

## 굴 패각의 소성온도 및 입경에 따른 연안 점토질 퇴적물의 전단강도 변화에 관한 연구

우희은 · 정일원 · 이인철 · 김경희\*

부경대학교 해양공학과

## A Study on the Change of Shear Strength of Coastal Muddy Sediment Due to the Mixing of Oyster shells with different Pyrolysis Temperature and Particle size

Hee-Eun Woo · Ilwon Jeong · In-Cheol Lee · Kyunghoi Kim\*

Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

### ABSTRACT

In order to investigate change of shear strength of coastal muddy sediment by mixing pretreated oyster shells with different pyrolysis temperatures and particle sizes, a vane shear test was carried out. The shear strength of the sediment with oyster shells pyrolyzed at 800°C was twice higher than that of the control, with a maximum shear strength of ca. 0.2 kPa. The  $\text{Ca}^{2+}$  concentration in the pore water was the highest at sediment with oyster shells pyrolyzed at 800°C with a concentration of ca. 790 mg/L. From the above results, it is concluded that the application of the oyster shells pyrolyzed at 800°C can affect the increase in shear strength of coastal sediments through the aggregation of clay particles and pozzolanic reactions with sediments.

**Key words :** Coastal sediments, Shear strength, Oyster shells, Cations

### 1. 서 론

점토질로 이루어진 연안 퇴적물은 간극수 흐름이 느리고 강도가 낮다는 특성이 있다(Indraratna et al., 2014; Rahman et al., 2013). 정체된 간극수 흐름은 육상에서 연안으로 유입된 산소 및 영양염의 확산을 저해하여 연안 생태계에 부정적인 영향을 줄 수 있다(Kim and Kim, 2020). 또한 지반강도가 낮은 연안 퇴적물은 작은 외력에도 쉽게 재부상하여 침전된 오염물질이 수층으로 공급될 수 있다(Pourabadehei and Mulligan, 2016).

점토입자는 표면에 음전하를 띠고 있어 입자 주변에는 양이온이 밀집되어 있는 고정층과 일정 거리 밖의 양이온

밀도가 낮은 분산층으로 전기이중층이 형성되어 있다(Chorom et al., 1994; Davidson et al., 1962; Jung et al., 2003). 전기이중층 이론과 DLVO 이론에 따르면, 콜로이드 입자의 분산거동은 입자간 발생하는 Van der Waals 인력과 전기이중층에 따른 척력(반발력)의 합에 의해 결정된다(Mun and Kang, 2010; Yao et al., 2016). 전기이중층의 두께가 감소하면 인력이 증가하면서 입자간의 응집성은 커지게 된다(Abbaslou et al., 2020). Mahanta et al.(2014)는 토양 간극수의  $\text{Ca}^{2+}$ 가 100 mol/m<sup>3</sup>까지 증가할 경우 전기이중층의 두께가 최대 50%까지 감소한 것으로 보고하였다.

이처럼 교환성 양이온은 점토 입자의 분산과 응집에 관여하는데, 이러한 거동은 양이온의 원자가에 따라서 달라진다(Rengasamy et al., 2016). 1가 양이온은 점토 입자를 분산시키며, 2가 양이온은 점토 입자를 응집시켜 지반 강도에 영향을 준다(Dontsova and Norton, 1999; Marchuk and Rengasamy, 2011). 점토 입자에서의 양이온 교환은 일반적으로  $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^{+} > \text{Na}^{+}$  순으로 나타나기 때문

주저자: 우희은, 대학원생

공저자: 정일원, 대학원생; 이인철, 교수

\*교신저자: 김경희, 교수

Email: hoikim@pknu.ac.kr

Received : 2020. 11. 30 Reviewed : 2020. 12. 10

Accepted : 2021. 01. 22 Discussion until : 2021. 04. 30

에(Helfferich, 1962), 2가 양이온 중 특히  $\text{Ca}^{2+}$ 을 연안 퇴적물에 공급할 경우, 양이온 교환에 의한 점토입자의 응집을 유도할 수 있다.

2019년 기준 연간 발생하는 굴 폐각량은 약 300,000톤으로 이 중 85%가 재활용되고 있다(Baek and Lee, 2020). 반면, 재활용되지 못한 약 15%의 굴 폐각은 연안가에 그대로 방치되어 악취, 해충 등의 문제를 야기하고 있어 굴 폐각 처리에 대한 논의가 시급한 실정이다(Wu et al., 2014). 굴 폐각은 95% 이상이  $\text{CaCO}_3$ 로 구성되어 있어 해양에 친환경적으로  $\text{Ca}^{2+}$ 을 공급할 수 있는 재료이다(Hamster et al., 2012). 특히 600°C 이상에서 소성시킨 굴 폐각의 영양염 및 중금속을 제거하는 등의 환경 개선 효과가 다수의 연구를 통해 확인되었다(Moon et al., 2015; Yu, et al., 2010).

