

## 시료 유형에 따른 카제인 폴리머 처리토의 공학적 특성 분석

### Analysis of the Engineering Characteristics of Casein Polymer-Treated Soil Based on Soil Type

정 상 호 <sup>1</sup>	Jung, Sang-Ho	장 채 운 <sup>2</sup>	Jang, Chaewoon
이 정 윤 <sup>2</sup>	Lee, Jeong Yoon	이 의 찬 <sup>2</sup>	Lee, Uichan
유 재 은 <sup>3</sup>	Ryou, Jae-Eun	정 종 원 <sup>4</sup>	Jung, Jongwon

#### Abstract

Chemical ground reinforcement involves enhancing the mechanical properties of soil through chemical reactions. Existing ground reinforcement materials pose challenges, including environmental pollution during production and use, pH fluctuations caused by leaching into groundwater, and ecological disturbances. This study investigates the engineering performance of soils treated with casein polymer, a milk-derived, eco-friendly reinforcement material. The performance assessment was carried out by measuring unconfined compressive strength and hydraulic conductivity across different soil types, including Jumunjin sand, granite weathered soil, and soft soils. The analysis examined the relationship between unconfined compressive strength, hydraulic conductivity, and soil type. The findings indicate significant correlations based on the concentration of casein polymer and soil type. The outcomes of this study provide foundational data for the application of casein polymer in soil reinforcement efforts.

#### 요 지

화학적 지반보강은 재료의 화학적 반응을 통해 지반의 역학적 성능을 확보하는 것을 의미한다. 기존에 활용되는 지반보강 재료는 제조 및 활용 간 대기오염, 지하수 용출로 인한 pH 변화 및 생태계 교란 등의 문제가 제기되었다. 따라서, 본 연구에서는 친환경 지반보강을 위해 우수로부터 기원된 카제인 폴리머로 처리된 시료의 공학적 성능이 분석되었다. 공학적 성능 분석은 일축압축강도 및 투수계수 측정을 통해 수행되었다. 활용된 시료는 주문진 표준사, 화강풍화토, 연약지반 시료이며 시료 유형에 따른 일축압축강도 및 투수계수가 분석되었다. 분석 결과, 카제인 폴리머의 함량 및 시료 유형에 따른 유의미한 상관관계가 도출되었다. 본 연구에서 도출된 결과는 카제인 폴리머의 지반 보강 적용 시 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

**Keywords :** Biopolymer, Casein, Hydraulic conductivity, Soil type, Unconfined compressive strength

1 정희원, 금호건설 부장 (Member, General Manager, KUMHO Engineering & Construction Co., Ltd.)

2 비회원, 충북대학교 토목공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Chungbuk National Univ.)

3 정희원, 충북대학교 토목공학과 박사후연구원 (Member, Post-Doctoral Researcher, Dept. of Civil Engineering, Chungbuk National Univ., Tel: +82-43-261-2377, Fax: +82-43-275-2377, [jaeunryou@chungbuk.ac.kr](mailto:jaeunryou@chungbuk.ac.kr), Corresponding author, 교신저자)

4 정희원, 충북대학교 토목공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil Engineering, Chungbuk National Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2025년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2024 by the Korean Geotechnical Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서론

지반 보강은 구조물 건설 및 지반의 안정성에 주요한 부분으로, 대상 지반의 요구 사항을 충족하기 위해 역학적 성능을 확보하는 것을 목표로 한다(Jun et al., 2017; Gidebo et al., 2023; Lazo et al., 2024). 지반을 보강하는 공법은 물리적 및 화학적 지반 보강으로 구분될 수 있다(Archibong et al., 2020). 물리적 지반 보강은 주로 공법에 따라 분류될 수 있으며 다짐, 치환, 사전 재하, 지오그리드(geogrid) 활용 등으로 대표된다(Afrin, 2017). 화학적 지반 보강은 보강재의 화학적 반응에 의해 지반의 역학적 성능을 확보하는 것으로 주로 활용 재료에 따라 분류될 수 있다. 시멘트(cement), 라임(lime), 폴리머(polymer) 등이 대표적이다(Butt et al., 2016; Firoozi et al., 2017). 근래 이러한 전통적인 보강재 활용에 따른 환경적 우려가 대두되고 있다(Oluseyi et al., 2011). 기존에 활용되는 석회 기반의 주입재는 다량의 탄소 배출, pH 변화에 의한 환경 오염 및 지반 생태계 교란 등의 한계점이 보고되었다. 일례로, 대표적인 석회 기반의 주입재인 시멘트는 용출에 따른 지하수 오염 및 알칼리화로 인한 사회적 피해가 발생할 수 있다. 따라서, 전통적인 보강 재료를 대체할 수 있는 친환경 보강 재료의 연구가 필요한 실정이다(Khachatoorian et al., 2003; Bakhshizadeh et al., 2022; Pushpakumara and Mendis, 2022; Hussein et al., 2023).

