

폴리프로필렌 미세플라스틱이 점토질 연안 퇴적물의 유변학적 특성에 미치는 영향

권유진¹ · Valianto Rojulun Afif¹ · 서예지² · 김경희^{3,†}

¹국립부경대학교 해양공학과 대학원생

²국립부경대학교 해양공학과 학부생

³국립부경대학교 해양공학과 교수

The Effect of Polypropylene Microplastics on the Rheological Properties of the Cohesive Coastal Sediments

Yujin Gwon¹, Valianto Rojulun Afif¹, Yeji Seo², and Kyunghoi Kim^{3,†}

¹Graduate Student, Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

²Under Graduate Student, Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

³Professor, Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

요 약

미세플라스틱이 전 세계 해양 생태계에 광범위하게 확산되면서, 이로 인한 심각한 환경 문제가 대두되고 있다. 미세플라스틱은 해양 내에서 여러 경로를 거쳐 최종적으로 해양 퇴적물에 축적되며, 퇴적물의 성상을 변화시키는 것으로 알려져 있으나, 미세플라스틱이 연안 점토질 퇴적물의 성상 변화에 미치는 영향에 관한 연구는 제한적이다. 본 연구는 폴리프로필렌(PP) 미세플라스틱을 혼합한 실험군(MP)과 혼합하지 않은 대조군(CON)을 대상으로, 연안 점토질 퇴적물의 압밀에 따른 점도 및 퇴적물 성상 변화를 평가하였다. 실험 결과, 미세플라스틱 혼합으로 실험군의 함수비는 1~2% 증가한 것으로 나타났는데, 이는 낮은 비중의 미세플라스틱이 퇴적물의 압밀을 저해한 결과로 판단된다. 또한 환원 환경을 유지한 실험군은 암모니아 생성형 대사 촉진으로 대조군과 상반되는 유의미한 pH 상승을 나타냈다. 퇴적물의 겔 보기 점도를 분석한 결과, 실험군의 점도 범위(1,528~171,542 mPa·s)는 대조군의 점도 범위(1,854~237,159 mPa·s)보다 낮았다. 또한, 중성인 미세플라스틱에 의한 전하 희석 효과 및 물리적 차단으로 인해 양이온 농도가 소폭 감소하는 경향을 보였으며, 이에 따라 실험군의 나트륨 흡착률(SAR)과 양이온 교환 용량(CEC)은 각각 0.2~1% 수준으로 감소하였다. 이상의 결과를 통해 미세플라스틱 혼합은 압밀 기간이 길어질수록 퇴적물의 입자 간 결합을 약화시키는 것으로 확인되었다. 본 연구 결과는 미세플라스틱이 연안 점토질 퇴적물의 미세 구조, 유변학적 특성 등에 복합적으로 작용하여 재부상 용이성을 증가시켜, 수층의 2차 오염을 가중시킬 수 있음을 보여준다.

Abstract – Microplastics are widely distributed across global marine ecosystems, posing emerging environmental concerns. While they accumulate in marine sediments by multiple pathways, thereby altering sediment properties, studies on their effects on cohesive coastal sediments remain limited. This study evaluated viscosity and physico-chemical property changes during consolidation of cohesive coastal sediments, comparing polypropylene (PP) microplastic-amended treatment (MP) with microplastic-free control (CON). Microplastic incorporation increased water content by 1-2%, attributable to low-density MPs inhibiting consolidation. Furthermore, MP under a reducing environment exhibited a significant increase in pH, contrasting with the CON, driven by the stimulation of ammonia-producing pathways. Analysis of the apparent viscosity of sediments revealed that the viscosity range of the MP (1,528–171,542 mPa·s) was lower than that of CON (1,854–237,159 mPa·s), indicating that the influx of microplastics inhibits the development of the sediment structure. In addition, the dilution of charge density and physical blocking by the inert microplastics led to a slight decrease in cation concentrations, which consequently reduced the sodium adsorption ratio (SAR) and cation exchange capacity (CEC) of the MP by 0.2–1% relative to the CON.

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

These results confirm that microplastics progressively weaken interparticle bonding during extended consolidation. The results of this study demonstrate that microplastics complexly disrupt the microstructure and rheological properties of cohesive coastal sediments, thereby enhancing resuspension potential and potentially aggravating secondary water column contamination in coastal ecosystems.

Keywords: Microplastics(미세플라스틱), Polypropylene(폴리프로필렌), Cohesive Coastal Sediments(점토질 연안 퇴적물), Rheological Properties(유변학적 특성), Viscosity(점성)

1. 서 론

전 세계적으로 플라스틱 생산량의 증가와 관리 미흡으로 인해 해양 내 미세플라스틱 축적이 심화하고 있으며, 이는 심각한 환경 문제로 대두되고 있다(Jaikumar *et al.*[2025]). 해양에 유입된 미세플라스틱은 풍화 작용, 기계적 마모, 생분해, 광분해, 가수분해 등 물리·화학·생물학적 과정을 거쳐 5 mm 미만의 미세플라스틱으로 분해된다(Andrady[2011]; Coyle *et al.*[2020]). 분해된 플라스틱 입자는 비 표면적의 증가로 인해 수체 내에서 침강과 재부상을 반복하며, 동종응집(Homoaggregation) 및 이종응집(Heteroaggregation)을 통해 플록(Floc)을 형성하고 최종적으로 연안 퇴적물에 축적된다(Li *et al.*[2022a]).