지반 강도 증가를 목적으로 굴 폐각을 활용한 연구 사례는 다수 수행되었으나 굴 폐각이 지반 강도에 미치는 영향에 대하여 연구마다 다른 결과가 보고되고 있다(Gyeonggi-do Fisheries Office, 2009; Kim et al., 2013; Lee et al., 2007). 굴 폐각과 같은 재료들은 전처리 방법에 따라 물리화학적 특성이 달라진다는 점을 반영하지 않아 나타난 현상인 것으로 보인다(Woo et al., 2018). 따라서 본 연구에서는 실내시험을 통해 소성 온도와 입경이 다른 굴 폐각이 연안 퇴적물의 강도에 미치는 영향을 조사하고 양이온 농도변화를 중심으로 연안 퇴적물의 강도 변화 메커니즘을 해석하는데 목적을 두고 있다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 굴 폐각

실험에 사용한 굴 폐각의 적정 소성 온도는 시차열분석(Thermo Gravimetric-Differential Thermal Analyzer, TG-DTA) 결과를 통해 선정하였다. TG-DTA(DTG-60H,

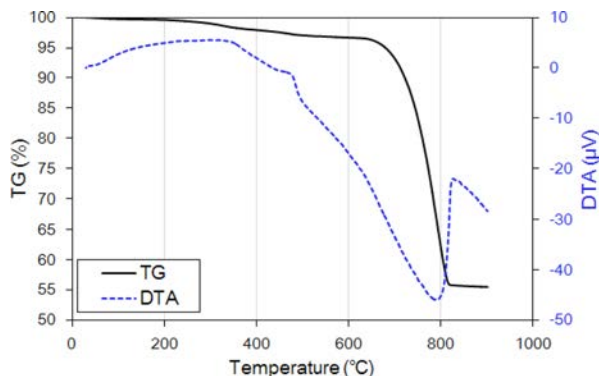
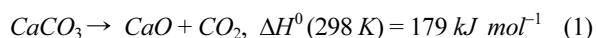


Fig. 1. TG-DTA result of oyster shell.

Shimadzu)는 10°C/min의 속도로 900°C까지 승온시켜 수행되었으며, 결과는 Fig. 1에 나타내었다. TG 분석 결과 700°C까지의 중량 감소율은 약 6%이었으며 700~900°C에서 약 40%의 중량 감소를 확인하였다. 굴 폐각의  $\text{CaCO}_3$ 는 열분해반응을 통해  $\text{CO}_2$ 와  $\text{CaO}$ 로 분해가 된다(식 (1)). Fig. 1에 따르면 약 650°C에서 열분해가 본격적으로 시작되어 약 800°C에서 굴 폐각의 소성이 완료되는 것을 확인하였다. 이는 기존의 문헌들과 유사한 결과를 보여준다(Silva et al., 2019; Kim et al., 2019). Ha et al. (2019)에 따르면 굴 폐각의 소성 온도는 석회석 보다 낮게 나타내는데, 이는 굴 폐각의 다공성이 열 안정성을 감소시키기 때문인 것으로 보고하였다. DTA의 결과, 탄산칼슘의 열분해는 흡열 반응임을 나타내며 약 800°C에서 약 -46 μV로 가장 강한 흡열피크를 확인하였다.



### 2.2. 실험재료

실험에 사용된 굴 폐각은 거제시에 위치한 굴 박신장에서 원형 그대로의 굴 폐각을 채취하여 서늘한 곳에서 6개



Fig. 2. Pyrolyzed oyster shells with different particle size (a:0-1 mm, b:1-2 mm, c:2-5 mm).

