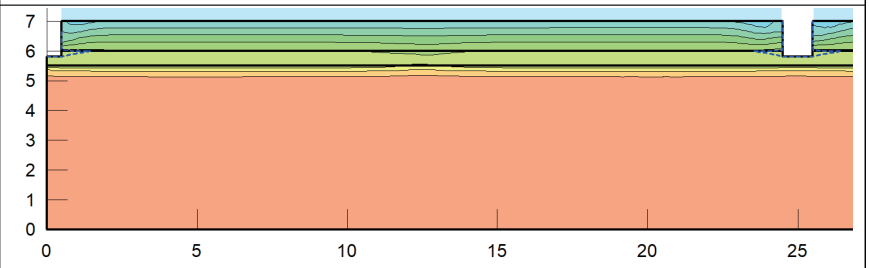
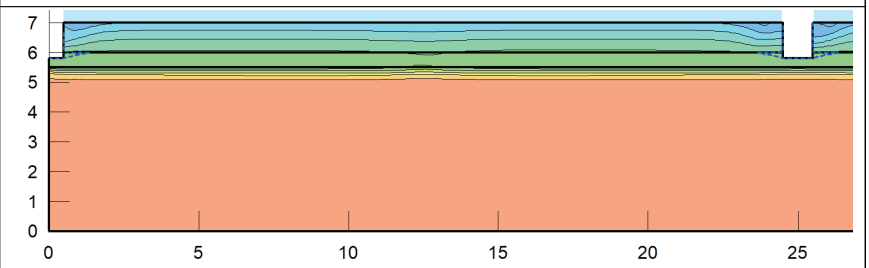
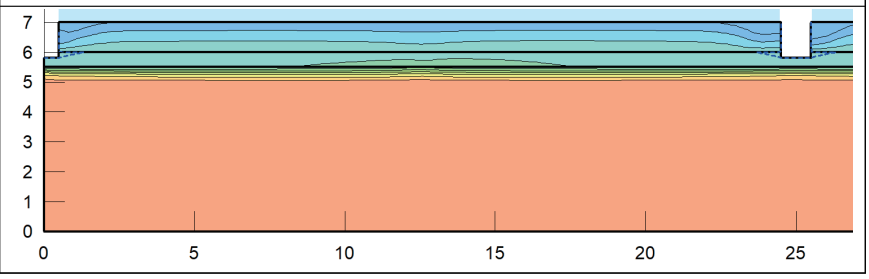
Case 11

1day	
4day	
7day	
10day	

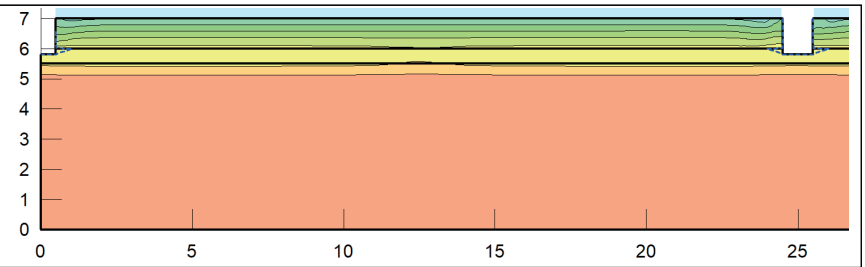
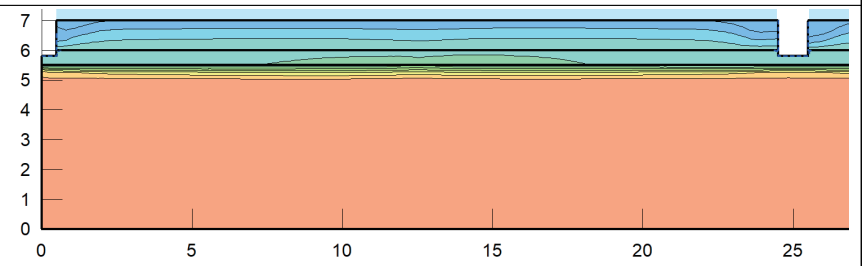
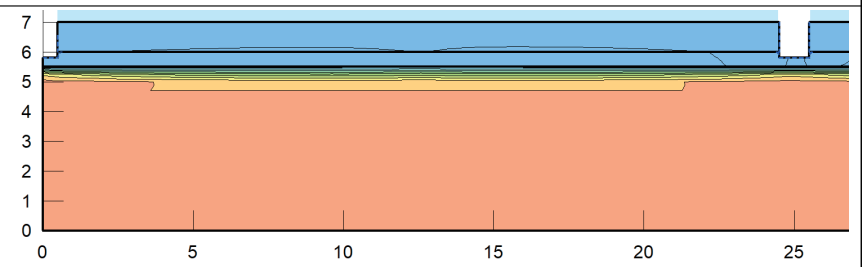
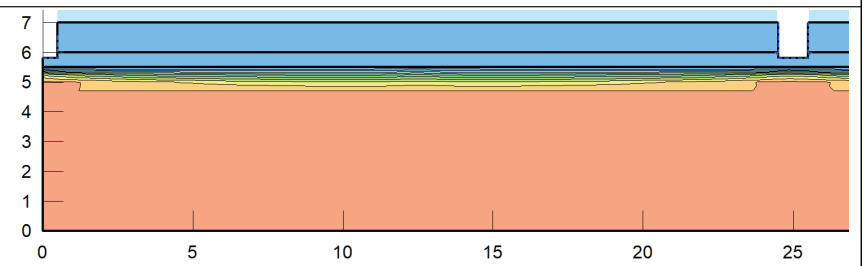
Case 12

