

환경 유해 부산물 누출이 없는 지반 보강용 효소 기반 탄산칼슘 침전 기법 연구

A Study on Enzyme-induced Carbonate Precipitation Technique for Soil Reinforcement without Releasing an Environmental Contaminant

이 승 형¹ Lee, Seung-Hyung

김 종 민² Kim, Jong-Min

Abstract

Recently, the enzyme-induced carbonate precipitation (EICP) technique has been considered as one of the alternatives to the cement-based soil reinforcing method. However, the problem with the emission of ammonium ion has not been solved. In this study, an experimental study on the EICP without releasing an environmental contaminant (Ze-EICP) is performed using calcium-exchanged zeolite. The results show that the Ze-EICP using calcium-exchanged zeolite reduced the amount of ammonium ions by 96.96% and precipitated almost the same amount of calcium carbonate, compared to the EICP using calcium chloride. In addition, the Ze-EICP shows higher strength improvement rate than the EICP due to densification of zeolite and cementation of calcium carbonate.

요 지

최근 효소 기반 탄산칼슘 침전(EICP) 기법은 시멘트 기반 지반보강공법의 대안 중 하나로 간주되어 왔다. 하지만 EICP 기법에서 발생하는 환경 유해 부산물인 암모늄 이온의 배출에 대한 문제는 해결되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 칼슘 치환 제올라이트를 사용하여 환경 유해 부산물이 없는 EICP(Ze-EICP)의 실험적 연구를 수행하고자 한다. 실험결과는 칼슘 치환 제올라이트를 사용하는 Ze-EICP가 염화칼슘을 사용하는 EICP와 비교하여 암모늄 이온은 96.96%가 제거되었으며, 거의 동일한 양의 탄산칼슘이 침전되었음을 보여주었다. 또한 Ze-EICP는 제올라이트의 조밀화와 탄산칼슘의 고결화로 인해 EICP 대비 높은 강도증진 효과를 보여주었다.

Keywords : Soil reinforcement, Cementation, Calcium carbonate, Cation exchange, Zeolite

1. 서 론

현재 연약지반 보강 및 액상화 방지 등을 위해 시멘트

기반 지반보강공법이 사용되고 있다. 하지만 시멘트 기반 지반보강공법은 시멘트 생산 시 동반되는 이산화탄소의 발생으로 인해 지구온난화와 같은 환경적인 문제

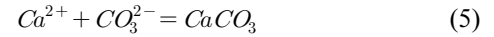
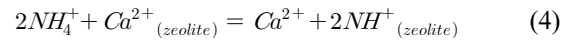
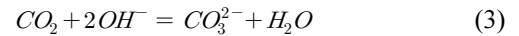
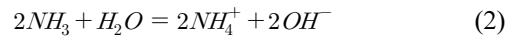
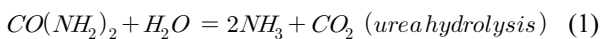
1 비회원, 세종대학교 건설환경공학과 박사후 연구원 (Post-Doctorate Researcher, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ.)

2 정회원, 세종대학교 건설환경공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ., Tel: +82-2-3408-3293, Fax: +82-2-3408-4332, jongmin@sejong.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2021년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

가 발생한다. 이러한 시멘트 기반 지반보강공법의 환경적인 문제점을 해결하고자 많은 연구자들로부터 요소가수분해 효소를 이용하는 탄산칼슘 침전(Enzyme-Induced Carbonate Precipitation, EICP) 기법에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다(Namati et al., 2003; Park et al., 2012; Yasuhara et al., 2012; Neupane et al., 2013; Kavazanjian et al., 2015; Neupane et al., 2015a; Neupane et al., 2015b; Oliveira et al., 2016; Almajed et al., 2018; Song et al., 2020; Lee et al., 2020). 탄산칼슘(CaCO₃)은 요소가수분해 효소의 요소가수분해 과정에서 생성되는 탄산 이온(CO₃²⁻)과 칼슘 이온(Ca²⁺)과의 화학결합을 통해 생성된다. 지반에 요소가수분해 효소액과 요소(CO(NH₂)₂) 및 염화칼슘(CaCl₂) 수용액을 혼합 또는 주입하면 지반 공극 내에 탄산칼슘이 침전되고, 침전된 탄산칼슘은 흙 입자들을 결합시켜 지반이 고결된다. 그러나 EICP 기법은 요소가수분해 과정에서 발생하는 부산물인 암모늄 이온(NH₄⁺) 같은 환경 유해 부산물로 인해 지하수를 오염시킬 가능성이 존재하며, 암모늄 이온의 산화로 인해 발생하는 암모니아(NH₃) 또한 독성을 갖고 있는 물질이다(Khodadadi et al., 2017). Phua et al.(2018)은 콘크리트에 사용되는 철근 보강재의 부식을 방지하기 위해 석회암을 재활용하여 염화칼슘의 염소 이온 배출을 방지하였지만 아직까지 환경 유해 부산물인 암모늄 이온 제거에 대한 뚜렷한 방안은 없는 시점이다.

