

굴 껍데기 피복에 따른 조간대 점토질 퇴적물의 투수성 변화에 관한 연구

우희은¹ · 김종오^{2,3} · 김경희^{4,†}

¹국립부경대학교 램프사업단 박사후연구원

²국립부경대학교 램프사업단 교수

³국립부경대학교 미생물학과 교수

⁴국립부경대학교 해양공학과 교수

Modification of Sediment Permeability with Oyster Shells Capping for Improving Intertidal Groundwater Flow

Hee-Eun Woo¹, Jong-Oh Kim^{2,3}, and Kyunghoi Kim^{4,†}

¹Post-Doctoral Researcher, Institute of Sustainable Earth and Environmental Dynamics (SEED), Pukyong National University, Busan 48547, Korea

²Professor, Institute of Sustainable Earth and Environmental Dynamics (SEED), Pukyong National University, Busan 48547, Korea

³Professor, Department of Microbiology, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

⁴Professor, Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

요 약

본 연구에서는 굴 껍데기가 점토질 연안 퇴적물의 투수도 향상에 미치는 영향을 조사하기 위해 굴 껍데기(OS)와 모래(SAND)로 피복한 점토질 퇴적물의 변수위 투수시험을 수행하였다. 변수위 투수시험 후 점토질 퇴적물의 최종 투수계수는 SAND와 OS에서 각각 4.2×10^{-7} cm/sec, 11.0×10^{-7} cm/sec로 나타났다. 상대적으로 높은 OS의 투수도는 굴 껍데기에서 용출된 칼슘 이온에 의해 점토 입자의 응집력이 높아진 데 기인한 것으로 판단된다. 실험 후 퇴적물 간극수의 용존무기인(DIP) 농도는 SAND에서 1.10 mg/L인 반면, OS에서는 0.86 mg/L로 감소하였다. 이는 변수위 투수시험 중 OS에서의 투수성 증가에 따른 DIP 유출량 증가와 굴 껍데기에 의한 DIP 흡착량 증가에 의한 것으로 나타났다. 이상의 결과로부터 굴 껍데기 피복은 오염된 조간대 점토질 퇴적물의 환경개선에 적합한 방법임을 확인하였다.

Abstract – In this study, we investigated the effect of oyster shells on enhancing the permeability coefficient of clayey coastal sediment through a variable permeability test. The clayey sediments capped with oyster shells (OS) and sand (SAND) were prepared for the permeability test. The permeability coefficient of the clayey sediment was determined to be 4.2×10^{-7} cm/sec in the SAND and increased to 11.0×10^{-7} cm/sec in the OS. The increase of permeability in OS is due to the increase of calcium ions supplied by the oyster shells, which causes flocculation of the clay particles. After the permeability test, the concentration of dissolved inorganic phosphorous(DIP) in the SAND was 1.10 mg/L, whereas it was 0.86 mg/L in the OS. This reduction in the OS is attributed to both the outflow of DIP and the adsorption of DIP onto the oyster shell. These findings suggest oyster shells can be used as a sustainable solution to address physicochemical challenges in intertidal habitats.

Keywords: Clayey sediment(점토질 퇴적물), Permeability(투수도), Oyster shell(굴 껍데기), Calcium Ion(칼슘 이온)

[†]Corresponding author: hoikim@pknu.ac.kr

1. 서론

조간대는 조석의 영향으로 인한 지표수와 지하수의 상호작용으로 주기적인 수질 변화가 발생하는 공간이다. 지하수 흐름은 해안 지역에 미량 원소와 산소를 공급하며 조간대 및 해안 공간의 생태학적, 퇴적학적 과정에 영향을 준다(Miller and Ullman[2004]). 점토질 퇴적물은 사질 퇴적물에 비해 공극률은 크지만 공극의 크기가 미세하여 투수성이 낮다는 특징이 있다. 낮은 투수성은 지하수 흐름을 방해하고, 따라서 지하수의 흐름이 약한 점토질 조간대에서는 오염물질의 축적, 환원 환경 조성 등의 환경오염이 발생한다. 이에 오염된 점토질 조간대의 환경개선 방안으로 퇴적물의 투수도를 높여 지하수 흐름을 활성화하는 방법이 제안되고 있다(Kim and Kim[2020]).

점토질 퇴적물의 투수도는 퇴적물 내 용액의 전해질 농도와 관련이 있다. 전해질 농도의 변화는 점토 입자의 콜로이드 상태를 변화시켜 투수성에 영향을 준다(Hardcastle and Mitchell[1974]). Na⁺ 및 K⁺과 같은 1가 양이온은 점토 입자의 팽윤 및 분산을 유도하여 공극을 막고 투수성을 감소시킨다. 반면, 2가 양이온(Ca²⁺ 및 Mg²⁺)은 점토 입자 간의 응집을 촉진하여 투수성을 향상시킬 수 있다. 또한 2가 양이온은 점토 표면에 흡착된 Na⁺과 치환되어 퇴적물의 투수성을 높일 수 있다(Behnsen and Faulkner[2013]). 실제 식물의 생장을 저해하는 염류토양을 개량하기 위해 2가 양이온이 함유된 전해질을 토양에 적용하여 투수도를 높이고 있다(Hillel[2005]).