근래에 친환경 지반보강의 중요성이 대두되어 혁신적인 지반 보강 공법에 대한 연구가 수행되고 있다. 이는 MICP(microbial induced calcite precipitation) 및 바이오폴리머 처리 등으로 분류된다. MICP 공법은 박테리아와 같은 미생물이 칼슘이 다량 함유된 용액과 함께 지반에 주입되어 흙 입자를 고결시키는 것을 의미한다. 박테리아는 칼슘 용액을 통해 다량의 탄산칼슘을 생성할 수 있으며 공극 내에 생성된 탄산칼슘은 지반의 강도 증진 및 투수성 감소 등의 역학적 성능 향상이 가능하다고 보고되었다(Mujah et al., 2017). 바이오폴리머 처리 공법은 바이오폴리머 처리를 통해 지반의 역학적 성능확보를 수행하는 일련의 공법을 의미한다. 바이오폴리머는 생물로 기원된 고분자 화합물을 의미하며 이는 기존 석회 기반의 보강재와 달리 환경적으로 유해성 나타내지 않는다. 따라서, 이는 환경 보존을 위해 높은 잠재력을 가지는 새로운 지반 보강공법으로 분류될 수 있다(Choi et al., 2015; Chang et al., 2020; Cho et al., 2024).

바이오폴리머 지반 보강공법은 지반의 역학적 성능을 개

선하는데 활용되는 환경친화적 공법이다. 현재까지 활용된 바이오폴리머 지반 보강공법에 활용된 바이오폴리머는 키토산(chitosan), 전분(starch), 잔탄검(xanthan gum), 셀룰로오스(cellulose), 구아검(guar gum), 알지네이트(alginic acid) 등으로 대표된다(Hassan et al., 2019; Zhao et al., 2020; Singh et al., 2021; Kong et al., 2022; Ryou and Jung, 2023). 갑각류의 껍질에서 발견되는 키틴에서 추출한 키토산은 지반 보강에 활용할 수 있는 바이오 폴리머이다. 선행연구에 따르면 키토산은 토양 응집력을 높이고 토양 침식을 줄이며 보수력을 향상시킬 수 있다. 또한, 흙의 전단강도를 증진하여 비탈면과 제방을 안정시키는 데 적합하다(Adamczuk and Jozefaciuk, 2022). 전분은 많은 식물 공급원에서 발견되는 탄수화물 생체 고분자이다. 전분은 지반에 혼합될 때 작업성과 가소성 증진을 통해 지반을 다지기 쉽게 특성을 변화시킬 수 있다. 전분은 또한 바인더 역할을 하여 토양의 응집력을 높이고 침식에 대한 안정성을 향상시킬 수 있다(Im et al., 2021). 잔탄검은 발효를 통해 생산되는 미생물 바이오폴리머이다. 수분 보유 능력을 높이고 투수성을 감소시켜 지반의 역학적 특성을 개선하는 능력이 있다(Chang et al., 2015; Ryou et al., 2024). 잔탄검은 종종 지반 안정화 및 침식 제어를 향상시키기 위해 다른 재료와 병행하여 활용되기도 한다. 식물 세포벽의 주요 성분인 셀룰로오스는 토양을 안정화 시키는 데 사용될 수 있다. 셀룰로오스 기반 바이오폴리머는 지반 구조, 보수성 및 내침식성을 개선할 수 있다(Sujatha and Kannan, 2022). 또한, 넓은 지반에서 수축-팽창 거동을 완화하는 데 도움이 될 수 있다. 구아검은 구아 콩에서 추출한 천연 바이오폴리머이다. 일반적으로 식품 산업에서 증점제로 활용된다. 지반 보강 공법에서 구아검은 작업성을 개선하고 수분 침투를 저감하며 지반의 응집력을 향상시킬 수 있다(Moghal and Vydehi, 2021).

효과적인 역학적 성능확보를 위한 바이오폴리머는 지반 유형 및 요구되는 공학적 특성에 따라 결정된다. 선행연구에 따르면 잔탄검, 구아검으로 대표되는 다당류계 바이오폴리머는 친수성을 보이므로 물에 쉽게 용해되는 특성이 있다(Smidsrød et al., 2008). 본 연구에서는 소수성을 띠어 양호한 수중 저항성을 발현하는 카제인 폴리머를 활용하였다. 이를 활용하여 카제인 폴리머의 함량 및 시료 유형에 따른 일축압축강도 및 투수 특성이 분석되었다. 또한, 시료 유형 및 카제인 함량에 따른 공학적 특성의 상관관계가 분석되었다.

## 2. 실험 재료 및 방법

본 장은 카제인 폴리머의 재료적 특성 및 카제인 폴리머로 처리된 시료의 역학적 특성 분석을 위한 실험방법에 대해 기술되었다.

### 2.1 카제인 바이오폴리머

본 연구에서는 효과적인 지반보강을 위한 유기 고분자 화합물로 카제인 폴리머를 활용하였다. 카제인 폴리머는 우유 및 탄지유에서 기원된다. 카제인 폴리머는 pH 10 이상의 조건에서 물에 용해될 수 있으며 이하의 값에서는 용해되지 않는 특성을 가진다. 카제인을 활용한 지반보강 원리는 다음과 같다. 카제인 폴리머의 분자 말단에 함유되어있는 카복실기(-COOH)는 염기성 이온과 반응하여 산성 이온을 잃고 새로운 금속 양이온과 반응한다. 새로운 금속 양이온은 서로 다른 카제인과 금속 결합하여 고결력을 발생시킨다. 따라서, 중국에는 카제인-시료-카제인의 고결체를 형성하여 지반의 역학적 성능 증진 발현이 가능하다. 위와 같은 메커니즘을 위한 카제인의 제조 방법은 다음과 같다. 물과 카제인을 배합에 맞게 계량한다. 본 연구에서는 선행 연구를 통해 역학적 성능과 현장 작업성을 고려하여 물과 카제인의 중량비로 20, 30%를 초기에 설정하였으며 CS20, CS30으로 표기하였다. 이후, 염기성 이온과 카제인을 반응하기 위해 소량의 수산화나트륨 및 수산화칼슘을 계량한 뒤 교반한다. 본 연구에서 카제인(Casein from milk, 2534-4405), 수산화나트륨(Sodium hydroxide beads, 7571-4405) 및 수산화칼슘(Calcium hydroxide, 2511-4405)은 대정화금에서 제조된 시약을 활용하였다. 이후 카제인으로 처리된 시료의 일축압축강도 및 투수계수 시험을 수행하였다. 활용된 카제인의 전체 시험 배합안은 Table 1과 같다.

