

제주도 김녕 해안사구 퇴적물의 특성 및 탄산염 모래 입자의 운반작용 연구

박태영 · 이성훈 · 고용수 · 권순율 · 홍종철 · 조경남[†]
강원대학교 지질학과

A study on sediment characteristics and transportation processes of carbonate sand grains in Gimnyeong coastal dunes, Jeju Islands, Republic of Korea

Tae-yeong Park · Sung-hoon Lee · Yongsu Ko · Sunyoul Kwon · Jongcheol Hong · Kyoung-nam Jo[†]
Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea

요 약

제주도 구좌읍에 위치한 김녕 해안사구는 국내에 분포하는 해안사구들 중 지형지질학적 희귀성 및 특이성이 매우 높게 인정되는 풍성퇴적지형이다. 김녕 해안사구에 대한 기존 연구 대부분은 사구지형의 변화 및 해안사구 형성 시기에 초점이 맞춰져 왔다. 이 연구에서는 김녕 해안사구의 퇴적물 이동과정과 탄산염 구성입자의 종류별 분별작용에 대해 논의하고, 보다 상세한 퇴적학적 과정과 요인을 규명하고자 하였다. 이를 위해 기원지인 김녕 해변으로부터 내륙 2 km 지점까지 현생 표층퇴적물을 채취하여 체분석, 구성입자 판별 및 포인트 카운팅(point counting), 주사전자현미경 이차전자이미지 분석(SEM; Scanning Electron Microscope), X-선 회절분석(XRD; X-ray Diffraction analysis)을 수행하였다. 입도분석 결과, 전체적으로 1.0~2.7 Φ 범위의 세립질 내지 중립질 모래 입자가 약 81~92%를 차지하는 것으로 나타났다(평균입도 2.08 Φ). 해안사구 영역 내에서 평균입도는 큰 변화를 보이지 않았지만, 분급은 내륙 쪽으로 갈수록 더 양호해지고, 왜도는 점진적으로 더 강한 음성 왜도를 나타내어 세립질 입자가 우세해지는 경향이 확인되었다. 이번 연구의 가장 주요한 연구결과로서 사구의 이동방향을 따라 탄산염 구성입자의 분별현상이 뚜렷하게 나타났으며, 이의 원인은 주요 구성입자인 홍조류와 연체동물 생체설 입자 사이의 형태적 특징에 기인한 운반 효율 차이로 해석된다. 따라서 이번 연구의 결과는 기존의 해양환경에 초점이 맞춰져 있던 탄산염 생체설 입자의 형태에 따른 유체역학적 거동 특성이 제주도 현생 풍성환경에도 적용될 수 있음을 시사한다.

주요어: 해안사구, 탄산염 퇴적물, 입도분석, 김녕, 제주도

ABSTRACT: Gimnyeong coastal dunes in Gujwa-eup, Jeju Islands, are a very important aeolian sedimentary landforms based on its rarity and specificity among coastal dunes distributed in Korea. Most of the previous researches on Gimnyeong coastal dunes have been focused on the development of large scale topography and the time periods of dune formations. In this study, authors have tried to delineate the sediment migration processes and the fractionation of carbonate particles in Gimnyeong coastal dunes. For this purpose, the sediment samples were collected from the present dune surface along a sideline between Gimnyeong Beach and the location of 2 km inland. These samples have been used to be performed sieve analysis, particle identification and point counting, scanning electron microscope (SEM) and X-ray diffraction analysis (XRD). As a result of the particle size analysis, it was found that fine to medium sand grains of 1.0 to 2.7 Φ accounted for about 81 to 92% (the mean size of 2.08 Φ). While the mean size did not show a significant change in the dune area, the sorting became better toward the inland, and the skewness gradually showed negative skewness, indicating the relative dominance of fine grains in the landward. Most importantly, the separation of particles along the movement direction of the dunes was clearly observed, and this is attributed to the inherent morphological structure between red algae and mollusks which induced the difference in transport efficiency. Therefore, the results of this study suggest that the characteristics of hydrodynamic behaviors according to the shape of carbonate bioclastic particles can be also applied to the current aeolian deposits of Jeju Islands.

Key words: coastal dune, carbonate sediments, particle size analysis, Gimnyeong, Jeju Islands

[†]Corresponding author: +82-33-250-8555, E-mail: kjo@kangwon.ac.kr

1. 서론

해안사구는 해변에 퇴적되어 있던 모래 크기의 입자들이 해풍을 통해 내륙 쪽으로 충분히 공급될 수 있는 조건의 해안환경에서 발달하는 풍성지형이다. 해안사구의 형태와 규모는 기원 입자의 종류와 분포, 퇴적물 유입, 바람 체제, 기후조건 및 식생 피복 등 여러 다양한 요인들의 조합에 의해서 조절된다(Lancaster, 1982; Nordstrom *et al.*, 1990; Hesp, 2000; Pye and Tsoar, 2008). 육성환경과 해양환경 사이의 공간적 전환지점인 해안사구는 그 특성으로 인해 기후, 해수면 변동, 토양화 등에 민감하게 반응하며(e.g., Yizhaq *et al.*, 2007; Muhs *et al.*, 2009; Tsoar *et al.*, 2009), 이에 더해 독특한 생태계를 형성하고 높은 생물학적 다양성을 갖는 것이 특징이다(Martínez *et al.*, 2004). 또한, 해안사구는 천연 제방 및 저수지 형성 등 인간 활동을 위한 공간적 기반을 제공할 뿐만 아니라, 농업, 광업 및 관광 자원으로 활용되는 등 사회경제적으로도 중요한 의미를 지니는 자연지형이다(Carter, 1988).

해안사구는 열대지역에서부터 극지방까지 전세계 대부분의 연안지역에서 흔히 발견되는데, 국내의 경우에도 2016년 전국 해안사구조사 관리목록에 등재된 사구만 총 189개이다(National Institute of Ecology, 2017). 이에 따라 국내에서도 해안사구에 대한 기원을 규명하기 위한 지형지질학적 연구들이 수행되어 왔다. 예를 들어, 해안사구의 형성시기 및 진화에 대한 연구로는 제주도 협재, 신양, 김녕 및 월정지역과 서해안의 신두리 및 만리포 해안사구를 대상으로 광여기루미네선스(Optically Stimulated Luminescence) 및 방사성탄소 연대측정 연구가 진행된 바 있다(Seo, 2005; Woo and Kim, 2005; Park and Son, 2007; Ji *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2010; Choi *et al.*, 2014). 또한, 제주도 사계지역과 전국 해변 및 해안사구를 대상으로 지형과 퇴적물 특성에 관해 연구된 사례가 있으며(Seo and Son, 2006; Rhew and Kang, 2020), 그 외 해안사구의 기원물질이라고 할 수 있는 해변 퇴적물의 구성성분 및 계절변화에 대한 연구도 수행된 바 있다(Ji and Woo, 1995; Youn and Kim, 2011).

협재, 김녕, 월정지역 등 제주도에 위치한 해안사구는 국내에서 보고된 사례 중 탁월풍에 가장 큰 영향을 받은 것으로 평가되고 있으며(Rhew and Kang,

2020), 퇴적물을 공급하는 주요 기원지가 극히 뚜렷하게 인식되는 특징을 지닌다. 무엇보다도 이 지역의 해안사구들은 주변 해변지역에서 생성된 냉수성 탄산염 생쇄설 입자를 매우 우세하게 공급받았다는 것이 가장 주요한 특징으로서(e.g., Ji and Woo, 1995), 한반도 육상지역에서 발견되는 다른 해안사구들과는 뚜렷하게 차별화된다. 또한, 김녕 해안사구는 인근 지역에 발달한 천연기념물이자 유네스코 세계자연유산에 포함된 중요 지질명소인 용천동굴과 김녕사굴 상부 지표를 피복하여 세계적으로 매우 희귀한 유형의 자연유산을 형성하는데 크게 기여한 지표지형으로 여겨지고 있다(Jeju Special Self-Governing Province, 2007).

위와 같이 희귀성 및 특이성 측면에서 중요한 의미를 지니는 김녕 해안사구에 대한 기존 연구들은 대부분 중규모 이상의 사구지형 발달 및 해안사구 형성 시기에 초점이 맞춰져 왔다(e.g., Park *et al.*, 2004; Ji *et al.*, 2008; Park and Park, 2009). 이의 예로서 김녕 해안사구의 기원에 관한 연구결과를 들 수 있으며, 그 결과에 의하면 이 지역의 해안사구는 해수면의 위치가 현재와 비슷해진 약 6,000년 BP 이후 탄산염 퇴적물이 활발히 생성되면서 발달하였다(Ji *et al.*, 2008). 이와 같은 기존 연구들에도 불구하고 현재까지 김녕 해안사구를 구성하는 탄산염 퇴적물의 이동과 분별에 관한 상세한 연구결과는 보고된 바 없다.

이번 연구의 목적은 제주도 북동부 탄산염 해안사구의 퇴적물 이동과정과 분별에 대해 논의하고 보다 상세한 퇴적학적 과정과 요인을 파악하는 데 있다. 이를 위해 김녕 해안사구의 기원지인 해변으로부터 내륙의 배후사구(hind dune)까지 표층 시료를 연속적으로 채취 및 분석하여 퇴적물 이동과정에 영향을 미친 운반 역학적 요인을 설명하고자 하였다.

2. 연구지역

김녕 해안사구는 제주도 북동부 연안지역에 분포하고 있으며, 행정구역상 제주특별자치도 제주시 구좌읍 김녕리, 경위도상으로는 북위 33°31'36"~33°33'38", 동경 126°45'27"~126°48'02" 지점에 위치한다(그림 1). 또한, 김녕 해안사구의 분포는 천연기념물 제466호이자 유네스코 세계자연유산에 속하는 중요

지질문화재인 용천동굴과 김녕사굴의 상부 지표를 폭넓게 가로지르고 있다.