우리나라 굴 생산량은 2020년 기준 30만 톤 이상으로, 중국에 이어 세계 2위를 차지하고 있다(Kim and Lee[2022]). 그러나 굴 양식산업의 급속한 성장은 굴 껍데기 처리 문제로 이어져, 전체 굴 껍데기 발생량의 약 85% 정도는 재활용되고 있으나 나머지 15%(45,000톤)는 해안가에 방치되고 있다(Baek and Lee[2013]). 방치된 굴 껍데기의 처리는 오랫동안 지역 현안 문제로 남아있으며, 굴 껍데기의 새로운 재활용처 확보에 대한 요구가 커지고 있다. 대부분 탄산칼슘으로 구성된 굴 껍데기는 Ca²⁺의 공급체로 이용될 수 있으며 이러한 특성은 점토질 퇴적물의 투수도를 높이기 위해 사용될 수 있다.

굴 껍데기를 토양에 적용하여 투수도를 높인 사례가 있었으나 이는 주로 농업용 토양, 슬러지, 간척지에 제한적으로 적용되었다(Lee and Han[2001]; Kim[2019]; Khirul *et al.*[2020]). 또한, 연안 오염 퇴적물의 환경복원을 위해 굴 껍데기를 적용한 연구도 주로 화학적 및 생물학적 환경 개선 효과에 중점을 두었다(Patil *et al.*[2022a]; Woo *et al.*[2023]). 특히 굴 껍데기를 칼슘 공급체로 활용하여 점토질 조간대의 투수도를 향상시키기 위한 연구는 전무한 실정이다.

이에 본 연구에서는 굴 껍데기를 활용하여 점토질 조간대의 투수도를 높여 조간대 지하수 흐름을 개선하고 오염된 점토질 조간대의 환경개선 효과를 검토하는데 목적을 두고 있다.

Table 1. Component of oyster shell (Woo *et al.*[2018])

Component percentage (%)			
Ca	96.25	Sr	0.21
Na	1.08	Fe	0.13
Mg	0.61	Al	0.12
Cl	0.58	P	0.12
S	0.47	K	0.06
Si	0.37		

Table 2. The initial value of sediment

Content	Value	SD**
pH	7.69	0.009
ORP*	-369.80 mV	12.920
NH ₄ -N	24.15 mg/L	0.053
NO ₂ -N	0.02 mg/L	0.001
NO ₃ -N	0.06 mg/L	0
PO ₄ -P	1.16 mg/L	0
Water content	117.4%	0.381
Loss on ignition	11.15%	0.063

*ORP: Oxidation Reduction Potential

**SD: Standard deviation

2. 재료 및 방법

2.1 굴 껍데기

투수시험에 사용된 굴 껍데기는 경상남도 거제시에 위치한 굴 박신장에서 채취하였다. 굴 껍데기의 구성성분은 Ca이 96% 이상으로 나타났으며, 이외에도 Na, Mg, Cl 등의 성분을 포함하고 있다(Table 1). 채취한 굴 껍데기는 세척 후 직경 4 mm 이내로 분쇄하고 잔류 유기물을 제거하기 위해 600℃에서 6시간 동안 열처리하여 실험에 사용하였다.

2.2 퇴적물 시료

본 실험에 사용된 퇴적물은 울산 장생포항에서 채취하였다. 해당 해역은 산업단지 및 도시의 폐수 배출로 인한 부영양화 등의 환경문제가 발생하는 것으로 알려져 있다(Lee *et al.*[1999]). 퇴적물은 실트 및 점토의 함량이 75% 이상이며(Hwang *et al.*[2014]), 주변 점토광물은 카올리나이트(Kaolinite), 일라이트(Illite), 녹니석(Chlorite)으로 구성되어 있다(Kim *et al.*[1998]). 퇴적물의 초기 상태는 Table 2에 나타내었으며, 높은 수준의 오염도와 함께 강한 환원 상태인 것을 확인하였다.