폴리에틸렌(PE), 폴리프로필렌(PP), 폴리스타이렌(PS)과 같은 고분자 미세플라스틱은 높은 소수성을 지니며, 이로 인해 중금속뿐 아니라 다환방향족탄화수소(PAHs), 폴리염화비페닐(PCBs), 유기염소계 농약 등 소수성 유기 오염 물질을 효과적으로 흡착하는 것으로 보고되고 있다(Menéndez-Pedriz and Jaumot[2020]). 해양 환경에서 미세플라스틱 표면은 풍화와 생물막 형성을 거치면서 -OH, -COOH, C=O 등의 기능기가 도입되고 표면 거칠기가 증가한다. 이러한 표면 특성 변화는 소수성 상호작용, π - π 상호작용, 정전기적 인력, 수소 결합 등을 유도하여 오염물질에 대한 미세플라스틱의 흡착 능력을 증가시킨다(Agboola and Benson[2021]). 이처럼 미세플라스틱은 해양에서 다양한 오염물질의 운반체 및 농축 매체로 기능하며, 연안 퇴적물 내 오염물질 거동 및 오염물질의 섭취와 같은 생물학적 노출 경로에 중요한 요인으로 작용한다.

연안 퇴적물은 해양 생태계에서 영양염 순환을 조절하고 저서생물의 서식지를 제공하며, 해양 생태계의 핵심적인 생태 기능을 수행한다. 그러나 오염된 퇴적물이 재부상하면, 퇴적물 내 농축된 영양염류, 유기물 및 산소 소비 물질(Oxygen Demand Unit)이 수층으로 용출되어 적조와 빈산소수괴 등과 같은 해양 수질 오염을 발생시킨다(Kwon and Cho[2010]). 퇴적물 재부상은 주로 조류, 파랑과 같은 외력 인자에 의해 유발되며, 그 저항력은 퇴적물의 유변학적 특성에 의해 결정된다(Leighton and Acrivos[1986]). 특히 낮은 비중의 점토질 퇴적물이 상대적으로 작은 외부 교란에도 쉽게 재부상할 수 있어(Reeks and Hall[2001]), 입자 간 결합 구조가 안정성을 좌우하는 핵심 인자가 된다. 이때 혼합된 미세플라스틱은 퇴적물 입자 간 결합 구조와 안정성을 변화시켜, 퇴적물의 유변학적 특성 및 재부상 양상을 변형시킬 수 있다. 일부 연구에서는 미세플라스틱이 담수 퇴적물의 세포 외 고분자 물질 생성과 양이온 교환

능력에 영향을 미쳐 점도, 항복응력 등 퇴적물 유변학적 특성을 변화시키는 것을 보고하고 있다(Wu *et al.*[2024a]; Wu *et al.*[2024b]). 하지만 해양 퇴적물은 염분에 의한 입자 응집, 조류와 해류 영향 등 담수 환경과 다른 물리·화학·생물학적 환경 조건들을 고려해야 한다(Kim *et al.*[2016]). 따라서 해양 환경 조건을 반영한 미세플라스틱 혼합 연안 퇴적물의 유변학적 특성 변화에 관한 연구가 필요하다. 이에 본 연구는 미세플라스틱의 혼합에 따른 연안 퇴적물의 거동을 해석하기 위한 기초 연구로, 폴리프로필렌(PP) 미세플라스틱이 혼합된 점토질 해양 퇴적물의 유변학적 변화를 정량적으로 평가하는 것을 목적으로 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 실험 재료

폴리프로필렌(PP)은 전 세계적으로 널리 생산되고 환경 내 축적 비중이 높은 고분자 물질 중 하나이며(Geyer *et al.*[2017]), 중금속 및 유기 오염물질 흡착을 통한 환경 위해성이 보고되고 있다(Bhagat *et al.*[2022]; Eom *et al.*[2019]). 본 연구에서는 밀도가 약 0.83–0.85 g/cm³인(Andrady[2011]) 상업용 PP 재질의 플라스틱 스푼을 핸드그라인더(UDT 4" ANGLE GRINDER UD-100GB, China)로 분쇄하여 사용하였다. 분쇄한 플라스틱 입자는 1 mm 체를 통과시켜 입자 크기를 1 mm 미만으로 제한하였으며, 분쇄 공정의 특성상 불규칙한 파편(Fragment) 형태를 띠는 시료를 확보하였다.

실험에 사용한 점토질 연안 퇴적물은 Van Veen Grab(CL-VG 351, HY Science, Korea)을 사용하여 부산항(35°06'39" N; 129°03'04" E)의 해저면으로부터 30 cm 깊이까지 채집하였다. 채취한 퇴적물은 표준 2 mm 체를 통과시켜 대형 저서동물 및 이물질을 제거한 후 사용하였다. 해수는 광안리 해수욕장 인근(35°08'18" N; 129°06'51" E)에서 채수하였으며, 채수한 해수는 Glass Microfiber Filter(GF/C 47 mm, Whatman, China)로 여과하여 불순물을 제거한 후 실험에 사용하였다. 연구에 사용된 초기 퇴적물 및 해수의 물리화학적 특성은 Table 1에 제시하였다.