연구지역으로부터 약 30 km 떨어진 지점에 위치한, 제주기상대에서 측정한 1923-2022년의 연평균 기온은 15.3°C이며, 전 지구적인 온난화 경향과 유사하게 점진적으로 상승하는 추세를 보이고 있다 (Korea Meteorological Administration, 2023; 그림

2a). 월별로 가장 높은 온도를 보이는 달은 8월로 26.5°C이고, 가장 낮은 온도를 보인 달은 5.3°C인 1월이다(그림 2b). 동일 기간의 연평균 강수량은 1,446 mm이고, 기온과 마찬가지로 8월이 244 mm로 가장 높은 강수량을 보인 반면, 강수량이 가장 적은 달은 12월로 57 mm를 기록하였다. 연평균 풍속은 4.1 m/s이며, 기온이 상승함에 따라 점진적으로 감소하는

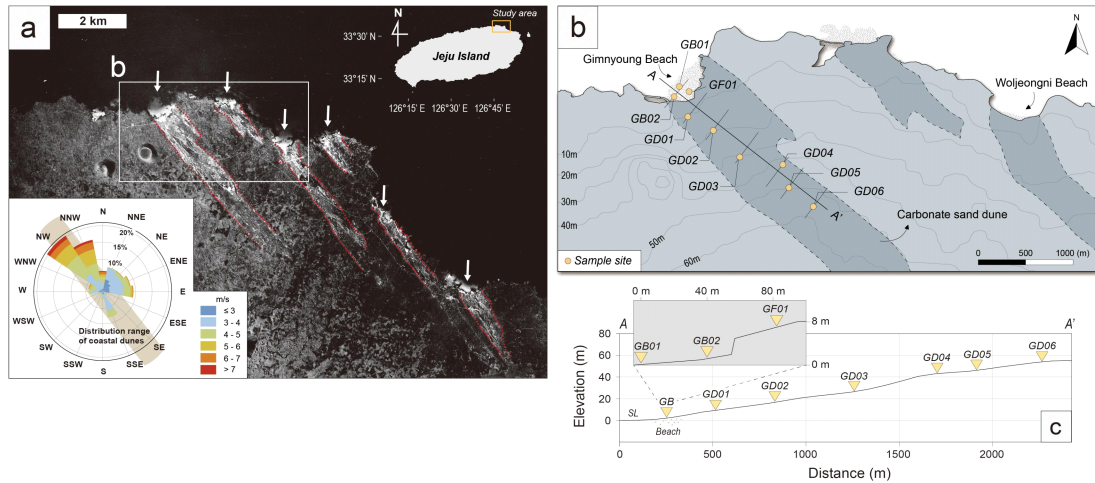


Fig. 1. Geographical setting of the study area and sampling locations in Gimnyeong coastal dunes. (a) Aerial photograph of the study area in 1969 (modified from National Geographic Information Institute, 2016). The inset figure shows a rose diagram of wind directions. Colour in the diagram indicates levels of wind velocity. Note that it is superimposed by distribution range of coastal dunes. (b) A topographical map of sampling sites. (c) A profile view of transect A-A' in (b).

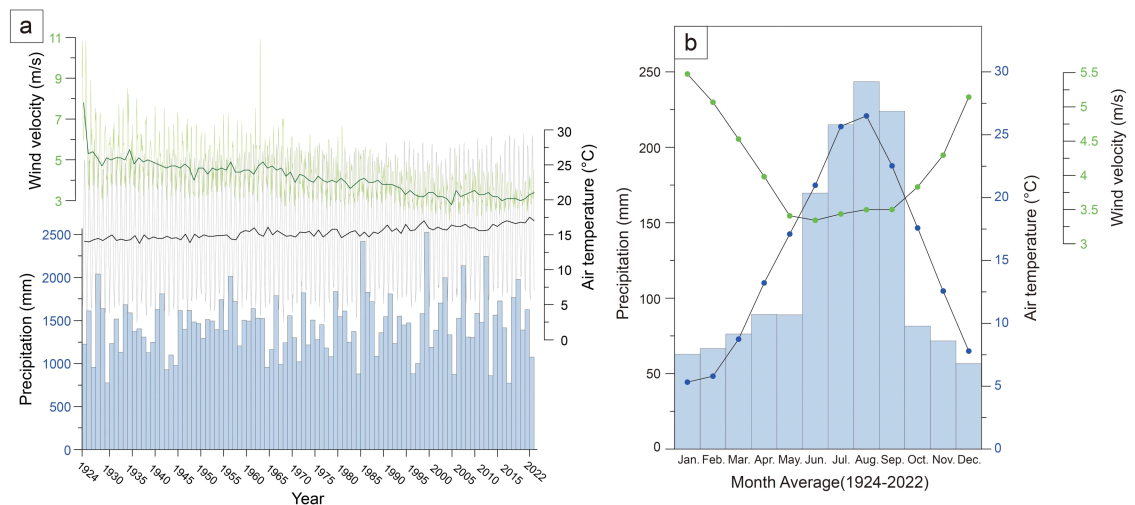


Fig. 2. The plots of weather conditions recorded at Jeju meteorological observatory from 1924 to 2022 (Korea Meteorological Administration, 2023). Each graph shows time-series data during total period (a) and data for monthly mean values (b), respectively.

추세를 뚜렷하게 보인다. 가장 높은 풍속을 보이는 달은 1월로 5.5 m/s이며, 이때의 최다풍향은 북서풍이다. 이에 반해 최저 풍속을 보인 달은 3.3 m/s의 6월로, 동풍이 최다풍향이다. 전체적인 풍향은 북북서와 북서 방향이 약 36%로 가장 우세하며, 풍속 또한 해당 풍향일 때 가장 높다(그림 1a).

제주도 북동부 연안지역은 내륙 쪽으로 완만한 상향경사를 보이며(그림 1b), 하천이 부재하다는 지형적 특징을 가진다. 해당 지역은 김녕 해안사구 뿐만 아니라, 독립적인 5갈래의 해안사구가 분포하고 있는데, 이들은 모두 개별 해변으로부터 운반되어 온 모래가 내륙 쪽으로 이동하여 퇴적된 형태로 나타난다(그림 1a). 이 해안사구들은 북서-남동 방향으로 서로 거의 평행하게 배열되어 있는 특징을 보이며, 이러한 분포 방향은 최대 풍속 시기의 가장 우세한 풍향과 일치한다(그림 1a). 이 중 김녕 해안사구는 길이 약 6 km, 너비 1 km 이하의 제주도 최대 규모의 탄산염 해안사구로서, 지형적 특성을 고려했을

때, 해변과 전사구(foredune) 및 배후사구로 구분할 수 있다. 해변과 전사구는 현재 김녕해수욕장 내에 위치하는데, 해변은 퇴적물이 파도의 영향을 지속적으로 받고 있는 영역에 해당된다(그림 3a). 이에 반해 전사구는 해안선으로부터 내륙으로 약 40 m 지점부터 형성되어 있으며, 약 3 m 높이의 사구애(dune cliff)를 경계로 해변과는 구분되므로 파도 영향권 밖에서 주로 바람에 의해 사구 형성 퇴적물이 이동되고 있는 영역이다(그림 1c, 3b). 또한, 현재의 전사구 표층은 대부분 식생으로 덮여 있다. 김녕 해안사구 내 배후사구는 전사구로부터 내륙 쪽으로 약간의 지형 기복이 있는 평탄한 지역에 넓게 분포하고 있다. 배후사구 역시 전체적으로 식생이 피복하고 있으며, 사구 최상부층에 토양대가 발달하고 있다(그림 3c).

Ahn and Hwang (2009)은 화산지형, 암상, 화학 조성, 지표형상을 기반으로 제주도 북동부의 층서를 선북오름 용암류, 북오름 용암류, 거문오름 용암류, 후거문오름 용암류로 구분하였다. 이 중 약 8,000년

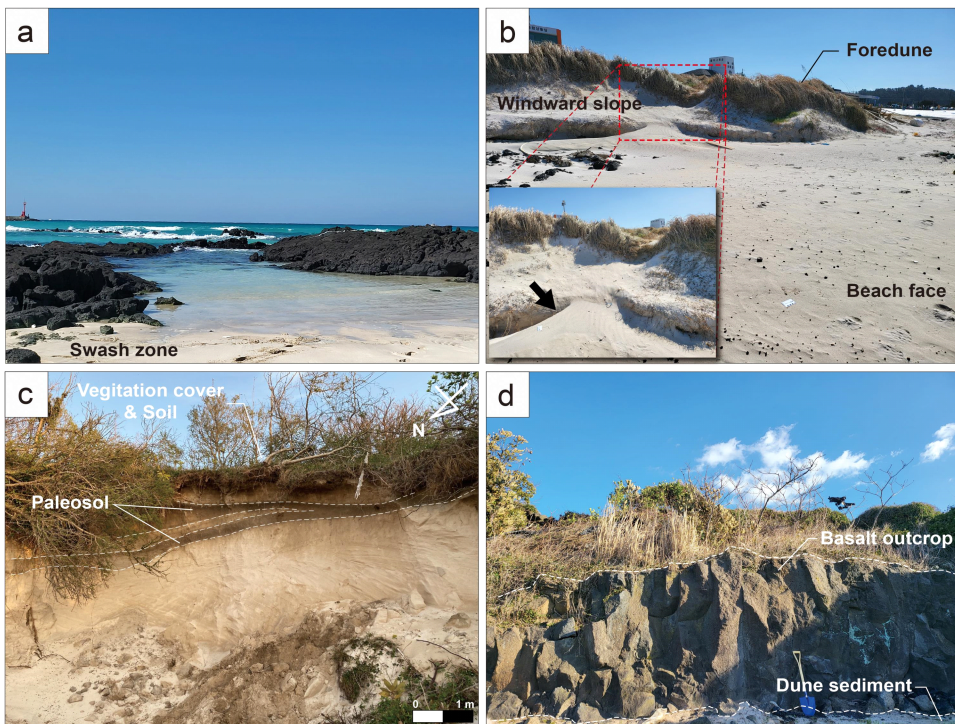


Fig. 3. Photographs of sub-environments in Gimnyeong coastal dunes. (a) Gimnyeong Beach. (b) The foredune located between Gimnyeong Beach and hind dunes. This is covered by vegetation on dune surface. The black arrow in the inset photograph shows sediment accumulation by gravitational movements of sand grains. (c) A cross section of the dune field. (d) A basalt outcrop exposed around the dune field.

전 이후에 분출된 것으로 추정되고 있는 거문오름 용암류는 분석구에서부터 북동쪽으로 흘러 해안지역까지 비교적 넓게 분포하고 있으며(Ahn *et al.*, 2017), 이를 김녕 해안사구가 넓게 피복하고 있다. 해당 지역은 주로 불규칙한 형태의 기공이 풍부한 다공질의 침상장석감람석현무암으로 이루어져 있다. 이들은 약 1 mm 크기의 감람석과 침상장석이 반정으로 함유되어 있는 특징을 보인다(Ahn and Hwang, 2009; Yoon *et al.*, 2014; Koh *et al.*, 2019).