2.3 변수위 투수시험

변수위 투수시험 장치의 모식도는 Fig. 1에 나타내었다. 변수위 투수시험은 시간에 따라 점토 시료의 상부에서부터 물이 침투하면서 발생하는 수위 변화를 측정하여 투수계수를 결정

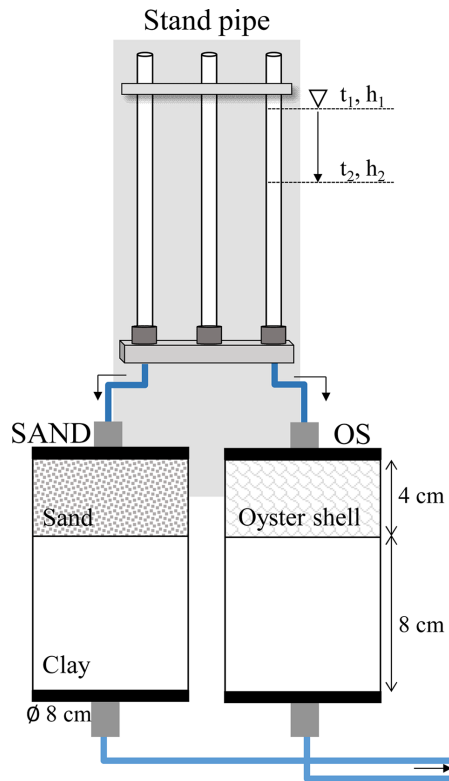


Fig. 1. A schematic diagram of the permeability test.

한다. 투수시험을 수행하기 위해 칼럼($\text{Ø} 8 \times h 12 \text{ cm}$)에 8 cm 높이까지 침전물을 채운 뒤 시료를 안정화시키기 위하여 하루 동안 정치시켰다. 이후 퇴적물 표층에 굴 껍데기(OS)와 모래(SAND)를 4 cm 두께로 피복하여 시료를 제작하였다. 모래 피복은 퇴적물 내의 오염물질이 수층으로 용출되는 것을 물리적으로 차단하는 고전적 방법이며, 굴 껍데기는 물리적 차단과 화학적 반응을 모두 고려한 반응성 피복재로 분류된다(Park and Kim[2020]). 스탠드파이프를 통해 제작한 시료의 상부에서부터 탈이온수가 투입되고, 시간에 따른 스탠드파이프의 수위 변화를 측정하여 투수계수를 결정하였다. 투수계수(k)는 Darcy의 법칙에 의해 식 (1)과 같이 계산되었다.

$$k = 2.303 \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \quad (1)$$

여기서 k = 투수계수 (Permeability coefficient)

a = 스탠드파이프의 단면적 (Area of the standpipe)

L = 시료의 길이 (Height of the soil specimen)

A = 시료의 면적 (Area of the soil specimen)

h_1, h_2 = 스탠드파이프 수위 (Height of the standpipe)

t_1, t_2 = 스탠드파이프의 수위 변화에 따른 시간 (Time at h_1 and h_2)

2.4 시료 분석

변수위 투수시험 종료 후 pH/ion 측정기(LAQUA F-73,

HORIBA, Japan)를 이용하여 pH와 산화환원전위(ORP; Oxygen-Reduction Potential)를 측정하였다. 이후 퇴적물을 채취하고 원심분리(3,700 rpm, 20 min)하여 간극수를 추출하였다. 간극수 내용존무기질소(DIN; $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$)와 용존무기인(DIP; $\text{PO}_4\text{-P}$)은 자동분석기(SWATT, BLTEC, Korea)를 이용하여 표준방법(APHA [2012])으로 측정하였다. 간극수의 전기전도도(EC)는 AAQ-RINKO (JFE-ADVANTECH, Japan)를 사용하여 측정하였으며, ICP/OES 분석(Optima 7300DV, PERKIN ELMER)으로 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 농도를 측정하였다. 측정된 SAND와 OS 데이터의 평균 차이를 비교하기 위해 95% 신뢰수준에서 t 검정을 수행하였다.

측정한 양이온 농도를 바탕으로 식 (2-4)에 따라 나트륨 흡착비(SAR, Sodium Adsorption Ratio)와 교환성 나트륨 퍼센트(ESP, Exchangeable Sodium Percentage)를 계산하였다.

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]}} \quad (2)$$

여기서 $[Na^+]$, $[Ca^{2+}]$, $[Mg^{2+}]$ = 양이온 농도(Cation concentration)

일반적으로 ESP는 식 (3)과 같이 교환성 양이온(Ex)의 농도(cmol_c/kg)를 사용하여 나타내지만, 이온 교환반응이 용액과 점토의 교환 가능한 상(phase) 사이에서 발생한다는 개념을 바탕으로 SAR로부터 추정할 수 있다. 본 논문에서는 미국 농부부의 Salinity Lab에서 도출한 ESP와 SAR의 관계식(식 (4))을 사용하여 ESP를 계산하였다(Richards[1954]).

$$ESP = \frac{ExNa}{ExNa + ExCa + ExMg + ExK} \times 100 \quad (3)$$

$$ESP = \frac{0.0126 + 0.01475 \times SAR}{1 + (-0.0126 + 0.01475 \times SAR)} \times 100 \quad (4)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 퇴적물의 투수도 변화

굴 껍데기와 모래를 피복한 퇴적물의 투수계수 변화는 Fig. 2에 나타내었다. 실험 세팅 시 발행한 퇴적물의 교란 및 퇴적물의 압밀로 인해 초기 투수계수는 변동이 컸으나(4.0×10^{-6} - $1.8 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$), 해양 점토질 퇴적물의 투수계수 범위 내로 나타났다(Bennett *et al.*[1989]). 투수계수가 안정화된 50시간 이후 투수계수는 OS에서 빠르게 증가했으며, 300시간 후 SAND와 OS의 투수계수는 각각 $4.2 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ 와 $11.0 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ 로 OS의 투수계수가 SAND보다 2배 이상 유의미하게 높게 나타났다($p < 0.05$).