### 2.2 흙 시료

본 연구에서는 다양한 지반 모사를 위해 주문진 표준사, 화강풍화토, 연약지반 시료를 활용하였다. 주문진 표

Table 1. Mixing ratio of casein biopolymer used in this study

Case	Water [g]	Casein [g]	NaOH [g]	CaOH [g]
CS20	100	20	1.0	5.2
CS30	100	30	1.5	7.8

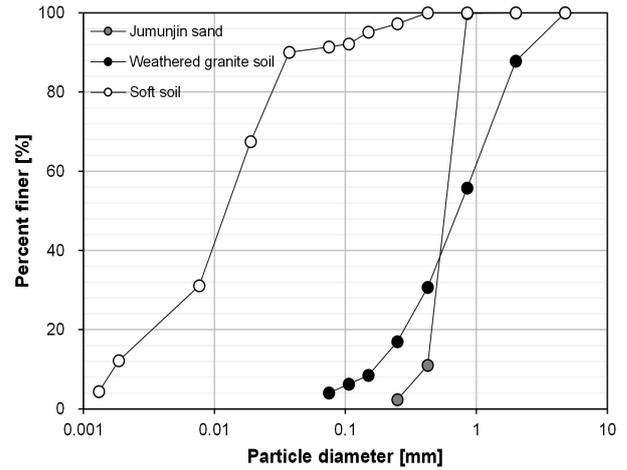


Fig. 1. Particle size distribution of soils

준사는 모래 기반의 사질토 시료이며 화강풍화토는 화강암 및 편마암이 풍화되어 형성된 잔적토로 국내 다양한 산지에 분포되어 있다. 또한, 연약지반 시료는 부산광역시 일대에서 획득하였으며, 해당 지역은 낙동강 하구 유역으로 국내 연약지반을 대표할 수 있다. 해당 시료는 조립질 시료, 자연지반 시료, 세립질 시료로 모사될 수 있으므로 시료 유형에 따른 카제인 처리 시 역학적 성능 분석을 목표로 하였다. Fig. 1은 세 가지 시료에 대한 입도분포곡선을 나타낸다. 세 가지 시료의 균등계수(Cu) 및 곡률계수(Cc) 값은 주문진표준사의 경우 2.05, 0.867이며 화강풍화토는 6.25, 0.903이며 연약지반 시료는 6.00, 2.04로 나타났다. 세 가지 시료의 USCS는 주문진 표준사, 화강풍화토, 연약지반 각각 SP, SP, CH로 판별되었다.

### 2.3 일축압축강도 측정

일축압축강도 시험은 시료를 측방 구속이 없는 상태에서 하중을 가하여 파괴시키는 시험으로 일반적으로 시료의 강도 비교에 용이하다. 활용된 시료는 주문진 표준사, 화강풍화토 및 연약지반 시료로 구성되며 카제인 함량은 CS20 및 CS30이 활용되었다. 양생 방법은 건조 양생으로 각 1, 7, 28일의 양생 기간에 따른 변화를 분석하였다. 또한, 1.6g/cm<sup>3</sup>의 건조단위중량을 목표로 제작되었으며 데이터의 신뢰성 확보를 위해 각 조건당 3개의 시료로 일축압축강도를 측정하였다. 시료 내 카제인 폴리머의 함량은 공극률을 계산을 통해 공극 체적(pore volume, PV)에 맞게 카제인 폴리머를 혼합하였다. 본 연구에서 일축압축강도의 측정은 UTM(Universal testing machine, TnDorf(TD-U02)) 시험기로 측정되었다(Fig. 2). 해당 장