본 저자들은 암모늄 이온 제거 방법 중 하나인 양이온 치환 방법(Jorgensen et al., 2003; Zhao et al., 2004)에 착안하여 칼슘 치환 제올라이트의 사용을 통한 요소가수분해의 부산물인 암모늄 이온을 제거하는 EICP 기법에 대해 고려하였다. 알루미늄 규산염인 제올라이트는 높은 양이온 치환 능력을 갖고 있어 지하수 오염 처리에 관해 많은 연구가 수행되었다(Ji et al., 2007). 만약 칼슘으로 치환된 제올라이트를 EICP 기법의 칼슘원으로 사용한다면, 요소가수분해 부산물로 배출되는 암모늄 이온과의 양이온 치환을 통해 칼슘 이온이 배출되고, 칼슘 이온은 탄산 이온과의 화학반응을 통해 탄산칼슘이 침전될 것이다. 따라서 칼슘 치환 제올라이트를 사용하는 EICP(Ze-EICP)는 대부분의 환경 유해 부산물 배출이 없이 탄산칼슘을 침전시켜 지반을 고결시킬 것이다. 이러한 Ze-EICP 기법의 과정은 식 (1) ~ (5)와 같다.



제올라이트는 흙 입자들을 결합시킬 수 없지만, 공극을 채우는 것으로 지반을 더욱 조밀화 시킨다. 따라서 Ze-EICP는 탄산칼슘의 고결화와 실트 입자 크기를 가지는 제올라이트의 조밀화를 통해 EICP 대비 높은 보강효과를 가질 것이다.

본 연구는 환경 유해 부산물이 없는 지반 보강용 EICP 기법에 대한 가능성을 평가하고자 실험적 연구를 수행하였다. 회분식 실험을 통해 칼슘 치환 제올라이트의 함량에 따른 탄산칼슘 침전량과 암모늄 이온 제거량을 측정하였으며, 실험결과를 토대로 강도시험용 시편을 제작하여 일축압축강도 측정을 통한 기존 EICP와 Ze-EICP 간의 보강효과를 비교하였다. 또한 파괴된 시편은 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM) 분석 및 X-선 광전자(Energy Dispersive Spectrometry, EDS) 분석을 통해 시편 내 탄산칼슘 침전을 확인하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 재료조건

2.1.1 효소액

효소액은 상업적으로 판매되는 정제된 요소가수분해 효소보다 저렴하고 요소가수분해 효소가 풍부한 노란콩 분말을 사용하여 제작하였다. 본 연구에서 사용된 노란콩 분말의 우레아제 활성도는 6.535U/mg으로 측정되었다(Lee et al., 2020). 75g의 노란콩 분말을 증류수와 함께 혼합하여 1 L의 혼합 수용액을 제작하였고, 혼합된 수용액은 3,000rpm 및 4°C의 조건으로 20분 간 원심 분리 되었다. 원심분리된 상층액은 요소가수분해 효소가 풍부한 효소액으로, 75g/L의 효소액은 하루 동안 1M (mol/L)의 요소를 가수분해하는데 충분한 농도이다.

2.1.2 고결액

EICP의 고결액은 60.06g(1mol)의 요소와 147.01g(1

Table 1. Components of the synthetic zeolite A5

Components	%
Al ₂ O ₃	36.82
SiO ₂	42.95
CaO	14.46
Na ₂ O	5.44
Etc.	0.33

mol)의 염화칼슘 2수화물을 물과 함께 혼합하여 1L의 고결액을 제작하였으며, Ze-EICP의 고결액은 60.06g(1 mol)의 요소와 0 ~ 900g의 합성 제올라이트 A5를 물과 함께 혼합하여 1 L의 고결액을 제작하였다. 합성 제올라이트 A5는 칼슘이 풍부하고 양이온 치환능력이 좋으며, 2.5 ~ 4.5 μ m의 입경 및 7meq/g의 양이온 치환능력(Cation Exchange Capacity, CEC)을 갖고 있다. 합성 제올라이트 A5에 대한 구성요소는 X선 형광분석기(X-Ray Fluorescence, XRF)를 통해 측정되었으며, Table 1과 같다.

2.1.3 화강풍화토

본 연구에서 사용된 흙은 우리나라에 가장 많이 분포하는 화강풍화토를 대상으로 하였다. 화강풍화토의 입도분포곡선(ASTM 2487, 2000) 및 기본물성은 각각 Fig.

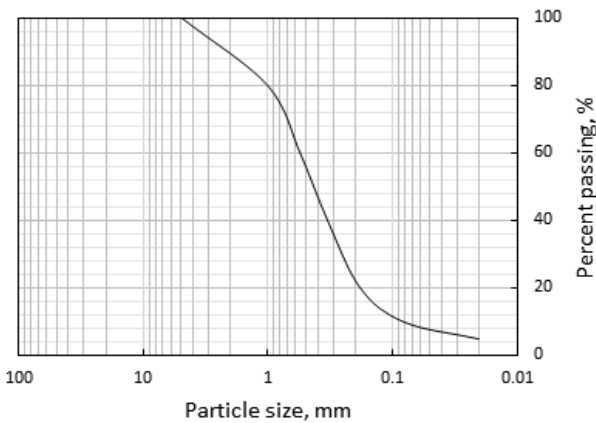


Fig. 1. The grain size distribution curve

Table 2. Properties of the soil

Property	Value
Specific gravity (G_s)	2.66
Coefficient of curvature (C_c)	1.54
Coefficient of uniformity (C_u)	6.88
Maximum void ratio (e_{max})	0.96
Minimum void ratio (e_{min})	0.61
Plasticity index (PI)	11.64
Liquid limit (LL)	17.42

1 및 Table 2와 같으며, 입도분석결과 통일분류법상 SW로 분류되었다.