굴 껍데기의 Ca^{2+} 공급은 OS의 투수성 증가에 중요한 요인으로 작용할 수 있다. 점토질 퇴적물 입자의 표면은 음전하를 띠고 있어 주위 양이온을 끌어당겨 전기 이중층을 형성한다. 특

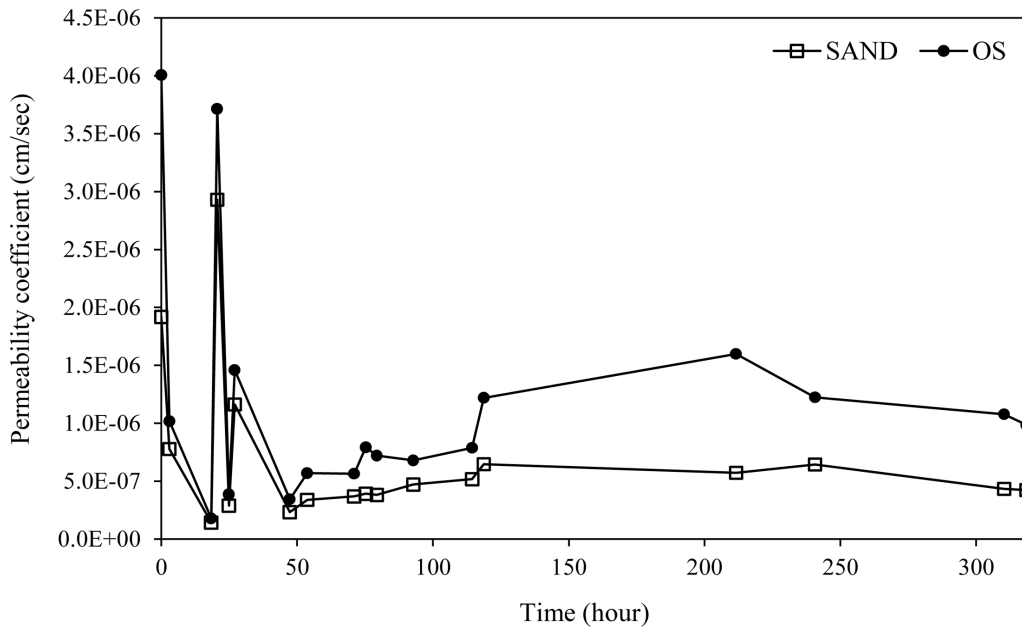


Fig. 2. Permeability coefficient of clayey sediment capped with OS and SAND.

히, Ca^{2+} 은 점토질 퇴적물 입자 사이의 정전기적 인력과 결합으로 확산 이중층을 압축하여 퇴적물 입자가 응집된 상태를 유지한다(Kim and Kim[2020]). $600^{\circ}C$ 에서 소성한 굴 껍데기는 열분해 과정을 통해 탄산칼슘($CaCO_3$) 일부가 산화칼슘(CaO)으로 분해되고(Woo *et al.*[2018]), CaO 는 가수분해되어 Ca^{2+} 을 공급한다(식 (5-6)). 굴 껍데기로부터 공급된 Ca^{2+} 은 점토질 퇴적물 입자를 응집시켜 OS의 투수도를 향상시킨다(Xu *et al.*[2018]).



투수시험 종료 후 간극수의 양이온 농도 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 점토질 퇴적물의 구조에 미치는 영향은 Na^+ 과 Ca^{2+} 이 지배적이며, 상대적으로 K^+ 과 Mg^{2+} 의 영향은 낮다(Levy *et al.*[1988]; Marchuk and Marchuk[2018]). SAND와 OS의 간극수 Na^+ 농도는 각각 199.4 mmol/L 및 126.7 mmol/L , Ca^{2+} 농도는 각각 2.7 mmol/L 와 1.1 mmol/L 로 나타났다. 토양 입자에 대한 양이온의 선택성은 토양의 종류와 특성에 따라 달라질 수 있으나 일반적으로 Ca^{2+} 의 선택성이 Na^+ 보다 높아 간극수 내 Ca^{2+} 농도가 증가하면 Na^+ 용탈을 유도한다(Sparks *et al.*[2024]). 그 결과 Na^+ 은 자유이온의 형태로 남게 되어 간극수 내 Na^+ 농도는 증가하는 반면, Ca^{2+} 농도는 감소하게 된다. 또한 OS에서 낮은 양이온 농도는 투수성 증가에 따른 유입 및 유출수의 증가로 인한 양이온의 희석 및 배출에 의한 영향으로 판단된다.

