



Article

## 강원도 북부 동해안 연안류에 의해 운반되는 석영입자표면미세조직의 변화

고용수, 조경남\*

강원대학교 지질학과

### Changes in surface microtextures of quartz grains by longshore current transport along the Northern East coast of Gangwon Province, Korea

Yongsu Ko, Kyoung-nam Jo\*

Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea

Received: April 4, 2024 / Revised: May 12, 2024 / Accepted: May 17, 2024

\*Corresponding author: +82-33-250-8555 / E-mail: kjo@kangwon.ac.kr

**요약:** 퇴적물 공급과 유실의 불균형으로 야기된 연안침식의 원인과 메커니즘을 이해하기 위해서는 연안 구성물질의 특성과 퇴적물 이동과정을 이해하는 것이 필수적이다. 그동안 퇴적학적 연구는 물론 연안 지질 관련 연구가 극히 미진했던 강원도 고성군의 화진포, 송지호, 청간 해변을 대상으로 해변 퇴적물의 석영입자표면미세조직(SMQ; surface microtextures of quartz grains)의 특징 변화를 이용하여 운반과정 가설을 테스트하고 이에 대한 실제 퇴적학적 증거를 제시하고자 한다. 다양한 SMQ 중 가장 주요하게 인식되고 있는 윤곽선(outline)과 V-형 충돌흔(v-shaped percussion cracks)은 퇴적물 운반과정에서 환경 변화에 민감하게 반응하는 미세조직으로 알려져 있다. 이 SMQ들은 청간 해변으로 직접 유입하고 있는 천진천에서 하류 방향으로 운반 거리가 증가함에 따라 변화하는 경향을 뚜렷하게 보여준다. 이러한 경향성은 세 해변 모두에서도 동일한 방향으로 나타나며, 그 방향은 현재까지 연구를 통해 추정된 동해안의 연안류 방향과 일치한다. 따라서, 이러한 결과들은 SMQ 특성을 통해 실질적인 연안류의 방향을 해석하는 도구로 유용하게 활용될 수 있다는 점을 시사한다.

**주요어:** 연안류, 동해안, 운반과정, SEM, 석영입자표면미세조직

**ABSTRACT:** To understand the causes and mechanisms of coastal erosion resulting from imbalances in sediment supply and loss, it is essential to comprehend the characteristics of coastal materials and the processes of sediment transport. Sedimentological research, as well as coastal geological studies, have been significantly lacking, particularly in the Hwajinpo, Songjiho and Cheonggan beaches of Goseong County, Gangwon Province. This study aims to test transport hypotheses and present actual sedimentological evidence by examining the changes in the features of surface microtextures of quartz grains (SMQ) in beach sediments. Among the various SMQs, outlines and V-shaped percussion cracks are recognized as the most significant, known to respond sensitively to environmental changes during the sediment transport process. These SMQs exhibit a clear tendency to change as the transport distance increases from Cheongjincheon stream, which directly flows into Cheonggan beach. This trend is consistent across all three beaches, and the observed direction aligns with the estimated longshore current direction along the East Coast. Consequently, these findings suggest that SMQ characteristics can serve as a practical tool for interpreting the direction of longshore current.

**Key words:** longshore current, The eastern coast of Korea, transport process, SEM, surface microtexture of quartz grains (SMQ)

## 1. 서론

최근 동해안은 지구온난화에 따른 해수면 상승과 연안 지질작용에 대한 명확한 이해 없이 이루어지는 난개발로 인해 심각한 연안침식 문제에 직면해 있다(An, 2013; Lim and Lee, 2017; Park *et al.*, 2021; The Province of Gangwon, 2021; Ministry of Ocean and Fisheries, 2022). 연안침식은 해안가 지역의 퇴적물을 포함한 자연 지형 및 지반 구성물질 자체가 침식되어 사라지는 현상으로, 연안침식의 원인과 메커니즘을 이해하기 위해서는 이러한 지반 구성물질의 특성과 퇴적물 이동과정을 이해하는 것이 필수적이다. 하지만, 기존 동해안 지역에서의 연안침식 연구는 퇴적물의 해빈 내 유입 및 이동에 대한 실제 관측과 검증 과정은 극히 미진한 채 수치모델과 예측 연구에만 치우친 경향이 뚜렷하다(Kim *et al.*, 2011; Proddger *et al.*, 2017; Jin *et al.*, 2020; Maeng *et al.*, 2022; Shim *et al.*, 2022). 또한, 이러한 연구 결과를 기반으로 건설된 대형 해안 구조물은 경우에 따라 해빈 내 표사 출입의 불균형을 야기하기도 하였고(e.g., Kang *et al.*, 2010; Kim and Lee, 2013; Nukazawa *et al.*, 2021), 결과적으로는 연안 회복탄력성(Coastal resilience)이 낮아지고 있다(Kang and Lee, 2023).

강원도 동해안 지역에서는 일반적으로 북동 방향으로부터 연안을 향해 입사하는 파도에 의해 해안선을 따라 남남동 방향으로 연안류가 우세하며 이 연안류를 따라 해빈 및 대규모 연안 지형이 형성되는 것으로 알려져 있다(Oh *et al.*, 2010; Kim and Lee, 2013, 2015; Lim and Lee, 2017; Cho and Kim, 2019). 하지만 이들 선행연구 대부분은 위성 혹은 항공영상을 통한 일반적인 변화만을 관찰하는 수준에 머물고 있으며(e.g., Kim *et al.*, 2005; Lee and Kim, 2007; Choi *et al.*, 2009; Eom *et al.*, 2010; Kim and Lee, 2013, 2015), 보다 상세한 해빈 내 퇴적물 이동 및 그 기작 등 연안 지질작용에 대한 실제적 근거는 여전히 불분명한 상태이다. 따라서 연안 지역의 지속가능한 보전 및 개발에 앞서 실제 퇴적물의 특성과 운반과정 그리고 잠재적 공급원 등 필수 기초 자료를 확보하여 동해안 연안의 지질작용에 대한 근본적 이해를 넓힐 필요가 있다.

석영은 거의 대부분의 해빈 퇴적물에서 주요 구성요소에 해당하며 지표환경에서 물리화학적으로 매우 안정한 상태를 유지하여 퇴적물 이동 및 퇴적 전후 과정 동안 발생된 여러 지질작용의 흔적들을 입사 표면에 기록한다(Goldich, 1938; Margolis and Kennett, 1971; Krinsley and Doornkamp, 2011). 퇴적물 입도 및 그 매개변수들이 주로 퇴적물 운반에 필요한 수력학적 에너지 및 퇴적환경을 해석하는 데 유용하지만, 석영입자표면미세조직은 같은 크기의 퇴적입자라 할지라도 운반과정 및 기작에 따라 입자의 마모와 화학

적 조직이 달라진다는 특징을 활용하며, 이는 운반과정 및 직후의 속성작용을 해석할 수 있는 유일한 방법이다. 그동안 주사전자현미경(SEM; scanning electron microscope)의 발전과 함께 석영입자표면미세조직(SMQ; surface microtextures of quartz grains) 분석기법은 퇴적물의 운반기작 규명과 퇴적과정 연구에 널리 활용되어 왔다(e.g., Mahaney, 2002; Krinsley and Doornkamp, 2011; Vos *et al.*, 2014; Itamiya *et al.*, 2019; Baek and Jo, 2023; Park *et al.*, 2023). 또한, SMQ에 대한 분석은 미국, 유럽, 중국 등 여러 나라에서 운반선 변화와 표면미세조직의 비율 변화를 통해 해빈 퇴적물의 운반 과정을 해석하는 데에도 다양하게 사용된 바 있다(Bellanova *et al.*, 2016; Reddad *et al.*, 2016; Tunwal *et al.*, 2018; Itamiya *et al.*, 2019; Madhavaraju *et al.*, 2021, 2022).

이번 연구는 그동안 제시되어 왔던 동해안 해빈 퇴적물의 특성과 운반과정 가설을 테스트하고 이에 대한 실제 퇴적학적 증거를 제시하고자 수행되었다. 이를 위해 그동안 퇴적학적 연구는 물론 연안 지질 관련 연구가 극히 미진했던 남한 지역 동해안 최북단부의 화진포, 송지호, 청간 해빈을 대상으로 SMQ 분석을 실시하였다. 이번 연구는 동해안 연안 지질작용의 근본적인 이해라는 장기적인 연구 주제의 첫 번째 세부 연구에 해당하며, 연안류에 의한 해빈 퇴적물 운반과정과 SMQ 특성 변화 사이의 관련성에 대해 논의하고자 한다.

## 2. 연구 지역

연구 지역인 강원도 북부 동해안은 조차가 최대 0.3 m, 평균 0.2 m 내외를 보이는 소조차(micro tidal) 환경에 해당하며(Davis Jr and Fitzgerald, 2019), 강한 파랑의 영향을 많이 받는 대표적인 파랑 우세 환경이다(그림 1). 동해안은 연평균 북동쪽에서 입사하는 파도가 우세하기 때문에 남동쪽으로 연안류를 발생시키며(Oh *et al.*, 2010; Lim *et al.*, 2017; Cho and Kim, 2019), 이러한 연안류와 일치하는 방향으로 퇴적물이 순이동(net transportation)할 것으로 추정된다(그림 1; Schwartz, 2006; Davidson-Arnott *et al.*, 2019). 그러나, 여름철 동안에는 계절풍으로 인한 남동 탁월풍과 태풍 등에 의해 강하고 높은 파랑을 남동쪽으로부터 입사시키기 때문에 북서쪽으로 흐르는 연안류를 발생시킬 가능성도 제기된다(Lim *et al.*, 2017). 한편 연구지역에서 동해안으로 연결되는 하천들은 태백산맥의 동쪽 급사면을 따라 발달하므로 비교적 경사가 급하고 유로의 길이가 짧은 단순한 특징이 있다(Kim, 1999; Migoñ *et al.*, 2019; Shin *et al.*, 2020).

