



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

박사학위논문

제주 우도 홍조단괴 해빈
지형변화 특성 연구

제주대학교 일반대학원

지구해양과학과

윤 우 석

2023년 2월



박사학위논문

제주 우도 홍조단괴 해빈
지형변화 특성 연구

제주대학교 일반대학원

지구해양과학과

윤 우 석

2023년 2월



제주 우도 홍조단괴 해빈 지형변화 특성 연구

지도교수 윤 석 훈

윤 우 석

이 논문을 이학 박사학위 논문으로 제출함

2023년 2월

윤우석의 이학 박사학위 논문을 인준함

심사위원장

위 원

위 원

위 원

위 원

문 재 홍

이 광 춘

안 응 산

강 정 찬

윤 석 훈



제주대학교 대학원

2023년 2월

Characteristics of Morphological Change in the Udo Rhodolith Beach, Jeju Island

Woo Seok Yoon

(Supervised by professor Seok-Hoon Yoon)

A thesis submitted in partial fulfillment of the
requirement for the degree of Doctor of
Philosophy in Science

Feb. 2023

This thesis has been examined and approved.

DEPARTMENT OF EARTH AND MARINE SCIENCES
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

List of Figures	v
List of Tables	xi
Abstract	xiii
제1장 서 론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 연구 내용 및 방법	2
1.3 선행연구	4
제2장 연구지역 개요	7
2.1 우도의 지형 및 지질	7
2.2 홍조단괴 해빈 개요	9
2.2.1 해빈지형	9
2.2.2 홍조단괴 생성과정	11
2.2.3 홍조단괴해빈 분포	13
제3장 해빈 외해역의 해양환경	15
3.1 서 론	15
3.2 연구방법	16
3.2.1 우도수로 해저지형 분석	16
3.2.2 연안역 홍조단괴 분포조사	16
3.3 해저지형 및 저질특성	19
3.3.1 해저지형 특성	19
3.3.2 해저면 저질 특성	20

3.4 기상 및 해황특성	27
3.4.1 기상특성	27
3.4.2 해황특성	30
3.4.3 주요 태풍의 특성	34
3.5 해양생태학적 특성	37
3.6 소 결	38
제4장 홍조단괴 해빈의 장기 지형분포 변화	39
4.1 서 론	39
4.2 연구자료 및 분석방법	39
4.2.1 연구자료	39
4.2.2 분석방법	40
4.3 분석결과	43
4.3.1 조위 추정 결과	43
4.3.2 면적 분석 결과	43
4.4 소 결	51
제5장 홍조단괴해빈의 규모 및 지형변화	53
5.1 서 론	53
5.2 연구 방법	54
5.2.1 조사범위 및 시기	54
5.2.2 지상 라이다 측량	57
5.2.3 드론 영상촬영 처리	58
5.2.4 해빈 지형 및 면적 분석 방법	67
5.3 해빈 규모 변화	71
5.3.1 라이다 측량을 이용한 해빈 부피 및 면적 변화	71
5.3.2 무인항공 영상을 이용한 해빈 면적 변화	86

5.3.3 라이다와 무인항공 영상의 면적 차이	95
5.4 해빈 세부지형 변화	103
5.4.1 평상환경(계절별) 해빈 지형 변화	103
5.4.2 폭풍환경(태풍별) 해빈 지형 변화	110
5.5 소 결	116
제6장 홍조단괴 해빈의 퇴적물 특성 변화	121
6.1 서 론	121
6.2 연구 시료 및 방법	121
6.2.1 연구 시료	121
6.2.2 입도분석	122
6.2.3 입자기원 조성 분석	122
6.3 퇴적물 입자의 조직특성 변화	127
6.3.1 2016년-2017년 해빈 퇴적물 조직특성 변화	127
6.3.2 2018년-2019년 해빈 퇴적물 조직특성 변화	132
6.3.3 2019년-2020년 해빈 퇴적물 조직특성 변화	139
6.4 소 결	146
제7장 고 찰	149
7.1 지형변화 영향 요인	149
7.1.1 홍조단괴 해빈 퇴적물 공급원	151
7.1.2 연안역-해빈 퇴적물 이동 영향 요인	153
7.1.3 퇴적물 재배치	161
7.2 해빈의 지형변화 특성	162
7.2.1 계절별 변화 특성	162
7.2.2 해빈의 장기적 변화	173
7.3 우도 홍조단괴 해빈 최적 모니터링 기법	176

7.3.1	우도 홍조단괴 해빈 지형 모니터링 방법 비교	176
7.3.2	드론을 이용한 우도 홍조단괴 해빈 모니터링 방법 제시	177
제8장 결 론		181
참고문헌		185
국문요약		195

List of Figures

Fig. 1-1. Location map of the study area (Udo Rhodolith Beach).	6
Fig. 2-1. Geologic and topographic map of the Udo Island.	8
Fig. 2-2. Aerial orthoimage, schematic diagram and scenic view showing physiography and sediment distribution in Udo Rhodolith beach.	10
Fig. 2-3. A model for the structure and dynamics of rhodoliths, rhodolith beds, and geological structures derived from them.	12
Fig. 2-4. Locations of boreholes and Ground Penetrating Radar(GPR) track line and the rhodolith bed exposed on a trench wall and borehole core sample in backshore area.	14
Fig. 3-1. Map showing bathymetry and locations of offshore survey stations in Udo Channel.	18
Fig. 3-2. Bathymetry map and seafloor profiles in Udo Channel.	21
Fig. 3-3. 3-D bathymetry map and seafloor photographs in the eastern part of the Udo Channel neighboring the Udo Rhodolith Beach.	22
Fig. 3-4. Photos of type A seafloor which is densely covered by rhodoliths in station DT-6.	24
Fig. 3-5. Photos of type B seafloor (DT-7) which is covered by sandy sediments composed of broken particles of rhodoliths and shells.	25
Fig. 3-6. Photos of type C seafloor (DT-8) where unbroken rhodolith nodules are mixed with sandy sediments.	25
Fig. 3-7. Classification of seabed types in Udo Channel and a photo of the seafloor. ..	26
Fig. 3-8. Five-year (2016-2020) average monthly rainfall and temperature.	28
Fig. 3-9. Time series of wind speed and direction (2016~2020).	29
Fig. 3-10. Time series of significant wave height-period and wave	

direction during Aug. 2018 at the PC station.	31
Fig. 3-11. Time series of significant wave height-period and wave direction at the PC station during Feb. 2019.	32
Fig. 3-12. Scatter diagrams of observed currents by ADCP at the PC station in Udo Channel.	33
Fig. 3-13. Progressive vector diagrams obtained from ADCP measurements in summer and winter case.	33
Fig. 3-14. Tracks of the typhoons analyzed in this study.	36
Fig. 4-1. Aerial photographs of the Udo Rhodolith Beach from 1948 to 2015. ..	41
Fig. 4-2 Long-term changes of beach area and shoreline in the Udo Rhodolith Beach.	47
Fig. 4-3 Aerial photos in Mar. 1991 and Mar. 1995, and areal change between two photographs.	49
Fig. 4-4 Beach area and shoreline change of the Udo Rhodolith Beach from Mar. 1995 to Apr. 2015.	50
Fig. 5-1. Subdivision of the Udo Rhodolith Beach by coastal cusps.	56
Fig. 5-2. Diagram showing survey ranges of the terrestrial LiDAR scanning and Drone mapping, Specification of the terrestrial laser scanner.	59
Fig. 5-3. Field work photos of terrestrial LiDAR scanning and snap shots of data processing.	60
Fig. 5-4. Diagram showing survey ranges of the terrestrial LiDAR scanning and Drone mapping, Specification of the drone system.	64
Fig. 5-5. Field work photos of dron mapping and raw data.	65
Fig. 5-6. GIS modelling for topographic change of the Udo Rhodolith Beach. ..	69
Fig. 5-7. Analysis of spectral characteristics in the Udo Rhodolith Beach. ...	70
Fig. 5-8. LiDAR-based digital elevation maps of the Udo Rhodolith Beach from Sep. 2016 to May 2017.	73

Fig. 5-9. Inter-seasonal elevation changes of the Udo Rhodolith Beach from Sep. 2016 to May 2017.	74
Fig. 5-10. LiDAR-based digital elevation maps of the Udo Rhodolith Beach from Jul. 2018 to Apr. 2019.	77
Fig. 5-11. Inter-seasonal elevation changes of the Udo Rhodolith Beach from Jul. 2018 to Apr. 2019.	78
Fig. 5-12. LiDAR-based digital elevation maps of the Udo Rhodolith Beach from Aug. 2019 to Apr. 2020.	82
Fig. 5-13. Inter-seasonal elevation changes of the Udo Rhodolith Beach from Aug. 2019 to Apr. 2020.	83
Fig. 5-14. Drone-based orthoimages of the Udo Rhodolith Beach from Aug. 2018 to Apr. 2019.	88
Fig. 5-15. Beach area and shoreline change of the Udo Rhodolith Beach from Aug. 2018 to Apr. 2019.	89
Fig. 5-16. Drone-based orthoimages of the Udo Rhodolith Beach from Aug. 2019 to May 2020.	92
Fig. 5-17. Beach area and shoreline change of the Udo Rhodolith Beach from Aug. 2019 to May 2020.	93
Fig. 5-18. Drone-based orthoimages of the Udo Rhodolith Beach from May 2021 to Oct. 2021.	96
Fig. 5-19. Beach area and shoreline change of the Udo Rhodolith Beach from May 2021 to Oct. 2021.	97
Fig. 5-20. Comparison of Lidar and drone-based area of the Udo Rhodolith Beach.	100
Fig. 5-21. Topographic change models of the Udo Beach in association with 4 types of beach area change.	102
Fig. 5-22. Morphological change between spring and summer seasons in the Udo Rhodolith Beach.	104

Fig. 5-23. Morphological change between summer and autumn seasons in the Udo Rhodolith Beach.	106
Fig. 5-24. Morphological change between autumn and winter seasons in the Udo Rhodolith Beach.	109
Fig. 5-25. Morphological change between winter and spring next year in the Udo Rhodolith Beach.	111
Fig. 5-26. Elevation and beach profile changes before and after typhoons. ..	115
Fig. 5-27. Area and volume changes in the Udo Rhodolith Beach from 2016 to 2021.	118
Fig. 5-28. Volume change by subdivision zones in the Udo Rhodolith Beach from 2016 to 2021.	119
Fig. 5-29. Area change by subdivision zones in the Udo Rhodolith Beach from 2016 to 2021.	120
Fig. 6-1. Sampling locations for sediment textural analysis in Udo Rhodolith Beach.	124
Fig. 6-2. Textural classification ternary diagram and nomenclature.	126
Fig. 6-3. Mean grain-size distribution of surface sediments in Udo Rhodolith Beach from 2016 summer to 2017 spring.	130
Fig. 6-4. Grain sorting distribution of surface sediments in Udo Rhodolith Beach from 2016 summer to 2017 spring.	131
Fig. 6-5. Mean grain-size distribution of surface sediments in Udo Rhodolith Beach from 2018 summer to 2019 spring.	137
Fig. 6-6. Grain sorting distribution of surface sediments in Udo Rhodolith Beach from 2018 summer to 2019 spring.	138
Fig. 6-7. Mean grain-size distribution of surface sediments in Udo Rhodolith Beach from 2019 summer to 2020 spring.	144
Fig. 6-8. Grain sorting distribution of surface sediments in Udo Rhodolith Beach from 2019 summer to 2020 spring.	145

Fig. 7-1. Beach dynamic system showing sediment gain and loss in association with surrounding environments.	150
Fig. 7-2. Map showing distribution of 3 types seafloor materials and flow direction of tide in Udo Canal.	152
Fig. 7-3. Time series of significant wave height and direction during the periods of 1-15 August 2018, and 1-15 February 2018.	155
Fig. 7-4. Nearshore processes for sediment transportation in a subtidal beach.	158
Fig. 7-5. Time series of current vectors at the ADCP site during the Chaba and Soulik.	159
Fig. 7-6. Spatial patterns of simulated mean wave direction and significant wave height during four typhoons.	160
Fig. 7-7. Conceptual diagram of the various mechanisms of sediment transport in beach.	163
Fig. 7-8. Lidar-based on area and volume changes in the Udo Rhodolith Beach from 2016 to 2021.	165
Fig. 7-9. Drone-based area change in the Udo Rhodolith Beach from 2018 to 2021.	166
Fig. 7-10. Schematic diagram of the Udo Rhodolith Beach showing overall topography and distribution of the beach sediments during summer season.	167
Fig. 7-11. Schematic diagram of the Udo Rhodolith Beach showing overall topography and distribution of the beach sediments during winter season. ...	169
Fig. 7-12. Conceptual model of sediment transport processes governing the topographic change of the Udo Rhodolith Beach.	172
Fig. 7-13. Conceptual model of the sediment exchange in the Udo Rhodolith Beach.	175
Fig. 7-14. Topographic map based on LiDAR and Drone measurements.	180

List of Tables

Table 3-1. Offshore survey stations in Udo Channel.	17
Table 3-2. Summary of five-year (2016-2020) average monthly weather data by Seongsan AWS.	28
Table 4-1. Equations for tidal non-harmonic constants.	42
Table 4-2. Information of TBM in Jeju and Seongsan tide stations.	44
Table 4-3. Information of tide levels at the time of the aerial photo shots. ..	45
Table 4-4. Summary of areal change in the Udo Rhodolith Beach from 1967 to 2019.	52
Table 5-1. Survey schedule of LiDAR scanning and drone mapping.	55
Table 5-2. Coordinates of the ground control points measured by Trimble R2 GNSS (LiDAR survey).	61
Table 5-3. Coordinates of the ground control points that measured by Gintec F90 GNSS (Drone survey).	66
Table 5-4. The results of LiDAR-based area calculation of the Udo Rhodolith Beach from Sep. 2016 to Oct. 2021.	84
Table 5-5. The results of LiDAR-based volume calculation of the Udo Rhodolith Beach from Sep. 2016 to Oct. 2021.	85
Table 5-6. The results of Drone-based area calculation of the Udo Rhodolith Beach from Aug. 2018 to Oct. 2021.	98
Table 5-7. Types of beach area change by Lidar and Drone measurements. ·	101
Table 5-8. Seasonal change of backshore width in zone 3.	108
Table 5-9. Rate of volume and areal changes during typhoons.	114
Table 6-1. Sampling locations for this study.	123
Table 6-2. Sampling date in Udo Rhodolith Beach.	123
Table 6-3. Grain-size terminology.	125

Table 6-4. Classification of the degree of sorting.	125
Table 6-5. Results of sediment texture analysis in Udo Rhodolith Beach between sep. 2016 and may 2017.	129
Table 6-6. Results of sediment texture analysis in Udo Rhodolith Beach between July 2018 and Apr. 2019.	135
Table 6-7. Composition ratio of rhodolith, shell fragments and lithic fragments between July 2018 and Apr. 2019.	136
Table 6-8. Results of sediment texture analysis in Udo Rhodolith Beach between Aug. 2019 and Apr. 2020.	142
Table 6-9. Composition ratio of rhodoliths, shell fragments and lithic fragments between Aug. 2019 and Apr. 2020.	143
Table 6-10. Sediment textural change according to beach change.	148
Table 7-1. Weather information of the eastern Jeju Island during the typhoon events.	171
Table 7-2. Technical comparison of topographic monitoring methods by video, GNSS, LiDAR and UAV operated in the Udo Rhodolith Beach. ..	179

Abstract

The Udo Rhodolith Beach located in the eastern part of Jeju Island is a small-scale beach with a length of about 850 m and a maximum width of 30 to 35 m. It is an unique and representative coastal environment of the Jeju volcanic island as the beach sediments are dominantly made up of rhodoliths which are nodules of red algae. Recently, however, concern in the preservation of this precious natural heritage has been cautiously raised in relation to the development of coastal areas and frequent occurrence of abnormal weather and marine conditions. Hence, this thesis analyzes the characteristics of annual and seasonal changes in scale and topography of the beach from 2016 to 2021 and elucidates causes and mechanism of the observed beach changes. The analysis uses the topographic data of terrestrial LiDAR scanning and drone photogrammetry, aided by weather and oceanographic datasets of wind, wave, current and tide as well as marine geological data of offshore topography and sediment distribution.

The beach is topographically divided into four gently indented areas (zones 1 to 4) with the rocky protrusions at the boundaries. Each zone is 140 to 310 m in length, and runs primarily north-south, northwest-southeast, and northeast-southwest. Zone 3 is the largest subdivision accounting for about 47% of average volume of the beach (i.e. total volume of bedrocks and sediment beds above the mean sea level), and zone 4 accounts for 31%, zone 1 for 12%, and zone 2 for 10%.

More than 95% of the beach sediments are originated from rhodoliths, and classified into gravel, sandy gravel, and gravel sand in grain size. The rhodolith beds are deposited on volcanic bedrocks with an average thickness of 1.5 m and a maximum thickness of 4.5 m. The rhodolith sediments of the beach are most likely delivered from two main offshore source areas

including A-type seafloor (densely covered by growing rhodoliths), north of Haumokdong Port, and as well as B-type seafloor occupied by large-scale sand ridges, west of the beach where some growing rhodoliths are mixed with sand-sized debris of rhodoliths and shells. The movement of rhodolith sediments toward the beach seems to be mainly controlled by year-round eastward residual flow of the tide, waves strengthened by northwest wind in winter, and long-period swells induced by typhoons in summer. On the other hand, sediment accumulation and erosion in the foreshore are determined by the relative strength of two opposite flows on the beachface, swash (landward) and backwash (seaward). In the beach backshore, wind also plays an important role in relocation of the dried sediments.

The analyses of LiDAR scanning data and drone photographs suggest two contrasting features of alongshore topographic change depending on the seasonal weather and sea conditions. During the spring and summer, dominant northward flow and wave propagation were observed in the nearshore, the northern part of the beach accreted while the southern part eroded. In contrast, it appears the opposite topographic changes during autumn and winter. Furthermore, this phenomenon also occurs with similar pattern during typhoons. When typhoon moved northward along the western sea of the Jeju Island, northward current and wave propagation were dominant in Udo Channel. On the other hand, when the typhoon passed over eastern sea of Jeju Island, southward current and wave propagation occurred in the channel. The dominant direction of water movement was southeastward and northeastward when the typhoon pathway lay to the east or west of Jeju Island, respectively. As these enhanced waves and currents approached obliquely to the N-S trending coastline, the beach sediments were reworked and transported southward or northward mainly by longshore currents, which likely acts as a major control mechanism regarding alongshore topographic change with respect to the Udo Rhodolith Beach.

Over the entire survey period from 2016 to 2021, it was found that the volume of the beach varies depending on the characteristics of weather or sea conditions but remains at a certain level in the long run, while the area of beach gradually decreases. This indicates that the coastline slowly retreats as a result of sediment erosion in the lower foreshore and the subtidal zone although the subaerial part of the beach maintains its volume, not significantly reduced. The gradual reduction of the beach extent is interpreted to result from a combined effect of enhanced beach erosion by natural and artificial factors. Those are sea-level rise and abnormal high waves due to long-term climate change, and loss of buffer zone behind the beach by construction of seawall, road and buildings.

제1장 서론

1.1 연구 배경 및 목적

해안에 발달하는 대표적인 퇴적지형 중의 하나인 해변(beach)은 주로 파도에 의해 운반된 모래나 자갈 등이 미고화 상태로 집적되어 있는 해안지형으로서, 간조선에서부터 내륙 쪽으로 가면서 뚜렷한 지형변화(해안절벽, 사구지대 등)나 육상 식생이 나타나는 지점까지의 해변지역에 발달한다(Komar, 1976; Davis, 1985). 전 세계적으로 볼 때 해안지역의 약 40%가 해변으로 이루어져 있지만(Davis, 1985), 신생대 제4기에 탄생한 젊은 화산섬인 제주도의 해변은 대부분 화산암반 돌출부 사이의 만입부에 형성되어 있어서 전체 해안의 7% 정도에 지나지 않으며 개별 해변의 길이도 대부분 500 m를 넘지 못한다(Kim and Park, 1997). 그럼에도 불구하고 제주도의 소규모 만입형 해변은 화산암반이 우세한 제주도 해안경관의 미적 가치와 다양성을 높여주는 중요한 자연환경 중의 하나이다.

특히, 제주도 동부에 위치한 우도 서광리의 홍조단괴 해변(Fig. 1-1)은 구성 퇴적물의 대부분이 국내에서는 보기 드문 홍조류 기원의 단괴와 그 쇄설물로 이루어져 있다. 홍조단괴(rhodolith)로 이루어진 해양퇴적물은 세계 여러 곳에 분포하는 것으로 알려져 있지만 해변퇴적물 대부분이 홍조단괴로만 이루어진 경우는 극히 드물게 나타난다(NRICH, 2010). 이러한 특이성과 희소성으로 인해 홍조단괴 해변은 2004년에 천연기념물로 지정되었으며, 유네스코 제주 세계지질공원의 지질명소(geosite)의 하나인 우도의 핵심 탐방지로도 각광 받고 있다(Kim et al., 2003; Heo et al., 2012; Woo et al., 2013).

그러나 홍조단괴 해변은 우도 관광객 증가에 따른 개발 과정에서 1995년 해안도로가 확대 포장되면서 후안 일부와 배후지역이 잠식되었으며, 2000년대에 들어와서는 해안도로와 해변 경계에 1~2 m 높이의 호안이 축조되어 내륙으로의 이동성을 거의 상실하게 되었다(Jeju Special Self-Governing Province 2017). 그 이후 해변에서는 침식이나 퇴적물 유실과 같은 급격한 지형변화가 목격되어 해변의 보존에 대한 우려가 꾸준히 제기되었다. 이에 따라 문화재청과 제주특별자치도에서는 홍조단

과 해빈의 지형변화 원인을 규명하고 보존대책을 수립하기 위하여 해빈과 인근 연안역을 대상으로 2016년부터 2021년까지 5회의 모니터링 조사를 실시하였다(Jeju Special Self-Governing Province, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021).

이 논문에서는 2016년 이후 모니터링 조사를 통해 취득된 해빈 및 인접 연안역의 해양지질 및 해양물리 자료를 종합하여 분석함으로써 인위적으로 조정된 홍조단괴 해빈의 계절 및 다년간 지형변화의 영향요인과 과정을 밝히고자 한다. 이 논문에서 제시된 결과는 우도 홍조단괴 해빈의 미래 변화에 대한 예측과 이에 대응하여 보존 및 관리 방안을 수립하는 데 기초자료로 활용할 수 있을 것이다.

1.2 연구 내용 및 방법

해빈의 지형변화는 자연적 요인인 파랑, 조석, 바람, 계절 폭풍(태풍)과 인위적 요인인 항만건설, 방파제, 해안 석축 등에 의해 주로 발생하며, 최근에는 지구 온난화에 따른 기후변화와 해수면 상승 등 다양한 요인들이 복합적으로 작용하여 변화가 가속화되기도 한다. 계절에 따른 지형변화는 해빈 지역에서 발생하는 계절풍의 영향으로 파랑이 발달하게 되는데, 파랑의 영향으로 해빈 퇴적물이 수시로 이동하는 양상을 보인다. 주로 우세파랑은 해빈에 인접하여 연안류, 이안류와 같은 해류를 생성시키며 이에 따라 퇴적물이 이동되어 해빈 면적과 세부지형의 끊임없는 변화를 야기시킨다. 주로 고파랑이 형성되는 시기(폭풍, 겨울철 고파랑 환경)에서는 장주기 해파가 발달하여 해빈면에 가해지는 에너지가 보다 넓은 범위로 작용하기 때문에 짧은 기간 내에 해빈의 지형변화를 야기하기도 한다(Sam Boggs, 2006).

한편, 기후변화로 인한 해수면 상승에 따른 해빈 침식은 전 지구적인 문제로서 전 세계의 약 70% 이상의 해빈이 침식되는 것으로 보고되었다(Zhang et al., 2004). 특히, 해수면 상승에 의한 해안지대의 침식속도는 해수면 상승속도의 100배 정도의 큰 규모로 진행된다는 연구결과들이 오랫동안 보고되었으며(Bruun 1954, 1962), 특히, 조위자료 기반으로 우리나라 주변 해수면 변동 연구에서는 제주해역의 해수면 상승률을 연간 5.6 mm로 보고하였으며(Yoon et al, 2012), 이는 전세계 평균치보다 3배 가량 높은 상승률로서 제주도 해안에 발달하는 해빈의 지형변화는

미래에 더 가속화될 수 있음을 지시한다.

우도 홍조단괴 해빈의 지형변화 요인과 과정을 밝히기 위해서는 먼저 계절에 따른 기상 및 해황 변화나 태풍과 같은 단기적 요인에 따른 지형변화 양상과 과정을 규명하여야 한다. 일반적으로 해빈을 구성하고 있는 퇴적물은 주로 육상기원 퇴적물과 외해에서 공급되는 퇴적물이 복합적으로 구성되어 있으나, 연구지역인 우도 홍조단괴 해빈은 퇴적물 주요 공급원이 외해역에 위치하기 때문에(Kim et al., 2003) 퇴적물 순환체계를 이해하기 위해서는 해양물리, 해양생태 등의 다양한 해양 정보를 이용하여 해석되어야 한다. 따라서 이 논문에서는 홍조단괴 해빈의 지형조사, 홍조단괴 해빈 연안역 해양 조사 등의 현장조사와 더불어 홍조단괴 해빈과 관련된 항공사진, 해양환경 및 기상 자료에 대한 분석도 병행하여 실시하였다.

홍조단괴 해빈 조사는 해빈의 지형변화를 관찰하고 이에 대한 분류를 목적으로 시기별로 해빈을 대상으로 라이다 측량, 퇴적물 시료 채취 및 조직 특성 분석, 드론을 이용하여 월별 해빈 영상촬영을 진행하였다. 라이다 측량은 레이저 펄스를 해빈으로 주사하여 반사된 레이저의 도달 시간을 측정하여 대상 해빈의 지형 정보(수평상 위치, 수직고도 등)를 획득하는 측량 방법으로서 단기간에 발생하는 해빈 지형변화를 파악할 수 있다. 퇴적물 시료 채취 및 조직 특성 분석은 지형변화에 따른 해빈의 조직 특성 변화를 파악하기 위하여 실시하였으며, 홍조단괴 해빈 전 구역을 대상으로 20개 정점 선정 후 1년에 5회(춘계, 하계, 태풍 후, 추계, 동계)에 걸쳐 조사하였다. 드론을 이용한 해빈 영상촬영은 매월 1회 대조기 간조시간을 이용하여 홍조단괴 해빈 전구역을 대상으로 진행하였으며 이를 통해 해빈 면적 변화를 월 단위로 확인할 수 있다. 홍조단괴 해빈 연안역 환경조사는 홍조단괴 해빈을 구성하고 있는 퇴적물이 분포하는 해양환경을 파악하고자 수중 잠수조사를 통해 연안역에 홍조단괴 분포 상태를 파악하였다. 아울러, 기존 보고된 우도 홍조단괴 해빈 관련 보고서 및 문헌 등을 활용하여 해양환경 특성에 대하여 분석하였다. 그리고 국토지리정보원에서 공개된 홍조단괴 해빈이 포함된 항공사진 총 10매를 활용하여 장기간 홍조단괴 해빈의 분포 변화에 대해서도 파악하였다.

종합해보면 이 논문에서는 우도 홍조단괴 해빈 및 연안역 조사결과를 바탕으로 해빈 구성퇴적물인 홍조단괴의 연안역 분포양상 확인, 시기별 해빈 지형 측량 자료

기반 해빈 지형 변화 특성 분석, 지형변화에 따른 해빈 퇴적물의 조직특성 변화 분석, 기존 연구결과를 기초로 한 우도 홍조단괴 해빈 주변 연안역의 해양환경 특성 파악, 과거 항공영상을 이용한 해빈의 장기 지형변화 특성에 대하여 분석하였다.

1.3 선행연구

우도 홍조단괴 해빈은 2000년대 이전까지만 하더라도 산호사 해빈으로 잘못 알려져 있었으나, 2000년대에 들어오면서 구성 퇴적물이 동물성 산호가 아닌 식물성 홍조류에 기인한 입자로 알려지면서(Woo, 2001, 2002) 그 이후 학술적으로 많은 관심을 받게 되었다.

Kim et al. (2003)의 연구에서는 서광리 해빈(옛 산호사 해빈) 퇴적물의 99% 이상 홍조단괴와 그 조각으로 이루어져 있으며, 덮개상 홍조류(무절산호말류, Melobesioidean algae)의 일종인 *Lithophyllum* sp.가 홍조단괴 우도 연안역에서 해양물리적 조건에 의해 구르면서 단괴 형태로 형성되었음을 보고하였다.

Heo et al. (2012)는 홍조단괴의 계절에 따른 셀(세포) 크기 변화를 관찰하여 홍조단괴의 성장률을 분석하여 약 100년의 기간 동안 형성되었음을 보고하였다. 또한 홍조단괴에 대한 마그네슘(Mg)을 비롯한 미량원소 분석을 통해 홍조단괴가 형성되었던 고해양환경의 복원을 시도하였다.

Jeong (2016)에서는 홍조단괴 해빈 연안역(우도수로)을 대상으로 과거 위성영상 자료, 측량자료 및 퇴적물 조직특성 자료를 바탕으로 1985년부터 1995년 해빈 변화를 분석한 결과, 해빈의 가장 넓은 면적을 점유하고 있던 시기는 1995년으로 분석되었다.

Jeong et al. (2020)에서는 우도 홍조단괴 해빈 연안역을 해저지형학적 특징, 홍조단괴 분포양상, 해양물리적, 생태학적 특징으로 4개의 구역으로 구분하였으며, 다양한 크기와 모양의 홍조단괴 분포양상은 해저지형의 형태, 해저에서의 해양 물리적 특성의 영향을 미친다고 보고하였다. 해빈에서의 지형변화 특성을 분석하기 위하여 해빈 점유 면적이 가장 크게 나타나는 지역(본 연구에서의 3구역)을 대상으로 해안 전면부에 암반이 우세하게 분포하고 해양에너지에 노출이 적은 A 구역(3구역

북부해안)과 해빈에 암반이 없으며, 해양에너지에 대부분 노출되어 있는 B 구역(3 구역 남부)으로 구분하여 계절별 지형변화를 비교하였다. 해빈 전체의 침·퇴적 변화는 여름철 동안 북측이 퇴적되며 남측은 침식되고, 봄철은 북측 침식, 남측 퇴적되는 경향을 보이는 것으로 보고하였다. 해빈 부피는 가을에 최대, 봄과 여름철의 부피는 유지되었으며, 이러한 계절적 지형변화 특성은 아시아 몬순 기후의 영향으로 발생하는 계절풍이 주요 요인으로 해석하였다.

Jeong et al. (2022)에서는 제주도와 우도 사이에 발달하는 해저지형(우도수로)을 따라 독특한 해양환경에 맞추어 홍조단괴 분포 특성에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과, 생존 홍조단괴 분포는 해저지형 및 이에 따른 유체역학적 특성 그리고 조직적 특성과 관련 있음을 보고하였다. 특히 사질퇴적물 분포 지역은 수심이 얕고 강한 유체의 흐름과 수압에 노출됨에 따라 홍조단괴의 생존에 불리한 것으로 판단하였으며, 수심 10~25 m 지역은 경사가 완만한 지형 특성으로 인해 홍조단괴가 구르면서 성장하기에 최적 조건이기 때문에 홍조단괴 분포밀도가 높은 것으로 해석하였다. 우도 수로는 충분한 햇빛, 구르기에 필요한 물리적 에너지 등 홍조단괴 성장에 최적의 조건이며, 홍조단괴의 생존도 및 분포는 해저지형에 의해 좌우되는 것으로 평가하였다.

제주특별자치도에서는 우도 홍조단괴 해빈 지형 변화 특성 규명을 위하여 2014년부터 RTK-GPS를 이용한 측량 광파기를 이용한 정밀 측량, 항공사진 분석, 비디오 모니터링 등 다양한 방법으로 해빈에서 발생하는 지형변화를 관측하였으며, 2016년부터 세밀하고 정량적인 지형분석을 위하여 라이다 측량을 이용한 해빈 측량, ADCP를 이용한 해양조사가 실시되었다. 2018년부터는 드론을 활용하여 우도 홍조단괴 해빈을 대상으로 정사영상을 촬영 후 해빈 변화에 대한 연구자료를 구축하였다. 이에 따라 5년간 우도 홍조단괴 해빈에 대한 해양물리학적, 지질학적 자료들이 축적되었다(Jeju Special Self-Governing Province, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021).

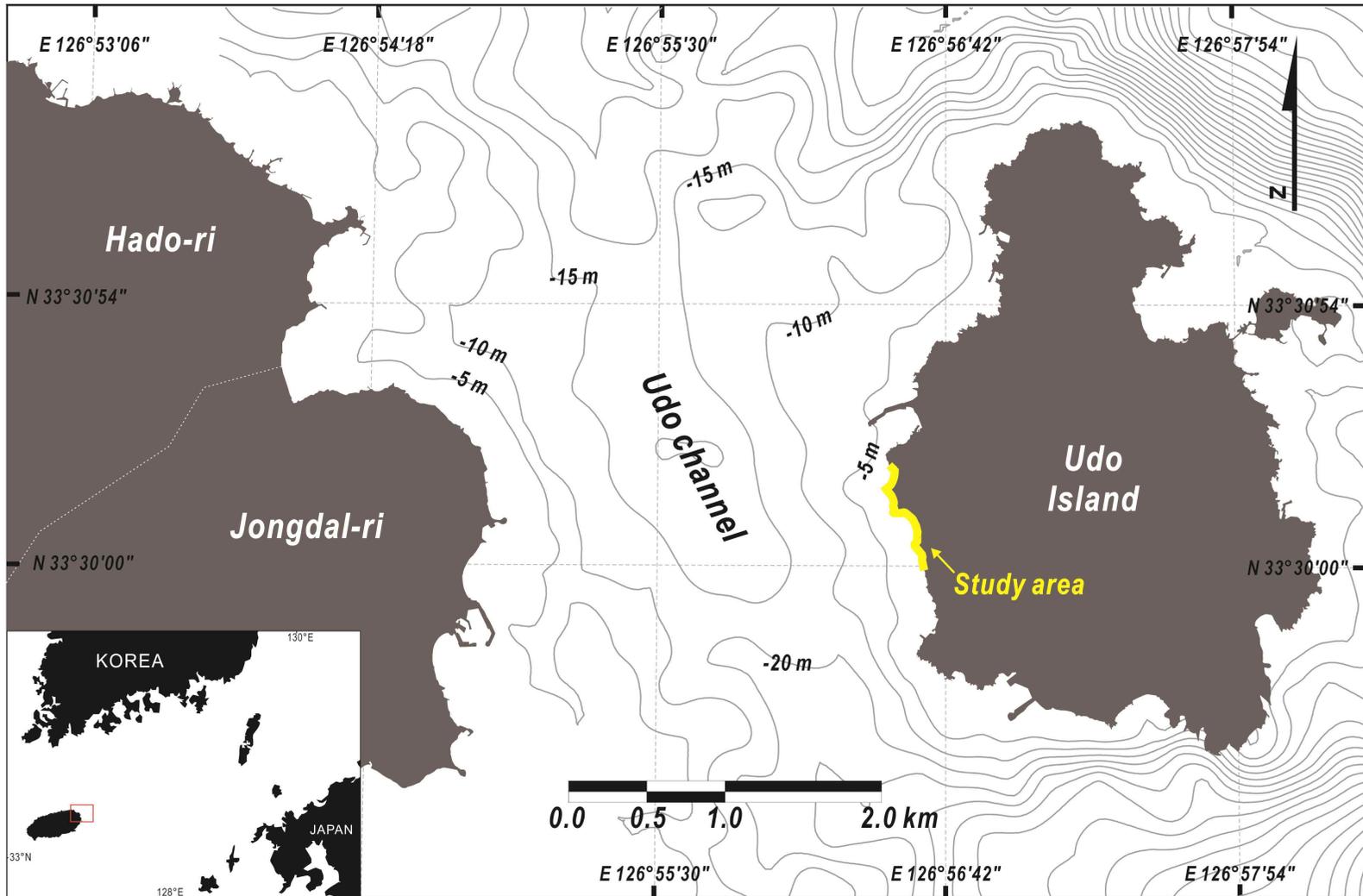


Fig. 1-1. Location map of the study area (Udo Rhodolith Beach).

제2장 지역 개관

2.1 우도의 지형 및 지질

우도는 제주 본도(구좌읍 종달리)에서 약 2.5 km 떨어진 2.5×4.3 km² 면적의 화산섬으로서(Fig. 2-1), 섬의 남동단에 위치한 소머리오름 분화구에서 일어난 수성화산분출(hydrovolcanic activity)에 의해 형성되었다(Hwang, 1993; Sohn and Chough, 1993). 해발 132.5 m의 소머리오름(단성화산체)은 주로 화산쇄설물로 이루어진 응회구(tuff cone)로서 중심에는 직경 약 600여 m, 깊이 약 40여 m에 달하는 분화구가 형성되어 있으며 중심에는 해발 87.5 m의 분석구(scoria cone)가 발달한다(Fig. 2-1). 소머리오름을 제외한 우도의 대부분 지역에는 분화구로부터 흘러나온 용암류에 의해 형성된 용암순상지가 해발 약 30 m 이하의 완만한 평지를 이루고 있으며, 용암순상지에는 소규모 용암동굴들도 분포한다(Hwang, 1993; Sohn and Chough, 1993). 한편, 해안을 따라서는 해변과 사구, 화석산지 등이 분포하는 것으로 알려져 있다(NRICH, 2010).

용암순상지를 구성하는 화산암의 형성시기는 K/Ar 연대 측정결과 약 114,000년 전으로 보고되었으나(Koh et al., 2008), 시추코어로부터 취득된 암석시료는 약 86,000년~102,000년의 지질연대(Ar/Ar 측정)를 갖는 것으로 분석되었다(Koh et al., 2008). 최근 연구에서는 우도 응회암 경계부에서 광여기루미네선스(OSL) 연대 측정으로부터 약 70,000년의 연대가 제시되었다(Jeju Special Self-Governing Province, 2018).

우도의 해안지역은 소머리오름 주변을 제외하고는 대부분 완만한 경사의 용암순상지가 해저로 연장되면서 대부분 암반으로 이루어진 파식대지가 우세하게 발달하며, 해안 돌출부 사이의 만입부(bay)에는 홍조단괴 해변을 포함하여 검멀레 사빈, 하고수동 패각 사빈, 돌칸이 역빈과 같은 소규모의 포켓해빈(pocket beach)이 나타난다. 반면에, 소머리오름 응회구가 위치한 우도의 남동부 해안에서는 응회구 화구륜의 일부가 파도에 의해 침식되어 수십 m 높이의 가파른 해안단애가 나타나며, 응회암층으로 이루어진 해안단애의 하단부에는 ‘동안경굴(길이 약 150 m)’ 등 다수의 해식동굴이 발달한다(Woo et al., 2013).

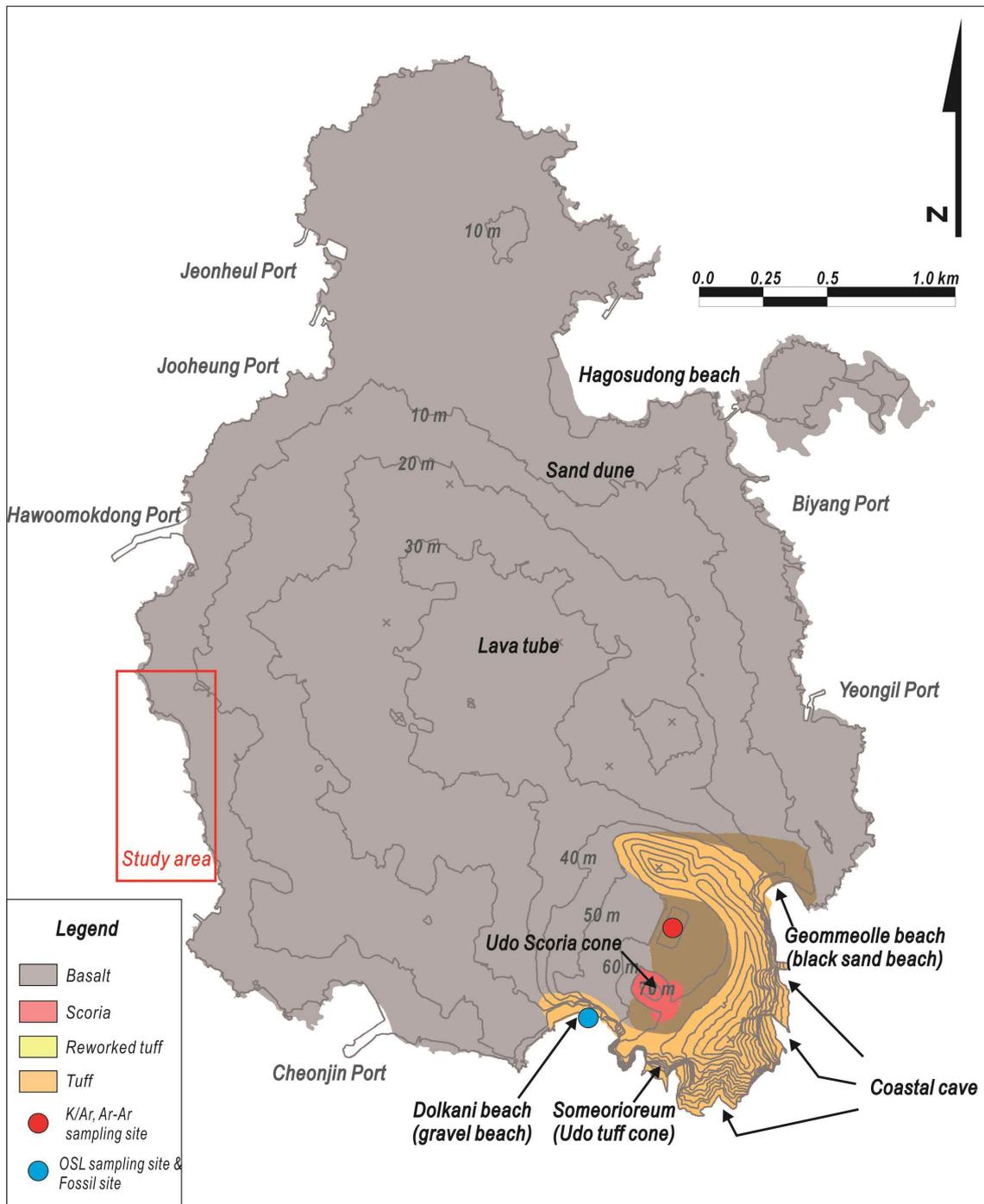


Fig. 2-1. Geologic and topographic map of the Udo Island. Modified from Sohn and Chough (1993).

2.2 홍조단괴 해빈 개요

2.2.1 해빈 지형

해빈은 일반적으로 구성퇴적물의 입도에 따라 자갈로 이루어진 역빈(gravel beach)과 모래가 우세한 사빈(sand beach)으로 분류되며, 지속적인 파도의 작용으로 세립질 퇴적물은 대부분 이동되어 버리기 때문에 니(mud)로 구성된 해빈은 거의 나타나지 않는다. 해빈을 형성하는 퇴적물은 연안역, 해안 침식대, 하천, 해빈 배후지 등지로부터 주로 파도, 해류, 바람에 의해 공급되는데, 이들 중 가장 중요한 것은 주로 기파대(surf zone)를 따라 해안선에 평행하게 이동하는 연안류(longshore current)로서, 비스듬히 들어오는 파도에 의해 해안선에 평행한 방향으로 흐르면서 해빈 지형변화의 주요 요인으로 작용한다(Komar, 1976).

홍조단괴 해빈은 우도 서쪽 해안을 따라 길이 약 850 m, 최대폭 30~35 m로 분포하는 소규모 해빈으로서(Fig. 2-2a), 해안선에서 외해역으로 약 1 km까지의 연안역을 포함하는 구역이 천연기념물로 지정되어 있다(Jeju Special Self-Governing Province, 2020). 홍조단괴 해빈이 발달하는 해안은 전반적으로 만입부가 적은 완만한 굴곡의 해안선을 특징으로 하며, 해빈의 폭은 배후지에 해안도로와 주차장 등이 들어서 있어서 최대 50 m를 넘지 않는다. 만조선과 간조선 사이의 전안(foreshore)은 비교적 평탄한 해빈면(beachface)을 보이며 약 15° 정도로 바다 쪽으로 경사져 있고, 전안의 일부에는 암반이 노출되어 나타나기도 한다(Fig. 2-2b). 만조선 상부의 후안은 전안에 비해 경사가 감소하여 다소 완만한 사면을 보이며, 전안과의 경계부 혹은 전안 상단부에는 폭 1~2 m, 높이 10~30 cm 내외의 능(ridge)들이 해안선에 평행하게 3~5개의 열을 이루면서 발달하고 있다(Fig. 2-2c). 한편, 간조선 아래의 근안 지역에는 대부분 불규칙한 기복을 갖는 현무암 암반이 노출되어 외해로 연장되며, 홍조단괴 퇴적물은 돌출된 암반 사이의 저지대에는 국지적으로 나타난다. 후안의 육지쪽 경계에는 1993년에 해안도로 포장과 함께 축조된 1~3 m 높이의 호안이 거의 전 구역에 걸쳐 축조되어 있다. 잠식된 해빈 배후지에는 두께 1.5 m 내외의 홍조단괴 퇴적층이 분포하는 것으로 확인되었다(Jeju Special Self-Governing Province, 2017).

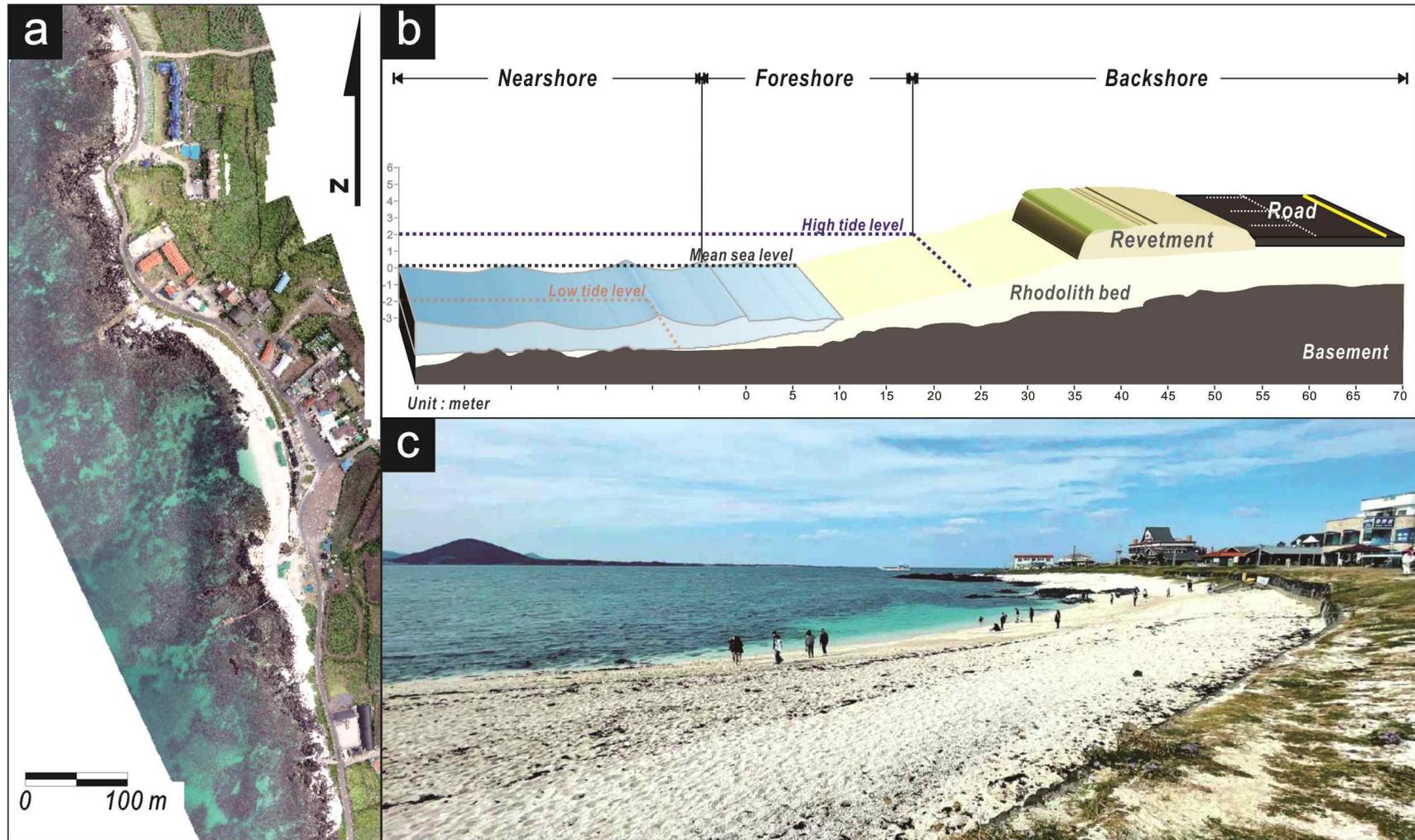


Fig. 2-2. Aerial orthoimage (a), schematic diagram (b) and scenic view (c) showing physiography and sediment distribution in Udo Rhodolith beach.

2.2.2 홍조단괴 생성과정

우도 홍조단괴 해빈은 당초 산호사 해빈으로 알려져 있었으나, 해빈을 구성하고 있는 퇴적물의 약 95%가 자갈과 모래 크기의 생물기원 입자인 홍조단괴(rhodolith)로 구성되어 있음이 밝혀졌다(Woo, 2001). 홍조단괴란 피각(encrust)을 형성하는 석회질 홍조류(*Lithophyllum*)에 의해 형성된 단괴로서, 일반적으로 단단한 기질면을 피복하거나 고착하여 가지를 형성하는 형태로 성장하는데, 해수의 유동이 활발한 고에너지의 수력학적 조건에서는 기질에서 떨어져 나온 뒤, 독립된 덩어리로 떨어져 해수의 움직임에 따라 지속적으로 구르거나 움직이면서 단괴를 형성하게 된다(Fig. 2-3). 반면에 해류가 상대적으로 강한 해저에서는 홍조단괴가 크게 성장할 수 없는 환경으로 주로 파쇄되어 나타난다(Foster, 2001). 살아있는 홍조류는 표면에 붉은색을 띠지만, 죽은 후에 유기물이 분해되고 탄산칼슘만 남게 되면서 백색으로의 색 변화가 발생하는데, 해빈의 단괴는 대부분 유기물이 분해되어 제거된 죽은 홍조류의 골격으로 구성되어 있다(Kim et al., 2003). 홍조류가 자라는 핵 부분은 생물의 각질 또는 파편으로 구성되어 있는 경우가 대체로 우세하게 나타나며, 일부 핵이 뚜렷하게 구분되지 않는 경우도 있다. 홍조단괴는 계속해서 성장하면서 크기가 증가하기 때문에 내부의 단면은 동심원 구조가 발달 되어있다(Rivera et al., 2004).

홍조류가 성장하는 환경은 지역별로 매우 다양하게 나타나지만, 성장에 있어 가장 중요한 영향을 주는 요소는 햇빛, 수온, 그리고 주변 퇴적물의 퇴적물이다(Wilson et al., 2004). 홍조단괴는 일반적으로 해빈에서 수심 200 m 이상의 대륙붕 환경까지 다양하게 분포하며, 전 세계적으로는 대륙 연안을 따라 많이 분포하는 것으로 알려져 있다(Littler and Littler, 1984). Boscence (1983b)는 홍조단괴 분포지역을 ① 열대 지역에서 나타나는 산호초 지역, ② 열대와 온대 지역의 해조류(seagrass)가 풍부한 지역, ③ 온대 해역에서 켈프(kelp)가 풍부한 지역, ④ 온대와 열대 지역에서 홍조단괴가 많이 형성되는 지역으로 구분하였다. 제주 우도 홍조단괴의 경우는 '온대와 열대 지역에서 홍조단괴 자체가 많이 형성되는 지역'에 해당한다고 볼 수 있다. 홍조단괴로 이루어진 퇴적층은 외해로 바로 연결되는 천해환경에서 발견되기도 하지만 조류가 빠르게 흐르는 수로나 천해의 좁은 섬 사이의 수로를 따라 분포하는 것이 일반적이다(Foster et al. 1997). Kim et al. (2003)에서 우도 홍조단괴 해빈은 연안역의 홍조단괴가 태풍이나 폭풍 등 강한 해수 유동에 의해 해안으로 운반되어 집적되는 것으로 해석한 바 있다.

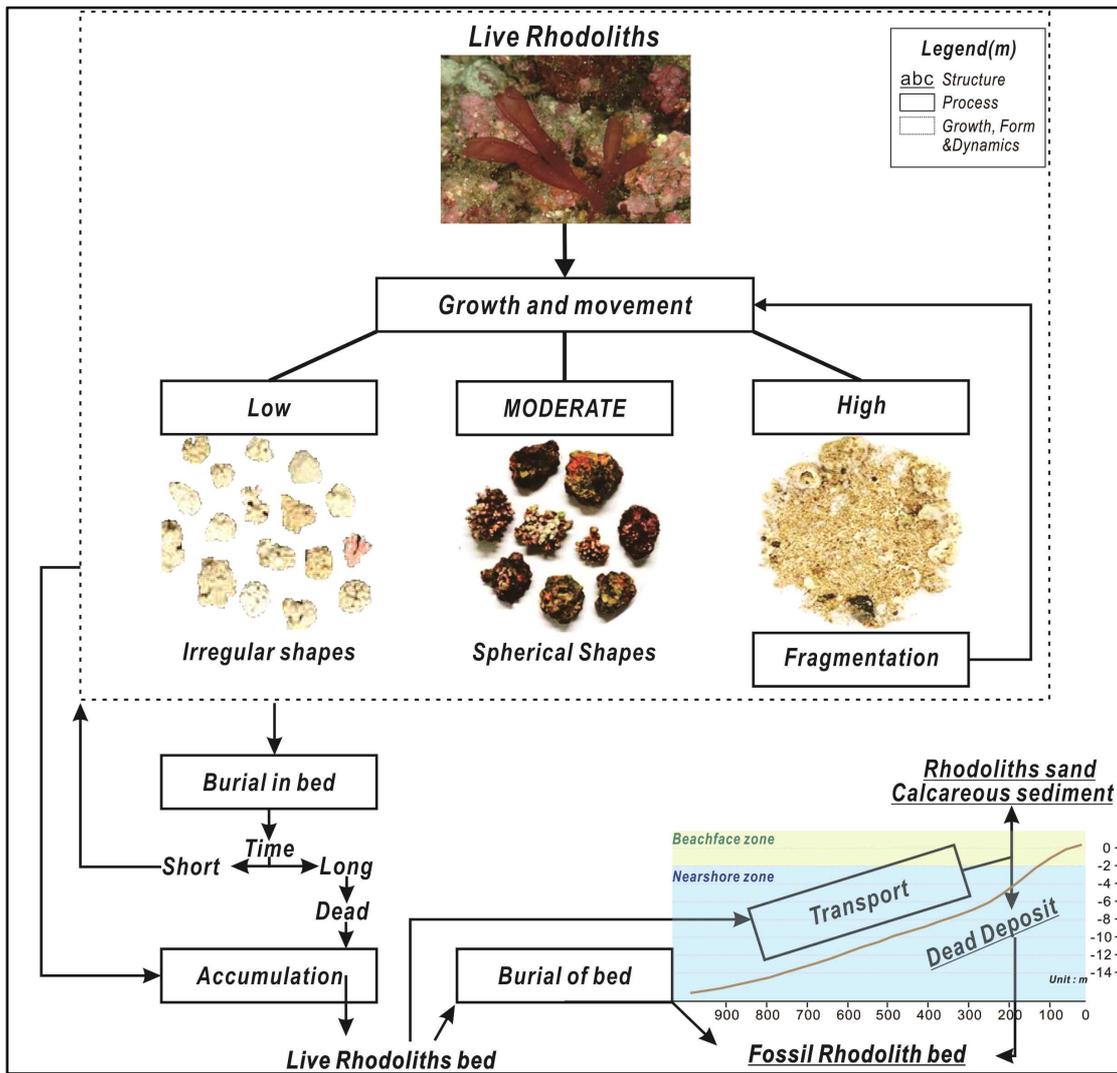


Fig. 2-3. A model for the structure and dynamics of rhodoliths, rhodolith beds, and geological structures derived from them. Modified from Foster (2001).

2.2.3 홍조단괴 해빈 분포

과거 항공영상에서 홍조단괴 해빈은 현재의 해안도로, 숙박시설, 주차장 구역까지 후안이 연장되어 있었으며, 실제 해안도로 우수관로 공사에 따른 절개구간에서 70 cm 두께의 홍조단괴 퇴적층이 확인되었다. 해빈 후안의 정확한 경계를 파악하기 위하여 비파괴 방식인 지하관통레이더(GPR)탐사와 홍조단괴 유무 실체를 파악하기 위한 시추조사가 실시되었다(Jeju Special Self-Governing Province, 2017; Fig. 2-4). 시추결과에 따르면, 해빈 퇴적층 두께는 평균 0.8~2.5 m로 추정되며, 실제 표토층(토양층)도 함께 포함되어 있어서 홍조단괴층만의 실제 두께는 이보다는 얇을 것으로 보인다(Jeju Special Self-Governing Province, 2017).

홍조단괴 해빈에서 실시된 지하관통레이더(GPR)탐사 결과를 보면, 홍조단괴 하부층 추정 경계면은, 1.0~2.8 m 깊이로 북쪽 구간에서 두껍고 남쪽 구간에서 얇은 경향을 나타낸다. 다만, 측선위치가 시점부는 호안과 가깝고, 남측은 다소 이격되어 있기 때문에 홍조단괴 분포지 전체를 대표하는 분포 경향으로 해석하기는 어렵다(Fig. 2-4b). 우도 홍조단괴 해빈 배후지역에서의 시추조사는 총 7개소에서 진행되었으며, 그 중 홍조단괴 퇴적층이 확인된 시추공은 북쪽 구간 1공, 중심부 구간 1공이다(Fig. 2-4b, c). 중앙부 구간 시추공에서는 상부 매립층을 포함하여 2.1 m 깊이, 북쪽 구간 시추공에서는 1.9 m 깊이까지 홍조단괴가 분포하고 있는 것으로 확인되었으며, 토양층을 제외한 홍조단괴층은 각각 1.3 m, 1.6 m 두께로 확인된다. 상부에 일부 교란된 매립토와 전석 등이 각각 0.3 m, 0.8 m 두께로 피복되어 있는데 이들을 포함하면 2.1 m 및 1.9 m 깊이까지 홍조단괴층이 형성되어 있는 것으로 파악된다(Jeju Special Self-Governing Province, 2017).

종합해보면, 원래의 홍조단괴 해빈은 현재 해빈지형과 해안도로, 주차장 용지(2개소)까지 포함하는 것으로 확인된다. 일반적인 해빈 후안은 주로 식생이 분포하는 사구로 구성되어 있는데, 과거 항공영상에서는 홍조단괴 해빈의 후안의 경계부가 점진적인 변화가 나타나지 않으며, 오히려 농경지로 인하여 뚜렷하게 구분되는 특징을 보인다.