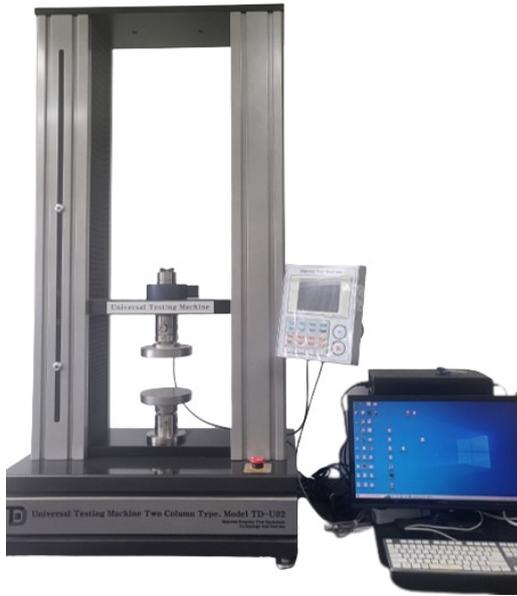


Fig. 2. Unconfined compressive strength test equipment

비는 최대 1,000kgf의 하중 재하가 가능하며 1/50,000의 정밀도를 나타내어 데이터의 신뢰성을 확보할 수 있다. 또한, 실험 시 하중 재하 속도는 1mm/min의 낮은 속도로 설정하여 일축압축강도의 과대평가를 최소화하였다. 일축압축강도 시험의 과정은 다음과 같다. (1) 카제인 폴리머 및 흙 시료를 배합에 맞게 계량하여 준비한다. (2) 사각 몰드에 카제인 폴리머와 혼합된 시료를 3층 다짐으로 성형한다. (3) 성형된 카제인 혼합 시료의 무게를 측정 후 정해진 기간 및 방법에 따라 양생시킨다. (4) 기간 및 방법에 따라 양생 후 카제인 혼합 시료의 일축압축강도를 측정한다.

## 2.4 투수계수 측정

흙에서의 투수는 지하수 및 강우가 흙을 투과하여 흐르는 정도를 의미하며 이를 수치화하기 위해서 투수계수가 활용된다. 이에 따라 흙의 투수계수는 비탈면 및 제방의 안정성에 큰 영향을 미친다. 본 연구에서는 KS F 2322 규격을 참고하여 변수위 투수시험을 활용하여 투수계수를 측정하였다. 시료의 제작은 일축압축강도와 동일하게 주문진 표준사, 화강풍화토, 연약지반 시료에 대해 1 PV의 카제인 폴리머(CS 20 및 CS30)가 혼합되었다. 투수계수 측정에 활용된 변수위 투수시험기는 Fig. 3과 같으며 시험의 과정은 다음과 같다. (1) 카제인 폴리머 및 흙 시료를 배합에 맞게 계량하여 준비한다. (2) 원형 챔버에 카제인 폴리머와 혼합된 시료를 5층 다짐으로

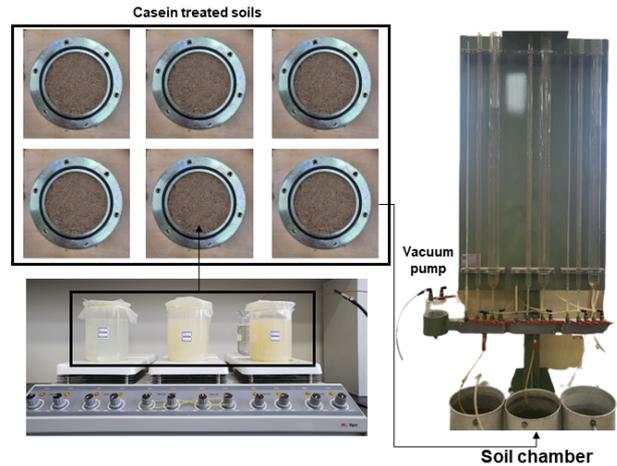


Fig. 3. Falling head test for measurements of casein treated soils

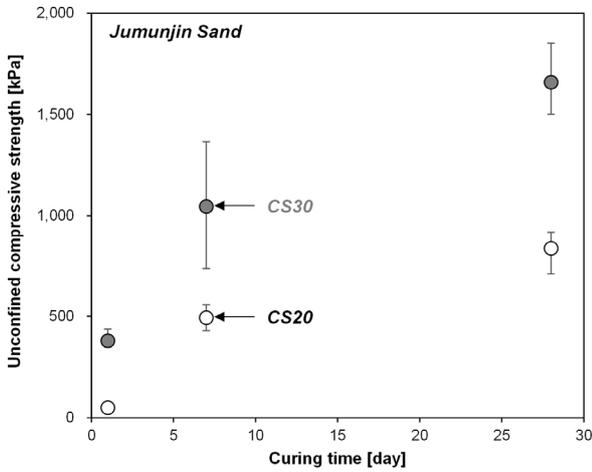
성형한다. (3) 성형된 카제인 혼합 시료를 1일 양생 후 시료 내 일정 수두차로 물을 주입하여 포화시킨다. (4) 이후 변수위 투수시험기를 활용하여 수두 차에 따른 물의 투과량 및 시간을 기록한다. (5) (4)의 과정을 5회 이상 반복하여 투수계수를 계산한 뒤 평균 내어 최종 투수계수를 결정한다.