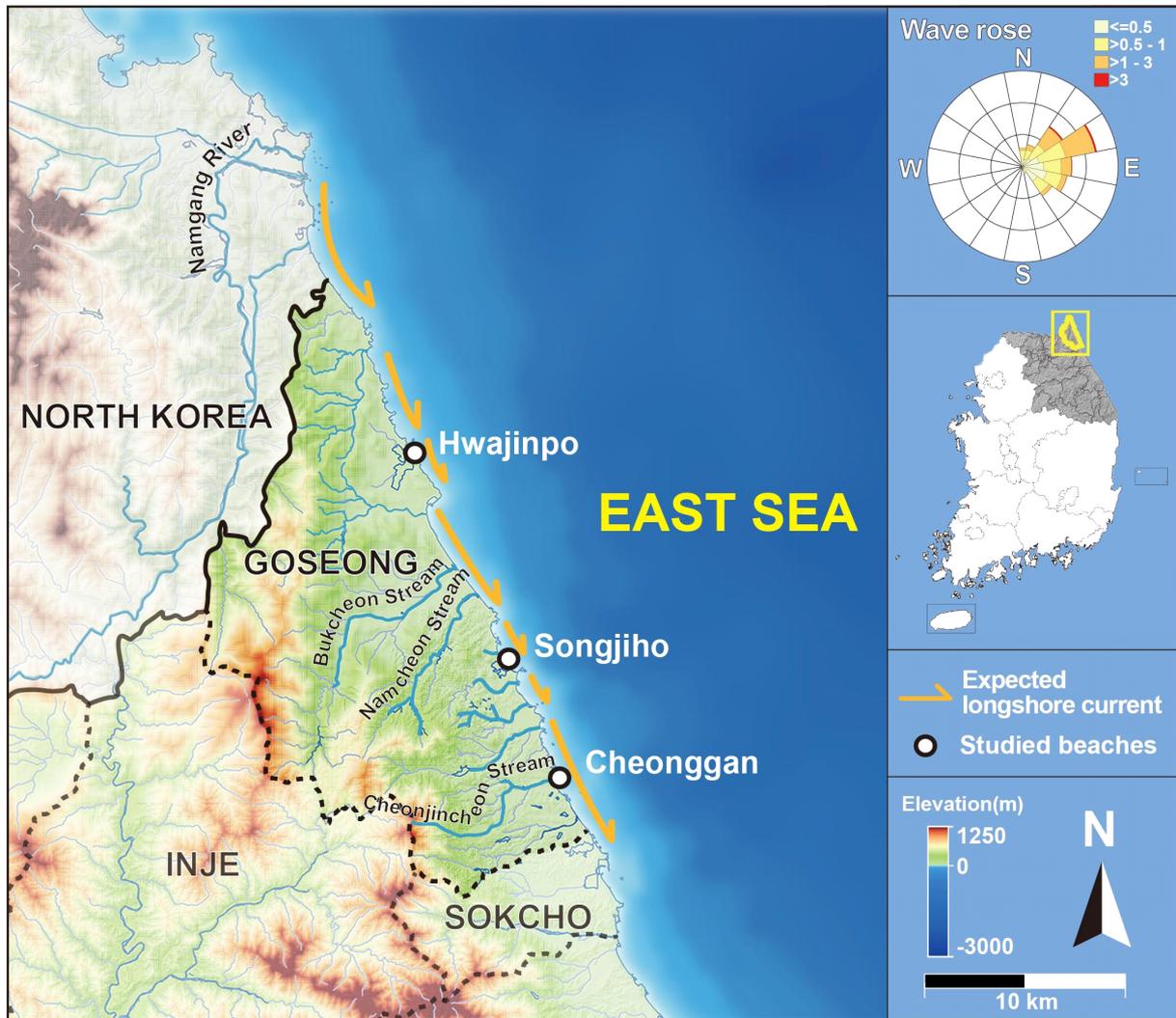
강원도 고성군 화진포, 송지호, 청간 해빈 세 지역은 북

북서-남남동 방향으로 발달한 포켓형 해변이다(그림 2). 이들 해변은 각각 서로 다른 지형지질학적 특징을 나타내기 때문에 퇴적학적 차이점과 공통점을 비교분석하기에 유리할 것으로 판단하여 연구지역으로 선정하였다. 먼저 화진포 해변의 경우, 세 해변 중 유일하게 변성암류가 주변에 분포하고 있으며, 하천 유입의 영향이 가장 작다. 송지호와 청간 해변의 규모는 세 해변 중 최대 및 최소이며, 하천 유입 영향은 청간 해변이 송지호에 비해 월등하여 해변 퇴적물에 대한 하천의 영향성을 비교 평가할 수 있을 것으로 판단하였다. 또한, 이들 두 해변은 거의 단일 암종으로 구성됨 매우 단순한 지질조건을 갖추고 있다.

### 2.1. 화진포 해변

약 1.2 km 길이의 화진포 해변에는 쥐라기의 화강암이

해빈의 북부에 위치하는 반면, 남단에는 선캄브리아 시대의 근청석-규선석 편마암이 곳곳에 노출되어 있다. 해변과 인접하여 내륙 쪽에 위치한 화진포호는 좁고 얇은 수로로 연결된 내호와 외호로 나누어지며, 호소 면적은 2.03 km<sup>2</sup>, 유역 면적은 20.53 km<sup>2</sup>, 최대 수심은 4.62 m이다(Kim *et al.*, 2021). 내호와 외호에는 각각 2개와 1개의 소규모 하천이 유입되며, 외호로부터 바다로 직접 연결되는 유출 통로(inlet)가 존재하고 있다(Yum *et al.*, 2015). 이 유출 통로는 화진포 해변의 북단으로부터 약 400 m 남쪽에 위치하며, 강수량이 많은 여름철에는 화진포호의 수위가 상승하여 유출통로를 통해 유출수를 동해로 배출한다(그림 2a). 하지만 동해안의 석호는 계절적인 영향으로 간헐적으로만 해변과 연결되기 때문에 모래 크기 이상의 퇴적물 유출이 적고, 오히려 동절기 파도에 의해 석호 내부 쪽으로 퇴적물의 유입



**Fig. 1.** The geographic location and study sites situated in the northeastern part of Gangwon-do Province. The inset figure (wave rose) represents distributions of wave directions. Due to the predominance of these waves, longshore currents are expected to flow in the southeast direction, as highlighted in orange.

이 우세한 편이다(Yum *et al.*, 2015; Shin *et al.*, 2020).

## 2.2. 송지호 해변

송지호 해변은 약 2.8 km 길이로 주변 지역의 기반암은 백악기 화강암 단일 암층으로 구성되어 있으며, 유입 하천 유역 내에 부분적으로 극히 소규모의 현무암이 분포하고 있다. 해변의 북단에는 어항과 이안제가 설치되어 있어 자연적인 곳을 확인할 수 없었으며, 해변 남쪽단 곳은 화강암으로 이루어진 소죽도 쪽으로 사취가 성장하고 있다. 현재 이 사취의 남부 지점에도 모래 해변이 분포하여 전체적으로 송지호 해변에 포함되나, 비교적 소규모이고 해양관광 복합지구 조성 사업으로 크게 교란되었기 때문에 이번 연구에서는 고려하지 않았다(그림 2b). 송지호는 약 0.63 km<sup>2</sup>의 면적과 최대 수심 2.6 m를 나타내며, 화진포호와 마찬가지로 두 개의 작은 호수로 구성되어 있다(Yum *et al.*, 2015; Song *et al.*, 2018). 바다와 연결된 유출 통로는 평상시에는 닫혀 있으며 강수가 발생해 유량이 많아지는 시기에만 제한적으로 갯터짐이 발생하여 인접 퇴적물이 제한적으로 이동한다. 송지호 해변의 북단으로부터 약 200 m 남쪽에는 규모가 작은 오봉천이 해변과 직접 연결되어 있으며, 다시

남쪽으로 약 1.8 km 떨어진 곳에 송지호 유출 통로가 위치한다.