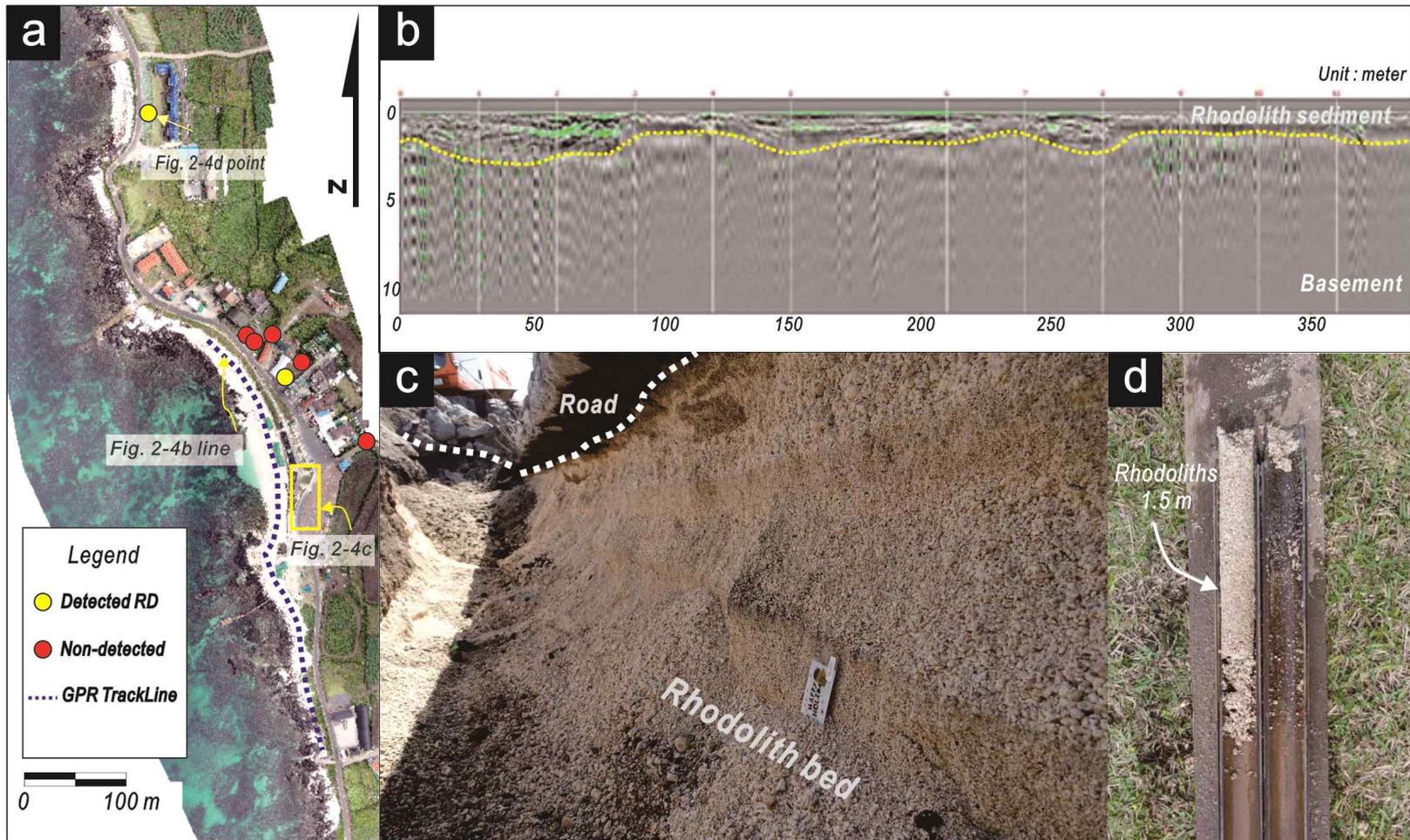


Fig. 2-4. (a) Locations of boreholes and Ground Penetrating Radar (GPR) track line. (b) A GPR profile along the foreshore and backshore of the beach. (c) Backshore rhodolith bed exposed on a trench wall. (d) Borehole core sample recovered the rhodolith bed in backshore area.

제3장 해빈 외해역 해양환경

3.1 서론

해안 지형의 변화는 조석, 파랑 등과 같은 해양환경 변화와 연계되어 있기 때문에 외해역의 해양환경 특성을 파악하는 것은 매우 중요하다. 특히 제주도는 한반도 최남단에 위치한 지리학적 특성상 계절별로 다양한 수괴들로 인하여 장·단기적으로 다소 복잡한 변동을 보이고 있어서(Pang et al., 1992; Kim and Rho, 1994; Kim and No, 2004), 해양환경과 해안지형과의 관계는 매우 밀접하다고 할 수 있다.

제주도 본도와 우도 사이에 위치한 우도수로는 북북서-남동방향의 수로형태의 지형이 발달되어 있으며, 최대수심 약 20 m, 평균수심 약 15 m 정도로서 연안지형에서는 근안(nearshore)에 해당한다(Fig. 3-1). 우도수로 주변 지역은 비교적 완만한 경사를 보이는 지형기복이 발달하여 있으며, 상대적으로 북쪽 해저지형이 평탄하게 나타난다. 기존 연구에서 우도수로 해황은 남동해역에서 대한해협으로 향하는 고온·고염의 대마난류수의 영향을 받고 있으므로 겨울철 평균 수온 14℃, 여름철 평균 26℃, 연평균 수온은 19℃로 연중 따뜻한 수온을 유지하며, 조류의 방향은 창조류시 북향류, 낙조류시 남향류가 발달하는 것으로 알려져 있다(Ko et al., 2003; Lie et al., 2000). 이러한 해빈 외해역의 해양환경 특성은 홍조단괴가 성장하는데 유리한 조건으로 작용하기 때문에 홍조단괴의 생성-성장-이동하는데 주요 요인으로 판단된다(Heo et al., 2012; Jeong et al., 2022).

우도 홍조단괴 해빈의 해빈 지형변화를 규명하기 위해서는 홍조단괴 퇴적물이 공급되는 외해역의 해양환경 특성에 대한 이해가 필요하며, 특히 해저지형의 특성과 홍조단괴들의 공급원인 해저면의 홍조단괴 분포를 파악하는 조사가 선행되어야 한다. 이에 따라 본 장에서는 국립해양조사원에서 제공하는 해도를 기초로 우도수로의 해저지형에 대한 분석결과와 해빈 연안역에서의 홍조단괴 분포 특성 파악을 위하여 실시된 잠수조사 결과를 설명하고자 한다.

3.2 연구방법

3.2.1 우도수로 해저지형 분석

우도수로의 해저지형 특성을 분석하기 위하여 국립해양조사원(2022)에서 발간한 해도의 수심자료를 이용하여 수심분포도 및 3차원 지형도를 작성하였다. 입력된 수심점은 약최저저조면 수심(Approx.L.L.W)으로 일반 수치지형도의 해발고도(0 m)보다 약 1.4 m 낮게 표시된다. 조사범위는 우도에서 약 2 km 북쪽에서부터 남쪽으로는 약 4 km에 위치한 성산지역(성산일출봉)까지로 설정하였으며, 동쪽 외해역의 범위는 약 4 km까지 설정하여 제주도 동부 외해역에 대한 지형정보를 파악할 수 있다. GIS 프로그램에서 작성된 3차원 지형도는 입력된 수심점 자료를 기반으로 보간법을 이용하여 디지털표고모델(Digital Elevation Model) 자료를 생성하였으며, 위 자료를 이용하여 해저지형을 분석하였다.

3.2.2 연안역 홍조단괴 분포 조사

우도 홍조단괴 해빈 외해역 및 연안의 해저 저질 특성과 홍조단괴 수중 분포범위를 육안으로 확인하기 위하여 우도수로를 중심으로 총 10개의 잠수조사 정점을 선정하였다(Table 3-1). 잠수조사는 2021년 5월부터 10월까지 약 5개월간 스쿠버 다이빙을 이용하여 실시되었으며, 잠수관찰은 2인 1조로 팀을 구성하여 수심 5~20 m 해저를 약 15분 동안 홍조단괴 분포 상태를 동영상으로 촬영하였으며, 각 구역별 해저면에서 시료를 채취하였다. 구역 선정은 조사 입수 및 출수 시, GPS를 이용하여 좌표를 취득한 후, GIS에서 각 좌표에 해당하는 지점을 연결하였으며, 촬영 영상과 비교하여 해당 구역 주변의 홍조단괴 분포 특성에 대한 자료를 기록하였다.

Table 3-1. Offshore survey stations in Udo Channel.

Station No.	Location		Water Depth
DT-1	33° 30' 9.249"N	126° 56' 20.517"E	9 m
DT-2	33° 29' 59.425"N	126° 56' 21.549"E	8 m
DT-3	33° 29' 53.870"N	126° 55' 55.214"E	14 m
DT-4	33° 29' 48.223"N	126° 55' 32.586"E	12 m
DT-5	33° 29' 30.597"N	126° 56' 27.168"E	15 m
DT-6	33° 29' 21.313"N	126° 56' 7.414"E	20 m
DT-7	33° 29' 12.920"N	126° 55' 46.512"E	11 m
DT-8	33° 30' 38.021"N	126° 56' 11.009"E	10 m
DT-9	33° 30' 28.663"N	126° 55' 44.034"E	20 m
DT-10	33° 30' 18.340"N	126° 55' 16.242"E	12 m

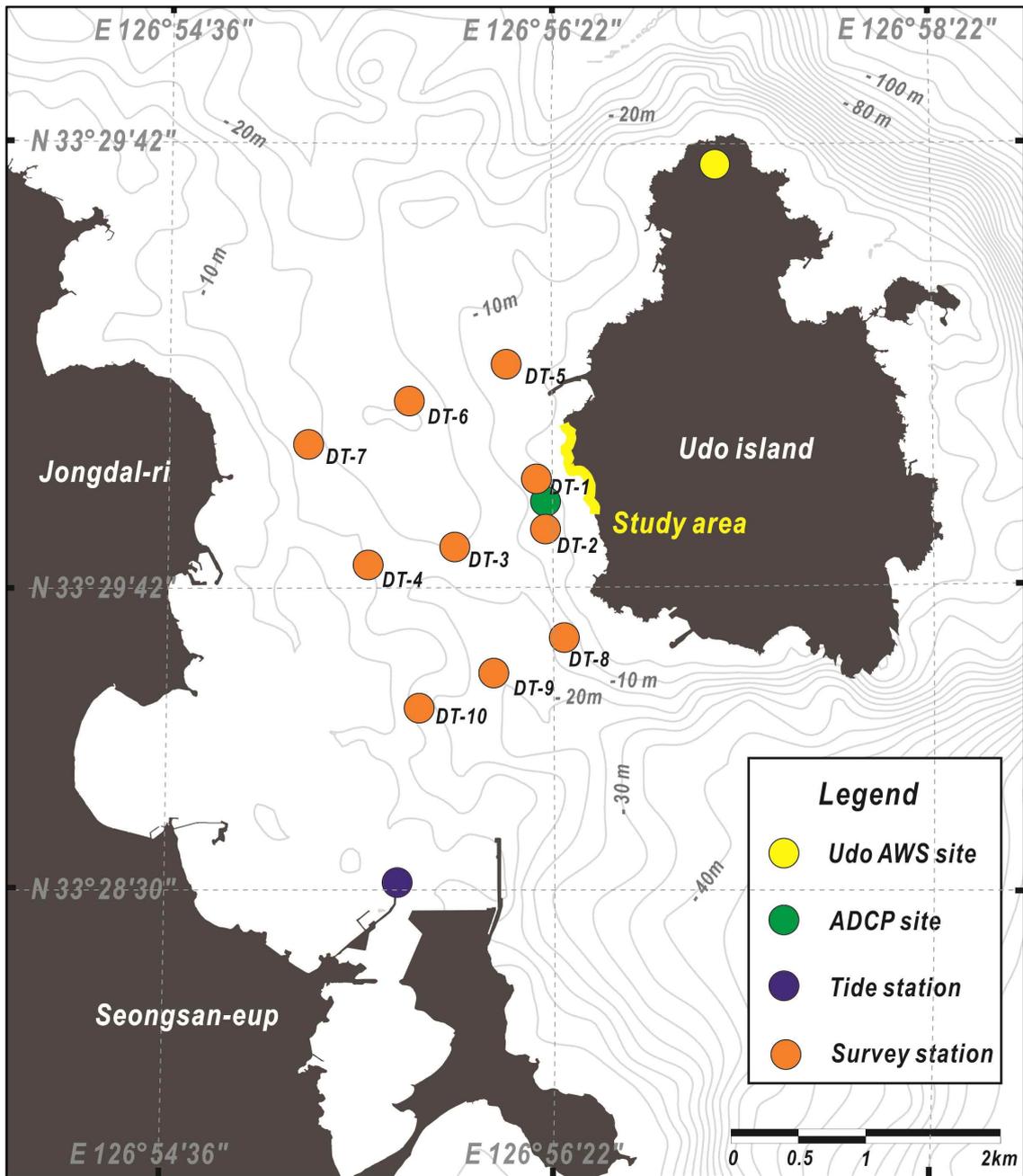


Fig. 3-1. Map showing bathymetry and locations of offshore survey stations in Udo Channel.

3.3 해저지형 및 저질특성

3.3.1 해저지형 특성

우도 주변의 해저는 서쪽 종달리 해안과의 사이에서 수심 약 20 m 이하의 천해를 이루고 있으며 강한 조류(평균 2.8 knot)가 흐르는 반면, 동쪽 해저는 해안에서 2~3 km 정도만 외해 쪽으로 나가더라도 수심 50 m 이상으로 급격히 깊어진다. 우도와 구좌읍과 성산읍 해안(하도, 종달, 시흥, 오조) 사이에는 평균 폭 3 km, 길이 5 km 내외의 우도수로가 북북서-남남동 방향으로 발달한다(Fig. 3-2a; Jeju Special Self-Governing Province, 2020).

우도수로 중심부는 다소 우도 쪽으로 치우쳐 나타나는데, 중심부의 최저 수심은 16 m(해도/약최저저조선 기준) 내외로 홍조단괴 해빈에서 남서쪽으로 약 1 km 지점에 위치하며 남쪽과 북쪽으로 갈수록 수심은 20 m 이상으로 완만하게 깊어진다. 해도의 측심자료로 볼 때, 우도수로는 바닥이 비교적 평탄한 U자형의 단면(동서 방향)을 보이는데 수로 기저의 폭은 대체로 200~500 m이며, 수로 양쪽의 해저는 해안선부터 비교적 완경사로 연안역을 이루다가 수심 5~6 m 지점부터는 경사가 다소 급하게 변하면서 우도수로의 측면으로 이어진다. 따라서 수심 6 m 이상 해저를 기준으로 할 때, 우도수로의 폭은 1.0~1.5 km이며, 북쪽에서 남쪽으로 갈수록 다소 좁아지는 양상을 보인다(Fig. 3-2b, c). 한편, 한국해양과학기술원(KIOST)에서 2016년 취득한 홍조단괴 해빈 외해역의 해저지형 탐사자료(Fig. 3-3a)에서 5 m 등수심선(평균해수면 기준; 해도 수심보다 2 m 정도 깊음)은 대체로 해안선의 전개 양상과 유사하며, 수심 5~10 m 해역에는 홍조단괴 해빈의 북쪽과 남쪽에서 해저 암반대가 불규칙한 기복을 보이면서 돌출되어 나타난다(Fig. 3-3b). 10 m 등수심선은 대체로 큰 굴곡이 없이 단순하게 나타나며, 반면에 15 m 등수심선은 복잡한 굴곡을 보인다. 수심 15 m 이상의 해저는 불규칙한 저지대와 돌출부가 혼재하여 다소 복잡한 지형을 보인다. 홍조단괴 해빈 북쪽구간에서 연안역 방향으로 500 m 지형에서는 암반돌출부가 서쪽으로 발달되어 있는데, 현장조사 결과 화산성 기반암으로 확인되었다(Fig. 3-3b). 홍조단괴 해빈 남쪽구간에서 약 500 m 떨어진 외해역에는 미고결 사질퇴적물로 이루어진 해저사퇴(sand ridge)가 분포하고 있으며, 길이는 100~200 m, 폭은 20~50 m 범위이다(Fig. 3-3a). 해저사퇴는 주로 해저면에서 이동되는 퇴적물에 의해 형성된 지형으로서 표면에 연흔, 거대연흔, 사구 등

의 퇴적구조가 발달하며 일반적으로 왕복성 조류에 의해 형성된다. 우도 연안에서 조류 특성은 창조류 시기에 북 방향으로 낙조류 시기에는 남방향으로의 왕복성 조류 특성을 보이는데, 해저사퇴 지형 또한 남, 북 방향으로 발달되어 있다. 기존 연구에서는 위 사퇴지형은 하계-동계 기간동안 해류에 의해 남쪽으로 이동하는 것으로 보고되었다(Jeju Special Self-Governing Province, 2020). 해저사퇴 지형과 연안 암반 사이 구간(수심 10 m)은 비교적 평탄한 지형으로 홍조단괴가 분포하고 있는 것으로 확인된다(Fig. 3-3c).

3.3.2 해저면 저질 특성

우도수로 해역에서의 홍조단괴의 분포양상을 종합적으로 파악하기 위하여 잠수조사를 통해 수집된 영상을 이용하여 해저면의 퇴적물 분포 유형, 홍조단괴 분포밀도, 단괴 형태, 홍조류 생존 여부와 기존 조사 결과(Jeong et al., 2022)의 정보를 포함하여 해저면의 상태를 총 3개(A, B, C)의 유형으로 구분하였다(Figs. 3-4, 5, 6, 7).

A 유형은 대부분의 해저가 홍조단괴로 덮여 있는 유형으로서 주로 홍조단괴 해빈의 북서쪽(우도수로의 북동부)에 위치하는 정점 DT-1, 5, 6에서 관찰된다. 이들 정점은 수심 5 m 내외의 연안역에서부터 수심 18 m의 우도수로 중심부까지 다양한 깊이의 해역에 분포한다. 이 유형은 자갈 크기(평균 직경 5 cm 내외)의 홍조단괴가 높은 밀도로 분포하는 특징을 보이는데, 홍조단괴는 대부분 살아있는 무절산호말로 피복되어 적갈색 혹은 자주색을 띠며 동심원상이나 가지상이 우세하게 나타난다(Fig. 3-3). A 유형에서 미고화 퇴적물의 점유면적은 매우 제한적으로 나타나며, 해저 표면의 홍조단괴 분포층 바로 밑에서는 단괴편과 패각으로 구성된 백색의 사질 퇴적물의 분포가 확인되었다(Fig. 3-4). 특히, 하우목동항 북쪽 연안에서는 생존 홍조단괴의 밀도가 매우 높게 나타나는데, 남쪽으로 갈수록 적색 홍조단괴의 분포밀도가 낮아지며, 홍조단괴 크기도 대체로 1~5 cm 범위를 보이고 있기 때문에 홍조단괴의 주 공급지는 하우목동항 북쪽 연안에 있을 것으로 추정된다.

B 유형은 살아있는 무절산호말로 피복된 단괴가 거의 나타나지 않고 사질 퇴적물이 우세하게 분포하고 있는 지역으로 정점 DT-2(수심 7 m)와 DT-7(수심 13 m)을 중심으로 한 우도수로 동쪽과 서쪽의 연안역과 수로 측사면에 해당한다. 사질 퇴적물은 대부분 과편화된 백색 홍조단괴와 패각 입자들로 구성되어 있는데, 이 유형의 정점들 중 홍조단괴편 함량은 종달리 연안 정점(DT-7, DT-2) 보다는 우도

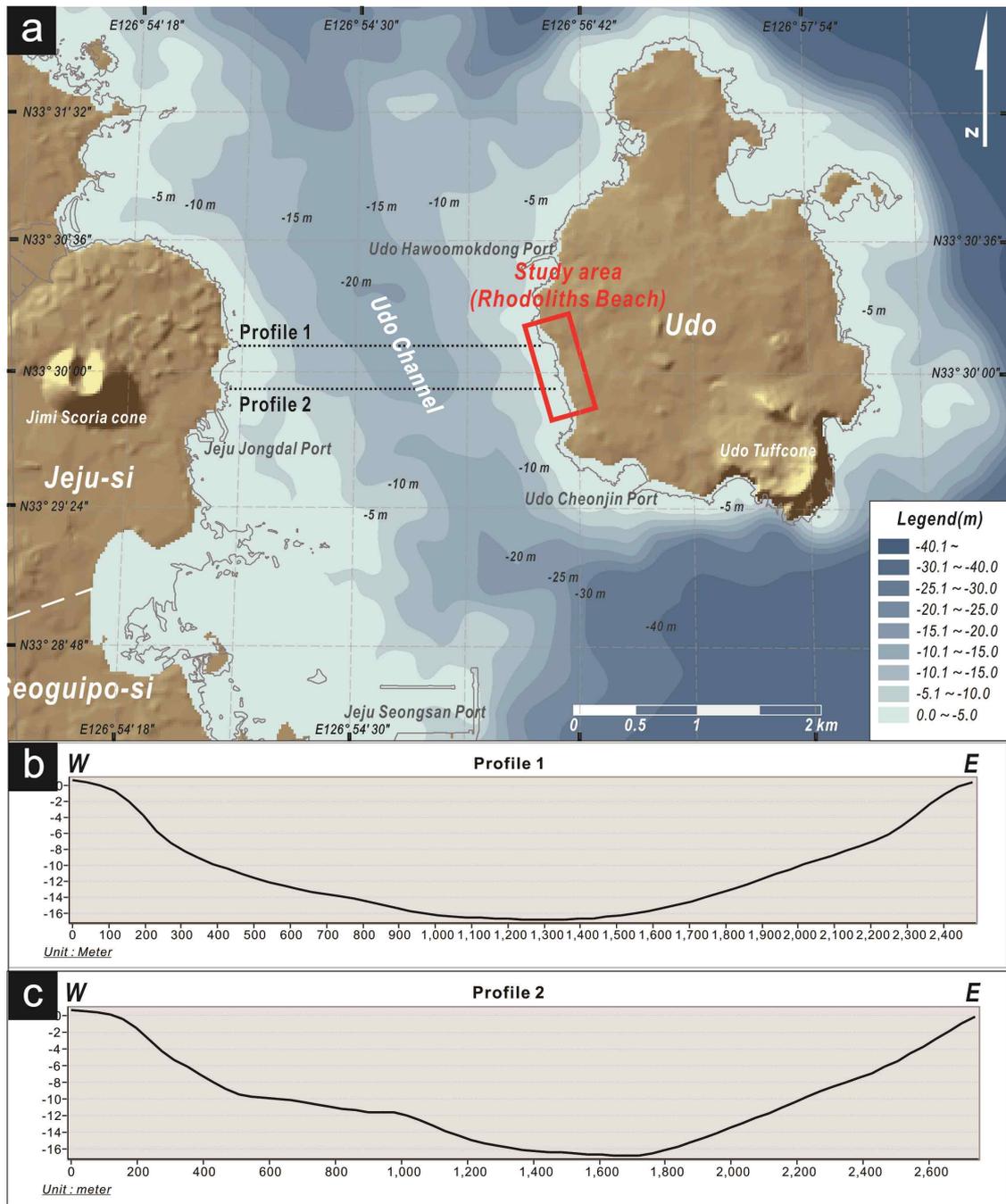


Fig. 3-2. (a) Bathymetry map (a) and seafloor profiles (b and c) in Udo Channel (Data from KHOA).

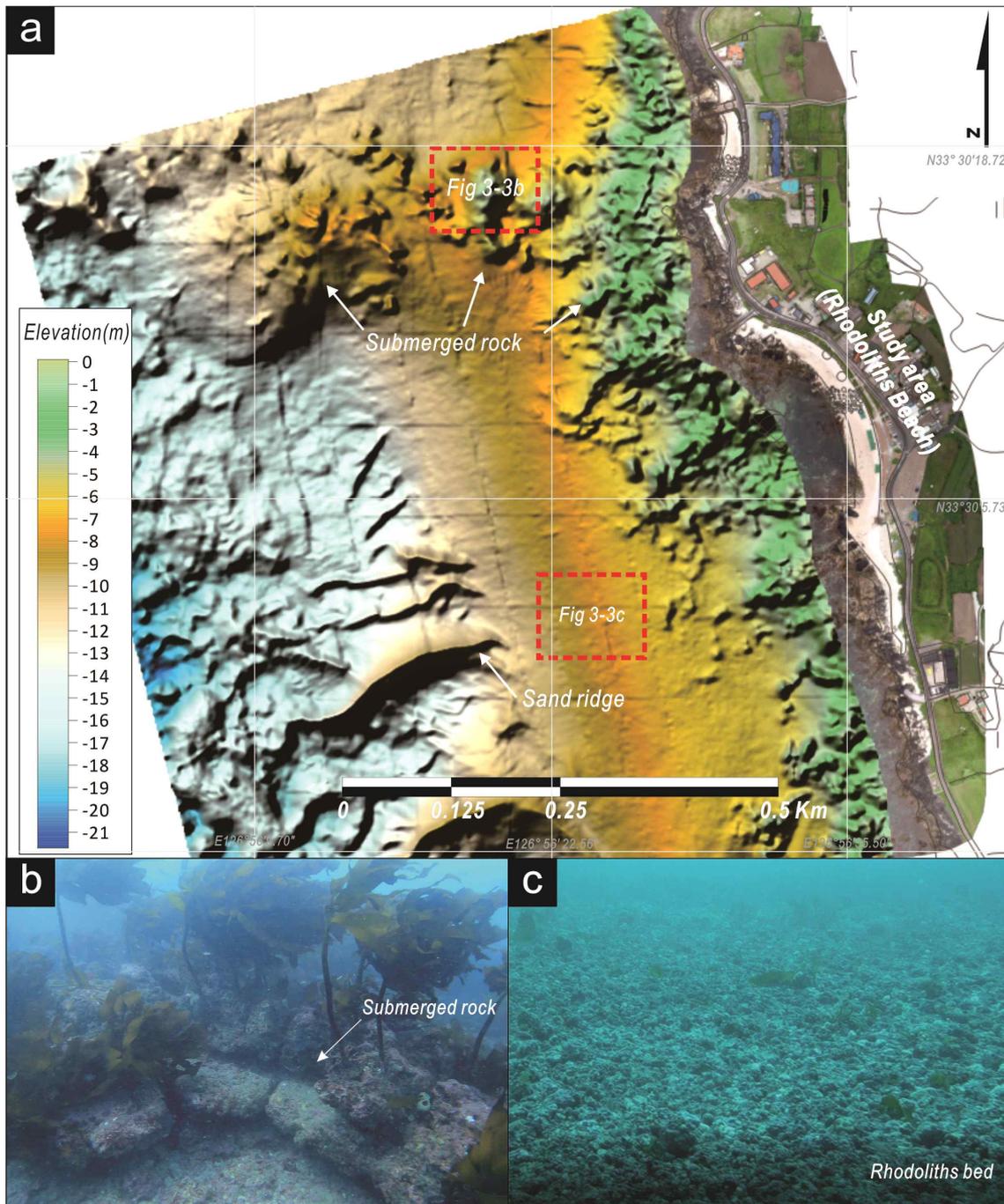


Fig. 3-3. (a) 3-D bathymetry map (a) and seafloor photographs (b and c) in the eastern part of the Udo Channel neighboring the Udo Rhodolith Beach. Photos shows rocky (b) and rhodoliths-covered (c) seafloor. Bathymetric data provided by KIOST.

연안에서 정점에서 더 높은 비율로 관찰된다.

사질 퇴적물로 덮인 해저면에서는 불규칙한 정선을 보이는 연흔구조(ripple mark)가 나타나며, 우도 연안사퇴에서의 KIOST 정밀 해저지형 조사에서는 더 큰 규모의 모래파(sandwave)나 사구(sand dune) 형태의 규칙적인 해저기복이 확인된다(Fig. 3-5).

C 유형의 해저는 사질 퇴적물과 홍조단괴가 혼재하는 곳으로서 정점 DT-3, 4, 8, 9, 10을 포함하는 수심 5 m 이상의 우도수로 중심부와 측사면에 해당한다. 이 유형의 해저에는 주로 사질 크기의 백색 홍조단괴편과 껍각편이 미고화상태로 분포하고 있으며, 부분적으로 화산암반이 노출되어 있거나 여기서부터 떨어져 나온 거력이나 왕자갈들이 산재하여 나타난다. 암반과 거력들은 대부분 적갈색 혹은 자주색을 띠는 무절산호말류로 피복되어 있으며, 홍조류로만 구성된 단괴는 매우 드물고, 주변에는 감태, 모자반 등의 해조류들과 다양한 색상의 산호들이 군락을 이루고 있다(Fig. 3-6).

우도해역에 분포하는 사질 퇴적물에서 홍조단괴 기원 입자의 함량은 우도 연안사퇴와 홍조단괴가 우세하게 분포하는 A 유형 해저의 퇴적물에서 90% 이상으로 매우 높게 나타나는 반면, B와 C 유형에서는 대체로 50% 이하로 나타나 퇴적물 조성에서 뚜렷한 대조를 보인다.

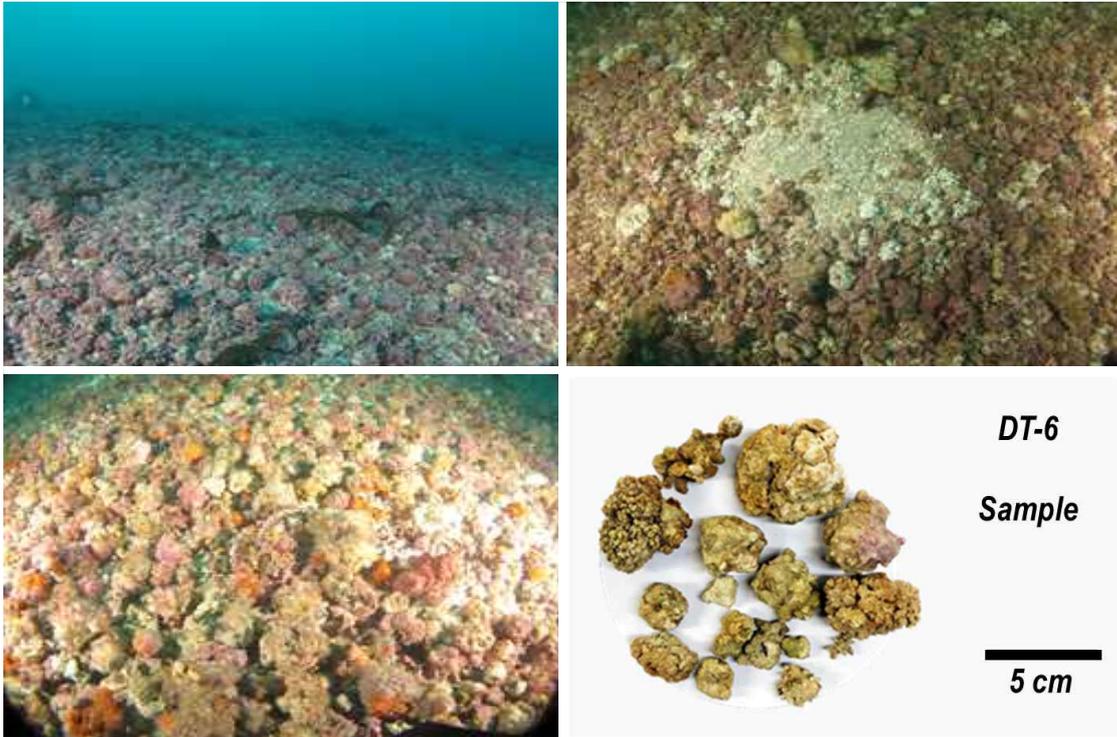


Fig. 3-4. Photos of type A seafloor which is densely covered by rhodoliths in station DT-6. See Table 3-1 for photo location.

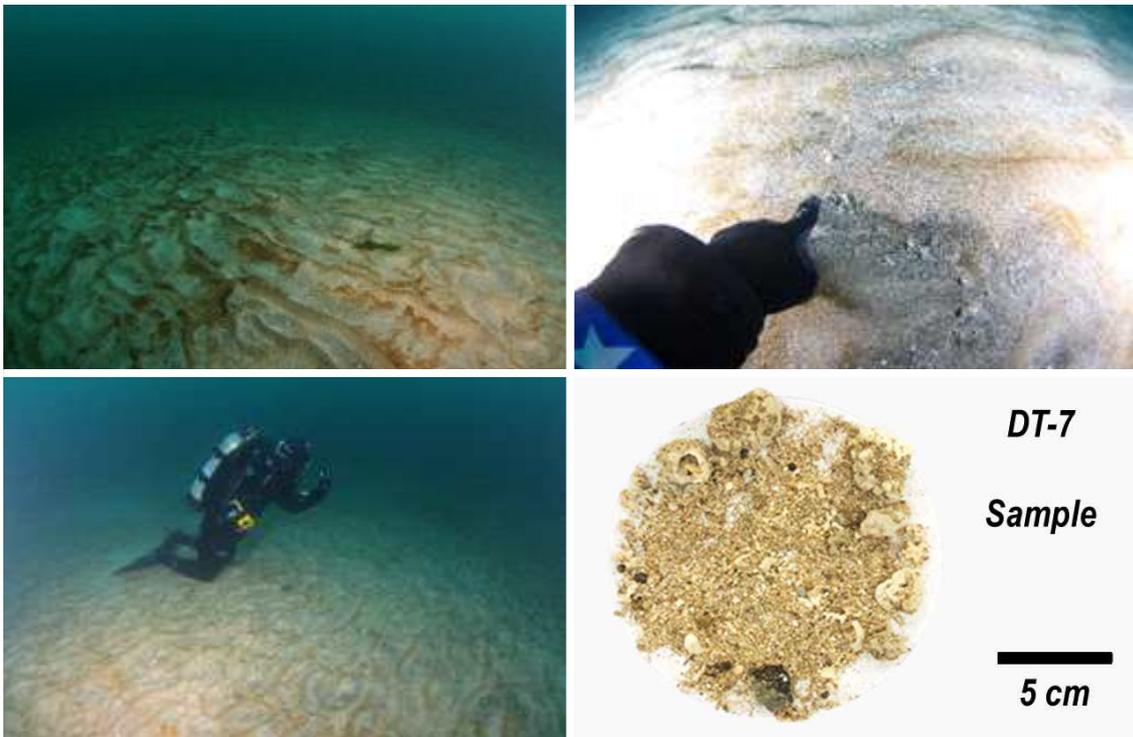


Fig. 3-5. Photos of type B seafloor (DT-7) which is covered by sandy sediments composed of broken particles of rhodoliths and shells. See Table 3-1 for photo location.

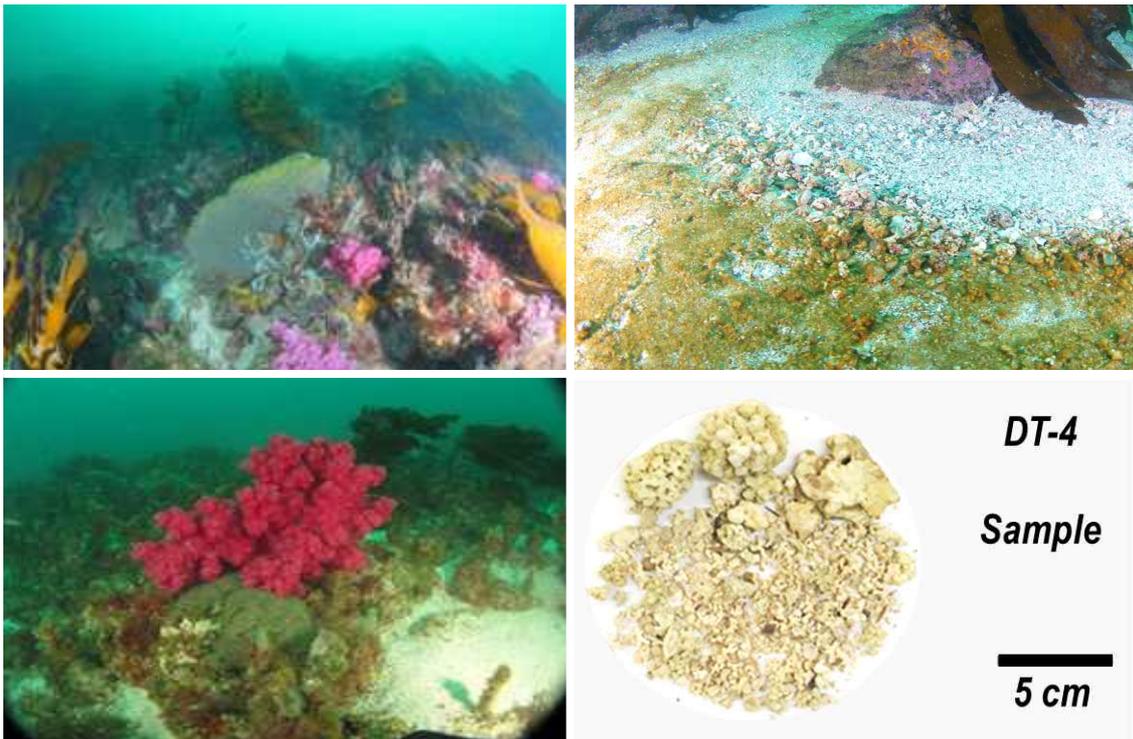


Fig. 3-6. Photos of type C seafloor (DT-8) where unbroken rhodolith nodules are mixed with sandy sediments. See Table 3-1 for photo location.

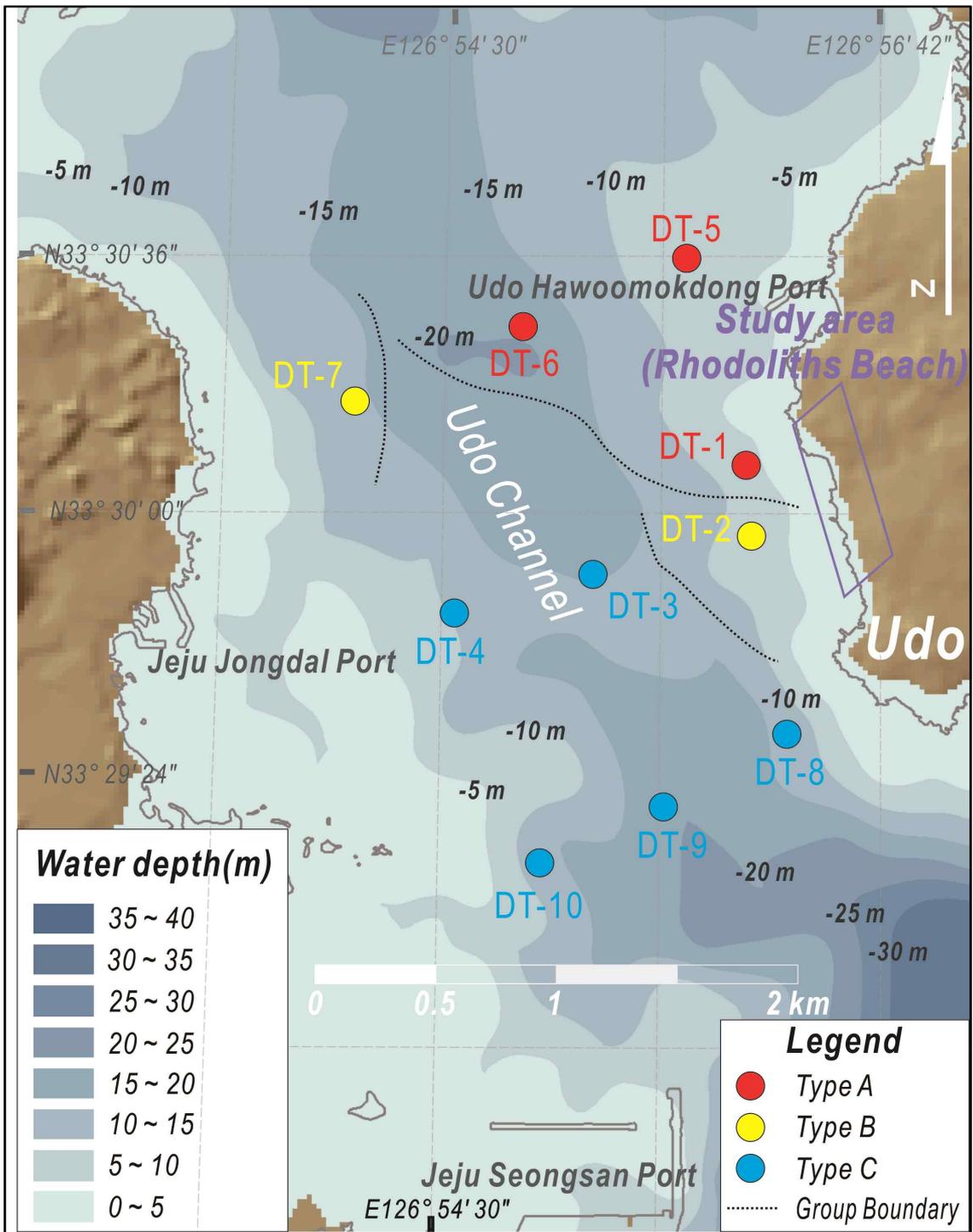


Fig. 3-7. (a) Classification of seabed types in Udo Channel. (b) A photo of rhodoliths dominant distribution area (type A), (c) A photo of sand dominant distribution area (type C), (d) A photo of sandy/rock mixed area (type C).

3.4 기상 및 해양 특성

3.4.1 기상 특성

우리나라에 영향을 미치는 계절풍의 시·공간적인 분포는 지역과 해역별로 그 분포 형태가 다르며, 주로 겨울철 강한 북서풍과 여름철에는 남풍에 의한 바람에 따른 계절변화가 뚜렷하게 나타난다(Lie et al., 1994). 연구지역인 우도에서의 계절풍은 우도 AWS의 풍향 풍속자료를 이용하여 분석하였으며, 시기적으로 차이가 발생하지만, 주로 10월부터 북풍계열의 바람이 4월까지 영향을 미치는 것으로 확인되며, 5월부터 10월까지의 남풍계열 외에도 다양한 방향에서의 풍향이 관측된다(Fig. 3-8). 특히, 제주도는 우리나라에서 연평균기온은 14.4°C로 우리나라 연평균기온(12.8°C)보다 1.6°C 높게 나타나며, 연강수량은 2,166.3 mm로 우리나라 평균인 1,358.5 mm보다 807.8 mm 더 많은 양의 강수특성으로 인해 기후지역 구분에서 ‘아열대 기후지역’으로 구분되기도 한다(Kwon et al., 2007).

연구지역의 기상특성을 파악하기 위하여 연구지역에서 가장 근접한 기상대인 성산 기상대에서 취득된 2016년부터 2020년까지의 기상자료를 분석하였다. 2016~2020년 5년간 평균기온은 16.2°C로 평년(16.2°C) 수준의 기온을 보이며, 계절별로 보면 봄에는 14.5°C, 여름 24.8°C, 가을 18.2°C, 겨울 6.6°C로 순으로 기록되었다. 연강수량은 성산지역이 제주도에서 평년값이 가장 높게 나오는 지역으로서 최근 5년간 연평균 강수량은 평균 2,218 mm로 성산 평년강수량(1,923 mm)보다 높게 나타나며, 강수량의 약 50%는 장마, 여름철(태풍)에 집중되어 나타난다. 계절별 평균 풍속은 봄 3.1 m/s, 여름 2.8 m/s, 가을 3.1 m/s, 겨울 3.1 m/s로 기록되어 여름철 외에 큰 변동이 나타나지 않는다. 평균 최대 풍속은 봄 5.9 m/s, 여름 5.5 m/s, 가을 5.7 m/s, 겨울 6.0 m/s로서 봄과 겨울철에 강한 풍속이 작용한다(Table 3-2; Figs. 3-8, 9).

Table 3-2. Summary of five-year (2016-2020) average monthly weather data by Seongsan AWS.

	Aver. Wind speed(m/s)	Max. Wind speed(m/s)	Aver. Temp(°C)	Precipitation(mm)
Jan.	3.1	5.9	5.8	87.3
Feb.	3.4	6.5	6.5	98.4
Mar.	3.3	6.4	10.2	138.2
Apr.	3.1	6.3	14.4	170.9
May	2.8	5.8	18.3	181.9
Jun.	2.5	5.2	21.4	251.3
Jul.	2.9	5.5	25.5	306.8
Aug.	3.1	5.7	27.5	245.2
Sep.	3.1	5.8	23.3	395.8
Oct.	3.2	5.9	18.4	224.4
Nov.	2.8	5.4	13.0	41.3
Dec.	2.9	5.6	7.6	77.6

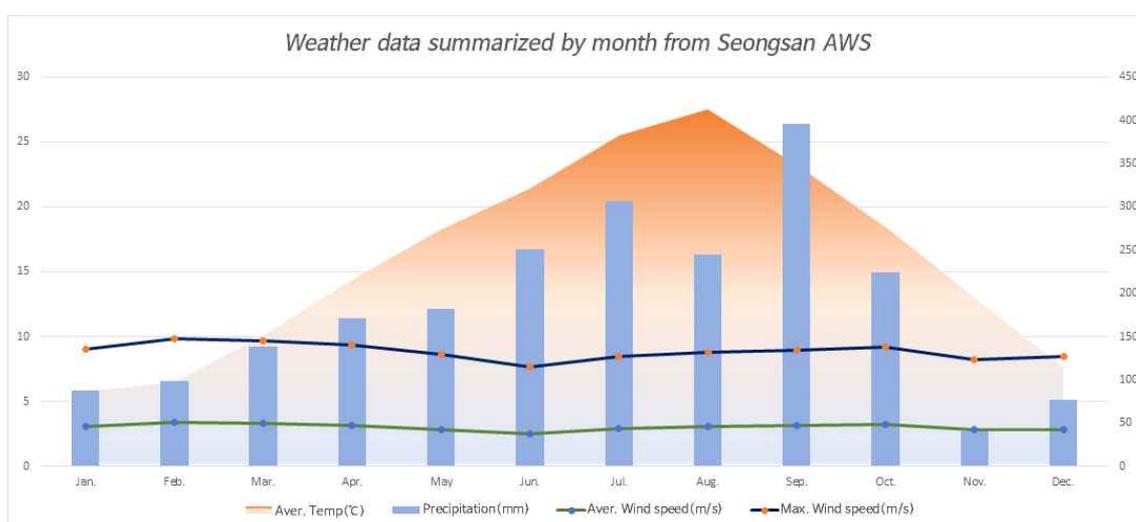


Fig. 3-8. Five-year (2016-2020) average monthly rainfall (mm) and temperature(°C) observed by Seongsan AWS.

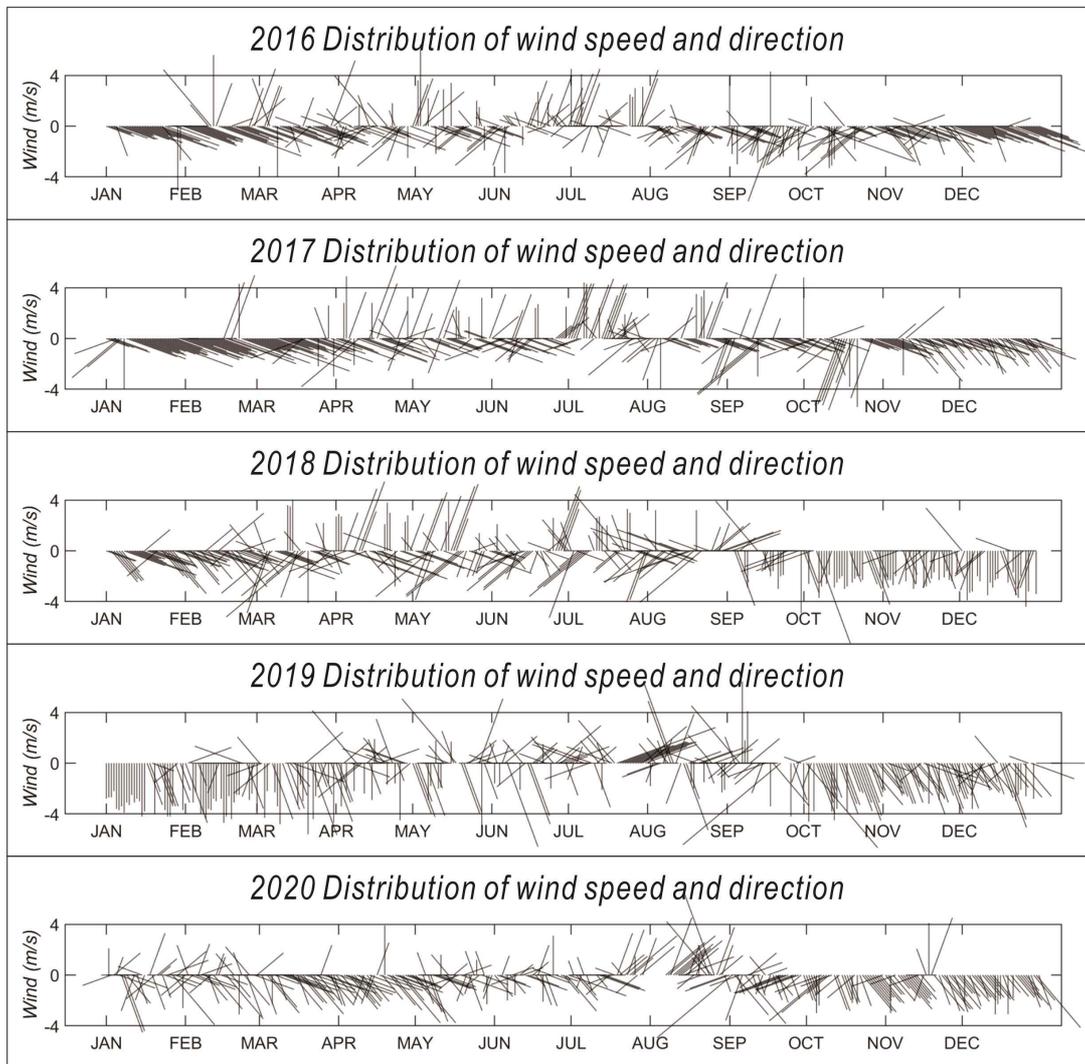


Fig. 3-9. Time series of wind speed and direction taken from Seongsan AWS data (2016~2020).

3.4.2 해황특성

우도수로는 제주도 남동해역에서 대한해협으로 향하는 고온·고염의 대마난류수의 영향을 연중 받고 있으며(Ko et al., 2003; Lie et al., 2000), 이로 인한 평균 수온은 겨울철 약 14°C, 여름철 약 26°C로 나타난다. 연평균 수온은 19°C로 연중 온화한 수온을 유지하며, 이러한 물리적 환경은 홍조단괴가 성장하는데 유리한 조건을 제공한다(Heo et al., 2012).

Cha and Moon (2020) 연구에서는 고해상도 해양순환모델을 사용하여 제주도 주변해역에 대한 상세 조류에너지 분포를 평가하였는데, 그 결과 제주도 연근해에서 조석파는 주로 남동에서 북서방향으로 전파되고, 조류에너지는 수심이 깊은 제주도 남동해역에서 수심이 얇은 북서방향으로 갈수록 커지는 특징을 보이며, 제주도 주변 조류에너지는 제주 연안에서 발생하는 해류에너지의 90% 이상을 차지하고 있음을 보고하였다. 특히, 우도수로에서 조류 방향은 창조류시 북향류, 낙조류시 남향류를 나타내며, 창조 및 낙조시에 1 m/s 이상의 강한 조류 유속이 모사되었다(Jeju Special Self-Governing Province, 2020).

기존 연구에서는 해빈 퇴적물 운반 특성을 규명하기 위하여 파랑 및 조류 특성을 파악할 수 있는 해빈 앞 500 m 연안역에 ADCP를 설치하여 현장 관측(하계, 동계)이 수행되었다(Jeju Special Self-Governing Province, 2020).

파랑관측 결과, 하계와 동계 유의파고 평균값은 0.5~1.0 m 내외로 높게 발달하지 않았으며, 평균 파주기는 4~5초 내외로 대부분 충분히 발달하지 못하는 풍파의 특성(young wave)을 보이며, 파랑 분포는 남동계절풍이 부는 여름철에 평균 201.6°의 남쪽 방향에서 들어오는 파의 분포가 우세하였고, 북서계절풍이 부는 겨울철에 평균 356.8°의 북쪽 방향에서 들어오는 파의 분포가 우세하였다(Jeju Special Self-Governing Province, 2017, 2019, 2020; Figs. 3-10, 11).

여름과 겨울철의 해류관측 조사에 의하면, 관측해역은 왕복성 조류운동이 지배적이며 창조류는 북북서, 낙조류는 남남동 방향이 우세한 특징을 보였다. 주로 표층에서 최강 유속이 분포하며 표층과 저층에서의 유속 차이는 두 계절에서 10 cm/s 내외로 작게 나타났다. 창조류와 낙조류의 빈도는 크지 않지만 주로 겨울철에 창조류가, 여름에는 낙조류가 약간 우세한 특징을 보인다(Jeju Special Self-Governing Province, 2021; Fig. 3-11). 저층에서의 잔차류는 여름에는 동남동향으로 해빈을 향하며 겨울철에는 북동향의 성분이 지배적으로 흐름의 세기는 여름철이 4.5 cm/s, 겨울철에 ~3.8 cm/s로 여름이 겨울 보다 조금 더 강한 흐름으로 나타난다(Fig. 3-12).

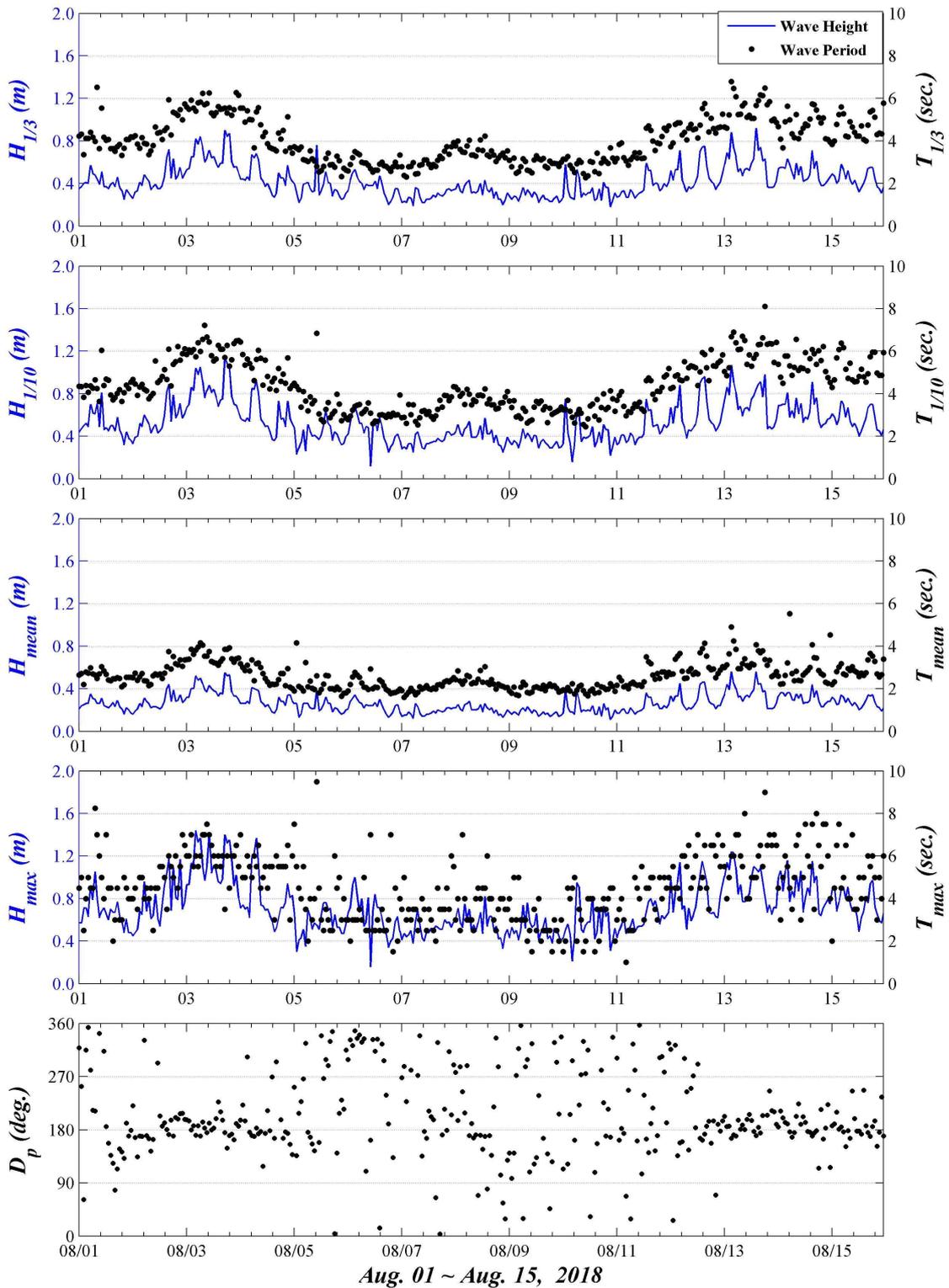


Fig. 3-10. Time series of significant wave height–period and wave direction during Aug. 2018 at the PC station. Modified from Jeju Special Self-Governing Province (2021).

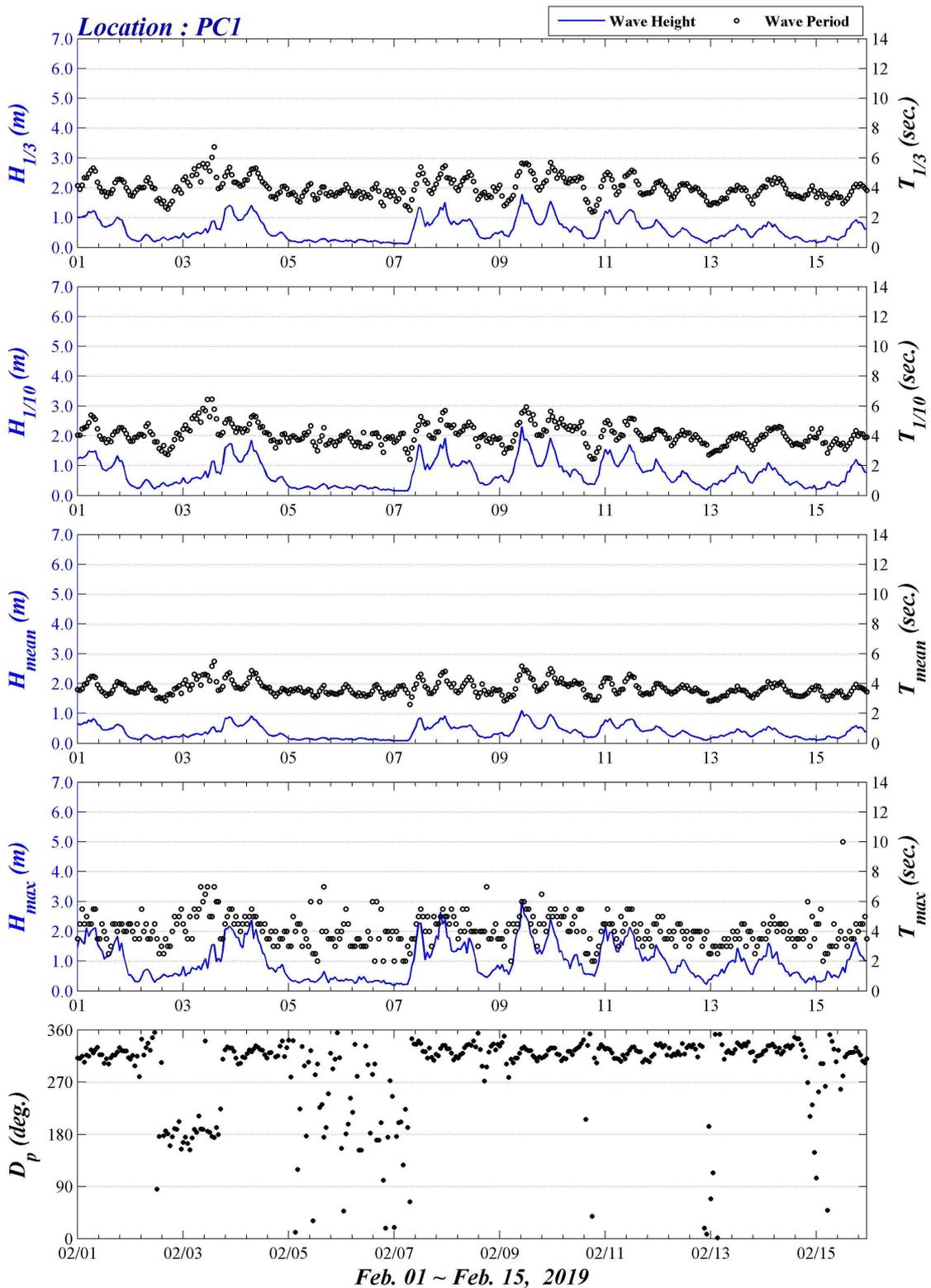


Fig. 3-11. Time series of significant wave height-period and wave direction at the PC station during Feb. 2019. Modified from Jeju Special Self-Governing Province (2021).