## 3. 실험 결과 및 분석

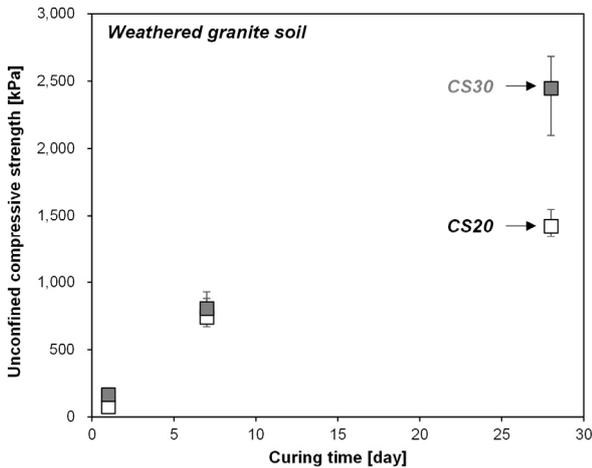
### 3.1 일축압축강도 측정 결과

Fig. 4는 양생 기간에 따른 카제인으로 처리된 시료의 일축압축강도 변화를 나타낸다. 카제인으로 처리된 시료의 일축압축강도는 1, 7, 28일의 양생 기간에서 측정되었으며 각 데이터는 최소값, 최대값 및 평균값으로 도식되었다. Fig. 4(a)는 카제인으로 처리된 주문진 표준사, Fig. 4(b)는 화강풍화토 및 Fig. 4(c)는 연약지반 시료를 의미한다. 분석 결과, 주문진 표준사, 화강풍화토, 연약지반 시료 모두 양생 기간이 증가함에 따라 일축압축강도의 증가가 관찰되었다. 또한, 카제인 함량이 증가함에 따라, 동일한 시료 유형 및 양생 기간에서 비교적 높은 일축압축강도의 발현이 관찰되었다. 일례로, CS 20의 배합으로 처리된 주문진 표준사의 경우 1, 7, 28일의 양생 기간에서 평균 50.21, 493.86, 835.27kPa 일축압축강도를 보였다. CS 30의 배합으로 처리된 주문진 표준사의 경우 1, 7, 28일의 양생 기간에서 평균 379.98, 1045.91, 1,658.76kPa의 일축압축강도를 보였다. 또한, 시료 유형에 따라 동일 카제인 함량 및 양생 기간에 따라 상이한 일축압축강도의 발현이 관찰되었다. 일례로, CS 30의 배합으로 처리된 시

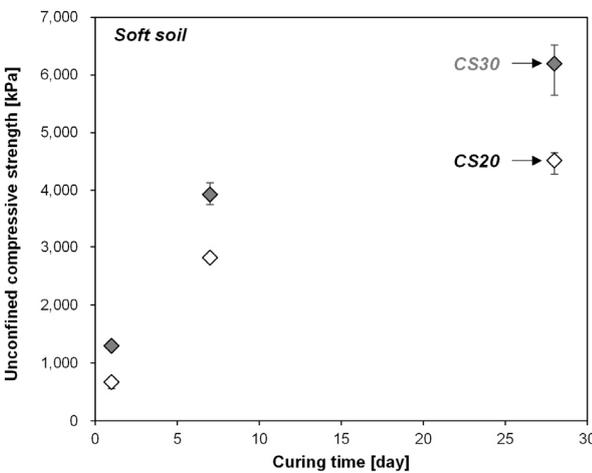
료는 28일의 양생 기준에서 주문진 표준사, 화강풍화토, 연약지반 시료의 순으로 1,658.76, 2,448.13, 6,196.67kPa의 일축압축강도 값이 발현되었다.



(a) Jumunjin sand treated with casein biopolymer



(b) Weathered granite soils treated with casein biopolymer



(c) Soft soils treated with casein biopolymer

Fig. 4. Effect of curing time on unconfined compressive strength of casein treated soils; (a): jumunjin sand, (b): weathered granite soil, (c): soft soil

### 3.2 투수계수 측정 결과

Fig. 5는 카제인 폴리머로 처리된 주문진 표준사, 화강풍화토 및 연약지반 시료의 투수계수 측정 결과를 나타낸다. Fig. 5(a)는 카제인 폴리머로 처리된 주문진 표준사의 결과이며 Fig. 5(b)는 카제인 폴리머로 처리된 화강풍화토, Fig. 5(c)는 카제인 폴리머로 처리된 연약지반 시료의 결과를 나타낸다. 분석 결과, 모든 시료 조건에서 카제인 함량에 따라 투수계수의 저감이 관찰되었다. 이는 카제인 폴리머가 공극 내 네트워크를 형성하며 물의 흐름을 감소시키기 때문이다. 시료의 유형에 따른 분석 결과, 주문진 표준사의 경우 카제인 함량이 20, 30%로 증가함에 따라 미처리 시료에 비해 투수계수가 약 2.5, 10.9배 저감되었다. 화강풍화토의 경우 카제인 함량이 20, 30%로 증가함에 따라 미처리 시료에 비해 투수계수가 약 16.7, 25.2배 저감되었다. 연약지반 시료의 경우 카제인 함량이 20, 30%로 증가함에 따라 미처리 시료에 비해 투수계수가 4.1, 9배 저감되었다. 주문진 표준사의 경우 공극이 크기 때문에 비교적 투수가 원활하게 이루어진 것으로 판단된다. 연약지반 시료는 공극이 상대적으로 작으므로 투수가 원활하지 못한 것으로 판단된다. 반면, 카제인 폴리머의 처리에 따른 투수계수 저감 효과는 주문진 표준사, 화강 풍화토, 연약지반 시료 순으로 나타났다. 투수계수 저감 효과는 미처리 시료의 투수계수 값에 영향을 받는 것으로 판단된다. 따라서, 실제 지반에 카제인 폴리머를 처리할 경우, 투수계수의 저감 정도는 원래 지반의 투수계수에 크게 영향을 받는 것으로 사료된다.