2.2 실험방법

2.2.1 회분식 실험

회분식 실험은 Ze-EICP의 칼슘 치환 제올라이트 함량에 따른 탄산칼슘 침전량과 암모늄 이온 제거량을 측정하고, 염화칼슘을 사용하는 기존 EICP 기법과 비교·분석하기 위해 수행되었다. 회분식 실험의 세부적인 절차는 다음과 같다. 50ml의 conical tube에 각각 10ml의 효소액(75g/L)과 고결액을 혼합한다. 회분식 실험에 사용된 고결액의 농도 조건은 Table 3과 같다.

혼합된 효소액 및 고결액은 shaking incubator에서 200 rpm 및 25°C의 조건으로 하루 동안 반응시켰다. 반응 후 conical tube는 3,000rpm 및 25°C의 조건으로 20분 간 원심분리 되었다. Conical tube 속 원심분리된 상층액을 추출하여 암모늄 이온 농도 측정에 사용하였고, 침전물은 증류수 혼합, 원심분리 및 침전물 추출 과정을 통해 불순물을 제거하여 탄산칼슘 침전량 측정에 사용하였다.

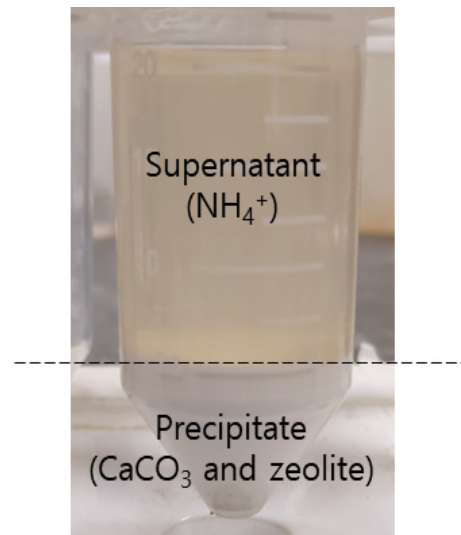


Fig. 2. The conical tube after centrifugation

Table 3. Concentration of cementation solution for the batch test

	Cementation solution	
	EICP	Ze-EICP
Urea	60.06 g/L (1 M)	60.06 g/L (1 M)
CaCl ₂ ·2H ₂ O	147.01 g/L (1 M)	-
Ca-zeolite (A5)	-	0 ~ 900 g/L (100 g/L intervals)

Fig. 2는 conical tube 속 암모늄 이온이 존재하는 상층액과 침전된 탄산칼슘 및 제올라이트를 보여준다.

2.2.2 암모늄 이온 농도 측정

암모늄 이온 농도는 상업적으로 이용가능한 assay kits (Machery-Nagel NANOCOLOR[®] ammonium 2000, Machery-Nagel, Düren, Germany)와 분광 광도계를 이용하여 인도페놀법으로 측정하였다. 실험절차는 assay kit의 매뉴얼에 따라 수행되었다. Assay kit의 암모늄 이온 농도 측정범위에 따라 다양한 농도의 암모늄 수용액을 준비하여 각각의 암모늄 이온 농도에 따른 585nm 파장의 광학밀도(OD585)를 측정하였다. 측정된 OD585와 암모늄 이온 농도와의 선형관계를 통해 표준곡선 그래프를 작도하였으며, 그래프는 Fig. 3과 같다. 회분식 실험을 통해 추출한 상층액은 assay kit의 측정범위에 맞게 희석시켜 광학밀도를 측정하였다. 측정된 상층액의 OD585는 표준곡선을 통해 암모늄 이온 농도로 변환되었다.

2.2.3 탄산칼슘 침전량 측정

탄산칼슘 침전량의 측정은 탄산칼슘과 염산의 반응을 통한 이산화탄소(CO₂)의 증기압을 이용하여 측정하였다. 탄산칼슘과 염산은 반응하여 이산화탄소를 발생시키고, 그로 인한 이산화탄소 증기압은 탄산칼슘의 양에 따라 선형적으로 증가한다. 상단에 벨브가 있는 직경 5cm, 높이 20cm의 아크릴 몰드에 1M의 염산 150 ml를 넣는다. 상업적으로 구매한 순수 탄산칼슘 분말(0 ~ 1g)과 주문진 표준사(10g)를 50ml conical tube 속에서 혼합한 후, conical tube를 아크릴 몰드 안에 탄산칼슘과 염산이 미리 반응하지 않도록 주의하며 넣는다. 아크릴 몰드의 상단 벨브를 닫고 완벽하게 밀봉시킨 후 흔들어