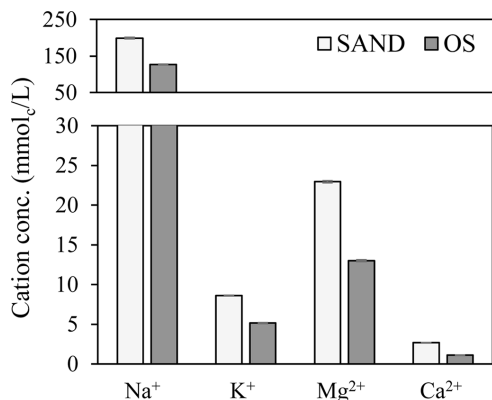


Fig. 3. Cation concentrations of SAND and OS after completion of the permeability test.

Table 3. The EC, SAR, and ESP in SAND and OS

	Sand	OS
EC	17.19 dS/m	11.75 dS/m
SAR ^{0.5}	39.4 mmol/L	33.7 mmol/L
ESP	37.3%	33.8%

EC, SAR, ESP는 퇴적물의 염분 및 알칼리 수준을 반영하는 중요한 화학적 지표이다. 점토질 퇴적물 입자는 일반적으로 EC가 낮고 Na^+ 농도가 높은 퇴적물에서 분산된다(Sparks *et al.*[2024]). SAND와 OS의 EC는 각각 17.19 dS/m 과 11.75 dS/m 로 (Table 3), OS에서 낮은 EC는 투수성 개선에 따른 이온강도의 감소에 의한 영향으로 판단된다. 초기 OS 시료 내 Ca^{2+} 의 용출에 의해 간극수의 이온강도가 증가하였으나, 이후 투수성이 증가함에 따라 유입 및 유출수의 양이 증가하면서 간극수의 양이온 농도 및 EC가 감소한 것으로 보인다. SAND와 OS의 SAR^{0.5}은 각각 39.4 mmol/L 와 33.7 mmol/L 로 계산되었는데, SAR

은 높을수록 교환성 나트륨의 흡착이 증가하여 점토질 퇴적물 입자는 높은 분산특성이 나타난다(Ward III and Carter[2004]; Amer[2021]). 상대적으로 낮은 OS의 SAR은 굴 껍데기에 의한 Na⁺의 용탈에 기인한 것이며, 교환성 나트륨의 비율인 ESP 역시 굴 껍데기에 의한 Ca²⁺의 공급 및 점토에 흡착된 Na⁺의 용탈을 나타낸다. Sparks *et al.*[2024]는 ESP가 30%보다 높은 토양을 불투수성이라 정의하고 있는데, OS의 ESP는 33.7%로 높은 불투수성을 유지하고 있으나, SAND(39.4%)에 비해 투수성이 개선되었음을 보여주었다. Lee *et al.*[2015]는 Ca를 함유한 석고로 토양 개량제로 사용한 결과 토양의 SAR과 ESP가 감소되었다고 보고하였다.

3.2 퇴적물 성상의 변화

점토 퇴적물 시료의 초기 pH는 7.69였으며 실험 후 OS와 SAND의 pH는 각각 8.00과 7.65로(Fig. 4a), OS의 pH는 초기값에 비해 유의하게 증가한 반면, SAND는 소폭 감소하였다. 유사한 조건의 굴 껍데기를 이용한 mesocosm 실험에서도 퇴적물의 pH

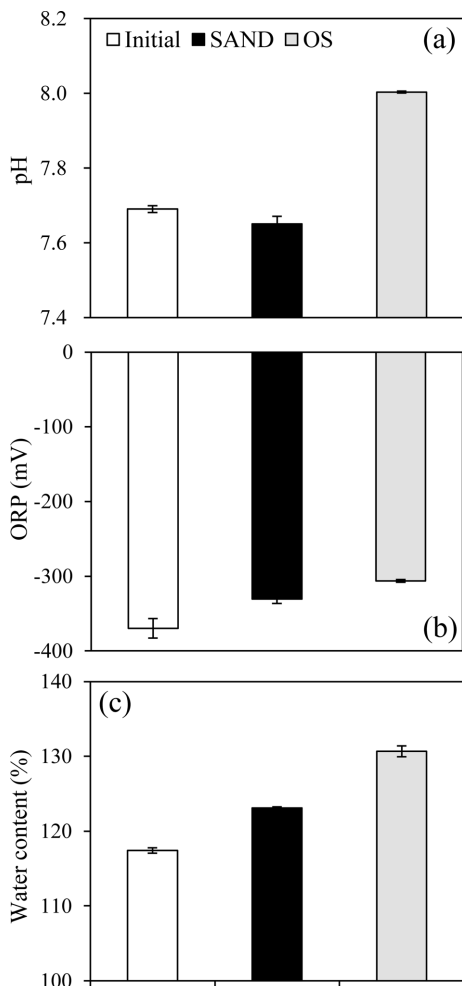


Fig. 4. The variation of (a)pH, (b)ORP, and (c)water content in sediment.