Table 1. Initial Physicochemical Properties of Sediment and Seawater

Parameter	Sediment	Seawater
pH	7.92	8.19
ORP (mV)	-115.3	78.1
Water content (%)	111.2	-
Ignition Loss (%)	6.97	-

2.2 실험 방법

본 연구에서는 점토질 연안 퇴적물과 미세플라스틱의 혼합 여부에 따른 유변학적 특성 변화를 분석하기 위해 실험군과 대조군으로 구분하여 실험을 수행하였다. 실험군(MP) 시료는 퇴적물 600 mL에 퇴적물 건조 중량의 2.5%에 해당하는 PP 미세플라스틱(약 10^5 particles/L)을 균질하게 혼합하여 준비하였다. Wu *et al.* [2024a]은 호수 퇴적물을 대상으로 한 연구에서 0.5–2% 농도의 미세플라스틱이 유변학적 변화를 유도함을 보고하였으나, 본 연구의 예비 실험 결과 점착성이 강한 연안 점토질 퇴적물 구조 내에서는 미세플라스틱 혼입에 따른 반응이 명확히 구별되어 나타나는 임계 농도가 2.5% 수준임을 확인하였다. 이에 따라 본 연구에서는 자연환경에서 보고된 일반적인 농도(1–10 particles/L)보다 높은 함량으로 채택함으로써, 미세플라스틱 축적에 따른 퇴적물의 물리적 안정성 변화 메커니즘을 보다 정밀히 관찰하고자 하였다(Lenz *et al.* [2016]).

실험군 퇴적물을 1 L 고밀도 폴리에틸렌(HDPE) 용기에 담은 후, 상부에 300 mL의 해수(직상수)를 채웠으며, 대조군은 미세플라스틱을 제외한 동일한 조건에서 준비되었다. 준비된 모든 시료는 실온(약 25°C)에서 각각 5일과 15일간 압밀시켰으며, 직상수의 수위를 일정하게 유지하기 위해 주기적으로 해수를 보충하였다. 압밀 후에는 사이폰을 이용해 각 시료의 직상수를 제거한 후, 점도를 측정하였다. 이어 퇴적물의 pH 및 산화환원전위(Oxidation-Reduction Potential, ORP)를 측정한 후, 일부 시료는 함수비 측정을 위해 덜어내고, 남은 시료는 양이온 교환 용량(Cation Exchange Capacity, CEC)과 나트륨 흡착 비율(Sodium Adsorption Ratio, SAR) 분석을 위해 사용하였다.

퇴적물의 점도는 IKA ROTAVISC lo-vi Complete 점도계(IKA, Germany)를 이용하였다. T-bar 회전자의 기하학적 특성과 불균질한 퇴적물 시료 내에서의 복잡한 전단응력을 고려하여, 본 연구에서는 회전수(RPM)에 따른 겉보기 점도(Apparent viscosity)로 나타내었다. T-SP-3 회전자를 사용하여 전단 속도를 1 RPM에서 200 RPM까지 단계적으로 증가시켰으며, 이에 따른 점도 변화를 로그 값으로 변환하여 나타내었다. 각 전단 속도에서의 점도 안정성을 확보하기 위해 1 RPM에서는 5분, 20 RPM 이상에서는 20초 등으로 측정 시간을 차등 적용하였다. 퇴적물의 pH 및 ORP 측정은 pH이온미터(Laqua F-73, Horiba, Japan)를 사용하여 측정하였다. 함수비(Water Content)는 습윤 퇴적물의 무게와 100°C에서 6시간 건조한 후 얻은 건조 퇴적물 무게 차이를 기준으로 산출하였으며, 함수비 계산식은 (1)과 같다.

$$\text{WaterContent}(\%) = \frac{\text{Moist Sediment (g)} - \text{Dried Sediment (g)}}{\text{Dried Sediment (g)}} \times 100 \quad (1)$$

CEC 및 SAR은 100°C에서 24시간 동안 건조한 퇴적물을 사용하여 측정하였다. 본 연구에서는 해수 내 용존 이온이 퇴적물 입자와 이루는 전체적인 화학적 평형 상태를 유지하기 위해 별도의 세척 과정을 거치지 않은 시료를 분석에 사용하였다. 퇴적물 내 교환성 양이온인 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 를 측정하기 위해 건조 퇴적물과 0.5 M

K_2SO_4 용액을 1:4 비율로 혼합하였다. 혼합 후, 각 시료는 0.45 μm membrane syringe filter (MILLEX-HV, Millipore, USA)를 통해 여과하였다. 추출액은 탈이온수로 10,000배 희석한 후, 유도결합 플라즈마 광학 방출 분광계(Agilent 5800 ICP-OES, USA)를 사용하여 양이온 농도를 분석하였다(Mohd Noor and Kim[2025]). CEC와 SAR은 양이온 농도 값으로부터 각각 아래의 식 (2)–(3)을 이용하여 산출하였다(Zhou *et al.* [2019]).

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

$$\text{SAR (mmol}_c / \text{L)}^{0.5} = \frac{\text{Na}}{\sqrt{\text{Ca} + \text{Mg}}} \quad (3)$$

2.3 통계 분석

통계 분석은 R 소프트웨어(ver 4.4.1)를 사용하여 수행되었다. 퇴적물의 pH, ORP, 함수비는 각각 3회 독립 반복 측정하여 평균값으로 나타내었으며, 미세플라스틱 유무와 시간 요인이 퇴적물 특성에 미치는 효과를 평가하기 위해 *t* 검정을 실시하였다. *p*-값이 0.05 미만인 경우 통계적으로 유의하다고 간주하였다.