3. 연구방법

제주도 북동부 연안지역의 지표지형 및 사구분포를 파악하기 위해 항공사진과 DEM 분석을 수행하였다. 현재 이 지역은 경작지 및 도시개발로 인해 해안사구가 크게 훼손되었기 때문에 과거 1969년 음화필름을 이용해서 촬영한 항공사진(National Geographic Information Institute, 2016)을 활용하였다. 또한, 오픈 소스 소프트웨어 QGIS를 활용하여 수치지형도 기반 DEM을 작성하고, 이를 거쳐 생성한 음영기복도를 지형 분석에 활용하였다.

시료 채취는 퇴적물 이동에 유리한 북서풍 계열의 바람이 우세한 시기와 식생의 성장이 활발하지 않은 시기를 고려하여, 2021년 3월 26일부터 27일까지 2일간 진행하였다. 김녕 해안사구를 구성하는 퇴적물의 특징을 연속적으로 확인하기 위해서 김녕 해수욕장에서부터 내륙 쪽으로 약 2 km 떨어진 지점까지 선상으로 시료를 채취한 후 표준체로 입도분석을 실시하였다. 해변에서 2지점(GB01, GB02), 전사구에서 1지점(GF01), 그리고 배후사구에서 주변 지형을 고려하여 6지점(GD01~GD06)의 시료를 채취하였다. 이때 토양대 내에서 탄산염 사구퇴적물이 용해 등 화학적 풍화의 영향을 받지 않고 가장 최근에 퇴적되었을 것으로 판단되는 표층(대부분 약 50 cm 이내)에서 시료를 채취하였다. 입도분석 시 사용한 표준체의 조합은 0.0~0.5 ϕ , 0.5~1.0 ϕ , 1.0~2.0 ϕ , 2.0~2.7 ϕ , 2.7~3.3 ϕ , 3.3~4.0 ϕ , 4.0~4.5 ϕ 로 중립질-세립질 모래 범위에 대한 보다 세밀한 분석을 위해 위와 같이 구성하였다.

해변에서부터 사구지대로 퇴적물이 운반됨에 따라, 평균입도 및 분급 등 구성입자의 특징에서 변화가 나타나는지 알아보기 위해 입도분석을 실시하였다.

연구지역의 퇴적물은 대부분 탄산염 입자로 구성되어 별도 산처리 진행하지 않았다. 분석을 완료한 후 GRADISTAT v9.1을 이용하여 Folk and Ward (1957)의 통계학적 방법으로 개별 시료에 대한 입도 매개변수를 계산하고 도시하였다(Blott and Pye, 2001).

연구지역의 표층퇴적물을 이루고 있는 구성성분을 식별하고 이에 대한 함량을 파악하기 위해, 모든 시료에 대해 모달분석을 실시하였다. 이 연구에서는 각 입자 동정의 불확실성 및 세부 방법 상의 문제를 상호검증하기 위해 두 가지 독립적인 방식으로 모달 분석을 수행하였다. 첫 번째 방식은 전시료(bulk sample)를 에폭시로 경화시켜 박편으로 제작한 후 편광현미경(Nikon, Eclipse LV100) 하에서 관찰 및 구성성분을 분류한 후, 박편상에서 포인트 카운팅(point counting)을 진행하는 방식이다. 두 번째 방식은 시료 중 일부를 이용해 실체현미경(Nikon, SMZ18) 하에서 직접 구성성분을 동정 및 집계하는 방식이다. 포인트 카운팅은 각 시료당 250에서 300점 이상으로 실시하였으며, 각 구성성분을 백분율로 나타내었다.

퇴적물을 주로 구성하고 있는 탄산염 생쇄설 입자의 전체적인 형태와 표면 미세조직을 파악하기 위해 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)을 이용하였다. 분석기기는 강원대학교 강원연계형융합이미징특화센터(Kangwon Center for Systems Imaging, KCSI)에서 보유 중인 CX-200TM 모델(COXEM)과 이온코팅기(ion coater; COXEM, SPT-20)를 이용하였다. 주사전자현미경분석 이전에 실체현미경 하에서 구성성분을 분류한 후, 해당 입자를 탄소테이프 위에 부착하여 300초, 5 mA 조건에서 백금 코팅을 진행하였다. 이후 주사전자현미경을 활용하여 관찰목적에 따라, 80~20,000배 범위에서 관찰을 진행하였다. 관찰 시 가속전압 설정 조건은 20 kV의 범위이다.

퇴적물의 광물조성을 확인하기 위해, 다른 전처리 과정을 거치지 않은 전시료에 대해 X선 회절분석을 실시하였다. 먼저 불밀(Spex Sampleprep, 8000D)을 이용하여 시료를 분말화한 후 알루미늄 재질의 원형 캐비티 마운트(cavity mount)에 시료를 준비하였다. 이후 강원연계형융합이미징특화센터에서 보유 중인 Rigaku사의 Miniflex 600를 이용하여 2 θ 3~90° 구간에 대해 X선 조사 간격 0.01°, 조사 시간 5초의

조건으로 XRD 분석을 수행하였다. PDXL2 소프트웨어와 내장된 COD reference card를 이용하여 X-선 회절 패턴에 부합하는 광물을 식별하였다. 정성 분석에 더해 모달분석 자료와의 비교검증을 위하여 식별한 광물에 대한 리트벨트법 계산(Rietveld method)을 통해 반정량 분석을 수행하였다.

4. 연구결과

4.1 입도분석 결과

김녕 해변 및 사구지대의 탄산염 퇴적물은 전체

적으로 1.0~2.7 ϕ 범위의 세립 내지 중립질 모래 입자가 약 81~92%를 차지하여 가장 우세하게 나타나며(평균입도 2.08 ϕ), 단봉분포(unimodal distribution)를 보이는 것으로 확인되었다(표 1; 그림 4a). 해변 2개 지점의 평균입도는 1.86 ϕ 와 1.88 ϕ 로, 연구지역에서 가장 큰 편에 속하며, 상대적으로 조립질 입자에 해당하는 1.0~2.0 ϕ 의 입도범위가 약 48~51%로 가장 많은 부분을 차지한다(그림 4, 5). 이에 반해 사구지대는 2.0~2.7 ϕ 의 입도범위가 약 48~69%로 가장 많은 것으로 나타났으며, 평균입도 범위도 상대적으로 세립인 2.04~2.30 ϕ 로 나타났다. 분급은

Table 1. Grain size parameters of surface sediments in Gimnyeong coastal dunes. The codes of all parameters for each sample are based on Folk and Ward (1957) (ms = medium sand; fs = fine sand; mws = moderately well sorted; s = symmetrical skewness; cs = coarse skewness; p = platykurtic; m = mesokurtic; l = leptokurtic; vl = very leptokurtic).

Site	Environment	Mean (ϕ)		Sorting (ϕ)		Skewness		Kurtosis	
		Value	Code	Value	Code	Value	Code	Value	Code
GB01	Beach	1.88	ms	0.62	mws	-0.10	s	0.78	p
GB02	Beach	1.86	ms	0.59	mws	-0.03	s	0.75	p
GF01	Foredune	2.04	fs	0.67	mws	-0.09	s	0.99	m
GD01	Hind dune	2.17	fs	0.66	mws	-0.09	s	1.28	l
GD02	Hind dune	2.29	fs	0.64	mws	-0.06	s	1.50	vl
GD03	Hind dune	2.04	fs	0.64	mws	-0.10	s	0.91	m
GD04	Hind dune	2.06	fs	0.61	mws	-0.16	cs	0.92	m
GD05	Hind dune	2.30	fs	0.51	mws	-0.13	cs	1.49	l
GD06	Hind dune	2.12	fs	0.56	mws	-0.24	cs	1.03	m

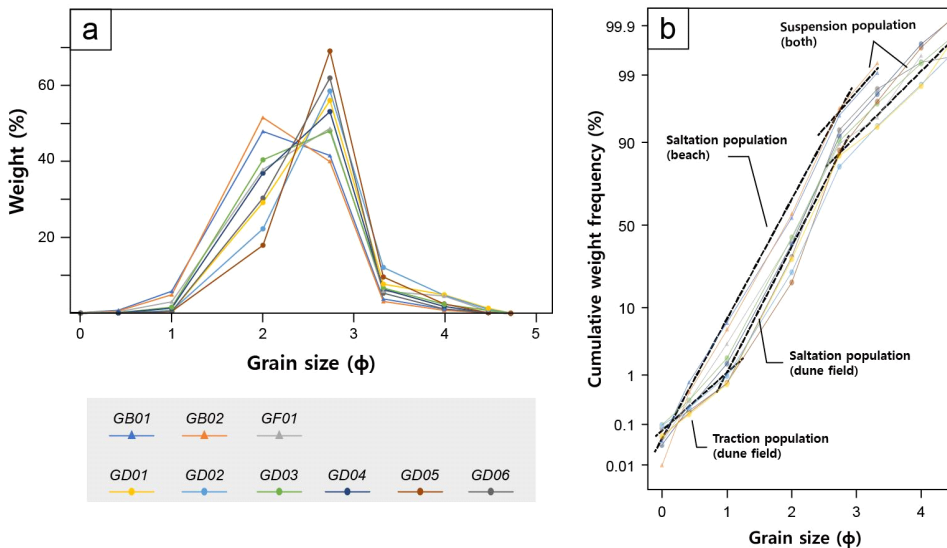


Fig. 4. The results of particle size analyses. (a) Grain size distribution. (b) Cumulative weight frequency curves. The dashed lines indicate average lines for traction, saltation and suspension population in the beach and dune field environments.

해빈과 사구지대에서 모두 중간 양호 분급(moderately well sorted)에 해당하는 0.51~0.67 ϕ 의 범위에 놓이지만, 배후사구 영역 내에서는 내륙방향으로 갈수록 점차 양호해지는 경향을 보인다(그림 5). 왜도의 경우, 대칭 왜도에서 음성 왜도(negatively or coarse skewed)로 점진적인 변화가 뚜렷하게 나타나며, -0.03 ~ -0.24 값을 보인다. 첨도(kurtosis)는 0.75~1.50의 범위를 보이며, 평평한 첨도(platykurtic)에서부터 매우 뾰족한 첨도(very leptokurtic)까지 넓은 범위에 해당하는 것으로 나타났다. 첨도 결과를 상세히 보면 해빈 2개 지점에서는 각각 0.75과 0.78로 모두 평평한 첨도 범위에 해당하는데 반해, 사구지대는 0.91~1.50으로, 중간 첨도에서 매우 뾰족한 첨도까지 넓은 범위를 보인다.