## 2.3. 청간 해변과 천진천

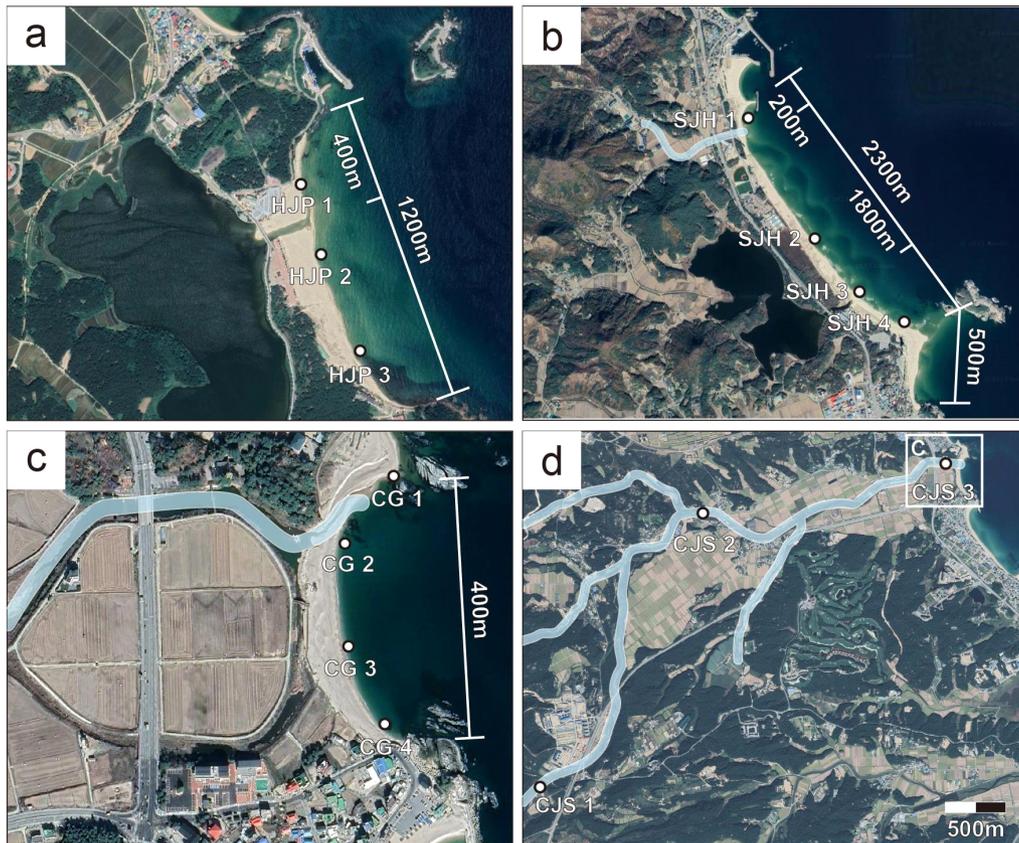
청간 해변은 길이가 약 400 m로 연구 지역 중 가장 작은 규모의 해변이다. 해변의 양쪽 곳은 백악기의 화강암 노두로 구성되어 있고 파도의 영향을 직접적으로 받는다. 청간 해변 주변과 천진천 유역 기반암은 모두 백악기 화강암으로만 구성되어 있다.

태백산맥 신성봉에서 발원한 천진천은 하천연장 8.3 km, 지천 포함 유로연장 13.4 km, 유역면적 35 km<sup>2</sup>의 규모로, 이번 연구에서 다루는 해변에 직접 유입되는 하천 중 가장 큰 규모이다. 또한 천진천은 모래 크기는 물론 자갈 크기의 퇴적물까지 청간 해변으로 활발하게 공급하고 있다(그림 2c, 2d).

## 3. 연구방법

### 3.1. 시료 채취 및 분석

연구 지역 표층 퇴적물의 분포 특성을 파악하고 시료를



**Fig. 2.** Satellite photographs and sampling points in three beaches. The light blue lines correspond to stream. (a) Hwajinpo beach. (b) Songjiho beach. (c) Cheonggan beach. (d) Cheonjin stream.

**Table 1.** The correlation coefficient ( $-1 \leq r \leq 1$ ) between transportation distance and SMQ in study areas. Unobserved SMQ is denoted by “-”. (HJP) Hwajinpo beach. (SJH) Songjiho beach. (CG) Cheonggan beach. (CJS) Cheonjin stream.

			Distance			
			Beach			Fluvial
			HJP	SJH	CG	CJS
Mechanical	Outline	Angular	-0.866	-0.949	-1.000	-1.000
		Sub-angular	1.000	0.400	0.857	1.000
		Rounded	-1.000	0.949	0.655	-0.866
	Conchoidal fractures	Small (<10 μm)	1.000	0.000	0.158	0.866
		Medium (<100 μm)	0.500	0.400	-0.536	0.500
		Large (>100 μm)	-0.500	-0.800	0.000	-0.500
	Steps	Arcuate	-1.000	0.316	-0.536	-1.000
		Straight	-0.500	0.000	-0.143	1.000
		Meandering ridges	-1.000	-0.316	-0.556	0.500
		Flat cleavages surfaces	0.500	-0.447	-0.164	-1.000
		V-shaped percussion cracks	0.866	0.775	0.955	1.000
		Straight/curved grooves and scratches	0.500	0.800	0.179	-0.500
		Upturned plates	-0.500	0.000	0.074	-0.866
		Crescentic percussion marks	-1.000	-0.400	0.821	1.000
		Abrasion fatigue	1.000	0.800	0.396	0.500
		Parallel striations	-	-	-0.334	-0.500
Chemical		Oriented etch pits	-	-	-	0.866
		Solution pits	-0.500	-0.400	0.286	0.500
		Solution crevasses	0.866	-0.949	0.741	-
		Scaling	-	0.258	0.418	-
		Silica globules	1.000	0.211	-	-
Mechanical /Chemical	Relief	Low	-0.500	0.400	-0.324	0.500
		Medium	0.500	0.105	0.500	0.500
		High	-1.000	-0.316	0.144	-0.500
		Adhering particles	1.000	-0.800	-0.655	0.866
		Arcuate/circular/polygonal cracks	-0.500	0.000	0.342	-1.000

채취하기 위해 2023년 4월 현장 조사를 진행하였다. 이 시기는 이전 해의 동절기를 지나 사람의 접근 및 활동이 최소화되는 시기로, 인위적 교란을 최소화하기 위해 시료 채취 당시 퇴적물 이동이 육안으로 확인되는 포말대(swash zone)의 표층으로부터 최대 5 cm 깊이 이내에서 3 내지 4개의 해변 퇴적물을 화진포, 송지호, 청간 해변에서 채취하였다(그림 2). 하천의 영향이 가장 크고 주된 퇴적물 기원이 명확하게 확인되는 청간 해변의 경우, 비교군으로 활용할 하천 퇴적물 시료를 천진천 최상류, 중류, 최하류 구간 3지점에서 채취하였다(그림 2).

### 3.2. 석영입자표면미세조직 관찰

퇴적물을 주로 구성하고 있는 석영입자의 전체적인 형태와 표면미세조직을 파악하기 위해 해변 퇴적물 시료에서

330개, 하천 퇴적물에서 90개, 총 420개의 석영 입자를 256 μm~1 mm 까지 입자 크기 범위로 제한하여 SMQ를 추출하고 SEM 분석을 실시하였다.

시료의 전처리에는 Vos *et al.* (2014)이 제시한 과정을 따랐다. 먼저 시료를 60°C에서 건조하고, 실체현미경(Nikon, SMZ18)을 이용하여 석영 입자를 시료당 최소 30개 이상 추출하였다. 추출한 석영 입자는 탄산염을 제거하기 위해 15%의 염산에서 10분간 가열한 후 증류수를 이용하여 3~4회 세척하였다. 그 후 50 g/L의 피로인산나트륨(tetrasodium pyrophosphate)에서 10분간 가열하여 부착 입자들을 분산시키고, 다시 증류수로 3~4회 세척한 뒤 60°C에서 건조하였다. 건조된 석영 입자는 탄소테이프에 고정된 후, SEM 분석을 위해 강원대학교 내의 강원 연계형 융합 이미징 특화센터(KCSI, Kangwon Center for Systems Imaging)의 이온

코팅기(SPT-20, COXEM)를 이용하여 5 mA에서 300초간 백금(Pt)으로 도포하였다. 그 후 SEM(CX-200TM, COXEM)을 이용하여 관찰 및 이차전자 이미지(SE; secondary electron) 데이터를 생성하였으며, 관찰 시 가속 전압은 20 kV, 전자빔의 크기(spot size)는 13-16 pA, 렌즈와 물체와의 거리(working distance)는 5 mm로 분석을 진행하였다. Vos *et al.* (2014)이 제시한 석영입자표면미세조직 분류 기준을 이용하여 총 34종의 표면미세조직(물리적, 화학적, 복합적 기원 표면미세조직 각각 19종, 8종, 7종)을 구분하였다(표 1).

윤곽선(outline)은 Vos *et al.* (2014)에서 제시된 분류를 따라 각형 윤곽선(angular outline), 아각형 윤곽선(sub-angular outline), 원형 윤곽선(rounded outline)으로 분류하였다. 이 분류는 모서리의 마모 정도를 기준으로 하여 정성적으로 결정되었다. 그림 3a, 3d와 같이 모서리가 완전히 보존되어 면과 면 사이의 구분이 확실할 경우 각형 윤곽선으로 분류하며, 그림 3b, 3e의 경우처럼 모서리가 조금이라도 마모된 경우를 아각형 윤곽선으로 분류하였다. 원형 윤곽선은 모서리가 완전히 마모되어 면과 면의 구분이 없어져 자연스럽게 이어진 입자의 모습을 나타낸다(그림 3c, 3f). 이러한 분류법은 아각형 윤곽선 조직에 다수의 입자가 해당하기 때문에 이 범위 내에서 상세한 구분에는 불리한 측면이 존재하지만, 서로 극단에 있는 각형 윤곽선과 원형 윤곽선을 보다 명확하게 구분할 수 있고 윤곽선의 관찰 빈도를 통해 석영입자가 겪은 마모 정도 및 운반 과정을 평가할 수 있다는 장점을 지닌다.