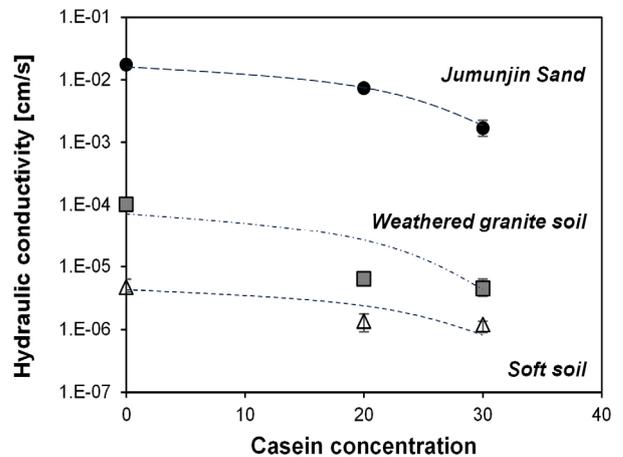


Fig. 5. Effect of curing time on unconfined hydraulic conductivities of casein treated soils

### 3.3 양생 기간에 따른 건조량 분석

바이오폴리머는 지반 처리 시 건조됨에 따라 흙 입자 사이에 바이오필름을 형성하여 역학적 성능을 향상시킨다. 바이오폴리머 처리 지반의 성능 분석에 있어 건조 특성은 주요하나, 현장에서 카제인 폴리머의 건조 속도는 지반의 투수성, 온도, 상대 습도, 기후 등의 요인에 의해 영향을 받는다. 이러한 이유로 본 연구에서 양생 기간에 따른 일축압축강도의 정량적 분석은 제한적으로 적용될 수 있다. 따라서, 양생 기간에 따른 역학적 성능을 평가하기 위해 건조량 분석이 수행되었다. Fig. 6은 양생 시간에 따른 건조량을 나타낸다.  $W_{cd}$ 는 각 양생 기간 후의 공극에 존재하는 카제인 폴리머 수용액의 무게를 나타내며  $W_{c0}$ 는 초기 설정된 카제인 폴리머 수용액의 무게를 의미한다. 해당 값의 무게비( $W_{cd}/W_{c0}$ )는 공극 내 카제인 수용액의 건조 정도를 의미한다. 분석 결과, 카제인으로 처리된 주문진 표준사, 화강풍화토 및 연약지반은 모두 양생 기간 증가에 따라 건조량의 증가가 관찰되었다. 반면, 주문진 표준사의 경우 28일의 양생 기간에서 100%의 건조가 관찰되나 화강풍화토 및 연약지반 시료에서는 77~91% 및 72~75%의 건조가 관찰되었다. 주문진 표준사의 경우 화강풍화토 및 연약지반 시료에 비해 비교적 큰 입자를 함유하기 때문에 건조가 원활히 진행된 것으로 판단된다. 반면, 연약지반 시료는 가장 작은 입자 크기 분포를 보이므로 비교적 낮은 건조 정도를 보이는 것으로 판단된다.

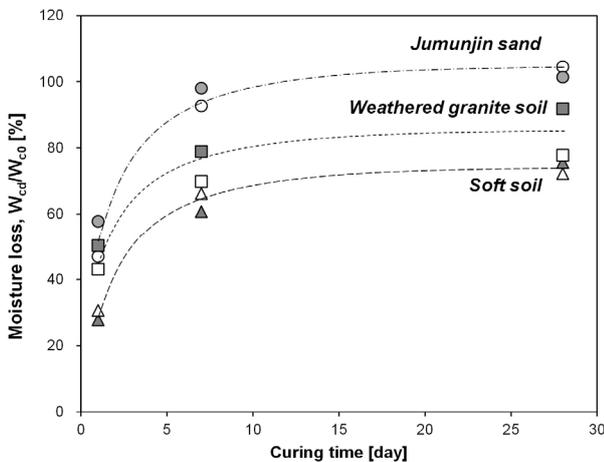


Fig. 6. Effect of curing time on moisture loss of casein treated soils

### 3.4 시료 유형 및 건조량에 따른 역학적 특성 분석

Fig. 7은 CS20 및 CS30 카제인 혼합 시료의 건조량에 따른 일축압축강도 변화를 나타낸다. 해당 분석에는 양생 기간 및 시료 유형에 따른 일축압축강도 및 각 조건의 3가지 일축압축강도 데이터가 모두 포함되었다. 모든 시료 유형은 건조량 증가에 따라 일축압축강도가 증가하는 경향이 관찰되었다. 이는 카제인 폴리머 처리 시료의 건조가 진행됨에 따라 내부 구조가 경화되어 강도 특성이 개선되는 것으로 판단된다. 카제인 함량을 분석한 결과, 주문진 표준사 및 화강풍화토는 카제인 함량과 강도의 개선 간 유의미한 상관관계가 관찰되나 연약지반 시료의 경우 카제인 함량에 따른 유의미한 차이를 보이지 않는다. 시료 유형에 따른 분석 결과, 연약지반 시료의 경우 50% 이상의 건조 조건에서 급격한 강도 증가를 나타낸다. 이는 다른 시료와 비교할 때 현저히 높은 값으로, 연약지반 시료가 카제인 폴리머 처리에 따라 가장 효과적인 것으로 판단된다. 화강 풍화토의 경우, 연약지반 시료와 주문진 표준사의 강도 증진 효과 사이에 위치하는 것이 관찰된다. 주문진 표준사의 경우 상대적으로 낮은 강도를 발현하며, 수분 손실이 100%에 도달해도 효과적인 강도 증진은 관찰되지 않는다. 연약지반 시료의 경우 주문진 표준사 및 화강풍화토에 비해 다량의 점토를 함유하고 있다. 점토 광물 중 대표적인 카올리나이트의 조성은  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ 와 같다. 구조는 팔면체 시트(octahedral sheet)와 사면체 시트(tetrahedral sheet)로 구성된다. 카제인 폴리머는 글루탐산 또는 아스파르트산과 같은 아미노산을 포함하는데, 이들은 카복실기 구조를 보인다. 따