가 7.1에서 7.9로 증가한 것으로 보고되었다(Patil *et al.*[2022b]). 이는 OS에 포함된 CaO가 가수분해를 통해 OH⁻를 생성하였기 때문이다(식 (6)). 굴 껍데기 사용으로 인한 pH 증가는 퇴적물 내 점토 입자 표면의 음전하 용량 증가로 이어질 수 있다. 이는 결과적으로 퇴적물의 정전기 작용을 강화하고 점토질 퇴적물 입자 표면의 양이온에 대한 절대 흡착 용량을 증가시킬 수 있다(Wang *et al.*[2022]). 또한 pH가 증가함에 따라 함께 증가하는 pH 의존성 전하는 1가 이온에 비해 2가 이온에 대한 높은 선택성을 갖는다(Sommerfeldt[1984]). 결과적으로, 굴 껍데기에 의한 pH 증가는 점토 입자 내 Ca²⁺의 공급뿐만 아니라 Na⁺과 Ca²⁺ 이온 교환을 촉진하여 투수도 증가에 기여한다.

초기, OS 및 SAND의 ORP는 각각 -369.80 mV, -306.47 mV 및 -330.65 mV로 측정되었다(Fig. 4b). SAND 대비 OS의 높은 ORP는 다공성 굴 껍데기에 포함된 산소가 퇴적물에 공급되었기 때문일 수 있다. 또한 투수도의 증가에 의해 유입수에서 퇴적물로의 용존산소 이동이 원활해지면서 ORP를 증가시킨 것으로 판단된다. 투수시험 후 OS와 SAND의 함수비 모두 초기(117.4%) 대비 증가하였으며, OS의 함수비는 130.7%로 SAND(123.1%)에 비해 높은 증가율을 보였으며(Fig. 3c), 이는 퇴적물 공급 증가로 인해 보수력이 높아졌기 때문으로 판단된다.

Fig. 5에 의하면 초기, SAND 및 OS의 DIP 농도는 각각 1.16 mg/L, 1.10 mg/L 및 0.86 mg/L로 SAND 대비 OS에서 DIP 농도의 유의미한 감소를 확인하였다(*p*<0.05). 굴 껍데기로부터 공

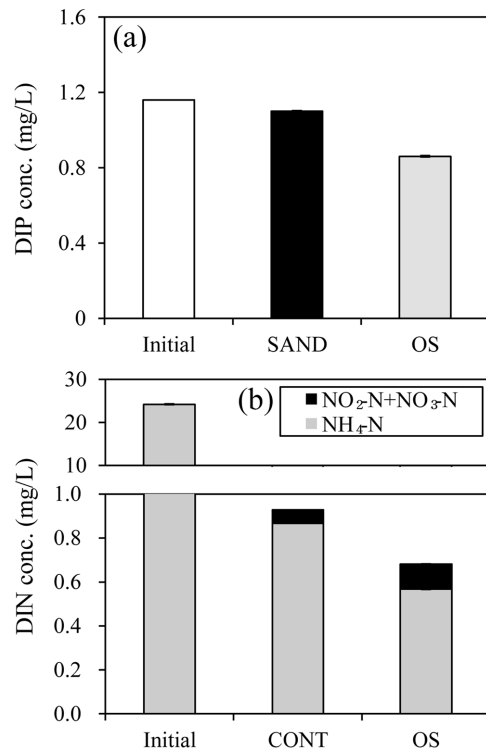


Fig. 5. Concentrations of (a)dissolved inorganic phosphorous and (b) dissolved inorganic nitrogen in pore water.

급된 Ca^{2+} 은 간극수 내의 DIP와 반응하여 인산칼슘을 흡착 및 침전시켜 DIP를 고정한다(Chen *et al.*[2012]; Patil *et al.*[2022b]). 또한 투수도의 향상으로 인한 증류수의 유입량 증가 또한 영양염 농도의 희석에 기여한다. 투수시험 후 SAND와 OS의 $\text{NH}_4\text{-N}$ 농도는 각각 0.87 mg/L, 0.57 mg/L로 급격하게 감소하였으며, $\text{NH}_4\text{-N}$ 농도와 대조적으로 DIN의 $\text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$ 농도 비는 SAND(6.6%)보다 OS(16.7%)에서 더 높았다. OS의 투수도 향상으로 인한 산소 공급량의 증가는 SAND과 비교하여 질산화균을 활성화하고 질산화를 촉진할 수 있다. 또한 높은 염도는 질산화 미생물의 성장을 억제할 수 있어, 상대적으로 낮은 OS의 염도가 질산화 과정에도 영향을 줄 수 있다(Dincera and Kargi[2001]).