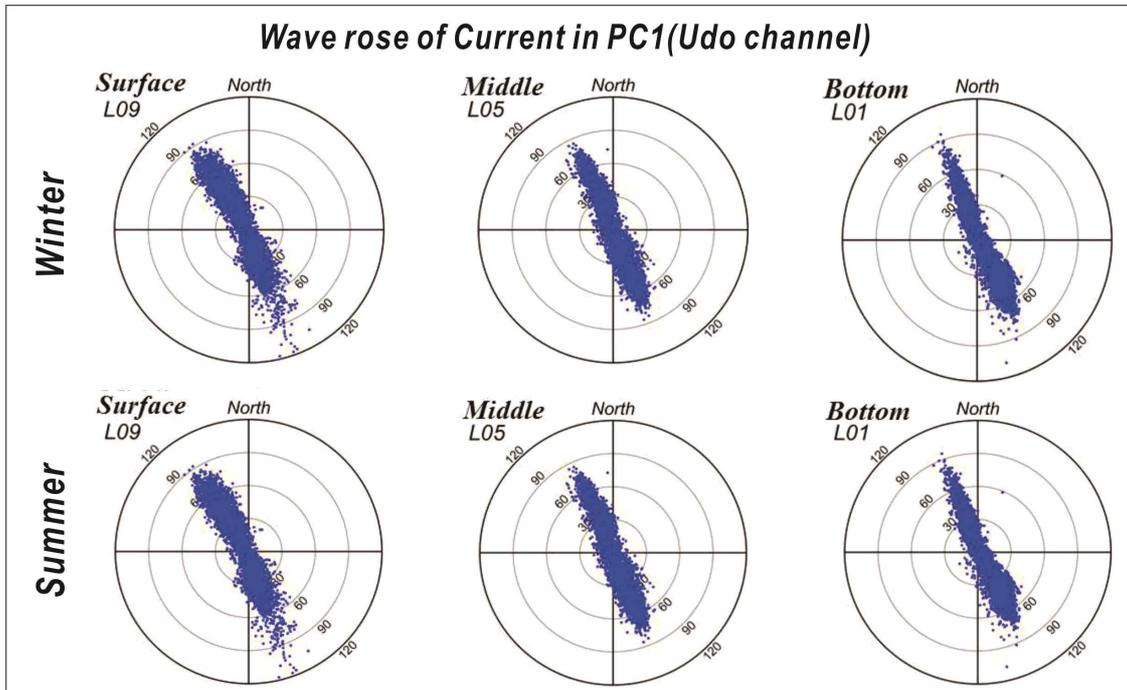


Fig. 3-12. Scatter diagrams of observed currents by ADCP at the PC station in Udo Channel. Modified from Jeju Special Self-Governing Province (2021).

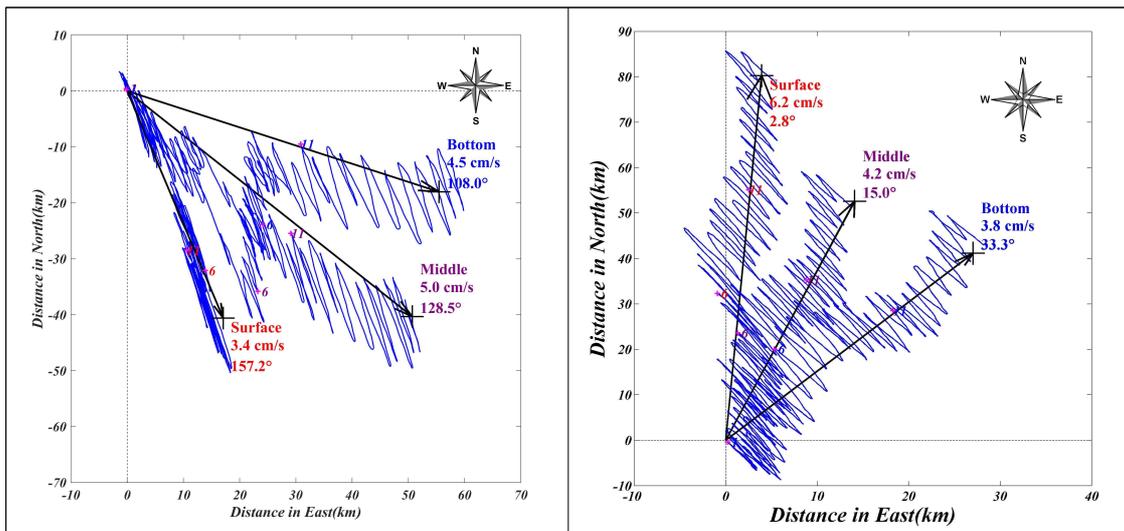


Fig. 3-13. Progressive vector diagrams obtained from ADCP measurements for bottom layer with 10-minute interval at the PC station in summer and winter case. Modified from Jeju Special Self-Governing Province (2021).

3.4.3 주요 태풍의 특성

1) 태풍 차바

2016년 제18호 태풍 차바는 9월 28일 괌 동쪽 590 km 부근 해상에 발생 후 10월 4일 오후에서 10월 5일 오후까지 연구지역인 제주도 우도 동쪽 해역을 북북동진하며 통과한 후 거제도와 부산을 거쳐 동해상으로 진출하였다(KMA, 2017; Fig 3-15). 우도 AWS의 관측결과에 의하면 태풍이 제주도 남쪽 해역에 도달한 10월 4일 정오부터 연구지역에 강한 북동풍의 영향으로 평균풍속이 8 m/s 이상으로 증가하며, 제주도에 근접한 4일 18시 이후에는 주요 풍향이 북서풍으로 전환되어 최대 18 m/s 평균풍속이 기록되었다(KMA, 2017; Yoon et al., 2021). 우도수로에 설치된 ADCP 관측 결과, 차바가 통과하기 직전 1개월간의 저층 잔차류(조석의 왕복운동 성분을 제거한 해수의 이동)는 평균 6.5 cm/s 정도의 유속과 남동의 유향을 보였는데, 차바 통과 시에 유향은 남동향이 우세하였고 유속은 최대 60 cm/s로 평소보다 10배 정도 증가하였다(Hong et al., 2021). 태풍 통과 시기의 조석 물때는 11~12물로서 조차는 최대 174 cm, 최고 조위는 성산항 검조소 기준으로 약 250 cm를 나타내었다.

2) 태풍 솔릭

2018년 19호 태풍 솔릭은 8월 16일 괌 북서쪽 260 km 부근 해상에서 발생하여 일본 가고시마 남동쪽 해상에서 방향이 서쪽으로 변경되었다(KMA, 2019). 태풍은 제주도 서쪽 해역을 느리게 이동하다가 목포를 통과하여 북동진하며 한반도를 관통하였다(KMA, 2017; Fig. 3-14). 우도지역에는 8월 22일부터 24일까지 태풍의 영향으로 우도 AWS 기준 평균 7 m/s의 강풍이 지속되었으며, 풍향은 남동풍-남풍-남서풍으로 시계방향으로의 풍향 변화를 보였다. 태풍 절정기에는 최대 12.3 m/s에 달하는 남동풍이 관측되었는데(Yoon et al., 2021), 이러한 남풍 계열 바람의 영향으로 우도수로의 ADCP 정점에서는 유의파고 최대 3 m 이상의 북향 파도가 우세하게 관측되었으며, 저층에서는 유속 100 cm/s 이상의 강한 잔차류가 북향하는 것으로 나타났다(Hong et al., 2021). 태풍 솔릭 통과 시기의 조석 물때는 4~6물로서 조차가 최대 165 cm, 최고 조위는 약 250 cm를 나타내었다.

3) 태풍 링링

2019년 13호 태풍 링링은 9월 2일 필리핀 마닐라 동쪽 해상에서 발생을 시작으로 타이완 동쪽 부근 통과 후 9월 6일~7일 제주도 서쪽 해역에서 황해도 해주시로 북진하며 통과하였다(KMA, 2020; Fig. 3-14). 연구지역에는 9월 6일 낮에 동풍계열 3 m/s 바람을 시작으로 점진적으로 풍속이 강해지면서 태풍의 영향이 나타나기 시작해서 태풍 통과 후인 7일 오전까지 강풍이 지속되었다(Yoon et al., 2021). 이 시기에 풍향은 남동풍에서 시작하여 시계방향으로 남풍과 남서풍으로 점차 바뀌었는데, 전반적으로 동풍계열이 우세하였고, 절정기에는 최대 평균풍속 12.1 m/s의 남풍이 우세하게 나타났다. 우도 홍조단과 해빈 전면의 ADCP 관측정점에서는 이러한 강풍의 영향으로 유의파고 1.5~2.0 m의 북향 파도가 지속적으로 발달하였으며, 저층에서는 최대 100 cm/s 의 북향 잔차류가 분석되었다(Hong et al., 2021). 태풍 링링 통과 시기의 조석은 조금시기로서 최대 조차는 99 cm, 최고 조위는 약 220 cm로 나타났다.

4) 태풍 마이삭

2020년 9호 태풍 마이삭 8월 28일 마닐라 동북동쪽 해상에서 발생하였으며, 9월 1일 오키나와 서쪽 해상에서 강도가 ‘매우 강’에 해당하는 태풍으로 발달 후, 매우 강한 강도를 유지하며 북상하여 9월 2일부터 3일 새벽까지 연구지역 동쪽 해상을 통과하였다(KMA, 2021; Fig. 3-14). 연구지역 및 인근 조위관측소(성산 조위관측소) 기상관측 자료에 따르면, 태풍 통과 기간 풍향은 북동풍-북풍-북서풍으로의 반시계방향 변화를 보였으며, 절정기에는 평균풍속이 최대 29.6 m/s에 근접하는 북풍이 우세하게 관측되었다(Yoon et al., 2021). 태풍 통과 시기의 조석 물때는 6~9 물로서 대조기에 해당하며, 조차는 최대 194 cm, 최고 조위는 약 320 cm로서 그동안 연구지역에 영향을 주었던 타 태풍 시기에 비해 70~100 cm 더 높은 것으로 나타났다.

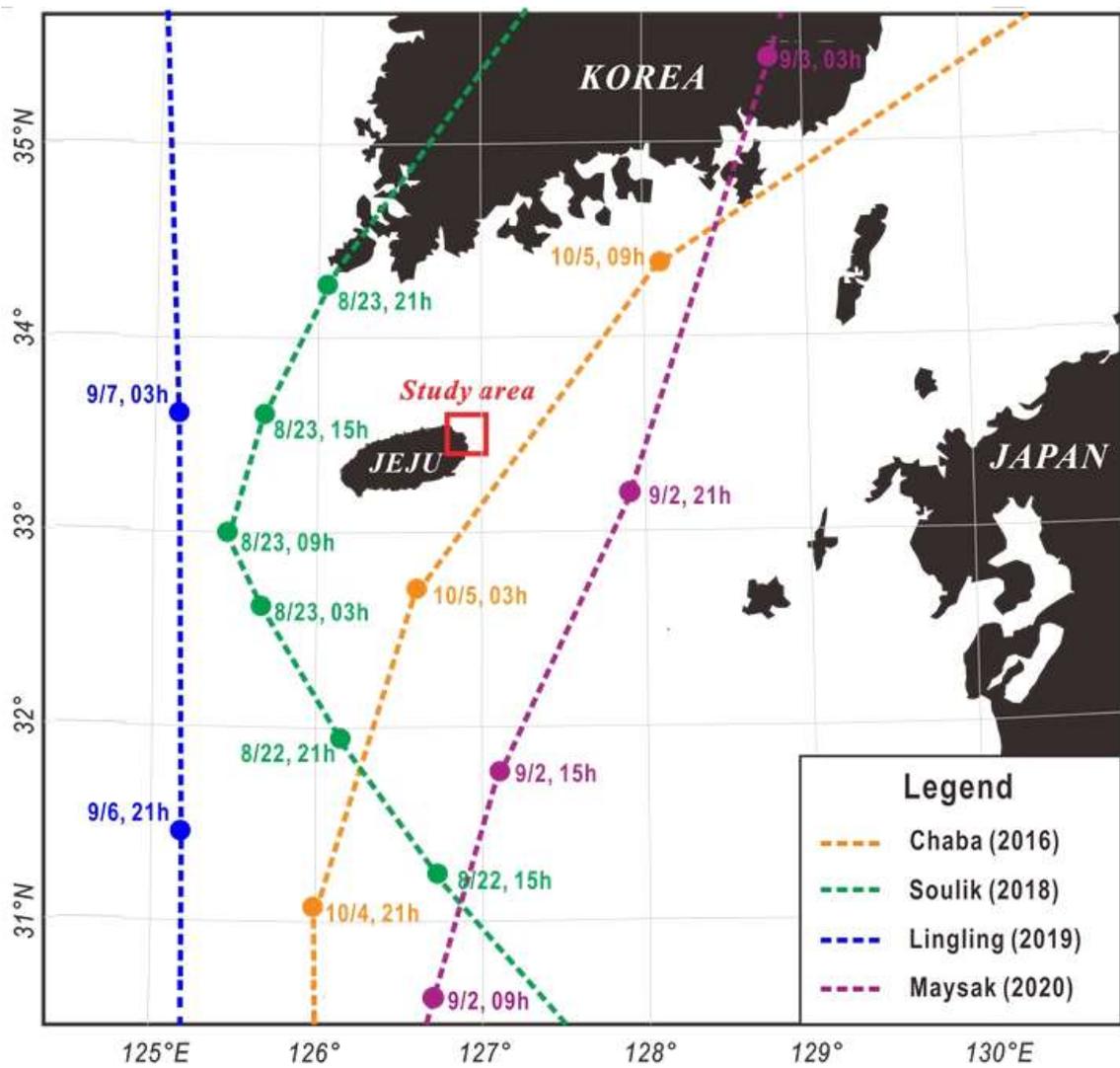


Fig. 3-14. Tracks of the typhoons analyzed in this study. After Yoon et al. (2021).

3.5 해양생태학적 특성

제주도는 한반도 최남단에 위치한 지리적 특성과 제주도 주변의 다양한 수괴의 영향으로 온대와 아열대 및 열대 생물이 공존하는 생물다양성이 높은 환경이다 (Kim, 1991; Lee and Boo, 1993). 우도 홍조단괴 해빈의 저서동물의 수직분포는 조간대 중부에서는 삿갓조개(Patellidae)의 서식밀도가 높았으며, 꽃고랑따개비 (Anthosiphonaria sirius)의 발견과 더불어 대형전복과 소라, 나팔고둥의 패각들이 채집되었다(Jeju Special Self-Governing Province, 2007). 우도 홍조단괴 해빈 연안역의 식물플랑크톤의 출현종 수는 총 89종이며 규조류가 가장 많았고 그 외 와편모조류와 규질편모조류가 출현하였다. 수층의 평균 일일 일차생산력은 홍조단괴 해빈 연안역에서 $210.17 \text{ mgC/m}^2/\text{day}$ 분석되었으며, 미세식물플랑크톤($<20 \mu\text{m}$)의 총 일차생산력에 대한 비율은 연안보다 외해역에서 더 높은 생산력을 보인다(Lee et al., 1993). 또한, 거대조류(Macro algae)를 대상으로 수행된 식생 연구에서 Kang (2011)연구에서는 조사기간 동안 홍조류가 149종, 갈조류 56종, 녹조류 26종으로 총 231종의 해조류가 출현하였다고 보고되었다. 연안역의 해조류 군락적 특징으로는 조하대의 경우 연중 감태가 우점하며, 우리나라의 어떤 연안 보다 높은 종다양성과 생물량을 보육하는 매우 안정적인 생태환경을 유지하고 있다고 보고하였다.

홍조단괴 분포 연안역에서는 국제적으로 매우 드문 사례에 속하는 홍조단괴-거대갈조(Rhodolith-kelp) 시스템이 존재하는 것으로 알려져 있다. 기존 연구에서 거대갈조인 넓미역은 이 지역에서 거의 전적으로 홍조단괴 기질에 의존적인 생육특성을 보이며 4~8월에 걸쳐 포자체(sporophyte) 수심 10~15 m 범위에 넓은 군락을 형성한다고 보고하였다. 또한, 물리적 환경으로 서식지의 수온은 $15.5\sim 22.4^\circ\text{C}$, 4월에 가장 낮고, 8월에 높게 나타난다. 이와 반대로 염분농도는 $33.09\sim 34.44\%$ 로 4월에 높고 8월에 가장 낮은 것으로 나타났다. 이들 군락 내 저서동물 군집은 총 80종으로 연체동물이 차지하는 구성비가 가장 높았으며, 평균 서식밀도는 126 ind./m^2 를 보이는 것으로 조사되었다(Jeju Special Self-Governing Province, 2018).

3.6 소 결

홍조단괴는 단단한 핵을 중심으로 석회질 홍조류(Lithophyllum)가 부착하여 만들어진 입자로서 해수의 움직임에 의해 지속적으로 구르거나 움직이면서 직경 수 cm의 단괴로 성장한 것이다(Kim et al., 2003; Heo et al., 2012). 홍조단괴 해빈 인근의 단괴형 홍조류 주요 서식지는 우도와 제주 본섬 사이의 평균수심 약 15 m의 우도수로(Udo Channel) 연안역이다. 우도수로는 평균 폭 3 km, 길이 5 km 내외로 북북서-남남동 방향으로 발달한 수로로서 홍조단괴 해빈에서 남서쪽으로 약 1 km 지점에서 나타나며 남쪽과 북쪽으로 가면서 수심은 20 m 이상으로 완만하게 깊어진다. 우도해역에서의 홍조단괴 분포양상은 해저면 퇴적물 유형, 홍조단괴 분포밀도, 단괴 형태, 홍조류 생존 여부 등을 고려하여 해저면의 상태를 총 3개(A, B, C)의 유형으로 구분하였다. A 유형은 대부분의 해저면이 홍조단괴로 덮여 있는 유형으로서 주로 홍조단괴 해빈의 북서쪽에 위치하는 정점에서 관찰된다. 이들 정점은 수심 5 m 내외의 연안역에서부터 수심 18 m의 우도수로의 중심부까지 다양한 깊이의 해역에 분포하는데, 특히 자갈 크기의 홍조단괴가 높은 밀도로 분포하는 특징을 보인다. B 유형의 해저는 생존하는 사질 퇴적물이 우세하게 분포하고 있는 지역으로서 우도수로 동쪽과 서쪽의 연안역과 수로 측사면에 해당한다. 사질 퇴적물은 대부분 파편화된 백색 홍조단괴와 패각 입자들로 구성되어 있는데, 해저면에서는 불규칙한 정선을 보이는 연흔구조(ripple mark)가 나타나며, 우도 연안사퇴에서 큰 규모의 모래파(sandwave)나 사구(sand dune) 형태의 규칙적인 해저기복이 확인된다. C 유형의 해저는 우도수로 중심부와 측사면에 해당하는데, 해저에는 주로 사질 크기의 백색 홍조단괴편과 패각편이 미고화상태로 분포하고 있으며, 부분적으로 화산암반이 노출되어 있거나 여기서부터 떨어져 나온 거력이나 왕자갈들이 산재하여 나타난다. 결론적으로 높은 종다양성과 생물량을 보육하는 매우 안정적인 생태환경과 더불어 북북서-남남동 방향 왕복성 조류 등의 해양물리학적 특성, 단괴가 구르기 필요한 해저지형 등의 조건(Jeong et al., 2022)이 갖추어져 홍조단괴의 생성-성장-이동하는데 최적환경으로 판단된다(Kim et al., 2003; Heo et al., 2012; Jeju Special Self-Governing Province, 2021; Jeong et al., 2021, 2022).

제4장 홍조단괴 해빈의 장기 지형 변화

4.1 서론

우도 홍조단괴 해빈 배후지역은 1995년 해안도로 개통을 시작으로 천연기념물로 지정된 2004년까지 도로확장, 건물 신축 등 개발되었다. 특히 2000년대에는 해안도로의 홍조단괴 퇴적물 비사 발생에 따른 민원을 해결하고자 해안도로-해빈 경계에 약 1~2 m 높이의 호안이 축조되어 현재의 해빈 지형 및 주변환경의 모습을 갖추었다. 우도 홍조단괴 해빈의 지형변화는 기존 연구에서 해빈 배후지역 개발 등 인위적 환경 변화로 인하여 면적이 축소되는 것으로 보고되었으며(Jeju Special Self-Governing Province, 2017), 이에 대한 지형변화를 확인하기 위해서는 배후지역 개발 이전의 해빈 분포 범위를 파악하는 연구가 수행되어야 한다.

우리나라에서는 1966년 네델란드와 협정 체결을 통해 본격적인 항공사진 측량 기술이 도입되어 순수 최초 지형 제작기술 기반이 구축되었다(NGII, 2009). 연구지역 주변의 항공사진은 1948년부터 촬영되어 국토지리정보원에서 보유하고 있었으나 2004년부터 공개되어 활용할 수 있는 기반이 마련되어 홍조단괴 해빈의 배후지역 개발 이전의 해빈의 지형을 파악할 수 있게 되었다. 본 장에서는 국토지리정보원에서 제공하는 항공사진을 이용하여 우도 홍조단괴 해빈 지형변화와 더불어 주변환경 변화를 분석하고자 한다.

4.2 연구자료 및 분석방법

4.2.1 연구자료

우도 홍조단괴 해빈의 지형과 주변 환경 변화 과정을 파악하기 위하여 국토지리정보원에서 제공하는 항공 영상을 분석하였다. 우도 홍조단괴 해빈 지형이 촬영된 항공사진은 1948, 1967, 1969, 1991, 1995, 2003년 자료와 특정간격으로 촬영된 사진 6매와 2008년부터 2022년도 14매가 제공되고 있다. 본 연구에서 사용된 자료는 라이다 지형 측량 이전에 촬영된 1948년부터 2015년 항공자료 중 1948, 1967, 1969, 1985, 1991, 1995, 2003, 2008, 2010, 2015년 총 10매 자료를 이용

하였다(Fig. 4-1).

1967년에서 2008년까지 구축된 항공영상 자료는 주로 아날로그 자료로서 흑백사진으로 구축되어 있으며, 이후 디지털카메라로 촬영이 진행되어 항공사진이 컬러로 표현되어 있다. 항공사진에서 제공되는 정보는 주로 사업번호, 카메라(필터포함) 종류, 필름종류, 영상 저장매체, 유효년도, 촬영업체, 촬영기간이 명시되어 있으며, 아날로그 자료에서는 촬영시간까지 촬영정보 기록되어 있다. 이러한 정보기록 특성으로 아날로그 자료에서는 촬영시간을 알 수 있어 촬영 당시 조위를 파악할 수 있으며, 디지털자료에서는 정확한 조위 파악이 어렵다. 다만, 항공측량법에 의거 촬영비행은 음영부를 최소화하기 위하여 태양고도가 산지에서는 30° 평지에서는 25° 이상일 때 수행하여야 하는 규정에 의해 작업 시간은 오전 10시부터 오후 2시 사이에 실시되기 때문에 촬영시간이 명시되지 않은 자료들은 평균값인 12시로 적용하였다.

항공사진 촬영 당시 해수면을 파악하기 위하여 연구지역 근처인 성산 조위관측소의 조위자료를 이용하였는데, 성산 조위관측소는 2003년 11월부터 운영되어 1948년에서 2003년 자료는 1964년부터 운영되었던 제주 조위관측소 자료를 활용하였다.

4.2.2 분석방법

1967년에서 2003년까지 구축된 항공영상 자료는 주로 아날로그 자료로서 흑백사진으로 구축되어 있으며, 이후 디지털 자료로 전환되어 컬러로 표현되어 있다. 이에 따라 2003년 이전 자료는 홍조단괴 해빈을 구성하고 있는 퇴적물 고유색(흰색)과 농경지 분포를 표현하는 회색을 기준으로 해빈의 면적을 분석하였으며, 이후 컬러로 표현된 자료에서는 홍조단괴 퇴적물의 분광특성을 이용하여 면적을 산출하였다. 1995년 이전 자료에서 홍조단괴 해빈의 후안 범위는 현재 개발된 해안도로, 상가, 숙박시설 등이 위치한 배후지역까지 연장이 확인되었으며, 배후지역까지 해빈 연장선으로 설정하여 면적을 분석하는 경우 급격한 면적 축소가 발생하기 때문에 현재 설치된 호안을 기준으로 연안 방향에 분포하는 해빈 퇴적물을 대상으로 면적을 계산하였다. 해빈은 지속적으로 조석의 영향에 의해 파랑에 영향을 받는 해빈 면적이 매시간 달라 촬영 시 해당 조위를 파악하는 것이 중요하다. 특히 항공사진을 이용한 장기지형변화 분석을 위해서는 촬영 당시의 조위 값이 필요하지만, 조위 자료가 없는 경우 조위 조정을 통해 추정이 가능하다. 조위 조정은 조위 정보를 기준으로 표준항의 조위관측소 관측값을 우도 홍조단괴 해빈과 인접한 성산 조위관측소의

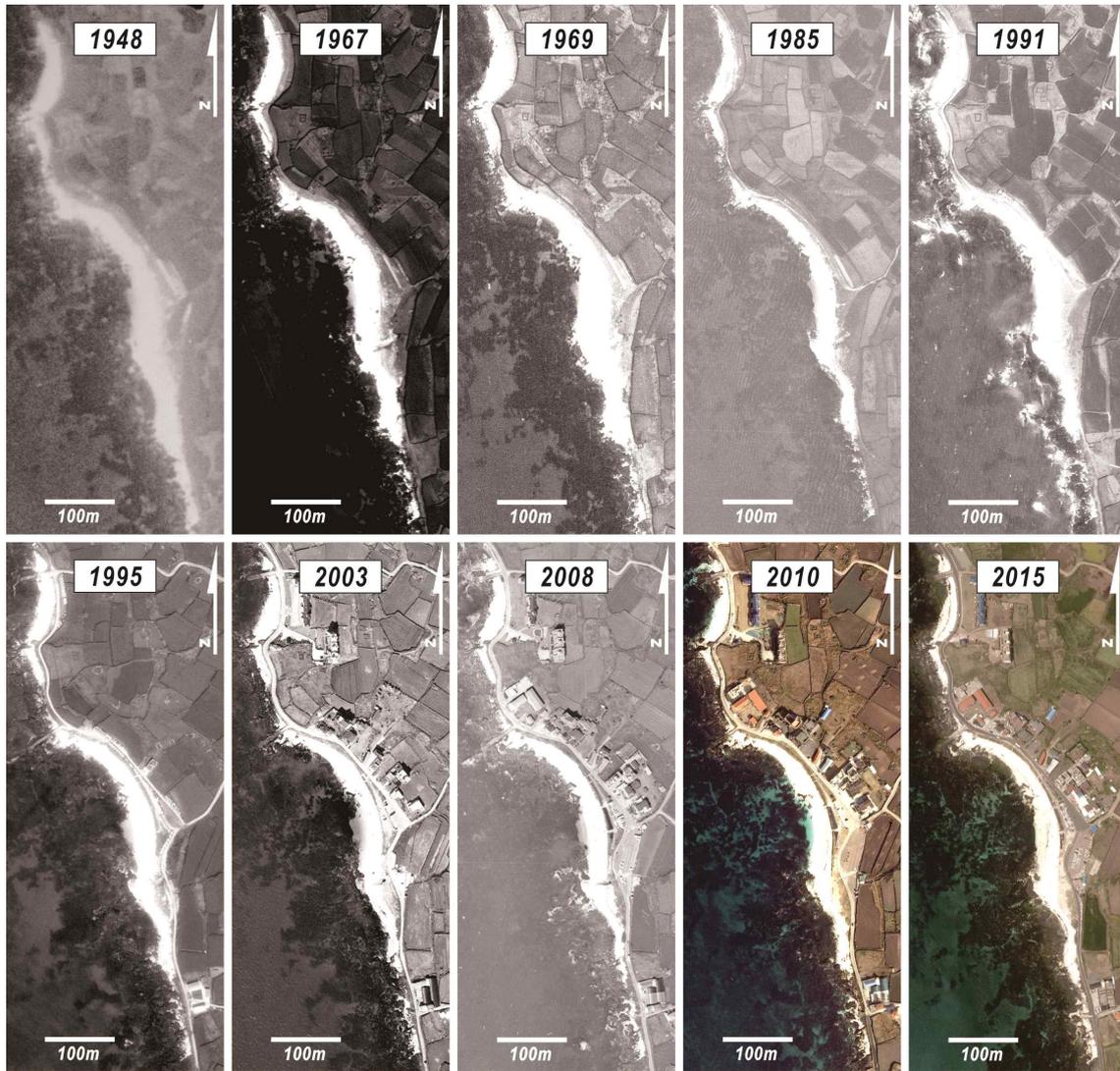


Fig. 4-1. Aerial photographs of the Udo Rhodolith Beach from 1948 to 2015. Photos from NGII (National Geographic Information Institute).

조시차와 조고비를 대입하여 산출할 수 있으며(Table 4-1), 표준항 선정은 연구 분석자료의 촬영시기에 운영되었던 제주 조위관측소를 선정하였다. 다만, 항공사진 촬영 특성상 촬영기간 정보만이 공개되기 때문에 촬영일자와 관련된 정보는 불일치 가능성이 포함되어 있어 면적 변화를 해석하는 보조적 수단으로 활용하였다. 이에 따라 해빈 면적은 조위 값과 관계없이 영상에서 확인되는 분포면적을 산출하였다.

최근에 구축되는 항공사진은 촬영과정에서 위치정보가 기록되어 좌표가 투영되어 있으나, 과거 아날로그 항공사진에서는 좌표가 투영되어 있지 않아, 정량적인 자료 분석을 위해서는 현재 기준에서의 좌표를 임의적으로 투영하여야 한다. 항공사진 좌표 투영은 일반적으로 과거 영상과 현재 위성영상을 비교하여 변하지 않았던 지형적 특성, 지적 경계에서의 절대 좌표를 획득하여야 하나, 항공사진의 해상도가 매우 낮아 지형지물 파악에 어려움이 있어 일부 항공사진은 해안선의 모양을 기준으로 GIS 프로그램에서 좌표참조(Georeferencing) 작업하여 분석하였다.

Table 4-1. Equations for tidal non-harmonic constants.

Tidal non-harmonic constant	Equation
Spring Range	$= 2(H_m + H_s)$
Time difference for tide	$= \text{Observation Point MHWI} - \text{Standard MHWI}$
Height ratio for tide	$= 2(H_m + H_s) / 2(H_m + H_s)_{\text{standard observation}}$

· H_m : Principal lunar semidiurnal component amplitude

· H_s : Principal solar semidiurnal component amplitude

4.3. 분석결과

4.3.1 조위 추정 결과

국립해양조사원에서 고시된 제주항의 기본수준점 성과표에 따르면 평균해수면은 139.1 cm 로서 홍조단괴 해빈 근처에 위치한 성산 조위관측소 보다 6 cm 높으며, 평균고조간격은 10시간 28분으로 성산항(9시간 27분)과 약 1시간의 조시차가 나타난다. 제주항의 대조차는 238.3 cm로서 성산 조위관측소 228.5 cm 보다 9.8 cm 높으며, 대조차 비교를 통해 0.96의 조고비가 계산되어 이를 대입하여 계산하였다 (Table 4-2, 3).

제주 조위관측소 자료를 계산하여 추정된 항공사진 촬영 당시 조위 값은 1967년 205 cm, 1969년 140 cm, 1985년 129 cm, 1991년 127 cm, 1995년 203 cm, 2003년 278 cm 이다. 성산 조위관측소 조위 자료를 기준으로 적용된 항공사진 촬영 당시 조위 값은 208년 76 cm, 2010년 206 cm, 2015년 121 cm 이다(Table 4-4).

항공사진 촬영 시각의 조위 범위는 76~278 cm 이며, 1948년은 제주지역 조위 값 부재로 인하여 조위 자료 추정이 불가능하였다. 조위 관측 값이 계산된 9개 자료중 4개 자료(1969, 1985, 1991, 2015년)는 성산지역 평균 해수면 범위에서 촬영되었으며, 4개 자료(1967, 1995, 2003, 2010년)는 만조 수위에 촬영되었다. 2008년 자료는 간조 시기에 촬영되어 홍조단괴 해빈 전안의 지형형태를 파악할 수 있다.

4.3.2 면적 분석 결과

1) 배후지역 개발 전 장기 지형변화(1948~1991년)

43년간 홍조단괴 해빈 및 주변 지형을 파악 할 수 있어 매우 중요한 자료이다. 1948년 촬영 당시 제주지역 조위관측소 부재로 인해 조위 값을 판단 할 수 없으나, 면적 20,661 m²로 분석되었다. 1967년 항공촬영 당시 조위는 205 cm로서 평균해수면 보다 약 72 cm 해수면이 상승한 상태이며, 분석 면적은 20,647 m²로 측정되어 19년간 면적 변화는 거의 나타나지 않았다. 면적 변화와 달리 지형변화는 해빈 북부구간(1구역)에서 해빈 폭이 15 m 확장되어 나타나고 대조적으로 해빈 남부구간(4구역)에서의 폭은 대폭 감소하였다. 해빈 중앙부 구간(3구역)은 상대적으로 북쪽 침식, 남쪽 퇴적의 지형변화가 발생하였다(Fig. 4-2a).

1969년 2월 항공사진은 조위 140 cm 위치에서 촬영되었으며, 분석 면적은

Table 4-2. Information of TBM (Tidal Bench Mark) in Jeju and Seongsan tide stations. Data from KHOA.

Location name	Tidal harmonic constant				Tidal non-harmonic constant	
	Tidal constituent	Amplitude (H)	Tidal lag (k)	Tidal lag (g)		
Jeju tide station	M2	69.7	303.5	311.3	MHWI (k)	10h 28m
					MHWI (g)	10h 44m
	S2	29.5	324.1	341	Spring rise	238.3 cm
					Neap rise	179.2 cm
	K1	23	210.2	219	M.S.L	139.1 cm
O1	16.8	189.1	188.1	Approx.H.H.W	278.1 cm	
Seongsan tide station	M2	65.4	274.2	281.2	MHWI (k)	09h 27m
					MHWI (g)	09h 42m
	S2	30	296.3	312.4	Spring rise	228.5 cm
					Neac rise	168.5 cm
	K1	21.7	202.6	211	M.S.L	133.1 cm
O1	16	182.3	180.9	Approx.H.H.W	266.2 cm	

Table 4-3. Information of tide levels (estimated) at the time of the aerial photo shots. Data from NGII and KHOA.

Date	Time	Seongsan tide station tide level (cm)	Jeju tide station tide level (cm)	Time difference for tide (hour)	Height ratio for tide	Source
1948-05-13	-	-	-	1	0.96	<ul style="list-style-type: none"> · Image : National Geographic Information Institute (NGII) · Tide level data : Jeju and Seongsan tide station (KHOA)
1967-10-07	11:49	205	257			
1969-02-12	11:55	140	125			
1985-04-29	12:00	129	118			
1991-03-23	12:48	127	133			
1995-10-08	13:00	203	202			
2003-10-27	12:46	278	290			
2008-10-11	14:16	76	102			
2010-11-11	12:00	206	214			
2015-04-17	12:00	121	203			

23,298 m²로서 약 2년간 면적이 약 13% 증가하였는데, 이는 전체 기간 중 해빈 면적이 가장 넓은 시기이다. 세부지형 변화는 중앙부(3구역)구역의 북쪽 침식, 남쪽 퇴적이 발생하였다. 지난 기간(1948-1967년도)에서 축소되었던 남부구역(4구역)이 다시 확장되어 점유 면적이 증가 되었으며, 북부구역(1구역)에서는 지난 기간 확장되었던 면적이 유지되어 이는 면적이 증가된 주요 요인으로 해석된다(Fig. 4-2b). 이후 16년 뒤 자료인 1985년 항공사진은 조위 129 cm에서 촬영되었으며, 면적은 12,910 m² 로서 약 16년간 44.6% 감소하여 분석시기 중 가장 적은 면적으로 분석되었다. 해빈 전구역 걸쳐 전안 전단부가 침식되어 최소 5 m에서 최대 26 m 폭이 줄어들어 해안선이 내륙방향으로 후퇴되었다(Fig. 4-2c). 점유면적 변화는 중앙부-남부 구역에서 많은 퇴적물이 유실 또는 이동되어 2022년 해빈 중앙부 구역(3구역) 중심에 돌출되어 있는 기반암의 모습을 확인할 수 있다. 1991년 자료는 1985년 자료와 거의 동일한 조위 127 cm에서 촬영되었으며, 면적은 14,707 m² 6년간 약 13% 면적 증가가 확인되는데, 해빈 전구역에 걸쳐 해안선이 외해방향으로 확장되어 나타난다(Fig. 4-2d).

1948-1991년 기간 5개의 항공사진 자료 분석 결과, 호안 축조 전 해빈 면적은 43년간 약 28% 감소되었으며, 면적 증감 양상은 증가-감소-증가 형태로 변화한다(Fig. 4-2e). 특히, 1969년 항공사진은 만조시기에 촬영됨에도 불구하고 전체 분석 기간 중 가장 넓은 면적이다. 반면에 1985년 자료는 평균 해수면 위치에서 촬영됨에도 불구하고 전체 분석 기간 중 가장 낮은 면적을 기록하였다. 따라서 인위적 개발이 없던 배후지역 개발 전 해빈 장기 지형변화는 큰 폭의 변화범위를 보이고 있다.

2) 배후지역 개발 전, 후 단기 지형변화(1991~1995년)

우도 홍조단괴 해빈 배후지역은 1995년 홍조단괴 퇴적물 위에 토목 기초 작업을 실시한 뒤 해안도로가 건설되어 해빈 배후지 변화가 뚜렷하게 발생한 시기로서 배후지 개발에 따른 지형변화를 파악하기 위하여 1991년 자료와 1995년 자료를 비교하였다(Fig 4-3a, b). 1991년 자료는 평균해수면과 비슷한 조위(127 cm)에서 촬영 되었으며, 면적은 14,707 m² 로 분석되었다. 1995년 자료는 조위 203 cm에서 촬영되었으며, 면적은 15,985 m²로 분석되어 약 8.7% 증가하였다. 1995년 항공사진에서는 호안 및 해안도로 설치 등 배후지역 개발 현상이 확인되며, 배후지역에서 연안방향으로의 경사로 등이 설치되어 해빈 형태가 단절되었다(Fig. 4-3c).

호안 축조전 장기변화에서는 실제 배후지역까지 홍조단괴 해빈 퇴적물이 분포하

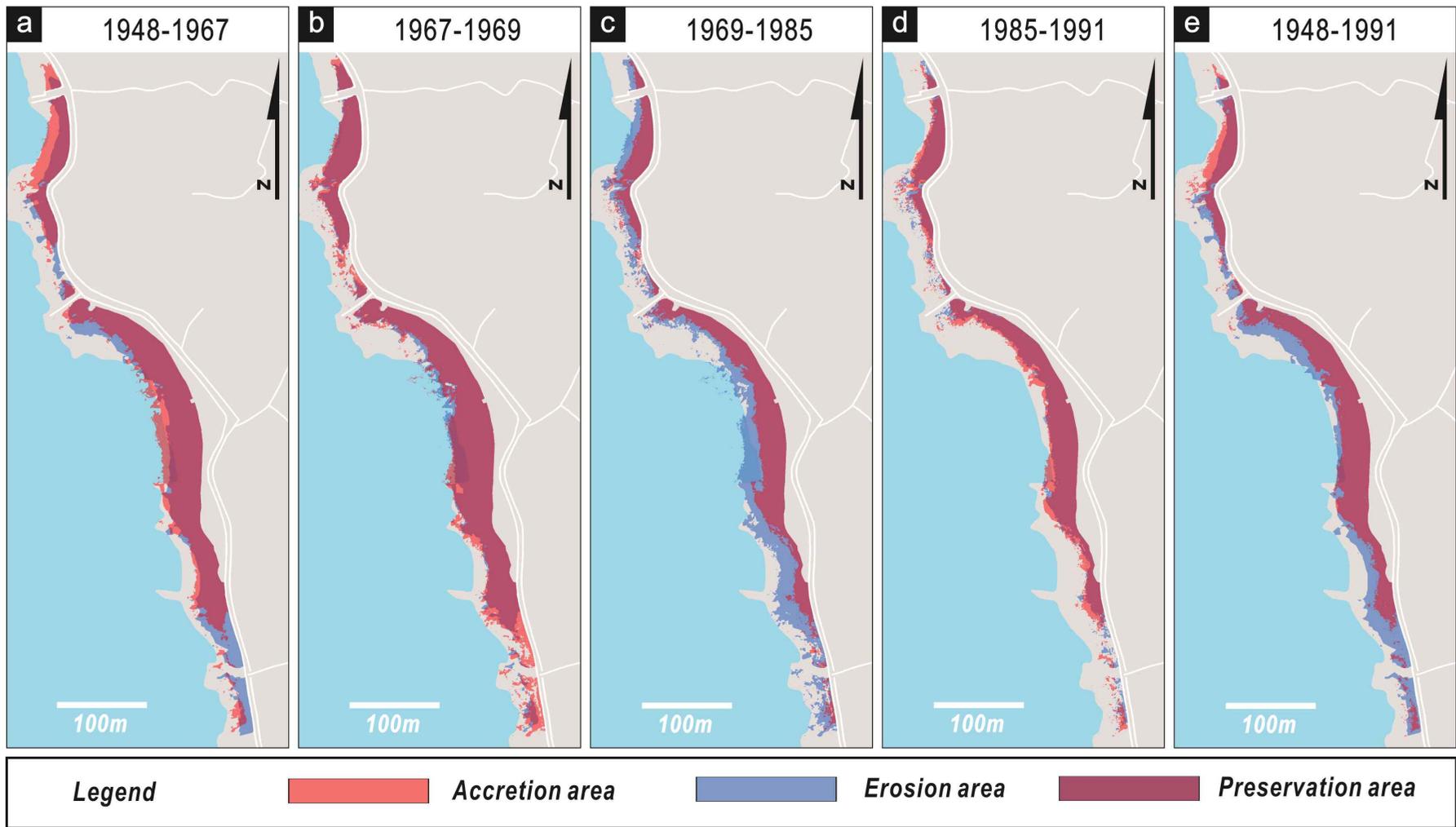


Fig. 4-2 Long-term changes of beach area and shoreline in the Udo Rhodolith Beach.

였으나 면적분석은 호안을 기준으로 해안에 분포하는 퇴적물 면적을 측정된 값이기 때문에 호안 축조가 해빈 퇴적물을 증가하게 되는 요인으로 작용하는 것으로 해석하기에는 다소 무리가 있다. 다만, 촬영 당시 높은 조위에도 불구하고 해빈의 면적이 증가한 요인은 중앙부(3구역)에서의 면적이 확장과 북부(1구역)에서의 해빈 폭 증가가 면적 증가의 요인으로 해석된다.

3) 배후지역 개발 후 장기 지형변화(1995~2015년)

1995년에서 2015년까지 항공사진에서는 배후지역 개발이 뚜렷하게 관측되는데, 1995년 해안도로 완공 후, 주거 및 상가건물들이 건설되어 배후지역에서의 홍조단괴 퇴적물 분포의 흔적은 찾아 볼 수 없다. 2004년 홍조단괴 해빈은 천연기념물로 지정되어 이후 배후지역에서의 인위적 개발은 추가로 확인되지 않는다. 1995~2019년 기간은 배후지역 개발이 끝난 뒤 해빈의 퇴적환경 변화를 유추할 수 있는 기간으로 면적은 1995년 15,985 m², 2003년 14,075 m², 2008년 13,073 m², 2010년 14,794 m² 로 측정되었는데, 면적변화는 1995년에서 2008년까지 면적 축소(Fig. 4-4a, b), 2008년에서 2015년간은 면적 증가 시기로 확인된다(Fig. 4-4c, d). 1995년~2015년 20년간 호안 축조 후 퇴적물 분포 면적은 축소-증가 하였으며, 위 기간동안 면적은 약 7% 감소하였다(Fig 4-4e; Table 4-3).

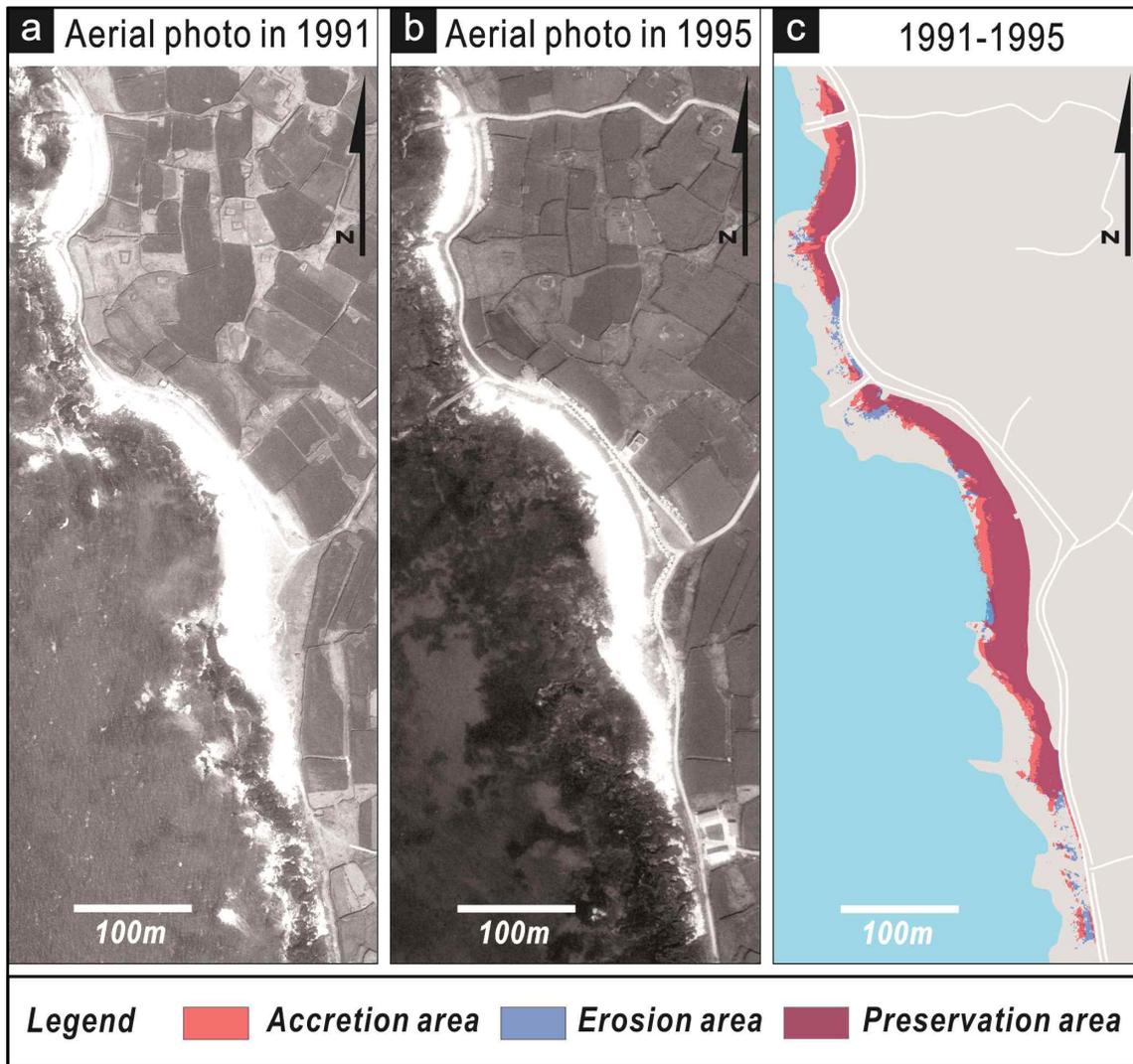


Fig. 4-3 Aerial photos in Mar. 1991 (a) and Mar. 1995 (b), and areal change between two photographs.

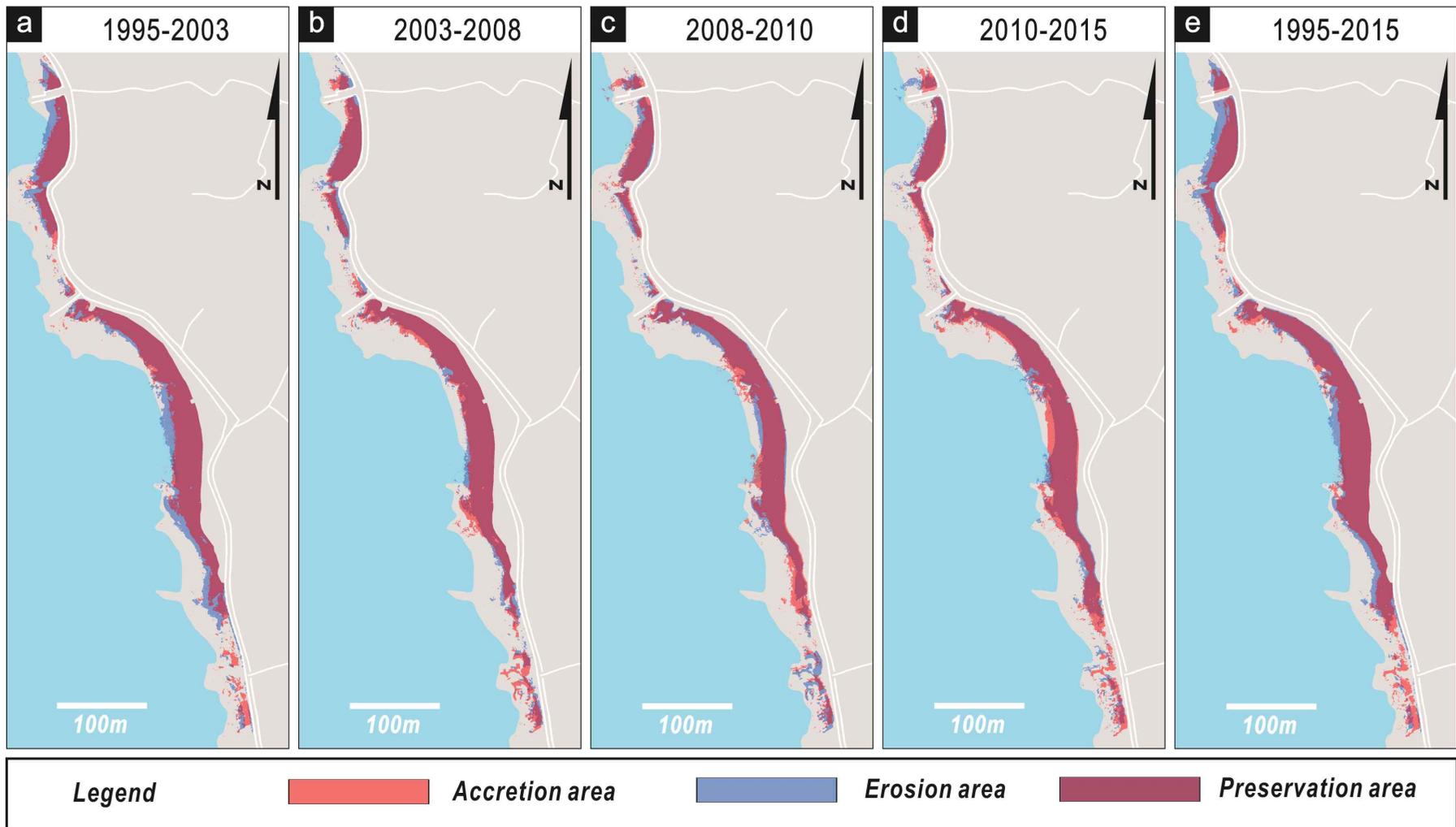


Fig. 4-4 Beach area and shoreline change of the Udo Rhodolith Beach from Mar. 1995 to Apr. 2015.

4.4 소 결

1948~1969년 영상에서 해빈 배후 지역(주차장 및 해안도로 지역)은 대부분 초지로 보이며 당시에도 농경지로 활용되지 않은 것으로 보아 홍조단괴 퇴적물이 비교적 안정적 환경(후안)에서 분포하는 것으로 추정된다. 해빈의 전체 길이(남북 방향)는 현재 홍조단괴 해빈의 길이보다 남쪽으로 약 150 m 확장되어 나타난다.

전체 해빈 기간 중 1948~1969년도가 가장 넓게 분포하며 현재 호안에서 약 50 m까지 나타나는데, 특히, 1969년 면적은 해수면 만조 시기임에도 불구하고 23,299 m² 로 분석되어 해안의 폭은 외해로 더 연장될 것으로 추정된다.

1969~1985년 영상에서 해빈 면적이 최대로 축소되는 시기로서, 해빈 면적 축소는 44.6% 큰 폭으로 발생하였는데, 해빈 전구역 걸쳐 전안 전단부가 최소 5~26 m 폭이 줄어들어 해안선이 내륙방향으로 후퇴되었다. 특히, 해빈 중앙부-남부 구역에서 많은 퇴적물이 유실 또는 이동으로 인하여 상당 규모의 해빈 면적이 축소되었다.

1985년에서 2015년 30년간 해빈 면적은 증가(1985~1995년), 감소(1995~2008년), 증가(2008~2015년)되는 경향을 보이고 있으며, 30년간 해빈 면적은 15% 증가를 보이고 있다. 호안 축조 전후의 1990년과 1995년 영상에서 홍조단괴 해빈의 폭의 감소는 3구역 북쪽 및 중앙 구간 미약한 폭 감소 외에는 뚜렷한 변화는 없었으며, 면적은 약 8.7% 증가하였다. 호안이 축조된 후 2003년 영상에서는 해빈의 중앙구역 일부에서 해빈 폭이 감소가 확인되었으며, 2012년과 2014년에는 다시 해빈 폭이 증가하는 등의 2008년에 비해 다소 해빈 폭이 증가하는 등 해빈 면적 확대 및 축소가 반복되는 현상으로 미루어보아 해빈 면적은 시기 및 해황 변화에 의해 해빈의 감소와 확대가 반복되었던 것으로 보인다(Fig. 5-3). 특히, 기존 연구에서 해빈 배후지역 개발 등 인위적 환경 변화로 인하여 면적이 축소되는 것으로 보고되었는데(Jeju Special Self-Governing Province 2017), 장기지형 분석결과, 호안 축조 이전 시기인 1985년 면적이 최소였으며, 호안 축조시기인 1995년까지 면적은 지속적으로 상승 추세를 보이는데, Jeong (2016) 연구에서 보고된 1985~1995년 장기지형변화 추세와 유사하다. 따라서 홍조단괴 해빈 퇴적물 유실은 배후지역 개발 외에도 해양환경 변화, 주변 항만 확장 등 다양한 요인들이 복합적으로 작용에 의한 것으로 판단된다.

Table 4-4. Summary of areal change in the Udo Rhodolith Beach from 1967 to 2019.

Year	1948	1967	1969	1985	1991	1995	2003	2008	2010	2015	Entire period
Area (m ²)	20,661	20,647	23,299	12,910	14,707	15,985	14,075	13,073	14,345	14,794	
Area change (m ²)		-14	2,652	-10,389	1,797	1,278	-1,910	-1,002	1,272	449	-5,867
Rate of area change (%)		-0.1%	12.8%	-44.6%	13.9%	8.7%	-11.9%	-7.1%	9.7%	3.1%	-28.4%

제5장 홍조단괴 해빈의 규모 및 지형 변화

5.1 서론

최근 사회적 이슈로 대두되고 있는 연안지형 변화를 파악하기 위하여 항공사진, 위성사진, 비디오 영상, RTK-GPS 등 다양한 측량 및 모니터링 기법이 적용되어 지형 변화 연구가 이루어지고 있다(Park et al., 2010; Kim et al., 2016). 기존 연구에서는 우도 홍조단괴 해빈 지형변화 파악을 위하여 RTK-GPS 방법, 비디오 모니터링 등의 해빈 지형 모니터링이 실시되었으나, 주로 홍조단괴 해빈에서 점유면적이 가장 넓은 구역을 대상으로 자료가 구축되었으며, 제한된 시간 및 측량 정점수로 인하여 지형변화를 파악하기에 한계가 있다. 또한 비디오 모니터링 시스템은 주변의 높은 건물 등을 이용하여 설치함으로써 해빈의 전체적인 지형을 파악할 수 있어야 하지만, 연구지역 주변에는 해빈 전체 모습을 조망할 수 있는 건물의 부재로 모니터링에 어려움이 있다.

레이저의 반사 속도를 이용하여 지형 및 사물을 스캔할 수 있는 라이더(LIDAR: Light Detection and Ranging) 측량은 짧은 시간 내에 수많은 레이저를 조사하여 많은 양의 지형정보 데이터를 획득할 수 있는 장점이 있기 때문에 최근 해빈 지형 연구에서 활용되고 있으며, 특히, 고해상도의 데이터 품질은 해빈의 미지형까지 조사되어 각광 받고 있다(Shim et al., 2010; Yoon et al., 2010). 최근 해양분야에서는 무인항공기를 활용하여 조간대 지역에 대한 항공사진측량을 실시하여 수치표고모형과 정사영상을 생성 후 갯골의 위치 및 시간에 따른 갯골 변화양상을 분석하였으며(Lee and Huh, 2017), 격포해수욕장을 대상으로 2018년 6월 ~ 2019년 6월까지 1년간 무인항공기를 활용한 해빈 지형 모니터링을 실시하여 구간별 침식·퇴적양상을 분석한 사례도 있다(Cho et al., 2020). 또한 무인항공기에서 취득된 영상의 분광특성을 이용한 적조 모니터링 연구가 활발히 진행되는 등 해양 및 연안환경에서의 무인항공기를 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다(Oh et al., 2016; Bae et al., 2016).

이 장에서는 우도 홍조단괴 해빈을 대상으로 지상라이더를 이용하여 계절별로 해빈 지형변화를 분석하고 이에 대한 경향을 파악함과 더불어 무인항공기에 얻어진 해빈 면적자료와 비교를 통해 우도 홍조단괴 해빈의 지형 변화 특성에 대하여 설명하고자 한다.

5.2. 연구 방법

5.2.1 조사범위 및 시기

약 850 m 걸쳐 남북으로 발달하는 홍조단괴 해빈에는 해안선으로부터 외해로 돌출된 다수의 암반지역(곶)이 나타나고 이를 경계로 하여 4개의 소규모 만입부가 발달하는데, 이들 4개의 만입부를 북에서부터 남쪽으로 가면서 각각 1구역, 2구역, 3구역, 4구역으로 구분하여 지형 측량과 분석을 수행하였다(Fig. 5-1).

라이다를 이용한 해빈 지형의 측량은 레이더파의 해수 침투율이 매우 낮으므로, 측량의 공간적 범위는 평균해수면(표고 0 m) 상부의 전안(foreshore) 및 후안(backshore) 등 대기 중에 노출되어 있는 해빈구역이며, 육지 쪽으로는 호안벽이나 도로 등 인공구조물과의 경계부까지 측량범위가 설정되었다(Fig. 5-2). 라이다 측량 시기는 계절별 변화 양상을 분석하기 위하여 하계, 태풍 후, 추계, 동계, 춘계 대표시기를 선정하여, 2016년 9월부터 2021년 하계까지 수행하였으며다만, 2017년 하계부터 2018년 하계까지, 2020년 하계에서 2021년 하계까지는 측량을 실시하지 못하였다(Table 5-1).

드론 영상 촬영은 무인기에 장착된 디지털 광학카메라를 이용하여 해빈에 대한 정사영상을 취득함으로써, 해빈 퇴적물의 분포 범위를 파악하고 조사 시기별로 해빈면적의 정량적 변화를 파악하는 데 그 목적이 있다. 드론 항공기를 이용한 해빈 영상촬영의 범위는 육지 쪽으로는 호안벽이나 도로 등 인공구조물과의 경계부이며, 바다 쪽으로는 광학 영상분석에서 퇴적물 분포가 확인되는 해수면 아래의 연안역까지로 설정되었다(Fig. 5-4a). 평균해수면 상부의 지표층을 대상으로 표고를 측정하는 라이다 측량과 비교할 때 드론으로 측량된 면적은 해수면 상부뿐만 아니라 해수에 잠겨 있는 하부 조간대 및 조하대까지도 포함되기 때문에 산정범위가 확대된 것이며, 대신 라이다 측량면적에 포함되는 노출 암반은 드론영상에서는 색상을 통해 해빈 퇴적물과 구별이 가능하여 면적에서 제외되기 때문에 해빈과 이에 인접한 연안역에 쌓여 있는 ‘퇴적물의 분포면적’을 보다 정밀하게 파악할 수 있다. 무인항공기를 이용한 해빈 영상촬영은 2018년 8월을 시작으로 2021년 10월까지 총 33회 실시하였으며, 2020년 6월부터 2021년 4월까지 촬영을 실시하지 못하였다(Table 5-1).

Table 5-1. Survey schedule of LiDAR scanning and drone mapping.