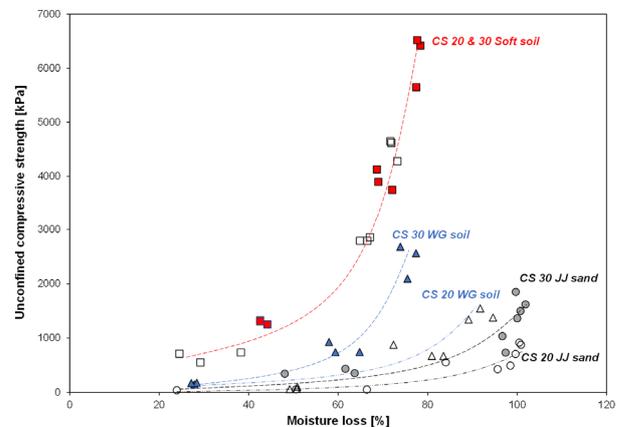


Fig. 7. Correlation between moisture loss and unconfined compressive strength of casein treated soils according to soil type

라서, 카올리나이트 구조 내 팔면체 및 사면체의 수소와 카제인 폴리머의 카복실기 간 결합으로 효과적인 강도 발현이 가능한 것으로 유추된다. 반면, 주문진 표준사 및 화강풍화토는 연약지반 시료와 달리 다량의 점토를 함유하고 있지 않으므로, 정전기적 특성에 비해 건조 과정에 지배적인 강도 증진이 관찰된 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 친환경 지반 보강을 위해 우유로부터 기원된 카제인 폴리머로 처리된 시료의 역학적 특성이 분석되었다. 분석된 역학적 특성은 일축압축강도 및 투수계수로 구성되며 카제인 폴리머의 함량 및 시료 유형에 따른 성능 평가가 수행되었다. 본 연구의 요약은 아래와 같다.

- (1) 카제인 폴리머로 처리된 시료의 일축압축강도 시험을 수행한 결과, 양생 기간에 따라 일축압축강도가 증가하는 경향이 관찰되었다. 양생 기간에 따른 건조량과 일축압축강도의 변화를 분석한 결과, 건조량과 일축압축강도의 유의미한 상관관계가 관찰되었다. 또한, 시료 유형에 따라 입자가 작은 시료에서 비교적 높은 일축압축강도가 나타났다. 따라서, 카제인 폴리머 처리는 양생 기간에 따라 증가하며 시료 유형에 따라 높은 성능 발현이 가능할 것으로 판단된다.
- (2) 카제인 폴리머로 처리된 시료의 투수계수 측정 시험을 수행한 결과, 시료 종류와 무관하게 카제인 함량에 따라 투수계수 저감이 관찰되었다. 그러나, 연약지반 시료의 경우 초기에 낮은 투수 성능을 보유하기 때문에 처리에 따른 투수계수 저감 효과는 비교적 미미하였다. 따라서, 카제인 폴리머 처리는 투수계수 저감 효과를 기대할 수 있으며 주문진 표준사 및 화강풍화토와 유사한 지반에서 높은 차수 성능을 발현할 것으로 판단된다.
- (3) 본 연구에서 분석된 양생 기간 및 시료 유형에 따른 일축압축강도를 분석한 결과, 카제인 폴리머 처리에 따른 강도 증진 효과는 대상 지반의 함수 특성 및 시료의 조성과의 유의미한 상관관계를 나타내었다. 해당 분석은 향후 실 지반 내 카제인 폴리머 처리에 따른 강도 증진 효과 분석에 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1A4A3029737)(RS-2024-00353644).