본 연구 결과를 통해 굴 껍데기에 의한 투수성 증가는 산화 환원전위의 증가, 영양염 농도의 감소 효과가 있는 것으로 확인되었다. 이는 오염된 조간대의 저서환경을 개선하고 저서생물들의 서식지에 적합한 환경을 제공할 수 있다. 기존 연구에 따르면, 600°C에서 소성한 굴 껍데기는 저서생태계에서 생물량을 증가시켰으며, 지반강도의 변화도 크지 않아 저서생태계 교란을 야기할 우려도 적다고 판단된다(Woo *et al.*[2021]; Woo *et al.*[2023]). 다만 장기적인 생태학적 영향과 적용범위의 확장 가능성을 평가하기 위해 추가 연구와 모니터링이 필요할 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 굴 껍데기를 이용한 점토질 퇴적물의 투수도 개선 가능성을 확인하였다. 굴 껍데기의 Ca^{2+} 공급은 점토질 퇴적물 입자를 응집시키고, 입자를 분산시키는 Na^+ 을 치환하여 지하수 흐름을 향상시켜 물리적 특성을 개선할 수 있음을 보여주었다. 또한, 굴 껍데기의 적용은 투수도의 증가와 함께 퇴적물의 pH, 산화환원전위, 영양염 농도를 변화시켜 화학적인 측면에서도 영향을 미쳤다. 이러한 결과는 굴 껍데기를 이용한 저투수성 지역에서의 환경 개선 가능성을 제시하며, 지속 가능한 관리 및 개선 전략을 모색하는 데 기여할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2024년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 램프(LAMP) 사업(No. S-2023-000301702)과 기초연구사업(No. 2021R111A3060374)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

[1] Amer, R., 2021, Spatial Relationship between Irrigation Water Salinity, Waterlogging, and Cropland Degradation in the Arid

and Semi-Arid Environments, *Remote Sensing*, 13(6), 1047.

[2] APHA, 2012, Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water, 22nd Ed., American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.

[3] 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.

[4] Behnsen, J. and Faulkner, D.R., 2013, Permeability and Frictional Strength of Cation-Exchanged Montmorillonite, *J. Geophysical Res.: Solid Earth*, 118(6), 2788-2798.

[5] Bennett, R.H., Fischer, K.M., Lavoie, D.L., Bryant, W.R. and Rezak, R., 1989, Porometry and Fabric of Marine Clay and Carbonate Sediments: Determinants of Permeability, *Marine Geology*, 89(1-2), 127-152.

[6] Chen, W.-T., Lin, C.-W., Shih, P.-K. and Chang, W.-L., 2012, Adsorption of Phosphate into Waste Oyster Shell: Thermodynamic Parameters and Reaction Kinetics, *Desalination and water treatment*, 47(1-3), 86-95.

[7] Dincer, A.R. and Kargi, F., 2001, Salt Inhibition Kinetics in Nitrification of Synthetic Saline Wastewater, *Enzyme Microb. Tech.*, 28(7-8), 661-665.

[8] Hardcastle, J. H. and Mitchell, J. K., 1974, Electrolyte Concentration-Permeability Relationships in Sodium Illite-Silt Mixtures, *Clays and Clay Minerals*, 22, 143-154.

[9] Hillel, D., 2005, Salinity Management, In: Hillel, D., (Ed.), *Encyclopedia of Soils in the Environment*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 435-442.

[10] Hwang, D.W., Lee, I.S., Choi, M.K. and Choi, H.G., 2014, Distribution and Pollution Assessment of Organic Matter and Trace Metals in Surface Sediment around Ulsan Harbor, *J. Korean Soc. Environ. Anal.*, 17(3), 146-160.

[11] Khirul, M.A., Kim, B.-G., Cho, D., Yoo, G. and Kwon, S.-H., 2020, Effect of oyster shell powder on nitrogen releases from contaminated marine sediment, *Environ. Eng. Res.*, 25(2), 230-237.

[12] Kim, D.Y. and Lee, G.Y., 2022, Direction of Restructuring in Response to Structural Changes in the Korean Oyster Farming, *J. Korean Soc. Fish. Mar. Edu.*, 34(3), 404-414.

[13] Kim, K. and Kim, K., 2020, Remediation of Contaminated Intertidal Sediment by Increasing Permeability Using Active Capping Material, *J. Environ. Manage.*, 253, 109769.

[14] Kim, S.-K., Lim, H.-D. and Moon, S.-K., 1998, Clay minerals and their distribution in the soft ground deposited along the coastline, *J. Korean Geotechnical Soc.*, 14(6), 73-80.