Year	Method	Beach morphology measurements survey schedule											
		Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
2016	LiDAR									1st	2nd	3rd	
	Drone												
2017	LiDAR		4th			5th							
	Drone												
2018	LiDAR							1st	2nd		3rd		
	Drone												
2019	LiDAR		4th		5th				1st	2nd	3rd		
	Drone												
2020	LiDAR		4th		5th								
	Drone												
2021	LiDAR										1st		
	Drone												

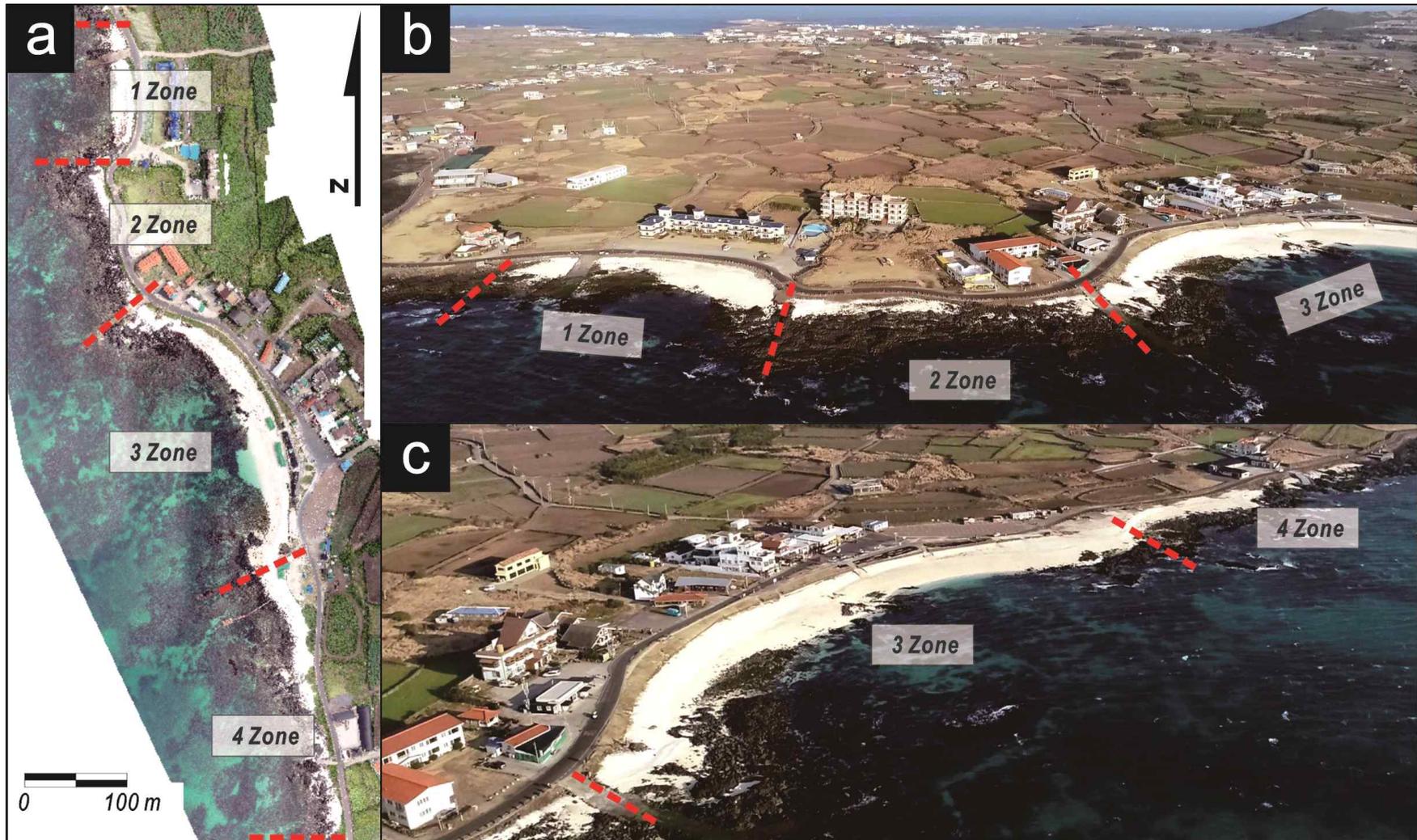


Fig. 5-1. Subdivision of the Udo Rhodolith Beach by coastal cusps.

5.2.2 지상 라이다 측량

1) 지상라이다 측량 및 해빈 규모 산출 방법

지상 라이다(LiDAR: Light Detection And Ranging) 측량은 육상에서 레이저를 이용하여 측량 대상으로 레이저를 주사하고 도달하는 시간을 계산을 통해 3차원 지형정보를 획득하는 측량 방법으로서 해빈의 부피, 면적 및 세부 지형의 변화를 파악할 수 있다.

라이다 측량에서는 도출된 값을 기초자료로 하여 표고 0 m 이상인 지점들의 분포 면적(평면)을 산정하며, 표고값에 기초하여 추출된 3D 지표면과 평균해수면 사이의 부피를 산정하는 방식으로 해빈 규모가 분석되었다. 표고값으로 이루어진 라이다 측량정보만으로는 측량구역 내의 지질유형(즉, 퇴적물 혹은 암반)을 직접 구분할 수 없으므로, 라이다 측량을 통해 산정한 면적과 부피는 해빈을 구성하는 홍조단괴 퇴적물뿐만 아니라 평균해수면 상부에 노출된 암반까지도 포함된 기하학적 수치이다. 따라서 라이다 측량구역의 면적이나 부피는 홍조단괴 해빈의 실제 면적이나 부피와 정확히 일치하지는 않는다(암반이 포함되어 있으므로 실제 값보다 더 크게 산정된다). 다만, 수년 범위의 조사기간 동안 암반은 표고가 거의 변하지 않으나 모래와 자갈로 이루어진 해빈은 수시로 쌓이고 깎이기 때문에, 만일 라이다 측량 면적이나 부피가 시기별로 달라진다면 이는 퇴적물의 집적이나 유실로 인한 실제 해빈의 부피 혹은 면적의 변동 값으로 볼 수 있다.

한편, 면적 산정범위의 육지부 경계는 호안 하단부와 해안도로 경계적으로 설정하였는데, 이들은 고정 구조물로서 그 위치가 변하지 않기 때문에 측량면적의 변화는 곧 해안선(평균해수면과 해빈면의 교차선)의 전진과 후퇴를 반영하는 것으로 볼 수 있다.

2) 측량 장비 및 소프트웨어

라이다 측량에 사용된 장비는 Leica 사의 'Scan station p40' 장비를 이용하였으며, 본 장비는 270 m 범위에서 초당 백만 포인트의 초고속 스캔속도를 지원한다. 장비의 측량 정확도는 50 m 거리에서 3 mm, 60 m 거리에서는 약 6 mm의 매우 적은 오차범위를 보이기 때문에 정확한 지형정보를 취득할 수 있다(Fig. 5-2). 본 연구에서 라이다 지형정보를 이용하여 계산된 측량 값과 해빈 주변에 설치된 기준점의 오차 값을 비교한 결과, 수평방향 5~8 mm, 수직방향 1 cm 이하로 오차 범위

가 산출되었다. 라이다 장비에서 취득된 3차원 지형정보는 ‘Cyclone v.9.1.5’프로그램을 이용하여 3차원 지형정보를 구축하였다.

3) 조사 및 데이터 처리

라이다 장비를 이용하여 해빈 측량에 앞서 후처리 과정에서의 점군 데이터 정렬 과정을 용이하기 위하여 해빈에서는 광대역 스캐너로 대상물을 스캔하기 전, 대상물 내 여러 지점에 타겟을 고정하였다. 동일 지역을 다시 스캔하여 변형 등을 분석할 수 있도록 기준점을 고정하였으며, 기준점 취득을 위해 측량장비인 VRS를 사용하여 좌표를 취득해 두었다(Fig. 5-3a, b; Table 5-2).

해빈의 구역별로 저장된 3차원 지형정보 데이터를 등록(registration) 과정을 통해 정렬하고, 최종 데이터는 하나의 데이터로 병합되는데, 등록(registration) 작업에서는 우선 점군 데이터들을 정렬하는데, 타겟을 설치하고 스캔을 한 경우 이 결과를 이용해 정렬할 수 있다. 1차적으로 정렬된 점군들에 대해서는 점들 간의 거리에서 오류(error)값이 계산되는데 최적화(optimize) 과정을 거쳐 오차를 최소화하고 최적의 상태로 정렬하는 과정을 실시한다. 해빈 측량 작업에서는 점군들 사이의 오차를 10mm 이내로 설정하였으며, 이는 스캐너의 해상도 이내에 들어오는 값이므로 충분히 작은 값이라 할 수 있다(Fig. 5-3c). 등록 작업 후에는 이를 하나의 데이터로 병합하는 통합(unify) 과정을 거치는데, 하나의 데이터로 병합된 최종 점군 데이터는 Cyclone 프로그램에서 구간별 단면위치를 설정하고 내보내기(export)를 하여 CAD 및 GIS 프로그램을 이용해 결과물을 도출할 수 있다.

5.2.3 드론 영상촬영 처리

1) 드론영상 촬영 장비

드론 영상촬영에 이용된 기체는 ‘Phantom 4 Pro V2.0’ 기종으로 무게가 약 1,300 g으로 경량기체에 해당되며, 프로펠러가 4개가 장착되어 운영되는 쿼드콥터(Quadcopter)이다. 본 장비는 정지비행 상태(Hovering)에서 수평 ± 0.3 m, 수직 ± 0.1 m의 오차 범위를 보이며, 최대속도는 약 72 km/h, 통신거리는 약 7 km까지 가능하다. 드론에 탑재된 카메라는 4K 해상도, 1인치 2000만 화소 CMOS 센서로 구성되어 있으며, 초점거리 8.8 mm, 화각 84°, 픽셀 사이즈는 $2.61 \times 2.61 \mu\text{m}$ 으로서 고해상도 이미지를 획득 할 수 있다.

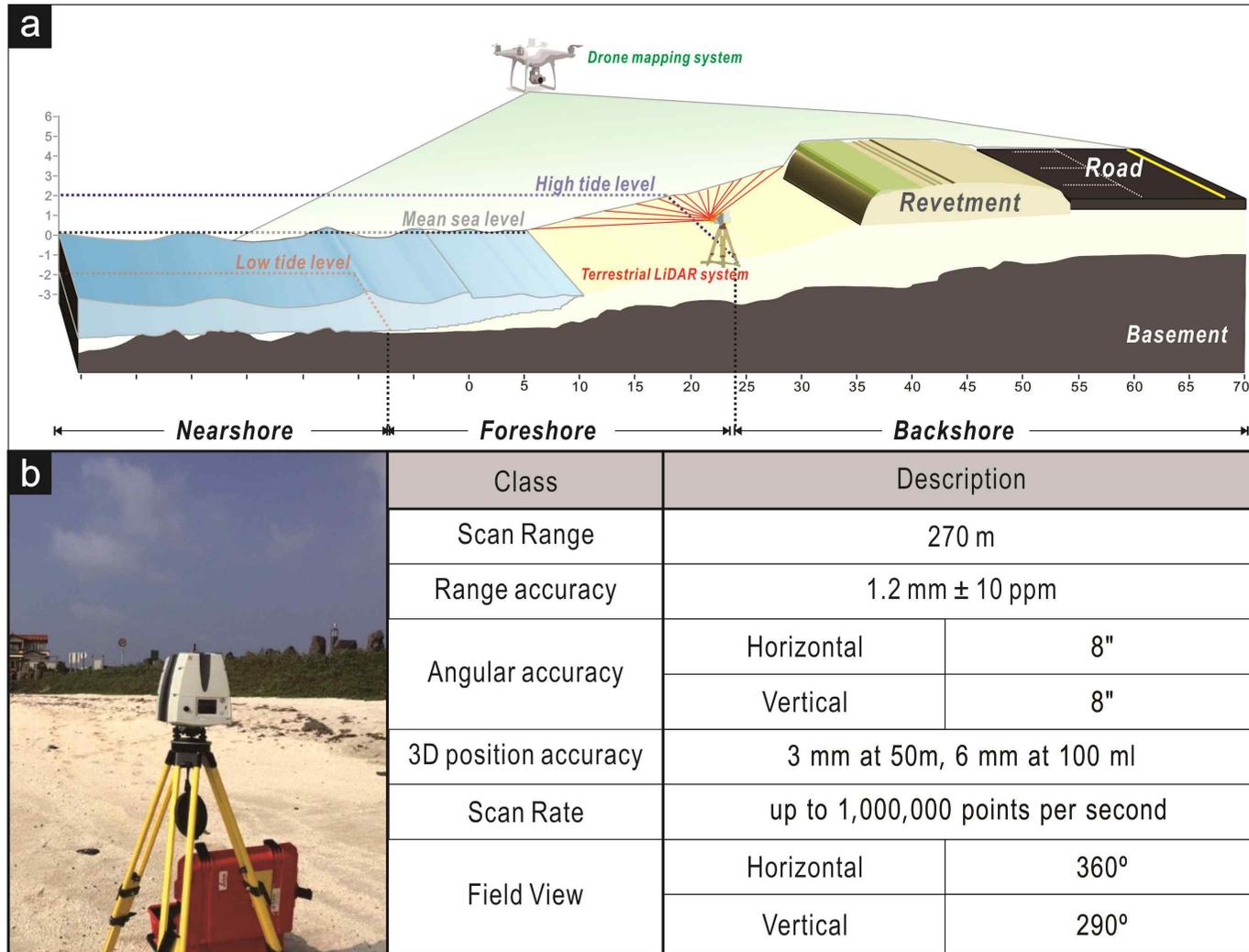


Fig. 5-2. (a) Diagram showing survey ranges of the terrestrial LiDAR scanning (red line) and Drone mapping. (b) Photo and specification of the terrestrial laser scanner (Leica Scan Station P40)

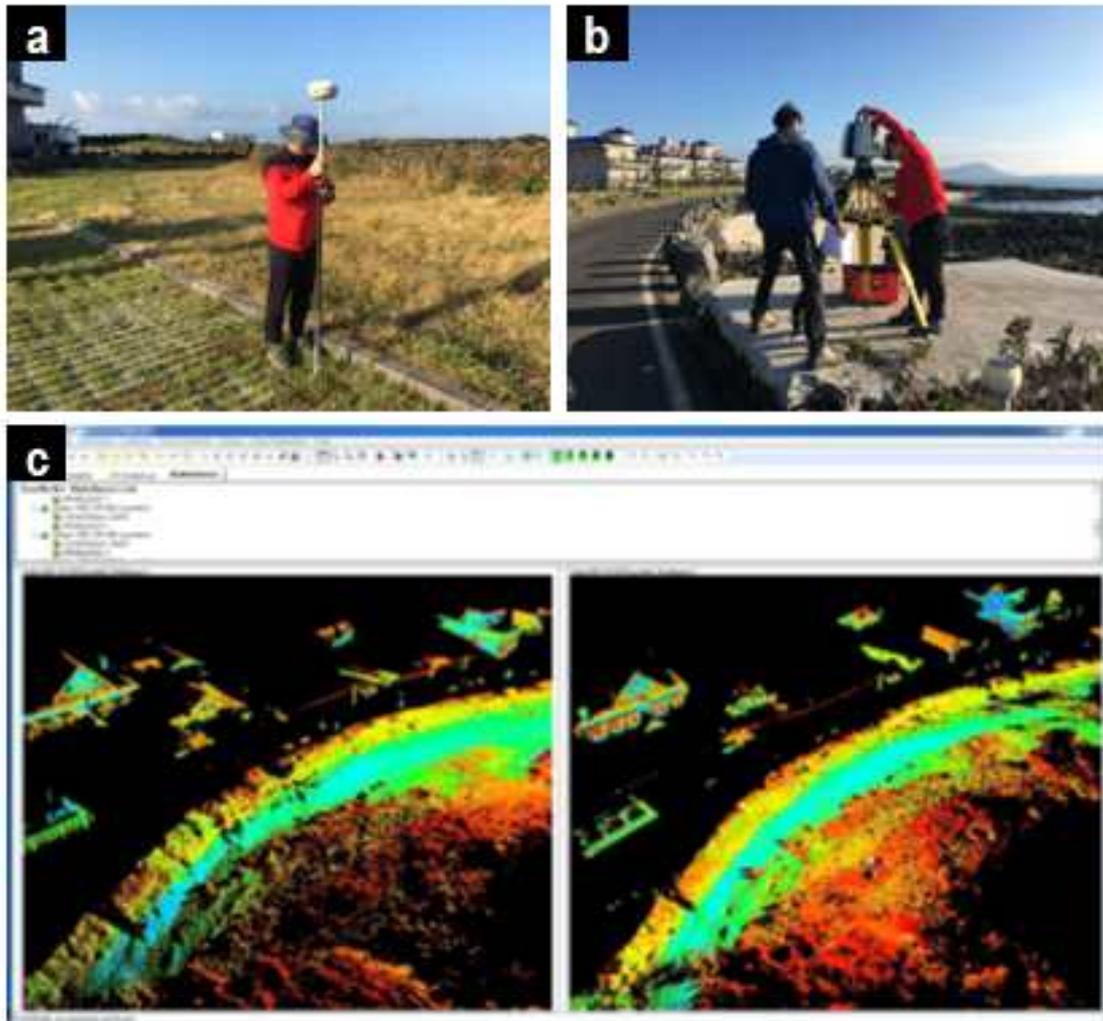


Fig. 5-3. Field work photos of terrestrial LiDAR scanning (a and b), and snap shots of data processing (registration) by Cyclone v.9.1.5 (c).

Table 5-2. Coordinates of the ground control points measured by Trimble R2 GNSS (LiDAR survey).

Code	Latitude (E)	Longitude (N)	Z (m)	Code	Latitude (E)	Longitude (N)	Z (m)	GCP location
WD01	126°56'29.14"	33°30'21.86"	4.08	WD26	126°56'36.50"	33°30'07.68"	5.44	
WD02	126°56'29.81"	33°30'21.57"	4.17	WD27	126°56'36.51"	33°30'06.85"	4.75	
WD03	126°56'29.54"	33°30'20.46"	1.65	WD28	126°56'36.37"	33°30'06.47"	4.19	
WD04	126°56'29.62"	33°30'20.23"	1.70	WD29	126°56'36.37"	33°30'05.24"	2.09	
WD05	126°56'30.12"	33°30'20.37"	3.10	WD30	126°56'36.72"	33°30'05.21"	2.04	
WD06	126°56'30.35"	33°30'19.35"	3.62	WD31	126°56'34.73"	33°30'04.89"	1.39	
WD07	126°56'30.39"	33°30'18.90"	3.69	WD32	126°56'34.82"	33°30'04.68"	1.33	
WD08	126°56'29.44"	33°30'16.97"	3.87	WD33	126°56'35.37"	33°30'04.47"	0.87	
WD09	126°56'29.31"	33°30'16.59"	3.90	WD34	126°56'36.40"	33°30'03.93"	3.32	
WD10	126°56'29.56"	33°30'15.95"	3.94	WD35	126°56'36.86"	33°30'03.38"	3.46	
WD11	126°56'29.82"	33°30'15.39"	3.80	WD36	126°56'37.38"	33°30'02.79"	3.03	
WD12	126°56'29.83"	33°30'15.03"	3.48	WD37	126°56'37.31"	33°30'01.98"	3.06	
WD13	126°56'30.34"	33°30'13.36"	3.93	WD38	126°56'36.66"	33°30'00.96"	1.65	
WD14	126°56'30.77"	33°30'12.90"	3.92	WD39	126°56'37.44"	33°30'01.08"	3.20	
WD15	126°56'30.50"	33°30'12.69"	1.80	WD40	126°56'37.81"	33°30'00.11"	4.71	
WD16	126°56'31.26"	33°30'12.20"	2.81	WD41	126°56'37.98"	33°29'59.69"	4.90	
WD17	126°56'32.17"	33°30'12.37"	4.95	WD42	126°56'37.88"	33°29'58.57"	2.88	
WD18	126°56'33.11"	33°30'12.12"	6.61	WD43	126°56'38.24"	33°29'58.55"	4.27	
WD19	126°56'34.29"	33°30'11.49"	6.31	WD44	126°56'38.49"	33°29'57.45"	3.59	
WD20	126°56'34.58"	33°30'11.11"	6.26	WD45	126°56'38.56"	33°29'57.16"	3.56	
WD21	126°56'35.15"	33°30'10.41"	6.14	WD46	126°56'38.66"	33°29'55.86"	4.40	
WD22	126°56'35.29"	33°30'10.21"	6.13	WD47	126°56'38.39"	33°29'55.79"	4.44	
WD23	126°56'35.53"	33°30'09.88"	6.20	WD50	126°56'33.81"	33°30'11.51"	5.51	
WD24	126°56'36.12"	33°30'08.96"	6.19	WD51	126°56'35.89"	33°30'08.85"	3.93	
WD25	126°56'36.49"	33°30'08.10"	5.89	WD52	126°56'35.94"	33°30'08.75"	3.91	

2) 드론 영상 처리 원리

드론에서 촬영된 영상은 단일 사진으로서 이를 정사영상으로 병합하기 위해서는 크기와 회전이 불변하는 특징점을 추출하여 매칭을 하여야 하며 축 공간(Scale space)에서의 특징점 주변의 모양 변화에 대한 경향성을 파악 후 일치하는 공간에 대한 병합을 실시한다. SIFT(Scale Invariant feature Transform) 방식은 사진영상에서 영상과 영상을 매칭시키는 경우 사용되는 가장 일반적인 방법으로 이미지에서 발견된 특징점들을 정합하는 원리이다(Lowe, 2004; Brown and Lowe, 2007). 위 방식은 사진을 자동으로 정합하는게 가능하고, 영상의 크기, 노이즈 영향에도 일정한 정합 성능을 유지하고 있어 비행 특성상 흔들림이 많은 드론에서 획득한 사진 영상 정합에 적합하다(Kwon et al., 2020).

SfM(Structure from motion)은 여러 방향에 찍은 수많은 촬영사진으로부터 점군(point cloud) 데이터를 생성하여 3차원 데이터를 구축하는 방법으로 여러시점에서 촬영된 2D 영상으로부터 3차원 구조를 복원하는 방법이다(Westoby et al., 2012). 드론에서 촬영된 영상은 카메라 종류, 영상크기, 초점거리, GPS 등의 각종 정보가 저장되어 있으며, 영상 처리 프로그램은 위 정보를 기초로 하여 많은 수의 사진을 빠른시간에 처리할 수 있다. 촬영 시 높은 중복도를 설정하여 많은 수의 사진이 획득되는 경우, 보정 값이 많이 생성되어 높은 정밀도의 표고지형모델을 추출할 수 있다(Kwon et al., 2020).

3) 조사 및 데이터 처리

드론을 이용하여 촬영된 영상을 정사영상 및 표고모델로 제작하기 위해서는 현장 조사를 통해 촬영 데이터를 취득하고 이를 기초로 하여 SIFT 및 SfM 알고리즘으로 개발된 프로그램을 이용한 데이터 분석을 실시하여야 한다. 최근 기술발전으로 SfM기법을 적용하여 3차원 입체모델을 만들어주는 소프트웨어들이 많이 개발되어 있다(Hayakawa and Obanawa, 2020).

드론을 이용한 해빈 영상촬영을 실시하기 위하여 우도 홍조단괴 해빈을 대상으로 촬영시기(월별)마다 동일한 범위를 촬영하기 위하여 비행범위 및 경로 등을 미리 설정하여 자동비행을 실시하였다. 본 연구에서는 Pix4D사의 'Pix4D mapper' 어플리케이션을 이용하여 촬영 범위는 홍조단괴 해빈 지역 전체로 길이 1,000 m, 폭 200~300 m로 설정하였으며, 촬영 고도를 60m에서 120m로 설정하여 해상도 1.25

cm/pixel의 정밀 영상을 촬영하였다. 촬영 조건은 드론 속도를 4 m/s, 사진 중첩비율(중중복도, 횡중복도)은 80%, 카메라 각도는 90°로 설정하였다. 드론을 이용한 해빈 촬영 시간은 배터리 1개당 비행시간이 25분 내로 제한적이기 때문에 구역별(총 4개 구역)로 1회, 총 4회에 걸쳐 1시간 동안 촬영하였으며, 1회 조사에서 사진은 870 여장이 취득되었다. 조사시기는 매월 대조기 간조시기를 대상으로 실시하였으며, 최대 간조시간 30분 전 촬영을 시작함으로써 파랑의 영향이 최소가 될 수 있도록 무인항공측량을 실시하였다(Fig. 5-4a).

일반적으로 드론에서 촬영된 사진은 위치정보가 기록되지만, 정확도가 낮은 편으로서 드론을 이용한 사진으로 지형정보를 생성하는 경우 정확도가 매우 낮다. 사진상에 기록된 좌표계를 실제 도면상 지도 좌표로 변환을 위하여 지상기준점 설치 및 측량작업이 선행 되어야 한다. 기준점 선정에서의 중요한 원칙은 촬영지역을 중심으로 격자형태로 선정되어야 하지만 해빈 특성상 격자형 기준점 선정이 어려운 실정으로 이를 해결하기 위하여 해안에 노출된 기반암을 선정하였다. 기준점은 정사영상을 제작하기 위하여 호안을 따라 18개 지점, 위치 변동이 없는 해안에 노출된 기반암 16개 지점 등 총 34개의 기준점을 설정하였다(Table 5-3). 지상기준점 측량은 GINTEC 사의 F90 모델을 사용하였으며, RTK 측량에서는 수평 8 mm + 1.0 ppm, 수직 15 mm + 2.0 ppm, 정지 측량에서는 수평 2 mm + 0.5 ppm, 수직 3 mm + 0.5 ppm의 위치 정밀도를 보인다(Fig. 5-4b).

현장조사에서 취득된 사진은 촬영 당시의 각종 데이터(위치정보, 카메라 속성 정보, IMU 정보 등)가 저장되어 있으며, 이를 기초로 DSM(Digital Surface Model) 및 정사영상(Orthoimage)으로 제작하기 위해 'Pix4Dmapper' 프로그램을 이용하였다.

조사시기별로 촬영된 사진은 프로그램에서 불러 온 뒤, 속성 데이터를 기초로 정렬(align)단계를 거쳐야 접합점(tie point)을 찾아 희소점군(sparse point cloud)을 생성 뒤 3D 점을 생성한다(Kwon et al., 2020; Fig. 5-5c). 상호표정이 끝난 희소점군(sparse point cloud)은 GCP(Ground Control Point) 좌표정보를 이용하여 최적화(optimize)를 통해 절대표정을 실시하여야 하는데, 이는 GCP가 확인되는 공간에 연구자가 직접 좌표를 입력하여 보정하는 과정으로, 최적화를 통해 이루어진 각각의 점에는 정확한 X, Y, Z 정보가 부여된다(Ryu et al., 2018). 최초 형성된 DSM(Digital Surface Model)에서는 인공구조물(천막), 사람, 파랑 등으로 형성된 점들이 포함되어 있어 이를 제거 후 최종적으로 DSM(Digital Surface Model) 및 정사영상(Orthoimage)을 도출할 수 있다(Fig. 5-5d, e).

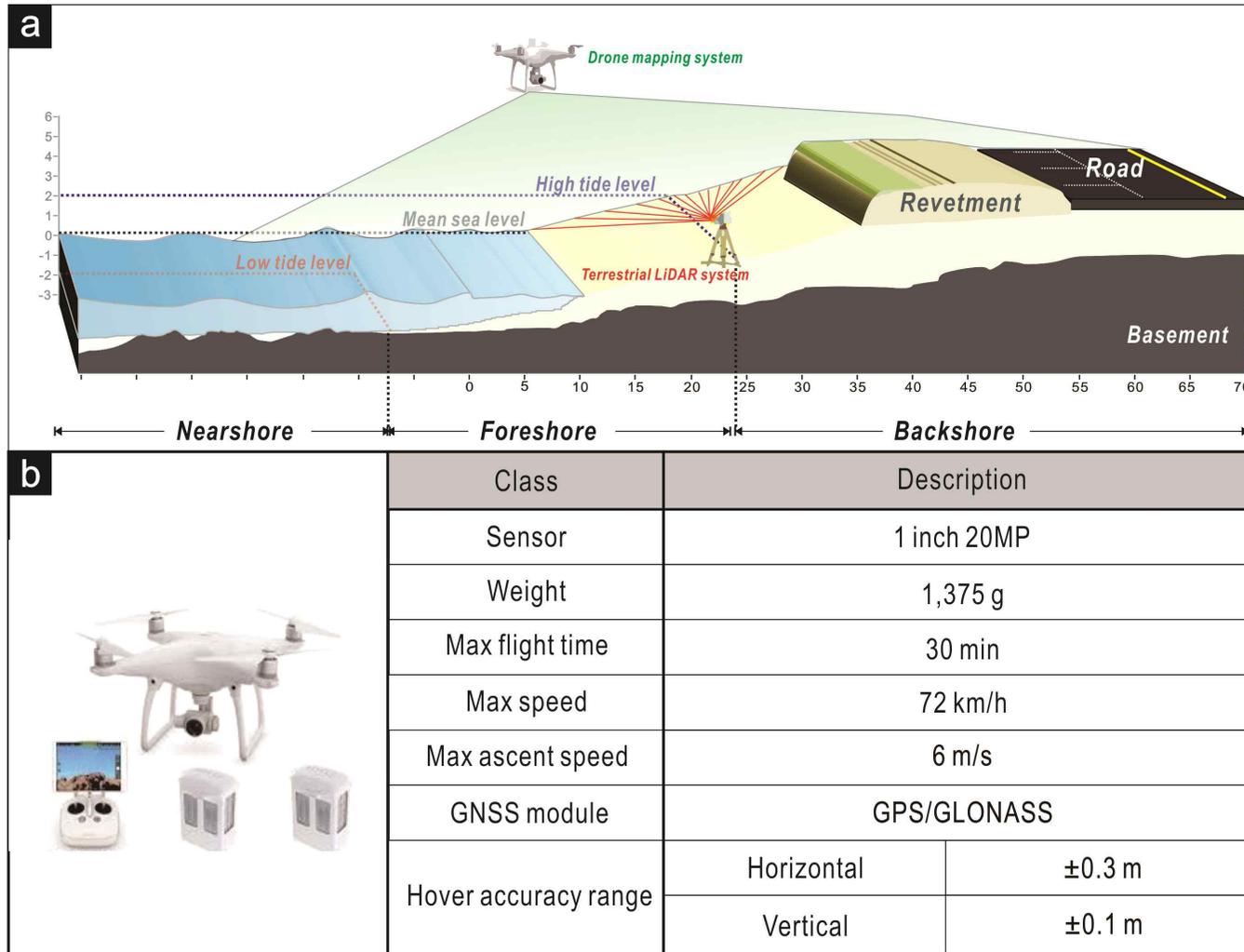


Fig. 5-4. (a) Diagram showing survey ranges of the terrestrial LiDAR scanning (red line) and Drone mapping. (b) Photo and specification of the drone system (Phantom 4 pro V2.0).

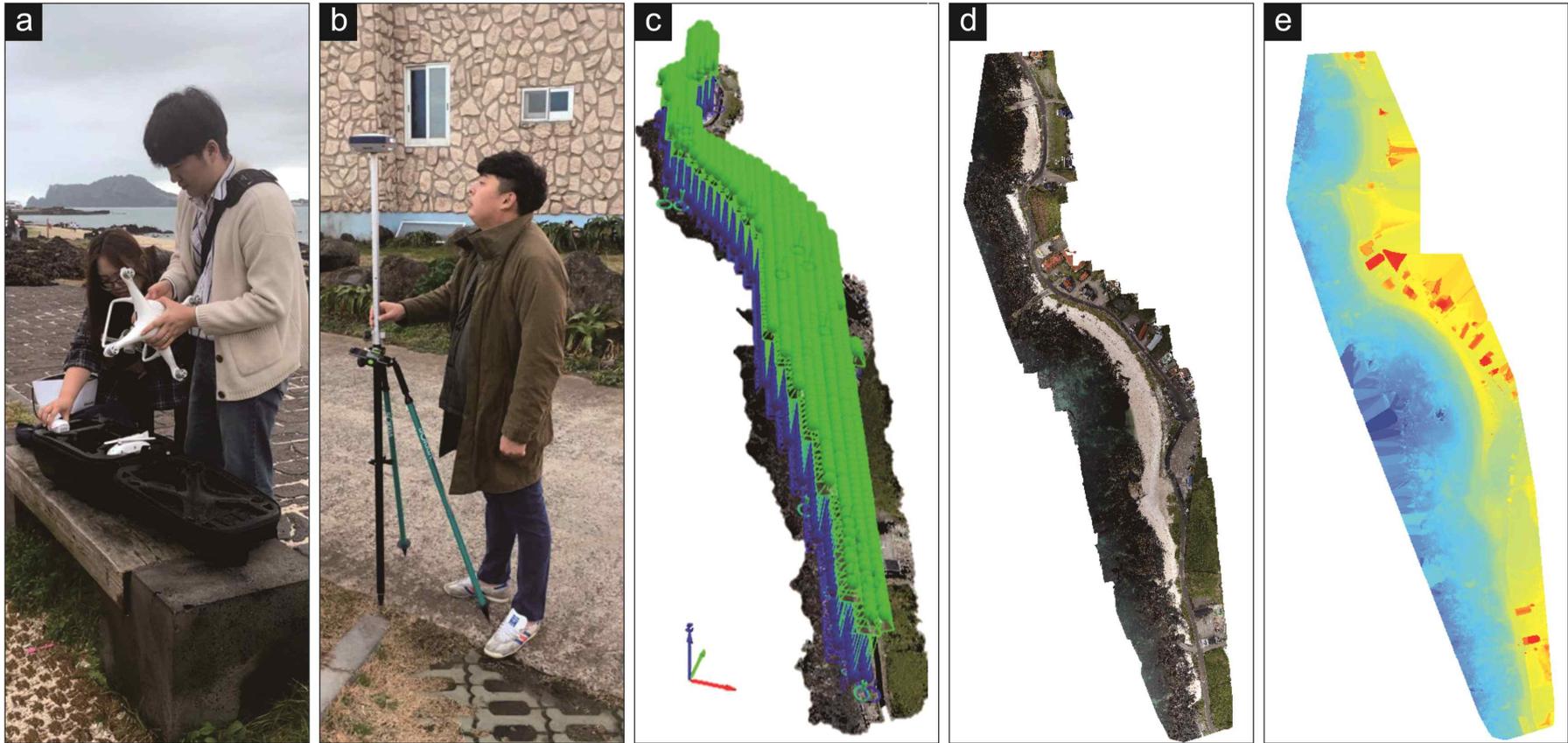


Fig. 5-5. Field work photos of drone mapping (a and b), and raw data: mapping process image (c), orthoimage data (d), and DSM (Digital Surface Model) data (e).

Table 5-3. Coordinates of the ground control points that measured by GINTEC F90 GNSS (Drone survey).

Code	Latitude (E)	Longitude (N)	Z (m)	Code	Latitude (E)	Longitude (N)	Z (m)	GCP location
D01	126°56'29.14'''	33°30'21.86'''	1.42	D18	126°56'38.39'''	33°29'55.79'''	3.36	
D02	126°56'29.67'''	33°30'21.23'''	0.70	D19	126°56'38.66'''	33°29'55.86'''	0.86	
D03	126°56'29.55'''	33°30'20.24'''	3.29	D20	126°56'36.56'''	33°30'00.22'''	3.16	
D04	126°56'29.32'''	33°30'16.79'''	4.18	D21	126°56'34.67'''	33°30'05.00'''	0.87	
D05	126°56'29.59'''	33°30'15.88'''	3.75	D22	126°56'34.70'''	33°30'09.26'''	0.94	
D06	126°56'29.80'''	33°30'14.59'''	0.92	D23	126°56'29.56'''	33°30'14.46'''	4.69	
D07	126°56'30.07'''	33°30'13.72'''	4.04	D24	126°56'30.38'''	33°30'18.85'''	3.75	
D08	126°56'31.12'''	33°30'12.69'''	1.23	R01	126°56'38.53'''	33°29'58.61'''	1.02	
D09	126°56'33.03'''	33°30'12.14'''	1.26	R02	126°56'29.06'''	33°30'16.48'''	1.26	
D10	126°56'35.18'''	33°30'10.44'''	4.04	R03	126°56'38.03'''	33°29'56.36'''	1.50	
D11	126°56'35.67'''	33°30'09.69'''	1.24	R04	126°56'37.49'''	33°29'58.06'''	1.74	
D12	126°56'36.51'''	33°30'06.84'''	1.24	R05	126°56'37.76'''	33°29'57.24'''	4.19	
D13	126°56'35.36'''	33°30'04.51'''	4.05	R06	126°56'28.91'''	33°30'21.54'''	3.37	
D14	126°56'37.80'''	33°30'00.10'''	1.03	R07	126°56'28.76'''	33°30'17.15'''	1.64	
D15	126°56'38.04'''	33°29'59.46'''	3.58	R08	126°56'29.10'''	33°30'15.65'''	3.97	
D16	126°56'37.97'''	33°29'58.52'''	6.08	R09	126°56'28.77'''	33°30'16.14'''	4.07	
D17	126°56'38.47'''	33°29'57.45'''	4.42	R10	126°56'29.47'''	33°30'11.79'''	3.43	

5.2.4 해빈 지형 및 면적 분석 방법

1) 해빈 지형 분석 방법

해빈 지형 자료는 지상 라이더 측량 및 무인항공 측량을 통해 획득된 3차원 점군 데이터를 이용하였으며(Fig. 5-6a), 취득된 점군 데이터는 'Arc GIS 10.8' 공간분석 도구인 내삽법(Interpolation)을 이용하여 10 cm 해상도의 표고지형 모델(DEM : Digital Elevation Model)을 생성하였다(Fig. 5-6b, c). 생성된 표고지형모델(DEM)은 고도변화 분석, 단면분석, 면적분석(해안선 변화 분석), 부피 및 면적을 이용한 퇴적 및 침식량을 분석하였다. 분석 공간범위는 해빈 해안선에서 호안까지 설정하였으며, 부피 및 면적 계산을 위해 해안선은 평균해수면(고도 0 m)을 기준으로 변화를 분석하였다. 계절에 따른 지형변화 파악을 위하여 생성된 표고지형모델(DEM)을 중첩시켜 상대적인 고도 변화를 계산하였으며, 이를 위해 공간분석 도구인 'Raster minus'를 이용하여 지형변화를 분석하였다(Fig. 5-6d, e).

2) 해빈 면적 분석 방법

일반적으로 해빈 지형변화를 분석하기 위해 미국 USGS에서 개발한 해안선 분석프로그램 DSAS 프로그램을 이용하여 해안선에서 호안(호안이 없는 경우 후안 경계 설정)까지의 임의적 측선 생성 후, 해안선의 전진 및 후퇴 거리 계산을 통해 각 구간별로 다음과 같은 지표를 취득할 수 있다(Thieler et al., 2009).

- ① 최대 해안선 변화량(SCE: Shoreline Change Envelope): 각 측선에서 가장 최극값의 두 해안선 사이의 거리를 계산한 값으로서 최대 변화폭을 나타낸다.
- ② 순 해안선 변화량(NSM: Net Shoreline Movement): 가장 오래된 과거자료에서의 해안선과 최근 자료에서의 해안선 사이의 변화량으로서 총 조사기간 동안의 순수한 전진 및 후퇴 거리를 나타낸다.
- ③ 연간 해안선변화율(EPR: End Point Rate): 가장 오래된 과거 자료에서의 해안선과 최근 자료에서의 해안선 사이의 거리를 시간 간격으로 나누어 계산한 것으로서 연간 평균 변화량을 나타낸다.

홍조단괴 해빈은 홍조단괴 퇴적물로 구성되어 있는 희소성으로 퇴적물 유실여부가 천연기념물 관리분야에서 중요한 사안임과 더불어 화산암반으로 이루어져 용암류 돌출부 사이에 해빈이 소규모로 발달되어 있기 때문에 정량적인 퇴적물의 분포 면적을 파악하는 것이 중요하다.

드론을 이용하여 얻어진 자료는 이미지 자료로서 연구지역 내 지형지물, 식생 등 다양한 정보를 포함한다. 취득된 디지털이미지는 픽셀 단위로 구성되어 각각 위치 정보와 R(빨강)G(초록)B(파랑) 분광특성(데이터 범위 : 0~255)이 기록되어 있어 (Fig. 5-7a, b), 사용자에게 필요한 정보(홍조단괴 해빈 면적)를 추출하기 위하여 구별되는 특징(색상 차)을 이용한 영상분류를 실시하여야 한다. 영상분류(image classification)는 영상 내의 비슷한 특징을 가진 픽셀들을 하나의 군집으로 분류하여 영상전체를 특정 객체 군집으로 구분하는 과정으로서 무감독분류와 감독분류로 구분된다. 무감독분류는 표본집단과 같은 사전정보가 없이 영상을 구성하는 화소값의 공간적, 분광특성을 이용하여 분류하는 기법으로 분류결과의 정확성이 유동적이며 편차가 크다. 이와 반대로 감독분류는 영상을 구성하는 화소 중 비슷한 분광특성을 갖는 픽셀들을 집단화하는 분류방법으로서 사용자가 분광특성을 정확히 인지하고 있을 때 사용되어 분류 정확성이 높다(Jeon and Kim, 2003). 본 연구에서는 홍조단괴 해빈 퇴적물의 분포 범위와 면적을 산출하기 위하여 감독분류(최대우도분류법)기법을 적용하였으며, 홍조단괴 해빈의 지형구분 정확성을 높이기 위하여 영상분석 범위를 홍조단괴 해빈 호안-연안으로 한정하여 영상분류를 실시하였다. 우도 홍조단괴 해빈 정사영상에서 분광특성이 뚜렷하게 구분되는 지형은 홍조단괴 퇴적물, 조하대 해빈퇴적물, 기반암(현무암), 사구이며, 홍조단괴 퇴적물은 백색 계열로 RGB(250) 분광특성, 조하대 해빈퇴적물은 R(169), G(212), B(208), 기반암은 RGB(117), 사구는 모래와 식물들이 혼재되어 있어 R(170), G(170), B(122)로 나타나며, 각 지형을 학습된 분광특성을 기반으로 구분할 수 있다(Fig. 5-3c, d, e). 위와 같이 사전훈련된 분광특성 자료는 감독분류 시스템에 입력하고 위 자료를 기초로 퇴적물 분포범위와 면적을 산출하였다.

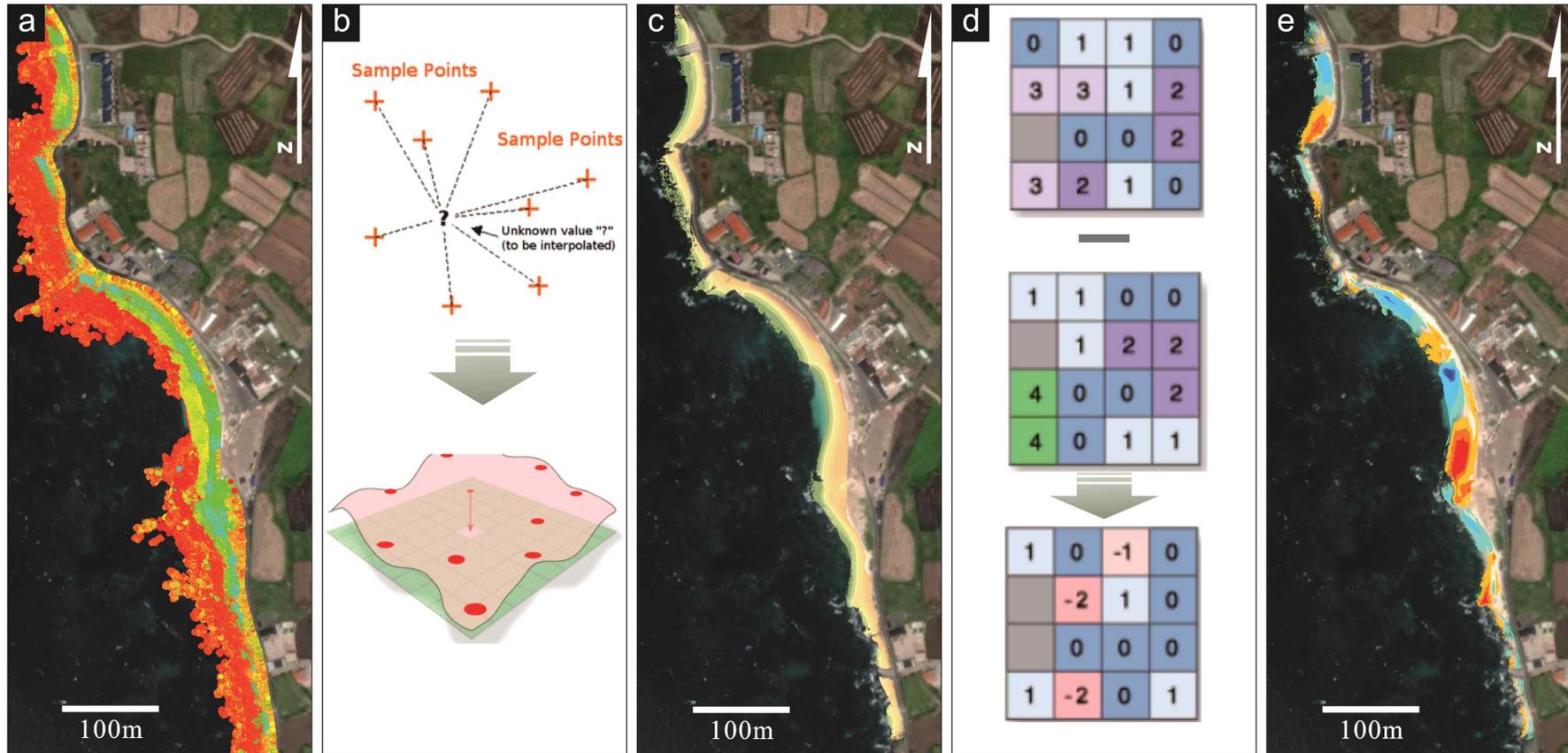


Fig. 5-6. GIS modelling for topographic change of the Udo Beach. (a) A float from LiDAR survey point in ArcGIS. (b) An example of interpolation of a geologically correct raster surface from point data. (c) Creating DEM from Lidar survey point. (d) Calculating raster data from before and after elevation data. (e) Result of morphological change in the Udo Rhodolith Beach.

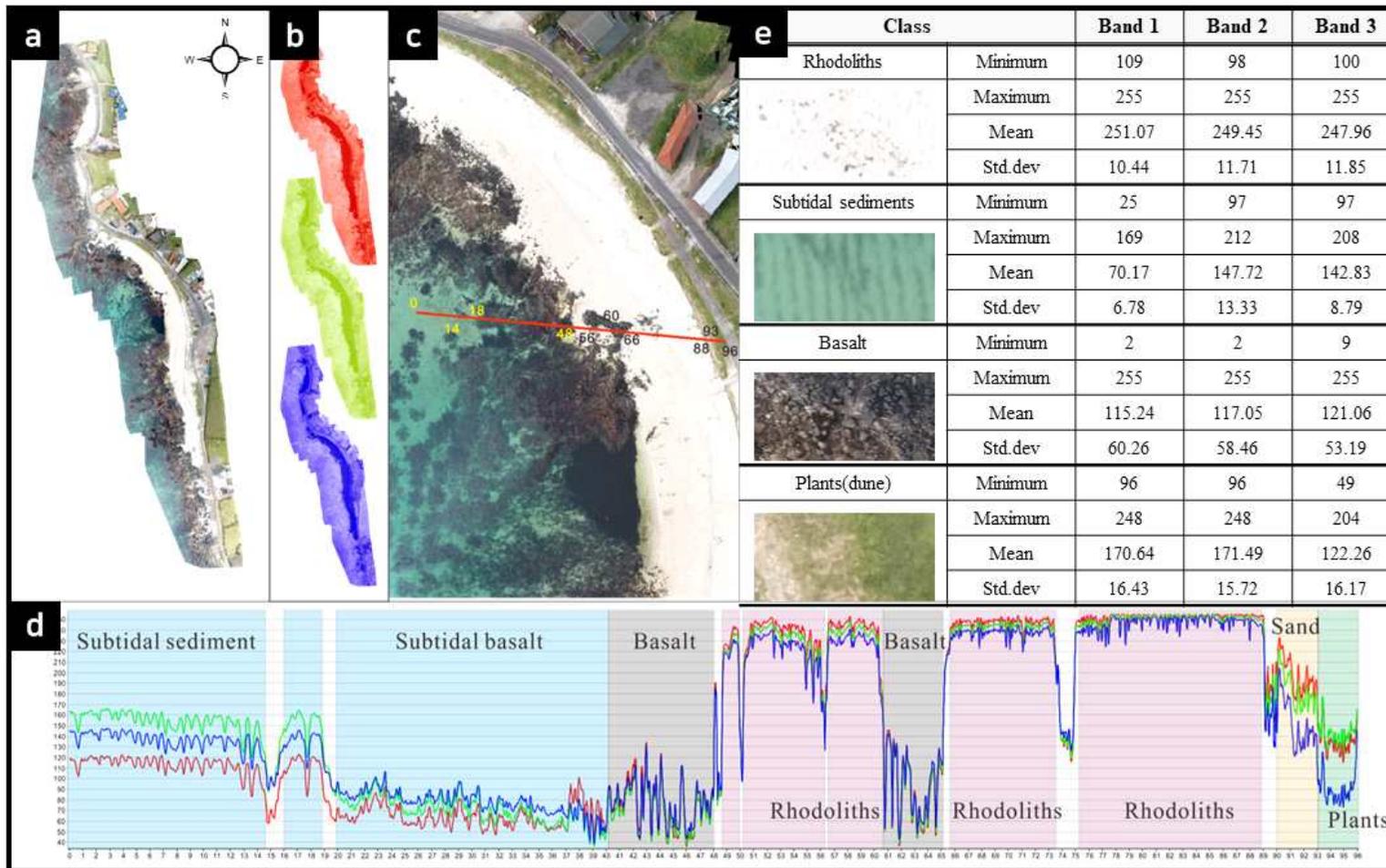


Fig 5-7. Analysis of spectral characteristics in the Udo Rhodolith Beach. (a) Orthoimage of the entire area. (b) RGB image decomposition on the orthoimage. (c) Spectral properties of surface materials in the beach. (d) Wavelength of different types of beach materials depending on distance. (e) Spectral reflectance of the subdivision topography (rhodolith, subtidal sediments, basalt, plants).

5.3 해빈 규모 변화

5.3.1 라이다 측량을 이용한 해빈 부피 및 면적 변화

1) 2016-2017년 지형변화

2016-2017년 지형조사는 2016년 9월 추계조사를 시작으로 태풍 후(2016년 10월), 추계(2016년 11월), 동계(2017년 2월), 춘계(2017년 5월) 총 5회 실시하였다(Fig. 5-8).

(1) 태풍 내습 후 변화(1-2차 비교)

태풍 차바 내습 후 2016년 10월 17일에 실시된 라이다 2차 측량에서는 홍조단괴 해빈의 부피가 이전 조사(2016년 9월 20일)에 비해 2.0% 정도 증가한 것으로 나타났으며, 총면적은 크게 변화하지 않았다(Table 5-4, 5-5). 구역별로 보면 1, 2구역에서는 부피와 면적이 모두 감소하였고, 반면에 3, 4구역에서는 모두 증가하였다. 특히 4구역에서 4.6%의 부피 증가가 나타났다. 이로 보아, 태풍 시기에 해빈 퇴적물은 주로 북부에서 남부로 이동된 것으로 해석되며, 이와 함께 연안역으로부터의 추가적인 퇴적물 유입으로 총부피가 증가된 것으로 추정된다. 해빈 내에서 세부적인 지형변화를 보면, 각 구역의 후안이나 전안 상단부 및 남북 경계부에서 퇴적이 집중되는 경향이 나타나며, 퇴적물 유실은 각 구역 중심부의 전안에서 우세하게 나타남을 인지할 수 있다(Fig. 5-9a). 이러한 경향은 해빈 부피의 감소나 증가에 관계 없이 거의 모든 구역에서 유사하게 나타난다.

(2) 태풍 후-추계 변화(2-3차 비교)

2016년 10월 17일에 실시된 2차 조사 후 약 한 달 만에 실시된 3차 조사(2016년 11월 14일)에서는 홍조단괴 해빈의 총부피와 총면적이 거의 변화되지 않고 유지된 것으로 나타났다(Table 5-4, 5-5). 이 기간 동안 뚜렷한 침식이나 퇴적 우세 지역은 거의 없으며, 해빈 전안 전단부에 분포하는 기반암 사이의 해빈 퇴적물에서만 0.1 m 이상의 변화가 나타난다(Fig. 5-9b). 해빈 퇴적물 분포지역에서는 0.1 m 이하로 미약한 변화를 보이고 있으며, 이를 통해 태풍 후 변화되었던 해빈 지형이 변화되지 않은 채 유지된 것으로 판단된다.

(3) 추계-동계 변화(3-4차 비교)

2016년 11월 14일에 실시된 3차 조사와 이후 약 3개월 만에 실시된 4차 조사(2017년 2월 27일)의 비교 결과는 동계를 대표한다고 할 수 있는데, 이 기간 동안

홍조단괴 해빈의 총부피는 3.5% 정도 감소하였으나 총면적은 크게 변화하지 않았다(Table 5-4, 5-5).

해빈의 부피 감소는 모든 구역에서 나타났으며, 면적은 1구역에서 증가하였는데, 이는 해빈 퇴적물이 외해로 유실되는 과정에서 일부 퇴적물이 해안선 근처 노출된 기반암 사이에 잔류된 결과로 추정된다(Table 5-4, 5-5).

해빈 퇴적물의 유실은 최대 1.5 m 두께에 달하며, 각 구역의 북쪽 부분이나 남쪽 경계부 일부를 제외한 전 지역에서 침식이 우세한 경향이 있다(2구역과 4구역의 남쪽 부분은 예외). 반면에 퇴적물 집적부는 해빈 각 구역의 남쪽에 집중되며, 최대 집적 높이도 침식부에서와 유사하게 1.0 m 이상으로 나타난다(Fig. 5-9c). 특히, 퇴적물 유실은 전안보다는 후안에서 더 우세하게 나타나는 경향이 있으며, 퇴적은 전안의 상단부와 일부 후안에 더 집중되는 것으로 보인다.

(4) 동계-춘계 변화(4-5차 비교)

2017년 2월 27일에 실시된 4차 조사 이후 약 2.5개월 만에 실시된 5차 조사(2017년 5월 12일)에서는 이전 조사에 비해 홍조단괴 해빈의 총부피는 0.9%, 총면적은 0.9% 감소한 것으로 나타나서(Table 5-4, 5-5) 동계의 해빈 유실이 춘계에도 계속되었음을 알 수 있다. 구역별로 보면, 2구역을 제외한 모든 구역에서 면적은 감소한 반면 1, 3구역에서는 부피가 감소하였다. 2구역에서는 면적은 감소 하였지만 부피는 증가한 것으로 나타나 이는 동계와 반대되는 양상이다.

세부적인 지형변화를 보면 침식부와 퇴적부의 분포는 동계자료 분석결과와 대체로 반대로 나타나는 것으로 보인다. 즉, 각 해빈 구역의 남쪽 부분에서는 미약하지만 침식이 우세하고 북쪽 부분에서는 퇴적이 더 뚜렷하게 나타나는 경향을 보인다(Fig. 5-9d). 따라서 전체 해빈 부피는 감소하였지만, 국지적으로는 동계에 유실되었던 해빈구역은 부분적으로나마 복원이 진행되었고, 동계에 퇴적이 우세하게 일어났던 곳은 퇴적물이 유실되면서 평탄화가 이루어진 것으로 보인다.

(5) 전 기간 해빈 규모 변화(1-5차 비교)

2016-2017년도 조사기간(2016년 9월 20일~2017년 5월 12일) 동안에 홍조단괴 해빈의 총부피는 0.9% 정도 감소하였는데, 세부구역별로 보면 1구역은 0.3% 감소, 2구역은 0.5% 증가, 3구역은 2.2% 감소, 4구역에서는 0.7%의 미약한 증가가 나타났다(Table 5-5; Fig. 5-9e). 한편, 해빈의 면적은 1구역과 2구역에서 전안 부분이 축소되면서 조사기간 동안 총면적은 0.9% 감소한 것으로 측정되었다(Table 5-4).

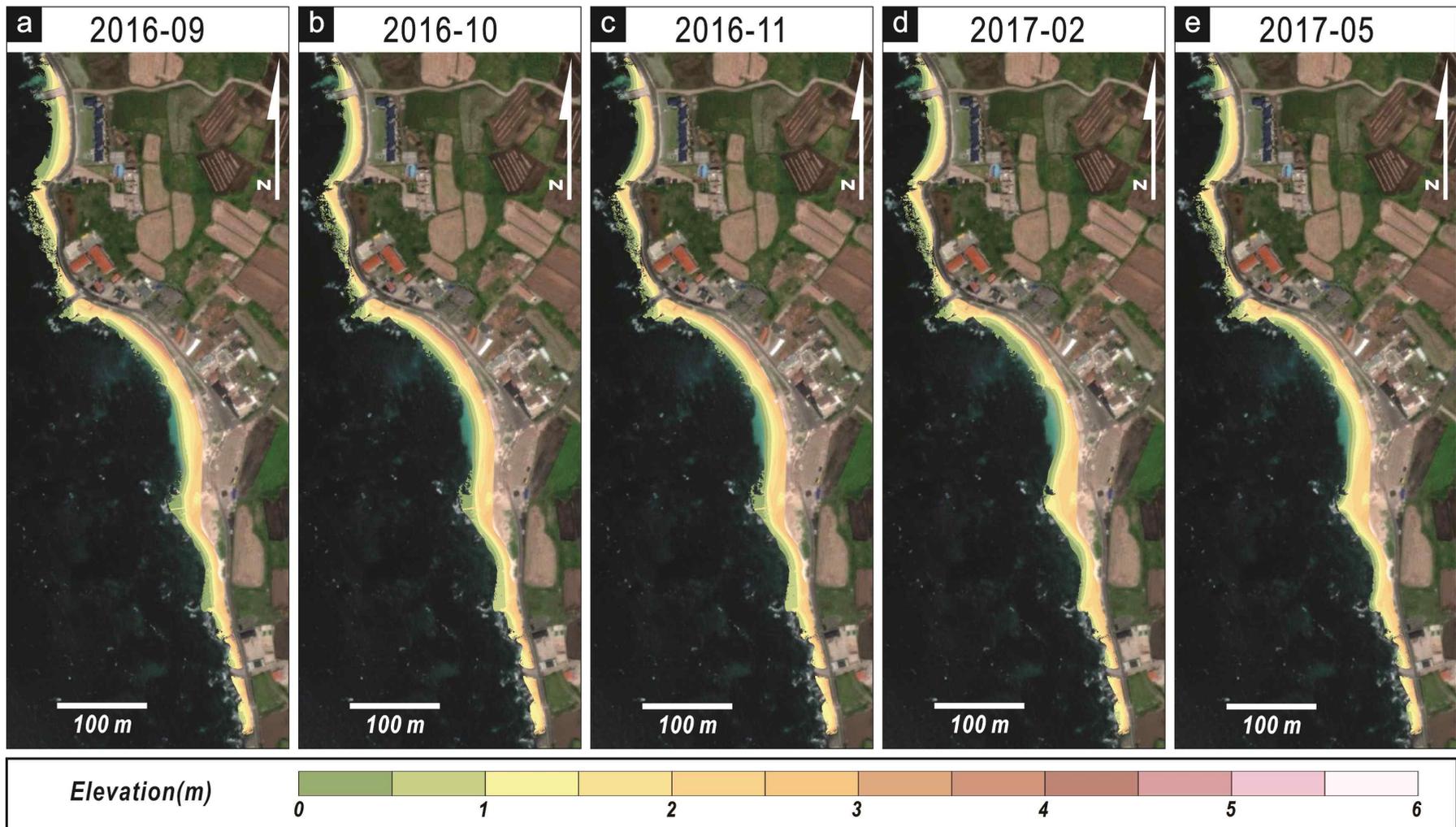


Fig. 5-8. LiDAR-based digital elevation maps of the Udo Rhodolith Beach from Sep. 2016 to May 2017 (basemap from ArcGIS online basemap).