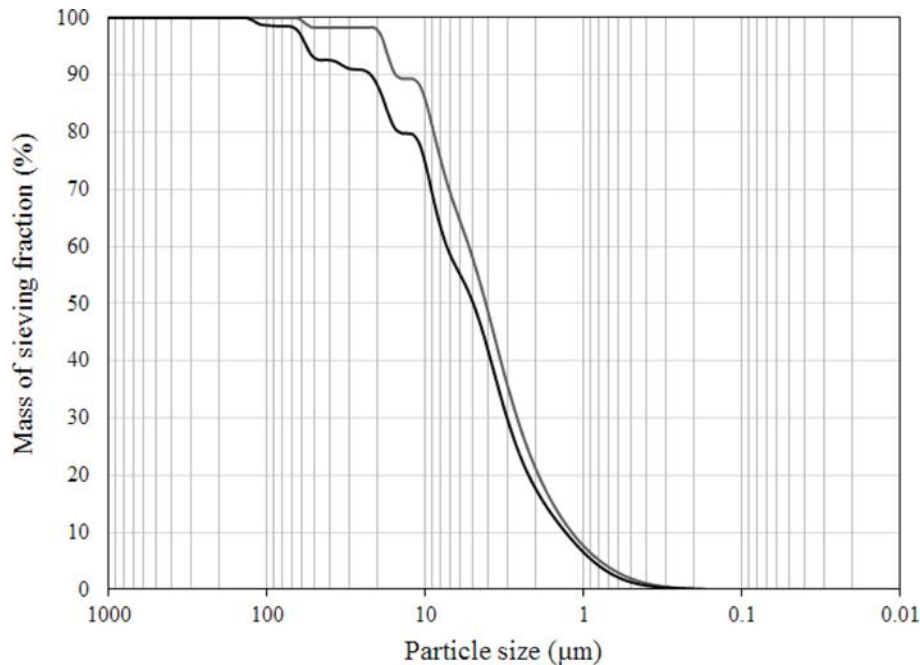


Fig. 3. Grain size accumulation curve of sediment.

Table 1. The granulometric results for the sediments

|                               | Case 1 | Case 2 | Aver. | SD   |
|-------------------------------|--------|--------|-------|------|
| D10 ( $\mu\text{m}$ )         | 1.3    | 1.4    | 1.4   | 0.09 |
| D30 ( $\mu\text{m}$ )         | 2.7    | 3.1    | 2.9   | 0.28 |
| D50 ( $\mu\text{m}$ )         | 4.6    | 5.5    | 5.0   | 0.65 |
| D60 ( $\mu\text{m}$ )         | 5.4    | 7.4    | 6.4   | 1.41 |
| coefficient of uniformity, Cu | 22.22  | 17.57  | 19.89 | 3.29 |
| coefficient of curvature, Cg  | 1.12   | 1.00   | 1.06  | 0.09 |

월 이상 자연건조 하였다. 이후 굴 패각은 각각 0~1 mm, 1~2 mm, 2~5 mm의 입경으로 파쇄 후 400°C, 500°C, 600°C, 800°C의 온도로 각각 1시간 동안 전기로(SF-14, Wise Therm(R))에서 소성하였다(Fig. 2). 5~35 mm로 파쇄한 굴 패각은 내부마찰각이나 투수계수가 모래(사질토)와 비슷한 수치인 것으로 보고되었다(Yoon et al., 2001). 따라서 5 mm 이하의 굴 패각을 대상으로 입경을 분류하여 실험에 적용하였다.

실험에 사용된 퇴적물은 남해 육지도 주변 해역에서 채취하였고, 퇴적물에 뒤섞여있는 패각 및 비닐 등의 이물질을 최대한 걸러낸 후 사용하였다. 남해 퇴적물의 입도 분포는 2회 반복 측정하였으며 측정결과는 Fig. 3과 Table 1에 나타내었다. 퇴적물의 평균 D50은 5.0  $\mu\text{m}$ 로 균등계수는 약 19.9, 곡률계수는 1.1로 조사되었다. 일반적으로 균등계수(Cu)>10, 곡률계수(Cg)=1~3 일 때 입도 분포가 양호하다고 할 수 있다(Kim et al., 2016). 해수

는 부산 용호만에서 채수하여 유리섬유여과지(GF/C-47, Whatman)로 여과 후 실험에 사용하였다.

### 2.3. 실험방법

전단강도 실험은 입경 및 소성온도별 굴 패각과 퇴적물을 1:1의 체적비로 혼합한 실험구와 퇴적물로만 구성된 대조구를 대상으로 수행되었다(Table 2). 굴 패각과 퇴적물을 혼합한 실험구의 경우 시료의 함수비가 달라지는데 함수비의 변화는 전단강도에 영향을 준다. 따라서 함수비에 의한 영향을 최소화하기 위하여 시료의 상부에는 필터링한 해수를 채워서 시료를 포화시켰다. 대조구는 실험구와 동일한 부피의 퇴적물을 채워 넣고 마찬가지로 상부에 해수를 채워 넣었다. 대조구 및 실험구는 각 2개씩 제작하였으며, 2주 동안 18°C에서 보관한 후에 배인전단강도 측정에 사용하였다. 배인전단시험은 50.8×101.6 mm 규격의 배인(H-4227, Humbolt)을 사용하였으며, KS F 2342

**Table 2.** Experimental cases

|                    | Case    | Pyrolyzed temp. | Grain size |        |        |
|--------------------|---------|-----------------|------------|--------|--------|
| Control case       | Control | -               | -          |        |        |
| Experimental cases | POS400  | 400°C           | 0~1 mm     | 1~2 mm | 2~5 mm |
|                    | POS500  | 500°C           |            |        |        |
|                    | POS600  | 600°C           |            |        |        |
|                    | POS800  | 800°C           |            |        |        |

점성토의 현장 배인 전단 시험 방법에 따라 진행되었다.