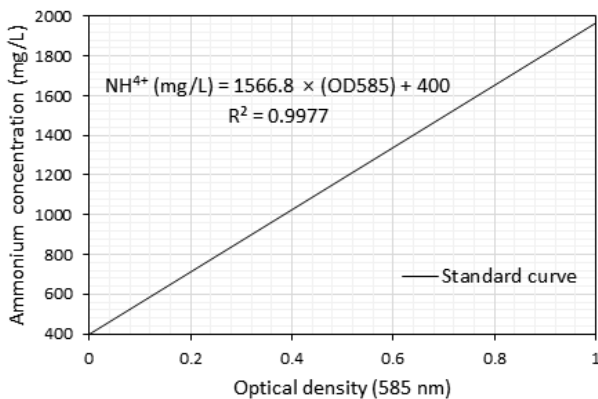


Fig. 3. Standard curve for ammonium concentration determination

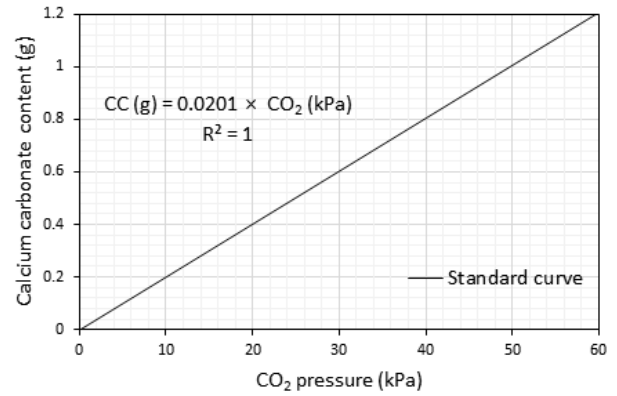


Fig. 4. Standard curve for calcium carbonate content determination

이산화탄소를 발생시킨다. 아크릴 몰드 상단에 압력계를 연결하여 이산화탄소로부터 발생한 증기압을 측정하고, 측정된 이산화탄소 증기압과 탄산칼슘 양에 대한 표준곡선 그래프를 작도한다. Fig. 4는 이산화탄소 증기압과 탄산칼슘 침전량에 따른 표준곡선 그래프를 나타낸다. 회분식 실험에서 추출한 탄산칼슘을 순수 탄산칼슘 분말과 동일한 방법으로 이산화탄소 증기압을 측정하고, 측정된 값은 표준곡선을 이용하여 탄산칼슘의 양으로 변환되었다.

2.2.4 일축압축강도시험

Ze-EICP와 기존 EICP 간의 보강효과를 비교하기 위해 일축압축강도를 측정하였다. 화강풍화토 310.89g과 효소액 및 고결액을 각각 39ml 씩 혼합하여 직경 5cm, 높이 10cm의 아크릴 몰드에 약하게 다짐하여 넣는다. 시편은 침전된 탄산칼슘이 흙 입자 간의 결합을 쉽게 유도할 수 있도록 80% 상대밀도의 조밀한 상태로 제작되었으며, 효소액 및 고결액의 혼합량은 시편 공극부피를 기준으로 많은 탄산칼슘을 침전시키기 위해 시편의 약 100%의 포화도를 달성하는 총 78ml로 결정하였다. 성형된 시편은 하루 동안 고결시킨 후, 아크릴 몰드를 해체하여 40°C의 건조오븐에서 무게 변화가 발생하지 않을 때까지 건조시켰다. 고결 및 건조가 완료된 시편은 ASTM D2166(2005)에 따라 재하속도 1mm/min의 변위 제어방식으로 일축압축강도시험을 수행하였으며, Table 4와 Fig. 5는 각각 시편의 성형조건 및 Ze-EICP 시편을 보여준다. 마지막으로 일축압축강도시험을 통해 파괴된 시편의 일부(약 20g)를 추출하여 2.2.3절의 탄산칼슘 침전량 측정방법을 통해 시편 내 탄산칼슘 함량을 측정하였으며, 정량적인 추정 외 SEM 및 EDS 분석을 통하여 시편 내 탄산칼슘의 존재를 확인하였다.

Table 4. Conditions of specimens

Specimen type	Enzyme solution	Cementation solution		
	Yellow soybean powder	Urea	CaCl ₂ ·2H ₂ O	Calcium-exchanged zeolite
Non-treated	-	-	-	-
Zeolite-treated	-	-	-	900 g/L
EICP-treated	75 g/L	1 M	1 M	-
Ze-EICP-treated	75 g/L	1 M	-	900 g/L



Fig. 5. Ze-EICP specimen for unconfined compression test

3. 실험결과 및 분석

3.1 탄산칼슘 침전을 및 암모늄 이온 제거율

본 절에서는 회분식 실험을 통해 Ze-EICP의 탄산칼슘 침전을 및 암모늄 이온 제거율을 측정·분석하였다. 1L의 수용액 속 1mol의 요소는 1mol의 탄산 이온과 2mol의 암모늄 이온으로 가수분해 되므로(식 (1) ~ (3)), 회분식 실험을 통한 이론적 최대 탄산칼슘 침전량 및 암모늄 이온량은 식 (6)과 식 (7)을 통해 각각 1,000.9mg 및 20 mmol로 계산되었다.