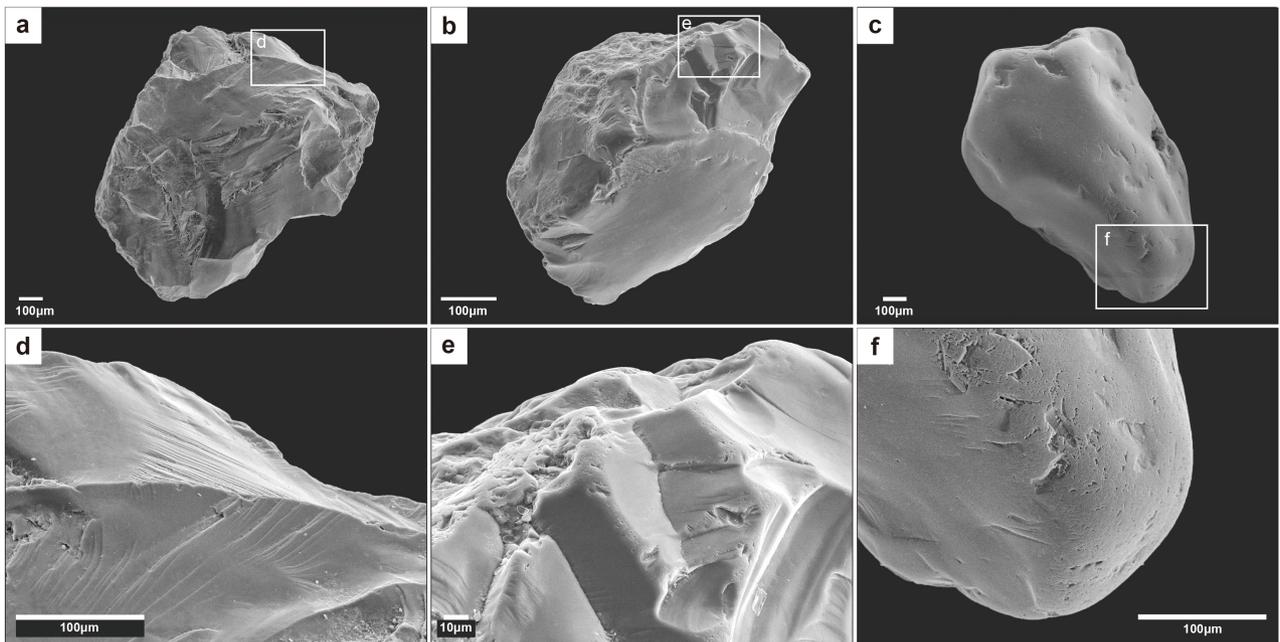
### 3.3. 통계분석

기존 연구들에서 추정된 대로 시료채취 시기인 4월 동안 연안류의 방향이 남동쪽으로 구성된다고 가정하면 이에 따른 SMQ 변화가 나타날 가능성이 있다(그림 1). 따라서 각 해빈의 북쪽 끝단 지점을 기준으로 시료채취 지점의 거리를 확인하였으며, IBM SPSS Statistics 26 소프트웨어를 이용하여 그 거리와 모든 종류의 SMQ 관찰 빈도 사이의 상관관계를 분석하였다(표 1). 표본의 크기가 충분하지 않아 정규분포를 보이지 않기 때문에 스피어만 상관계수(Spearman correlation coefficient)를 이용하였다. 각 변수는 표준화(standardization)하여, 평균이 0이고 표준편차가 1인 표준 정규분포로 변환한 후 사용하였다. 추가로 퇴적물의 지점별 SMQ 결과를 이용하여 계층적 군집 분석인 Ward 방법으로 유클리드 거리(Euclidean distance)를 산출하여 지점 간 유사성을 평가하였다.

## 4. 연구결과

### 4.1. 석영입자표면미세조직 분석결과

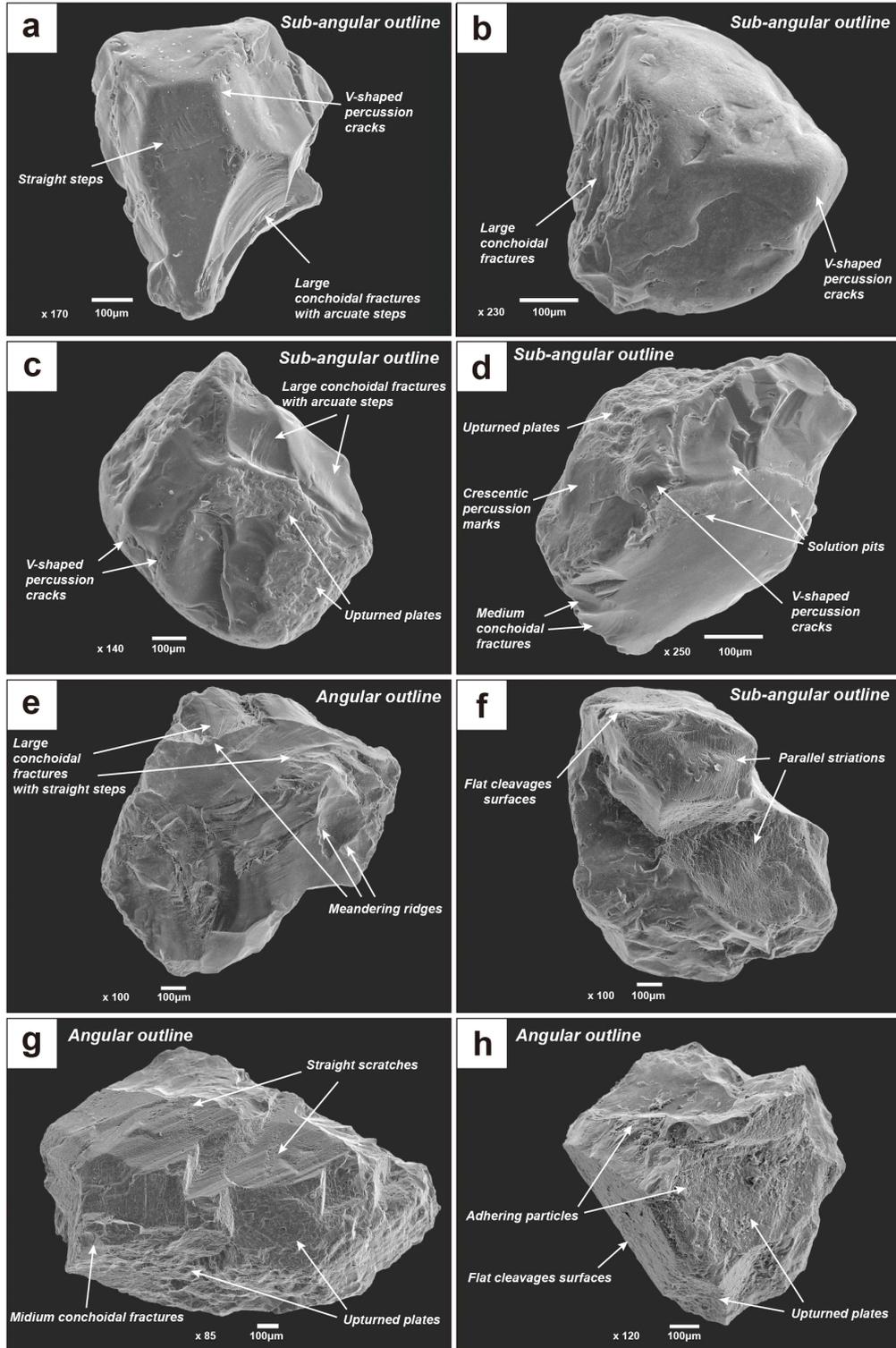
다양한 SMQ 중 가장 주요하게 인식되고 있는 종류 중 하나인 윤곽선의 경우, 세 해빈 모두에서 아각형 윤곽선이 평균 80% 이상으로 우세하게 나타난다는 공통점을 보인다. 해빈 환경 내부로 하천의 직접적 유입이 우세하지 않은 화진포와 송지호 해빈에서는 다양한 크기로 발달한 조개껍데기 형태의 패각상 파쇄면(conchoidal fractures; 그림 4a,



**Fig. 3.** SEM images displaying the classification criteria for outlines. (a, d) angular outline. (b, e) sub-angular outline. (c, f) rounded outline.