전단강도 시험 종료 후 각 소성 온도별로 0~1 mm의 굴 패각이 혼합된 시료를 대상으로 원심분리기(LaboGene 416, LABOGENE)를 사용하여 간극수를 추출하였다. 추출한 간극수는 부경대학교 공동실험 실습관에서 대표 양이온( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ )에 대한 ICP-MS(NexION 300D, PERKIN ELMER) 분석을 수행하였다(Summer, 2000). 분석한 양이온 결과값을 바탕으로 양이온 교환 용량(cation exchange capacity; CEC)과 나트륨 흡착비(sodium adsorption ratio; SAR)를 계산하였으며 계산식은 식(2)와 식(3)에 나타내었다(Kim and Kim, 2020).

$$CEC (\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}) = \frac{Na^+ + K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+}}{10} \quad (2)$$

$$SAR (\text{mmol}_c^{1/2} L^{-1/2}) = \frac{Na^+}{\sqrt{Ca^{2+} + Mg^{2+}}} \quad (3)$$

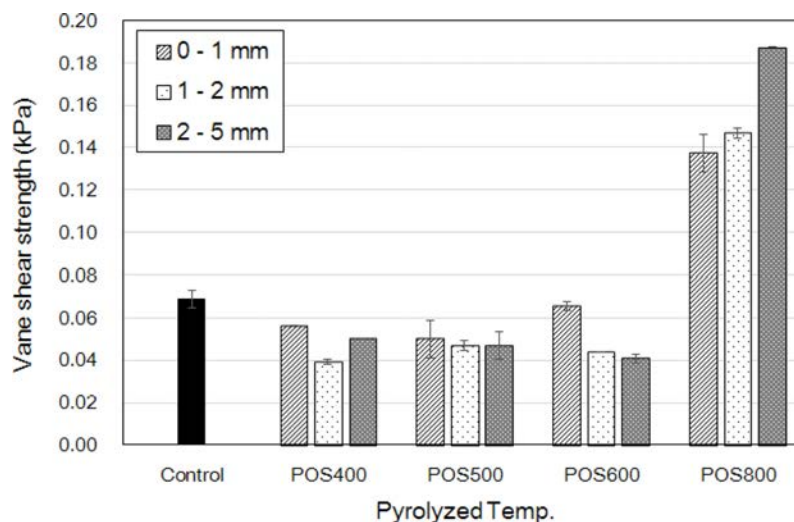
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 배인전단시험

굴 패각과 연안 퇴적물이 혼합된 시료의 전단강도 결과

를 Fig. 4에 나타내었다. 대조구의 배인전단강도는 약 0.07 kPa로 확인되었으며 POS400, POS500, POS600, POS800의 전단강도는 각각 약 0.039~0.056 kPa, 약 0.047~0.050 kPa, 약 0.041~0.066 kPa, 약 0.138~0.188 kPa의 범위로 나타났다. 입경별로 분류해보면, 0~1 mm, 1~2 mm, 2~5 mm의 굴 패각이 혼합된 시료 전단강도는 각각 약 0.050~0.138 kPa, 약 0.039~0.147 kPa, 약 0.041~0.188 kPa의 범위로 나타났다. 최대 전단강도는 입경 2~5 mm의 POS800에서 0.188 kPa로 나타났으며, 최소 전단강도는 입경 1~2 mm의 POS400에서 0.039 kPa로 나타났다.

이처럼 굴 패각의 소성 온도에 따른 퇴적물의 전단강도는 유의미한 차이를 보였다. POS400~600의 전단강도는 대조구보다 낮아졌으나, POS800의 전단강도는 급격히 증가하여 대조구 대비 2.0~2.7배 높게 나타났다. 퇴적물 강도 증가 원인 중 하나는 실리카, 알루미늄과 칼슘과의 반응으로 칼슘실리케이트(CSH) 혹은 칼슘알루미늄에이트(CAH) 수화물을 형성하는 포졸란 반응에 의한 영향인 것으로 보인다(Furlan et al., 2018). 토양 광물 내의 반응성 실리카 및 알루미늄 이온의 용해는 높은 pH 조건에서 유리하다(Bell, 1996). 따라서 POS800은 다른 실험 케이스에 비해 포졸란 반응이 더 활발했을 것으로 보인다.