대수확률 누적빈도곡선(Probability cumulative weight frequency curves)에서 해빈은 크게 도약군(saltation population)과 부유군(suspension population)에 해당하는 2개의 직선 마디만 구분되는 반면, 사구지대는 도약군과 부유군에 더해 바닥끌림군(traction population)에 해당하는 직선이 추가적으로 관찰되는 특징을 보여준다(그림 4b). 이때 직선 마디 중 가장 세립질 마디는 부유군, 중간 마디는 도약군, 가장 조립

질 마디는 끌림군에 해당하는 것으로 해석되어 왔는데(e.g., Visher, 1969), 이에 기반하면 이번 연구에서 분석한 시료들은 봄철에 채취한 사구표면 퇴적물로서, 당시의 김녕 해빈 퇴적물의 도약군과 부유군의 경계는 2.7 ϕ 이며, 해빈 퇴적물을 이루고 있는 입자의 평균 95%가 도약군에 해당하는 것으로 나타났다. 사구 지대에서의 부유군과 도약군의 경계 또한 2.7 ϕ 로 일치하며, 도약군과 끌림군의 경계는 1.0 ϕ 지점에서 나타나는 것을 확인할 수 있다. 사구 퇴적물 중 끌림군, 도약군 및 부유군에 해당하는 입자는 각각 평균 1%, 87%, 12%를 차지하고 있다.

4.2 구성성분 및 함량

연구지역의 표층퇴적물은 주로 탄산염 생체설 입자로 구성되어 있으며, 일부 현무암의 조암광물과 암편 입자를 포함하고 있다. 모든 시료에서 매우 우세하게 나타나는 탄산염 생체설 입자는 주로 홍조류, 연체동물, 태선동물, 유공충 및 성게류로 구성된다(그림 6, 7). 이들은 흔히 골격 마디 부분이 분리되거나 이후 더 잘게 깨지면서 파편화된 형태를 보인다. 이 외에도 판별이 불가능한 입자의 비율이 약 0~10%를 차지한다.

홍조류 기원 입자는 백색 내지 유백색을 띠며 주로 단괴상 및 마디상의 형태로 관찰된다(그림 6, 7, 8a). 거의 대부분 매끄러운 표면조직과 양호한 원마도를 보이며, 해당 입자의 단면에서는 약 10 μm 의 크기로 나뉜 세포벽 구조를 뚜렷하게 관찰할 수 있다(그림 8b). 연체동물 기원 입자는 이때패류와 복족류 기원으로 나눌 수 있으며, 반투명한 백색 입자부터 여러 색상의 불투명 입자까지 다양하게 관찰된다. 이들은 불규칙한 크기로 파편화되어 있으며, 다른 구성성분에 비해 두께 대 너비의 비가 작은 전형적인 판상의 입자 형태를 보이는 것이 특징이다(그림 6, 7, 8a). 패각의 외부를 구성하는 주상구조(prismatic structure)와 내부에 판상으로 배열된 진주층(nacreous layer) 및 주상의 결정들이 서로 사교하고 있는 사박층(crossed lamellar)이 관찰되기도 한다(그림 7d, 7f, 8c). 태선동물은 백색과 연한 적색을 띠며, 주로 불규칙한 형태로 나타난다. 또한, 다양한 형태의 공극이 불규칙하게 연결된 골격구조가 전형적으로 잘 관찰된다(그림 6, 7, 8a, 8d). 유공충은 반투명 혹은 불투명한 백색을 띠며, 여러 개의 방이 연

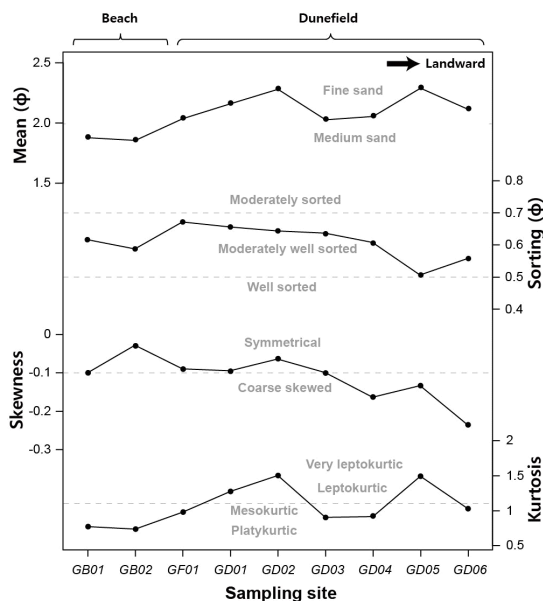


Fig. 5. Variations of grain size parameters toward landward sites from the beach as the final provenance of dune sands.

결된 형태로 다양한 모습을 보이는 것이 특징이다 (그림 6, 7, 8a). 또한 일부 입자의 표면에서는 많은 수의 작은 공극들이 관찰되기도 한다(그림 8e). 성게류는 주로 흰색과 자색을 띠며, 바깥쪽으로 갈수록 좁아지는 전형적인 원기둥 형태의 침(spine)과 표면에 미세한 공극을 포함하고 있는 몸체 부분 입자(echinoid plate)를 관찰할 수 있다(그림 6, 7, 8a). 특히, 성게 침의 경우, 침 형태 입자의 종 방향과 나란한 세로 줄무늬를 관찰할 수 있으며, 입자 내부가 비어 있는 특징을 보인다(그림 8f). 편광현미경 상에서는 직소광을 보이는 특징 때문에 파동소광을 보이는

다른 구성성분과 뚜렷하게 구분된다. 현무암 기원의 암편 및 광물입자는 상대적으로 세립질 입자를 구성하는 편이며, 사장석, 휘석, 감람석 및 석영의 광물 조합을 보인다.

확인된 6종류의 주요 구성성분에 대해 박편 내 모달분석을 실시한 결과, 가장 많은 함량을 보이는 홍조류와 연체동물 각질의 양이 해변에서부터 내륙 쪽으로 갈수록 뚜렷하게 변화한다는 것을 확인할 수 있다(그림 9a). 이러한 박편을 활용한 모달분석 결과는 2차원 단면에서 관찰된 결과로서 다소 가변적일 가능성을 고려하여 추가적으로 실체현미경 하에

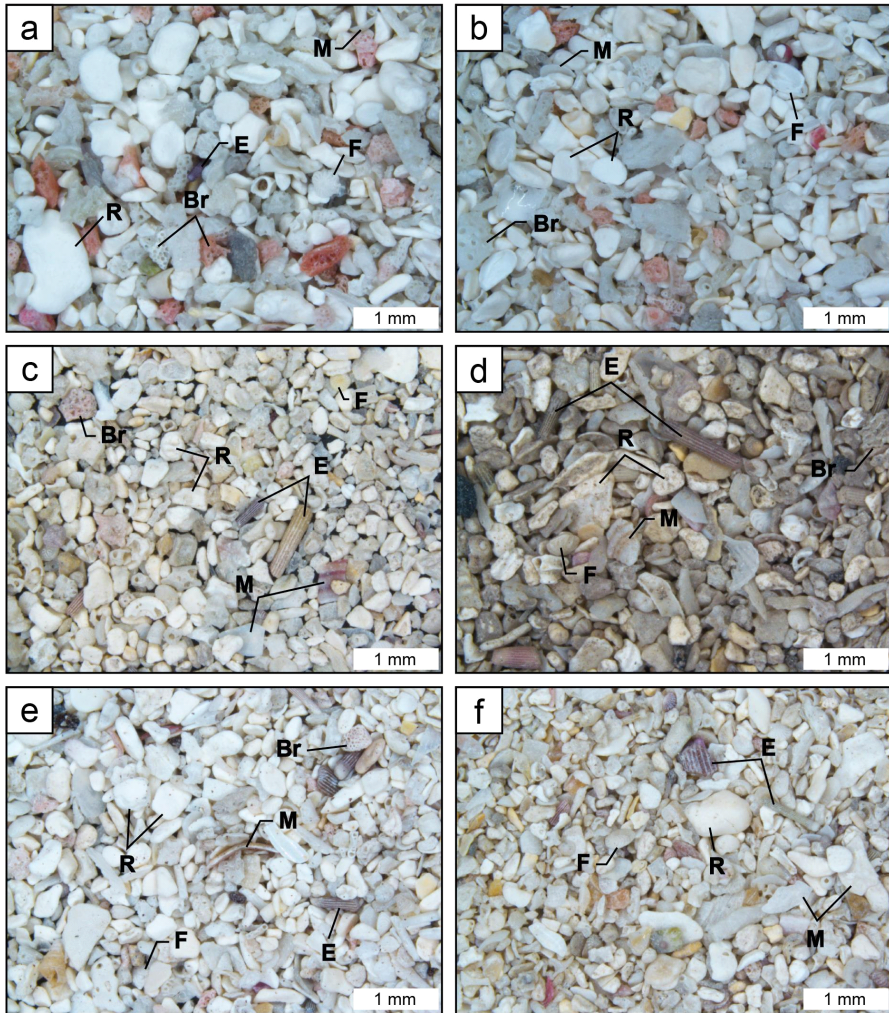


Fig. 6. Stereoscopic photomicrographs of the beach (a and b) and dune sediments (c-f). The codes of all components for each sample are as follows: R = red algae; M = mollusk; Br = bryozoan; F = foraminifera; E = echinoid; BF = basalt fragment.

서 진행한 모달분석 결과와 비교하여 검증하였다 (그림 9b). 그 결과, 절대적인 함량과 지점별 값에서 다소 큰 차이가 나타났지만 해변으로부터 내륙 쪽으로 함량이 변해가는 전반적인 경향성은 유사하게 나타났다.