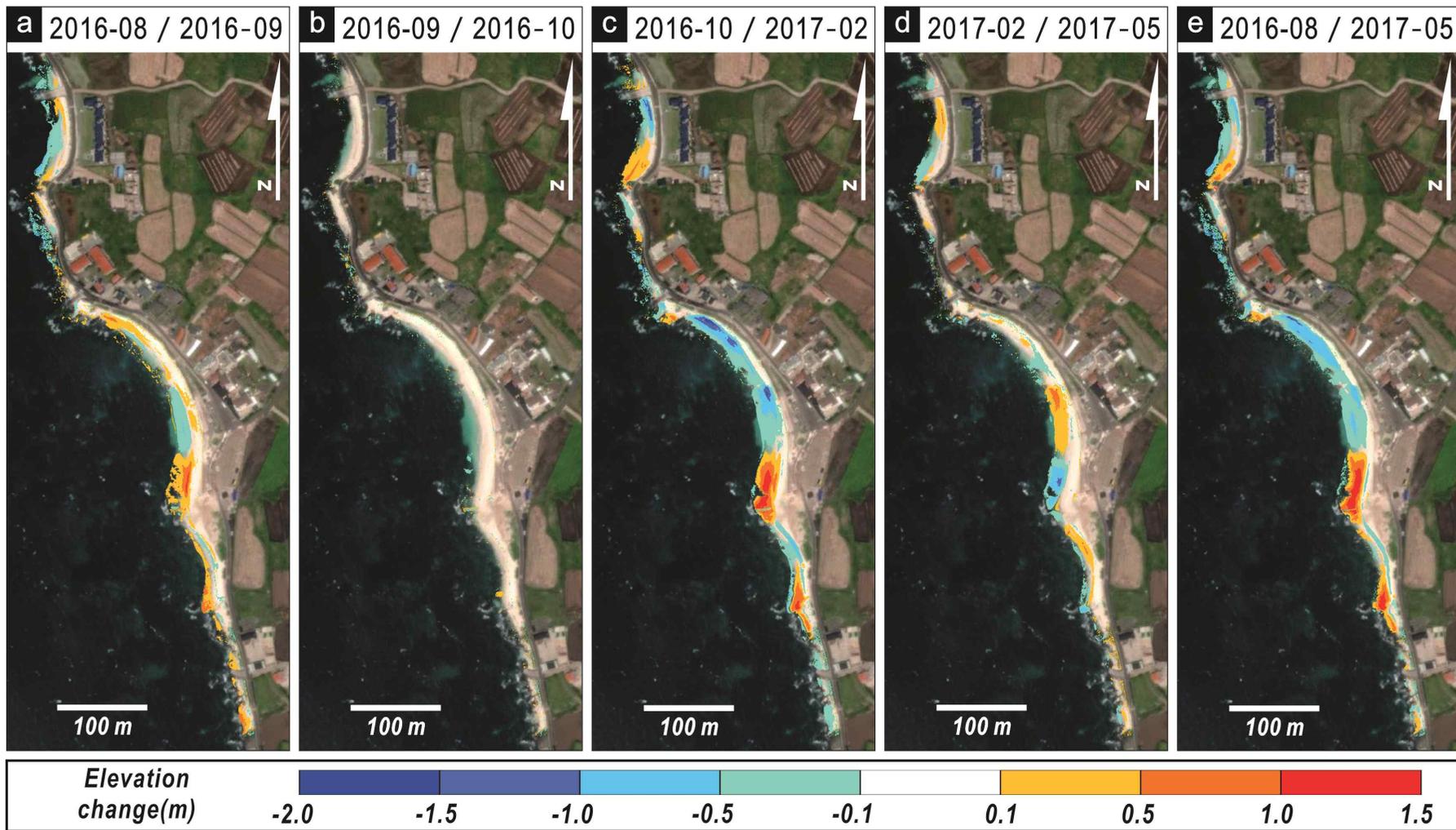


Fig. 5-9. Inter-seasonal elevation changes of the Udo Rhodolith Beach from Sep. 2016 to May 2017. Bluish and reddish colors denote eroded and aggraded areas, respectively.

2) 2018-2019년 지형변화

2018-2019년 지형조사는 2017년 조사가 이후 약 1년 2개월 후에 실시되었으며, 2018년 7월 하계조사를 시작으로 태풍 후(2018년 9월), 추계(2018년 10월), 동계(2019년 2월), 춘계(2019년 4월) 총 5회 실시하였다(Fig. 5-10). 다만, 동계 자료 분석결과, 1, 2구역에서 자료 오차가 다소 발생함에 따라 분석결과의 신뢰성을 위해 이를 제외하였다.

(1) 1-2차 비교: 하계 태풍 내습 후 변화

태풍 솔릭 내습 후 실시된 라이다 측량에서는 홍조단괴 해빈의 총부피가 이전 조사에 비해 1.4% 정도 감소한 것으로 나타났다(Table 5-5). 전체적으로 보면 태풍 내습 기간에 1, 2, 4구역에서는 각각 4.6%, 1.0%, 9.6%의 감소가 발생하였고, 반면에 3구역의 해빈 부피는 4.6% 증가 된 것으로 나타났다. 따라서 전체 해빈의 부피 감소는 주로 1구역 남부와 4구역 전반에 걸쳐 일어난 퇴적물 유실로 인한 것으로 보이며, 이와는 대조적으로 3구역의 북부에서는 최대 1.5 m 이상의 해빈고도 상승을 동반한 퇴적물 유입이 일어났다(Table 5-5).

퇴적은 1구역, 3구역 북쪽구간에 집중되는 경향이 나타나며, 남쪽구간은 전반적으로 침식이 발생하였으며, 4구역에서는 모든 구간이 침식 현상이 인지되었다(Fig. 5-11a). 한편, 해빈의 총면적은 부피와 마찬가지로 1.8%의 감소를 보였는데, 구역별로 보면 1구역에서 7.7%의 축소가 일어난 반면 그 외의 구역들은 크게 변화되지 않았다(Table 5-2).

(2) 2-3차 비교: 추계 변화

2차 조사 후 약 두 달 만에 실시된 3차 조사에서는 홍조단괴 해빈의 총부피는 변화가 없었고, 부피도 미약한 변화만이 인지되었다(Table 5-4, 5-5). 구역별로 보면 해빈의 부피는 1구역과 2구역에서 거의 변화가 없었으며, 3구역에서는 2.1% 정도 증가, 4구역에서는 1.9% 정도 감소가 나타났다.

해빈의 면적은 1구역이 2.9%, 2구역이 0.8% 정도로 다소 확대되었지만 나머지 구역에서는 큰 변화가 나타나지 않았다. 지형변화를 세부적으로 보면, 이 기간 동안 1구역은 남쪽에 고도가 상승하였으며, 이는 태풍 내습 후 양상과 정반대의 퇴적-침식 양상이 발생하였다. 3구역은 북부 전안과 중앙부 전체에서 집중적인 침식이 발생하였으며, 상대적으로 북부와 북부 후안에서는 퇴적물 집적이 이루어졌다. 따라서 2018년 추계에는 해빈의 규모가 안정적으로 유지되었으며, 하계 태풍으로 변화

되었던 세부지형도 평상 환경 상태의 형태로 복원된 것으로 보인다(Fig. 5-11b).

(3) 3-4차 비교: 동계 변화

동계 조사는 추계 조사 이후 약 3개월 만에 실시되었으며, 이 기간 동안 홍조단괴 해빈 3구역과 4구역의 총부피는 이전 시기에 비해 증가하였다. 3구역에서는 남부와 전체 구역의 후안을 중심으로 퇴적물 집적이 일어나면서 부피 증가가 발생하였으나, 4구역에서는 북부 전안 부분의 퇴적물 유실로 부피 감소가 나타난다. 특히 3, 4구역 북쪽 전안 전단부에서 집중적으로 침식이 발생하였으며, 퇴적물의 유실은 최대 1.5 m 두께에 달한 반면에 퇴적물 집적은 해빈 각 구역의 남쪽에 집중되며, 최대 집적 높이도 침식부에서와 유사하게 1.0 m 이상으로 나타난다(Fig. 5-11c). 전반적으로 퇴적물 유실은 전안에서 활발히 일어났고 후안에서는 퇴적이 발생하여 해빈의 경사가 동계기간에 급하게 발달하는 경향을 보인다.

(4) 4-5차 비교: 춘계 변화

4차 조사에서는 이전 조사에 비해 3구역에서 부피가 감소하여 0.2%의 감소가 나타났으나, 해빈의 모든 구역을 포함하는 총부피는 동계와 춘계를 합산하면 +0.4%로서 거의 변화가 없었다. 3구역과 4구역에서 침식부와 퇴적부의 분포는 동계자료 분석결과와 대체로 반대로 나타나는 것으로 보인다. 즉, 전안 전단부의 퇴적이 발생하였으며, 후안 부분이 침식이 우세하였다. 따라서 동계에 유실되었던 해빈구역은 부분적으로나마 복원이 진행되었고, 동계에 퇴적이 우세하게 일어났던 곳은 퇴적물이 유실되면서 평탄화가 이루어진 것으로 보인다(Fig. 5-11d).

(5) 1-5차 비교: 전 기간 변화

2018년 7월부터 2019년 4월까지 해빈의 총부피 변화는 0.6%로 거의 변화가 없었는데, 이는 1구역과 4구역에서 각각 1.2% 감소와 3.6%의 부피 증가가 일어났음에도 불구하고, 3구역에서 해빈 부피가 0.2% 감소된 결과이다(Table 5-5). 한편 해빈의 총면적은 0.4% 정도 증가되었는데, 1구역의 급격한 지형변화가 주된 요인으로 보이며 그 외의 구역에서는 해빈 면적의 변화는 거의 나타나지 않았다(Table 5-4).

1차와 5차 조사를 비교한 침식부와 퇴적부의 분포는 주로 4구역은 침식이 우세하게 발생하였다. 1-2구역에서는 주로 북쪽구역이 침식되었으며, 반면에 남쪽구역에서는 퇴적이 일어났다. 3구역에서는 전반적으로 퇴적이 우세하지만 중앙부와 남부 후안 지역에서 퇴적물 유실이 발생하였다(Fig. 5-11e).

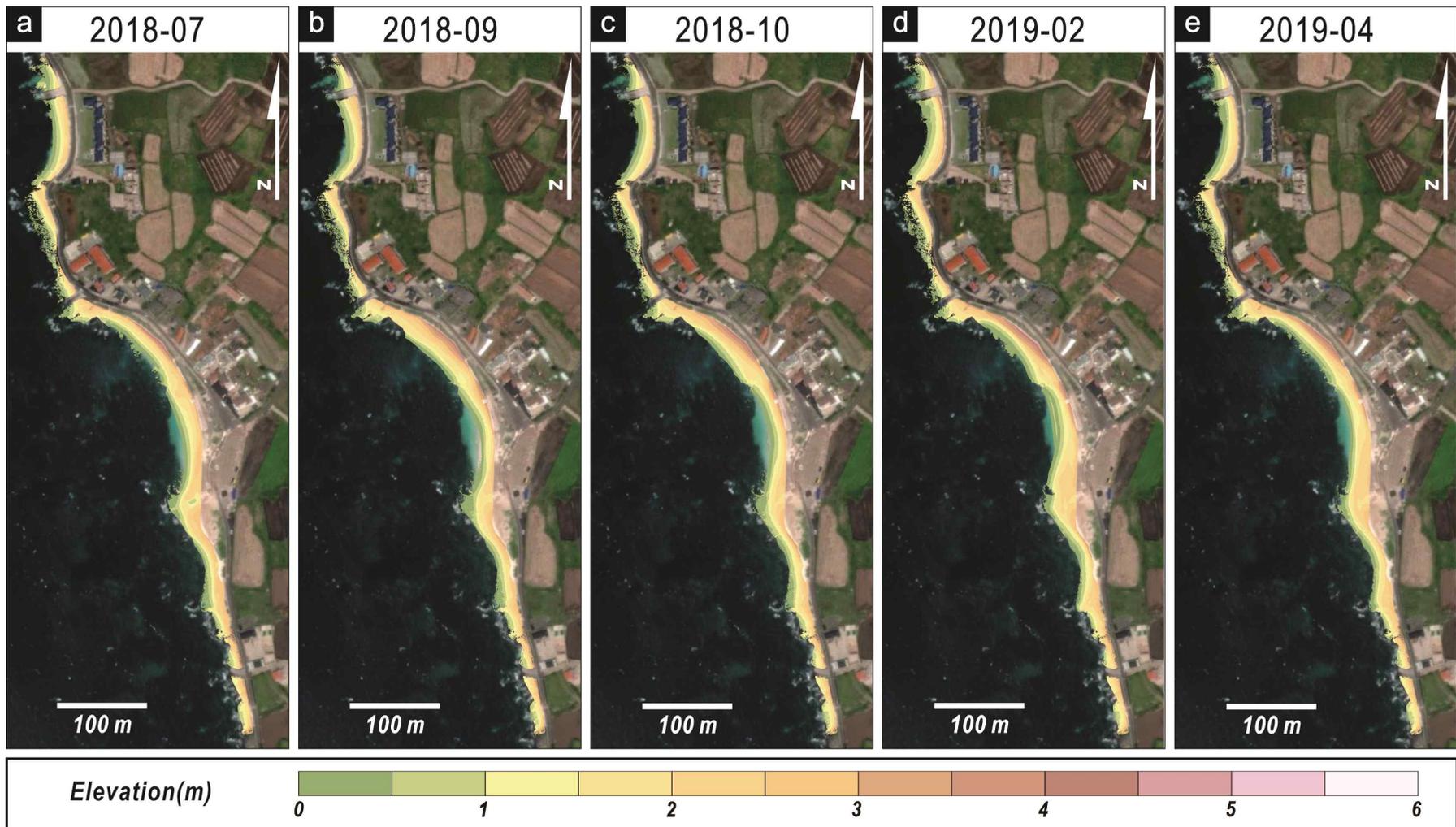


Fig. 5-10. LiDAR-based digital elevation maps of the Udo Rhodolith Beach from Jul. 2018 to Apr. 2019.

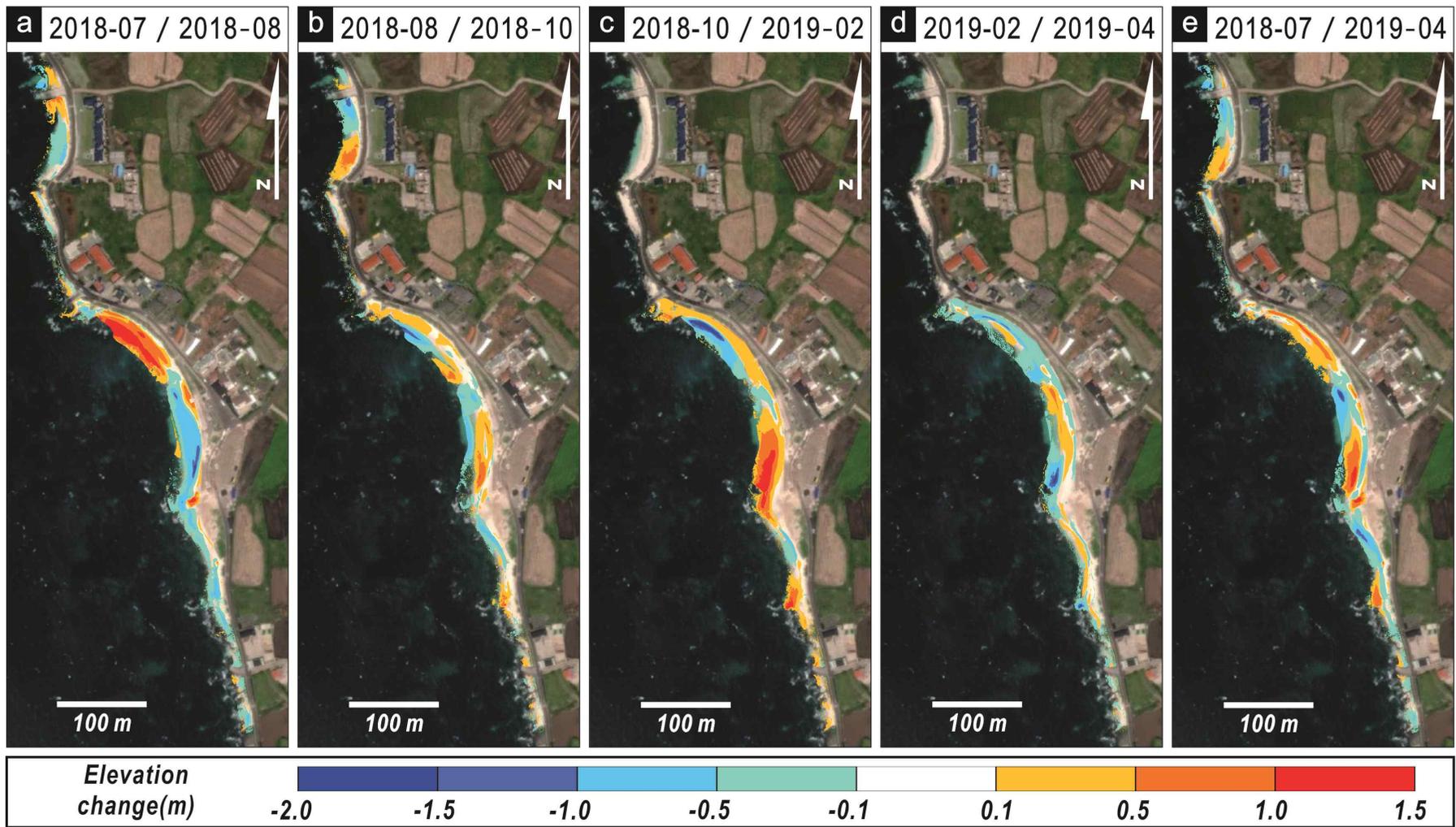


Fig. 5-11. Inter-seasonal elevation changes of the Udo Rhodolith Beach from Jul. 2018 to Apr. 2019. Bluish and reddish colors denote eroded and aggraded areas, respectively.

3) 2019-2020년 지형변화

2019-2020년 지형조사는 2019년 8월 하계조사를 시작으로 태풍 후(2019년 9월), 추계(2019년 10월), 동계(2020년 2월), 춘계(2020년 4월) 총 5회 실시하였다(Fig. 5-12).

(1) 1-2차 비교: 태풍 시기

태풍 링링이 통과한 직후에 실시된 라이다 2차 측량에서는 해빈의 총부피가 이전 조사에 비해 2.4% 정도 증가하고, 면적은 0.1% 감소한 것으로 나타났다(Table 5-4, 5-5). 모든 해빈 구역에서 해빈의 규모가 확장되었는데, 구역별로 보면 부피는 3구역에서 3.5%의 증가가 나타났고, 면적은 2구역에서 0.4% 확대되었다. 대부분의 해빈구역에서 퇴적은 북쪽구간에 집중되고 침식은 남쪽구간에 우세한 ‘북적남식’의 특징이 나타난다(Fig. 5-13a). 특히, 가장 큰 규모의 부피증가가 나타난 3구역은 북쪽 절반은 최대 1.5 m에 이르는 표고 증가가 나타날 정도로 퇴적물이 새롭게 집적되었으나 구역의 남쪽은 최대 1 m 내외의 표고 하강이 기록되었는데, 이는 평균해수면 아래의 인접 연안역이나 외해역으로부터의 퇴적물 유입과 함께 3구역 남쪽의 퇴적물도 동시에 북쪽으로 이동된 것으로 해석된다.

(2) 2-3차 비교: 추계 변화

2차 조사 후 약 한 달 만에 실시된 3차 조사에서는 해빈의 총부피가 이전 조사에 비해 0.1% 정도 증가되었으며, 면적은 0.5% 축소된 것으로 나타났다(Table 5-4, 5-5). 구역별로 보면, 부피는 3구역을 제외한 곳에서는 1~2% 정도의 감소가 기록된 반면에 3구역은 1.8% 증가되었으며, 면적은 3구역에서 1.1% 감소되었고 나머지 구역에서는 1% 이하의 미미한 변화가 인지된다. 해수면과 닿아 있는 하부 전안에서의 퇴적물 유실이 해빈 전구역에 걸쳐 광범위하게 나타나는 양상이 전반적인 해빈 부피 및 면적 감소와 잘 부합되고 있다(Fig. 5-13b). 한편, 3구역의 경우는 이러한 유실에도 불구하고 후안에 최대 1 m에 이르는 표고 증가가 나타나고 있어서 부피 증가와 잘 부합되며, 이는 전안에서 삭박된 퇴적물이 외해로 유실되지 않고 오히려 외부의 퇴적물이 부분적으로 더해져서 후안으로 이동되어 집적된 결과로 해석된다. 3구역을 제외하면 퇴적물 집적유형은 태풍 시기와는 반대로 대체로 ‘북식남적’의 특징을 보이는데, 이는 해빈면을 따라 북쪽에서 남쪽으로 퇴적물이 이동된 결과로 해석되며 이 시기에 우세했던 파랑과 조류의 이동방향과 밀접한 관계가 있

을 것으로 추정된다. 아울러, 해빈 부피 변화가 이전 시기에 비해 현저히 작은 것으로 보아 해빈 내에서 퇴적물의 이동(재배치)이 우세하였던 것으로 해석된다.

(3) 3-4차 비교: 추계-동계 변화

동계 조사는 추계 조사 이후 약 3개월 만에 실시되었는데, 이 기간 동안에 홍조 단괴 해빈의 부피와 면적 변화율은 모두 1% 미만으로 유의할만한 변화는 나타나지 않았다(Table 5-4, 5-5). 다만, 구역별로 보면, 3구역에서만 1.8%의 미약한 면적 증가 인지되었다.

퇴적물의 집적유형은 추계기간과 동일하게 ‘복식남적’의 특징을 보이는데, 3구역에서도 이러한 양상이 명확하게 나타난다(Fig 5-13c). 3구역은 남쪽 일부를 제외하고 대부분 지역에서 침식이 일어났는데, 특히 전안을 비롯하여 하부 후안까지도 일부 삭박된 모습을 보이지만 남쪽 구역에는 최대 1 m 이상의 표고 증가가 나타나고 있다. 뚜렷한 복식남적의 양상에도 불구하고 추계와 마찬가지로 해빈 부피나 면적 변화는 미미하게 나타나고 있어서 해빈 내 퇴적물의 이동(재배치) 현상이 동계까지 지속되었던 것으로 보인다. 아울러, 해빈면의 경사는 전반적으로 침식된 부분에서는 증가하고 퇴적된 부분에서는 감소하는 양상이 인지된다(Fig. 5-13c).

(4) 4-5차 비교: 동계-춘계 변화

4차 조사 이후 약 1.5개월 만에 실시된 5차 조사에서도 이전 조사에 비해 해빈의 전체 부피와 면적은 모두 1% 미만으로 미미한 변화를 보였다(Table 5-4, 5-5). 침식부와 퇴적부의 분포는 추계, 동계와 같은 침식유형인 ‘복식남적’의 특징을 보이며, 특히 상부 전안과 후안에서 유실이 활발하게 발생하였는데(Fig. 5-13d), 이는 겨울철 강한 바람과 높은 파고의 풍랑에 기인한 것으로 추정된다. 특히 각 구역의 남단 혹은 북단의 경계부는 연안역의 암초(rocky shoal) 분포대와 닿아 있어서 상대적으로 열린 연안지형을 보이는 중앙부에 비해 파도나 해류의 영향이 약하게 작용하는 곳임을 감안한다면, 미약한 부피 혹은 면적 변화를 동반한 ‘복식남적’ 혹은 ‘북적남식’의 분포양상은 구역 내 한쪽에서는 외해역으로부터 퇴적물이 유입되고 다른 쪽에서는 유출되는 것이 아니라, 해빈 내의 퇴적물이 한쪽에서 다른 쪽으로 재배치된 결과로 해석하는 것이 타당할 것이다. 아울러, 이전 시기와 마찬가지로 해빈면의 경사는 전반적으로 침식된 부분에서는 증가하고 퇴적된 부분에서는 감소하는 양상이 인지된다(Fig. 5-13d).

(5) 1-5차 비교: 전 기간 변화

2019년 8월~2020년 4월 동안에 홍조단괴 해빈의 전체 측량부피는 평균 25,312 m³, 측량면적은 평균 15,991 m²로서, 3구역이 부피로는 51%, 면적으로는 48%를 차지하고 있다(Table 5-4, 5-5). 조사기간 동안 측량부피는 24,819~25,474 m³의 범위에서 654 m³의 편차로 변화하며, 면적은 15,884~16,099 m²의 범위에서 215 m²의 편차를 보였는데, 이는 평균값을 기준으로 하면, 부피는 연간 2.6%, 면적은 1.3%의 범위에서 변동 된 것이다. 2018~2019년도 동안의 마지막(4차) 조사와 이번 연도 5차 조사 사이의 1년 동안(2019년 4월~2020년 4월) 라이다 측량구역의 전체 부피는 0.2% 감소하였으며, 면적은 0.4% 증가하였다. 이러한 측량값의 증가는 2019년 4월 이후에 홍조단괴 해빈으로 퇴적물 유입이 활발히 이루어져 집적되었으며, 이에 따라 해안선도 외해 쪽으로 전진하면서 전체 해빈의 면적도 증가하였음을 지시한다. 특히, 이러한 해빈의 확장은 대부분 2019년 4월 말~8월 초 사이의 늦은 봄철과 여름철 사이에 발생하였는데, 부피 증가율은 6.6%, 면적은 3.2%에 이른다. 이후 홍조단괴 해빈의 규모는 태풍 링링이 통과한 후(2차 조사)에 다소 증가하였으며, 그 이후에는 큰 변화 없이 유지되는 것으로 보인다.

조사기간 동안의 해빈 지표의 표고변화를 보면, 대부분의 구역에서 10~50 cm 범위의 고도 상승이 기록되었는데, 특히 3구역 남쪽 경계에서는 두께 1 m 이상의 퇴적물이 추가된 것으로 나타난다. 하지만, 1구역의 북부 일부와 3구역의 북부 및 중앙부에서는 50 cm 이하의 고도 하강, 즉 퇴적물 유실 혹은 침식이 일어난 것으로 보인다(Fig. 5-13).

1구역 북부의 퇴적물 침식은 주로 후안 지역에 나타나며 대신, 동일 구역의 남쪽은 퇴적물이 집적된 것으로 나타나서, 외견상으로는 북쪽의 해빈 퇴적물이 남쪽으로 이동된 것으로 보인다. 2구역에서는 퇴적물 침식부가 매우 제한적으로 나타나지만, 구역 내의 전반적인 지형변화 양상은 1구역과 같이 '북식남적(북부 침식, 남부 퇴적)'의 특징을 보인다. 3구역에서는 이러한 양상과는 다소 다르게 퇴적부와 침식부가 해안선 방향을 따라 비교적 일정한 간격으로 교호하여 나타나며, 침식된 부분은 전안과 하부 후안(전안-후안 경계부)에 집중되어 있는 것이 특징이다. 4구역의 퇴적과 침식 양상은 3구역과 유사하지만, 침식부가 매우 제한되어 있으며 하부 후안에 집중되어 있는 것이 3구역과 다른 점이다.

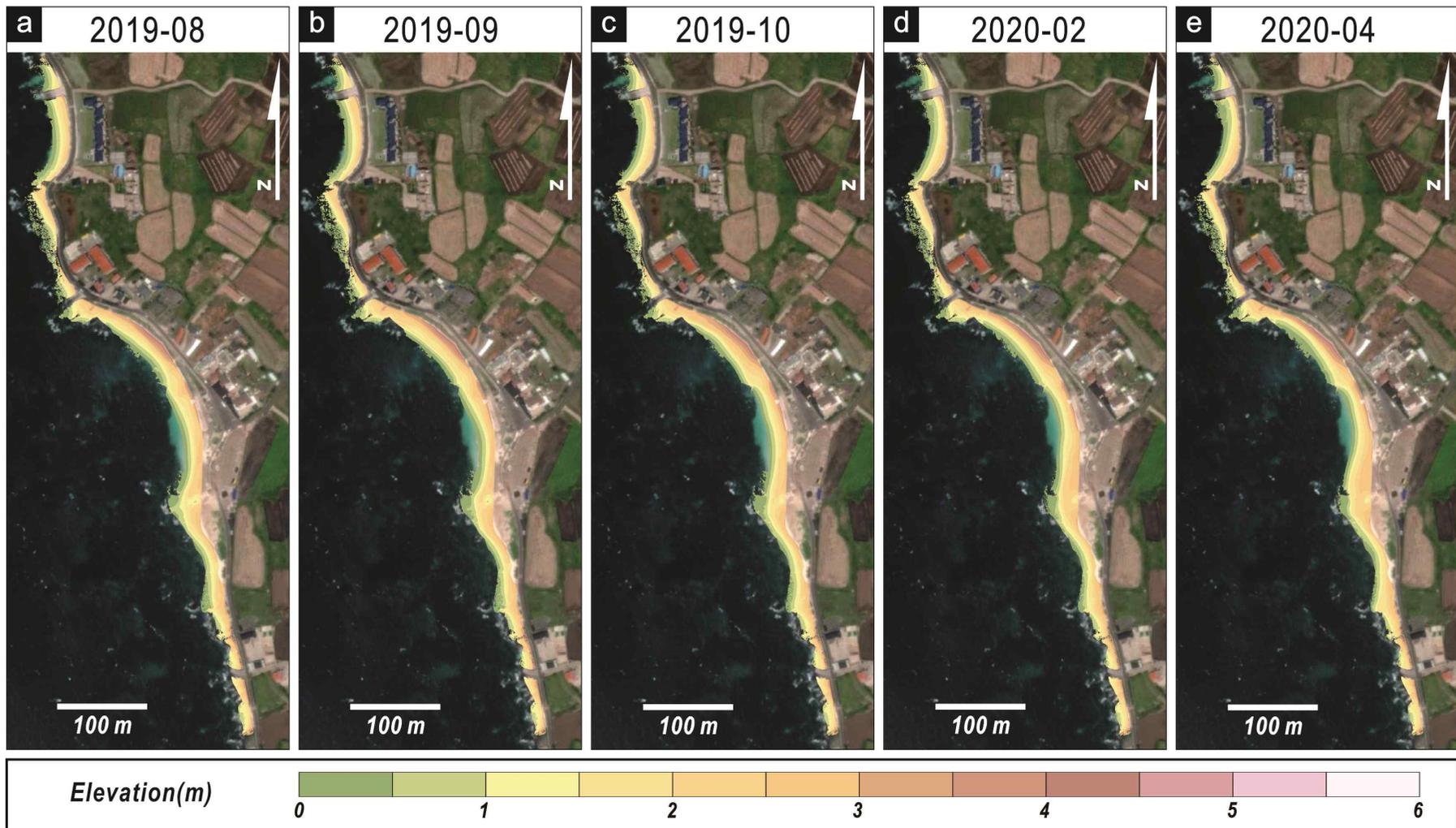


Fig. 5-12. LiDAR-based digital elevation maps of the Udo Rhodolith Beach from Aug. 2019 to Apr. 2020.

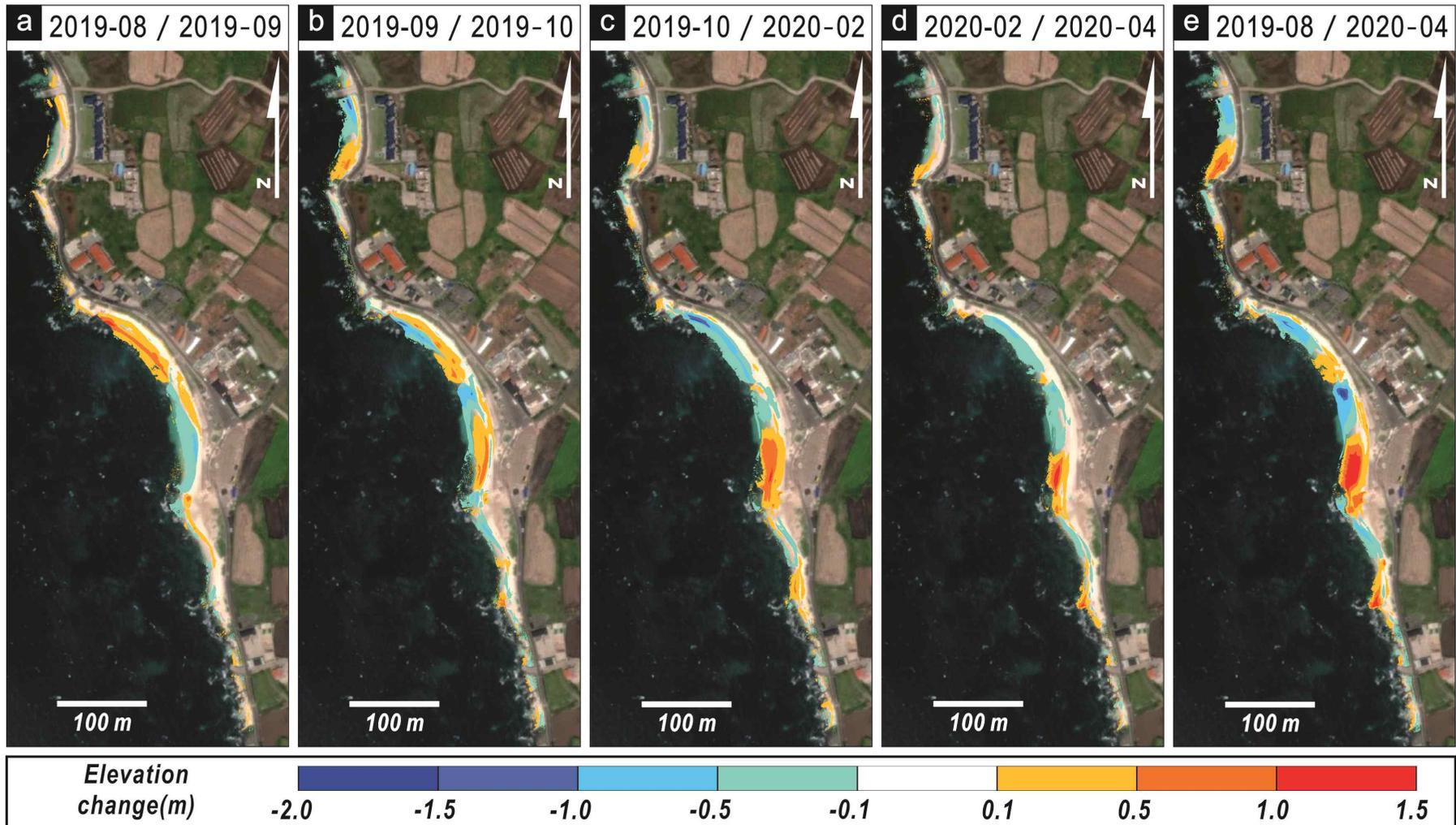


Fig. 5-13. Inter-seasonal elevation changes of the Udo Rhodolith Beach from Aug. 2019 to Apr. 2020. Bluish and reddish colors denote eroded and aggraded areas, respectively.

Table 5-4. The results of LiDAR-based area calculation of the Udo Rhodolith Beach from Sep. 2016 to Oct. 2021.

No	Survey date	Zone 1 area (m ²)	Zone 2 area (m ²)	Zone 3 area (m ²)	Zone 4 area (m ²)	Total area (m ²)
1	2016-09-20	2,605.0	1,673.7	7,483.8	4,135.8	15,898.4
2	2016-10-17	2,324.4 (-10.8%)	1,636.8 (-2.2%)	7,580.0 (1.3%)	4,149.9 (0.3%)	15,691.2 (-1.3%)
3	2016-11-14	2,323.6 (0.0%)	1,638.5 (0.1%)	7,576.8 (0.0%)	4,150.0 (0.0%)	15,688.9 (0.0%)
4	2017-02-27	2,413.0 (3.8%)	1,613.2 (-1.5%)	7,533.4 (-0.6%)	4,149.9 (0.0%)	15,709.4 (0.1%)
5	2017-05-12	2,360.5 (-2.2%)	1,613.4 (0.0%)	7,468.6 (-0.9%)	4,118.8 (-0.7%)	15,561.3 (-0.9%)
1	2018-07-30	2,531.9 (7.3%)	1,618.3 (0.3%)	7,327.9 (-1.9%)	4,113.2 (-0.1%)	15,591.2 (0.2%)
2	2018-08-31	2,336.2 (-7.7%)	1,603.7 (-0.9%)	7,288.4 (-0.5%)	4,084.1 (-0.7%)	15,312.4 (-1.8%)
3	2018-10-31	2,404.7 (2.9%)	1,616.3 (0.8%)	7,292.3 (0.1%)	4,102.3 (0.4%)	15,415.6 (0.7%)
4	2019-04-22	2,400.4 (-0.2%)	1,614.2 (-0.1%)	7,341.1 (0.7%)	4,123.2 (0.5%)	15,478.8 (0.4%)
1	2019-08-03	2,541.8 (5.9%)	1,665.0 (3.2%)	7,624.1 (3.9%)	4,142.1 (0.5%)	15,973.1 (3.2%)
2	2019-09-16	2,526.1 (-0.6%)	1,672.2 (0.4%)	7,625.0 (0.0%)	4,135.8 (-0.2%)	15,959.0 (-0.1%)
3	2019-10-28	2,525.4 (0.0%)	1,672.0 (0.0%)	7,544.8 (-1.1%)	4,142.0 (0.1%)	15,884.2 (-0.5%)
4	2020-02-12	2,546.2 (0.8%)	1,668.1 (-0.2%)	7,680.6 (1.8%)	4,147.6 (0.1%)	16,042.4 (1.0%)
5	2020-04-09	2,572.7 (1.0%)	1,670.8 (0.2%)	7,709.2 (0.4%)	4,147.0 (0.0%)	16,099.7 (0.4%)
1	2021-10-06	2,402.9 (-6.6%)	1,634.0 (-2.2%)	7,345.0 (-4.7%)	4,123.3 (-0.6%)	15,505.1 (-3.7%)
Average		2,454.3	1,640.7	7,494.7	4,131.0	15,720.7
Total area change(m ²)		-202.16 (-7.8%)	-39.77 (-2.4%)	-138.83 (-1.9%)	-12.48 (-0.3%)	-393.25 (-2.5%)

Table 5-5. The results of LiDAR-based volume calculation of the Udo Rhodolith Beach from Sep. 2016 to Oct. 2021.

No	Survey date	Zone 1 volume (m ³)	Zone 2 volume (m ³)	Zone 3 volume (m ³)	Zone 4 volume (m ³)	Total volume (m ³)
1	2016-09-20	2,842.7	2,106.0	11,907.5	6,680.0	23,536.1
2	2016-10-17	2,759.5 (-2.9%)	2,014.2 (-4.4%)	12,256.6 (2.9%)	6,987.8 (4.6%)	24,018.0 (2.0%)
3	2016-11-14	2,758.69 (0.0%)	2,020.57 (0.3%)	12,256.0 (0.0%)	6,988.3 (0.0%)	24,023.6 (0.0%)
4	2017-02-27	2,741.5 (-0.6%)	1,918.3 (-5.1%)	11,552.4 (-5.7%)	6,980.3 (-0.1%)	23,192.5 (-3.5%)
5	2017-05-12	2,733.3 (-0.3%)	1,928.4 (0.5%)	11,295.9 (-2.2%)	7,028.5 (0.7%)	22,986.1 (-0.9%)
1	2018-07-30	2,873.7 (5.1%)	1,970.7 (2.2%)	11,232.6 (-0.6%)	7,297.9 (3.8%)	23,374.9 (1.7%)
2	2018-08-31	2,742.2 (-4.6%)	1,950.8 (-1.0%)	11,751.2 (4.6%)	6,600.2 (-9.6%)	23,044.4 (-1.4%)
3	2018-10-31	2,722.2 (-0.7%)	1,949.6 (-0.1%)	11,998.4 (2.1%)	6,474.1 (-1.9%)	23,144.3 (0.4%)
4	2019-04-22	2,688.9 (-1.2%)	1,928.4 (-1.1%)	11,970.3 (-0.2%)	6,705.5 (3.6%)	23,293.1 (0.6%)
1	2019-08-03	3,001.9 (11.6%)	2,127.8 (10.3%)	12,534.5 (4.7%)	7,155.2 (6.7%)	24,819.4 (6.6%)
2	2019-09-16	3,078.7 (2.6%)	2,167.3 (1.9%)	12,970.0 (3.5%)	7,191.1 (0.5%)	25,407.1 (2.4%)
3	2019-10-28	3,023.9 (-1.8%)	2,139.8 (-1.3%)	13,201.8 (1.8%)	7,078.3 (-1.6%)	25,443.8 (0.1%)
4	2020-02-12	3,012.7 (-0.4%)	2,146.9 (0.3%)	13,177.8 (-0.2%)	7,136.7 (0.8%)	25,474.1 (0.1%)
5	2020-04-09	3,003.4 (-0.3%)	2,141.4 (-0.3%)	13,080.7 (-0.7%)	7,193.3 (0.8%)	25,418.8 (-0.2%)
1	2021-10-06	2,883.9 (-4.0%)	2,005.8 (-6.3%)	12,294.6 (-6.0%)	6,788.2 (-5.6%)	23,972.5 (-5.7%)
Average (m ³)		2,857.8	2,034.4	12,232.0	6,952.4	24,076.6
Total volume change (m ³)		41.19 (1.4%)	-100.13 (-4.8%)	387.18 (3.3%)	108.17 (1.6%)	436.40 (1.9%)

5.3.2 무인항공 영상을 이용한 해빈 면적 변화

1) 2018-2019년 면적변화

(1) 태풍 내습 후 해빈 면적 변화

1구역은 태풍 내습 후 남쪽구간이 침식이 되고 북쪽구간이 퇴적되었으며, 약 76 m² 소폭 증가 하였다(Table 5-6). 이 수치는 퇴적물이 외해에서 일부 유입되고 남쪽구간의 퇴적물이 북쪽으로 이동한 것으로 판단된다. 2구역은 홍조단괴 해빈 구역 중 가장 분포면적이 작은 지역으로 주로 홍조단괴 퇴적물이 기반암사이에 분포하고 있다. 태풍 내습 후 해빈 중심부 기반암 사이에 홍조단괴 퇴적물이 사이에 분포가 증가하였으며, 북-남쪽 구간이 해안방향으로 확장되었다. 3구역은 태풍 내습 후 가장 면적변화가 큰 차이를 보이는 지역으로 북쪽구간의 면적은 해안 방향으로 대폭 전진하였다. 반면에 남쪽구간은 대폭 침식되었으나, 분포면적은 약 18% 증가하였다. 4구역은 3구역과 반대로 6.5% 면적이 감소하였으며, 주로 남쪽구간과 중앙부분이 침식되었다.

위 결과를 종합하면, 태풍기간 동안 홍조단괴 해빈 각 구역 북쪽구간이 확장되어 폭의 증가를 보였으며 남쪽구간은 침식이 우세하게 발생하였다(Fig. 5-14a). 특히, 3구역의 북단부에서 전안이 연안쪽으로 확장된 것이 주요 원인으로 보인다. 이 기간 동안의 해빈 전체 면적은 7% 이상 증가하였다.

(2) 추계 해빈 면적 변화

3-4차 조사기간에 해당하는 가을철에 홍조단괴 해빈은 약 3%의 면적증가를 보인다. 특히, 9월과 10월 초순에 1구역과 3구역의 남단을 중심으로 해빈 전안이 확장된 것이 면적증가의 주요요인으로 보인다(Fig. 5-14b).

(3) 동계 해빈 면적 변화

2018년 11월 하순과 12월 사이의 동계 초기(6차 조사)에 홍조단괴 해빈에서는 8.4%의 면적 감소가 발생하였으며, 이는 2구역을 제외한 모든 구역에서 7~10%의 면적이 감소된 결과가 반영된 것이다. 반면에, 2019년 1월~2월 사이의 동계에는

그 이전에 유실되었던 부분들이 복구되면서 동계기간 동안 전체적으로 4%의 면적 증가가 나타났다(Fig. 5-14c).

(4) 춘계 해빈 면적 변화

2019년 2월 하순과 3월 하순 사이의 춘계 초기(9차 조사)에 홍조단괴 해빈에서는 약 3% 면적이 감소하였으며, 이는 주로 3구역 남단의 전안에서 발생한 퇴적물 유실로 면적이 7% 감소된 결과가 주요요인으로 보인다. 반면에, 2019년 3월 하순과 4월 사이에는 2구역과 4구역을 중심으로 면적 확장이 이루어지면서 춘계 전체적으로는 1%의 면적 감소가 나타났다(Fig. 5-14d).

(5) 2018-2019년 전 기간 변화

본 과제에서는 총 10회의 드론영상촬영을 통해 홍조단괴 해빈의 월별 면적변화를 파악하였는데, 전체 조사시간을 통하여 4구역의 면적이 다소 축소되기는 하였지만 홍조단괴 해빈 전체적으로는 약 6%의 면적 감소가 확인되었다.

특히, 태풍 기간 동안 해빈 전체 면적은 약 7% 증가하였는데, 해빈 각 구역의 북쪽구간이 확장되어 폭의 증가를 보인 반면 남쪽구간은 침식이 우세하게 발생하였다. 또한, 가을철(2018년 9월~11월)에 홍조단괴 해빈은 약 3% 면적이 증가하였는데, 9월과 10월 초순에 1구역과 3구역의 남단을 중심으로 해빈 전안이 확장된 것이 면적 증가의 주요요인이다. 한편, 동계 초기(11월 하순~12월)에 홍조단괴 해빈에서는 2구역을 제외한 모든 구역에서 유실이 일어나면서 면적이 감소하였지만, 2019년 1월과 2월에 유실되었던 부분들이 복구되면서 동계 기간 동안 4%의 면적 증가가 나타났다.

춘계 초기(2019년 2월 하순~3월 하순)에는 3구역 남단의 전안에서 발생한 퇴적물 유실로 인해 전체적으로 3% 이상의 면적이 감소하였으나, 3월 하순과 4월 사이에 2구역과 4구역을 중심으로 확장이 이루어지면서 춘계기간 동안 전체적으로 2% 면적이 증가하였다.

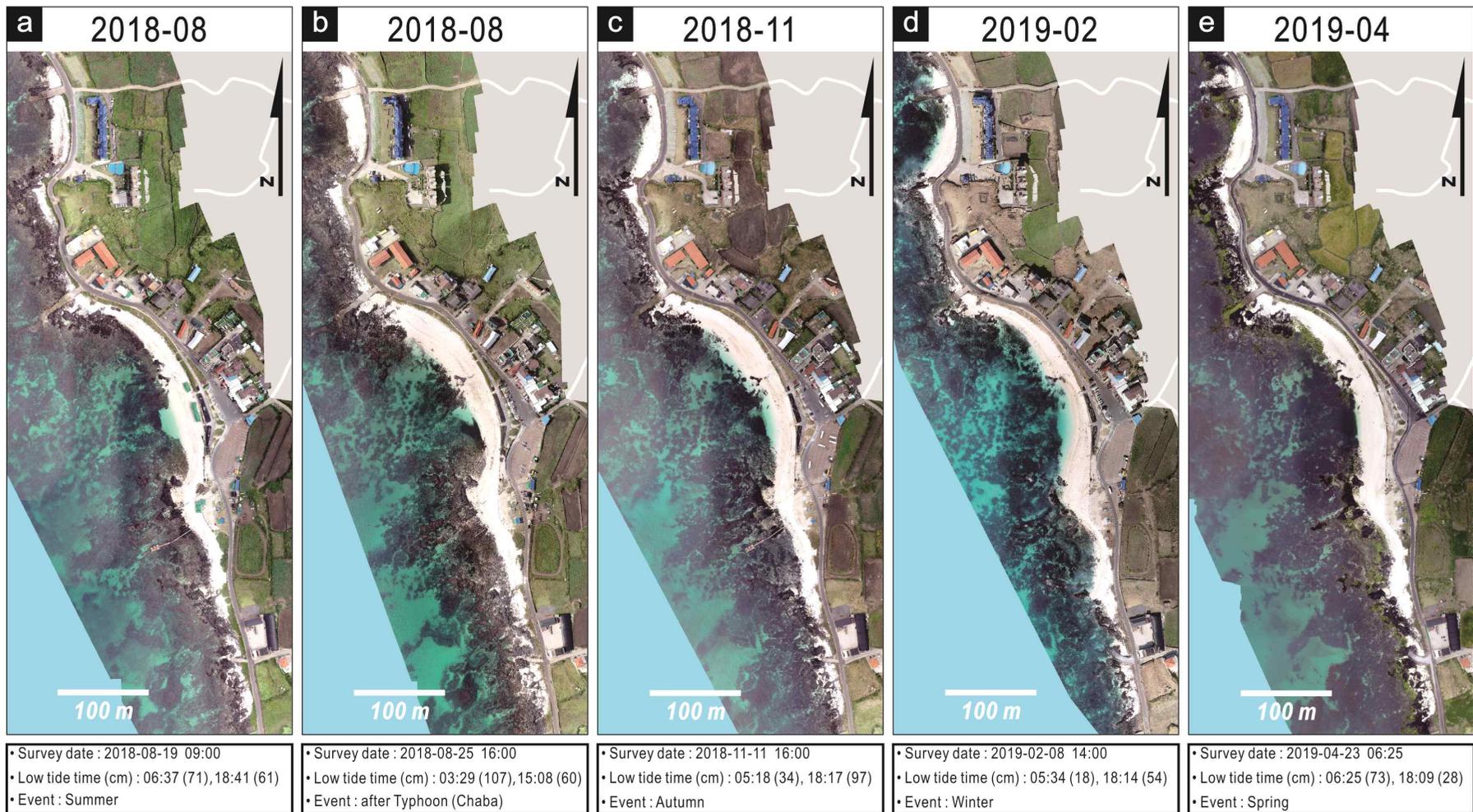


Fig. 5-14. Drone-based orthoimages of the Udo Rhodolith Beach from Aug. 2018 to Apr. 2019.

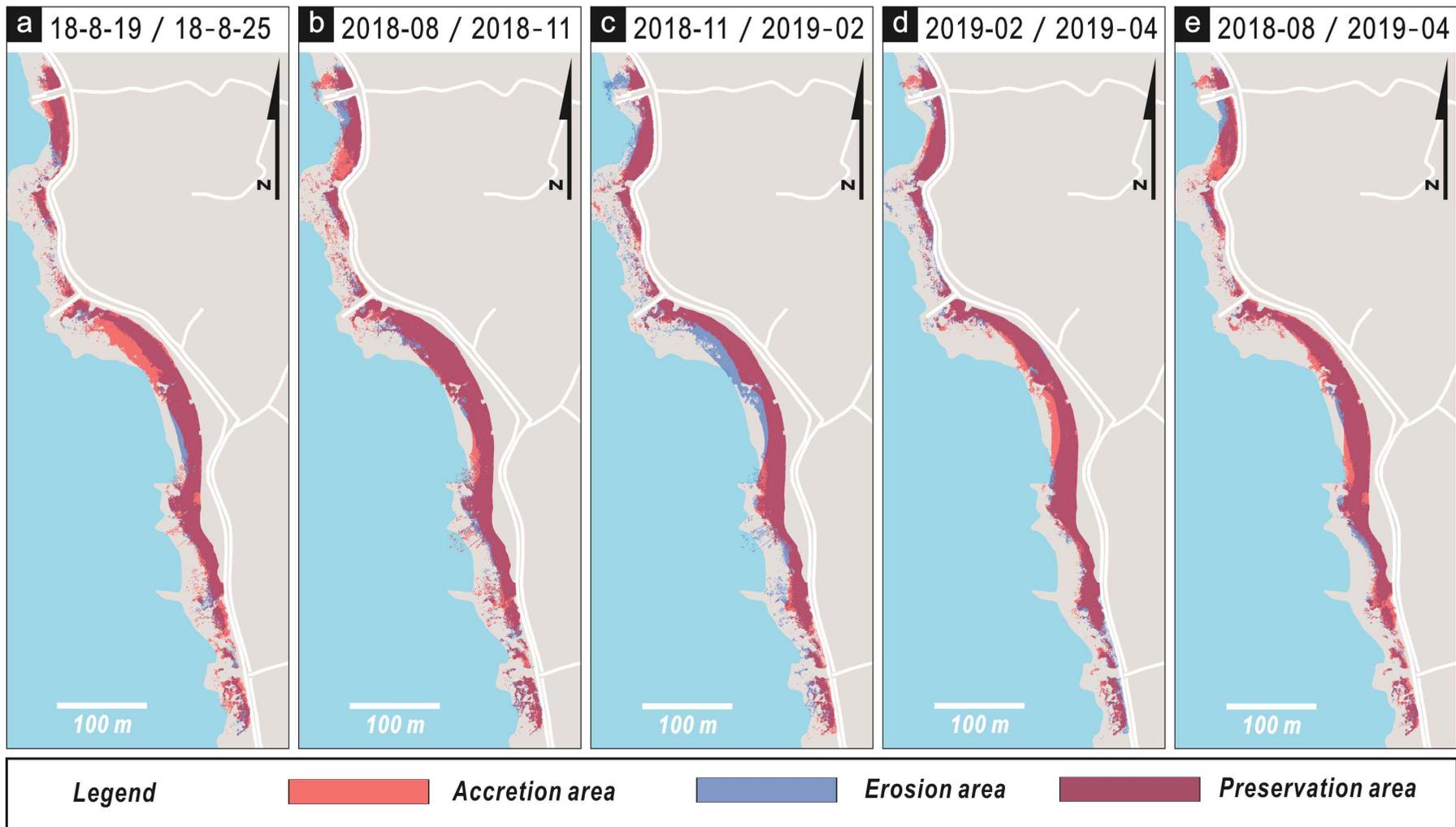


Fig. 5-15. Beach area and shoreline change of the Udo Rhodolith Beach from Aug. 2018 to Apr. 2019.

2) 2019-2020년 면적변화

(1) 하계 해빈 면적변화

하계(6~8월)에는 모든 구역에서 월별로 증가와 감소를 경향이 각각 다르게 나타나지만, 전체적인 면적 변화에서는 미약하게 증가하는 것으로 판단된다(Table 5-6).

(2) 추계 해빈 면적 변화

추계기간 세부구역별로는 1구역 6.0% 증가, 2구역 14% 증가, 3구역 5% 증가, 4구역 6% 증가 하는 등 지형변화가 발생하였으며, 해빈 규모는 하계 기간보다 전체 면적이 약 4 m² 증가하여 보존된 것으로 판단된다(Table 5-6). 추계기간 주요 세부지형 변화는 태풍 후 유실되었던 각 구역 남부구간에 퇴적물이 공급됨에 따라 일부 복구되었다. 해안선의 형태는 각 구역 북부구간에서는 침식, 남부구간에서의 퇴적됨에 따라 1, 3 구역에서의 남부구간 폭 증가가 확인된다.

(3) 동계 해빈 면적 변화

동계(12~2월)에는 모든 구역(1, 3 구역 제외)에서 면적이 감소하는 양상을 보였는데, 특히 12~1월에 감소폭이 상대적으로 더 크게 발생하였다. 추계-동계 기간 세부지형 변화는 2, 4구역에서 암반사이에 분포하는 퇴적물이 증가하였으며, 3구역에서 북부구간 침식, 남부구간 퇴적현상이 발생였다.

(4) 춘계 해빈 면적 변화

춘계기간 동안 1구역의 면적은 2.8%씩 계속 증가하였으나 11차조사에서 4.2% 감소가 발생하였다. 2구역은 춘계기간 동안 각각 1.6%, 7.8% 감소 되어 동계기간 대비 3%의 면적이 대폭 감소하였다. 3구역은 위 기간동안 0.5%의 범위내에서 면적 감소와 증가가 발생하여 퇴적물 변화가 거의 나타나지 않았으며, 4구역은 조사 차수가 진행될수록 퇴적물 유실이 가속화되었다. 동계-춘계 기간 세부지형 변화는 추계-동계 기간 퇴적되었던 2, 4구역 암반사이의 퇴적물이 다시 유실됨에 따라 면적 감소가 발생하였으며, 3구역에서는 추계-동계기간과 동일하게 북부구간 침식, 남부구간 퇴적현상이 나타난다.

(5) 태풍 내습 후 변화

2019년에는 2개의 태풍이 연구지역을 통과하였으며, 태풍 통과 후 약 3일 이내에 드론 영상이 촬영되었다. 2019년 태풍 타파 통과 후에는 해빈 면적의 감소가 발

생하였으나, 미탁 통과 후에는 면적이 감소하는 상반된 결과가 발생하였다. 태풍 시 지형변화는 짧은 기간안에 급격하게 발생하게 되며, 해빈 규모는 당시 해황이나 기상조건에 의해 달라지는 것으로 추정된다. 태풍 통과 후 세부지형 변화는 해빈 전 구역에서 유실이 발생하였으며, 특히 각 구역 남부구간에서의 큰 폭의 면적 감소가 발생하였다.

(6) 2019-2020년 전 기간 변화

2019~2020년 동안에 총 11회의 드론 영상촬영을 통해 홍조단괴 해빈의 퇴적물 분포면적을 측정한 결과, 이 기간 평균 면적은 15,076 m²이고 월별로 약 6%의 범위에서 증가와 감소가 반복되고 있다. 1차 조사와 11차 조사를 비교하면 전체 면적은 11.8% 감소하였는데, 해빈 전 구역에서 10~17%의 감소가 발생하였다.

계절 간의 면적변화 양상을 보면, 춘계-하계와 하계-추계에는 대체로 증가하는 경향을 보이며, 추계-동계와 동계-춘계에는 감소하거나 변화가 미미한 양상을 보이는 것으로 요약해볼 수 있다. 단기적(월별)으로는 확장과 축소가 반복되는 양상을 보이지만 장기적으로 해안선과 닿아 있는 하부 전안이 육지 쪽으로 점차 후퇴하고 조하대 연안역에 분포하는 퇴적물이 점차 유실(외해 혹은 해빈으로 운반된 결과)되어 면적 감소가 발생한 것으로 판단된다.

3) 2021년 면적변화

(1) 춘계 해빈 면적 변화

춘계기간 해빈 면적은 총 2.9% 감소하였으며, 세부 구역별로는 1구역 7.8% 감소, 2구역 1.4% 증가, 3구역 3.3% 감소, 4구역 0.2% 증가하였다(Table 5-6). 특히, 침식이 발생한 1, 3구역에서는 각 구역 남쪽 지역에서 퇴적물 유실을 두드러지게 나타낸다. 춘계-하계 기간 동안 세부지형 변화는 각 구역 북부구간에서 미약하게 퇴적 현상이 관찰되며, 이와 반대로 남쪽구간에서는 침식현상이 나타낸다(Fig. 5-18a).

(2) 하계 해빈 면적 변화

하계 기간동안 총 3회(3~5차 조사)의 드론 영상촬영이 진행되었다. 3~4차 조사에서는 각 구역 북쪽으로 퇴적물이 공급 및 이동되어 전 구역에서 4.4% 면적이 증가하였으며, 세부구역별로는 1구역 8.3%, 2구역 9.5%, 3구역 2.9%, 4구역 3.8% 면적이 증가하였다. 퇴적물 면적 변화도에서는 각 구역 남쪽구역에서 퇴적물 유실이

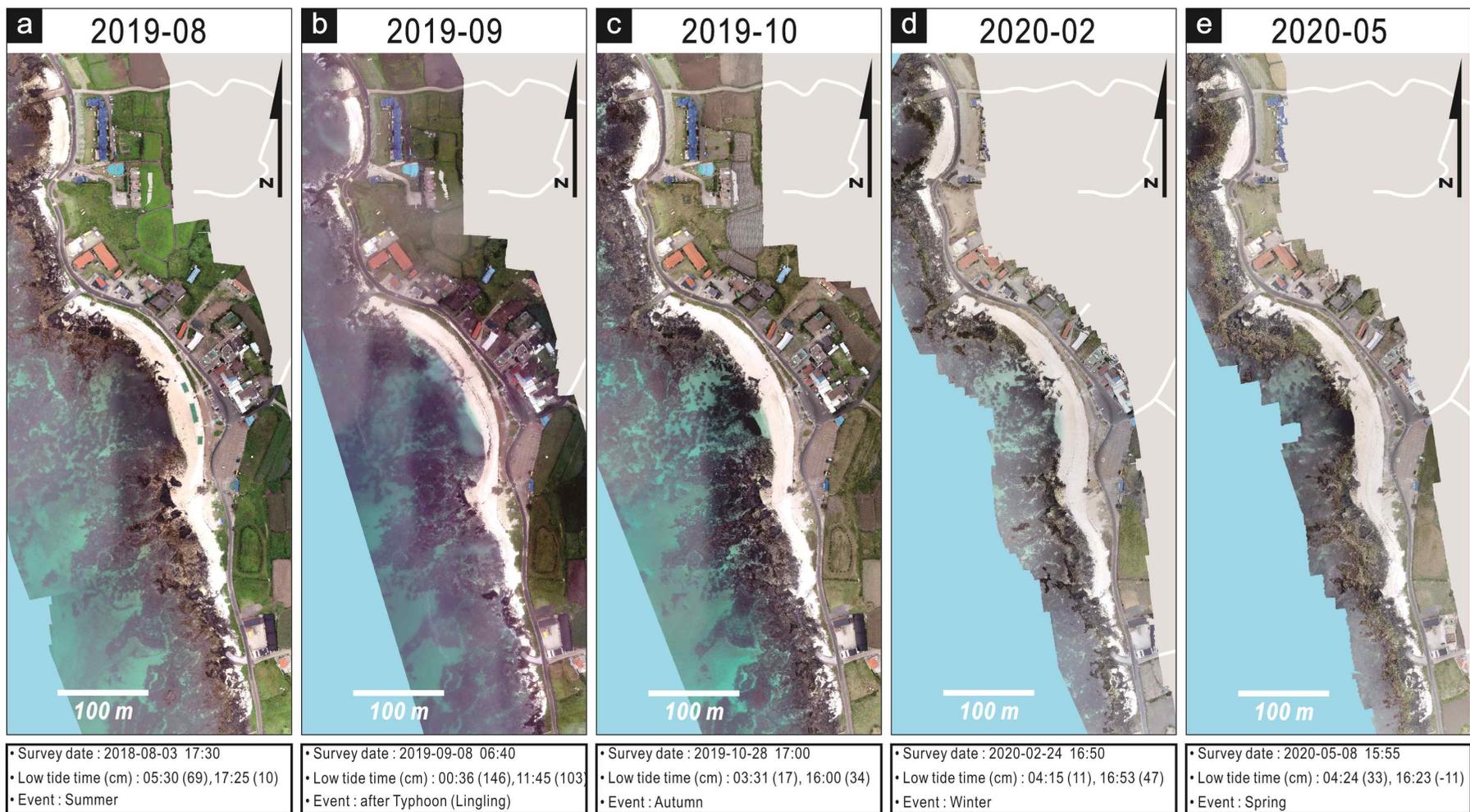


Fig. 5-16. Drone-based orthoimages of the Udo Rhodolith Beach from Aug. 2019 to May 2020.