#### 참고문헌 (References)

1. Adamczuk, A. and Jozefaciuk, G. (2022), "Impact of Chitosan on the Mechanical Stability of Soils", *Molecules*, Vol.27, No.7, 2273.
2. Afrin, H. (2017), "A Review on Different Types Soil Stabilization Techniques", *Int. J. Transp. Eng. Technol.*, Vol.3, No.2, pp.19-24.
3. Archibong, G.A., Sunday, E.U., Akudike, J.C., Okeke, O.C., and Amadi, C. (2020), "A Review of the Principles and Methods of Soil Stabilization", *Int. J. Adv. Acad. Res. Sci.*, Vol.6, No.3, pp. 2488-9849.
4. Bakhshizadeh, A., Khayat, N., and Horpibulsuk, S. (2022), "Surface Stabilization of Clay Using Sodium Alginate", *Case Stud. Constr. Mater.*, Vol.16, e01006.
5. Butt, W.A., Gupta, K., and Jha, J.N. (2016), "Strength behavior of Clayey Soil Stabilized with Saw Dust Ash", *Int. J. Geo-Eng.*, Vol.7, No.1, pp.1-9.
6. Chang, I., Im, J., Prasadhi, A.K., and Cho, G.C. (2015), "Effects of Xanthan Gum Biopolymer on Soil Strengthening", *Constr. Build. Mater.*, Vol.74, pp.65-72.
7. Chang, I., Lee, M., Tran, A.T.P., Lee, S., Kwon, Y.M., Im, J., and Cho, G.C. (2020), "Review on Biopolymer-based Soil Treatment (BPST) Technology in Geotechnical Engineering Practices", *Transp. Geotech.*, Vol.24, 100385.
8. Cho, H., Jun, M., Lee, E.S., and Hong, W.T. (2024), "Stiffness Characterization of Biopolymer-treated Sandy Soils using Shear Wave Velocity", *J. Korean Geotech. Soc.*, Vol.40, No.3, pp.55-63.
9. Choi, S.G., Chae, K.H., and Park, S.S. (2015), "Field Study for Application of Soil Cementation Method Using Alkaliphilic Microorganism and Low-cost Bacter", *J. Korean Geotech. Soc.*, Vol.31, No.1, pp.37-46.
10. Firoozi, A.A., Guney Olgun, C., Firoozi, A.A., and Baghini, M.S. (2017), "Fundamentals of Soil Stabilization", *Int. J. Geo-Eng.*, Vol.8, pp.1-16.
11. Gidebo, F.A., Yasuhara, H., and Kinoshita, N. (2023), "Stabilization of Expansive Soil with Agricultural Waste Additives: A Review", *Int. J. Geo-Eng.*, Vol.14, No.1, 14.
12. Hassan, M.E.S., Bai, J., and Dou, D.Q. (2019), "Biopolymers; Definition, Classification and Applications", *Egypt. J. Chem.*, Vol.62, No.9, pp.1725-1737.
13. Hussein, A.H., Muhawiss, F.M., and Abdul-Jabbar, R.A. (2023), "Collapsibility of Gypseous Soil Treated with Pectin-Biopolymer through Leaching", *J. Eng.*, 2023.
14. Im, J., Chang, I., and Cho, G.C. (2021), "Effects of Malonic Acid Crosslinked Starch for Soil Strength Improvement", *Transp. Geotech.*, Vol.31, 100653.
15. Jerez Lazo, C., Lee, N., Tripathi, P., Joykutty, L., Jayachandran, K., and Lee, S.J. (2024), "A Fungus-based Soil Improvement Using

- Rhizopus Oryzae Inoculum”, *Int. J. Geo-Eng.*, Vol.15, No.1, 18.
16. Jun, K.J., Oh, M., and Yune, C.Y. (2017), “Laboratory Test for the Performance of Grouting under Hydrostatic Pressure”, *J. Korean Geotech. Soc.*, Vol.33, No.10, pp.49-58.
  17. Khachatoorian, R., Petrisor, I.G., Kwan, C.C., and Yen, T.F. (2003), “Biopolymer Plugging Effect: Laboratory-pressurized Pumping Flow Studies”, *J. Pet. Sci. Eng.*, Vol.38, No.1-2, pp.13-21.
  18. Kong, X., Wang, G., Liang, Y., Zhang, Z., and Cui, S. (2022), “The Engineering Properties and Microscopic Characteristics of High-liquid-limit Soil Improved with Lignin”, *Coatings*, Vol.12, No.2, 268.
  19. Moghal, A.A.B. and Vydehi, K.V. (2021), “State-of-the-art Review on Efficacy of Xanthan Gum and Guar Gum Inclusion on the Engineering behavior of Soils”, *Innov. Infrastruct. Solut.*, Vol.6, pp.1-14.
  20. Mujah, D., Shahin, M.A.M and Cheng, L. (2017), “State-of-the-art Review of Biocementation by Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) for Soil Stabilization”, *Geomicrobiol. J.*, Vol.34, No.6, pp.524-537.
  21. Oluseyi, T., Olayinka, K., and Adeleke, I. (2011), “Assessment of Ground Water Pollution in the Residential Areas of Ewekoro and Shagamu due to Cement Production”, *Afr. J. Environ. Sci. Technol.*, Vol.5, No.10, pp.786-794.
  22. Pushpakumara, B. H. J. and Mendis, W. S. W. (2022), “Suitability of Rice Husk Ash (RHA) with Lime as a Soil Stabilizer in Geotechnical Applications”, *International Journal of Geo-Engineering*, Vol.13, No.1, p.4.
  23. Ryou, J.E. and Jung, J. (2023), “Characteristics of Thermo-gelation Biopolymer Solution Injection into Porous Media”, *Constr. Build. Mater.*, Vol.384, 131451.
  24. Ryou, J.E., Lee, J.Y., Hong, W.T., Yang, B., and Jung, J. (2024), “Effects of Curing and Soil Type on Unconfined Compressive Strengths and Hydraulic Conductivities of Thermo-gelation Biopolymer Rreated Soils”, *Constr. Build. Mater.*, Vol.432, 136493.
  25. Singh, R., Gautam, S., Sharma, B., Jain, P., and Chauhan, K.D. (2021), “Biopolymers and their Classifications”, In *Biopolymers and their Industrial Applications*, Elsevier, pp.21-44.
  26. Smidsrød, O., Moe, S., and Moe, S. T. (2008), *Biopolymer chemistry*, Tapir Academic Press.
  27. Sujatha, E.R. and Kannan, G. (2022), “An Investigation on the Potential of Cellulose for Soil Stabilization”, *Sustainability*, Vol.14, No.23, 16277.
  28. Zhao, Y., Zhuang, J., Wang, Y., Jia, Y., Niu, P., and Jia, K. (2020), “Improvement of Loess Characteristics Using Sodium Alginate”, *Bull. Eng. Geol. Environ.*, Vol.79, pp.1879-1891.

Received : September 2<sup>nd</sup>, 2024

Revised : September 18<sup>th</sup>, 2024

Accepted : September 18<sup>th</sup>, 2024