$$\text{Theoretical CaCO}_3 \text{ amount (mg)} = Mm \times M \times V \times 1000 \quad (6)$$

where, Mm = molar mass of CaCO₃ (100.09 g/mol); M = molarity of CO₃²⁻ (1 mol/L); V = volume of cementation solution (0.01 L)

$$\text{Theoretical NH}_4^+ \text{ amount (mmol)} = M \times V \times 1000 \quad (7)$$

where, M = molarity of NH₄⁺ (2 mol/L); V = volume of cementation solution (0.01 L)

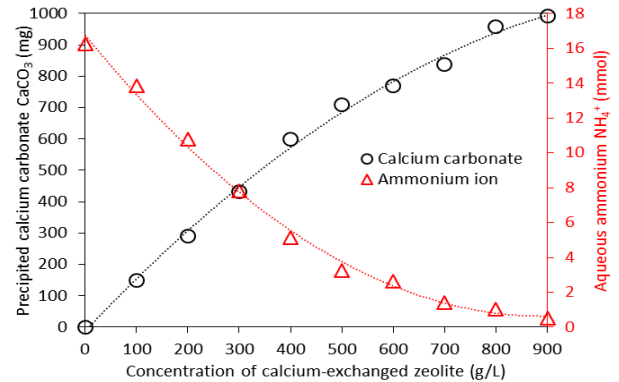


Fig. 6. Variation of calcium carbonate and ammonium ion according to zeolite concentration

Fig. 6은 칼슘 치환 제올라이트 농도에 따른 conical tube 속 탄산칼슘 침전량과 암모늄 이온량을 나타낸다. 그림과 같이 칼슘 치환 제올라이트의 농도가 증가할수록 암모늄 이온량은 감소하고 탄산칼슘 침전량은 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 칼슘 치환 제올라이트의 양이 증가할수록 많은 암모늄 이온이 양이온 치환되어 칼슘 이온을 방출하고, 그로 인해 더 많은 양의 탄산칼슘이 침전되기 때문이다. 또한 칼슘 치환 제올라이트의 농도가 900g/L일 경우, 탄산칼슘은 이론적 최대 탄산칼슘 침전량의 99%인 999.93mg이 침전되었으며, 암모늄 이온량은 0.53mmol로 이론적 암모늄 이온 생성량의 97%가 제거되었음을 보여주었다. 그러므로 Ze-EICP에 사용되는 칼슘 치환 제올라이트의 농도는 회분식 실험 결과를 토대로 침전 및 제거 효율이 95% 이상인 900g/L로 결정하였다.

칼슘 치환 제올라이트의 농도가 결정된 Ze-EICP는 Fig. 7에서 기존 EICP와 회분식 실험을 통해 비교·분석되었다. EICP의 탄산칼슘 침전량은 984.9mg으로 Ze-EICP와 EICP 모두 이론적 최대 탄산칼슘 침전량에 근접하였다. 하지만 EICP의 암모늄 이온량은 산화로 인한 암모니아 가스 배출로 인해 이론적 최대 암모늄 이온량보다 작은 17.42mmol로 측정되었으며, Ze-EICP의 암모늄 이온량은 EICP의 암모늄 이온량 대비 96.96%가 감소되었

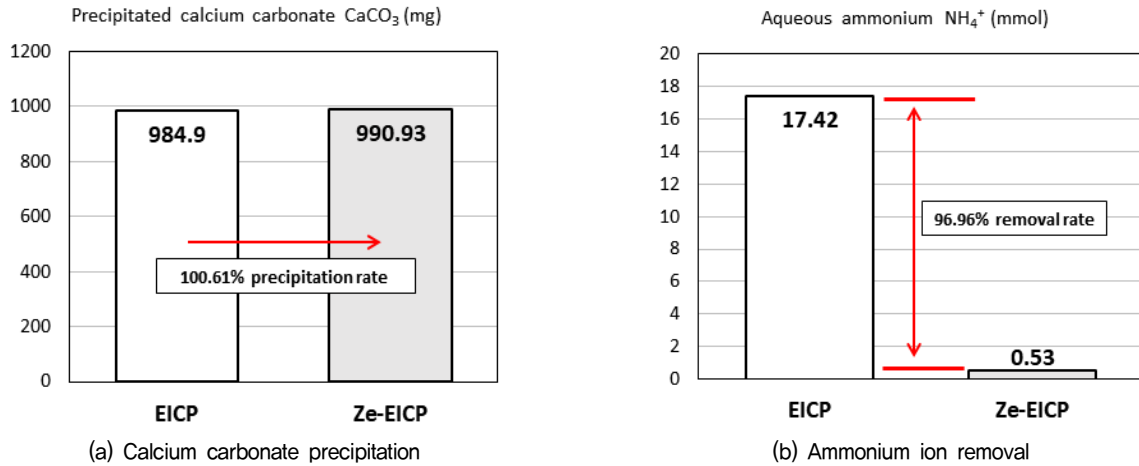


Fig. 7. Comparison of efficiency between EICP and Ze-EICP

다. 따라서 칼슘 치환 제올라이트는 충분히 염화칼슘을 대체하여 암모늄 이온 배출 없이 EICP와 동일한 양의 탄산칼슘을 침전시킬 수 있음을 보여주었다.