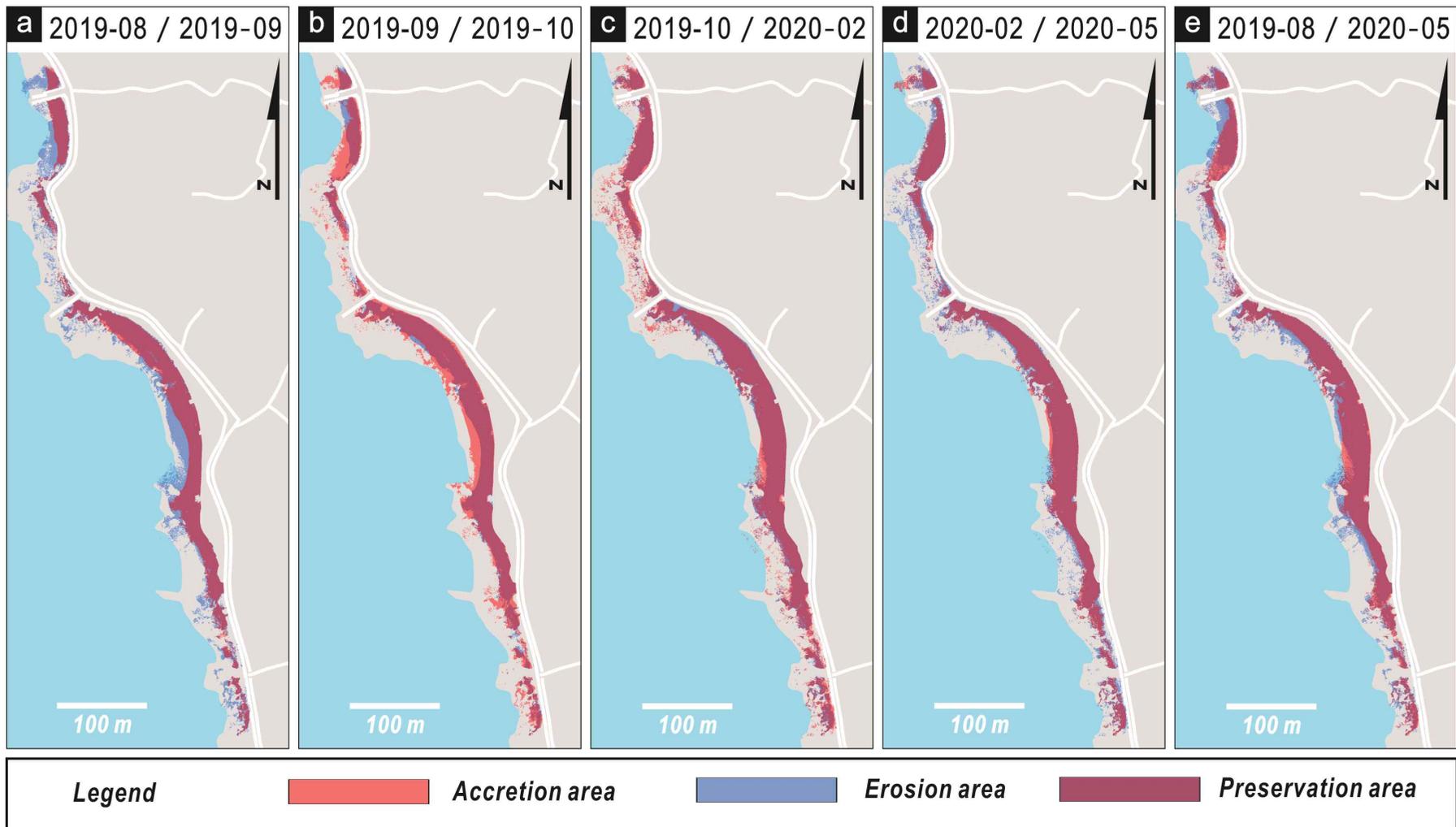


Fig. 5-17. Beach area and shoreline change of the Udo Rhodolith Beach from Aug. 2019 to May 2020.

발생하여 해빈 지형이 북쪽으로 확장된 형태로 변화하였다. 4~5차 조사에서는 전 구역에서 퇴적물 유실이 발생하였기 때문에 약 5.9% 면적이 감소하였다. 세부구역 별로 보면 1구역 4.2% 감소, 2구역 14.5% 감소, 3구역 4.4% 감소, 4구역 7.8% 감소하였다. 위 시기에는 주로 암반사이에 퇴적물이 분포하는 2, 4구역에서 퇴적물 침식이 두드러지게 나타난다.

(3) 추계 해빈 면적 변화

9~10차 조사에서는 3구역을 제외한 모든 구역에서 면적이 증가하여 해빈 전체 면적이 약 2% 증가하였다. 3구역에서는 전안 전단부에서의 침식이 뚜렷하게 관찰되며 이로 인해 약 2.3% 면적이 감소하였다. 퇴적물 분포변화는 각 구역 남쪽으로 퇴적물이 공급 및 이동되어 남쪽으로 확장된 형태로 해빈 지형이 변화하였다.

(4) 태풍 내습 후 변화

2021년 조사기간 동안 태풍 오마이스(2021년 8월), 찬투(2021년 9월) 등 2개의 태풍이 연구지역을 통과하였으며, 이 중 태풍 오마이스 경우 제주도 중심부(우도 서편)으로 통과하였으며, 찬투는 제주도 남해상(서귀포 남쪽 해상)에서 일본 방향으로 통과하였다. 태풍 오마이스 통과 후 면적 변화량은 -0.2%로 변화 정도가 매우 미약하게 나타났으며, 반면에 태풍 찬투 통과 후 전 구역에 걸쳐 퇴적물이 공급되어 해빈 면적이 5.9%가 증가하였다.

기존 모니터링 기간 동안 태풍은 제주도 동편, 서편으로 구분되었으며, 동편 통과 시 최대 풍속 시기에 북풍과 남동향 과도와 해류로 인하여 북쪽에서 남쪽으로의 퇴적물 이동이 관찰되었다. 서편 통과 시에는 대체로 남풍과 이로 인한 북동향 과도로 인하여 남쪽에서 북쪽으로의 퇴적물 이동이 관찰되었다.

태풍 오마이스는 중심부가 제주시 구좌읍 지역을 통과하였는데, 이는 분석기간 태풍 중 해빈에서 가장 근접한 경로로 통과한 사례이다. 통과 당시 최대 풍속은 10.2 m/s로 기록(우도 AWS)되어 소형태풍의 특징을 보인다. 본 태풍이 통과 당시 홍조단괴 해빈 지형은 대체로 남쪽에서 북쪽으로 퇴적물 이동이 관찰되었으며, 전차년도 태풍 시기에서 제주도 서편 통과 시 지형변화 양상과 유사하게 나타나는 것으로 확인되었다. 태풍 찬투는 중심부가 서귀포 남해상에서 일본 방향으로 통과하였으며, 태풍 최대 근접 시 강한 북동풍-동풍 계열에 바람이 최대 풍속 17.9 m/s로 기록되었다.

(5) 2021년도 전 기간 변화

2021년도에 10회에 걸쳐 취득된 드론 영상을 분석하여 산정된 홍조단괴 해빈의 전체 퇴적물 분포면적은 평균 13,145 m²로서, 구역별 면적 점유율은 3구역이 53%, 4구역 25%, 1구역 16%, 2구역 6% 순으로 나타난다.

조사기간 동안 전체 퇴적물 분포면적은 최대 13,737m²(4차 조사, 2021년 7월)에서 최소 12,722 m²(9차 조사, 2021년 10월)의 범위에서 변화를 보였는데 편차는 1,015 m²로서 평균치를 기준으로 하면 7.7%의 범위에서 면적이 변동되었다(Table 5-6, Fig. 5-18e)

춘계-하계 시기에 정사영상에서 면적은 약 2.1% 감소하였는데 이는 1구역, 4구역 남쪽 구간에서 퇴적물 면적 감소에 따른 영향으로 해석된다. 특히, 춘계-하계 시기 해빈의 세부지형 변화는 만입부 남쪽 구간에 침식이 우세하게 일어나며 북쪽과 중앙부에서 퇴적이 우세하게 발생하였다.

하계-추계 기간동안 정사영상에서의 면적은 약 1.6% 감소하였으며, 지형변화는 퇴적부와 침식부가 명확하게 구분되는데, 각 구역 북쪽구역에서 침식, 남쪽구역은 퇴적이 발생하였다. 특히 위 지형변화 양상은 2018~2019년도, 2019~2020년도 지형변화 양상이 매우 유사하다.

5.3.3 라이다와 무인항공 영상의 면적 차이

라이다와 드론에 의해 산정되는 면적의 차이는 기본적으로 측량범위의 차이에서 기인한다. 즉, 라이다 측량은 평균해수면 상부의 전안 및 후안 등 대기 중에 노출되어 있는 구간의 면적을 측량하며, 드론 촬영에서는 육상은 물론 가지적으로 확인 가능한 해수면 하 연안역까지도 측량범위에 포함시킨다. 따라서 두 가지 방식의 면적 값을 서로 비교한다면, 육상 영역의 해빈과 해수면 하 수중 영역의 해빈에 분포하는 퇴적물의 유출입 관계에 대한 정보를 얻을 수 있다(Fig. 5-2a, Fig. 5-4a, Fig. 5-19a).

라이다와 드론 면적을 비교하기 위하여 7개 절기에 대한 면적 변화율을 분석하였으며, 전체 구역에 대한 변화율을 보면, 2019년 태풍 후와 2019-2020년 동계-춘계에는 면적 변화율이 서로 반대로 나타나는 반면, 그 나머지 기간에는 동일한 변화양상을 보인다. 하지만 구역별로 보면 양상은 좀 달라지는데, 상당한 변화율 차이로 서로 반대의 변화 양상을 보인 경우는 해빈 1구역에서 태풍 후-추계(2018년),



Fig. 5-18. Drone-based orthoimages of the Udo Rhodolith Beach from May 2021 to Oct. 2021.

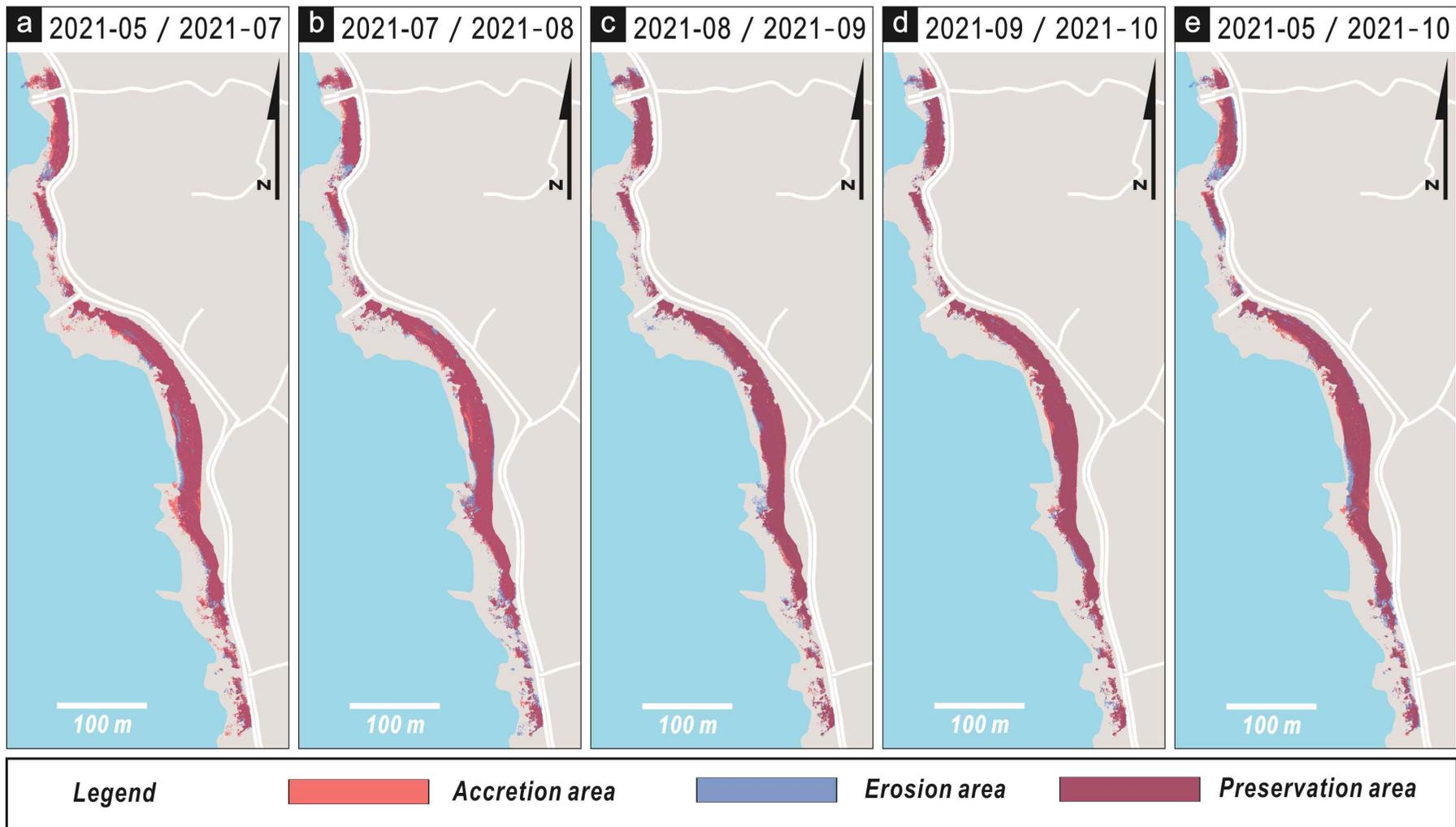


Fig. 5-19. Beach area and shoreline change of the Udo Rhodolith Beach from May 2021 to Oct. 2021.

Table 5-6. The results of Drone-based area calculation of the Udo Rhodolith Beach from Aug. 2018 to Oct. 2021.

Date	Zone 1 area (m ²)	Zone 2 area (m ²)	Zone 3 area (m ²)	Zone 4 area (m ²)	Total area (m ²)
2018-08-19	2,090	952	7,279	5,855	16,175
2018-08-25	2,166	1,142	8,581	5,472	17,361
2018-09-08	2,157	1,134	8,722	5,394	17,407
2018-10-09	2,305	1,031	9,007	5,528	17,871
2018-11-11	2,302	736	9,347	5,470	17,854
2018-12-31	2,142	836	8,427	4,943	16,348
2019-01-22	2,324	867	8,878	5,018	17,088
2019-02-20	2,504	880	9,226	5,165	17,775
2019-03-25	2,512	1,014	8,582	5,133	17,241
2019-04-23	2,466	1,069	8,573	5,536	17,645
2019-08-03	2,789	1,018	8,492	3,812	16,110
2019-09-23	2,235	1,203	7,831	4,003	15,271
2019-10-04	2,393	935	7,746	3,763	14,837
2019-10-28	2,487	1,019	8,332	3,879	15,716
2019-11-30	2,537	1,065	8,138	3,979	15,720
2019-12-30	2,315	1,167	7,675	4,112	15,269
2020-01-16	2,409	946	7,743	3,693	14,791
2020-02-28	2,357	1,011	7,724	3,621	14,713
2020-03-25	2,423	930	7,683	3,587	14,623
2020-04-10	2,492	915	7,636	3,522	14,565
2020-05-08	2,387	844	7,660	3,327	14,217
2021-04-28	2,204	816	7,299	3,279	13,599
2021-05-29	2,033	827	7,061	3,286	13,207
2021-06-13	2,029	814	6,989	3,333	13,164
2021-07-24	2,197	891	7,191	3,459	13,737
2021-08-12	2,106	761	6,874	3,189	12,930
2021-08-26	2,098	759	7,008	3,039	12,904
2021-09-12	2,081	712	6,838	3,099	12,729
2021-09-21	2,010	1,041	7,007	3,423	13,481
2021-10-06	1,904	685	7,053	3,081	12,722
2021-10-23	2,072	800	6,891	3,214	12,976

추계-춘계(2018-2019년), 하계-태풍 후(2019년) 시기에, 그리고 3구역에서 하계-태풍 후(2019년)와 태풍 후-추계(2018년)에 나타나며, 그 외의 시기에는 변화양상이 동일하거나 어느 한 자료에서만 증가 혹은 감소를 나타낸다(Fig 5-19b).

해수면 상부의 라이다와 드론의 촬영 범위가 동일하지 않고, 두 가지 측량방식이 오차 범위가 다르기 때문에 변화율을 정량적으로 비교할 수는 없지만, 증가 혹은 감소 등의 변화 경향만을 고려해보면, 해수면 상부의 해빈과 이에 인접한 조하대, 그리고 외해역과의 퇴적물 교류에 대한 정보를 해석할 수 있다. 즉, 2019년 춘계-하계에 모든 구역에서 라이다와 드론 면적이 동시에 증가하였는데 이는 외해역으로부터 조하대는 물론 해수면 상부의 해빈 전안과 후안까지 퇴적물이 이동하여 집적된 결과로 해석된다. 반대로, 라이다와 드론 면적이 모두 상당한 비율로 감소되었다면, 해빈 퇴적물이 외해로 유출된 것으로 판단할 수 있는데, 이번 조사에서 이와 같은 사례는 나타나지 않는다.

한편, 라이다와 드론 면적이 유사한 비율로 반대의 변화양상을 보였다면 이는 외해역과의 퇴적물 교류가 매우 제한된 상태에서 해빈 전안과 조하대 사이에서만 국지적인 퇴적물 교환이 일어났음을 시사하는데, 홍조단괴 해빈에서는 1구역의 태풍 후-추계(2018년), 추계-춘계(2018-2019년) 및 3구역의 하계-태풍후(2019년), 태풍후-추계(2019년) 등이 이러한 경우에 해당될 수 있다. 이외에도 세부 양상에 따라 다양한 퇴적물 유출입 관계를 해석해볼 수 있지만, 앞서도 언급했듯이 자료 취득의 조건이 달라 상세한 정량적 비교는 곤란하다. 하지만, 라이다와 드론의 면적 변화양상이 서로 다른 경향을 보이는 사례가 다수 나타난다는 것은 홍조단괴 해빈을 구성하는 퇴적물의 유출입에 있어서 육상의 해빈 영역과 해수면 하의 조하대 영역이 연계는 되어 있지만 별개의 퇴적물 저장지로 작용한다는 것을 시사한다. 즉, 해빈퇴적물은 단순히 외해역에서 파도나 해류에 의해 바로 해빈의 전안이나 후안에 집적되거나 이후에 바로 외해역으로 유실되는 것이 아니라 중간에 위치한 조하대 연안역을 경유지로 하여 다양한 경로로 활발히 유출입되고 있다는 것을 반증하는 것으로 해석된다. 이는 해빈과 궁극적인 퇴적물 공급지가 되는 외해역 사이에 기저 암반대가 노출되어 있는 불규칙한 해저돌출대가 해빈과 외해역의 즉각적인 단기적 퇴적물 교류를 방해하는 요인으로 작용하기 때문이다.

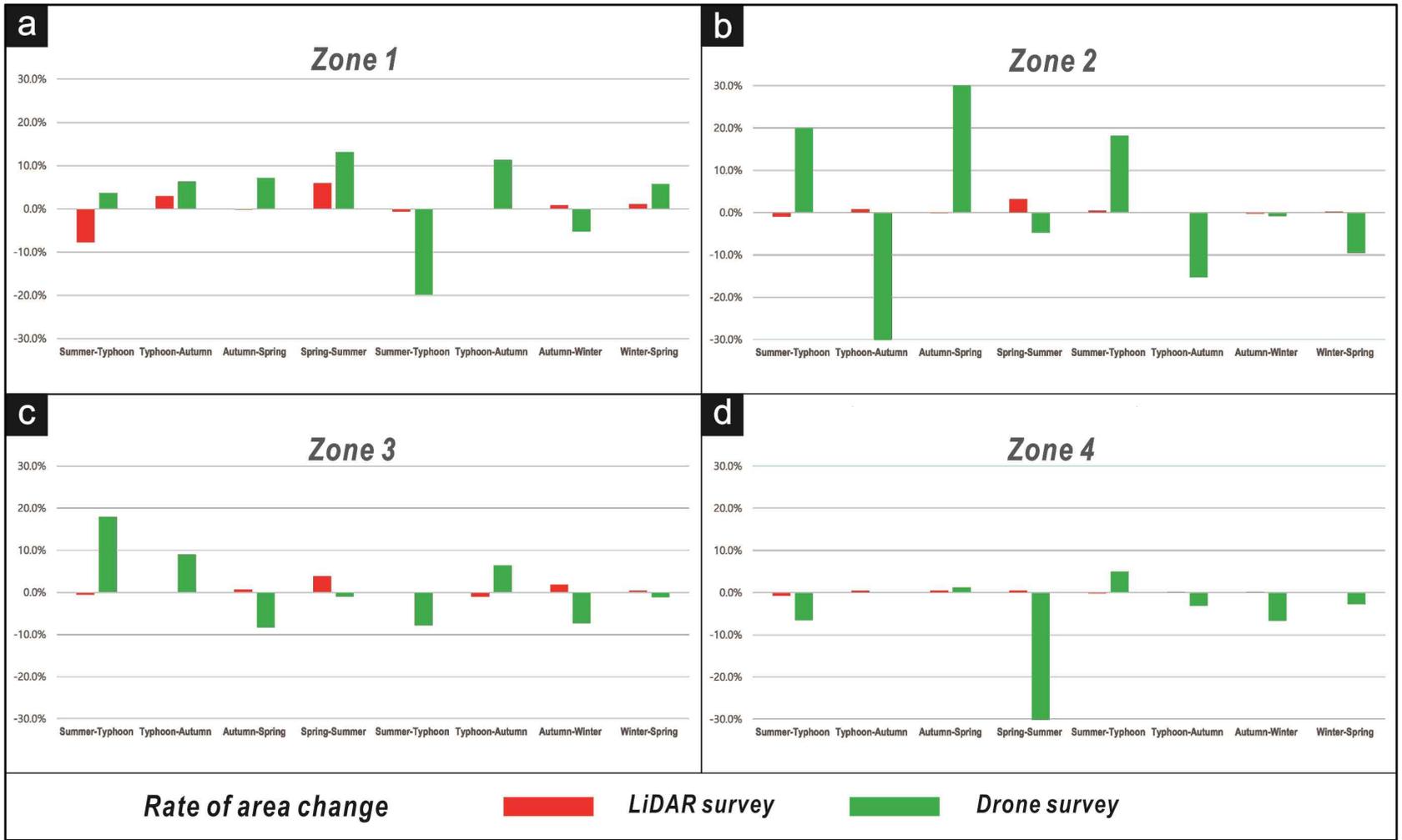
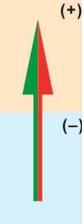
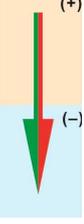
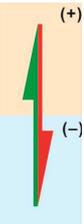
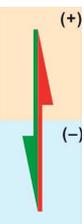


Fig. 5-20. Comparison of Lidar (red bar) and drone-based (green bar) area of the Udo Rhodolith Beach. (a) zone 1, (b) zone 2, (c) zone 3, (d) zone 4.

Table 5-7. Types of beach area change by Lidar (red arrow) and Drone (green arrow) measurements.

Change pattern	Description and interpretation	Location and time	
	<p>Increase in both Drone- and Lidar-based areas, due to sediment supply from nearshore zone.</p>	Zone 1	<p>Typhoon to autumn 2018 Spring to summer 2019 Typhoon to autumn 2019 Winter 2019 to spring 2020</p>
		Zone 2	Summer to typhoon 2019
		Zone 3	Typhoon to autumn 2018
		Zone 4	Autumn 2018 to spring 2019
	<p>Decrease in both Drone- and Lidar-based areas, due to offshore removal of beach and subtidal sediments</p>	Zone 1	Summer to typhoon 2019
		Zone 2	<p>Typhoon to autumn 2019, Autumn to winter 2019</p>
		Zone 3	Unoccurred
		Zone 4	<p>Summer to typhoon 2018, Winter 2019 to spring 2020</p>
	<p>Increase in Drone-based area while decrease in Lidar-based area, due to sediment movement from beach to subtidal zone</p>	Zone 1	<p>Summer to typhoon 2018, Autumn 2018 to spring 2019</p>
		Zone 2	<p>Summer to typhoon 2019, Autumn 2018 to spring 2019</p>
		Zone 3	<p>Summer 2018 to typhoon, Typhoon to autumn 2019</p>
		Zone 4	Summer to typhoon 2019,
	<p>Decrease in Drone-based area while increase in Lidar-based area, due to sediment movement from subtidal zone to intertidal beach</p>	Zone 1	Autumn to winter 2019,
		Zone 2	<p>Typhoon to autumn 2018, Spring to summer 2019 Winter 2019 to spring 2020</p>
		Zone 3	<p>Autumn 2018-spring 2019, Spring to summer 2019, Summer to typhoon 2019, Autumn to winter 2019, Winter 2019 to spring 2020</p>
		Zone 4	<p>Typhoon to autumn 2018, Spring to summer 2019 Typhoon to autumn 2019, Autumn to winter 2019,</p>

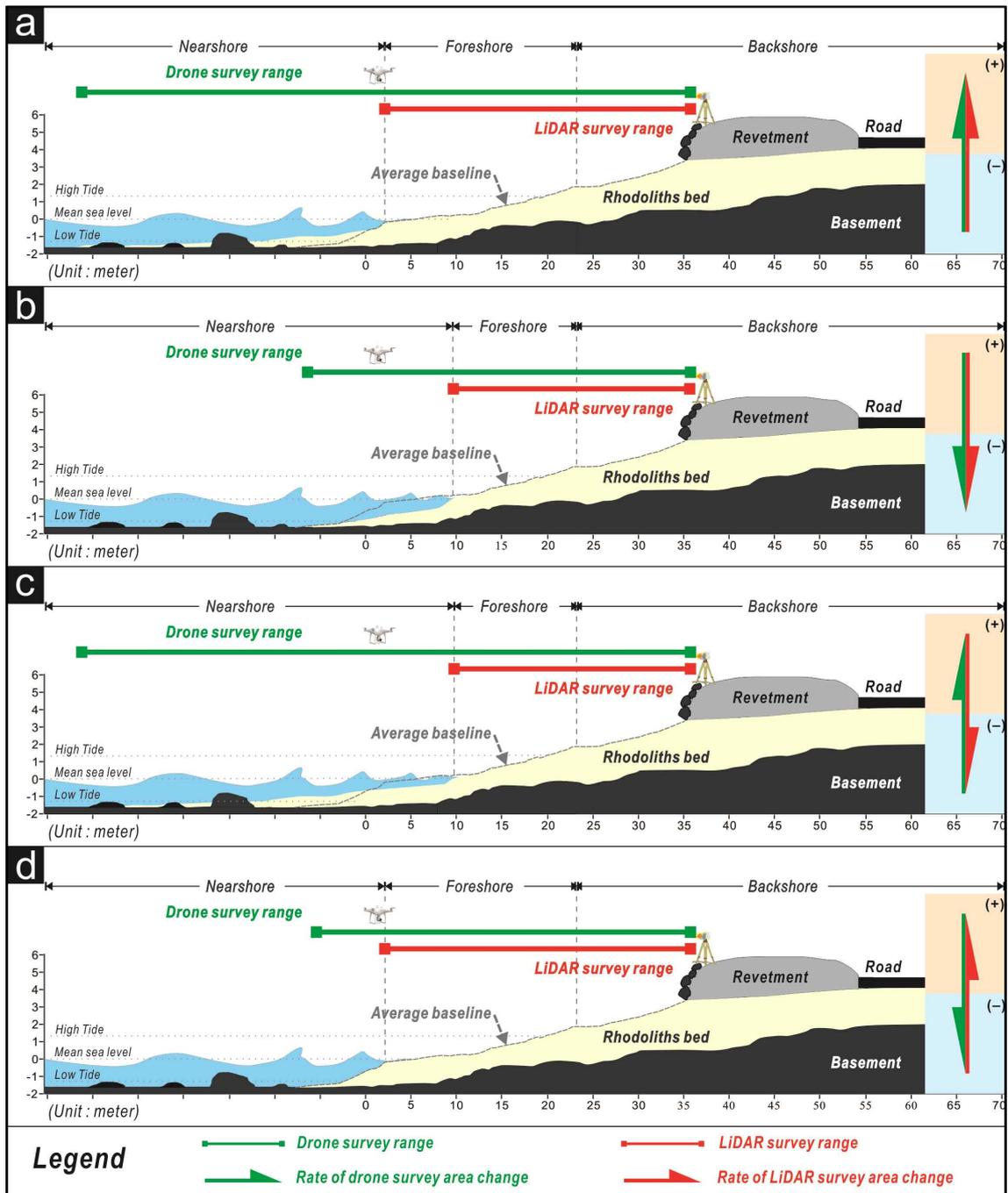


Fig. 5-21. Topographic change models of the Udo Rhodolith Beach in association with 4 types of beach area change shown in Fig. 5-20.

5.4. 해빈 세부지형 변화

5.4.1 평상환경(계절별) 해빈 지형 변화

1) 춘계-하계 변화

춘계-하계의 변화를 볼 수 있는 라이다 자료는 2019년 4월부터 2020년 8월에 취득된 자료가 유일하며, 이에 대한 변화 양상을 확인하기 위하여 2020년 4월에서 2020년 8월 드론 측량 자료를 활용하였다. 라이다 측량에서는 춘계-하계 동안 부피가 7.1% 증가하였는데, 이는 전 과업기간 동안 나타난 양(+)의 계절 변화 중에서 가장 큰 증가율이다.

드론 모니터링에서는 2019년 춘계기간은 해빈 면적구간이 소폭 상승하였으며, 이는 남부에 위치한 4구역에서 약 403 m² 증가에 따른 변화로서 타 구역은 거의 변화가 나타나지 않았다. 2021년에는 주로 봄 기간 동안 대체적으로 퇴적물 양이 감소하는 경향이 나타나고 6월에서 7월, 하계로 변화되는 기간에는 면적이 증가하는 경향이 나타난다(Table 5-6).

특히 4개의 모든 해빈구역에서 부피가 증가된 것으로 나타나는데, 홍조단괴 공급지가 연안역임을 감안하면 이는 외해역으로부터의 활발한 퇴적물 유입에 따른 결과로 해석되며, 춘계-하계는 퇴적물의 유입이 왕성하게 이루어지는 시기라고 추정된다. 이 시기의 나타나는 해빈의 세부 지형변화로 특징적인 점은 만입부(각 해빈구역)의 남쪽에 대체로 침식이 일어나며 그 나머지 북쪽과 중앙부에서는 퇴적이 우세하게 일어나는 ‘북적남식’의 양상이며 드론 영상자료에서도 북쪽 구역은 침식, 남쪽 구역은 면적 보존(퇴적)이 되는 것으로 확인된다.

특히 침식부는 전안과 후안의 경계부를 중심으로 분포하며, 그 나머지 부분은 모두 퇴적물 집적으로 고도가 상승하였다. 이는 바람이나 높은 파고의 이상과량으로 인해 거의 대부분의 전안 상단부가 침식이 되고, 이후에 퇴적물이 활발하게 유입되면서 복원되는 과정에서 구역의 남단부는 암반 돌출대와 조류나 해파의 이동방향의 영향으로 퇴적물이 충분히 공급되지 못해 침식지형이 그대로 남은 결과로 보인다.

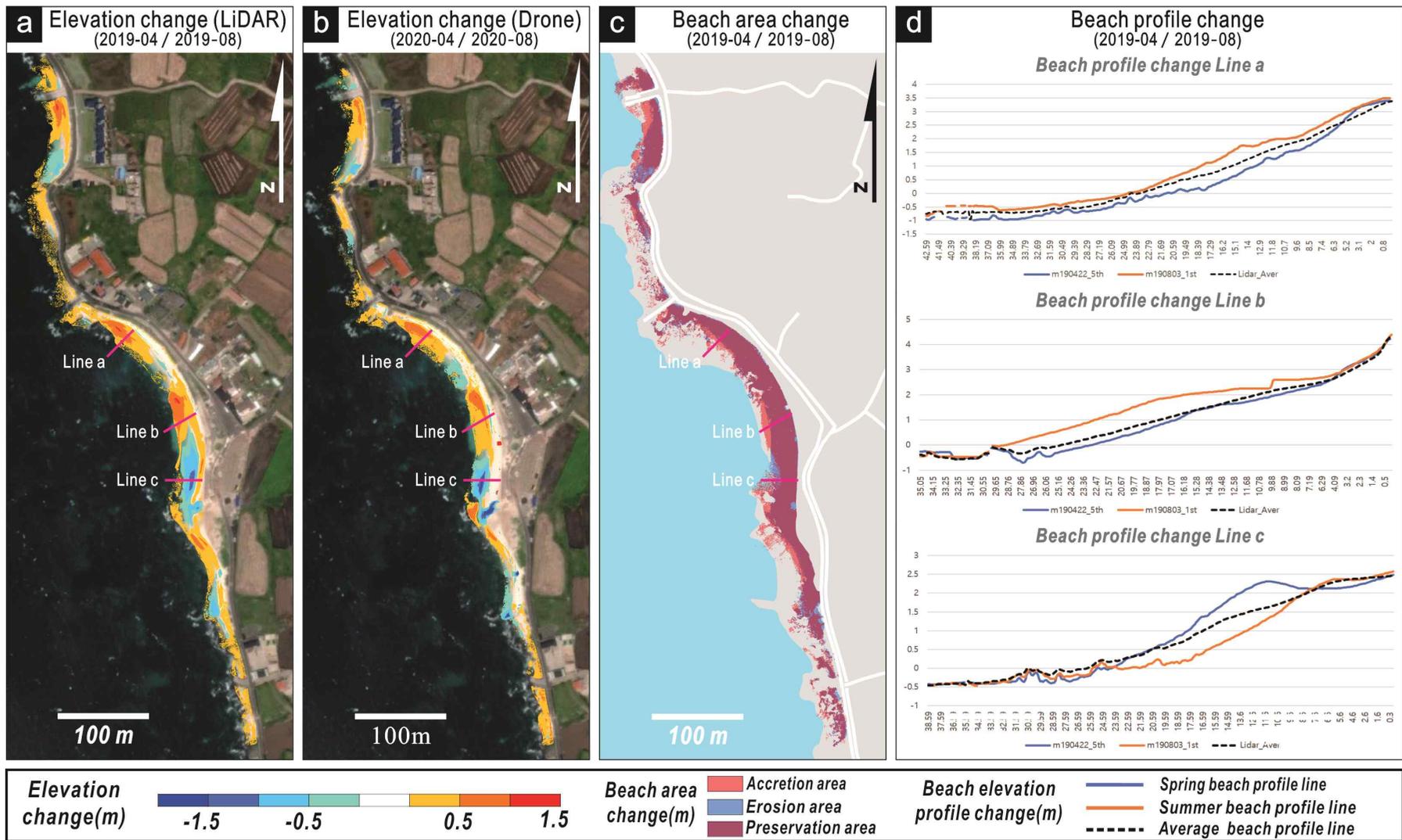


Fig. 5-22. Morphological change between spring and summer seasons in the Udo Rhodolith Beach.

2) 하계-추계 변화

이 시기의 라이다 측량 자료는 모든 조사연도에 취득되었는데, 해빈 부피는 2018년도에는 0.1% 감소한 것으로 나타나기 때문에 거의 변화가 나타나지 않는 것으로 해석된다. 해빈 면적 또한 2018년도 1% 증가, 2019년도 0.6% 감소로 변화가 거의 없다. 이와 같은 조사결과로 볼 때, 해빈의 부피와 면적은 모두 1% 이하의 증감을 보임에 따라 이 시기에는 해빈의 규모가 거의 변하지 않고 안정적으로 유지된다고 할 수 있다.

드론 영상 자료 중 하계 기간 자료는 2018년과 2019년 각각 1개 자료가 제한적으로 취득되었으나, 2021년에는 모든 기간(6, 7, 8월) 자료가 축적되어 하계기간에서 퇴적물 이동 경향 파악이 가능하다. 6-7월 기간은 퇴적물이 모두 증가되는 시기로서 세부구역별로 각각 8%, 9%, 3%, 4% 면적이 증가함에 따라 전체적으로 약 4% 면적 증가를 보이는 반면, 7~8월 기간은 세부구역별로 4%, 15%, 4%, 8% 면적 감소가 발생함에 따라 약 6% 전체 면적이 감소하는 경향이 나타난다. 이에 따라 주로 6월에 퇴적물 증가하고 7월부터 퇴적물 유실이 발생하는 것으로 해석된다.

이 시기의 구역 내의 지형변화는 조사연도에 따라 퇴적 및 침식 범위 차이는 있으나 대체적으로 1, 2, 4구역 등 소규모 해빈구역에서는 뚜렷한 '복식남적'의 특징을 보이는 반면, 3구역에서는 해수면과 닿아 있는 하부 전안에서의 퇴적물 유실이 광범위하게 나타나며 상부 전안과 후안에서는 패치(patch) 형태로 퇴적부와 침식부가 교호하여 분포한다(Fig. 5-25). 이러한 해빈지형의 변화양상은 춘계-하계의 지형변화(Fig. 5-24)와 거의 정반대의 양상, 즉 퇴적부와 침식부의 위치가 서로 뒤바뀌어 나타나는 점이 매우 특이하다.

3) 추계-동계 변화

추계-동계 변화자료는 2016년과 2020년 취득된 모든 라이다 측량자료로부터 확인할 수 있는데, 해빈 부피는 2016년도에는 1구역을 제외한 모든 구역에서 최대 4.4%까지 감소가 나타나서 총 부피는 5.9% 감소하였고, 2020년도에는 구역별로 -1.7~+1.4%의 증감이 나타났지만 총 부피는 거의 변화가 없었다. 결론적으로 추계-동계에 해빈의 부피는 연도에 따라 감소하거나 거의 변화가 없는 것으로 종합할 수 있다.

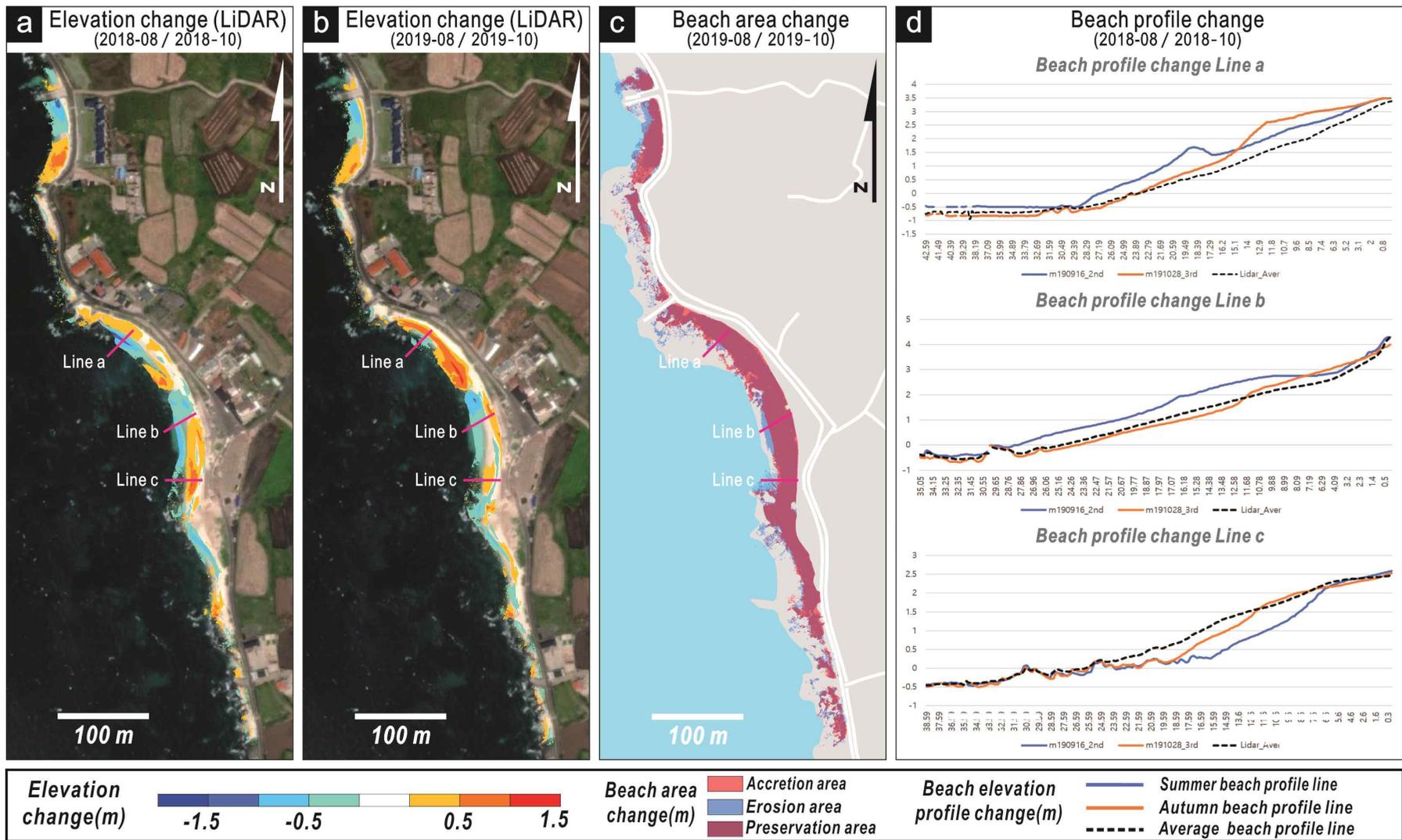


Fig. 5-23. Morphological change between summer and autumn seasons in the Udo Rhodolith Beach.

드론 면적 분석자료에서는 2018년 추계 기간 동안 약 2.6% 면적이 증가 하였는데, 세부구역별로 1, 3, 4구역에서 각각 145 m², 625 m², 76 m² 면적 증가, 2구역은 398 m² 면적이 감소하였다. 2019년 추계자료에서는 해빈 총 면적 변화는 발생하지 않은 것으로 보이나, 세부구역별로 1, 2, 4구역에서 각각 50m², 46 m², 100 m² 면적 증가, 3구역은 194 m² 면적 감소가 발생함에 따라 세부 구역별 지형변화가 발생한 것으로 확인되었다.

이 시기의 구역 내의 지형변화는 2016년도와 2020년도의 양상이 매우 유사하게 나타난다. 즉, 모든 구역에서 뚜렷한 '북식남적'의 특징을 보이는데, 특히 침식부는 호안과 인접한 상부 후안에 집중되는 경향을 볼 수 있으며, 3구역에서는 남쪽 일부를 제외하고는 거의 모든 구역에서 유실이 광범위하게 일어났으며, 드론 영상 추계 기간자료에서도 북에서 남으로의 퇴적물 이동이 확인된다(Fig. 5-26). 다만, 퇴적물 유실의 두께와 범위는 2020년도 보다 2016년도에 더 크고 넓게 나타나는데, 이로 인해 2016년도에 부피 감소가 특히 더 심하게 야기된 것으로 보인다,

2016년부터 2020년까지 지형 측량 자료와 드론 영상 자료를 통해 해빈 정단-호안 간의 거리 측정을 하였는데, 3구역 북부구간은 동계-춘계 시기에 평균 약 3.89 m로 측정되어 3구역에서 후안의 폭이 최소로 나타난다. 후안의 폭이 가장 짧았던 시기는 2017년으로서 3구역 북부 및 중앙부 구간에서 후안 폭은 1.25~1.95 m로서 파랑 에너지가 호안에 닿을 정도로 축소된 시기이다(Table 5-8).

4) 동계-춘계 변화

해빈 부피는 2016년도에 2구역을 제외한 모든 구역에서 최대 7.6%까지 감소가 나타나서 총 부피는 추계-동계에 이어서 4.4% 감소하였고, 2020년도에는 구역별로 -0.7~+0.7%의 증감이 교차하면서 총 부피는 0.1% 감소하였다. 이와 같은 조사 결과로 볼 때, 동계-춘계에 해빈의 총 부피는 다소 정도의 차이가 있기는 하지만 대체로 감소하는 경향을 보이는 것으로 종합해볼 수 있다.

드론 영상 동계기간 퇴적물 변화는 두 개년도에서 2/3구역 경계부를 기준으로 북쪽 구역으로의 퇴적물이 증가하였으며 남쪽 구역은 2018-2019년에는 상대적으로 미약한 퇴적, 2019-2020년 침식되는 변화양상을 보이는 것으로 요약해볼 수 있다.

2016년부터 2020년까지 라이다 측량 및 드론 영상 자료를 통해 3구역에서의 정

Table 5-8. Seasonal change of backshore width (m) in zone 3.

Class		Northern section (Line a)	Central section (Line b)	Southern section (Line c)
Spring	2017	4.28	15.32	14.31
	2019	3.40	14.33	15.45
	2020	4.19	8.76	20.70
	Average	3.96	12.80	16.82
Summer	2018	10.35	19.05	6.38
	2019	13.41	18.85	5.78
	Average	11.88	18.95	6.08
Autumn	2016	10.12	11.10	14.21
	2018	13.75	9.97	11.93
	2019	12.83	9.99	10.26
	Average	12.23	10.35	12.13
Winter	2017	1.25	1.95	22.39
	2020	6.53	7.69	14.43
	Average	3.89	4.82	18.41

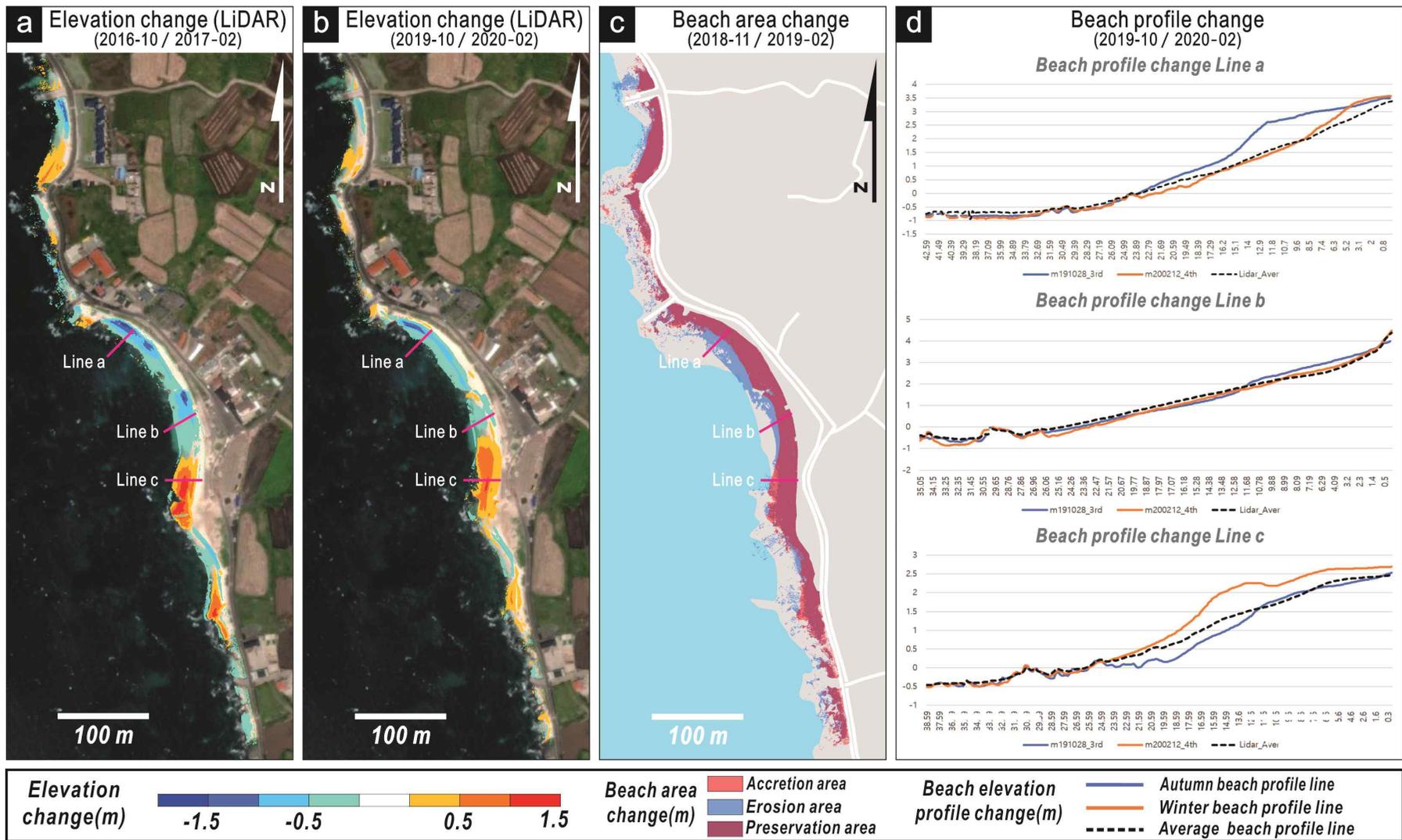


Fig. 5-24. Morphological change between autumn and winter seasons in the Udo Rhodolith Beach.

단-호안 간의 거리 측정 결과, 북부구역은 동계-춘계 기간에 평균 약 3.89~3.96 m로 최소로 나타나며, 특히, 북부 및 중앙부 구역은 동계-춘계 기간 동안 약 1 m로서 겨울철 높은 파고를 갖는 파랑에너지가 전안에 직접 영향을 미치고 있음이 확인된다.

한편, 해빈지형은 2020년도 이전 시기(추계-동계)의 양상과 거의 유사하게 ‘북식남적’의 특징과 3구역에서의 광범위한 퇴적물 유실이 나타난다. 하지만, 2016년도에는 이와는 전반적으로 반대의 양상을 보이는데(Fig. 5-27), 이는 2019년도 춘계-하계의 해빈 확장기의 양상과 매우 유사한 것이다. 두 개의 자료의 차이는 춘계 시기에 조사된 날짜가 약 1개월의 차이가 발생하는데, 2020년에는 조사기간까지 동계기간 이어진 북서풍이 우세하였으며, 반면에 2017년도에는 북서풍에서 남동풍으로의 변환에 따라 나타나는 차이로 해석된다.

5.4.2 폭풍환경(태풍별) 해빈 지형 변화

연구기간 동안 태풍 후 지형변화 자료는 라이다 측량에서 차바(2016년 10월), 솔릭(2018년 9월), 링링(2019년 9월) 등 3개의 태풍 후 지형변화 자료가 취득되었으며, 드론 영상 자료에서는 마이삭(2020년 8월), 오미스(2021년 8월), 찬투(2021년 9월) 자료가 취득되었으나, 지형변화를 파악할 수 있는 사진측량 자료는 마이삭이 유일하다.

1) 태풍 차바 시기 지형 변화

태풍 차바 내습 후에 실시된 라이다 측량결과, 해빈 1, 2구역에서는 퇴적물 침식으로 인하여 부피와 면적 모두 감소하는 형태가 나타나며, 남쪽에 위치한 3, 4구역에서는 퇴적물이 유입되어 부피와 면적이 증가하였다(Table 5-9). 결과적으로 해빈의 전체 면적은 변화가 거의 없었지만, 부피는 태풍 내습 전 보다 2.0% 증가하였다. 라이다 측량 지형변화 자료(Fig. 5-28a)에서는 1구역 중앙부 전안에서 50 cm 이하로 부피 감소가 발생하였으며, 구역의 남북 경계부와 후안에서는 미약하게 퇴적물이 집적되었다. 2구역에서 침식은 주로 구역의 중심부와 북부 전안에서 대부분 50 cm 이하로 발생하였고, 남부구역에서는 전안 전단부에 위치한 돌출 암반대 사이에 국지적으로 퇴적물이 집적되었다. 3구역에서는 중앙부 전안에서 침식이 우세

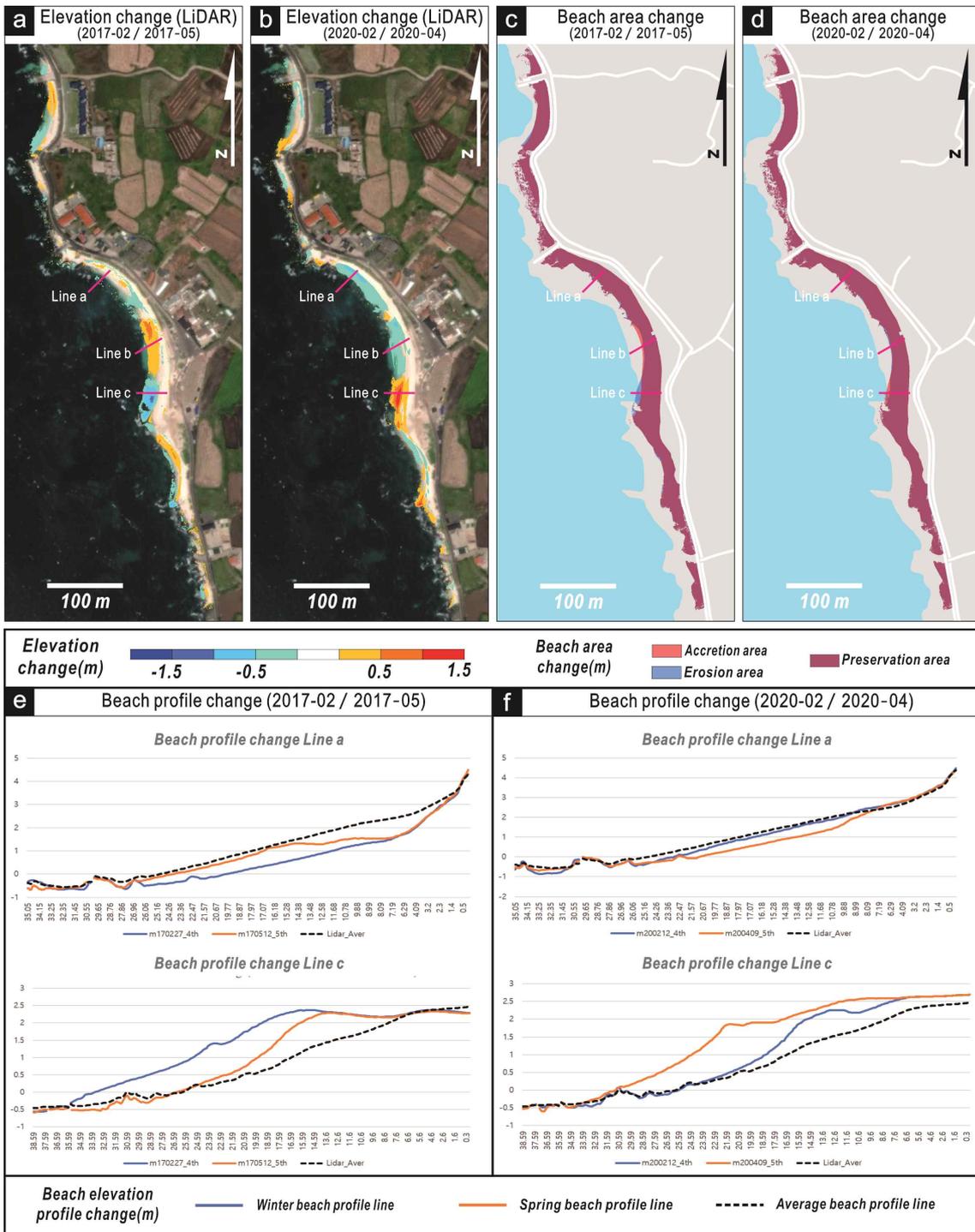


Fig. 5-25. Morphological change between winter and spring next year in the Udo Rhodolith Beach.

하게 나타났으며, 그 외 지역에서는 퇴적물이 집적이 확인되는데, 특히 해변 후안을 중심으로 퇴적물 두께가 최대 1 m 까지 증가하였다(Fig. 5-28a). 4구역에서는 전안 전단부를 중심으로 표고 증가가 뚜렷한 반면, 북부구간의 전안 상단부 일부와 남부구간의 내륙 경계에 위치한 후안을 따라서는 부분적으로 퇴적물 침식이 확인된다(Fig. 5-28a).

2) 태풍 솔릭 시기 지형 변화

태풍 솔릭 내습 후에 해변의 전체 부피는 태풍 통과 전에 비해 약 1.4% 부피 감소가 발생하는 것으로 분석되었다(Table 5-9). 세부적으로 보면, 4구역 전체, 1, 3구역 남부에서는 퇴적물 유실이 발생하였으며, 대조적으로 1, 3구역의 북부구간에서는 퇴적물 집적으로 지형 고도가 상승되었다(Fig. 5-28b). 1구역 북부구간에서는 전안 해변면이 퇴적물 집적으로 0.1~0.7 m 정도 고도가 상승하였으며, 반면에 남부구간에서는 유사한 정도(0.1~0.7 m)로 침식이 발생하였다. 2구역에서는 전안 전단부를 따라 0.1~0.5 m의 고도 상승이 발생하는데 비해 호안과 맞닿은 전안 후단부에서는 미약한 침식이 나타났다. 3구역에서는 주로 북부구간에서 전안과 후안의 고도가 최대 2 m 상승하였는데, 반대로 중앙부 및 남쪽구역은 일부 후안을 제외하고 대부분 지역에서 퇴적물이 유실되어 침식이 발생하였다(Fig. 5-28b). 한편, 해변 단면은 3구역 북부구간에서 태풍 이전에 정단이 호안에서 약 10 m 구간에 위치하고 있었으나 태풍 후에는 퇴적물이 집적되어 해안선이 전진하게 되어 호안에서 약 27 m 거리, 평균해수면 기준 고도 2.0 m 에 위치하게 된다(Fig. 5-28f). 반면에, 3구역 중앙부와 남부구역에서는 태풍 전에 정단이 발달하고 계단형태의 단면을 보였던 곳에서는 기존 정단이 호안에서 약 8 m 정도 위치에 발달하였으며, 태풍 후 정단이 내륙 쪽으로 3 m 후퇴하였으며 해변 폭이 좁은 곳에서는 기울기가 일정한 경사로(ramp) 형태의 단면으로 변화되었다(Fig. 5-28f). 4구역에서는 전구간에서 최대 1.5 m, 평균 0.5 m 정도의 침식이 발생하였고(Fig. 5-28b), 이로 인해 해변 부피도 태풍 전 시기에 비해 1.4% 감소하였다(Table 5-9).