4b, 4c, 4d, 4e, 4g, 5a)이 매우 흔하게 관찰되나 중간 크기의 패각상 파쇄면(*medium conchoidal fractures*; <math><100 \mu\text{m}</math>)이 가장 우세하게 관찰되었다. 또한, 패각상 파쇄면 내부

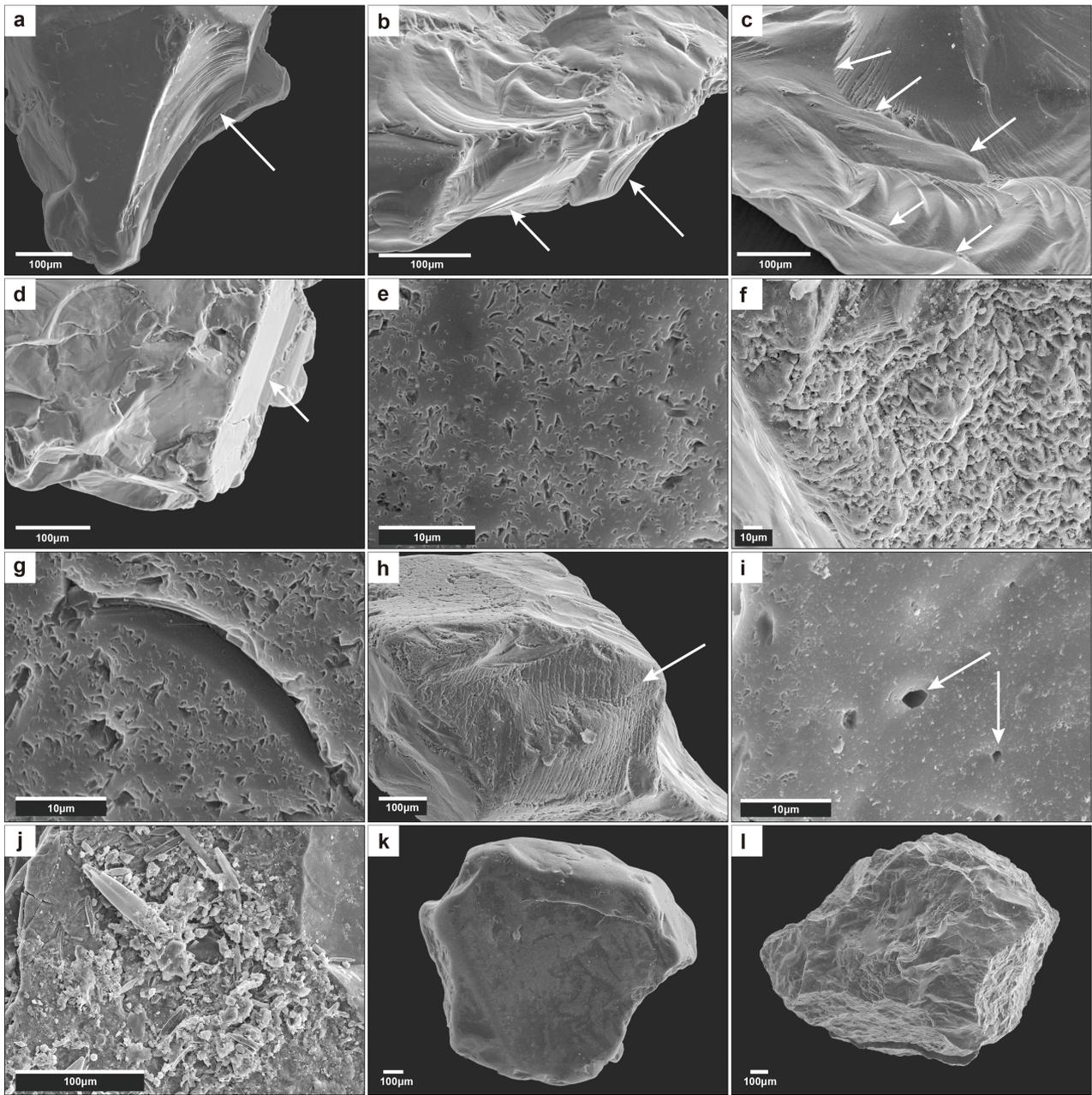
에서 흔히 관찰되는 직선형 내지 곡선형 계단(*straight/arcuate steps*; 그림 4a, 4c, 4e, 5b) 조직은 30~50%의 빈도로 관찰된다. 반면, 곡선형 능구조(*meandering ridges*; 그림



**Fig. 4.** Low-magnification SEM images showing various SMQ in the East coast. (a, b) Hwajinpo beach. (c, d) Songjiho beach. (e, f) Cheonggan beach. (g, h) Cheonjin stream.

4c, 5c)는 연속된 패각상 파쇄면이 양측으로 이어져 형성되는 것으로 알려져 있으며(Vos *et al.*, 2014), 화진포와 송지호 해빈에서는 5% 내외로 관찰되었다. 기반 암석으로부터의 분리 혹은 석영입자에 가해진 강한 충격으로 인해 벽개면처럼 형성되는 평탄 벽개면(flat cleavage surfaces; 그림 4f, 4h, 5d)도 5% 내외로 관찰된다. 또한, 주로 수중환경에서 입자 간 충돌로 형성되는 것으로 잘 알려진 V-형 충돌흔(v-shaped percussion cracks; 그림 4a, 4b, 4c, 4d, 5e)은 거

의 모든 입자에서 관찰되었다. 무질서 편립(upturned plates; 그림 4c, 4d, 4g, 4h, 5f) 미세조직은 두 해빈에서 모두 50% 이상 발달한다. 초승달형 충돌흔(crescentic percussion marks; 그림 4d, 5g) 역시 입자 간 충돌로 형성되는 조직이며, V-형 충돌흔보다 상대적으로 더 강한 충격 혹은 반복된 충격으로 인한 패각상 파쇄면 미세조직의 초기 단계로도 알려져 있다(Vos *et al.*, 2014). 이 미세조직은 화진포와 송지호 해빈 시료채취 지점에 따라 20~60%까지 다양한 비율로 관찰



**Fig. 5.** Various types of SEM in the East coast. (a) large conchoidal fracture. (b) medium conchoidal fracture and straight/arcuate steps. (c) meandering ridges. (d) flat cleavage surface. (e) v-shaped percussion cracks. (f) upturned plates. (g) crescentic percussion mark. (h) parallel striations. (i) solution pits. (j) adhering particles. (k) low relief. (l) high relief.

된다. 끌림 운반에 의해 형성된 한 방향의 선형 흔적인 평행 조선(parallel striations; 그림 4f, 5h) 조직은 송지호 해변의 한 지점에서만 관찰되었다. 추가로 미세 용해소(solution pits; 그림 4d, 5i) 조직은 pH 8 이상의 환경에서 용해작용에 의해 형성된 조직으로 보고되었으며(Manickam and Barbaroux, 1987), 두 해변 모두에서 50% 이상으로 비교적 흔하게 관찰된다. 또한, 표면의 거칠기를 의미하는 표면요철(relief)은 대부분의 석영 입자에서 중간 표면요철(medium relief; 그림 5k)을 보였지만, 5% 내외의 입자에서는 높은 표면요철(high relief; 그림 5l)을 나타내었다.

전술한 바와 같이 화진포와 송지호 해변은 유사한 특징을 보이지만 청간 해변은 상대적으로 큰 차이를 보인다(그림 6). 청간 해변에서의 경우, 평탄 벽개면, 무질서 편립, 평행 조선, 높은 표면요철 미세조직이 상대적으로 많이 관찰되며, 반대로 작은 크기 및 중간 크기의 패각상 파쇄면, 미세 용해소, 낮은 표면요철은 미세조직은 상대적으로 드물게 나타난다. 특히, 청간 해변 남부에 위치한 CG 4 지점에서는 다른 청간 해변 시료채취 지점들과는 다르게 각형 운

곽선은 관찰되지 않았고 원형 운곽선이 증가하는 경향이 뚜렷하며, 주로 큰 크기의 패각상 파쇄면(large conchoidal fractures; >100 μm) 미세조직이 형성되어 있는 특징이 나타난다. 또한, 초승달형 충돌흔도 이번 연구 전체 시료 중 가장 높은 비율을 보여주었으며, 부착 입자(adhering particles; 그림 5j)는 전혀 관찰되지 않는 것이 특징적이다(그림 6).

한편, 천진천은 해변 퇴적물과는 다른 특징을 가진다. 각형 운곽선이 약 70%로 지배적이며, 곡선형 계단구조, 부착 입자 역시 천진천 시료에서 높은 비율로 산출된다. 반면, V-형 충돌흔 40% 이하로 해변 퇴적물에 비해 상대적으로 적게 형성되어 있다. 청간 해변에서 관찰되었던 패각상 파쇄면, 평탄 벽개면, 무질서 편립, 평행 조선, 미세 용해소, 표면요철의 경우에는 천진천에서도 유사한 비율로 관찰되어 해변과 하천 환경 사이의 차이를 보이지 않았다.