반면, 점도, CEC 및 SAR 분석은 실험 조건상 단일 측정으로 수행하였으며, 대조군과 실험군 간의 수치 변화 및 유변학적·화학적 경향성을 비교 분석하는 데 활용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 퇴적물의 성상 변화

Fig. 1은 압밀 기간(0일, 5일, 15일)에 따른 퇴적물의 pH, ORP 변화를 보여준다. CON의 pH는 초기 7.92에서 5일 후 7.90, 15일 후 7.88로 점진적으로 감소하였는데, 이는 압밀에 의한 혐기성 환경 조성되어, 일반적인 유기물 분해 과정에서 생성된 유기산이 수소이온을 방출했기 때문으로 해석된다(Kim and An[2022]). 반면, 미세플라스틱이 혼합된 MP에서는 5일과 15일 후 각각 8.09와 8.15로 유의미한 pH 상승이 관찰되었다($p < 0.05$). 15일차 MP의 ORP는 -114.5 mV로 나타났으며, 환원 상태를 유지했다는 점을 고려할 때, 이러한 pH 상승은 특정 혐기성 물질대사의 결과로 해석하는 것이 타당하다. 즉, 미세플라스틱의 혼입 환경 하에서 질소계 유기물의 혐기성 분해 과정이나 질소 고정 경로가 활성화되었을 개연성이 크며, 이때 발생한 알칼리성 물질인 암모니아(NH_3)가 수소 이온(H^+)을 소모하면서 MP의 특이적인 pH 상승을 유도한 것으로 판단된다(Zhao *et al.* [2021]).

한편 CON과 MP 모두 초기값 대비 5일차와 15일차에서 ORP 값이 증가하는 경향을 보였으나, 증가 폭에는 차이가 있었다. CON의 ORP는 초기 -123.8 mV에서 15일차 -102.4 mV로 지속 상승하는 반면, MP는 초기값 대비 5일차 -102.5 mV에 일시적으로 상승 후 15일차 -114.5 mV로 다시 감소하였으며, 전반적인 변화 폭은 CON에 비해 작았다. 이처럼 MP가 대조군보다 낮은 ORP 상태에 머문 것은, 앞서 언급한 질소계 혐기성 대사로 인해 pH가 상승함에 따

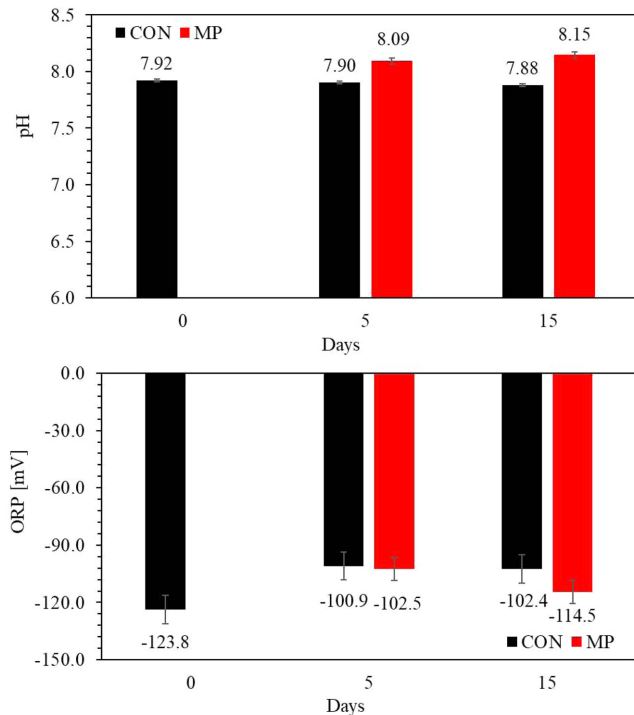


Fig. 1. Changes in pH and ORP in Sediment.

라 ORP가 저하되는 전기화학적 평형 특성과 일치한다(Chang *et al.*[2004]). 결과적으로 미세플라스틱의 존재가 퇴적물 내 특정 혐기성 대사 경로를 촉진하여, 대조군과는 차별화된 화학적 환원 환경을 형성할 수 있음을 증명한다.

Fig. 2은 압밀 기간(0일, 5일, 15일)에 따른 퇴적물의 함수비 변화를 나타내었다. 초기 함수비는 114%였으나, CON의 경우 15일 후

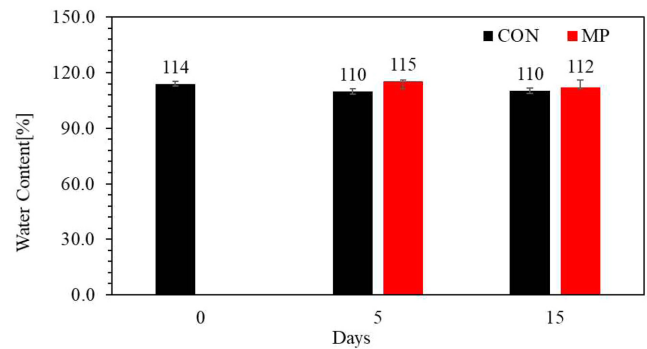


Fig. 2. Changes in Water Content of Sediment.