연구지역에서 가장 우세한 구성성분은 홍조류로 박편과 실체현미경 하에서 각각 29~63%, 27~57%의 함량을 보인다(표 2). 이들은 해변에서 함량이 가장 높는데 반해, 사구지대 내에서는 상대적으로 함량이 낮은 편이다. 연체동물은 두 번째로 우세한 구성성분에 해당하며, 8~34%와 14~37%의 함량을 보

인다. 이들은 홍조류와는 반대로 해변에서 상대적으로 함량이 낮은 편이며, 내륙 쪽으로 갈수록 함량이 증가하는 경향이 확인된다. 또한, 가장 내륙에 위치한 지점의 시료에서는 내륙 쪽으로 증가하던 연체동물의 함량이 홍조류의 함량과 유사해지는 특징이 관찰되었다(그림 9). 태선동물은 5~15%와 7~25%의 함량을 보이며, 두 가지 방법의 모달분석 결과에서 사구지대보다 해변에서의 함량이 상대적으로 약간 높은 것으로 나타났으나, 전체 함량이 다소 낮다는 점과 모달분석 결과의 재현성을 고려했을 때 반복적인 재검증이 필요할 것으로 보인다. 유공충과 성게

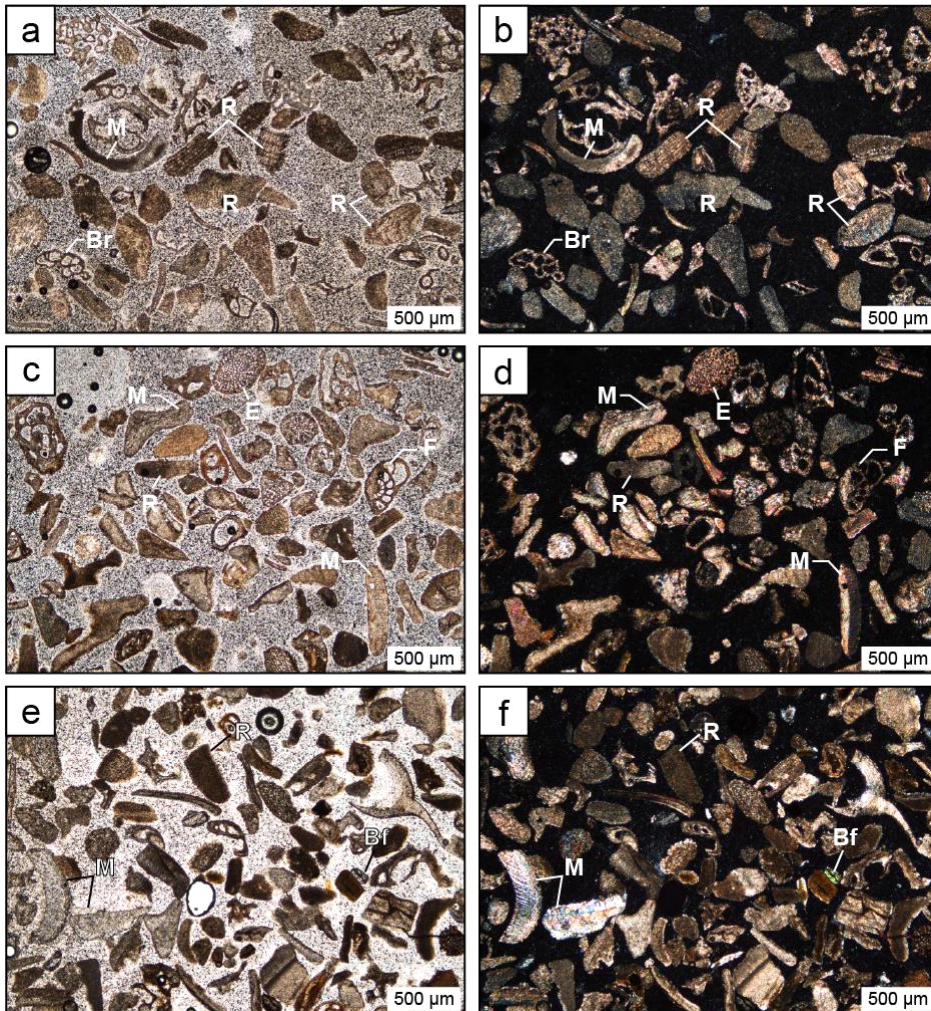


Fig. 7. Photomicrographs for thin sections of beach (a and b) and dune sediments (c~f). The left side is for PPL (plane polarized light), and the right side is for XPL (cross polarized light). The codes of all components for each sample are as follows: R = red algae; M = mollusk; Br = bryozoan; F = foraminifera; E = echinoid; Bf = basalt fragment.

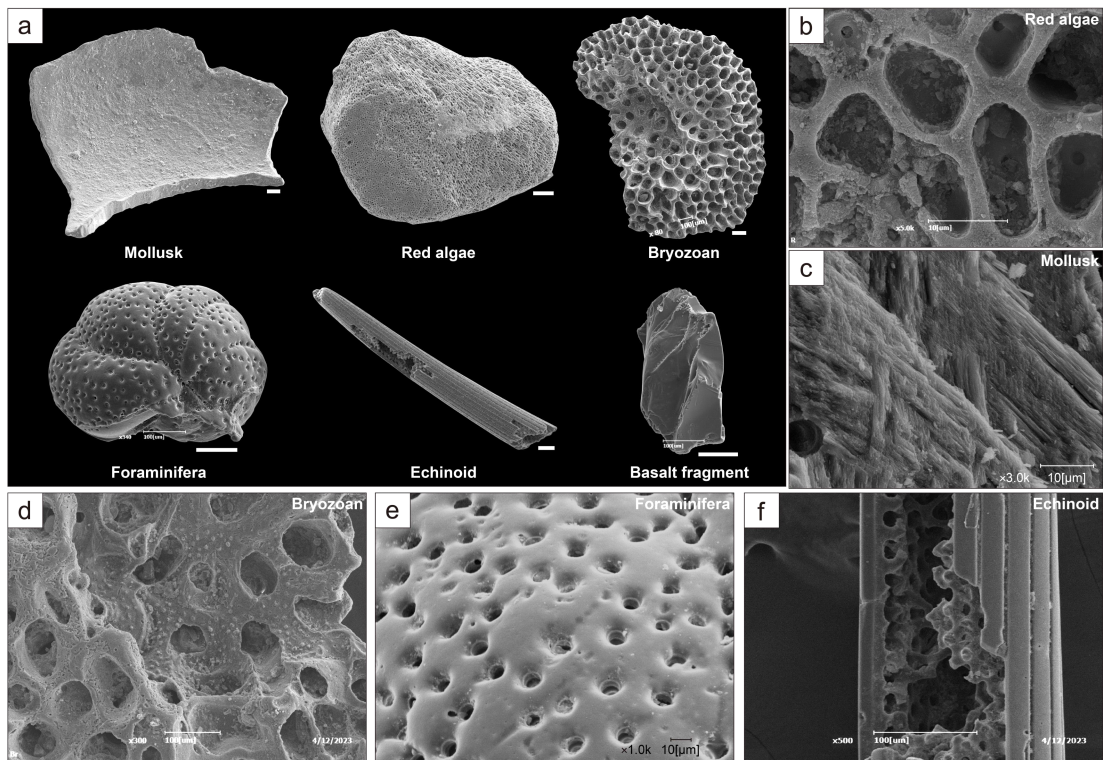


Fig. 8. SEM-SE (secondary electron) images of main sedimentary components in Gimnyeong coastal dunes. a) Overall shapes of six main components. White bars indicate the scale of 100 μm . The microtextures of carbonate bioclast grains are indicated in (b)~(f).

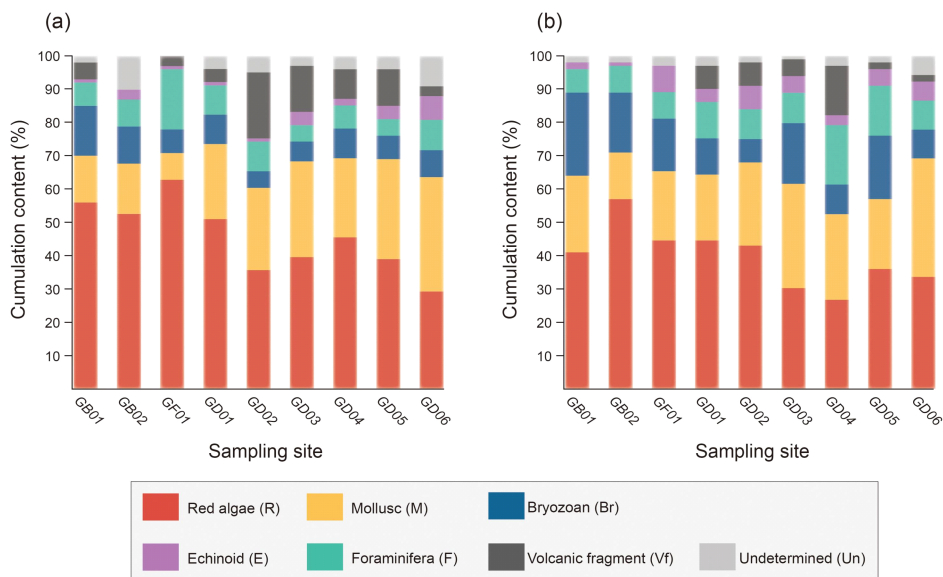


Fig. 9. Point counting results showing relative contents for each type of all sedimentary components. These are presented toward landward sites from the beach area. (a) A result under thin sections. (b) A result under the stereoscopic microscope.

Table 2. Main composition of surface sediments in Gimnyeong coastal dunes. The codes of all components for each sample are as follows: R = red algae; M = mollusk; Br = bryozoan; F = foraminifera; E = echinoid; Bf = Basalt fragment; Un = undetermined.

Site	Environment	Point counting method results							Additional modal analysis results						
		Component (%)							Component (%)						
		R	M	Br	F	E	Bf	Un	R	M	Br	F	E	Bf	Un
GB01	Beach	56	14	15	7	1	5	2	41	23	25	7	2	0	2
GB02	Beach	52	15	11	8	3	0	10	57	14	18	8	1	0	2
GF01	Foredune	63	8	7	18	1	3	0	45	22	16	8	8	0	3
GD01	Hind dune	52	23	9	9	1	4	4	45	20	11	11	4	7	3
GD02	Hind dune	36	25	5	9	1	20	5	43	25	7	9	7	7	2
GD03	Hind dune	40	29	6	5	4	14	3	30	31	18	9	5	5	1
GD04	Hind dune	46	24	9	7	2	9	4	27	26	9	18	3	15	3
GD05	Hind dune	39	30	7	5	4	11	4	36	21	19	15	5	2	2
GD06	Hind dune	29	34	8	9	7	3	9	35	37	9	9	6	2	6

류는 각각 5~18%, 7~18%와 1~7%, 1~8%의 함량을 차지하고 있으며, 김녕 지역 탄산염 퇴적물 중 낮은 함량을 보이는 구성성분들에 해당한다. 시료채취 지점에 따른 이들의 함량 변화는 매우 낮은 편이고, 두 가지 모달분석 결과로 유사한 결과를 얻지 못했다. 이외에도 현무암 기원 암편 및 쇄설성 퇴적 입자는 0~20%와 0~15%까지 나타나며, 비록 재검증이 필요하지만 이번 연구의 결과에서는 해변보다 사구지대에 더 많이 포함되어 있는 것으로 나타났다(그림 9).