3.2 일축압축강도

Ze-EICP의 보강 효과를 분석하기 위해 비처리, 제올라이트 처리, EICP 처리 및 Ze-EICP 처리시편을 제작하여 일축압축강도와 탄산칼슘 함량을 측정하였다. 각 시편에 대한 일축압축강도시험 결과와 탄산칼슘 함량을 정리하면 Table 5와 같으며, 시편 내 침전된 탄산칼슘의 함량은 식 (8)을 이용하여 계산하였다.

$$\text{Calcium carbonate content}(\%) = \frac{W_{cal}}{W_s} \times 100 \quad (8)$$

where, W_{cal} = weight of calcium carbonate (g); W_s = weight of soil particles (g)

비처리 시편의 일축압축강도는 평균 145.25kPa로 측정되었으며, 제올라이트 처리시편의 일축압축강도는 평균 449.34kPa로 비처리 시편 대비 일축압축강도비($R=q/q_0$)는 3.09로 증가하였다. 이러한 제올라이트 처리시편의 강도증진 효과는 제올라이트의 공극채움을 통한 시편의 조밀화 때문이다. 반면에 EICP 처리시편의 일축압축강도는 평균 1201.97kPa로 평균 0.73%의 적은 탄산칼슘 함량에도 불구하고 R값은 8.27로 증가한 것을 확인하였다. 본 실험에서 제작된 시편은 상대밀도 80%의 매우 조밀한 상태로 흙 입자들 사이의 간격이 매우 좁다. 따라서 흙 입자들 사이에 적은 양의 탄산칼슘으로도 충분히 흙 입자들을 결합시켜 강도 증진에 기여할 수 있다. Ze-EICP 처리시편의 일축압축강도는 모든 시편들 중 가장 높은 일축압축강도인 평균 1730.91kPa로 R값은 11.92로 증가하였다. 또한 Ze-EICP는 EICP와 비슷한 탄산칼슘 함량에도 불구하고 제올라이트 존재에 따른 시편의

Table 5. Unconfined compressive strength and calcium carbonate content for various specimens

Specimen type	Unconfined compressive strength (kPa)		Calcium carbonate content (%)	
Non-treated	138.88	145.25	0	
	156.44			
	140.44			
Zeolite-treated	492.43	449.34	0	
	440.02			
	415.58			
EICP-treated	1186.70	1201.97	0.79	0.73
	1176.42		0.69	
	1242.80		0.71	
Ze-EICP-treated	1928.60	1730.91	0.85	0.76
	1724.85		0.67	
	1539.29		0.76	

조밀화 영향으로 인해 EICP 대비 더 높은 강도증진 효과를 보여주었다. 따라서 Ze-EICP는 제올라이트의 조밀화와 탄산칼슘의 고결화를 통한 높은 보강 효과를 보여주었으며, EICP 기법 대비 환경적인 측면 뿐 만 아니라 강도 측면에서의 개선 효과를 보여주었다.

3.3 SEM 및 EDS 분석

탄산칼슘 함량의 정량적인 추정 외에, SEM 및 EDS 분석을 통한 시편 내 탄산칼슘 침전을 확인하였다. Fig.

8은 비처리, EICP 처리 및 Ze-EICP 처리시편의 SEM image와 EDS mapping을 보여준다. EDS mapping은 시편의 대표적인 물질인 이산화규소(SiO_2)의 실리콘(Si)과 탄산칼슘(CaCO_3)의 칼슘(Ca)을 각각 노란색 및 빨간색 점으로 표시하였으며, Si와 Ca 사이의 중량 퍼센트로 명시된 상대 비율은 EDS 장비의 EMAXevo 소프트웨어(Horiba, Japan)에 의해 계산되었다. 그림에서 비보강토 대비 EICP 및 Ze-EICP 시편의 탄산칼슘 침전량 증가는 EDS mapping에서 늘어난 빨간색 점을 통해 뚜렷하게 관찰되었으며, 또한 육안 뿐 만 아니라 비보강토의 0%