#### 4.2. 통계분석 결과

이번 연구에서 분석한 SMQ 관찰 빈도를 통해 시료채취

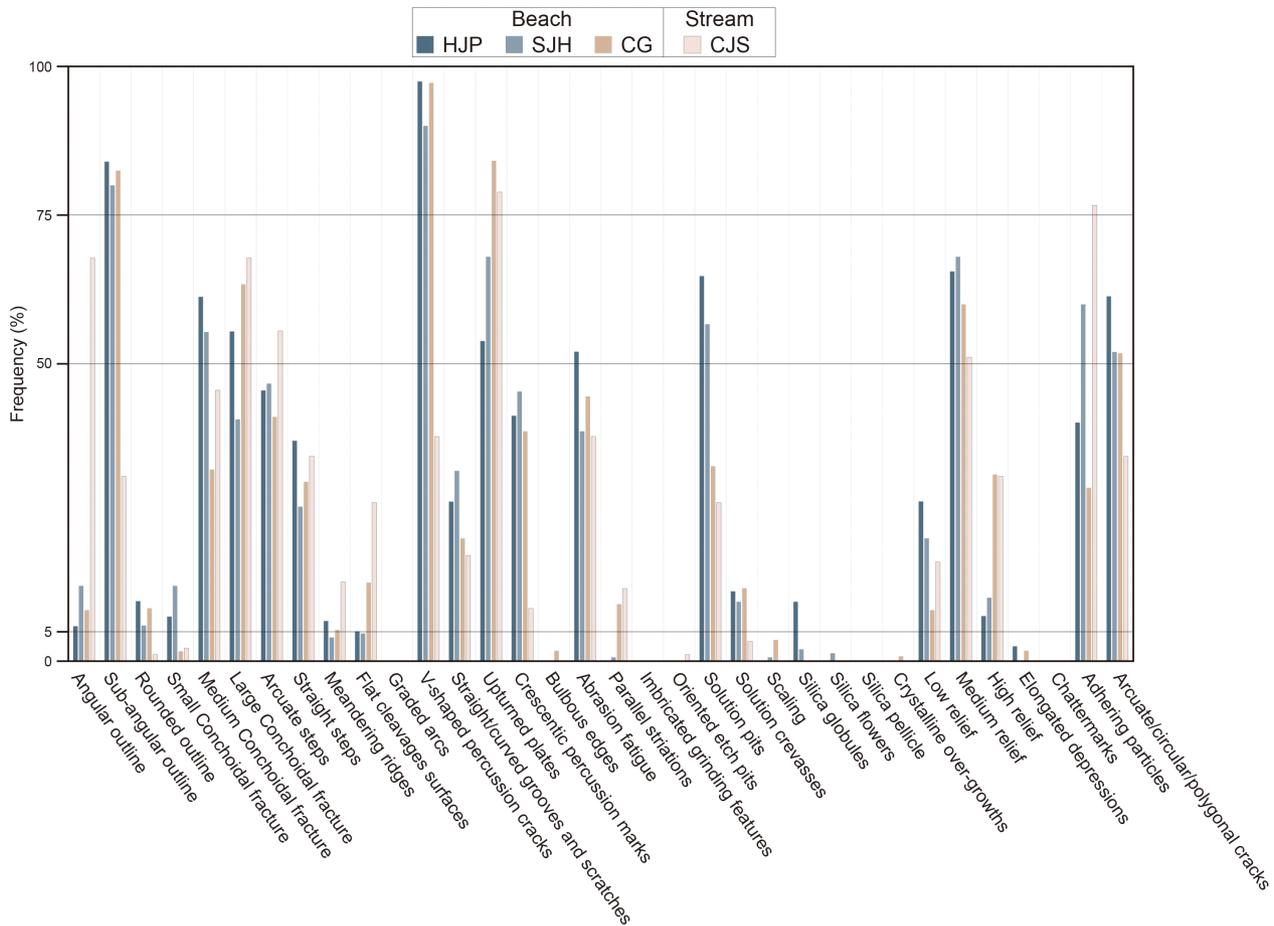


Fig. 6. Frequency distributions of SMQ results from the East coast sediment. The x-axis represents 34 SMQ classified according to the method proposed by Vos *et al.* (2014).

지점 간 군집분석을 실시하였다. 그 결과, 유클리드 거리 5를 기준으로 총 8개의 군집이 구분되었고(그림 7), 이들은 크게 해빈과 하천 환경으로 구분되었다.

세부적으로는, 천진천 상류에 해당하는 군집 1(CJS 1), 각각, 중류와 하류인 군집 2(CJS 2, CJS 3), 청간 해빈에서 북부 및 중부에 해당하는 군집 3(CG 1, CG 3)과 군집 4(CG 2), 청간 해빈의 가장 남부 지점에 해당하는 군집 5(CG 4)로 순차적으로 조합되었다. 이러한 군집분석 결과는 현재의 환경조건을 잘 반영한 결과로 판단할 수 있으며, 이번 연구에서 분석한 SMQ 자료의 높은 신뢰성을 암시한다. 또한, 군집 6(SJH 1, SJH 2)과 군집 7(HJP 1, SJH 3, HJP 2)은 화진포와 송지호 해빈의 북부와 중부 지점들로 조합되어 이들 시료에서 높은 유사성을 지시하였고, 마지막 군집 8(SJH 4, HJP 3)의 경우 화진포와 송지호 해빈의 남부 지점들로 별도의 특성을 지니는 것으로 분류되었다.

### 5. 토 의

하천 환경에서 퇴적물은 기원지에서 직접 공급되어, 상류에서는 짧은 운반 거리와 시간으로 인해 낮은 원마도를 보이나, 하류로 이동함에 따라 원마도가 향상된다(Mahaney, 2002; Li *et al.*, 2020). 또한, 얇은 해안 환경에 도달한 퇴적물은 원마도가 급격하게 증가한다는 사실이 확인되었다(Chandler, 1988). V-형 충돌흔은 수중환경에서 입자 간의 충돌에 의해 형성되는 표면미세조직으로, 저에너지의 하천 환

경의 석영에서는 50% 미만으로, 고에너지의 해빈 환경에서는 50% 이상 형성되는 것으로 잘 알려져 있다(Margolis and Kennett, 1971; Mahaney, 2002; Vos *et al.*, 2014; Bellanova *et al.*, 2016; Itamiya *et al.*, 2019; Madhavaraju *et al.*, 2022).

천진천 상류로부터 청간 해빈 남측지점까지의 퇴적물 운반과정에서 환경 변화에 민감하게 반응하는 윤곽선과 V-형 충돌흔 미세조직의 산출률 변화를 선형회귀분석을 통해 확인하였다(그림 8; 표 2). 이들 회귀식에서 계수는 윤곽선과 V-형 충돌흔의 변화율을 나타내며, 이는 회귀선의 기울기를 의미한다. 추가로, 운반거리에 따른 SMQ 산출 비율 변화의 경향성을 더욱 명확하게 파악하기 위해 운반거리와 SMQ와의 상관관계를 확인하였다(표 1). 상관분석 결과, 각형 윤곽선, 아각형 윤곽선, V-형 충돌흔 미세조직만이 해빈과 하천 지역 모두에서 공통적으로 운반거리가 증가함에 따른 상관성이 관찰되었다.

하천의 하류 방향으로 운반 거리가 증가함에 따라 각형 윤곽선은 감소하고, 아각형 윤곽선과 V-형 충돌흔은 증가하는 경향을 보인다(그림 8; 표 2 CJS). 이러한 관계의 상관 계수는 ±1로 매우 높으며, 하류방향으로 유의미한 변화 경향을 보이기 때문에, 윤곽선과 V-형 충돌흔은 흐름 방향을 지시하는 유력한 증거인 것으로 판단된다.

한편, 천진천과 직접 연결된 청간 해빈 내에서는 하구 지점부터 시작하여 남부 시료채취 지점에서의 SMQ 변화 경향성을 관찰할 수 있었고, 이러한 경향은 동해안 북부로부터 남동 방향으로 형성되는 연안류 흐름에 의한 결과로 해

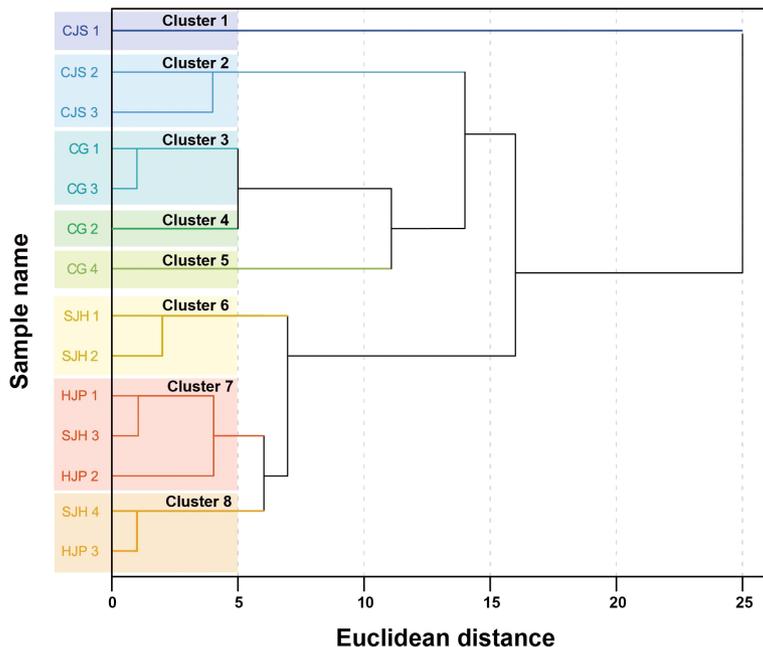


Fig. 7. Dendrogram showing cluster analysis based on SMQ results from the East coast sediment. Clusters are classified according to a Euclidean distance threshold of 5.

석된다. 또한, 천진천에서 청간 해변으로 환경이 변함과 동시에, SMQ의 변화는 같은 방향으로 나타나지만 기울기가 각각 -0.0093, 0.0098, 0.0108에서 -0.0716, 0.0381, 0.0397로 약 3~8배 가량 급격하게 증가한다(그림 8; 표 2 CG, CJS). 이러한 특징적인 경향은 하천보다 해변 내에서 SMQ 발달이 우세하다는 점을 반영하는 것으로 해석할 수 있으며, 동시에 연안류의 방향을 지시하는 증거로 판단된다. 하지만, 청간 해변에서 관찰되는 남쪽에서의 경향성은 하구에서 공급된 하천 퇴적물 특성이 해변 퇴적물과 혼합되어 나타난 경향일 가능성이 있기 때문에 이러한 특징이 화진포와 송지호 해변에도 적용될 수 있는지 확인이 필요하다.