110%로 감소하였는데, 이는 퇴적물의 압밀에 의한 수분 손실 결과로 해석된다(Skempton[1969]). 반면, MP의 함수비는 5일 후 115%로 일시적으로 증가한 후, 15일 후 112%로 감소하였으나 전체적으로 대조군보다 높은 수분함량을 유지하는 경향을 나타냈다. 이는 미세플라스틱의 낮은 비중이 퇴적물의 압밀을 저해하였기 때문으로 판단된다(Wu *et al.*[2024a]). 이러한 결과는 미세플라스틱 혼합이 연안 점토질 퇴적물의 물리적 압밀 특성과 수분 함유량을 변화시킬 수 있음을 시사한다.

3.2 퇴적물의 점도 변화

Fig. 3에는 분당 회전수에 따른 퇴적물의 겔보기 점도 변화를 나타내었다. 초기 점도는 1,437~141,545 mPa·s였으며, 모든 시료에서 회전수(RPM)가 증가함에 따라 점도가 급격히 감소하는 전단 박화(Shear-thinning) 현상이 관찰되었다. 이는 점토질 퇴적물이 가지는 전형적인 비뉴턴(Non-Newtonian) 유체 특성으로, 전단력이 가

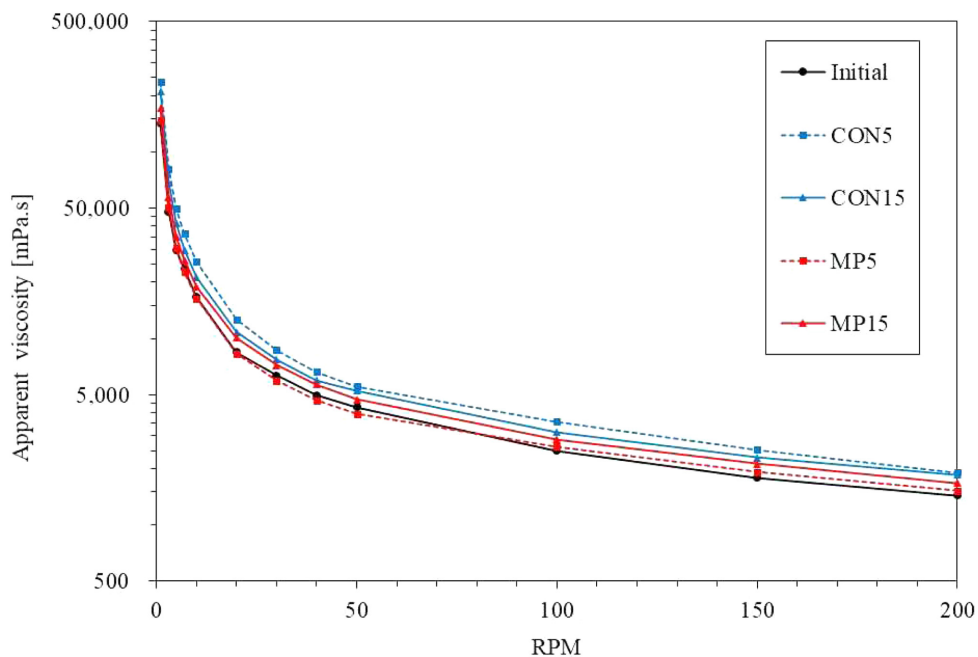


Fig. 3. Apparent viscosity changes of sediments according to RPM.

해짐에 따라 퇴적물 내부의 응집 구조가 물리적으로 파괴되면서 유동성이 증가하기 때문이다. 압밀 기간이 길어짐에 따라 CON의 점도는 초기 점도에 비해 5일 차(1,910–237,159 mPa·s)와 15일 차(1,854–212,318 mPa·s) 모두 전반적으로 증가하는 경향을 보였다. 이는 퇴적물 내부 구조가 안정화되고 압밀에 의해 입자 간 마찰력 및 응집력이 강화되었기 때문으로 판단된다(Kaveh and Malcherek [2024]).

반면, MP의 점도는 5일 차(1,528–148,576 mPa·s)와 15일 차(1,678–171,542 mPa·s) 모두 CON보다 낮게 측정되었다. 이는 미세플라스틱 혼합에 따른 퇴적물의 물리·화학적 및 생물학적 특성 변화가 복합적으로 작용한 결과로 해석된다. 미세플라스틱 입자는 퇴적물 구조 내 간극 형성이나 기존 퇴적물 입자 간 결합의 물리적 약화를 초래하여 전체적인 안정성을 저하할 수 있다(Wu *et al.* [2024a]). 이와 같은 변화로 인해 퇴적물 입자 간 응집력과 점착력이 약화하여 미세플라스틱 혼합된 퇴적물의 점성이 감소한 것으로 판단된다. Otsubo and Muraoka(1988)는 점토질 퇴적물의 점성 저하가 외력에 대한 저항력 및 한계 전단응력의 감소와 밀접한 상관관계가 있음을 보고한 바 있다. 이러한 선행 연구를 바탕으로 할 때, 본 연구에서 확인된 점도 감소는 미세플라스틱에 의한 유변학적 안정성을 저해하는 요인으로 작용함을 시사하며, 이는 파도나 조류 등 외력이 가해질 때 퇴적물이 재부상되기 쉬운 물리적 환경을 조성할 가능성이 크다. 이에 따라 실제 동적 거동에 미치는 영향에 대한 정량적인 후속 검증이 요구된다.