[15] Kim, T.J., 2019, Use of Bottom Ash and Oyster Shell to Improve Permeability for Reclaimed land, M.S. thesis, Dept. Landscape Architecture and Rural Systems Engineering, Seoul Univ., Seoul, Korea.

[16] Lee, J.-E., Seo, D.-H. and Yun, S.-I., 2015, Salt Removal in a Reclaimed Tidal Land Soil with Gypsum, Compost, and Phosphate Amendment. *Korean J. Soil. Sci. Fert.*, 48(5), 326-331.

- [17] Lee, K.H. and Han, J.O., 2001, Consolidation and Permeability Characteristic of Sludge Mixed with Oyster Shells, *J. Civ. Eng.*, 21(4), 375-384.
- [18] Lee, K.S., Ko, D.K., Heo, S., Lee, Y.G., Choi, C.I. and Choi, Y.G., 1999, Distribution of Nutritive Salts and Organic Matters in the Coastal Area of East Sea. *Korean J. Environ. Biol.*, 17(1), 51-58.
- [19] Levy, G.J., Van der Watt, H.V.H. and Du Plessis, H.M., 1988, Effect of sodium-magnesium and sodium-calcium systems on soil hydraulic conductivity and infiltration, *Soil Sci.*, 146(5), 303-310.
- [20] Marchuk, S. and Marchuk, A., 2018, Effect of Applied Potassium Concentration on Clay Dispersion, Hydraulic Conductivity, Pore Structure and Mineralogy of Two Contrasting Australian Soils, *Soil and Tillage Res.*, 182, 35-44.
- [21] Miller, D.C. and Ullman, W.J., 2004, Ecological Consequences of Ground Water Discharge to Delaware Bay, United States, *Groundwater*, 42(7), 959-970.
- [22] Park, H. and Kim, Y.-K., 2020. Effect of Temperature on Degradation of Organics and Nutrients by Biological Activated Carbon Immobilized with *Pseudomonas putida*, *Korean J. Soc. Biotechnol. and Bioeng.*, 35(1), 84-88.
- [23] Patil, M.P., Woo, H.-E., Kim, J.-O. and Kim, K., 2022a, Field Study on Short-Term Changes in Benthic Environment and Benthic Microbial Communities Using Pyrolyzed Oyster Shells, *Sci. Total Environ.*, 824, 153891.
- [24] Patil, M.P., Woo, H.E., Lee, I.C., Nakashita, S., Kim, K., Kim, J.O. and Kim, K., 2022b, A Microcosm Study of Microbial Community Profiles during Sediment Remediation Using Pyrolyzed Oyster Shells, *J. Environ. Manage.*, 316, 115229.
- [25] Richards, L.(ed.), 1954, Diagnosis and Improvement of Saline and Sodic Soils, USDA Agriculture Handbook No. 60, United States Departments of Agriculture, Washington.
- [26] Sommerfeldt, T.G., 1984, Soil and Solution pH and Sodium: Calcium Ratio: Effects on Cation Exchange Properties of a Sodium-Saturated Chernozemic Soil, *Canadian J. Soil Sci.*, 64(1), 139-146.
- [27] Sparks, D.L., Singh, B. and Siebecker, M.G., 2024, The Chemistry of Saline and Sodic Soils, In: D. L. Sparks, B. Singh, & M. G. Siebecker (Eds.), *Environmental Soil Chemistry*(Third Edition), Academic Press, 411-438.
- [28] Wang, F., Bao, K., Huang, C., Zhao, X., Han, W. and Yin, Z., 2022, Adsorption and pH Values Determine the Distribution of Cadmium in Terrestrial and Marine Soils in the Nansha Area, Pearl River Delta, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 19(2), 793.
- [29] Ward III, P. A. and Carter, B.J., 2004, Dispersion of Saline and Non-Saline Natric Mollisols and Alfisols, *Soil sci.*, 169(8), 554-566.
- [30] Woo, H.-E., Jeong, I., Kim, J.-O., Kim, Y.-R., Lee, I.-C. and Kim, K., 2023, Field Experiments on Chemical and Biological changes of Thin-Layer Oyster Shells Capping Sediments in Dense Aquaculture Area. *Environ. res.*, 237, 116893.
- [31] Woo, H.-E., Jeong, I., Lee, I.-C. and Kim, K., 2021, 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, *J. Soil Groundwater. Environ.*, 26(1), 17-23.
- [32] 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.
- [33] Xu, S., Bian, M., Li, C., Wu, X. and Wang, Z., 2018, Effects of Calcium Concentration and Differential Settlement on Permeability Characteristics of Bentonite-Sand Mixtures, *Applied Clay Sci.*, 153, 16-22.

Received 2 April 2024

Revised 30 April 2024

Accepted 3 May 2024