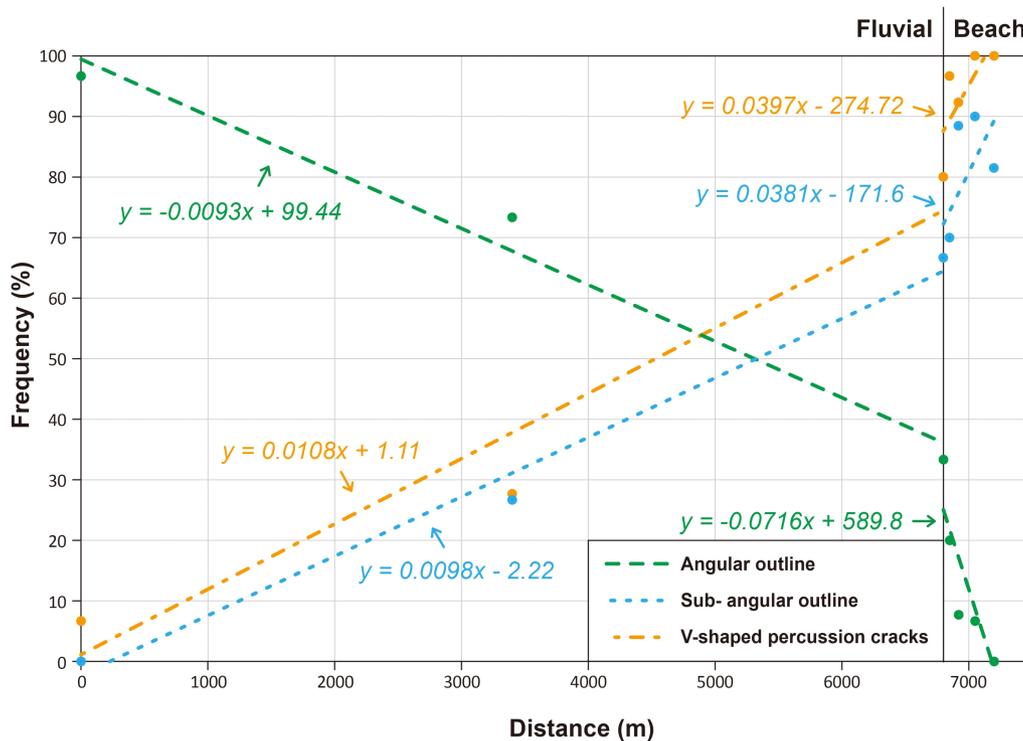
따라서 해변 인근 하천의 영향이 매우 혹은 비교적 적은 화진포와 송지호 해변에서도 SMQ와 각 해변의 북부에서 남부까지 연안류에 따른 운반거리 간의 관계를 분석하였다

(표 2 HJP, SJH). 그 결과, 하천이 없는 두 해변에서도 모두 일관된 SMQ의 경향성을 확인하였으며, 이는 앞서 확인한 천진천과 청간 해변에서 관찰된 바와 동일한 결과로써, 연안류 흐름의 방향성을 지시하는 유력한 지표로 평가된다. 이러한 해석은 하천이 없는 해변 환경에서는 SMQ의 변화가 연안류에 의해 주로 조절된다는 사실을 재확인하는 것이다(Davis Jr and Fitzgerald, 2019). 또한, 화진포와 송지호 해변에서 관찰된 SMQ 변화의 기울기가 청간 해변보다 상대적으로 낮은 이유는, 주변 혹은 인근 하천으로부터 새로운 하천 퇴적물의 공급이 적기 때문에 이미 상대적으로 성숙한 해변 퇴적물의 특성이 더 지배적으로 관찰되기 때문으로 해석할 수 있다.

천진천, 청간 해변, 그리고 직접적 하천이 없는 화진포와 송지호 해변 환경에서 관찰된 공통적인 SMQ의 변화 경향

**Table. 2.** The linear regression equation calculated through statistical analysis in study areas. with Y representing frequency of SMQ (%) and X denoting distance (m).

SMQ	Site			
	HJP	SJH	CG	CJS
Angular outline	$y=-0.006x+5.4523$	$y=-0.0088x+22.363$	$y=-0.0716x+589.8$	$y=-0.0093x+99.44$
Sub-angular outline	$y=0.0192x+79.553$	$y=0.0059x+72.764$	$y=0.0381x-171.6$	$y=0.0098-2.22$
V-shaped percussion cracks	$y=0.0035x+97.396$	$y=0.0084+82.231$	$y=0.0397-274.72$	$y=0.0108x+1.11$



**Fig. 8.** The regression line showing the frequency changes in SMQ depending on the transport distance from Cheonjin stream (0-6800 m) to Cheonggan beach (6800-7200 m).

성을 재검증하기 위해 추가적인 균집분석을 수행했다(그림 7). 이번 균집분석은 모든 시료채취 지점 간 SMQ 자료의 유사성을 평가하여 유사한 지점끼리 분류하는 방식으로 진행하였으며, 이 분석을 통해 청간 해변의 남측 지점은 균집 5로, 화진포와 송지호 해변의 남측 지점들은 균집 8로 분류되었다. 이 분류 결과는 연안류에 의한 해변 퇴적물 운반이 남쪽으로 지속적으로 발생하여, 모든 시료채취 지점들이 유사한 특성으로 수렴하고 있음을 나타낸다. 이는 앞서 언급한 각형 윤곽선, 아각형 윤곽선, V형 충돌흔 미세조직이 연안류에 의한 퇴적물 운반거리 및 환경 변화에 따른 성숙도 변화를 잘 반영하는 지표라는 점을 반복적으로 재확인시켜 주는 결과이다. 따라서 본 연구에서 관찰한 결과들은 연안류에 의한 퇴적물 이동이 SMQ 특성에 반영된다는 사실을 증명하며 향후 실질적인 연안류의 방향을 지시하는 수단으로 SMQ가 유용하게 활용될 수 있음을 시사한다.

## 6. 결론

SMQ 분석은 그동안 퇴적환경뿐만 아니라 퇴적물의 운반 경로를 추정하는 데 있어 유용하게 이용되어 왔다. 본 연구는 강원도 북부 동해안 고성군의 화진포, 송지호, 청간 해변을 대상으로 SMQ 분석을 적용하였다. 이들 해변은 규모가 상대적으로 작고, 여러 해변 사이에 크고 작은 하천이 발달하는 특징을 지니고 있다. 또한, 현재까지 연구를 통해 동해안 남동쪽 방향으로의 연안류가 추정되어 왔다. 하지만 이러한 연안류의 방향과 그에 의한 퇴적물 이동의 직접 증거는 아직까지 제시된 바가 없다. 이번 연구의 결과, 다양한 SMQ 중 각형 및 아각형 윤곽선, 그리고, V형 충돌흔 미세조직은 해변으로 직접 유입되고 있는 천진천 내 운반거리에 따라 변화하는 경향을 뚜렷하게 보여주었다. 이러한 경향성은 세 해변 모두에서 남동쪽으로 일관된 방향성을 나타낸다. 따라서 이러한 결과는 이들 SMQ가 연안류의 방향을 해석하는 데 유용하게 활용될 수 있다는 점을 강하게 시사한다. 추가로 하천의 영향이 적거나 없는 해변 환경에서의 SMQ 변화가 연안류에 의한 이동에 의해 크게 조절될 수 있다는 점을 고려하면, 향후 연안류에 의한 퇴적물 이동 양상의 파악에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

이 연구는 중견연구과제(NRF-2023R1A2C1006352)의 지원을 받아 수행되었으며, 부분적으로 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 지역지능화혁신 인재양성사업의 일환으로 수행되었다(RS-2023-00260267). 또한 정부(교육부)의 재원으로 한국기초과학지원연구원 국가연구시설장비진흥센터의 지원을 받아 수행되었다(2019R1A6C1010006).

## REFERENCES

- An, G.-M., 2013, Fluvial sediment Conditions and coastal erosion and deposition - A Case Study on the coastal inflow river in Gyeongsangbuk-do. *Coastal and Ocean*, 6, 32-35 (in Korean).
- Baek, S. and Jo, K.N., 2023, Surface microtextures of quartz grains and minor sedimentary components across the Paleolithic Jeongok-ri sediments, Yeoncheon, South Korea. *Journal of Quaternary Science*, 38, 1142-1158.
- Bellanova, P., Bahlburg, H., Nentwig, V. and Spiske, M., 2016, Microtextural analysis of quartz grains of tsunami and non-tsunami deposits - A case study from Tirúa (Chile). *Sedimentary Geology*, 343, 72-84.
- Chandler, R.J., 1988, The in-situ measurement of the undrained shear strength of clays using the field vane. *ASTM International West Conshohocken, PA, USA*, 1014, 13-44.
- Cho, Y.J. and Kim, I.H., 2019, Preliminary Study on the Development of a Platform for the Selection of Optimal Beach Stabilization Measures against the Beach Erosion - Centering on the Yearly Sediment Budget of Mang-Bang Beach. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 31, 28-39 (in Korean with English abstract).
- Choi, C.U., Lee, C.H., Oh, C.Y. and Son, J.W., 2009, Research on the Variation of Deposition & Accumulation on the Shorelines using Ortho Aerial Photos. *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science*, 17, 23-31 (in Korean with English abstract).
- Davidson-Arnott, R., Bauer, B. and Houser, C., 2019, Introduction to coastal processes and geomorphology. *Cambridge University press*, 139-180.
- Davis Jr, R.A. and Fitzgerald, D.M., 2019, *Beaches and coasts*. John Wiley & Sons.
- Eom, J.A., Choi, J.-K., Ryu, J.-H. and Won, J.-S., 2010, Monitoring of Shoreline Change using Satellite Imagery and Aerial Photograph : For the Jukbyeon, Uljin. *Korean Journal of Remote Sensing*, 26, 571-580 (in Korean with English abstract).
- Goldich, S.S., 1938, A study in rock-weathering. *The Journal of Geology*, 46, 17-58.
- Itamiya, H., Sugita, R. and Sugai, T., 2019, Analysis of the surface microtextures and morphologies of beach quartz grains in Japan and implications for provenance research. *Progress in Earth and Planetary Science*, 6, 1-14.
- Jin, H., Do, K.D., Chang, S.Y. and Kim, I.H., 2020, Field Observation of Morphological Response to Storm Waves and Sensitivity Analysis of XBeach Model at Beach and Crescentic Bar. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 32, 446-457 (in Korean with English abstract).
- Kang, S.W. and Lee, M.S., 2023, Development and Application of a Coastal Disaster Resilience Measurement Model for Climate Change Adaptation: Focusing on Coastal Erosion Cases. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 29, 713-723 (in Korean with English abstract).
- Kang, Y.K., Park, H.-B. and Yoon, H.S., 2010, Shoreline Changes Caused by the Construction of Coastal Erosion Control Structure at the Youngrang Coast in Sockcho, East Korea. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, 13,