**Fig 4.** Vane shear strength of the sediment with pyrolyzed oyster shells.



Seo et al.(2003)은 굴 패각 혼합비(중량비)가 높아질수록 굴 패각 혼합토의 비배수전단강도가 높아지며 25~50% 구간에서 가장 높은 것으로 보고되었다. 본 연구에서는 굴 패각과 퇴적물을 혼합할 때 체적비를 고려하였는데, 중량비는 POS400~600에서 약 15~23%인 반면, POS800에서는 25~30%로 나타났다. 이는 600°C 이하의 소성 온도에 비해서 800°C에서 소성시킨 굴 패각의 비중이 높아 혼합된 시료의 중량이 증가하면서 전단강도에 영향을 미친 것으로 보인다. 또한, DeJong et al.(2006)에 의하면 미생물의 대사활동은 pH가 증가시키고 수용액에 녹아있는  $\text{Ca}^{2+}$ 이 탄산이온( $\text{CO}_3^{2-}$ )과 반응하면서 탄산칼슘을 생성할 수 있다. 생성된 탄산칼슘은 입자 내의 공극을 채우고 결합력을 높여 지반의 강도 증가에 영향을 미친 것으로 추측된다(Kim et al., 2017).

굴 패각의 입경에 따른 퇴적물의 전단강도는 POS800을 제외한 POS400~600은 유의미한 차이를 나타내지 않았다. POS800은 입경에 따라 전단강도가 증가하는 경향을 보이는데, 이는 상대적으로 배인보다 큰 입경의 굴 패각이 배인과 퇴적물 경계의 마찰을 증가시켜 입경이 커질수록 전단응력의 증가가 나타난 것으로 판단된다.

### 3.2. 퇴적물의 양이온 측정

소성온도별 1 mm 이하의 실험 케이스에 대해 퇴적물 내의 양이온 농도를 측정하였다(Fig. 5).  $\text{Na}^+$  농도는 약 9,300~14,000 mg/L으로 가장 높게 나타났으며,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ 이 각각 약 420~520 mg/L, 약 200~790 mg/L, 13~1250 mg/L의 범위로 나타났다.  $\text{Na}^+$ 은 모든 실험구에서 대조구 대비 높게 나타났으며, 특히 POS800에서 약 1.5배 높게 나타났다. 이는 굴 패각에 의해 공급된  $\text{Ca}^{2+}$ 이 점토입자에 흡착되어 있던 기존의  $\text{Na}^+$ 과 교환되면서  $\text{Na}^+$ 을 외부로 배출시켰기 때문인 것으로 판단된다(Kim and Kim, 2020). 소성 온도가 낮을수록  $\text{K}^+$ 의 농도도 낮아지는 경향이 나타났으나 유의미한 차이는 없는 것으로 확인되었다( $t > 0.05$ ).  $\text{Ca}^{2+}$  농도는 POS800을 제외하고 소성 온도가 높아질수록 낮아지는 경향이 나타났다.  $\text{Ca}^{2+}$ 은 점토입자로 흡착되는 것 외에도 점토와 포졸란 반응, 퇴적물 내의 인과 결합하여 소비될 수 있다. POS800은 점토와 산화칼슘의 포졸란 반응에 의한 감소에도 불구하고 다른 케이스에 비해 높은  $\text{Ca}^{2+}$  농도를 나타내고 있는데, 가수분해에 의해 용출된 칼슘 이온에 의한 영향인 것으로 보인다(식(4)).

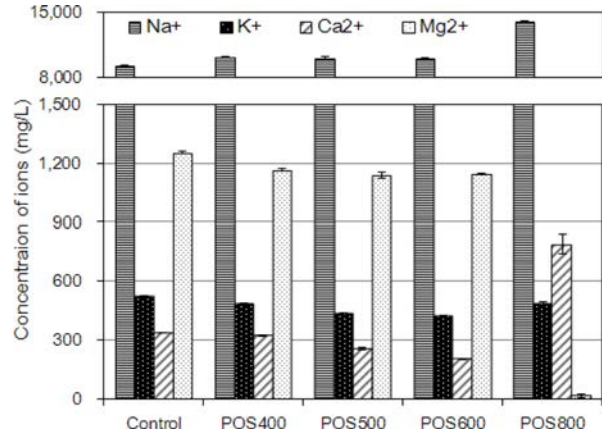
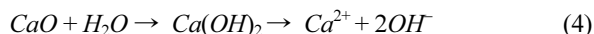


Fig. 5. Cation concentrations ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) in pore water of sediment.