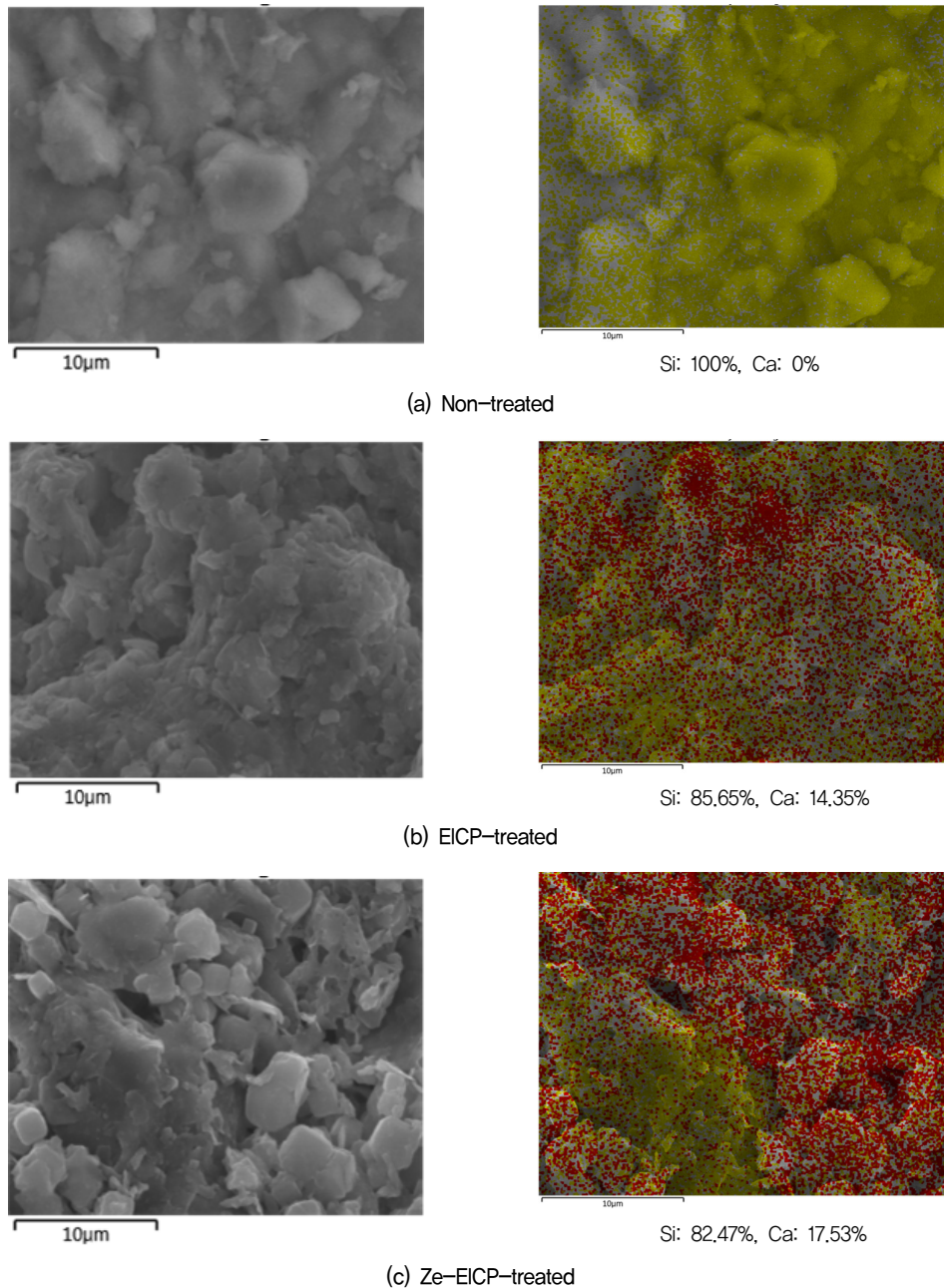


Fig. 8. SEM image and EDS mapping

에서부터 EICP 처리시편의 14.35% 및 Ze-EICP 처리시편의 17.53%까지 증가한 Ca의 상대적인 비율로부터 확인할 수 있다. Ze-EICP의 Ca의 비율은 제올라이트 구성 성분 중 하나인 CaO로 인해 EICP 처리시편 보다 약간 증가했음을 보여주었고, 다른 시편의 SEM image에 비해 육면체 형태의 제올라이트가 뚜렷하게 관찰되었다.

4. 결론

본 연구는 칼슘 치환 제올라이트를 사용하여 환경 유해 부산물이 없는 EICP (Ze-EICP) 기법에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 먼저, 회분식 실험을 통해 Ze-EICP의 암모늄 이온량과 탄산칼슘 침전량을 측정하였고, 기존 EICP와 비교·분석하였다. 또한, Ze-EICP의 강도 증진 효과를 확인하기 위해 일축압축강도시험을 수행하였다. 본 연구에서 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 칼슘 치환 제올라이트를 사용하는 Ze-EICP는 염화칼슘을 사용하는 EICP 대비 96.96%의 암모늄 이온이 제거되었으며 100.61%의 탄산칼슘을 침전시킴으로써, EICP 기법의 환경친화적인 대안이 될 수 있음을 보여주었다.
- (2) 일축압축강도시험을 통해 Ze-EICP 처리시편의 일축압축강도비(q/q_n)는 EICP 처리시편의 일축압축강도비인 8.27보다 높은 11.92로 측정되었으며, 제올라이트의 조밀화와 탄산칼슘의 고결화에 의한 높은 강도 증진 효과를 보여주었다. 따라서 Ze-EICP 기법은 EICP 기법 대비 환경적인 측면 뿐 만 아니라 강도 측면에서의 개선효과를 확인할 수 있었다.