4.3 X-선 회절분석 결과

전시료에 대해 X-선 회절분석 결과, 연구지역의 주요 구성광물은 일반적으로 탄산염 생쇄설 입자의 주요 구성광물로 잘 알려져 있는 방해석과 아라고나이트로 확인된다(그림 10a). X-선 회절분석 결과는 이들을 지시하는 주 정점(peak)을 뚜렷하게 나타내지만, 그 외 다른 광물에 해당하는 정점들도 미약하게 존재하는 것을 확인할 수 있다. 이들은 일반적으로 현무암의 조암광물에 해당하는 사장석, 휘석, 감람석, 석영을 지시하며, 해변 시료의 경우 전처리 과정에서 형성된 암염에 의한 정점이 확인된다.

X-선 회절분석으로 확인된 구성광물들에 대해 반정량 분석을 실시하였으며, 방해석 48.0~76.3%, 아라고나이트 7.6~40.8%, 기타 감람석 7.1% 이하, 휘석 13.3% 이하, 사장석 12.3% 이하, 석영 6.5% 이하, 암염 2.4% 이하로 계산되었다(표 3). 주요 특징

으로는 가장 높은 함량으로 나타난 방해석과 아라고나이트의 전반적인 변화 경향성이다. 즉, 방해석의 경우 내륙 쪽으로 갈수록 점차 감소하는 경향을 보이는데 반해, 아라고나이트는 내륙 쪽으로 갈수록 증가하는 경향성이 모달 분석 결과에 이어 재확인되었다(그림 10b). 이 외의 구성광물들은 시료채취 지점에 따라 함량이 변화하긴 했지만, 명확한 경향성을 확인할 수는 없었다.

5. 토 의

5.1 김녕 해안사구 퇴적물의 이동

평균입도를 비롯하여 분급, 왜도 및 첨도와 같은 퇴적물 입자 크기와 관련된 물리적 특성은 퇴적물 운반 역학적 특성을 해석할 수 있는 기본 지표 중 하나로서 잘 알려져 있다. 특히, 해안 전면부(shoreface), 해변, 해안사구 등 퇴적환경의 변화를 포함하는 연안지역에서는 퇴적환경을 구분하고 퇴적물의 기원지를 추적하거나 기원지로부터의 운반거리 및 운반 기작(transport mechanism)을 해석하는 등 최근까지도 다방면으로 활용되기도 하였다(e.g., Abuodha, 2003; Alsharhan and El-Sammak, 2004; Kasper-Zubillaga *et al.*, 2007; Navapro *et al.*, 2015). 이번 연구에서는 제주도 김녕지역 연안환경을 선상으로 조사하였는데, 퇴적물 공급지인 김녕해수욕장 인근 천해에서부터 내륙 쪽의 퇴적 지점까지 분급 및 왜

도가 연속적으로 변화하는 양상이 나타나는 반면, 평균입도에서는 이러한 연속적인 변화는 확인할 수 없었다(그림 5). 하지만, 내륙 쪽에 있는 전사구와 배후사구 퇴적물은 해변 두 지점보다 평균입도가 상대

적으로 더 작고 범위는 더 넓다는 특징을 보인다(표 1; 그림 4a, 5). 또한, 분급도 해변과 전사구 사이에서 불연속적인 특징이 뚜렷하다. 이와 같은 입도분석 결과는 전사구가 거리상 해변과 매우 인접하게 위

Table 3. Mineralogy of surface sediments in Gimnyeong coastal dunes. The values display the semi-quantitative percentiles by Rietveld method through XRD patterns. The codes of all minerals for each sample are as follows: Cal = calcite; Arag = aragonite; Ol = olivine; Px = pyroxene; Pl = plagioclase; Qtz = quartz; Hal = halite.

Site	Environment	Cal (%)	Arag (%)	Ol (%)	Px (%)	Pl (%)	Qtz (%)	Hal (%)
GB01	Beach	76.3	11.3	0.7	5.9	1.2	2.1	2.4
GB02	Beach	67.6	7.6	6.5	13.3	2.0	1.1	1.8
GF01	Foredune	76.4	16.2	2.1	3.1	1.2	1.0	-
GD01	Hind dune	49.7	21.1	4.7	5.6	12.3	6.5	-
GD02	Hind dune	59.7	34.3	1.0	1.9	1.2	1.9	-
GD03	Hind dune	48.0	39.0	7.1	2.3	2.6	1.1	-
GD04	Hind dune	64.8	24.6	1.6	0.5	5.1	3.4	-
GD05	Hind dune	52.0	36.4	0.4	0.5	9.6	1.1	-
GD06	Hind dune	53.8	40.8	2.0	1.8	0.5	1.1	-

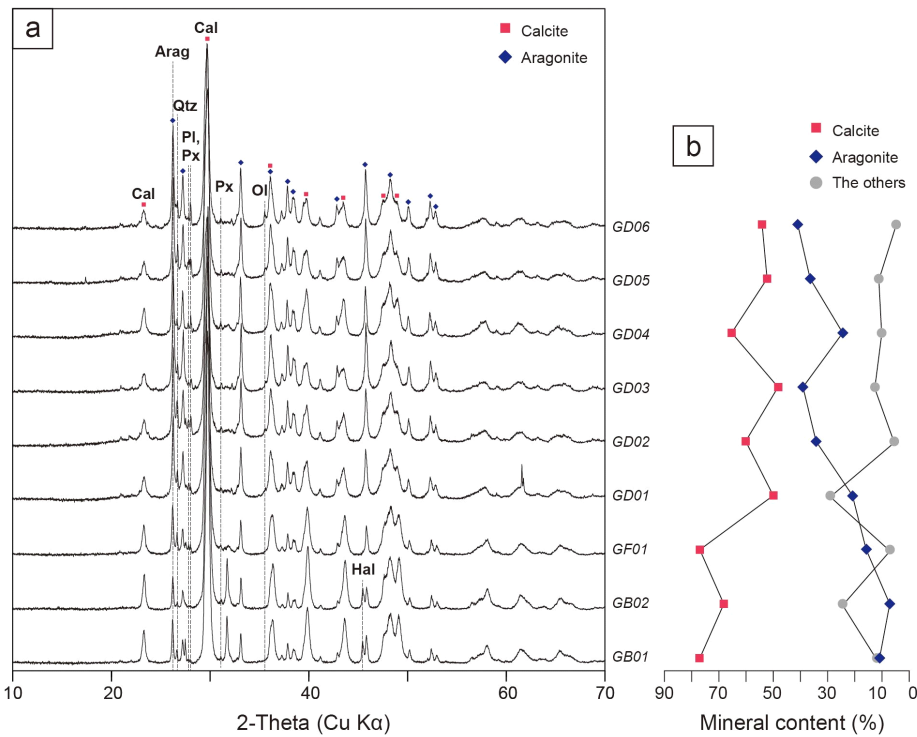


Fig. 10. XRD results for bulk sediment samples from Gimnyeong coastal dunes. (a) XRD patterns showing main constituents of calcite and aragonite. The codes of all minerals for each sample are as follows: Cal = calcite; Arag = aragonite; Ol = olivine; Px = pyroxene; Pl = plagioclase; Qtz = quartz; Hal = halite. (b) Landward variations of the semi-quantitative, relative contents among calcite, aragonite and the other components based on Rietveld method.

치하고 있음에도, 상대적으로 더 먼 거리에 있는 배후사구와 유사한 특징을 보여준다는 의미이다. 따라서 이러한 평균입도 특징의 원인을 파악하기 위해 해변-전사구 사이 그리고 전사구-배후사구 사이로 나누어 퇴적물 운반 및 퇴적작용에 대해 논의하였다.

이번 연구에서 채취한 전사구 퇴적물 시료는 해변 구역으로부터 약 40 m 이격된 지점에서 채취하였고, 이 지점으로부터 가장 인접한 배후사구 시료는 최소 250 m 이상 떨어진 지점에서 채취하였다(그림 1b, 1d). 이와 같은 시료 채취지점 사이의 거리를 고려하면, 연구지역에서 가장 큰 평균입도를 나타내는 해변 퇴적물은 지속적인 쇄파(wave breaking)의 영향으로 세립질 입자가 선택적으로 제거된 결과로 해석할 수 있다(Davis, 1978; Abuodha, 2003). 반면, 해변에서부터 전사구로 퇴적물을 공급하는 운반 매개체는 주로 바람으로서, 이 경우 풍속이 퇴적물을 이동시킬 수 있는 임계속도(threshold velocity)를 초과할 경우에 한해 세립질 입자부터 선택적으로 운반하기 시작하는 것으로 알려져 있다(Goldsmith, 1978; Nickling, 1988; Abuodha, 2003). 또한, 전사구 표층에는 식생이 서식하고 있고, 해변과의 경계 부에는 매우 가파른 풍사면(windward slope)이 형성되어 있는데(그림 1d, 3b), 이러한 지형적 특징은 난기류를 유발할 수 있는 조건을 제공하는 것으로 알려져 있으며, 이 조건 하에서는 도약이동하던 입자를 부유성 도약 혹은 단거리 부유이동으로 전환시킬 수 있다(Arens *et al.*, 2002; Schwarz *et al.*, 2021). 따라서 상대적으로 크기가 큰 입자보다 더 높이 상승하게 된 세립질 입자가 전사구 영역으로 운반될 수 있는 기회가 많기 때문에 매우 근거리 내에서도 세립화 현상이 나타날 수 있는 것으로 생각된다.