Fig. 5를 바탕으로 CEC 및 SAR을 계산하여 Fig. 6에 나타내었다. 대조구의 CEC가 약 54.0 cmol(+)/kg, POS400, POS500, POS600의 CEC는 각각 57.1, 56.1, 55.6 cmol(+)/kg로 나타났다. POS800의 CEC는 66.1 cmol(+)/kg로 다른 실험케이스보다 약 1.2배 높은 것으로 확인되었다. 25 cmol(+)/kg 이상의 높은 CEC 값은 유기물이 풍부한 점토로, 많은 양의 양이온을 점토입자에 고정시킬 수 있다(Bashour and Sayegh, 2007). 이는 점토입자에 더 많은 양의  $\text{Ca}^{2+}$ 을 흡착할 수 있음을 보여준다.

대조구의 SAR은  $36.8 \text{ mmol}_c^{1/2}\text{L}^{-1/2}$ 로 실험구 케이스 대비 가장 낮게 나타났다. POS400~600의 SAR은 41.8~42.8  $\text{mmol}_c^{1/2}\text{L}^{-1/2}$ 로 대조구와 비교하였을 때 유의미한 차이가 나타나지 않았다( $t > 0.05$ ). 반면 POS800의 SAR은  $95.6 \text{ mmol}_c^{1/2}\text{L}^{-1/2}$ 로 다른 케이스와 비교하였을 때 2배 이상 높은 것을 확인하였다. SAR은 관개용수의 적합성을 판단하기 위해 주로 활용되는 지수로, SAR이 13보다 클 경우 염류(sodic) 토양으로 분류되며, 이는 점토 입자의 분산이 높아 구조적으로 불안정한 상태가 된다(Kharel et al., 2018).  $\text{Na}^+$ 이 지배적인 연안 퇴적물의 특성상 모든 실험케이스에서 SAR > 13으로 나타난 것을 확인하였다. 특히 POS800은  $\text{Ca}^{2+}$  공급에 따른  $\text{Na}^+$ 의 배출로 간극수 내  $\text{Na}^+$ 의 농도 증가 및  $\text{Mg}^{2+}$  농도의 감소가 SAR의 상승에 영향을 준 것으로 보인다. POS800에서 SAR과 전단강도의 증가는  $\text{Ca}^{2+}$ 의 흡착에 따른 점토 입자의 응집 반응보다 포졸란 반응을 포함한 다른 외부적인 요인이 원인인 것을 보여준다.

연안의 오염저서환경 개선을 위해 굴 패각을 활용하는 방안은 오래전부터 논의되고 있다. 저서환경개선제로 굴 패각을 이용하는 경우 2차 오염을 방지하기 위해 굴 패각

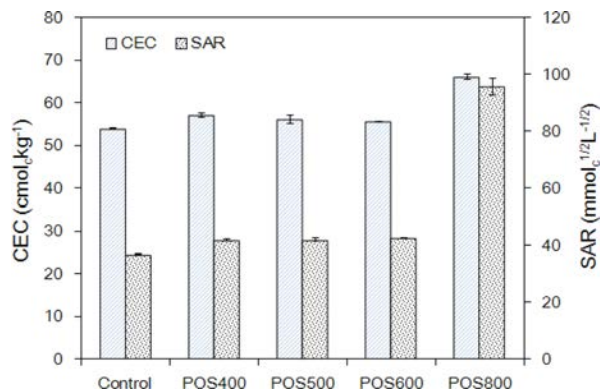


Fig. 6. CEC and SAR of sediment after the experiment.

의 소성 전처리 과정을 통한 유기물 제거는 필수적이다 (Baek and Lee, 2020). 그러나 소성 처리된 굴 폐각을 해양에 투기하였을 때 지반 강도가 급격하게 변화할 경우, 저서생태계의 교란을 야기할 수 있다. 따라서 본 연구의 결과는 굴 폐각의 연안환경 복원재로 활용하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 소성 굴 폐각을 연안 퇴적물에 적용하여 지반강도 개선 효과를 평가하였다. 또한, 굴 폐각의  $\text{Ca}^{2+}$  공급에 의한 점토입자의 거동에 대해 조사하기 위하여 연안 퇴적물의 간극수 양이온 농도도 측정하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1) POS400~600은 대조구 대비 배인전단강도의 유의미한 차이가 나타나지 않은 반면, POS800은 대조구보다 2배 이상 높게 나타났다. 이러한 결과는 굴 폐각의  $\text{Ca}^{2+}$ 와 연안 퇴적물의 포졸란 반응에 의한 것으로 판단된다.