3.3 CEC 및 SAR 변화

미세플라스틱 노출 전·후 퇴적물 내 이온 농도 및 CEC 및 SAR의 변화를 Table 2에 요약하였다. 본 연구에서 도출된 CEC 값이 일반적인 토양 기준에 비해 높은 수치를 기록한 것은, 해수 내 용존이온과 퇴적물 입자 간의 본래 화학적 평형 상태를 교란하지 않기 위해 별도의 세척 과정을 거치지 않은 시료를 분석에 사용했기 때문이다. 증류수를 이용한 과도한 세척 공정은 점토 입자 주위의 이온 강도를 변화시켜 유변학적 거동을 왜곡할 우려가 있으므로, 가용성 염의 간섭을 포함한 퇴적물 전체의 걸보기 양이온 용량(Apparent cation capacity)을 반영하고자 하였다(Wu *et al.* [2021]). 이처럼 해수 농축 효과에 의한 배경 양이온 농도가 높은 환경에서 미세플라스틱에 의한 실질적인 기여도를 객관적으로 판단하기 위해, 대조군(CON)의 절대값을 기준으로 설정하고 실험군(MP)의 상대적 변

화율($\Delta\%$)을 산출하여 데이터 보정 절차를 적용하였다.

이러한 보정 지표를 바탕으로 각 이온의 거동을 분석한 결과, 나트륨 이온(Na^+) 농도는 CON 대비 MP에서 50.82% 낮게 나타났으며, 칼륨 이온(K^+) 농도는 CON 대비 MP에서 4.03%로 감소하였다. 산출된 SAR은 초기 58.0에서 CON은 60.0으로 소폭 상승하였으나, MP에서는 59.3으로 CON보다 낮았으며, 보정치 기준으로 1.17% 감소를 나타냈다. SAR은 관개용수의 적합성을 판단하는 지수로, SAR이 13 이상인 경우 염류성(Sodic) 퇴적물로 분류되며 점토 입자의 분산성이 높아 구조적 불안정성을 나타낸다(Khareh *et al.* [2018]). 나트륨(Na^+) 이온이 지배적인 본 연구의 연안 퇴적물은 모든 조건에서 높은 SAR 값을 나타내어, 이는 구조적 불안정성을 내포하고 있음이 확인되었다(Kim and Kim[2020]). SAR의 감소는 분산성을 유발하는 1가 나트륨 이온의 상대적 영향력이 줄어들고 입자 간 응집을 유도하는 2가 양이온의 가교 역할이 우세해짐을 의미하므로, 이론적으로는 퇴적물의 구조적 안정성과 점도가 상승해야 마땅하다. 그러나 실제 유변학적 측정 결과에서는 이와 반대로 실험군의 점도가 대조군에 비해 뚜렷하게 저하되는 현상이 관찰되었다.

한편, CEC는 초기 2,768 cmol(+)/kg에서 CON은 2,814 cmol(+)/kg으로 증가하였으나, MP에서는 2,807 cmol(+)/kg으로 CON과 통계적으로 유의미한 차이를 보이지 않았으며($p > 0.05$), 보정치 기준 변동 폭 또한 0.25% 수준의 감소로 미미하였다. 일반적으로 CEC가 25 cmol(+)/kg을 초과하는 경우, 유기물이 풍부한 고점도 응집성 퇴적물을 의미하며, 많은 양의 양이온을 점토 입자에 고정시킬 수 있는 강한 흡착 능력을 나타낸다(Bashour and Sayegh[2007]).

결과적으로 본 연구에서 미세플라스틱 혼합에 따라 CEC와 SAR의 총량적 변화는 미미했으나, SAR 감소에 따른 점도 상승 예측과 실제 유변학적 거동(점도 저하)이 상반된 신호를 나타내는 현상은, 퇴적물의 물성이 화학적 이온 반응이 아닌 미세플라스틱의 물리적 개입에 의해 지배되고 있음을 증명한다. 기본적으로 폴리프로필렌(PP) 미세플라스틱은 표면에 극성 작용기가 없어 전기적으로 중성을 띠는 비활성(Inert) 입자이다(Fotopoulou and Karapanagioti[2012]). 이와 관련하여 Hou *et al.*[2023]은 연안 퇴적물 환경의 경우 이온 강도의 거시적 변화보다 입자 간의 물리적 조합과 기하학적 배열 구조가 물성을 지배하는 주요 요인임을 제시한 바 있다. 즉, 양이온 교환은 주로 점토 광물과 유기물의 음전하 사이트(Negative sites)에서 발생하는데, 중성인 미세플라스틱 입자가 퇴적물 내 일정 부

Table 2. Changes in Ion Concentrations, Cation Exchange Capacity (CEC), and Sodium Adsorption Ratio (SAR) in Sediments before and after Microplastic Exposure ($\Delta\%$ is calculated relative to the Control to eliminate background interference)

Item	Initial	Control	MP(PP)	$\Delta\%$
Na (mg/kg)	57,073	59,220	58,732	-0.82
Ca (mg/kg)	54,146	53,854	54,341	+0.90
K (mg/kg)	19,805	19,873	19,073	-4.03
Mg (mg/kg)	12,878	13,268	13,268	0
SAR (mmol/L) ^{0.5}	58.0	60.0	59.3	-1.17
CEC (cmol(+)/kg)	2,768	2,814	2,807	-0.25