Ze-EICP 기법에서 사용되는 합성 제올라이트는 기존 EICP의 염화칼슘에 비해 상대적으로 고가이다. 천연 제올라이트를 사용하는 경우에도 천연 제올라이트의 칼슘처리(Ca-activation)를 위한 추가적인 비용과 합성 제올라이트에 비해 낮은 양이온 치환능력으로 많은 양의 암모늄 이온 제거 및 탄산칼슘 침전이 어려운 단점이 존재한다. 따라서 합성 제올라이트 A5보다 경제적이고 양이온 치환 능력이 높은 칼슘 치환 제올라이트에 관한 추가적인 연구가 수행된다면, Ze-EICP 기법의 경제성은 EICP 기법 대비 암모늄 이온 배출이 없는 환경친화적인 장점과 추가적인 강도 증진 효과를 고려해 충분한 경쟁력을 확보할 수 있다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 행정안전부의 지진방재분야 전문인력 양성사업의 지원을 받아 제작되었습니다.

참고문헌 (References)

1. Almajed, A., Tirkolaei, H.K., and Kavazanjian Jr., E. (2018), Baseline Investigation on Enzyme-induced Calcium Carbonate Precipitation, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 144, No.11, pp.04018081.
2. ASTM D2166 (2005), Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soils, ASTM D2166, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
3. ASTM D2487 (2000), Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (unified soil classification system), ASTM D2487, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
4. Ji, Z. Y., Yuan, J. S., and Li, X. G. (2007), Removal of Ammonium from Wastewater Using Calcium form Clinoptilolite, *Journal of Hazardous Materials*, Vol.141, No.3, pp.483-488.
5. Jorgensen, T.C. and Weatherley, L.R. (2003), Ammonia Removal from Wastewater by Ion Exchange in the Presence of Organic Contaminants, *Water Research*, Vol.37, No.8, pp.1723-1728.
6. Kavazanjian, E. and Hamdan, N. (2015), Enzyme Induced Carbonate Precipitation (EICP) Columns for Ground Improvement, In: IFCEE 2015, *American Society of Civil Engineers*, Reston, VA, USA, pp. 2252-2261.
7. Khodadadi, H.T., Kavazanjian, E., van Paassen, L., and Dejong, J. (2017), Bio-grout Materials: A Review, *Grouting 2017*, July, Honolulu, HI, USA, pp.9-12.
8. Lee, S. and Kim, J. (2020), An Experimental Study on Enzymatic-induced Carbonate Precipitation Using Yellow Soybeans for Soil Stabilization, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.24, No.7, pp.2026-2037.
9. Namati, M. and Voordouw, G. (2003), Modification of Porous Media Permeability, Using Calcium Carbonate Produced Enzymatically in situ, *Enzyme and Microbial Technology*, Vol.33, pp.635-642.
10. Neupane, D., Yasuhara, H., Kinoshita, N., and Unno, T. (2013), Applicability of Enzymatic Calcium Carbonate Precipitation as a Soil-strengthening Technique, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.139, No.12, pp.2201-2211.
11. Neupane, D., Yasuhara, H., Kinoshita, N., and Ando, Y. (2015a), Distribution of Mineralized Carbonate and its Quantification Method in Enzyme Mediated Calcite Precipitation Technique, *Soils and Foundations*, Vol.55, No.2, pp.447-457.
12. Neupane, D., Yasuhara, H., Kinoshita, N., and Putra, H. (2015b), Distribution of Grout Material Within 1-m Sand Column in in Situ Calcite Precipitation Technique, *Soils and Foundations*, Vol.55, No.6, pp.1512-1518.
13. Oliveira, P.J.V., Freitas, L.D., and Carmona, J.P. (2016), Effect of Soil Type on the Enzymatic Calcium Carbonate Precipitation Process Used for Soil Improvement, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.29, No.4, pp.04016263.
14. Park, S.S., Choi, S.G., and Nam, I.H. (2012), Development of Soil Binder Using Plant Extracts, *Journal of the Korean Geotechnical*

- Society*, Vol.28, No.3, pp.67-75.
15. Phua, Y.J. and Royne, A. (2018), Bio-cementation through Controlled Dissolution and Recrystallization of Calcium Carbonate, *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd., Vol.167, pp.657-668.
 16. Song, J.Y., Ha, S.J., Jang, J.W., and Yun, T.S. (2020), Analysis of Improved Shear Stiffness and Strength for Sandy Soils Treated by EICP, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.31, No.1, pp.17-28.
 17. Yasuhara, H., Neupane, D., Hayashi, K., and Okamura, M. (2012), Experiments and Predictions of Physical Properties of Sand Cemented by Enzymatically-induced Carbonate Precipitation, *Soils and Foundations*, Vol.52, No.3, pp.539-549.
 18. Zhao, Y.P., Gao, T.Y., Jiang, S.Y., and Cao, D.W. (2004), Ammonium Removal by Modified Zeolite from Municipal Wastewater, *Journal of Environmental Sciences*, Vol.16, No.6, pp.1001-1004.

Received : April 9th, 2021

Revised : April 15th, 2021

Accepted : April 16th, 2021