2) 0~5 mm 이내의 굴 폐각 입경에서 POS400~600은 유의미한 차이를 보이지 않았으나, POS800의 경우 입경이 커질수록 전단강도도 증가하는 것을 확인하였다. 이는 큰 입경의 굴 폐각이 배인과 퇴적물 사이의 마찰을 증가시켰기 때문인 것으로 판단된다.

3) POS800의 간극수에 포함된 양이온 농도는 대조구 대비  $\text{Na}^+$ 과  $\text{Ca}^{2+}$ 이 각각 약 1.5배, 2.3배 높게 나타났다.  $\text{Na}^+$ 의 증가는 점토입자의 양이온 선택성에 따라  $\text{Ca}^{2+}$ 으로 치환되면서 간극수로 배출되었기 때문인 것으로 판단된다. 또한 POS800의  $\text{Ca}^{2+}$ 은 점토입자의 흡착 및 포졸란 반응에 의해 가장 많이 소비되에도 불구하고 가장 높은 간극수 농도가 나타날만큼 다량의  $\text{Ca}^{2+}$ 을 공급할 수 있음을 확인하였다.

#### 사 사

위 논문은 2020년도 정부(해양수산부) 재원으로 영남씨그랜트센터의 지원을 받아 수행된 연구임.

#### References

- Abbaslou, H., Hadifard, H., and Ghanizadeh, A.R., 2020, Effect of cations and anions on flocculation of dispersive clayey soils, *Heliyon*, **6**(2), e03462.
- Bell, F.G., 1996, Lime stabilization of clay minerals and soils. *Eng. Geol.*, **42**(4), 223-237.
- Baek, E.Y. and Lee, W.G., 2020, A study on the rational recycling of oyster-shell, *J. Fish. Bus. Adm.*, **51**(2), 71-87.
- Bashour I.I. and Sayegh, A.H., 2007, Methods of Analysis for Soils in Arid and Semi-arid Regions, Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations, Rome, Italy.
- Chorom, M., Rengasamy, P., and Murray, R.S., 1994, Clay dispersion as influenced by pH and net particle charge of sodic soils, *J. Soil Res.*, **32**(6), 1243-1252.
- Davidson, D.T., Demirel, T., and Rosauer, E.A., 1962, Mechanism of Stabilization of Cohesive Soils by Treatment with Organic Cations, in *Clays and Clay Minerals*, 585-591.
- DeJong, J.T., Fritzges, M.B., and Nüsslein, K., 2006, Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **132**(11), 1381-1392.
- Dontsova, K. and Norton, L.D., 1999, Effects of exchangeable Ca: Mg ratio on soil clay flocculation, infiltration and erosion, *Proceedings 10th International Soil Conservation Organization Meeting*, Int. Soil Conserv. Org., West Lafayette, USA, 24-30.
- Furlan, A.P., Razakamanantsoa, A., Ranaivomanana, H., Levacher, D., and Katsumi, T., 2018, Shear strength performance of marine sediments stabilized using cement, lime and fly ash, *Constr. Build. Mater.*, **184**, 454-463.
- Gyeonggi-do Fisheries Office, 2009, A Case Study on Marking A Site for Farming Ruditapes Philippinarum to Utilize Waste Oyster Shell.
- Ha, S., Lee, J.W., Choi, S.H., Kim, S.H., Kim, K., and Kim, Y., 2019, Calcination characteristics of oyster shells and their comparison with limestone from the perspective of waste recycling, *J. Mater. Cycles Waste*, **21**, 1075-1084.
- Hamester, M.R.R., Balzer, P.S., and Becker, D., 2012, Characterization of calcium carbonate obtained from oyster and mussel shells and incorporation in polypropylene, *Mater. Res.*, **15**(2), 204-208.
- Helfferich, F., 1962, Ion Exchange, McGraw-Hill, New York.

- Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C., and Balasubramaniam, A.S., 2014, Consolidation of estuarine marine clays for coastal reclamation using vacuum and surcharge loading, *From Soil Behavior Fundamentals to Innovations in Geotechnical Engineering: Honoring Roy E. Olson*, 358-369.
- Jung, S.J., Lee, S.I., and Lim, H.M., 2003, Effect of the concentration of suspension and electrolyte on zeta potential, *J. Korean Ceramic Soc.*, **40**(3), 293-300.
- Kharel, T.P., Clay, D.E., Reese, C., DeSutter, T., Malo, D., and Clay, S., 2018, Do precision chemical amendment applications impact sodium movement in dryland semiarid saline sodic soils?, *Agronomy J.*, **110**(3), 1103-1110.
- Kim, H.C., Woo, H.E., Jeong, I., Oh, S.J., Lee, S.H., and Kim, K., 2019, Changes in sediment properties caused by a covering of oyster shells pyrolyzed at a low temperature, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, **25**(1), 74-80.
- Kim, J.G., Oh, M., Lee, M., and Lee, J.Y., 2017, A feasibility study on soil-cement improved using oyster shell and microorganisms, *J. Korea Soc. Waste Manag.*, **34**(5), 442-448.
- Kim, K. and Kim, K., 2020, Remediation of contaminated intertidal sediment by increasing permeability using active capping material, *J. Environ. Manag.*, **253**, 109769.
- Kim, M.J., Wang, X., Lee, J.J., Lee, S.H., Kim, S.B., and Kim, C.J., 2013, Development of flowable backfill material using waste oyster shell, coal ash, and surplus soil, *Clean Tech.*, **19**(4), 423-429.
- Kim T.H., Lee, C.H., Lee, J.H., Oh, D.H., and Kim, G.B., 2016, Estimation of groundwater yield at a horizontal well using soil characteristics at riverbank filtration site, *J. Geol. Soc. Korea*, **52**(3), 291-301.
- Lee, S., Yoon, G., Lee, Y., Lee, K., Kang, I., Kim, H., and Baek, S., 2007, Shear strength characteristics of dredged soil with oyster shell binder, *J. Korean Geo-Environ. Soc.*, **8**(1), 27-32.
- Mahanta, K.K., Mishra, G.C., and Kansal, M.L., 2014, Estimation of the electric double layer thickness in the presence of two types of ions in soil water, *Appl. Clay Sci.*, **87**, 212-218.
- Marchuk, A. and Rengasamy, P., 2011, Clay behaviour in suspension is related to the ionicity of clay-cation bonds, *Appl. Clay Sci.*, **53**(4), 754-759.
- Moon, D.H., Wazne, M., Cheong, K.H., Chang, Y.Y., Baek, K., Ok, Y.S., and Park, J.H., 2015, Stabilization of As-, Pb-, and Cu-contaminated soil using calcined oyster shells and steel slag, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **22**(14), 11162-11169.
- Mun, M.H. and Kang, I.S., 2010, The effect of particle size on the detergency of particulate soil, *J. Korean Soc. Cloth. Text.*, **34**(4), 653-662.
- Pourabadehei, M., and Mulligan, C.N., 2016, Resuspension of sediment, a new approach for remediation of contaminated sediment, *Environ. Pollut.*, **213**, 63-75.
- Rahman, Z.A., Yaacob, W.Z.W., Rahim, S.A., Lihan, T., Idris, W.M.R., and Mohd Sani, W.N.F., 2013, Geotechnical characterisation of marine clay as potential liner material, *Sains Malays.*, **42**(8), 1081-1089.
- Rengasamy, P., Tavakkoli, E., and McDonald, G.K., 2016, Exchangeable cations and clay dispersion: net dispersive charge, a new concept for dispersive soil, *Eur. J. Soil Sci.*, **67**(5), 659-665.
- Seo, J.H., Kim, M.H., Park, J.H., and Kyoun, D.Y., 2003, A study of effects of dredged soil improvement and heavy iron removal by using oyster shells, *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, 3590-3594.
- Sumner, M.E., 2000, *Handbook of Soil Science*, CRC Press, Boca Raton London New York Washington, D.C.
- Woo, H.E., Kim, K., Lee, I.C., and Kim, K., 2018, A study on phosphate removal efficiency by pre-treatment conditioning of oyster shells, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, **24**(2), 196-202.
- Wu, Q., Chen, J., Clark, M., and Yu, Y., 2014, Adsorption of copper to different biogenic oyster shell structures, *Appl. Surf. Sci.*, **311**, 264-272.
- Yao, J., Han, H., Hou, Y., Gong, E., and Yin, W., 2016, A method of calculating the interaction energy between particles in minerals flotation, *Math. Probl. Eng.*, **2016**, 1-13.
- Yoon, G.L., Kwon, O.S., Im, Y.J., and Yang, E.I., 2001, Engineering Characteristics of waste oyster shell for recycling, *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, **21**, 421-431.
- Yu, Y., Wu, R., and Clark, M., 2010, Phosphate removal by hydrothermally modified fumed silica and pulverized oyster shell, *J. Colloid and Interface Sci.*, **350**(2), 538-543.