피를 차지함에 따라 미세플라스틱-퇴적물 혼합체 단위 중량당 반응할 수 있는 실질 전하 밀도를 감소시킨 것으로 판단된다. 아울러 미세플라스틱 입자가 점토 콜로이드 표면의 이온 흡착 부위를 물리적으로 차단함으로써 양이온 흡착을 국소적으로 저해하였을 개연성이 존재한다. 이러한 정전기적 인력 형성의 방해는 점토 입자 간의 Floc 구조 형성을 물리·화학적으로 방해하여 입자 간 결합력을 약화시키는 기전이 된다(Wu *et al.*[2024a]). 이는 결과적으로 미세플라스틱 혼합 퇴적물의 전반적인 구조적 취약성을 야기하며, 앞서 확인된 거시적인 점도 저하 현상을 유기적으로 뒷받침하는 화학적 근거가 된다. 다만, 선행 연구(Li *et al.*[2022b]; Wu *et al.*[2024b])에서 언급된 미생물 군집 교란 및 EPS 생산 감소 등 생물학적 요인이 본 연구의 유변학적 안정성 저하에 미친 직접적인 인과관계를 명확히 규명하기 위해서는 향후 EPS 정량 분석 등의 추가적인 검증이 병행되어야 할 것이다.

4. 결 론

본 연구는 폴리프로필렌(PP) 미세플라스틱 혼합에 따른 점토질 연안 퇴적물의 유변학적 특성 변화를 정량적으로 평가하였다. 본 연구를 통해 미세플라스틱의 혼합만으로도 연안 퇴적물의 물리·화학 특성이 변화하는 것을 확인하였다. 특히, 미세플라스틱 혼합으로 인해 퇴적물 내 공극 구조가 변화되면서 pH 상승, 함수비 증가, SAR·CEC 감소 등 물리·화학적 특성이 변화하였으며, 특히 압밀 경과에 따라 대조군의 점도는 증가한 반면, 미세플라스틱 혼합 퇴적물은 상대적으로 낮은 점도를 유지하는 것을 확인하였다. 이러한 점도 변화는 퇴적물 내 공극 구조 변화와 입자 간 결합력 약화를 통해 퇴적물의 한계 전단응력이 감소하고 재부상 가능성이 증가했음을 의미한다. 즉, 미세플라스틱은 단순한 오염 입자가 아니라 퇴적물 공극 구조를 교란하여 유변학적 안정성을 저해하는 요인으로 작용함을 확인하였다. 본 연구에서 임계 전단응력을 직접 측정하지는 않았으나, 점도 감소에 따른 저항력 약화의 이론적 개연성을 바탕으로 할 때, 미세플라스틱 오염은 외력 조건에서 퇴적물의 재부상 가능성을 높이는 환경적 위험 요소가 될 것으로 판단된다. 다만, 실제 재부상 메커니즘을 보다 명확히 규명하기 위해서는 향후 침식 및 한계 전단응력 측정 등 동적 거동에 대한 정량적인 후속 연구가 병행되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 국립부경대학교 자율창의학술연구비(2025년)에 의하여 수행되었습니다.

References

- [1] Agboola, O.D. and Benson, N.U., 2021, Physisorption and chemisorption mechanisms influencing micro (nano) plastics-organic chemical contaminants interactions: A review, *Front Environ Sci.*, Vol. 9, 678574.
- [2] Akdogan, Z. and Guven, B., 2024, Modeling the settling and resuspension of microplastics in rivers: Effect of particle properties and flow conditions, *Water Res.*, Vol. 264, 122181.
- [3] Andrady, A.L., 2011, Microplastics in the marine environment, *Marine Pollut. Bull.*, Vol. 62, No. 8, 1596-1605.
- [4] Bashour, I.I. and Sayegh, A.H., 2007, Methods of analysis for soils of arid and semi-arid regions, Food and agriculture organization of the United Nations, Rome, Italy, 119.
- [5] Bhagat, K., Barrios, A.C., Rajwade, K., Kumar, A., Oswald, J., Apul, O. and Perreault, F., 2022, Aging of microplastics increases their adsorption affinity towards organic contaminants, *Chemosphere*, Vol. 298, 134238.
- [6] Chang, C.N., Cheng, H.B. and Chao, A.C., 2004, Applying the Nernst Equation To Simulate Redox Potential Variations for Biological Nitrification and Denitrification Processes, *Environ. Sci. & Technol.*, Vol. 38, No. 6, 1807-1812.
- [7] Coyle, R., Hardiman, G. and O'Driscoll, K., 2020, Microplastics in the marine environment: A review of their sources, distribution processes, uptake and exchange in ecosystems, *Case Stud. Chemical and Environ. Eng.*, Vol. 2, 100010.
- [8] Eom, J.H., Park, J.H., Kim, S.H., Kim, Y.J., Ryu, S.K. and Seo, D.C., 2019, Evaluation of Cd adsorption characteristic by microplastic polypropylene in aqueous solution, *Korean J. Environ. Agric.*, Vol. 38, No. 2, 83-88.
- [9] Fotopoulou, K.N. and Karapanagioti, H.K., 2012, Surface properties of beached plastic pellets, *Marine environmental research*, Vol. 81, 70-77.
- [10] Geyer, R., Jambeck, J.R. and Law, K.L., 2017, Production, use, and fate of all plastics ever made, *Sci. Adv.*, Vol. 3, No. 7, e1700782.
- [11] Hou, C.L., Ma, X.Y. and Kang, X., 2024, Effects of salt and pH on microstructure and physico-mechanical behaviors of clay sediments? A references review, *Marine Georesources & Geotechnology*, Vol. 42, No. 6, 736-766.
- [12] Jaikumar, I.M., Tomson, M., Meyyazhagan, A., Balamuralikrishnan, B., Baskaran, R., Pappuswamy, M. and Farajnezhad, M., 2025, A comprehensive review of microplastic pollution in freshwater and marine environments, *Green Anal.Chem.*, Vol. 12, 100202.
- [13] Kaveh, K. and Malcherek, A., 2024, Theoretical approximation of gelling concentration: Application to the characterization of consolidation processes in coastal sediment environments, *Ocean Eng.*, Vol. 313, 119558.
- [14] 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.*, Vol. 110, No. 3, 1103-1110.
- [15] Kim, K. and Kim, K., 2020, Remediation of contaminated intertidal sediment by increasing permeability using active capping material, *Journal of environmental management*, Vol. 253, 109769.
- [16] Kim, K., Yoon, H.S., Lee, I.C. and Hibino, T., 2016, An influ-