해빈-전사구 사이에서는 평균입도의 명확한 차이가 관찰되는데 반해, 전사구-배후사구 사이 혹은 배후사구 내에서는 퇴적물 공급지로부터 멀어짐에 따라 평균입도에 한해서 어떠한 경향성도 확인할 수 없었다(그림 5). 이는 퇴적물이 공급지로부터 사구 지대로 운반되어 올 당시의 세부적 풍향 변화, 개별 사구 지형의 진화, 사구지대의 전체 규모 등 여러 복합적인 요인들에 의해 제어되었기 때문으로 추정된다(Kasper-Zubillaga *et al.*, 2007). 예를 들면, 풍속이 낮을 때는 조립질 입자가 사구 정상부(dune crest)에 도달하지 못하거나 퇴적물이 중력에 의해 미끄러

지는 등 개별 사구 내에서도 평균입도의 차이가 관찰될 바 있다(Lancaster, 1982; Livingstone *et al.*, 1999; Kasper-Zubillaga *et al.*, 2007). 또한, 평균입도가 공급지로부터 운반거리에 따라 점진적으로 변화한 사례를 보면 대부분 약 수십 내지 수백 km 이상의 대규모 사구지대에 해당한다(Zhang and Dong, 2015; Dawelbeit *et al.*, 2022). 이 밖에도 우리나라의 대청도와 우이도에 위치한 해안사구에서는 짧은 거리에서도 평균입도 변화가 관찰된 사례가 존재하며(Park *et al.*, 2009; Shin *et al.*, 2017), 구성성분, 식생 피복 및 풍속 등이 평균입도 변화에 영향을 미칠 수 있는 가능성이 있다. 이번 연구의 야외조사 결과에 의하면 식생 피복이 양호하고, 퇴적물 혼합의 흔적은 관찰되지 않았다. 따라서 구성성분, 풍속, 사구 전체 규모 등이 제주도 김녕 해안사구에서 평균입도 변화가 나타나지 않는 요인을 제공했을 수 있다. 김녕 해안사구에서 나타나는 평균입도 변화의 부재 현상에 대한 보다 자세한 논의는 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

평균입도와 달리, 분급과 왜도는 각각 내륙방향으로 갈수록 점차 양호해지는 경향을 보이며, 대칭 왜도에서 음성 왜도로 점진적인 변화가 뚜렷하게 나타나는 것이 특징이다(그림 5). 이러한 결과는 퇴적물이 내륙방향으로 운반되는 과정에서 점점 세립질 입자 중심으로 변화된다는 것을 의미한다. 해변은 끌림이동이 일어나지 않을 만큼의 고에너지 환경으로, 대부분의 입자가 도약이동을 하며 2.7 ϕ 이상의 입자는 부유이동을 통해 해변 영역으로부터 제거된다(그림 4b). 입자가 사구지대 내로 운반되면, 1.0 ϕ 이하의 입자들은 더 이상 도약이 아닌 끌림으로 이동하게 되며, 내륙 쪽으로 운반되는 빈도가 줄어들게 된다. 이와 반대로 1.0 ϕ 이상의 입자들은 도약이동을 통해 활발히 운반될 수 있으며, 특히 2.7 ϕ 이상의 입자는 부유 상태로 더 먼 거리까지 이동될 수 있기 때문에 내륙 쪽에 세립질의 입자가 더 집중적으로 공급될 수 있을 것이다(그림 4b). 여기서 주목할 점은 제주도 협재와 김녕 지역에서 진행된 기존 연구에서는 이러한 퇴적물 운반에 따른 점진적인 분급 및 왜도 변화가 보고되지 않았다는 점이다(Park *et al.*, 2004; Woo and Kim, 2005; Ji *et al.*, 2008). 이러한 차이는 지금까지의 연구가 그 목적 상 퇴적물 운반 기작에 집중되기 보다는 사구지형 혹은 과

거 환경변화와의 연관성을 규명하기 위해 수행되었기 때문인 것으로 사료된다.

5.2 탄산염 퇴적물 구성성분의 변화 요인

전술한 바와 같이 연구지역에서 채취한 표층퇴적물은 모두 동일한 종류의 구성성분을 보이고 있다. 하지만 구성성분 별 상대적 함량이 있어서는 공급지로부터 내륙 쪽으로 이동함에 따라 점진적으로 변화하는 경향이 확인되었다(그림9). 먼저 현무암 암편의 경우, 해빈에서는 박편과 실체현미경 하에서 각각 평균 0%와 3%로 나타났지만, 사구에서는 각각 평균 2%와 9%로 상대적으로 더 우세하게 관찰되었다. 세부 퇴적환경 별 에너지 조건을 고려하면, 이는 해빈으로부터 이동 및 퇴적된 탄산염 퇴적물이 내륙 방향으로 갈수록 주변 현무암 노두로부터 공급된 암편과 혼합될 수 있는 기회가 많아지기 때문인 것으로 추정된다(그림 3d).

이번 연구에서 가장 주목되는 결과는 탄산염 생쇄설 입자의 점진적인 변화이다. 즉, 홍조류 기원 생쇄설 입자의 함량은 해빈시료를 박편과 실체현미경 하에서 각각 분석하였을 때 평균 47%와 57%로 나타났지만, 사구에서는 평균 36%와 40%로 나타나 해빈 영역에서부터 내륙 쪽으로 갈수록 뚜렷하게 감소하는 경향이 관찰되었다(그림 9). 이와는 반대로 연체동물 입자의 함량은 해빈에서 평균 12%와 20%, 사구에서 평균 27%와 31%를 보이며, 해빈에서 내륙 쪽으로 증가하는 경향을 보였다. 이 결과는 추가적으로 실시한 X-선 회절 반정량 분석에서도 내륙 쪽으로 갈수록 아라고나이트의 함량이 점진적으로 증가하는 결과를 보여 재차 검증되었다(그림 10b). 주로 연체동물의 각질을 구성하는 아라고나이트가 기상수 환경(meteoric environments) 하에서 화학적 풍화 혹은 변질에 매우 취약한 광물이라는 점에서, 이는 다소 이례적인 결과라고 할 수 있다. 여기에 더해 연구지역의 기후 조건이 점차 사구 퇴적물 이동에 불리하게 변화하고 있다는 점에서 내륙 쪽 퇴적물 시료에서의 아라고나이트 입자 우세현상은 더욱 예상하기 어렵다(그림 2a).

주로 입자크기와 밀도에 의해 조절되는 규산염 생쇄설 입자의 유체역학적 거동 방식과는 달리, 탄산염 생쇄설 입자는 입자크기와 밀도에 더해 생물이 형성하는 각질 고유의 형태 및 내부 골격 구조 등에

의해서도 강한 영향을 받을 수 있는 것으로 알려져 있다(Maiklem, 1968; Braithwaite, 1973; de Kruijff *et al.*, 2021). 기존 연구에 의하면 대체로 최대 투영면적(maximum projected area)이 큰 판상의 형태를 갖는 생물종이 동일한 크기의 등방체 형태의 생물종에 비해 침강속도가 느리며, 상대적으로 크기가 작은 다른 형태의 입자와 함께 거동하는 것이 보고된 바 있다(e.g., Maiklem, 1968; Braithwaite 1973; Kench and McLean, 1996; Yordanova and Hohenegger, 2007). Navapro *et al.* (2015) 또한, 이들 연구에서는 현장 트랩실험 관찰결과를 토대로 풍성환경에서 평균입도 외에 입자의 모양과 밀도가 운반 거리를 조절하는 주요 요인일 수도 있다고 언급하였다. Rice (1991)는 탄산염 골격질 입자를 우세하게 포함한 모래와 석영 입자가 우세한 모래를 통한 실내실험을 통해 전자의 경우가 모래 입자 운송 궤적이 더 길고 낮은 특징이 있음을 확인하였으며, 주로 도약 운반되는 모래 입자가 유사한 모래로 이루어진 지표와 충돌 시 운동량의 손실이 적어 상대적으로 더 멀리 운반될 수 있다고 언급하였다. 이 지역 탄산염 퇴적물의 이동 방식 해석에 의하면 대부분의 입자가 도약 방식을 통해 이동했기 때문에(그림 4b), 김녕 해안사구 지역은 골격질 입자의 형태 특성에 의해 분별되기에 유리한 환경이라고 해석할 수 있다.

실제로 연구지역의 주요 구성성분에 대한 표면 형태 및 내부 미세구조를 관찰한 결과, 홍조류 기원 입자는 주로 단괴상으로, 연체동물 생쇄설 입자에 비해 상대적으로 등방체에 가까운 형태를 보이는 것이 확인된다(그림 8). 반면, 연체동물 기원 입자는 주로 판상의 형태로 나타나며, 입자의 두께가 얇고 최대 투영면적이 주요 구성성분들 중 가장 넓다는 특징이 있다. 결과적으로, 김녕지역 해안사구 퇴적물이 대부분 도약 방식으로 운반되는 조건 하에서 상대적으로 운반 효율이 높은 연체동물 기원 입자가 더 멀리 운반되어 내륙 쪽으로 갈수록 더 높은 함량을 보이는 것으로 판단된다.

6. 결론

이번 연구에서는 제주도 구좌읍 김녕 해안사구를 구성하는 탄산염 사질 퇴적물의 특성에 대해 분석하고, 이를 통해 퇴적물 운반 및 퇴적과정 중 발생된

주요 영향 요인을 파악하고자 하였다. 이를 위해 현생 표층 퇴적물을 대상으로 기원지인 김녕 해변 지역부터 내륙의 사구 분포지역까지 퇴적물 특성의 수평적 변화를 분석하였다. 김녕 해안사구 퇴적물의 물리적 특성 중 평균입도와 분급의 경우, 해변-전사구 영역 사이에서 불연속적인 특징을 나타내어 인접 위치임에도 비교적 뚜렷한 차이를 보였다. 이는 파도와 조석에 의해 조절되는 환경에서 대기 중 풍성 환경으로 전이되는 구간에서 나타난 현상으로, 풍성 환경 하에서의 퇴적물 운반 조건이 세립질 퇴적물 운반에 유리하기 때문인 것으로 판단된다. 특징적으로, 왜도가 배후사구 내에서 점진적으로 음성 왜도를 나타내어 해안가 풍성환경에서 내륙으로 진입할수록 조립질 퇴적물에 비해 세립질 퇴적물의 운반에 유리한 조건이 형성된 것으로 해석된다. 퇴적물의 입도별 누적빈도곡선 분석결과, 도약운동에 의해 이동하는 퇴적물이 김녕 해안사구 탄산염 퇴적물의 대부분을 구성하는 것으로 평가되었다. 사구 퇴적물의 주요 구성성분 중 방해석으로 구성된 홍조류 기원 입자는 내륙으로 갈수록 감소한 반면, 주로 아라고나이트로 구성된 연체동물 기원 입자의 경우 함량이 증가하는 특징이 나타났다. 이와 같은 현상은 김녕 지역 탄산염 생쇄설 입자를 생성하는 해양생물종 패각의 고유한 형태적 특징에 기인하는 것으로 해석된다. 이번 연구의 결과는 기존의 해양환경에 초점이 맞춰져 있던 탄산염 생쇄설 입자의 형태에 따른 유체역학적 거동 특성이 현생 제주도 풍성환경에도 적용될 수 있음을 시사한다.

감사의 글

논문의 질적 향상에 많은 도움을 주신 편집위원장님, 편집위원님, 심사위원님들께 감사드립니다. 이 연구는 23년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(NRF-2023R1A2C100 6352).