3) 태풍 링링 시기 지형 변화

태풍 링링이 통과 후 실시된 라이다 측량자료에서 해변의 부피는 이전 시기에 비해 2.5% 증가하였으며, 전 구역에서 태풍 전 대비 0.5~3.5%의 증가를 보인다(Table 5-9). 부피변화 양상은 솔릭 시기와 유사하게 퇴적은 각 구역 북부구간에

우세하고 침식은 남쪽 구간에 주로 발달하는 ‘북적남식’의 지형변화 양상이 2구역을 제외한 모든 구역에서 발생한다(Fig. 5-28c). 1구역에서는 해빈의 부피가 2.6% 정도 증가하였으며, 지형변화는 북부구간 전안 상단부에서 10~50 cm 고도 상승이 발생하였으며, 반대로 남쪽구간 전안 상단부에서 유사한 규모의 퇴적물 유실이 발생하였다. 2구역에서는 대체로 퇴적물 집적이 우세하게 발생하였는데, 북부구간 경계 후안에서의 국지적인 침식이 확인된다. 3구역에서는 링링 통과 이전 대비 3.5% 부피 증가가 확인되었는데, 북부구간에서 전안과 후안 모두에서 수 십 cm 정도의 퇴적물 집적이 발생하였고, 전안 상단부에는 정단이 형성되면서 1 m 가까이 고도가 상승되었다(Fig. 5-28c). 반면 중앙부 및 남부구간 전안에서는 전반적으로 침식이 발생하여 해빈면 고도가 최대 1 m 정도 하강하였으며, 후안을 따라 일부 구역에서 부분적으로 퇴적물이 집적되는 현상도 나타난다(Fig. 5-28c). 한편, 4구역의 부피는 0.5% 증가하여 대규모의 변화는 발생하지 않았으나, 세부지역으로 보면, 전안을 따라 국지적으로 50 cm 이하의 고도 하강이 측정되었다(Fig. 5-28c). 다만 4구역 북부구간 전안 상단에 좁은 폭으로 퇴적물이 집적됨에 따라 정단이 뚜렷하게 형성되었다(Fig. 5-28c).

4) 태풍 마이삭 시기 지형 변화

태풍 마이삭이 통과 후 실시된 드론 측량결과, 해빈 부피는 모든 구역에서 감소하여 이전 시기에 비해 5.7% 정도 부피가 감소 폭을 보이며, 이는 4개의 태풍 시기 중에서 가장 큰 폭의 지형변화를 반영한다(Table 5-9). 1구역에서는 북부구간 전안과 후안에서 퇴적물 유실이 우세하게 발생하였으며 반면 남부구간 전안 후단부-후안 지역에 퇴적물들이 집적되었다. 2구역에서는 중앙부 일부 제외한 모든 구간의 후안을 중심으로 퇴적물 유실이 우세하게 발생하였다. 3구역은 이전 3개의 태풍 시기에 부피가 증가하였으나 마이삭 통과 이후에는 해빈 부피가 6.0% 감소하였다. 구역 내 세부지형 변화는 태풍 차바 통과 후 지형과 유사하게 나타나는데, 3구역 중앙부의 전안에서 침식으로 표고가 최대 1 m 이상 낮아진 반면, 그 외구간에서는 퇴적물이 집적되어 고도가 상승되었다(Fig. 5-28d). 다만 남부구간의 후안과 일부 전안에서는 국지적으로 퇴적물 유실이 발생하였다. 한편, 4구역은 해빈 부피가 태풍 전 대비 5.6% 감소하였는데, 북부 일부 구간을 제외하고 전안과 후안 모든 구간에 걸쳐 퇴적물 침식이 광범위하게 발생하여 최대 1 m 이하의 고도하강이 나타났다(Fig. 5-28d).

Table 5-9. Rate of volume and areal changes during typhoons.

		Chaba	Soulik	Lingling	Maysak
Zone 1	Volume change (%)	-2.9	-4.6	+2.6	-4.0
	Areal change (%)	-10.8	-7.7	-0.6	-6.6
Zone 2	Volume change (%)	-4.4	-1.0	+1.9	-6.3
	Areal change (%)	-2.2	-0.9	+0.4	-2.2
Zone 3	Volume change (%)	+2.9	+4.6	+3.5	-6.0
	Areal change (%)	+1.3	-0.5	0	-4.7
Zone 4	Volume change (%)	+4.6	-9.6	+0.5	-5.6
	Areal change (%)	+0.3	-0.7	-0.2	-0.6
Entire beach	Volume change (%)	+2.0	-1.4	+2.4	-5.7
	Areal change (%)	-1.3	-1.8	-0.1	-3.7

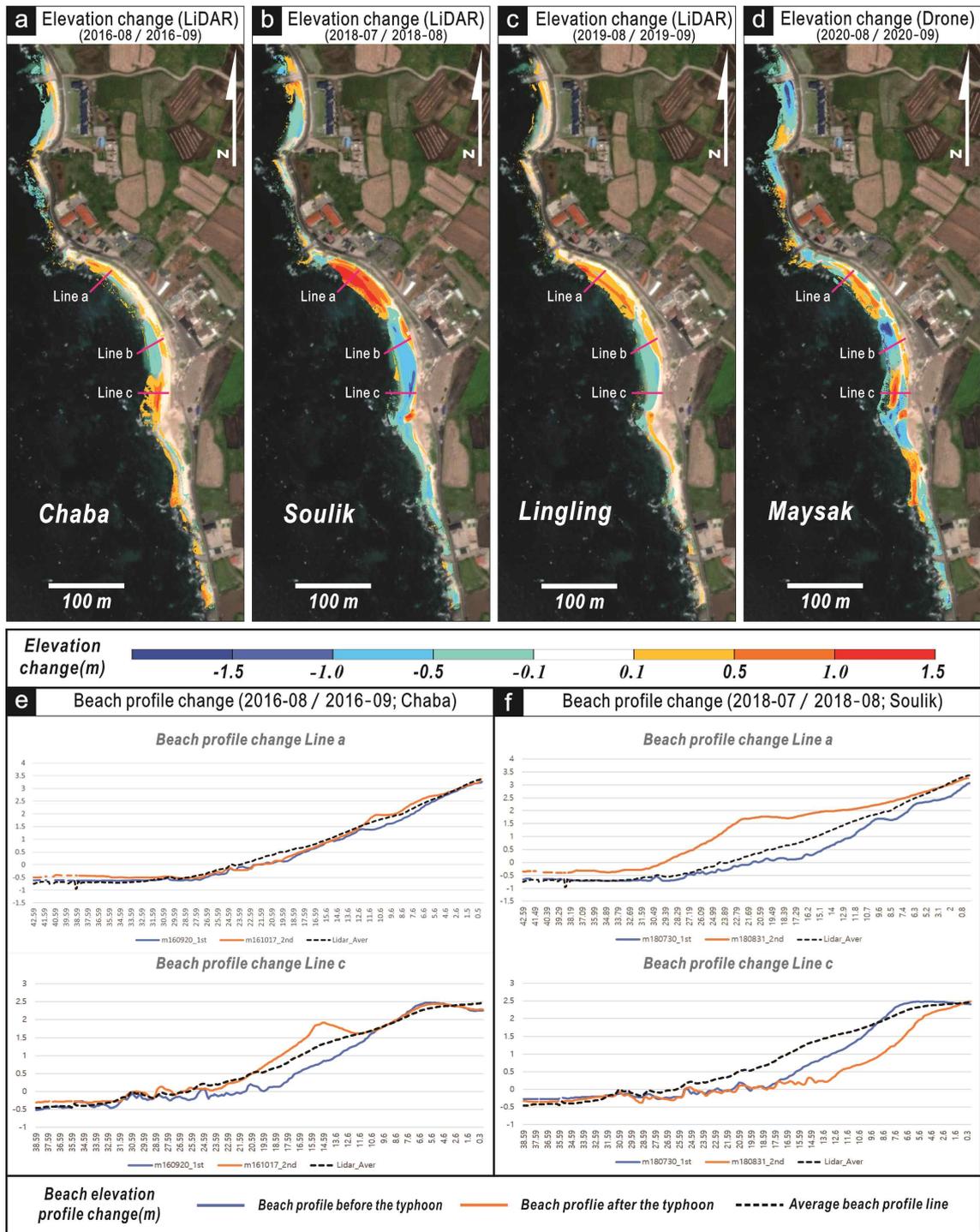


Fig. 5-26. Elevation and beach profile changes before and after typhoons.

5.5 소 결

2016년 9월부터 2021년 10월까지 5년 1개월 동안 라이다를 이용한 홍조단괴 해빈의 평균 측량부피는 총 24,076 m³, 면적은 총 15,720 m²로서, 가장 규모가 큰 3구역이 부피로는 50%, 면적으로는 47%를 차지하고 있다(Table 5-4, 5-5). 최대 부피 시기는 2020년 2월(25,474 m³)이었으며, 최소 부피 시기는 2017년 5월(22,986 m³)로서 편차는 2,488 m³이다(Fig. 5-27). 측량면적의 최대값은 2020년 4월(16,099 m²)이며 최소값은 2018년 8월(15,312 m²)로서 787 m²의 편차를 보인다. 한편, 드론을 이용하여 해빈과 인근 연안역에 대한 퇴적물 분포면적을 분석하였는데, 조사기간 동안 분포면적의 최대값은 2018년 10월에 기록된 17,871 m²이고 최소값은 2021년 10월에 기록된 12,722 m²로서 5,149 m²의 편차가 나타난다. 이는 평균값을 기준으로 하면, 약 18%의 범위에서 변화를 보인 것이다. 전 조사기간의 변화추세를 보면 전체 면적과 구역별 면적 모두 감소하는 양상을 보이며(Fig. 5-13), 2018년도 최초 조사와 2021년도 최종 조사 결과를 비교해보면 전체 면적은 20.0%(3,199 m²) 감소하였고 특히 4구역은 면적이 45% 축소되었다(Table 5-6). 이러한 면적 감소의 추세는 단기적(월별)으로는 확장과 축소가 반복되는 양상을 보이지만 장기적으로 해안선과 맞닿는 하부 전안이 육지 쪽으로 후퇴하며 조하대 연안역 및 전안 전단부 노출된 기반암 사이의 분포하는 퇴적물들의 유실된 결과로 해석된다(Fig. 5-14).

해빈 부피와 면적의 계절별 변화는 대체로 춘계-하계, 하계-추계 기간 동안 해빈 규모는 증가하는 경향을 나타내며 반면에 추계-동계, 동계-춘계 기간은 해빈 규모가 감소하는 경향이 우세하다. 한편, 홍조단괴 해빈의 규모는 최초 측량치를 기준으로 부피는 1.9% 증가한 반면, 면적은 2.5% 감소한 것으로 분석되었는데, 이는 해빈 퇴적물 총량이 늘어났음에도 불구하고 해빈 퇴적물의 분포면적은 오히려 줄어들었다는 것을 의미한다.

홍조단괴 해빈 세부지형 변화는 ‘북적남식’양상과 ‘북식남적’형태 두 가지 형태로 구분되는데, ‘북적남식’ 양상은 퇴적부가 각 구역 북부구간에 발달하고 침식부는 남부구간에서 우세하게 나타난다. 해빈 최대 점유구역인 3구역에서는 이러한 양상이 교호하게 나타나는데, 북부에서 남부방향으로 퇴적-침식-퇴적-침식 양상이 뚜렷하게 나타난다(Fig. 5-24). 이러한 세부지형 변화는 주로 춘계-하계 동안 발생하며, 2017

년 2월-2017년 5월 자료에서도 관찰된다. 반면에 ‘북식남적’ 지형변화 양상은 퇴적부가 각 구역 남쪽에 발달하고 침식부는 북부구간에 나타난다. 위 형태는 계절별로 다소 변화의 차이가 나타나는데, 하계-추계 동안 3구역에서는 북부에서 남부방향으로 침식-퇴적-침식-퇴적 양상에서 추계-동계 동안 침식-침식-침식-퇴적 양상으로 변화한다. 이후 동계-춘계 기간에는 측량 시점에 따라 다르게 나타나지만, 2019년 2월-2019년 4월 자료의 경우 지형변화 양상은 추계-동계 기간과 유사하지만, 퇴적물의 유실 및 집적 양이 다소 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

태풍 시기에 해빈의 규모는 다소 증가하거나 감소하는 등 태풍 사례마다 다르게 나타난다고 할 수 있는데, 대체적으로 태풍이 연구지역 최대 근접 시기에 조석상태가 만조인 경우 해빈 규모가 감소하였으며, 반면에 간조 시기인 경우 규모가 증가하였다. 태풍 시기의 구역 내의 지형변화는 태풍 사례별로 세부적으로는 다르게 발생하지만, 대체로 솔릭과 링링 시기(제주도 서쪽)에는 ‘북적남식’의 특징으로 춘계-하계 기간과 유사한 양상으로 나타난다. 반면에 차바와 마이삭 시기에는 하계-추계, 추계-동계, 동계-춘계와 유사한 형태인 중앙부에서는 침식, 남부구역에는 퇴적이 발생하였다. 구역별로 해빈 지형변화는 1구역에서 차바와 솔릭 통과 시에 전안과 하부 후안에 퇴적물 유실이 우세하게 일어났고, 3구역에서는 솔릭과 링링 통과 시에 구역 남부에서 광범위하게 퇴적물 유실이 발생하였다(Fig. 5-28; Table 5-9).

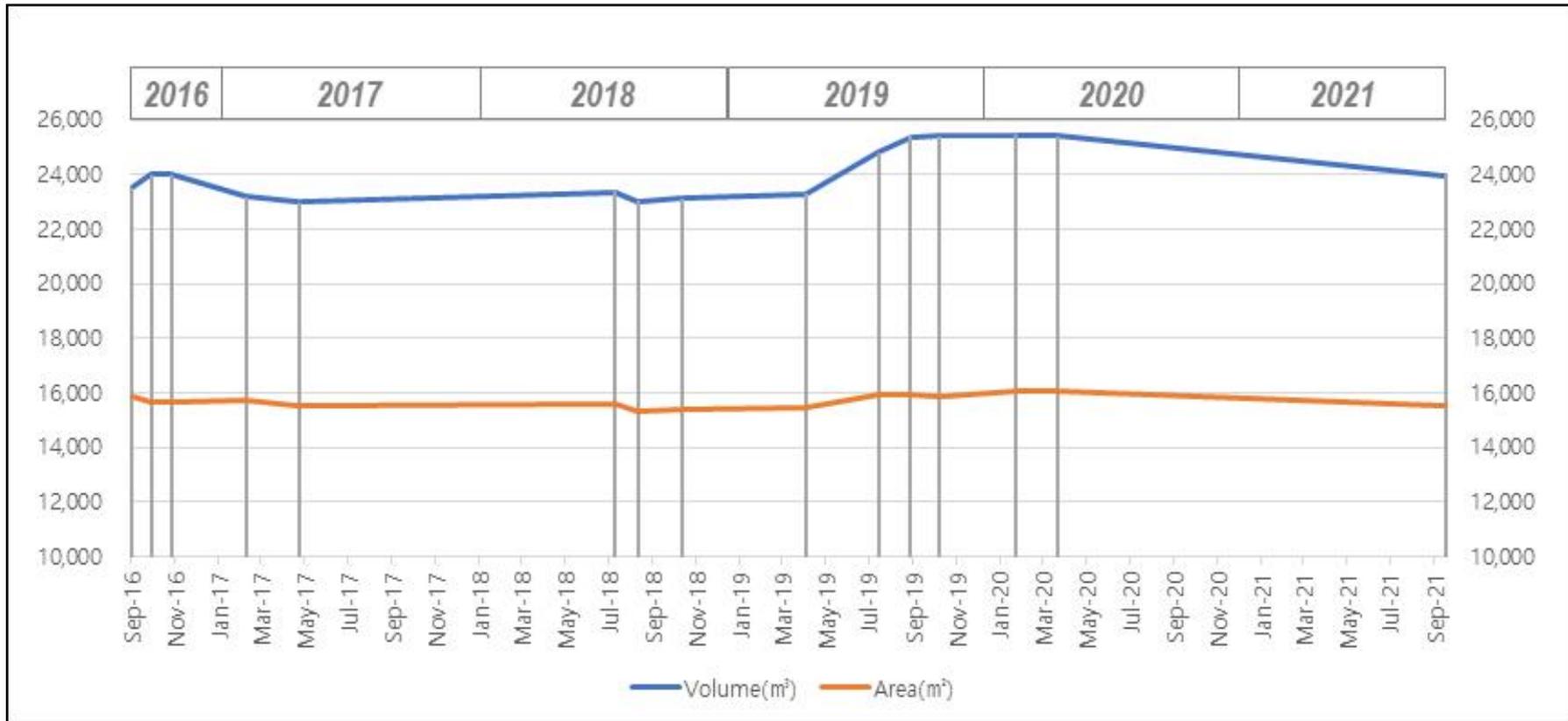


Fig. 5-27. Area (m²) and volume (m³) changes in the Udo Rhodolith Beach from 2016 to 2021.

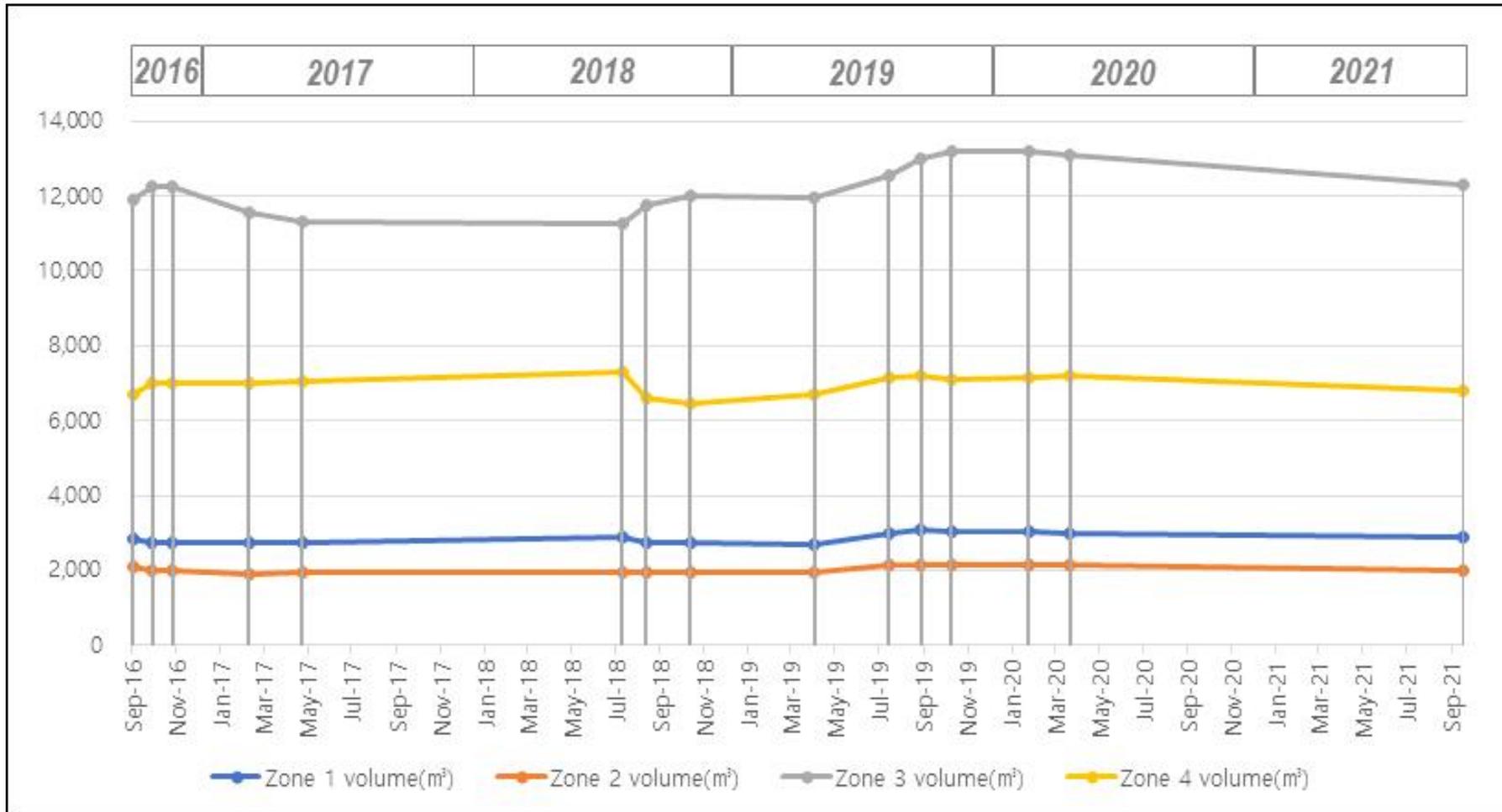


Fig. 5-28. Volume (m³) change by subdivision zones in the Udo Rhodolith Beach from 2016 to 2021.

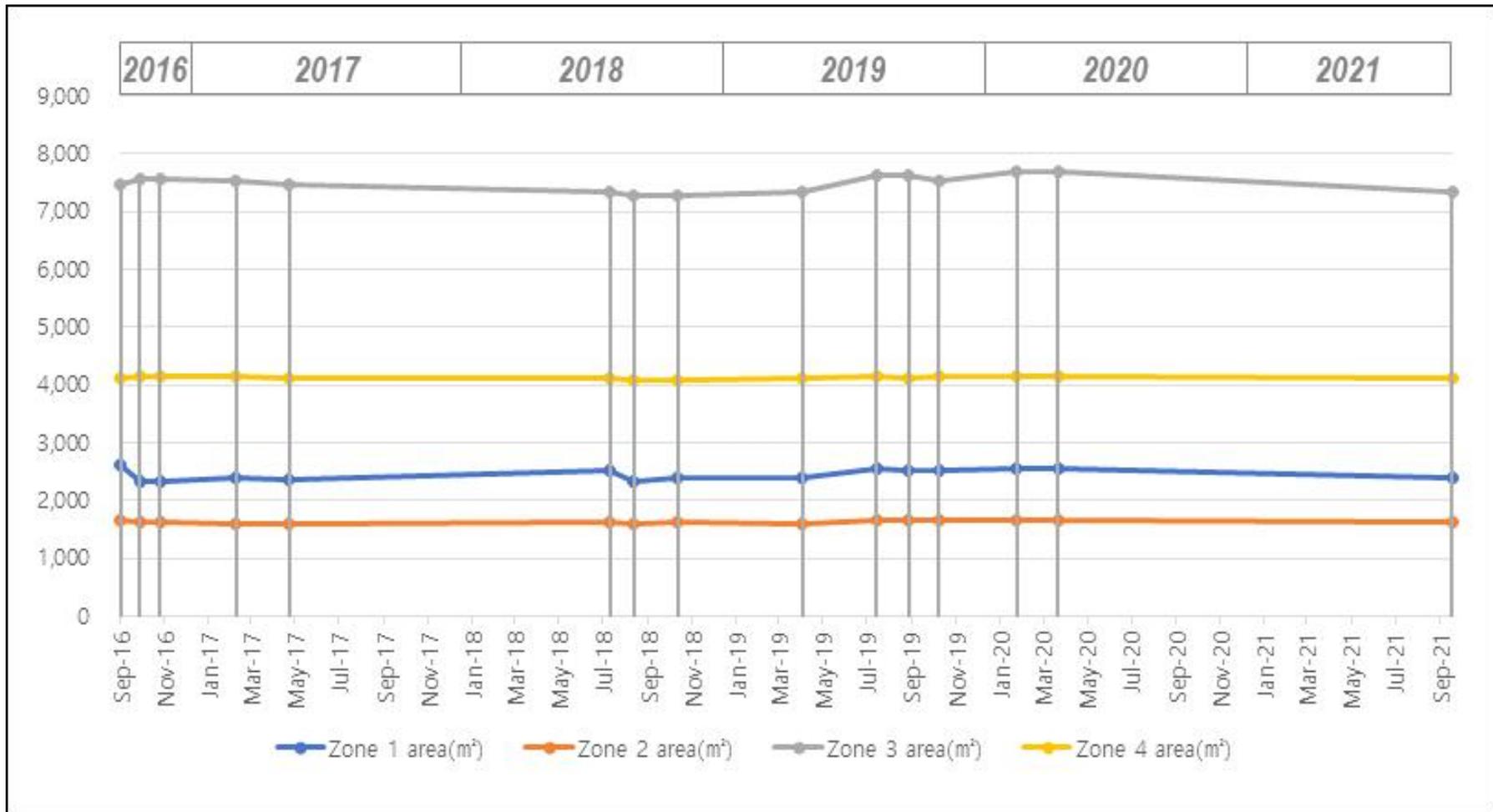


Fig. 5-29. Area (m²) change by subdivision zones in the Udo Rhodolith Beach from 2016 to 2021.

제6장 홍조단괴 해빈의 퇴적물 특성 변화

6.1 서 론

퇴적물 조직특성은 퇴적물이 운반, 퇴적, 침식되는 과정에서 결정되며, 퇴적환경의 변화를 지시한다. 특히 해빈에서는 파랑, 연안류, 조류 등의 해양작용에 의하여 지속적으로 퇴적물 조직특성이 변화하는데, 해빈 퇴적물의 조직특성 분석을 통해 해빈의 침식 및 퇴적에 대한 현상을 이해할 수 있다. 홍조단괴 해빈은 퇴적물의 대부분이 홍조단괴로 구성됨에 따라 희소성을 인정받아 천연기념물로 관리되고 있으며, 퇴적물의 조직특성 및 변화는 해빈을 이해하는 데 있어 중요할 뿐만 아니라 자연유산 관리 측면에서도 중요하다. 특히 홍조단괴는 과거 환경을 지시하는 열쇠층으로의 역할을 하기에 해빈에서의 조직특성 분석은 과거 퇴적환경을 이해하는 데 중요하다. 따라서 본 장에서는 해빈 지형변화와 연계하여 퇴적물 조직 변화에 대하여 서술하고자 한다.

6.2 연구 시료 및 방법

6.2.1 연구 시료

본 연구에서는 홍조단괴 해빈의 퇴적물의 조직특성 및 시기별 변화 양상을 규명하기 위하여 퇴적물에 대한 입도, 분급도, 기원별 입자구성 분석을 실시하였으며, 시료 채취는 해빈의 계절별 조직특성을 위하여 해수면 상부의 전안 및 후안을 대상으로 총 20개 정점을 선정하여 표층 5 cm 이내의 퇴적물을 실험용 스폰으로 채취하였다(Fig. 6-1; Table 6-1).

퇴적물 시료 채취는 2016년 8월을 시작으로 2020년 4월까지 춘계, 하계, 태풍 후, 추계, 동계 기간에 이루어졌으며, 지형변화에 따른 퇴적물의 조직특성을 파악하기 위하여 라이다 지형 측량과 동시에 진행하였다(Table 6-2).

6.2.2 입도분석

입도분석은 냉장 보관된 입도분석용 시료를 상온에 일정 시간 둔 후 과산화수소수를 가하여 유기물을 제거한 다음, 4 Ø 체를 이용하여 모래 크기 이상의 조립입자(>0.063 mm)와 니질 세립입자(<0.063 mm)로 양분한 후 자갈과 모래는 건식 체질법으로, 그리고 니 크기의 입자는 피펫팅법에 따라 입도 등급별 분포를 측정하였다. 최종적으로 퇴적물 시료의 평균입도와 분급도, 왜도는 등급별 누적빈도곡선을 이용하여 Folk and Ward (1957)의 그래프법에 따라 분석하였다.

퇴적물 시료는 입도에 따라 자갈(gravel), 모래(sand), 실트(silt), 점토(clay)로 분류하였으며(Table 6-3), 퇴적물 유형은 자갈, 모래, 니(실트+점토)의 함량비에 따라 자갈(G), 사질역(sG), 역질사(gS), 약역질사((g)S), 모래(S)로 구분하였다(Fig. 6-2). 분급도는 입자의 크기가 균질한 정도를 나타내는 값으로서 1 Ø 이하일 경우 분급의 상태가 양호한 것이고 1 Ø 이상일 경우 분급의 상태가 불량한 것이다. 이에 따라 양호 분급(well sorted), 중간양호 분급(moderately well sorted), 중간 분급(moderately sorted), 불량 분급(poorly sorted)으로 구분하였다(Table 6-4). 왜도는 입자 분포의 대칭을 나타내는 지수로서 그 값이 '0'에 가까울수록 조립질과 세립질이 대칭적으로 분포하는 것이고, ' - ' 값이면 조립한 입자가 많이 분포하는 것이며, ' + ' 값이면 세립한 입자가 많이 분포하는 것이다. 이에 따라 최극양의 왜도(strongly fine-skewed), 양의 왜도(fine-skewed), 중간의 왜도(near-symmetrical), 음의 왜도(coarse-skewed), 최극음의 왜도(strongly coarse-skewed)로 구분하였다(Folk and Ward, 1957).

6.2.3 입자기원 조성 분석

퇴적물의 입자 조성은 육안으로 구분할 수 있는 입자(직경 0 Ø 이상의 조립질 모래와 자갈)의 기원, 즉 홍조단괴, 폐각, 화산암편 등을 분류한 후, 각각의 무게를 측정하여 함량비를 제시하였다.

Table 6-1. Sampling locations for this study.

Sample No.	Location (WGS-84)	Sample No.	Location (WGS-84)
SD-1	33°00'20.8"N / 126°56'29.6"E	SD-11	33°30'08.1"N / 126°56'35.4"E
SD-2	33°30'19.8"N / 126°56'30.0"E	SD-12	33°30'06.5"N / 126°56'36.0"E
SD-3	33°30'18.6"N / 126°56'30.1"E	SD-13	33°30'06.5"N / 126°56'35.5"E
SD-4	33°30'17.9"N / 126°56'29.7"E	SD-14	33°30'05.1"N / 126°56'35.8"E
SD-5	33°30'15.8"N / 126°56'29.6"E	SD-15	33°30'05.1"N / 126°56'35.4"E
SD-6	33°30'12.1"N / 126°56'31.4"E	SD-16	33°30'03.5"N / 126°56'36.3"E
SD-7	33°30'11.2"N / 126°56'33.4"E	SD-17	33°30'02.7"N / 126°56'36.9"E
SD-8	33°30'10.3"N / 126°56'34.5"E	SD-18	33°30'00.4"N / 126°56'37.4"E
SD-9	33°30'09.2"N / 126°56'34.9"E	SD-19	33°29'58.9"N / 126°56'38.0"E
SD-10	33°30'08.1"N / 126°56'35.7"E	SD-20	33°29'57.0"N / 126°56'38.3"E

Table 6-2. Sampling date in Udo Rhodolith Beach.

	Sampling schedule											
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
2016												
2017												
2018												
2019												
2020												



Fig. 6-1. Sampling locations for sediment textural analysis in Udo Rhodolith Beach.

Table 6-3. Grain-size terminology by Friedman and Sanders (1978).

Grain size		Size class	
mm	Φ		
256	-8	Boulder	Gravel
16	-4	Cobble	
4	-2	Pebble	
2	-1	Granule	
1	0	Very coarse sand	Sand
0.5	1	Coarse sand	
0.25	2	Medium sand	
0.125	3	Fine sand	
0.063	4	Very fine sand	
0.031	5	Coarse silt	
0.016	6	Medium silt	
0.008	7	Fine silt	
0.004	8	Very fine silt	
		Clay	Mud

Table 6-4. Classification of the degree of sorting by Folk and Ward (1957).

Sorting Coefficient(σ)	Characterization
<0.35	very well
0.35 ~ 0.50	well
0.50 ~ 0.70	moderately well
0.70 ~ 1.00	moderate
1.00 ~ 2.00	poor
2.00 ~ 4.00	very poor
>4.00	extremely poor

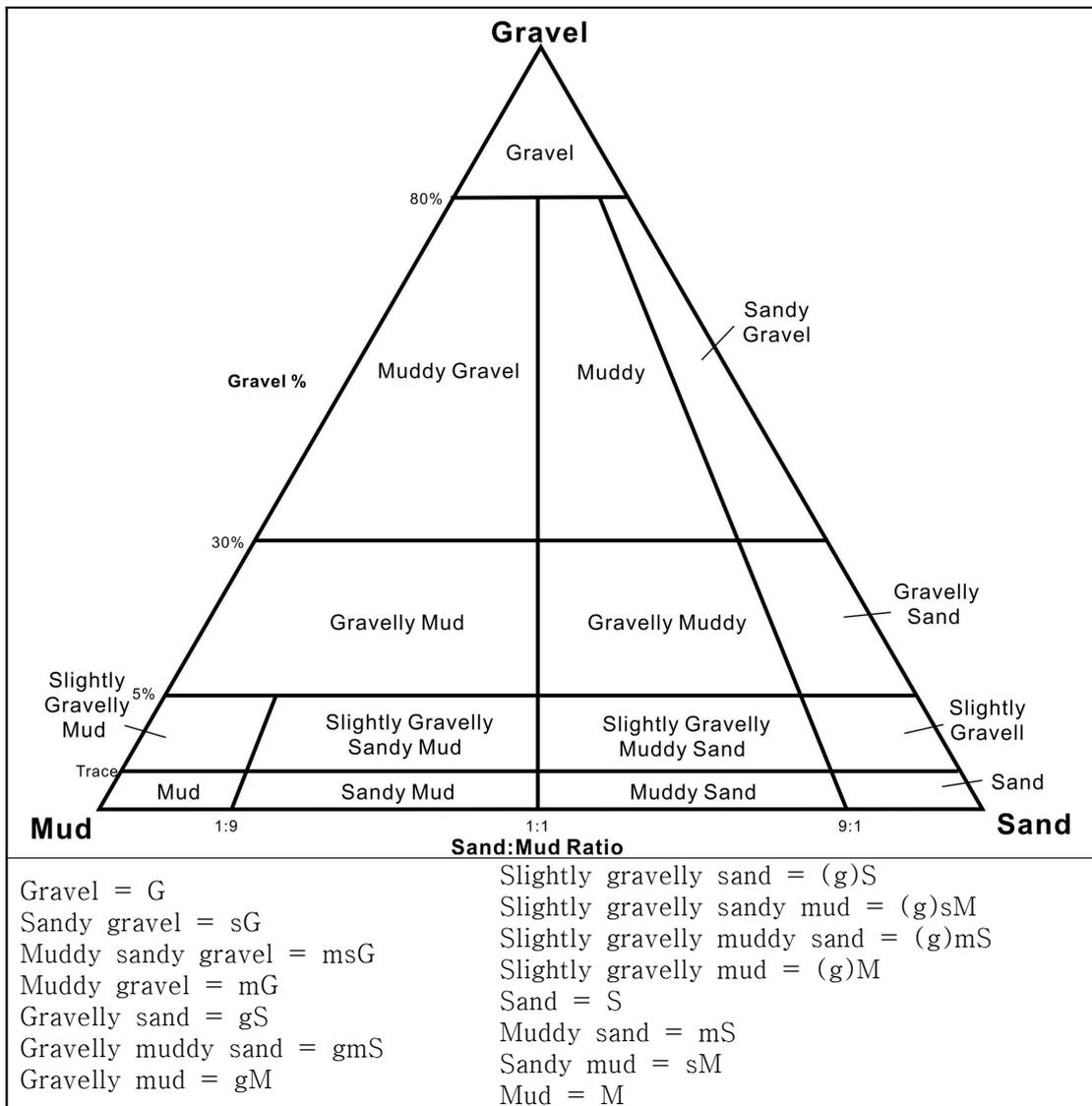


Fig. 6-2. Textural classification ternary diagram and nomenclature by Folk and Ward (1957).

6.3 퇴적물 입자의 조직특성 변화

6.3.1 2016-2017년 해빈 퇴적물 조직특성 변화

2016년 하계(8월)에 채취된 1차 해빈퇴적물의 조직특성 분석 결과(Table 6-5), 평균입도는 1.106~3.027 mm의 범위이다. 퇴적물 입도구성을 보면, 자갈(gravel) 26.6~96.5%, 모래(sand) 3.5~73.4%로 조립입자가 대부분을 차지하고 실트(silt)와 점토(clay)는 거의 포함되어 있지 않다. 따라서 퇴적물 유형은 역(G), 사질역(sG), 역질사(gS)로 분류된다. 분급도는 0.51~1.225 ϕ 범위로 대부분 중간 분급을 보이며, 왜도는 -0.605~0.332의 범위의 음의 왜도로서 다소 조립한 입자들로 나타난다. 전체적으로 각 구역별로 북쪽 정점이 조립질 특성을 보이고 있다. 분급도는 중간양호 특성을 보이고 있으며, 대체적으로 역으로 구성된 정점에서의 분급도가 양호하였으며, 이는 파랑의 영향으로 세립질 퇴적물이 빠져나감에 따라 양호한 분급 특성을 보이는 것으로 해석된다.

태풍 차마 통과 후 10월에 채취된 2차 해빈퇴적물의 조직특성 분석 결과(Fig. 6-3), 평균입도는 0.801~3.96 mm의 범위를 보인다. 퇴적물 입도구성을 보면, 주로 자갈 4.5~99.8%, 모래 0.2~95.5%로 대부분을 차지하고 실트와 점토는 거의 나타나지 않는데, 퇴적물 유형은 역(G), 사질역(sG), 역질사(gS), 약역질사((g)S)로 분류된다. 분급도는 0.376~0.961 ϕ 범위로 중간 양호 분급을 보이며, 왜도는 -0.405~0.59의 범위의 양의 왜도로서 다소 세립한 입자들로 나타난다(Fig. 6-4). 태풍 통과 후 전 구역의 입도가 조립화 되는 경향을 보이고 있으며, 특히, 3구역 후안에서의 퇴적물의 조립화 경향이 특징적이다. 이는 일반적으로 폭풍환경에서 파랑의 영향이 해빈면 전안을 넘어 후안까지 영향을 미치는 요인과 더불어 강한 바람에 의해 후안지역의 세립질 입자들이 이동에 따라 후안 부근이 조립화 된 것으로 해석된다.

2016년 추계(11월)에 채취된 해빈퇴적물의 분석 결과, 평균입도는 0.777~2.924 mm의 범위이다. 퇴적물 입도구성은 주로 자갈 5.3~87.8%, 모래 12.2~94.7%로 대부분을 차지하며, 역(G), 사질역(sG), 역질사(gS) 등의 유형으로 분류된다. 분급

도는 0.357~1.026 ϕ 의 범위로 중간양호 분급을 보이며, 왜도는 -0.608~0.428 범위의 음의 왜도로서 다소 조립한 입자들로 나타난다. 해빈구역에서는 각 구역 남부 퇴적물 정점(SD-2, 4, 15, 16, 20)에서의 조립화되는 경향을 나타내며, 위 구역에서는 분급도가 양호하게 나타난다. 이는 춘계에서 나타나는 조직특성과 반대되는 양상으로 춘계와 추계에 영향을 미치는 파랑의 영향이 반대되는 것으로 해석된다.

2017년 2월말에 채취된 퇴적물 분석 결과(Table 6-5), 평균입도는 0.966~4.725 mm의 범위이다. 자갈 8.5~99.9%, 모래 0.1~91.5%의 범위로 구성되며 니질 퇴적물은 거의 포함되어 있지 않다. 따라서 퇴적물 유형은 역(G), 사질역(sG), 역질사(gS)로 나타난다. 분급도는 0.15~0.88 ϕ 의 범위로 중간양호 분급을 보이며, 왜도는 -0.638~0.729의 범위의 양의 왜도가 특징적이다. 동계조사에서는 이전 추계조사에 비해 구역별로 평균입도 증가 현상이 발생하였으며, 특히, 1구역, 4구역의 입도 증가가 뚜렷하게 관찰된다. 입도 증가와 더불어 분급도 또한 양호하게 변화하였는데, 이는 겨울철 높은 파랑에 의해 파의 에너지가 강하게 해빈면에도달함에 따라 파랑에너지가 해빈면(shoreface)에 전달된 것으로 해석된다.

2017년 5월에 채취된 해빈퇴적물의 분석 결과(Table 6-5), 평균입도는 1.198~4.73 mm의 범위로 나타난다. 주로 자갈(13.1~100%)과 모래(0~86.9%)로 구성되며, 역(G), 사질역(sG), 역질사(gS)로 분류된다. 분급도는 0.149~1.186 ϕ 의 범위로 중간 분급(Moderately Sorted)을 보이며, 왜도는 -0.521~0.593의 범위의 중간의 왜도(Near-Skewed)로써 대부분 중간 크기의 입자들로 나타난다. 동계-춘계기간 동안 조직특성 변화는 1구역, 2구역, 4구역에서 대체적으로 입도가 증가 되었으며, 분급도의 변화는 4구역을 제외한 모든 구역에서 변화가 발생하였다. 3구역 동계조사에서는 남부구역으로의 조립화 경향을 보였으나, 춘계조사에서는 남부구역에서 입도 감소, 북부구역에서 입도 증가의 공간적 조직특성 변화가 나타난다. 이는 파랑의 영향이 동계에서 춘계 기간동안 변화함에 따른 결과로 해석된다.

Table 6-5. Results of sediment texture analysis in Udo Rhodolith Beach between sep. 2016 and may 2017.

Sample point	2016-09		2016-10		2016-11		2017-02		2017-05	
	Mean size (phi)	Sorting (phi)								
SD-1	-0.85	0.74	-1.24	0.38	-0.47	0.44	-0.57	0.50	-0.59	1.11
SD-2	-0.54	0.59	-0.99	0.58	-0.65	0.51	-1.95	0.48	-1.59	0.50
SD-3	-0.15	1.04	-0.65	0.51	0.36	1.03	0.05	0.66	-0.26	1.18
SD-4	-0.34	0.95	0.32	0.83	-0.89	0.62	-1.60	0.51	-1.15	0.79
SD-5	-0.65	1.23	0.14	0.64	-0.21	0.81	-1.57	0.65	-2.24	0.15
SD-6	-1.61	0.65	-1.99	0.45	-0.57	0.51	-1.06	0.58	-1.27	0.78
SD-7	-1.33	0.82	-1.65	0.51	-1.25	0.78	-0.64	0.86	-2.01	0.44
SD-8	-1.08	0.83	-0.92	0.65	-1.04	0.59	-0.02	0.72	-0.27	1.19
SD-9	-0.87	0.66	-1.30	0.77	-0.63	0.65	-0.96	0.57	-0.28	0.29
SD-10	-1.30	0.83	0.00	0.63	-0.23	0.36	-0.09	0.82	-0.30	1.02
SD-11	-0.57	0.61	-1.18	0.77	-0.52	0.73	-0.21	0.79	-1.36	0.84
SD-12	-0.64	0.81	-1.91	0.50	-1.11	0.83	-1.58	0.88	-0.30	0.96
SD-13	-1.60	0.51	-1.21	0.81	-1.31	0.86	-1.01	0.62	-0.61	0.63
SD-14	-1.01	0.62	-1.24	0.82	-0.60	0.63	-1.83	0.65	-1.22	0.83
SD-15	-1.25	0.82	-0.85	0.96	-1.55	0.65	-2.24	0.15	-1.10	0.84
SD-16	-1.30	0.78	-1.85	0.52	-1.50	0.64	-1.45	0.60	-1.64	0.52
SD-17	-1.17	0.83	-1.26	0.80	-0.98	0.63	-1.22	0.77	-0.92	0.64
SD-18	-0.65	0.64	-1.59	0.60	-0.63	0.72	-1.89	0.50	-1.64	0.52
SD-19	-0.64	0.77	0.16	0.52	-0.46	0.56	-0.93	0.87	-1.16	0.86
SD-20	-0.63	0.67	-0.94	0.63	-1.31	0.89	-1.84	0.64	-1.94	0.49

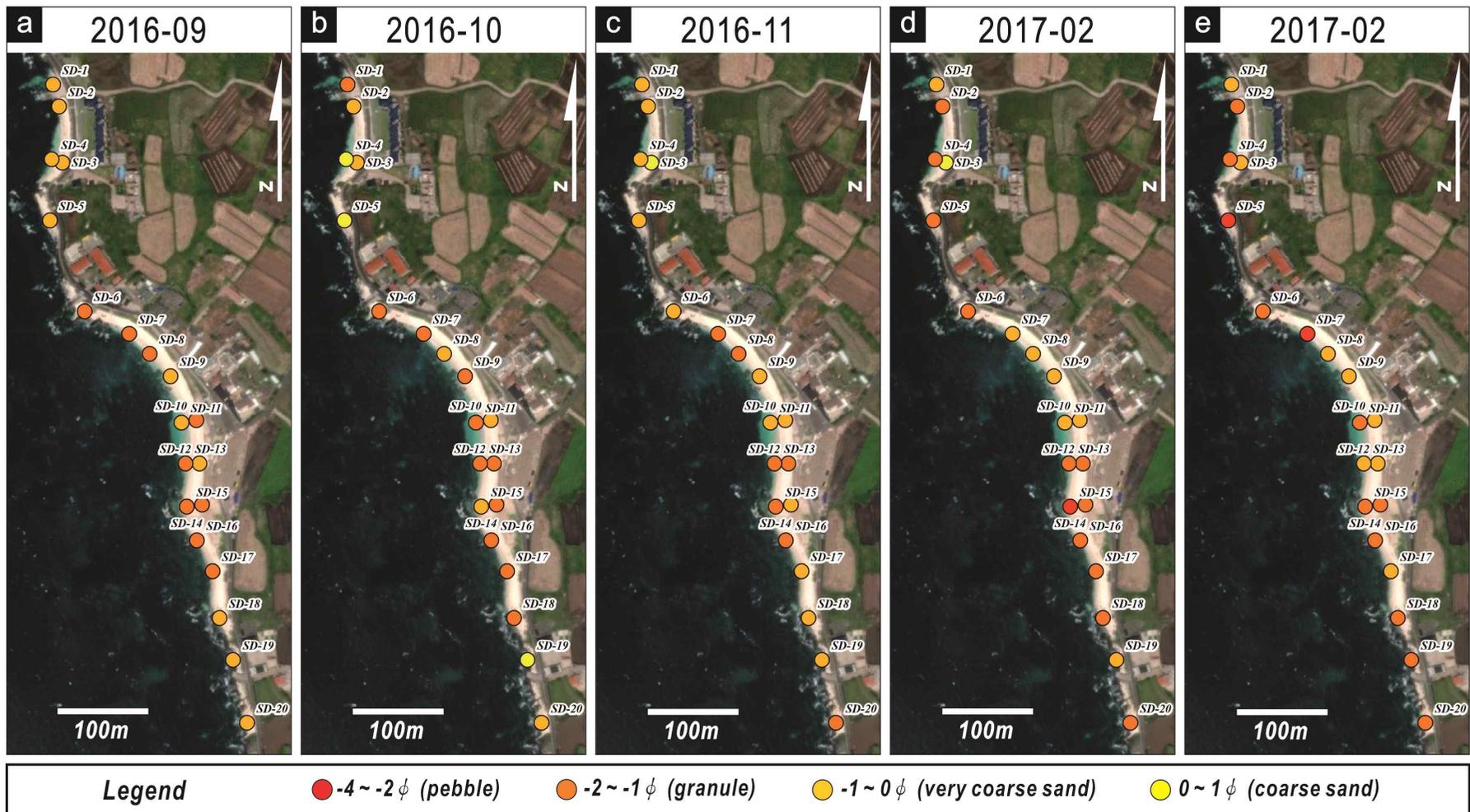


Fig. 6-3. Mean grain-size distribution of surface sediments in Udo Rhodolith Beach from 2016 summer to 2017 spring.

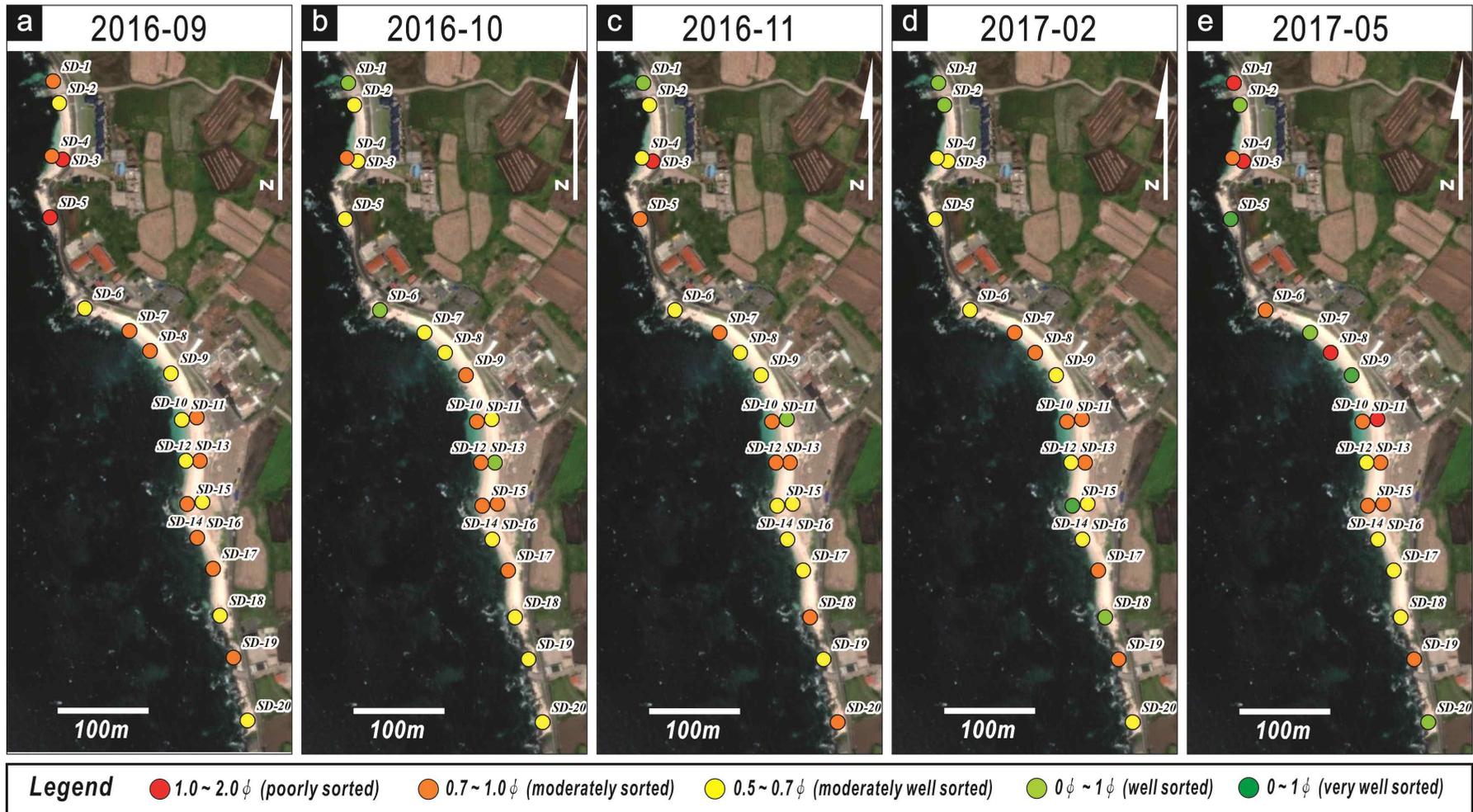


Fig. 6-4. Grain sorting distribution of surface sediments in Udo Rhodolith Beach from 2016 summer to 2017 spring.

6.3.2 2018-2019년 해빈 퇴적물 조직특성 변화

2018년 7월에 채취된 해빈 퇴적물의 조직특성 분석 결과, 평균입도는 0.73~4.73 mm의 범위이다(Table 6-6). 조사구역의 해빈퇴적물 입도구성을 살펴보면, 주로 자갈(gravel) <1.0~99.9%, 모래(sand) <1.0~99.6%로 시료의 대부분을 차지하고 실트(silt)와 점토(clay)는 존재하지 않는다. 이러한 결과로 나타나는 퇴적물 유형은 역(G), 사질역(sG), 역질사(gS), 약역질사((g)S)가 대부분이다(Fig. 6-5). 해빈사 분급도는 0.15~0.93 Ø 범위로 대부분 중간 내지 양호한 분급을 보인다(Table 6-6; Fig. 6-6). 춘계(2017년 5월)에서 하계(2018년 9월)기간 동안 조직특성 변화에 사용된 자료는 약 1년 4개월의 기간 차이가 발생함에도 불구하고 제주도 지역의 우세풍인 남남동 방향의 파랑유입에 따른 조직특성 변화를 표현하는 것으로 판단된다. 입도 증가가 우세하게 발생된 구역은 2구역, 3구역 북부에서 뚜렷하게 나타나며, 입도 증가와 더불어 분급이 양호해지는 특성을 보인다.

2018년 9월에 채취된 2차 해빈퇴적물의 분석 결과, 평균입도는 0.58~3.54 mm의 범위이다. 해빈 퇴적물 입도구성은 주로 자갈(>1.0~99.3%)과 모래(<1.0~99.1%)로 대부분을 차지한다. 이러한 결과로 나타나는 퇴적물 유형은 역(G), 사질역(sG), 역질사(gS)가 우세하게 나타난다(Fig. 6-5). 해빈사 분급도는 0.50~1.36 Ø 범위이며 중간 혹은 중간양호 분급이 우세하다(Table 6-6). 태풍 후 1구역에서는 전반적으로 입도가 증가하였으며, 구역 북부와 남부인 SD-1, 4정점에서가 가운데 정점 SD-2 보다 조립화되는 특성을 보인다. 2구역에서는 역질사(gS)에서 사질역(sG)로의 입도 증가와 더불어 중간에서 중간양호로의 변화를 보인다. 3구역에서의 공간적 조직특성은 북부와 남부구역에 역(G)크기의 퇴적물이 분포하고 중앙부에는 사질역(sG)의 분포가 확인된다. 4구역 해빈 북부 구역에서도 1, 3구역과 같은 조직특성인 북쪽 조립질, 중앙부 세립질, 남쪽 조립질 배열의 특성이 확인되며, 최남단 구역인 SD-20정점에서는 사질역(sG)에서 역(G)으로의 입도 증가가 확인된다. 태풍 후 조직변화는 2구역을 제외한 전구역에서 변화가 없거나 불량해지는 특징을 보이며 이는 태풍의 영향으로 퇴적물 이동에 따라 발생한 것으로 해석된다.

다.

2018년 10월(추계)에 채취된 3차 해빈퇴적물의 분석 결과, 평균입도는 0.91~4.73 mm의 범위이며, 입도구성은 주로 자갈(5.3~99.99%)과 모래(<1.0~94.7%)로 이루어져 있다. 퇴적물 유형은 역(G), 사질역(sG), 역질사(gS)가 우세하게 분포하며(Table 6-6), 분급도는 0.15~1.126 Ø의 범위로 중간양호와 양호 분급이 우세하게 나타난다(Table 6-6). 1구역에서의 퇴적물은 전안부에서 사질역(sG), 후안에서는 역질사(gS)의 입도를 보이며, 상대적으로 남부에 조립질 퇴적물이 우세하게 분포한다. SD-2, 3 정점에서는 분급이 불량하게, SD-1, 4정점에서는 양호하게 변화한다. 2구역에서는 사질역(sG)에서 역(G)으로 입도가 증가하였으며, 분급도는 양호하게 변화였다. 3구역에서는 북부에서 남부로 가면서 입도가 증가하는 패턴을 보이며, 전반적으로 북부-중앙부 구역의 입도가 세립화됨에 따른 것으로 해석된다. 4구역에서도 남부구역의 입도 증가가 관찰되며 분급의 변화는 거의 나타나지 않는다. 태풍 후-추계 기간 동안 2구역을 제외한 모든 구역에서 남부로 갈수록 입도가 증가하는 경향이 나타난다.

2019년 2월(동계)에 각 정점에서 채취된 4차 해빈퇴적물의 입도 분석 결과, 평균입도는 0.79~4.73 mm의 범위를 보이며, 주로 자갈과 모래로 구성되는데, 정점별로 자갈이 3.0~100%, 모래는 <1.0~97.0%의 비율로 나타난다. 퇴적물 유형은 역(G), 사질역(sG), 역질사(gS), 약역질사((g)S)로 다양하게 나타나며, 분급도는 0.15~1.04 Ø의 범위로 비교적 양호한 편이다(Table 6-6). 1구역에서는 남부 전안인 SD-4정점에서 입도 감소, 나머지 정점에서는 입도 증가 경향이 나타나는데, 홍조단괴의 양은 5~14%의 감소를 보인다. 2구역에서는 입도 및 분급도 그리고 홍조단괴 양의 변화가 나타나지 않는다. 2017년 2월 동계조사에서는 남부구역으로의 입도 증가 경향이 발생하였는데, 2019년 2월 동계조사에서는 북부-중앙부에서의 입도 증가 남부구간의 입도 감소가 발생하는 양상을 보인다. 4구역에서는 역(G)크기의 퇴적물이 우세하게 분포하며 홍조단괴 양이 평균 90% 이상으로 나타난다.

2019년 4월(춘계)에 채취된 5차 해빈 퇴적물의 평균입도는 0.39~4.73 mm의 범위를 보인다. 주로 자갈과 모래로 구성되는데, 정점별로 자갈이 1.2~99.9%, 모래는 0~98.8%의 비율로 나타난다. 퇴적물 유형은 역(G), 사질역(sG), 역질사(gS), 약역질사((g)S)로 다양하게 나타나며, 분급도는 0.15~1.13 ϕ 의 범위로 중간 내지 양호한 편이다(Table 6-6).

1구역에서는 SD-1, 2정점에서는 큰 폭으로의 입도 감소, SD-3 정점에서는 미약한 감소가 발생하였으며, 남부 전안인 SD-4 정점에서는 역질사(gS)에서 사질역(sG)로의 변화가 관찰된다. 2구역에서는 조직특성 변화가 나타나지 않으며, 추계-동계-춘계 세 계절에서의 뚜렷한 변화가 발생하지 않은 것이 특징적이다. 3구역에서는 중앙부를 제외한 북, 남부에서의 뚜렷한 입도 증가가 관찰되며, 후안에서의 입도 감소가 발생하였으며 분급도 또한 양호하게 변화하였다. 4구역에서도 3구역과 동일하게 북, 남부에서의 조립질 퇴적물 분포, 중앙부에서 상대적으로 세립질 퇴적물이 분포하는데, 조직변화는 4구역 북부구간 입도 증가, 중앙부-남부 구간은 입도 감소가 발생하였다.

2018년 여름부터 2019년 봄까지 5회에 걸친 조사 결과를 종합해보면, 조사 시기에 따라 뚜렷하고 체계적인 조직특성의 변화가 인지되지는 않지만, 태풍 솔릭 내습 후와 동계(4차)에 전반적으로 입도가 증가하고 분급도가 불량해지는 경향이 나타난다. 춘계(2017년 5월)에서 하계(2018년 9월)기간 동안 조직특성 변화에 사용된 자료는 약 1년 4개월의 기간 차이가 발생함에도 불구하고 제주도 지역의 우세풍인 남남동 방향의 파랑유입에 따른 조직특성 변화를 표현하는 것으로 판단된다.

Table 6-6. Results of sediment texture analysis in Udo Rhodolith Beach between July 2018 and Apr. 2019.

Sample No.	2018-7		2018-9		2018-10		2019-2		2019-4	
	Mean size (phi)	Sorting (phi)								
SD-1	-0.86	0.66	-1.21	0.96	-0.86	0.53	-1.58	0.50	-0.20	0.88
SD-2	-0.56	0.50	-0.61	0.62	-0.58	0.77	-2.22	0.27	-1.61	0.50
SD-3	0.04	0.59	-0.31	1.13	-0.23	0.36	-0.63	0.51	-0.55	0.49
SD-4	0.13	0.67	-1.00	0.63	-1.24	0.88	0.07	0.88	-0.58	0.63
SD-5	0.45	0.73	-0.65	0.63	-2.23	0.26	-2.24	0.15	-2.23	0.25
SD-6	-2.24	0.15	-0.87	0.52	-1.28	0.30	-0.39	1.04	-1.85	0.51
SD-7	-1.47	0.43	-1.63	0.82	-0.95	0.64	-2.23	0.15	-2.24	0.15
SD-8	-1.26	0.82	-0.59	0.75	0.13	0.94	-0.04	0.61	0.84	1.13
SD-9	-0.93	0.49	-1.09	1.36	-0.23	1.12	-2.24	0.15	1.34	0.69
SD-10	0.43	0.50	0.80	1.00	-0.48	0.64	-2.22	0.27	-0.59	0.50
SD-11	-0.34	0.93	-0.87	0.99	-0.34	1.12	-0.92	0.49	-1.28	0.29
SD-12	-0.27	0.84	-1.64	0.51	-1.26	0.80	0.33	0.52	-0.49	0.62
SD-13	-0.25	0.41	-1.62	0.50	-0.67	0.67	-0.27	0.30	-0.69	0.68
SD-14	-0.59	0.51	-1.25	0.77	-2.24	0.15	-0.63	0.65	-1.92	0.49
SD-15	-0.94	0.66	-0.33	0.92	-1.88	0.50	-0.95	0.64	-2.24	0.15
SD-16	-1.24	0.27	-1.26	0.82	-0.27	0.91	-1.58	0.49	-2.24	0.15
SD-17	-0.25	0.15	-0.64	0.53	-0.86	0.65	-1.59	0.90	-0.64	0.66
SD-18	-1.53	0.89	-1.25	0.98	-0.83	0.51	-2.21	0.28	-1.01	0.60
SD-19	-0.52	0.75	-0.27	0.74	-1.34	0.80	-2.24	0.15	-1.88	0.52
SD-20	-0.95	0.61	-1.82	0.61	-1.57	0.67	-1.92	0.49	-1.60	0.67

Table 6-7. Composition ratio (%) of rhodoliths (R), shell fragments (S) and lithic fragments (L) between July 2018 and Apr. 2019.