1day	
4day	
7day	
10day	

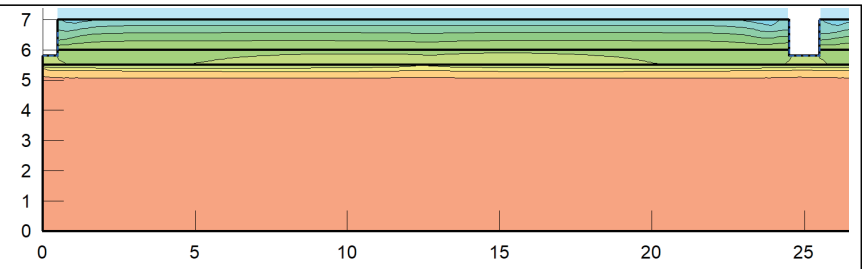
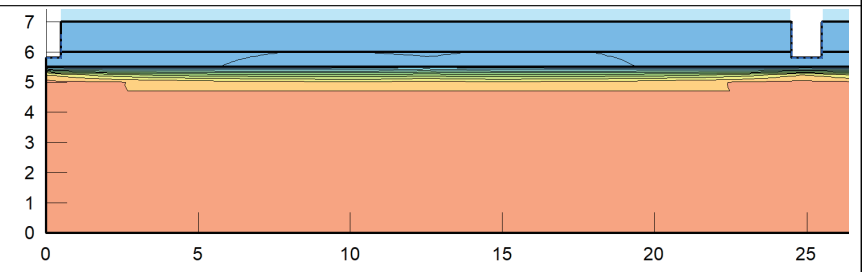
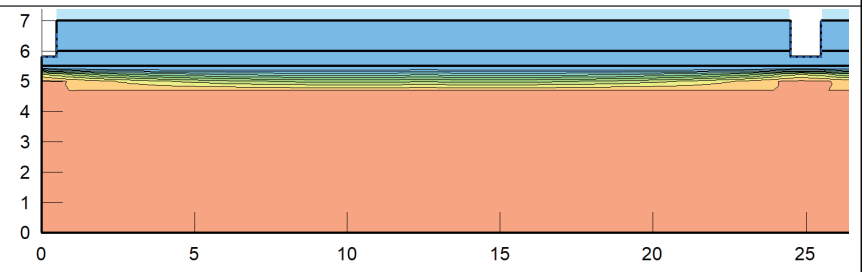
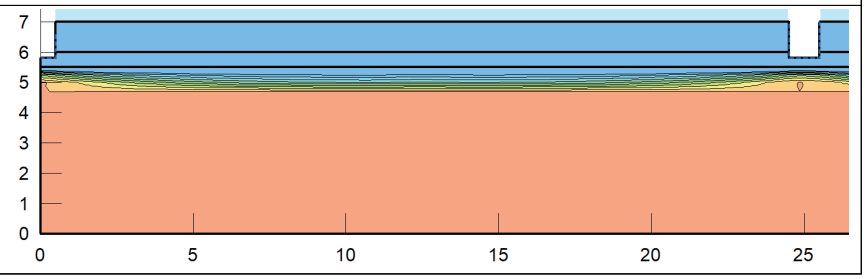
Case 13

1day	
4day	
7day	
10day	

Case 14

1day	
4day	
7day	
10day	

Case 15

1day	
4day	
7day	
10day	

Abstract

Use of Bottom Ash and Oyster Shell to Improve Permeability for Reclaimed land

Taejin, Kim

Major in Rural Systems Engineering

Department of Landscape Architecture and Rural Systems

Seoul National University

Due to the recent decline in land area, there is a growing need for diverse applications of reclaimed land, which accounts for about 10% of the agricultural area in Korea. The most important problem in using reclaimed land is the control of the drainage performance and salinity of the reclaimed soil. Because the reclaimed soil is close to the sea, the groundwater level is high and the salinity of the groundwater is very high due to the penetration of seawater. In addition, since it is mainly composed of ceramides, the drainage performance is very poor, and damage of salting is frequently occurred. Therefore, in order to use reclaimed land efficiently, improvement of drainage performance and management through desalination are essential. Desalination of the reclaimed soil is carried

out by improving the permeability of the soil using a soil remediation agent, or by installing drainage facilities such as culvert and drainage.

On the other hand, various industrial byproducts are generated by urbanization and industrialization, so recycling them has the advantage of saving natural resources and eco-friendly processing of industrial byproducts. In the thermal power plant, coal ash, which is an industrial by-product, is generated every year and buried in the company's headquarters. Also, shells such as oysters and shellfishes are also generated in large quantities, causing environmental problems. Since the bottom ash particles are large and porous, they are highly permeable and can be expected to improve permeability when mixed with the soil of the reclaimed land. The shell is composed mainly of calcareous material and can exhibit similar effects to lime used in soil improvement.

Therefore, in this study, bottom ash and oyster shells were mixed with the soil of the reclaimed land to improve the permeability. Experiments and modeling were carried out to improve the drainage performance of the reclaimed land using mixed soil. The permeability of the mixed soil changes depending on the mixing ratio, characteristics, and grain size of the material. Therefore, the permeability of the soil was confirmed by adjusting the mixing ratio and grain size. In addition, for the desalination of reclaimed land, mixing ratio and method of use were suggested and modeling was carried out to analyze the desalination effect. As a result of the analysis, it was confirmed that the permeability change of the mixed soil was affected by void ratio, viscocity and the characteristics of the material. As a result of modeling of the drainage system using the reclaimed land, the drainage facility using the industrial by -

product greatly increased the decontamination effect of the reclaimed soil.

keywords : Reclaimed Land, Bottom Ash, Oyster Shell, Mixed Soil, Soil Permeability, Desalination
Student Number : 2017-23927