- ence of salinity on resuspension of cohesive sediment, *J. Coast. Res.*, Vol. 75(SI), 68-72.
- [17] Kim, S. and An, S., 2022, A study on the effect of the development of anaerobic respiration processes in the sediment with the water-column stratification and hypoxia and its influence on methane at Dangdong Bay in Jinhae, Korea, *Ocean Polar Res.*, Vol. 44, No. 1, 1-11.
- [18] Kwon, S.H. and Cho, D.C., 2010, A study on anaerobic release characteristics of marine sediment and effect of CaO_2 , an oxygen releasing compound, *J. Korea Acad.-Ind. Coop. Soc.*, Vol. 11, No. 10, 4047-4054.
- [19] Leighton, D. and Acrivos, A., 1986, Viscous resuspension, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 41, No. 6, 1377-1384.
- [20] Lenz, R., Enders, K. and Nielsen, T.G., 2016, Microplastic exposure studies should be environmentally realistic, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, Vol. 113, No. 29, E4121-E4122.
- [21] Li, W., Wang, Z., Li, W. and Li, Z., 2022b, Impacts of microplastics addition on sediment environmental properties, enzymatic activities and bacterial diversity, *Chemosphere*, Vol. 307, 135836.
- [22] Li, W., Zu, B., Yang, Q., An, J. and Li, J., 2022a, Nanoplastic adsorption characteristics of bisphenol A: The roles of pH, metal ions, and suspended sediments, *Marine Pollut. Bull.*, Vol. 178, 113602.
- [23] Mancini, M., Francalanci, S., Serra, T., Colomer, J. and Solari, L., 2025, Settling velocities of microplastics with different shapes in sediment-water mixtures, *Environ. Pollut.*, Vol. 372, 126071.
- [24] Menéndez-Pedriz, A. and Jaumot, J., 2020, Interaction of environmental pollutants with microplastics: A critical review of sorption factors, bioaccumulation and ecotoxicological effects, *Toxics*, Vol. 8, No. 2, 40.
- [25] Mohd Noor, N.N. and Kim, K., 2025, Boosting bioelectricity performance in sediment microbial fuel cells with raw bamboo biochar as a sustainable energy source, *Renew. Energy*, Vol. 251, 123457.
- [26] Otsubo, K. and Muraoka, K., 1988, Critical shear stress of cohesive bottom sediments, *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 114, No. 10, 1241-1256.
- [27] Reeks, M.W. and Hall, D., 2001, Kinetic models for particle resuspension in turbulent flows: Theory and measurement, *J. Aerosol Sci.*, Vol. 32, No. 1, 1-31.
- [28] Skempton, A.W., 1969, The consolidation of clays by gravitational compaction, *Quart. J. Geol. Soc.*, Vol. 125, No. 1-4, 373-411.
- [29] Wu, Z., Deng, Y., Chen, Y., Gao, Y., and Zha, F., 2021, Long-term desalination leaching effect on compression/swelling behaviour of Lianyungang marine soft clays. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 80, No. 10, 8099-8107.
- [30] Wu, W., Wang, C. and Jiang, H., 2024a, Impacts of microplastic contamination on the rheology properties of sediments in a eutrophic shallow lake, *Environ. Pollut.*, Vol. 346, 123545.
- [31] Wu, W., Zhou, X., Zhao, Z., Wang, C. and Jiang, H., 2024b, Impacts of microplastic concentrations and sizes on the rheology properties of lake sediments, *Sci. Total Environ.*, Vol. 946, 174294.
- [32] Zhao, T., Lozano, Y.M. and Rillig, M.C., 2021, Microplastics increase soil pH and decrease microbial activities as a function of microplastic shape, polymer type, and exposure time, *Front. Environ. Sci.*, Vol. 9, 678574.
- [33] Zhou, J., You, X., Niu, B. and Gong, L., 2019, The flocculation process of released clay particles and its effect on the permeability of porous media, *Hydrogeol. J.*, Vol. 27, No. 5, 1827-1835.

Received 16 March 2026

1st Revised 8 May 2026, 2nd Revised 13 June 2026

3rd Revised 24 June 2026

Accepted 29 June 2026