REFERENCES

- Abuodha, J.O.Z., 2003, Grain size distribution and composition of modern dune and beach sediments, Malindi Bay coast, Kenya. *Journal of African Earth Sciences*, 36, 41-54.
- Ahn, U.S., Choi, J.H. and Yeo, E.Y., 2017, Eruption timing of the Geomun Oreum through the comparison of radio-carbon and quartz OSL ages. *Journal of the Geological Society of Korea*, 53, 367-376 (in Korean with English abstract).
- Ahn, U.S. and Hwang, S.K., 2009, Study on Source of Lava Flows Forming the Manjanggul Lava Tube. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 18, 237-253 (in Korean with English abstract).
- Alsharhan, A.S. and El-Sammak, A.A., 2004, Grain-size analysis and characterization of sedimentary environments of the United Arab Emirates coastal area. *Journal of coastal Research*, 20, 464-477.
- Arens, S.M., Van Boxel, J.H. and Abuodha, J.O.Z., 2002, Changes in grain size of sand in transport over a foredune. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, 1163-1175.
- Blott, S.J. and Pye, K., 2001, GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth surface processes and Landforms*, 26, 1237-1248.
- Braithwaite, C.J.R., 1973, Settling behaviour related to sieve analysis of skeletal sands. *Sedimentology*, 20, 251-262.
- Carter, R.W.G., 1988, *Coastal Environments: An Introduction to the Physical, Ecological, and Cultural Systems of Coastlines*. Academic press, London, 617 p.
- Choi, K.H., Jung, P.M., Kim, Y.M. and Lee, S.Y., 2014, Radiocarbon dating and sedimentary environment of the coastal dunes, Shinyang-ri, Jeju Island. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 21, 59-68 (in Korean with English abstract).
- Davis, R.A., 1978, Beach and nearshore zone. In: Davis, R.A. (eds.), *Coastal Sedimentary Environments*. Springer, New York, 379-444.
- Dawelbeit, A., Jaillard, E. and Eisawi, A., 2022, Grain size analysis of the latest Quaternary Kordofan sand of Central Sudan: depositional environment and mode of transportation. *Aeolian Research*, 55, 100785.
- de Kruijf, M., Sloom, A., de Boer, R.A. and Reijmer, J.J., 2021, On the settling of marine carbonate grains: Review and challenges. *Earth-Science Reviews*, 217, 103532.
- Folk, R.L. and Ward, W.C., 1957, Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters. *Journal of sedimentary research*, 27, 3-26.
- Goldsmith, V., 1978, Coastal dunes. In: Davis, R.A. (eds.), *Coastal Sedimentary Environments*. Springer, New York, 171-235.
- Hesp, P., 2000, *Coastal Sand Dunes: Form and Function*. Forest Research, Rotorua, 28 p.
- Jeju Special Self-Governing Province, 2007, <https://www.jeju.go.kr/news/news/data.htm?qType=title&q=%EB%8F%99%EA%B5%B4&act=view&seq=798943> (September 15, 2010).

- Ji, H.S., Woo, K.S., Kim, R., Choi, D.W., Yang, D.Y. and Park, B.K., 2008, The age and origin of carbonate sand dunes in Gimnyeong area, Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 44, 615-628 (in Korean with English abstract).
- Ji, O.M. and Woo, K.S., 1995, Compositional Variations of the Beach Sediments in Cheju Island. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 5, 480-492 (in Korean with English abstract).
- Kasper-Zubillaga, J.J., Zolezzi-Ruiz, H., Carranza-Edwards, A., Girón-García, P., Ortiz-Zamora, G. and Palma, M., 2007, Sedimentological, modal analysis and geochemical studies of desert and coastal dunes, Altar Desert, NW Mexico. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 489-508.
- Kench, P.S. and McLean, R.F., 1996, Hydraulic characteristics of bioclastic deposits: new possibilities for environmental interpretation using settling velocity fractions. *Sedimentology*, 43, 561-570.
- Kim, J.C., Eum, C.H., Yang, D.Y., Kim, G.D., Cheong, D.K. and Choe, H.G., 2010, A preliminary study of paleoenvironments using OSL (Optically Stimulated Luminescence) dating of coastal dune sequences on Manripo area. *Journal of the Geological Society of Korea*, 46, 207-219 (in Korean with English abstract).
- Koh, C.S., Yoon, S.H., Hong, J.G., Jeong, J.O. and Kim, J.J., 2019, Stratigraphic analysis of the drilling core in Woljong-ri coastal area, Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 55, 1-20 (in Korean with English abstract).
- Korea Meteorological Administration (KMA), 2023, <https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do> (February 13, 2023).
- Lancaster, N., 1982, Dunes on the Skeleton Coast, Namibia (South West Africa): geomorphology and grain size relationships. *Earth surface processes and landforms*, 7, 575-587.
- Livingstone, I., Bullard, J.E., Wiggs, G.F. and Thomas, D.S., 1999, Grain-size variation on dunes in the Southwest Kalahari, Southern Africa. *Journal of sedimentary research*, 69, 546-552.
- Maiklem, W.R., 1968, Some hydraulic properties of bioclastic carbonate grains. *Sedimentology*, 10, 101-109.
- Martínez, M.L., Psuty, N.P. and Lubke, R.A., 2004, A perspective on coastal dunes. In: Martínez, M. L. and Psuty, N.P. (eds.), *Coastal Dunes: Ecology and Conservation*. Springer, Berlin, 3-10.
- Muhs, D.R., Skipp, G., Schumann, R.R., Johnson, D.L., McGeehin, J.P., Beann, J., Freeman, J., Pearce, T.A. and Rowland, Z.M., 2009, The origin and paleoclimatic significance of carbonate sand dunes deposited on the California Channel Islands during the last glacial period. In: Damiani, C.C. and Garcelon, D.K. (eds.), *Proceedings of the 7th California Islands Symposium*. Institute for Wildlife Studies, Arcata, 3-14.
- National Geographic Information Institute (NGII), 2016, <https://www.map.ngii.go.kr/ms/map/NlipMap.do> (November 25, 2016).
- National Institute of Ecology, 2017, Survey on the coastal sand dune status for conservation and management plan, Ministry of Environment, 192 p (in Korean).
- Navapro, M., Muñoz Pérez, J.J., Roman-Sierra, J., Ruiz-Cañavate, A. and Gomez-Pina, G., 2015, Characterization of wind-blown sediment transport with height in a highly mobile dune (SW Spain). *Geologica Acta*, 13, 155-166.
- Nickling, W.G., 1988, The initiation of particle movement by wind. *Sedimentology*, 35, 499-511.
- Nordstrom, K., Psuty, N. and Carter, B., 1990, *Coastal dunes: Form and Process*. Wiley, Chichester, 392 p.
- Park, C.Y., Choi, K.H. and Kim, J.W., 2009, Geomorphological Characteristics and Process of Development of Okjuk-dong Coastal dune, Daecheong Island. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 16, 101-111 (in Korean with English abstract).
- Park, K. and Park, J.H., 2009, A Study on Dune-building Periods and Soil-forming Periods of Gimnyeong Sand dune Area. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 16, 111-122 (in Korean with English abstract).
- Park, K. and Son, I., 2007, Luminescence Dating Results from Kimnyong-Wolchung Coastal Sand-dune and Their Implications. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 14, 33-41 (in Korean with English abstract).
- Park, K., Son, I. and Chang, E.M., 2004, Development of Coastal Sanddunes at Kimyong-Wolchung Beach in Jeju. *Journal of the Korean Association of Regional Geographers*, 10, 851-864 (in Korean with English abstract).
- Pye, K. and Tsoar, H., 2008, *Aeolian Sand and Sand Dunes*. Springer, Berlin, 416 p.
- Rhew, H.S. and Kang, J.H., 2020, Morphological and Textural Characteristics of the Beach-dune System in South Korea, with the Possibility of a Dune Type Scheme Based on Grain-size Trend. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 27, 53-73 (in Korean with English abstract).
- Rice, M.A., 1991, Grain shape effects on aeolian sediment transport. In: Barndorff-Nielsen, O.E. and Willetts, B.B., *Aeolian Grain Transport 1: Mechanics*, Springer, Vienna, 159-166.
- Schwarz, C., Van Starrenburg, C., Donker, J. and Ruessink, G., 2021, Wind and sand transport across a vegetated foredune slope. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 126, e2020JF005732.
- Seo, J.C., 2005, A Luminescence Dating for a Relict Dune from the Sindu Dune field. *Journal of the Korean Association of Regional Geographers*, 11, 1-11 (in Korean with English abstract).

- tion of Regional Geographers, 11, 114-122 (in Korean with English abstract).
- Seo, J.C. and Son, M.W., 2006, The Geomorphology and the Sediment Characteristics of Sagye Coastal Dune, Jeju Island, Korea. *Journal of the Korean Association of Regional Geographers*, 12, 631-644 (in Korean with English abstract).
- Shin, W.J., Kim, J.W., Kim, J.Y. and Choi, J.H., 2017, The Processes of Coastal Dunes and its Geomorphological Characteristics, Ui-island, Shinan-gun, Korea. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 24, 1-13.
- Tsoar, H., Levin, N., Porat, N., Maia, L.P., Herrmann, H.J., Tatumi, S.H. and Claudino-Sales, V., 2009, The effect of climate change on the mobility and stability of coastal sand dunes in Ceará State (NE Brazil). *Quaternary Research*, 71, 217-226.
- Visher, G.S., 1969, Grain size distributions and depositional processes. *Journal of Sedimentary Research*, 39, 1074-1106.
- Woo, K.S. and Kim, J.K., 2005, The age and constituents of the carbonate sand dunes in Heopjae area, Jeju Island: Implication for late Holocene sea level change. *Journal of the Geological Society of Korea*, 41, 499-510 (in Korean with English abstract).
- Yizhaq, H., Ashkenazy, Y. and Tsoar, H., 2007, Why do active and stabilized dunes coexist under the same climatic conditions?. *Physical Review Letters*, 98, 188001.
- Yoon, S., Jung, C.Y., Hyun, W.H. and Song, S.T., 2014, Tectonic history of Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 50, 457-474 (in Korean with English abstract).
- Yordanova, E.K. and Hohenegger, J., 2007, Studies on settling, traction and entrainment of larger benthic foraminiferal tests: implications for accumulation in shallow marine sediments. *Sedimentology*, 54, 1273-1306.
- Youn, J.S. and Kim, T.J., 2011, Seasonal Variations of Hamo and Hyeopjae Beach Sediments in the Western Part of Jeju Island. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 32, 265-275 (in Korean with English abstract).
- Zhang, Z. and Dong, Z., 2015, Grain size characteristics in the Hexi Corridor Desert. *Aeolian Research*, 18, 55-67.

Received : June 16, 2023

Revised : July 7, 2023

Accepted : July 7, 2023