- 296-304 (in Korean with English abstract).
- Kim, D.S. and Lee, G.-R., 2013, Long-term Changes of Shoreline at the East Coast in South Korea 1 - Central East Coast. *Journal of The Korean Geomorphological Association*, 20, 1-13 (in Korean with English abstract).
- Kim, D.S. and Lee, G.-R., 2015, Seasonal Changes of shorelines and Beaches on East Sea Coast, South Korea. *Journal of the Korean Geographical Society*, 50, 147-164 (in Korean with English abstract).
- Kim, G.H., Choi, S.P., Yook, W.S. and Song, Y.S., 2005, Coastline Change Detection Using CORONA Imagery. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 23, 419-426 (in Korean with English abstract).
- Kim, I.C., Lee, J.Y. and Lee, J.L., 2011, Generation Mechanism and Numerical Simulation of Rip Current at Haeundae Beach. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 23, 70-78 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.-W., 1999, A Study of Channel Slope and Grain Size of Coarse Bed Materials in Streams in the Youngseo and Youngdong Area, Korea. *Journal of the Korean Geographical Society*, 34, 355-370 (in Korean with English abstract).
- Kim, M.J., Kim, D.J., Jun, S.-C. and Lee, J.H., 2021, A Study on Analysis of Freshwater-saltwater Interface in the Aquifer around Hwajinpo Lagoon on the Eastern Coast of Korea. *Economic and Environmental Geology*, 54, 699-707 (in Korean with English abstract)
- Krinsley, D.H. and Doornkamp, J.C., 2011, Atlas of quartz sand surface textures. Cambridge University press.
- Lee, H.-S. and Kim, I.-H., 2007, Investigation and Analysis of Shoreline Change using DGPS. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 10, 1-10 (in Korean with English abstract).
- Li, Z., Yu, X., Dong, S., Chen, Q. and Zhang, C., 2020, Microtextural features on quartz grains from eolian sands in a subaqueous sedimentary environment: A case study in the hinterland of the Badain Jaran Desert, Northwest China. *Aeolian Research*, 43, 100573.
- Lim, H.-S., Kim, M.J., Lee, H.-J. and Sim, J.S., 2017, Variability of wave-induced current due to high waves in Anmok. In: 2017 Autumn Annual Conference, The Korean Society of Oceanography, 37 p (in Korean).
- Lim, H.-S. and Lee, H.-J., 2017, Research on Coastal Erosion Process and Sediment Transport Mechanism. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 10, 1737-1738 (in Korean).
- Madhavaraju, J., Armstrong-Altrin, J.S., James, R.A. and Hussain, S., 2021, Palaeoenvironment and provenance signatures inferred from quartz grain surface features: A case study from Huatabampo and Altata beaches, Gulf of California, Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 111, 103441.
- Madhavaraju, J., Armstrong-Altrin, J.S., Selvaraj, K. and James, A.R., 2022, Microtextures on quartz grains from the Gulf of Mexico and the Mexican Pacific coastal sediments: Implications for sedimentary processes and depositional environment. *Journal of Palaeogeography*, 11, 256-274.
- Maeng, J.H., Kim, T.Y. and Lee, H.M., 2022, A Study on Environmental Impact Assessment Guidelines for Marine Environments in Harbor Construction Projects. *Journal of Environmental Impact Assessment*, 31, 141-160 (in Korean with English abstract).
- Mahaney, W.C., 2002, Atlas of sand grain surface textures and applications. Oxford University Press, USA.
- Manickam, S. and Barbaroux, L., 1987, Variations in the surface texture of suspended quartz grains in the Loire River: an SEM study. *Sedimentology*, 34, 495-510.
- Margolis, S.V. and Kennett, J.P., 1971, Cenozoic paleoglacial history of Antarctica recorded in subantarctic deep-sea cores. *American Journal of Science*, 271, 1-36.
- Migoń, P., Kasprzak, M. and Woo, K.S., 2019, Granite landform diversity and dynamics underpin geoheritage values of Seoraksan Mountains, Republic of Korea. *Geoheritage*, 11, 751-764.
- Ministry of Ocean and Fisheries, 2022, Coastal Erosion Monitoring Report (in Korean).
- Nukazawa, K., Itakiyo, T., Ito, K., Sato, S., Oishi, H. and Suzuki, Y., 2021, Mineralogical fingerprinting to characterize spatial distribution of coastal and riverine sediments in southern Japan. *Catena*, 203, 105323.
- Oh, S.-H., Jeong, W.-M., Lee, D.Y. and Kim, S.I., 2010, Analysis of the Reason for Occurrence of Large-Height Swell-like Waves in the East Coast of Korea. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 22, 101-111 (in Korean with English abstract).
- Park, S.J., Seo, H.J., Park, S.M., Park, S.H., Ahn, I.J. and Seo, G.S., 2021, The Analysis of Coastal Erosion and Erosion Impact Assessment in the East Coast. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 33, 246-256 (in Korean with English abstract).
- Park, T., Lee, S., Ko, Y., Kwon, S., Hong, J. and Jo, K., 2023, A study on sediment characteristics and transportation processes of carbonate sand grains in Gimnyeong coastal dunes, Jeju Islands, Republic of Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 59, 423-439 (in Korean with English abstract).
- Prodger, S., Russell, P. and Davidson, M., 2017, Grain-size distributions on high-energy sandy beaches and their relation to wave dissipation. *Sedimentology*, 64, 1289-1302.
- Reddad, H., El Talibi, H., Perri, F., El Moussaoui, S., Zerdeb, M.A., Zaghoul, M.N. and Critelli, S., 2016, Textural and compositional controls on modern fluvial and beach sands of Mediterranean coastal Rif belt (Northern Rif, Morocco). *Italian Journal of Geosciences*, 135, 336-349.
- Schwartz, M., 2006, Encyclopedia of coastal science. Springer Science & Business Media, 705.
- Shim, K.T., Cho, B.S. and Kim, K.H., 2022, Prediction of Beach Profile Change Using Machine Learning Technique. *Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, 42, 639-650. (in Korean with English abstract).
- Shin, I.C., Akatsuka, T., Azumi, H., Ao, L., Amahashi, N., Oyagi, M., Ishida, N., Goto, N., Maruo, M., Yagi, A., Seike, Y., Lee, S.H., Yoon, S.A., Choi, J.K., Byeon, Y.W., Lee, B.M., Mitamura, O. and Cho, K.J., 2020, Grain size distribution and chemistry of the brackish Lake sediment in Korea. *Environmental Engineering Research*, 26, 200365.
- Shin, S.W., Cho, H.S., Kang, H.-C., Lim, H.S., Kim, H.J., Cheong, D.K., Paik, I.S., Kim, J.S., Park, Y.L. and Jo, K.-N., 2020,

- Assessment of the value and development of geological heritages in Gangwon Province, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 56, 683-702 (in Korean with English abstract).
- Song, B., Yi, S.H., Jia, H., Nahm, W.-H., Kim, J.-C., Lim, J.S., Lee, J.-Y., Sha, L., Mao, L., Yang, Z., Nakanishi, T., Hong, W. and Li, Z., 2018, Pollen record of the mid- to late-Holocene centennial climate change on the East coast of South Korea and its influential factors. *Journal of Asian Earth Sciences*, 151, 240-249.
- The Province of Gangwon, 2021, Coastal Erosion Monitoring of East Sea Report (in Korean).
- Tunwal, M., Mulchrone, K.F. and Meere, P.A., 2018, Quantitative characterization of grain shape: Implications for textural maturity analysis and discrimination between depositional environments. *Sedimentology*, 65, 1761-1776.
- Vos, K., Vandenberghe, N. and Elsen, J., 2014, Surface textural analysis of quartz grains by scanning electron microscopy (SEM): From sample preparation to environmental interpretation. *Earth-Science Reviews*, 128, 93-104.
- Yum, J.-G., Takemura, K., Yu, K.-M., Nahm, W.-H., Hong, S.-S., Yang, D.-Y., Katsuki, K. and Kim, J.Y., 2015, Late Quaternary environmental changes of the Hwajinpo and Songjiho lagoons on the eastern coast of Korea. *Earth Surface Processes and Environmental Changes in East Asia: Records From Lake-catchment Systems*, 163-199.