Sample No.	2018-7			2018-9			2018-10			2019-2			2019-4		
	R	S	L	R	S	L	R	S	L	R	S	L	R	S	L
SD-1	88.6	3.2	8.3	92.2	5.3	2.5	94.9	3.0	2.1	80.8	12.3	6.9	75.8	18.6	5.6
SD-2	92.3	5.8	1.9	89.9	3.9	6.2	94.5	3.8	1.8	80.7	4.6	14.7	96.2	3.2	0.5
SD-3	90.4	6.8	2.8	80.4	15.0	4.6	93.9	2.6	3.5	88.0	9.2	2.9	89.8	8.6	1.6
SD-4	87.9	8.7	3.3	90.3	4.2	5.5	87.6	3.6	8.8	82.1	15.4	2.5	90.3	8.2	1.6
SD-5	79.9	16.1	4.0	97.4	2.4	0.2	97.0	2.0	1.0	97.4	2.0	0.6	88.7	3.4	7.9
SD-6	96.4	3.6	0.0	95.1	4.0	1.0	96.4	2.5	1.2	91.0	8.5	0.6	93.6	0.8	5.7
SD-7	94.3	4.5	1.2	93.6	5.6	0.8	97.2	2.5	0.3	93.9	1.9	4.2	97.1	2.9	0.0
SD-8	97.1	2.1	0.8	95.0	4.3	0.7	85.7	13.3	1.0	88.7	10.4	0.9	86.8	12.2	1.0
SD-9	96.9	2.6	0.6	95.1	4.7	0.2	91.8	7.4	0.8	98.2	1.3	0.6	68.7	29.9	1.4
SD-10	87.8	10.8	1.4	92.7	5.9	1.4	87.4	11.3	1.2	96.5	0.0	3.6	86.1	13.3	0.7
SD-11	88.3	11.0	0.7	90.0	5.9	4.1	89.8	9.6	0.7	92.9	6.4	0.7	94.1	4.9	1.0
SD-12	91.8	7.7	0.5	75.4	15.3	9.3	97.1	0.3	2.6	75.0	23.7	1.3	90.6	8.6	0.8
SD-13	93.3	5.9	0.8	93.1	4.4	2.5	94.2	5.5	0.2	89.5	9.9	0.6	91.5	7.6	0.9
SD-14	96.8	2.4	0.9	96.0	3.7	0.3	91.4	4.5	4.1	90.3	9.3	0.5	88.5	6.8	4.7
SD-15	95.0	2.8	2.2	91.2	7.5	1.3	96.0	3.8	0.2	95.7	3.8	0.5	99.9	0.1	0.0
SD-16	96.1	3.6	0.3	96.7	2.7	0.6	81.1	17.9	1.0	95.9	3.6	0.4	100.0	0.0	0.0
SD-17	93.6	6.0	0.5	95.7	3.6	0.7	93.2	6.2	0.6	89.0	10.4	0.7	91.9	7.3	0.8
SD-18	94.0	5.0	1.0	95.5	3.6	1.0	94.6	5.0	0.3	97.5	2.0	0.5	94.1	0.2	5.8
SD-19	91.0	7.5	1.5	92.4	5.1	2.5	93.3	6.1	0.6	96.0	0.9	3.2	96.0	2.7	1.3
SD-20	94.7	3.9	1.4	95.6	3.3	1.1	95.4	3.8	0.8	90.7	1.6	7.7	95.7	3.5	0.9

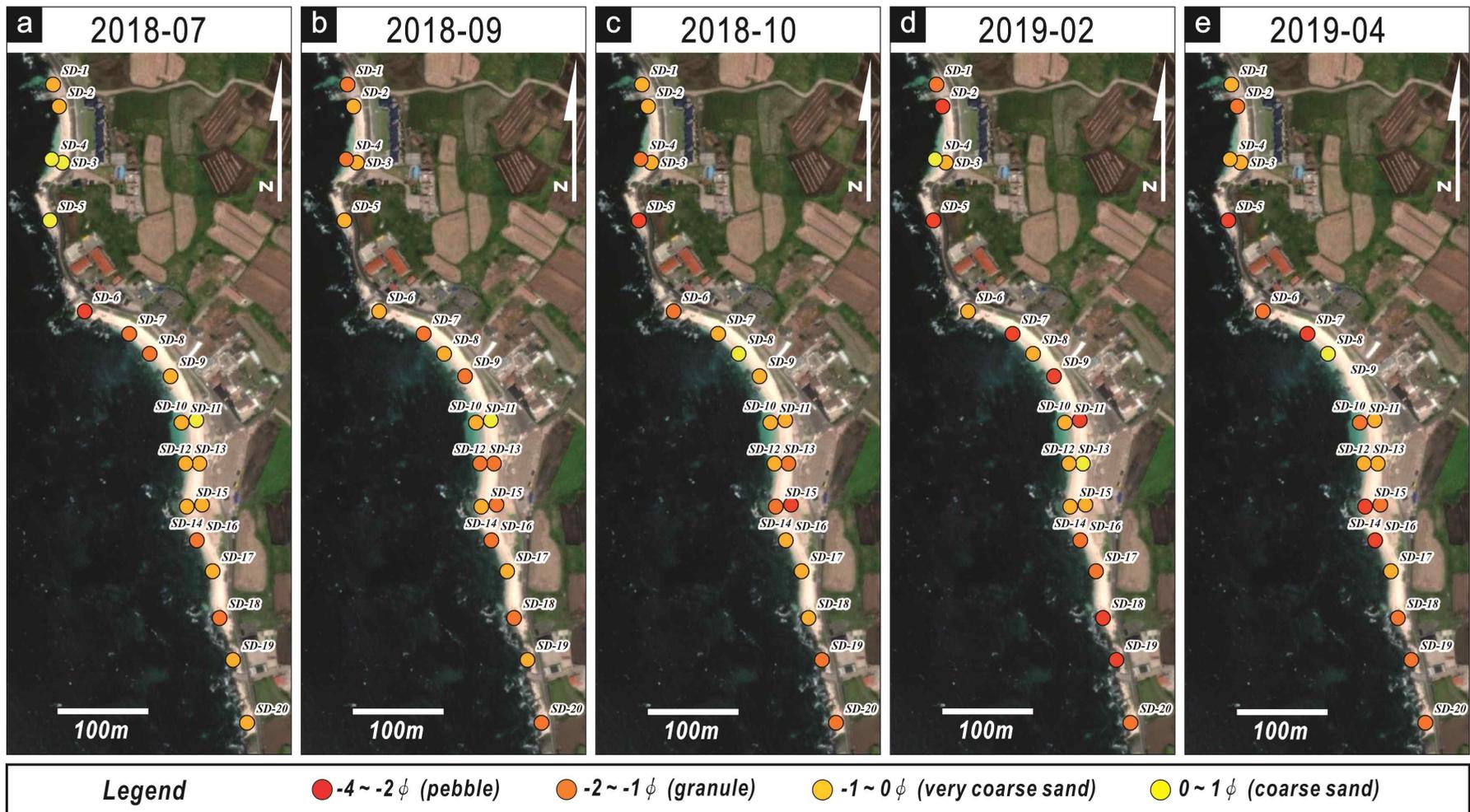


Fig. 6-5. Mean grain-size distribution of surface sediments in Udo Rhodolith Beach from 2018 summer to 2019 spring.

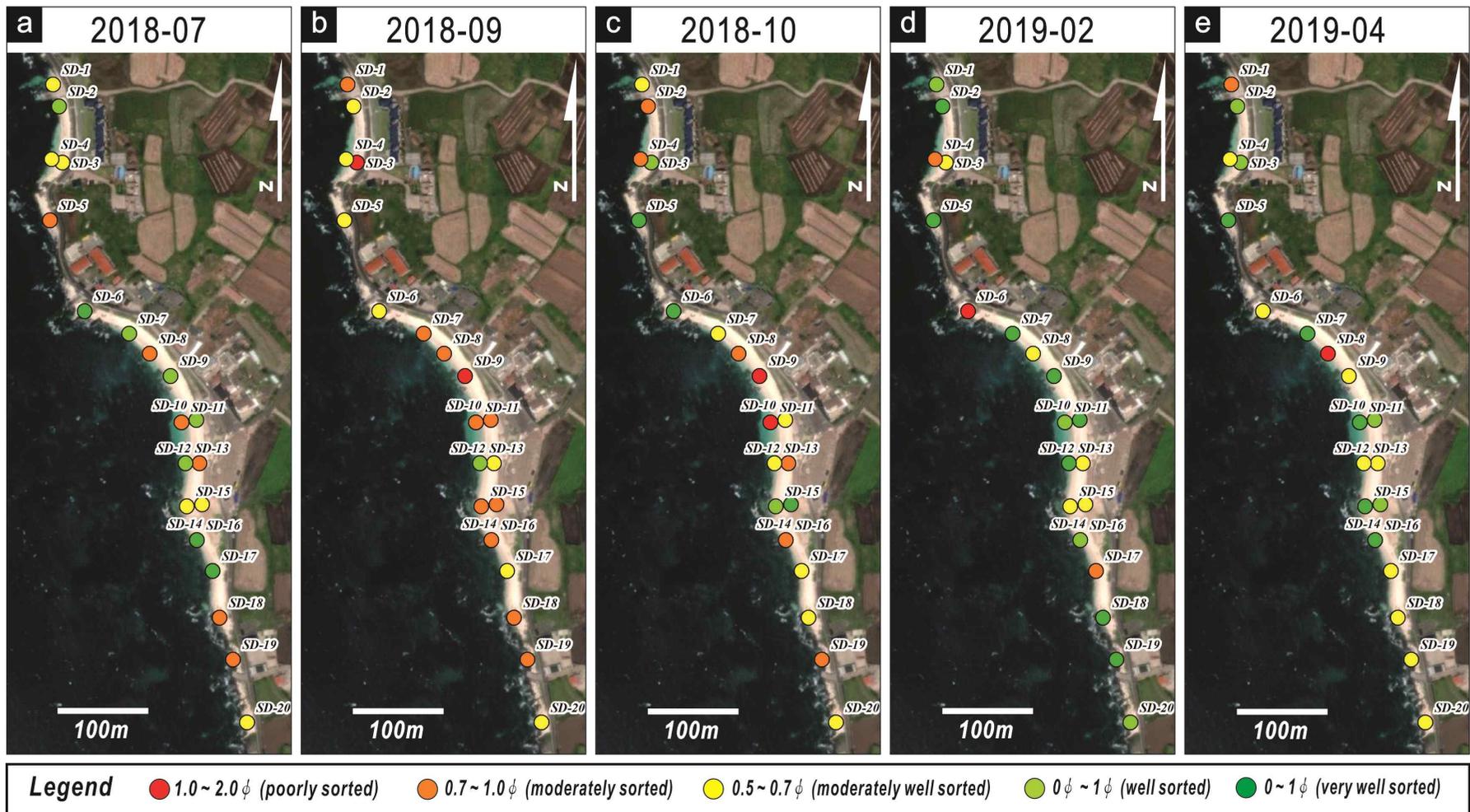


Fig. 6-6. Grain sorting distribution of surface sediments in Udo Rhodolith Beach from 2018 summer to 2019 spring.

6.3.3 2019-2020년 해빈 퇴적물 조직특성 변화

2019년 8월 채취된 퇴적물 조사결과, 역질사(gS)에서 자갈(G)까지의 입도 범위를 보이며, 분급도는 매우 양호(0.15 \emptyset)~불량(1.04 \emptyset) 범위로 나타나는데, 평균적으로 중간 양호에 해당한다(Table 6-8; Figs. 6-7, 8). 퇴적물의 구성비를 살펴보면, 홍조단괴는 71~98%의 함량으로 나타나며, 패각은 1~27%, 암편은 대체로 10% 이하의 함량 구성을 보인다(Table 6-9). 구역별 함량비의 뚜렷한 양상은 나타나지 않는다. 1구역은 전안과 후안 대부분에서 1차조사에서 3차조사로 갈수록 입도가 양호해지는 양상으로 나타나며, 2구역(SD-5)은 1차 조사에서 자갈이 분포하는 것으로 확인되었는데, 태풍 통과 후에도 평균입도와 분급도에서 큰 변화를 보이지는 않았다. 3구역은 1차 조사 시에 전안에서는 자갈(G)이, 후안에서는 이보다 세립질인 사질역(sG)이나 역질사(gS)가 우세하게 나타나며, 동시에 구역의 남북단 경계부에서 중앙부로 가면서 입도가 감소하는 특징을 보인다. 1차 조사 시의 3구역 퇴적물의 분급도는 1구역과 마찬가지로 전·후안, 남북 구역에 관계없이 중간 내지 양호한 특징을 보였다.

2019년 9월초 태풍 링링 통과 후의 조사에서 입도 구성은 -2.240~0.47 \emptyset 로 역질사(gS)에서 자갈(G)까지의 입도 범위를 보이며, 전반적으로 구역의 북부 구간에서는 입도가 감소하고 반대로 남부 구간에서는 증가되어 나타나며 분급도는 일정한 경향이 없는 것으로 보인다(Table 6-8; Figs. 6-7, 8). 지형변화를 고려하면, 퇴적된 구간에서는 입도 감소가, 침식된 구간에서는 입도 증가가 나타났다고 볼 수 있다. 4구역은 1차 조사 시에 남부 구간에 비해 북부 구간에서 분급이 양호한 퇴적물이 분포하는 것으로 나타났으며 태풍 후의 2차 조사에서는 정점에 따라 평균입도가 증가 혹은 감소하는 특징을 보이지만 감소보다는 증가의 폭이 더 크게 나타나고 분급도는 양호해진 변화를 보이는 정점이 더 많다. 2차조사 1구역에서는 정점 SD-2를 제외한 모든 구역에서 해빈퇴적물 내 홍조단괴 기원 입자의 조성비가 감소하는 양상이 나타나며, 특히, 정점 SD-1에서는 홍조단괴가 31.6% 감소한 대신, 암편 조성비는 35% 정도 증가하여 나타난다. 2구역에서는 10.8% 홍조단괴 조성비의 증가가 확인되며, 이와 반대로 패각편과 암편의 조성비는 각각 2.6%와 8.2% 감소하였다. 3구역에서는 북쪽 구간에서 대체로 홍조단괴 함량비가 감소하였으며, 중앙부는 증가-감소-증가-감소 양상을 보인다. 한편, 남쪽 구간은 홍조단괴 함량비가 증가

하였다. 4구역에서는 3구역과 연장되는 북쪽 구간에서 홍조단괴 함량비가 증가하였으며, 남쪽 구간은 약 4% 감소하였다. 정점 SD-19에서는 3.9% 증가추세를 보인 반면, 최남단에 위치한 정점 SD-20에서는 홍조단괴의 함량이 16.7% 급감하였다.

2019년 10월말, 1구역은 대체로 중앙부에서는 입도가 증가하고 구역 경계부에서는 감소된 특징을 보이며 분급도는 일정한 경향이 나타나지 않는다(Table 6-8; Figs. 6-7, 8). 그러나 2차 조사와는 반대로 정점 SD-2를 제외한 전 구역에서 홍조단괴 함량 증가가 나타나며, 정점 SD-1에서는 홍조단괴의 급격한 증가가 발생하였다(Table 6-9). 종합적으로 보면 1차 조사와 비슷한 수준으로 홍조단괴 조성비가 회복된 것으로 확인된다. 2구역은 앞선 시기와 마찬가지로 입도와 분급도에 큰 차이를 보이지 않으나 홍조단괴 조성비가 감소하고 대신 패각편의 조성비가 다소 증가하였다. 3구역은 정점 SD-13, 14를 제외하고 모든 정점에서 평균입도의 증가가 나타나며 분급도는 남북단 경계부의 일부 정점을 제외하면 대체로 양호해지는 양상이 확인된다. 퇴적물 구성비는 북쪽 구간에서 홍조단괴 조성비가 미약하게 감소되는 양상을 보이며, 중앙부는 대체로 조성비 증가가 확인된다. 4구역에서는 남북단의 정점 SD-16과 20을 제외하고는 대체로 세립화의 입도변화가 인지되며, 분급도는 전반적으로 불량해지는 특징을 보인다. 홍조단괴 해빈의 전 구역으로 종합해 보면, 태풍 내습 후 10월 말 사이의 추계에 대체로 1, 2구역을 포함하는 북부 구간과 해빈 남단(4구역)의 퇴적물은 입도가 감소하였으며 그 외의 중앙부는 평균입도가 증가하는 양상을 보였다. 분급도는 입도변화와는 다소 무관하게 국지적으로 양호 혹은 불량에 변화양상을 보인다.

추계 조사 후 3.5개월이 지난 2020년 2월 중순에 실시된 동계 조사에서 1구역은 전안을 중심으로 대부분의 구간에서 입도가 감소하고 분급도는 대체로 양호해지는 변화양상을 보이는데, 구역 내 모든 정점에서 홍조단괴의 조성비가 소폭 증가하였다(Figs. 6-7, 8; Table 6-9). 2구역은 이번에도 이전 시기에 비해 입도와 분급도에서의 변화가 거의 나타나지 않았으나 홍조단괴 퇴적물의 비율이 소폭 증가하는 특징을 보인다. 3구역에서도 일부 정점을 제외하고는 대체로 평균입도가 감소한 것으로 확인되며, 분급도는 일정한 변화양상이 인지되지 않는다. 그러나 구성비에서는 북쪽 구간에서 홍조단괴 증가, 남쪽 구간에서는 홍조단괴 감소 및 패각편 증가하는 경향이 나타난다. 4구역에서는 북쪽 경계에 위치한 정점 SD-16에서 입도 감소가

발생하였지만 그 외의 구간에서는 대체로 조립화 경향이 확인되며, 3구역과 연장되는 북쪽 구간이 주로 홍조단괴 함량비가 증가, 남쪽 구간 중에서는 SD-19 정점에서 홍조단괴 함량비의 감소가 나타난다. 추계-동계 기간은 1구역에서 해빈 부피 변화와 관련되어 입도 변화가 관찰되었으나, 3, 4구역은 부피 변화와 무관한 퇴적물 조직특성 변화가 관찰된다. 종합해보면, 추계에서 동계에 이르는 기간에 홍조단괴 해빈의 퇴적물은 전반적으로 세립화하는 경향을 보이며 분급도는 해빈의 위치에 따라 각기 다른 양상으로 나타난다.

동계 조사 후 2개월 정도가 지난 2020년 4월 초에 실시된 춘계 조사에서 1구역은 모든 정점에서 입도가 감소하고 분급도는 북쪽 구간에서 정점에 따라 양호 혹은 불량에 국지적인 변화양상을 보이며, 이에 맞추어 최북단의 정점 SD-1, 3에서 홍조단괴의 급격한 조성비 감소가 발생하였다(Figs. 6-7, 8). 2구역은 입도와 분급도에서의 변화가 거의 나타나지 않으며, 홍조단괴가 2.8% 감소, 암편의 조성비가 약간 증가하는 구성비 차이만 발생하였다. 3구역에서는 북쪽과 중앙 구간에서는 대체로 조립화(입도 증가), 남쪽 구간에서는 세립화(입도 감소)의 양상이 나타나지만 변화폭은 다소 낮은 편이다. 분급도는 북쪽과 중앙 구간에서는 불량해지고, 남쪽 구간에서는 양호해지는 대조적 변화양상이 확인된다. 북쪽구간 정점인 SD-8, 9에서 홍조단괴 조성비가 감소, 남쪽구간 정점인 SD-13, 14에서는 증가하는 양상이 확인되는데, 정점 SD-15인 경우 해빈 전안에 위치한 정점으로 이 기간에 27.2%의 급격한 홍조단괴 조성비의 감소가 발생하였다. 4구역에서는 최남단 정점을 제외하고는 모두 입도 감소의 변화양상이 두드러지게 나타나며 분급도는 이전 시기에 비해 대체로 양호해진 결과를 보이며, 홍조단괴 조성비의 소폭 증가가 나타나는데 비해 기반암 사이에 있는 정점들에서는 홍조단괴 조성비의 변화가 거의 없다.

종합해보면, 동계에서 춘계에 이르는 기간에 홍조단괴 해빈의 퇴적물은 북쪽의 1구역과 3구역 북부 구간을 중심으로 퇴적물의 평균입도가 감소하는 세립화의 경향을 보였으며, 남쪽 구간에 해당하는 4구역과 3구역 남부 구간에서는 반대로 조립화의 변화가 나타났다. 분급도는 세립화 양상을 보이는 북쪽 구간에서는 불량해진 반면, 조립화가 나타난 남쪽 구간의 퇴적물은 분급도가 양호하게 변화된 결과를 보였다.

Table 6-8. Results of sediment texture analysis in Udo Rhodolith Beach between Aug. 2019 and Apr. 2020.

Sample point	2019-8		2019-9		2019-10		2020-2		2020-4	
	Mean size (phi)	Sorting (phi)								
SD-1	-1.56	0.63	-2.21	0.29	-1.52	0.65	-1.26	0.28	0.07	0.67
SD-2	-0.94	0.49	-1.04	0.59	-2.24	0.15	-1.60	0.50	-0.92	0.50
SD-3	-1.15	1.04	0.42	0.80	-0.87	0.51	-0.87	0.51	-0.62	0.52
SD-4	-0.99	0.61	-1.48	0.60	-0.60	0.60	-2.22	0.27	-2.21	0.28
SD-5	-2.24	0.15	-2.23	0.15	-2.22	0.26	-2.24	0.15	-2.24	0.15
SD-6	-2.23	0.24	-0.94	0.67	-1.20	0.87	-2.24	0.15	-1.03	0.43
SD-7	-2.01	0.44	-1.23	0.38	-2.00	0.44	-0.60	0.51	-0.36	0.94
SD-8	-1.12	0.99	-0.22	0.29	-1.28	0.79	0.16	0.74	0.17	0.83
SD-9	-0.82	0.63	-0.21	1.15	-0.59	0.64	-0.66	0.79	0.03	0.64
SD-10	0.16	0.80	0.47	0.67	-0.52	0.61	-0.50	0.58	-0.10	0.95
SD-11	-1.25	0.72	-1.63	0.78	-1.89	0.50	-1.21	0.28	-1.51	0.46
SD-12	-0.53	0.66	-0.51	0.66	-2.24	0.15	-0.91	0.62	-0.97	0.64
SD-13	-1.45	0.56	-2.24	0.15	-2.22	0.27	-2.24	0.15	-2.22	0.27
SD-14	-1.19	0.85	-1.51	0.64	-0.84	0.82	-0.67	0.68	-1.54	0.48
SD-15	-1.37	0.81	-1.97	0.46	-2.23	0.43	-1.57	0.50	-2.24	0.15
SD-16	-2.24	0.15	-2.23	0.26	-2.24	0.15	-1.54	0.48	-2.24	0.15
SD-17	0.15	0.76	-1.55	0.89	-0.88	0.65	-1.16	1.00	-1.59	0.61
SD-18	-1.94	0.48	-1.92	0.49	-1.14	0.82	1.00	0.48	-1.65	0.50
SD-19	-1.21	0.89	-2.21	0.29	-1.83	0.51	-0.34	0.81	-1.23	0.81
SD-20	-1.21	0.88	-0.24	0.41	-0.93	0.65	-1.94	0.48	-1.27	0.39

Table 6-9. Composition ratio (%) of rhodoliths (R), shell fragments (S) and lithic fragments (L) between Aug. 2019 and Apr. 2020.

Sample point	2019-8			2019-9			2019-10			2020-2			2020-4		
	R	S	L	R	S	L	R	S	L	R	S	L	R	S	L
SD-1	85.5	8.7	5.8	53.9	5.1	41.0	82.4	7.7	9.9	84.2	7.9	7.8	69.8	18.5	11.7
SD-2	85.4	10.6	4.0	91.4	5.3	3.3	87.3	6.1	6.6	94.1	5.2	0.7	94.9	3.8	1.3
SD-3	88.3	9.4	2.3	78.6	17.1	4.3	88.3	9.3	2.4	94.0	3.9	2.1	86.8	9.5	3.7
SD-4	91.0	6.7	2.3	86.8	10.3	2.9	89.4	8.5	2.1	91.4	5.7	2.9	90.6	2.5	6.9
SD-5	85.8	5.1	9.1	96.5	2.6	0.9	95.	3.9	0.8	97.1	2.9	0.0	95.3	2.0	2.7
SD-6	96.2	3.8	0.0	92.8	6.0	1.2	91.5	7.3	1.2	89.7	7.1	3.2	94.1	4.7	1.2
SD-7	95.7	4.2	0.1	93.3	6.1	0.6	93.2	5.7	1.1	94.8	3.9	1.3	94.1	5.4	0.5
SD-8	84.0	6.3	9.7	82.4	16.4	1.2	94.5	4.9	0.6	99.7	0.2	0.1	88.1	11.1	0.8
SD-9	83.8	12.9	3.3	87.2	12.2	0.6	91.8	7.5	0.7	95.6	3.7	0.7	90.8	8.0	1.2
SD-10	76.5	18.6	4.9	69.7	28.4	1.9	89.7	9.9	0.4	93.3	5.8	0.9	95.1	4.0	0.9
SD-11	85	10.1	4.9	93.2	5.6	1.2	94.7	4.7	0.6	96.3	3.1	0.6	96.7	2.6	0.7
SD-12	93.2	6.3	0.5	91.7	7.9	0.4	97.8	2.2	0.0	96.1	3.3	0.6	95.6	3.8	0.6
SD-13	88.6	9.2	2.2	98.8	1.2	0.0	91.7	5.3	3.0	87.8	6.8	5.4	94.5	4.7	0.8
SD-14	91.0	7.8	1.2	93.7	5.7	0.6	93.3	6.0	0.7	92.9	5.6	1.5	95.2	4.2	0.6
SD-15	94.8	4.6	0.6	97.0	3.0	0.0	100	0.0	0.0	94.4	4.2	1.4	67.2	17.2	15.6
SD-16	96.5	1.0	2.5	98.3	1.7	0.0	99.3	0.7	0.0	94.3	4.9	0.8	96.4	2.3	1.3
SD-17	71.1	27.4	1.5	95.0	4.7	0.3	94.2	5.1	0.7	95.4	3.7	0.9	97.0	2.8	0.2
SD-18	97.8	2.1	0.1	93.8	4.9	1.3	92.1	6.9	1.0	94.5	4.8	0.7	96.2	3.1	0.7
SD-19	89.7	9.4	0.9	93.6	4.7	1.7	96.4	2.2	1.4	95.0	2.0	3.0	94.5	3.8	1.7
SD-20	90.8	8.3	0.9	74.1	22.8	3.1	95.2	2.9	1.9	95.7	2.8	1.5	95.4	2.3	2.3

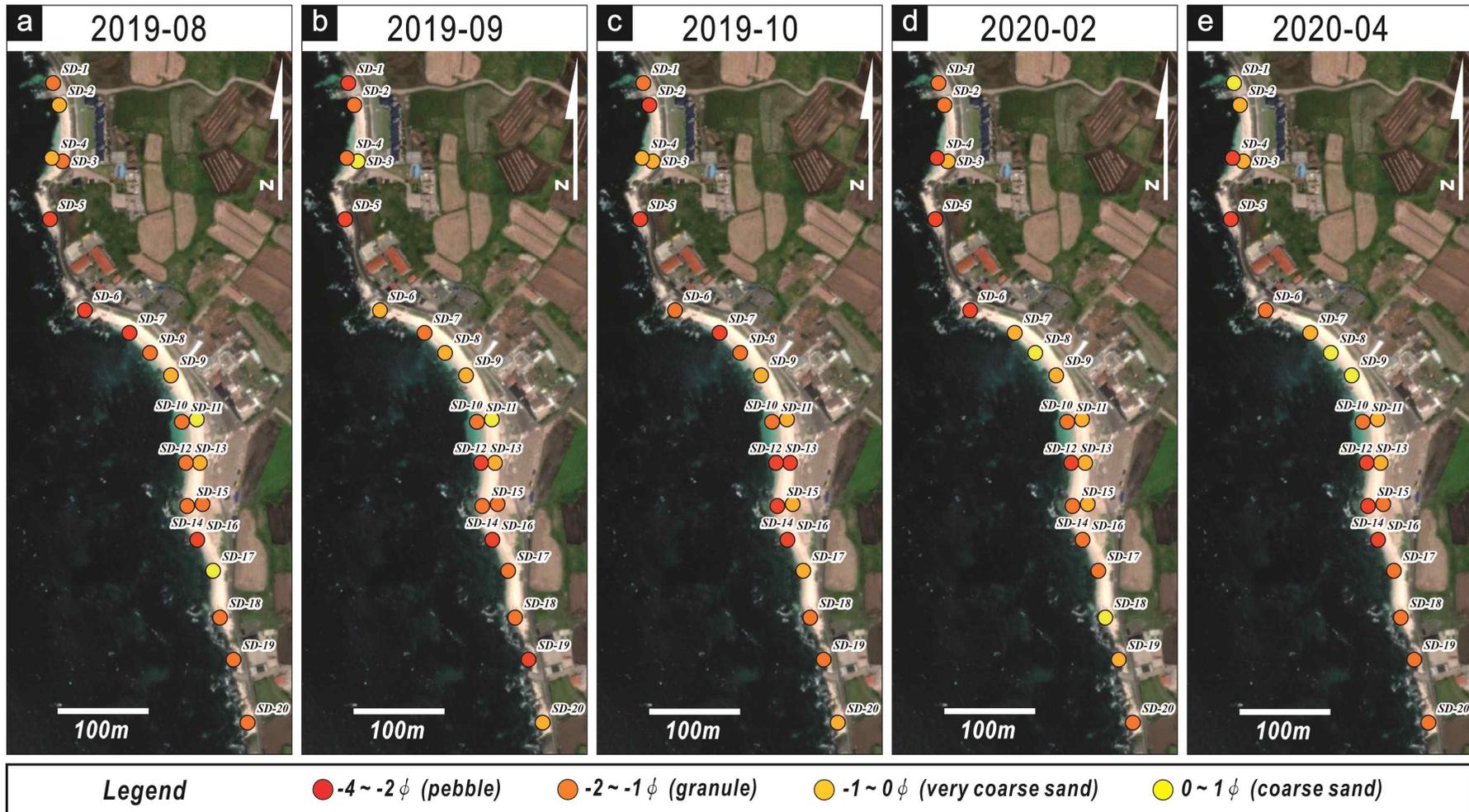


Fig. 6-7. Mean grain-size distribution of surface sediments in Udo Rhodolith Beach from 2019 summer to 2020 spring.

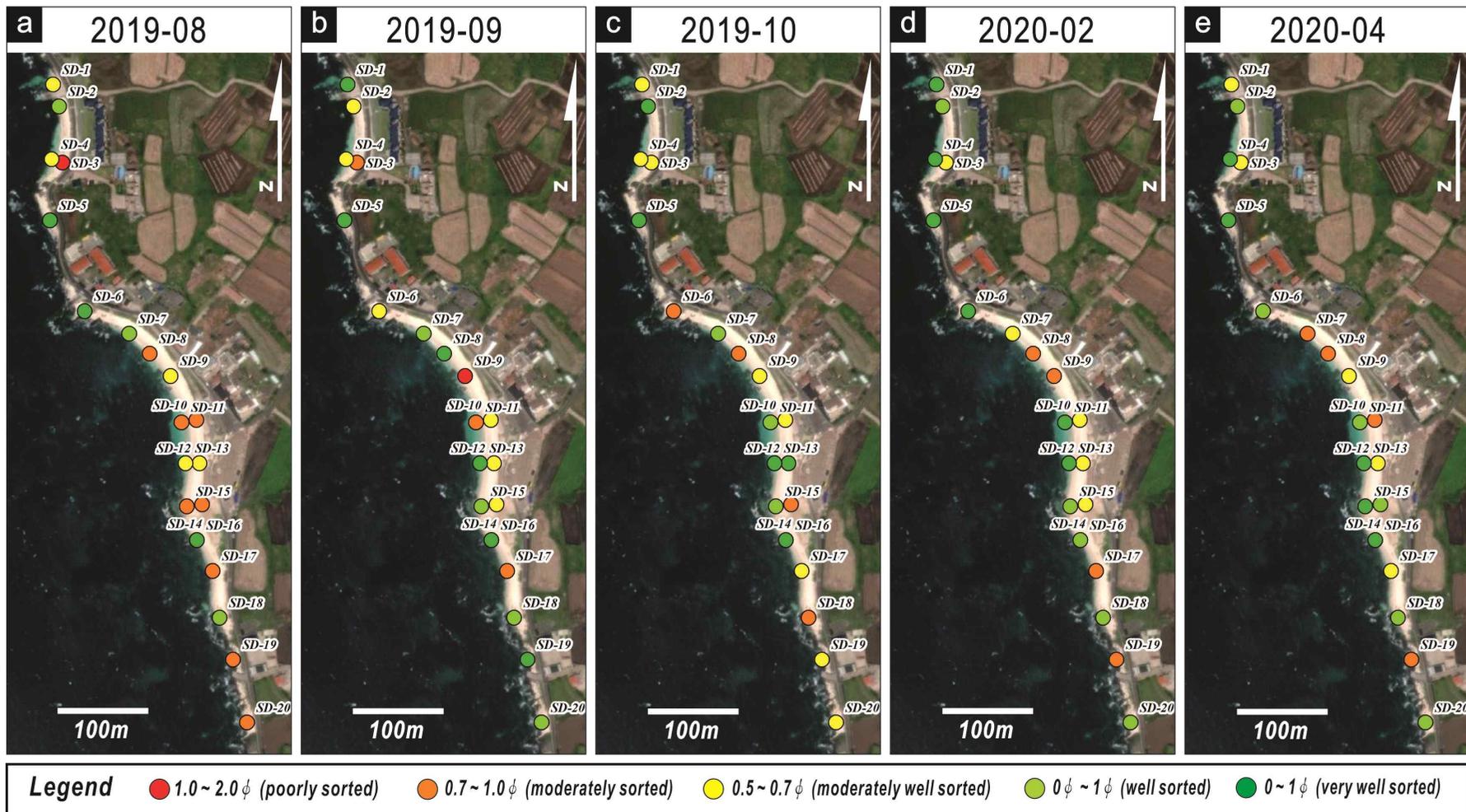


Fig. 6-8. Grain sorting distribution of surface sediments in Udo Rhodolith Beach from 2019 summer to 2020 spring.

6.4 소 결

우도 홍조단괴 해빈의 지형변화에 따른 퇴적물 조직특성 변화를 파악하고자 2018년부터 2020년까지 총 15회에 걸쳐 해빈 퇴적물을 채취하여 입도분석을 실시하였다. 해빈 퇴적물 유형은 조직적으로 역(gravel), 사질역(sandy gravel), 역질사(gravelly sand)로 구분되며, 대체로 역질 퇴적물의 함량이 더 높게 나타난다. Jeong (2016)에서는 봄-여름-가을-겨울로 계절에 따라 사질 함량이 감소하고 역질 함량이 증가함에 따라 겨울철 역 유형의 퇴적물 분포가 보고되었으나, 본 연구에서는 이러한 특징이 확인되지는 않는다.

이 연구에서는 전안 전단부 및 후안을 중심으로 조직특성 분석을 위한 정점이 선정되었는데, 해빈 후안(호안경계부)에서 하계-추계 기간 동안 퇴적물 조직특성은 역질사-사질 퇴적물이 주로 분포하였으며, 동계 조사에서는 역질 크기의 조립질 퇴적물이 분포하는 것이 확인되었다. 겨울철 해빈 전안이 육지부로 후퇴됨에 따라 정단(berm) 또한 내륙 방향으로 이동되며, 간헐적인 고파랑에 의해 파도가 정단을 넘어서는 오버워시(overwash)가 발생하는 경우 조립질 퇴적물이 후안 쪽으로 운반 및 퇴적될 수 있다. 또한 홍조단괴 퇴적물의 공극이 일반적인 조립질 퇴적물보다 크기때문에 입자밀도가 낮는데, 겨울철 강한 풍속이 발생하는 경우 후안에서의 퇴적물은 춘계-추계기간 보다 조립질의 퇴적물이 이동됨에 따라 조립화되는 가능성도 배제할 수 없다.

해빈 전안에서는 춘계-하계, 하계-추계-동계 기간동안 지형변화가 반대 양상(북부 퇴적 남부 침식, 북/중앙부 침식 남부 퇴적)으로 나타나는데, 침식환경에서 조직특성 변화는 주로 '입도-세립화 및 분급-불량화'의 경향, '입도-조립화 및 분급-불량화'의 경향이 우세하게 나타난다. 홍조단괴 해빈의 침식은 주로 파랑에 의한 침식이 우세하게 발생하는 것으로 해석되는데, 파랑에너지 크기에 따라 운반되는 퇴적물의 입도가 달라지기 때문에 분급이 불량해진다. 반면, 동일한 환경(침식환경)에서는 입도가 조립 또는 세립화되는 두 가지 양상으로 구분되는데, 주로 추계

기간에서는 세립화되는 경향이 우세하고 반면에 동계-춘계 기간 동안은 조립화 되는 경향이 우세하다. 해빈 지형변화는 주로 동계-춘계 기간 동안 해빈의 침식이 우세하게 발생하는데, 해빈 퇴적물 전안에 분포하는 사질 퇴적물이 파랑에 의해 이동 및 침식됨에 따라 잔류퇴적물이 남겨진 결과로 해석된다. 퇴적환경에서는 주로 ‘입도-조립화 및 분급-불량화’ 경향이 우세하게 나타나는데, 이는 외해 또는 침식구간에서 퇴적물 운반 및 집적에 따라 발생한 결과로 판단된다(Table 6-10).

이 연구에서는 해빈 지형변화에 따른 퇴적물 조직특성 변화는 계절별로 뚜렷한 변화가 관찰되지 않았으며, 원인은 크게 4가지로 볼 수 있다. 첫 번째 원인은 홍조단괴 퇴적물이 일반 사질 퇴적물과 다르게 크기에 비해 밀도가 낮으며, 공극이 높기 때문이다. 이로 인하여 일반적으로 적용되는 유속에 따른 퇴적물 이동 계수가 다르며, 특히 홍조단괴 해빈은 소산형 해빈으로서 특정 파랑에너지 이상에서 퇴적물이 운반되기 때문이다. 두 번째 원인은 일반적으로 표층퇴적물 채취하는 경우 채취 정점에서 깊이 5 cm 이상에 걸쳐 시료를 채취하게 되는데, 퇴적물은 수 cm 간격으로 입도가 다른 퇴적물로 구성되어 있다. 이로 인해 분급이 불량한 결과를 도출할 수 있으며, 추후 연구에서는 해빈 퇴적물 구성 특성을 반영한 시료채취가 이루어져야 할 것으로 판단된다. 세 번째 원인은 급격한 지형의 변화로서, 정점 SD 6~8 경우 2019~2020년에 급격하게 전안이 후퇴됨에 따라 채취 정점이 내륙방향으로 변경되어 특정 정점에서의 해빈 변화를 파악하기에 한계가 있다. 네 번째 원인은 인위적 환경 변화로서 우도 홍조단괴 해빈은 연간 150만명이 방문하는 주요 관광지로 매시각 마다 방문하는 관광객으로 인해 퇴적물 조직 특성 변화가 발생할 것으로 판단된다. 위 문제를 해결하기 위해서는 인위적 환경 영향이 최소화 되는 시간을 활용하여 시료채취가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

Table 6-10. Sediment textural change according to beach change.

	Decreased grain size / Decreased sorting	Decreased grain size / Increased sorting	Increased grain size / Increased sorting	Increased grain size / Decreased sorting	Decreased grain size	Increased grain size	Decreased sorting	Increased sorting	Preservation
Accretion	5	2	3	11	5	5	5	1	2
Erosion	12	4	5	10	1	3	2	1	1

제7장 고 찰

7.1 지형변화 영향 요인

해빈은 고화되지 않은 퇴적물(자갈 혹은 모래)로 이루어진 연성(soft)의 해안지형으로서, 지속적으로 작용하는 파도와 조류의 영향으로 해빈의 퇴적물은 유입되는 동시에 한편에서는 유출되는 매우 동적인(dynamic) 특성을 갖고 있다(Fig. 7-1). 그 결과, 해빈 퇴적물의 공급과 유출의 상대적 비율에 따라 해빈의 규모는 확장 혹은 축소되거나 유지되는 등 끊임없는 변화가 발생한다(King, 1972). 일반적으로 해빈 퇴적물에 대한 자연적 공급원으로는 하천유입, 해안침식, 연안 퇴적물의 재동, 배후지(사구)로부터 풍성 유입 등이 있으며, 유출은 마모와 풍화, 연안류와 이안류 등에 의한 외해역 및 타 해안으로의 이탈, 그리고 바람에 의한 비산 등에 의해 일어난다(Bird, 2010). 이러한 해빈 퇴적물의 유출입 과정에 영향을 미치는 주요인으로는 파랑, 조류, 태풍, 연안류, 이안류, 바람 등을 들 수 있는데, 단기적으로는 계절적 변동이나 이벤트성의 해황 변동과 밀접하게 연관되어 있다(Davis Jr and FitzGerald, 2004).

조석은 지구와 달의 중력의 영향으로 해수면의 높낮이가 주기적으로 변화를 의미하며, 조차가 큰 지역에서는 파도 에너지가 작용하는 면적이 넓어짐에 따라 지형변화에 중요한 요인으로 작용한다. 또한, 조석운동에 의해 형성된 조류는 주로 해양(근안)에 작용함에 따라 지형변화에 영향을 준다(Bird, 2010). 쇄파대 지역에서 파도가 해빈 전안에 닿게 되는 경우, 해빈 퇴적물은 일시적으로 부유하게 되며, 부유된 상태에서 퇴적물들은 해류에 의해 운반되고 파랑에 의해 형성된 해류(복합류, 연안류, 이안류, 저층역류) 등에 의해 퇴적물은 운반-퇴적(유실)되는 과정을 거쳐 지형변화를 야기시킨다(Davis Jr and FitzGerald, 2004).

우도 홍조단괴 해빈의 장단기 지형변화는 해양에서 발생하는 주요 요인과 관련성이 깊으며, 지형변화에 대한 원인을 파악하기 위해서는 홍조단괴의 공급원, 공급원에서 연안역으로 퇴적물 이동, 해빈에서의 퇴적물 재배치에 따른 지형변화를 파악함과 동시에 해빈의 지형변화와 인근 해역의 해황 및 홍조단괴 분포 등의 영향요인 사이의 상관관계를 분석하여야 하며, 이를 통해 해빈의 지형변화 메커니즘과 침식 원인을 규명할 수 있다.

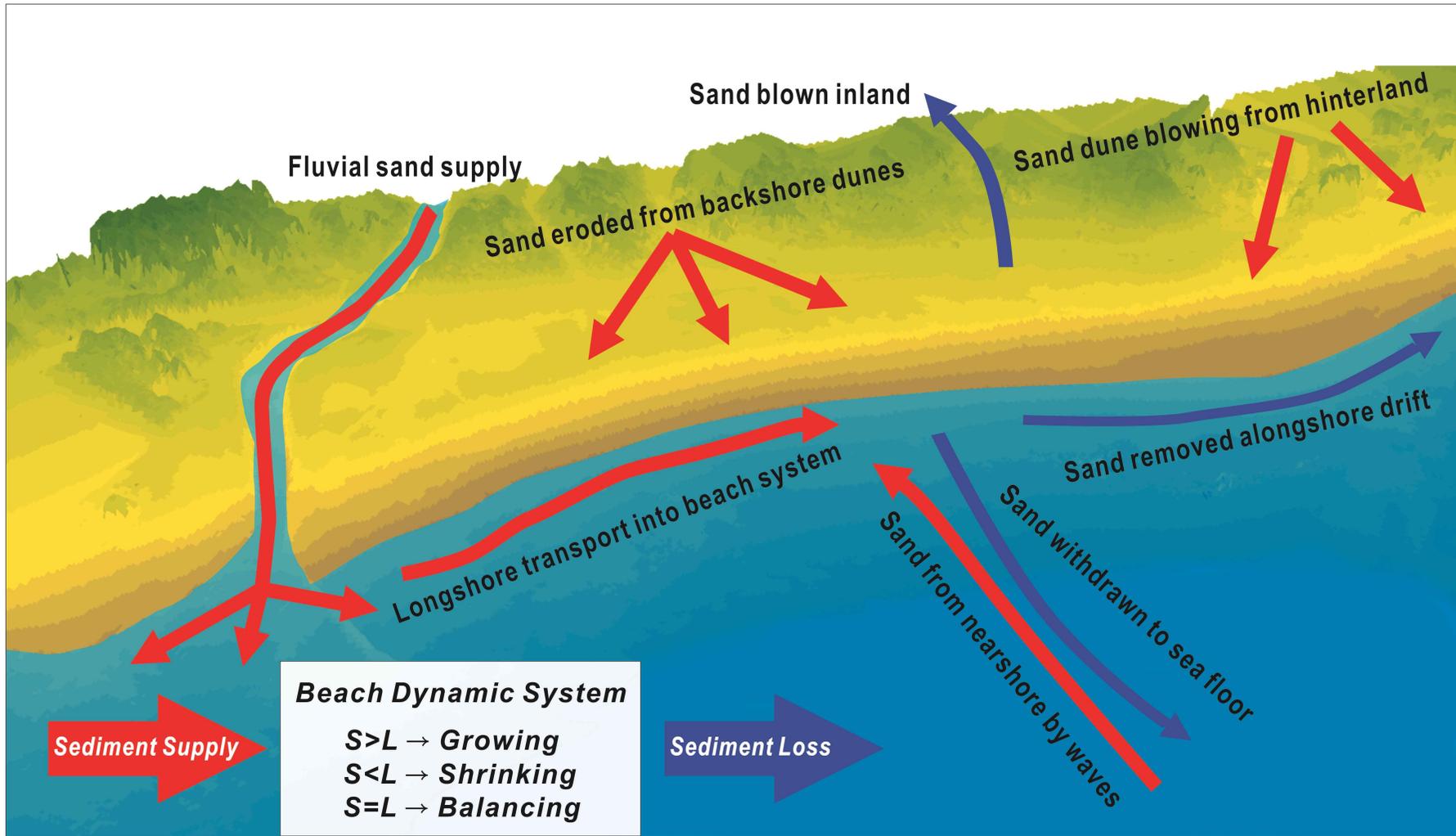


Fig. 7-1. Beach dynamic system showing sediment gain and loss in association with surrounding environments. Modified from Bird (2010).

7.1.1 홍조단괴 해빈 퇴적물 공급원

우도 홍조단괴 해빈을 구성하고 있는 퇴적물 내 홍조단괴 기원 입자의 함량은 대부분 90% 이상이며, 퇴적물 조직특성 분석 결과, 함량비는 연중 큰 변화 없이 안정적으로 유지되고 있다. 이러한 홍조단괴 입자는 우도와 본도 사이에 위치한 우도수로 해저면으로부터 공급된 것으로 보고되어 있다(Kim et al., 2003). 홍조단괴 해빈에 인접한 우도수로 해역은 홍조류가 서식할 수 있는 환경조건(수온, 햇빛 등)과 홍조단괴가 형성되기 위한 물리적 조건이 갖추어진 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2003; Jeju Special Self-Governing Province, 2017, 2021).

우도수로에서 실시된 잠수조사 결과, 이 해역의 해저 저질 유형은 크게 3가지로 구분된다(Fig. 7-2). 단괴형 홍조류가 우세하게 분포하는 해저(Type A)는 홍조단괴 해빈의 북서쪽(우도수로의 북동부) 연안역에서부터 우도수로의 중심부까지 분포한다. 한편, 우도수로 동쪽의 홍조단괴 해빈에 인접한 연안역 해저에는 모래 크기로 잘게 부서진 파편 입자들이 우세하게 나타나며(Type B), 조류의 영향으로 남쪽으로 서서히 이동하는 해저 사퇴(sand ridge)를 형성하고 있다. 나머지 해역의 해저에는 홍조류로 피복된 화산암반과 이로부터 분리된 거력이나 왕자갈들이 해조류 및 산호 군락과 함께 산재하여 나타나는 것(Type C)으로 조사되었다. Jeong et al. (2020)의 연구에서도 해빈 연안역을 대상으로 지구물리 탐사를 통해 해저지형학적 특징, 홍조단괴 분포양상, 해양물리적, 생태학적 특징을 기초로 4개의 구역으로 구분하였으며, 다양한 크기와 모양의 홍조단괴 분포양상은 해저지형의 형태, 해저에서의 해양 물리적 특성과 밀접한 관련이 있는 것으로 보고하였는데, 그 분포현황은 이 연구의 결과와 대체로 유사하다.

홍조단괴 해빈 주변에는 하천 및 사구 지형이 존재하지 않기 때문에 홍조단괴 퇴적물의 공급은 주로 연안역에 분포하는 홍조단괴들이 해빈으로 운반과정이 유일한 것으로 볼 수 있다. 따라서 홍조단괴 해빈을 구성하는 단괴나 그 파편들이 외해역으로부터 공급되었다면 이동이 가능한 분리된 입자상태로 분포하는 Type A 해저와 우도수로 동쪽의 Type B 해저가 홍조단괴 해빈에 대한 퇴적물 공급원으로서 중요한 역할을 하는 것으로 판단된다. 다만, 수심이 깊어짐에 따라 홍조입자의 운반수단이 되는 조류와 파도의 영향이 약해지므로 모든 장소가 고르게 공급원의 역할을 하지는 않았을 것으로 보인다. Type C 해저에도 홍조기원 입자들이 분포하기는 하지만 대부분 고착형이고, 해조류의 서식 밀도가 높아서 홍조단괴 입자의 산출량이나 운반 수월성은 낮은 것으로 볼 수 있다.

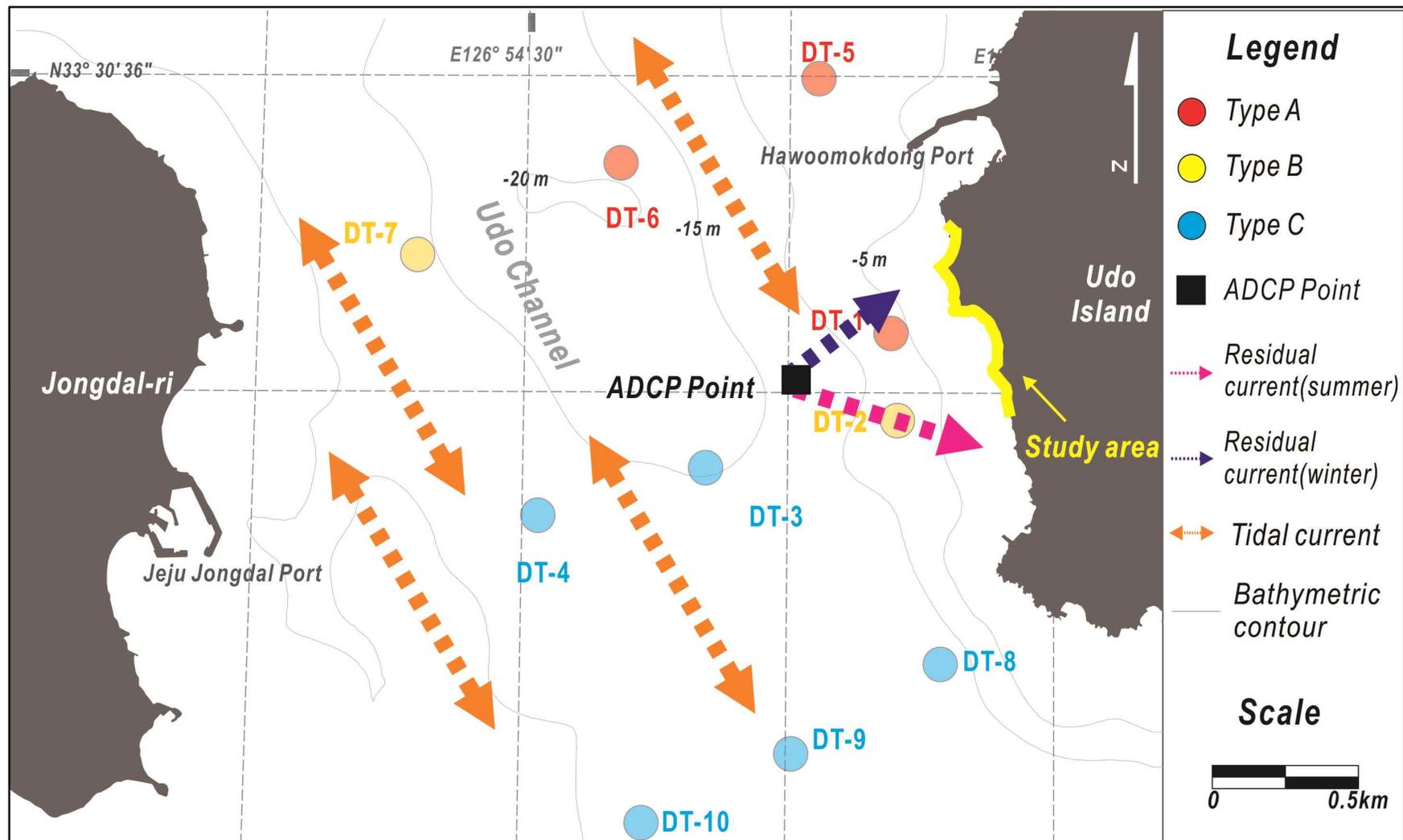


Fig. 7-2. Map showing distribution of 3 types (A, B and C) seafloor materials and flow direction of tide in Udo Canal.

7.1.2 연안역-해빈 퇴적물 이동 영향 요인

1) 조류

제주도 주변 해역에서 조류 에너지는 주요 해류인 대마난류의 영향에도 불구하고 제주도 남동 및 북서 연안을 제외하면 대부분 연안역 에너지 비율의 90% 이상을 차지하고 있어서(Cha and Moon, 2020), 연안역에서 물질을 수송하는 데 중요한 요인이라 할 수 있다. 연구지역인 우도 홍조단괴 해빈이 위치한 제주 동부 연안역에서는 주로 북북서-남남동의 왕복성 조류운동이 우세하게 나타나는데, 대마난류와 제주난류의 계절변동의 영향으로 겨울철에는 창조류가, 여름철에는 낙조류가 강한 특징은 보인다(Cha and Moon, 2020; Jeju Special Self-Governing Province, 2021).

우도수로 중앙부에서 대조기 조류의 유속은 낙조류와 창조류 모두 1 m/s 이상의 유속을 보이며, 소조기에도 다소 낮지만 50 cm/s 이상으로 나타날 수 있는 것으로 조사되었다(Jeju Special Self-Governing Province, 2021). 캘리포니아 연안역에서 홍조단괴가 형성되는 특정 유속을 측정한 결과, 0.25~0.30 m/s 이상은 되어야 성장 가능한 것으로 보고되었는데(Marrack, 1999), 우도 연안역에 관측된 조류 유속 결과는 홍조단괴 퇴적물 성장 및 이동에 조류가 잠재적 주요 요인으로 간주될 수 있음을 지시한다(Jeju Special Self-Governing Province, 2021). 특히, 홍조단괴 해빈 인근에서는 낙조기에 높은 유속의 조류가 북에서 남으로 발달하기 때문에 홍조단괴 해빈의 북서쪽에 위치한 공급 해역에서 홍조단괴 해빈 연안역 조하대로 운반할 수 있는 주요 요인으로 작용할 가능성이 높은 것으로 판단된다(Fig. 7-2).

일반적으로 잔차류는 물질 수송을 결정하는 중요한 요인이며, 발생 원인은 해류, 풍성류, 복잡한 지형, 담수 또는 냉각수 유입에 의한 경압력 등이 있다(Yanagi, 1999). 잔차류 벡터는 관측유속 벡터와 조류 벡터의 차를 나타낸 것으로 연안해역에서 물질의 수송을 해석하는데 사용된다(Moore, 1970; Tee, 1976). 기존 연구에서 보고된 홍조단괴 해빈 연안역 저층에서의 잔차류 분포 결과, 여름에는 동남동향의 성분이 우세하고 겨울철에는 북동향의 성분이 지배적이며, 흐름의 세기는 여름철이 4.5~6.5 cm/s, 겨울철에 3.3~3.8 cm/s로 다소의 계절적인 차이가 나타난다(Jeju Special Self-Governing Province, 2020). 저층 잔차류는 관측 시기에 따라 이동 방향이 다소 차이가 나지만 계절에 관계없이 전반적으로 홍조단괴 해빈 쪽으로 향하는 동향류가 지속적으로 관측되고 있어서(Fig. 7-2), 앞서 퇴적물 공급원으로 제시한 Type A와 B 해저에 분포하는 홍조단괴 퇴적물을 해빈으로 운반하여 공급하는 주요 수단으로 작용할 가능성이 높다.

2) 파랑

파랑의 특성은 수심과 파장의 관계에 따라 결정되며, 파도의 물의 움직임은 파장의 1/2이 되는 수심, 즉 파저면(wave base)까지 점차 그 반경이 작아지다가 사라진다. 파도가 연안으로 접근함에 따라 파저면 이하로 수심이 얕아지면 물입자의 운동은 원형(심해파)에서 타원형(전이파)을 거쳐 최종적으로는 전후 방향의 왕복 선운동(천해파)으로 바뀌게 된다. 이때 물 입자의 왕복운동은 파도의 진행 방향 운동이 그 반대 방향보다 다소 강하기 때문에 파도에 의해 퇴적물은 점차 해안 쪽으로 운반될 수 있다(Komar et al., 1976; Clifton, 2006).

기존에 보고된 우도 연안역에서의 파랑 관측 자료 결과(Fig. 7-3a)에서는 홍조단괴 해빈 연안역에서의 파도는 여름철에 평균 방위각 200°의 남동계절풍의 영향으로 남쪽 방향에서 들어오는 파랑이 우세하였고, 겨울철에는 북서계절풍의 영향으로 평균 방위각 357°의 북쪽 방향에서 들어오는 파랑이 우세하게 관측되었다(Jeju Special Self-Governing Province, 2021). 파랑의 파고는 우도수로의 수심이 얕고 길이가 짧아서 취송거리가 제한되기 때문에 계절별로 뚜렷한 차이 없이 유의파고의 평균값은 0.5~1.5 m 내외로 크지 않다. 다만, 수치모델링을 통해 계절별 파랑의 평균 파장 모의실험 결과(Fig. 7-3b), 동계와 하계에 모두 높지 않은 파고에도 불구하고 파장은 대체로 20 m 이상이며 이는 10 m 이상의 파저면을 지시하므로 홍조단괴 해빈에 인접한 얕은 수심의 연안역에서 해저 퇴적물이 유동할 가능성이 높음을 지시한다(Jeju Special Self-Governing Province, 2020). 특히, 강한 바람이 불어오는 겨울철 폭풍이나 여름철 태풍 시기에 특별히 높게 발달하는 이상파랑이 유입된다면 수로 내부의 깊은 해역에서도 해파 에너지가 작용하고 저층에 발달하는 해류의 에너지가 커지게 됨에 따라 퇴적물 이동이 발생할 수 있을 것이다. 아울러 우도수로 남쪽보다 북쪽에서 수심이 더 얕고, 계절풍은 통상 겨울철에 더 강하기 때문에 홍조단괴가 풍부하게 분포하는 주요 서식지인 북부 해역의 Type A 해저에서 겨울철 파랑에 의한 퇴적물 이동이 일어날 가능성이 큰 것으로 판단된다.

지난 4년간 풍향·풍속 자료 분석결과(Fig. 3-10), 제주 동부지역에는 하계 기간을 제외한 전 기간에 북풍계열의 바람이 우세하게 발생하는데, 이 경우 우도 연안에서는 북북서 계열의 파랑이 주로 발달하게 된다. 홍조단괴 주요 서식지가 해빈 북서쪽 약 1 km 지역에 위치하고, 제주지역의 계절풍은 파랑과 조류와 연계하여 작용하는 경우 연안역에 위치한 홍조단괴를 남쪽 방향으로 이동하는 주요 요인으로 작용할 것으로 판단된다.

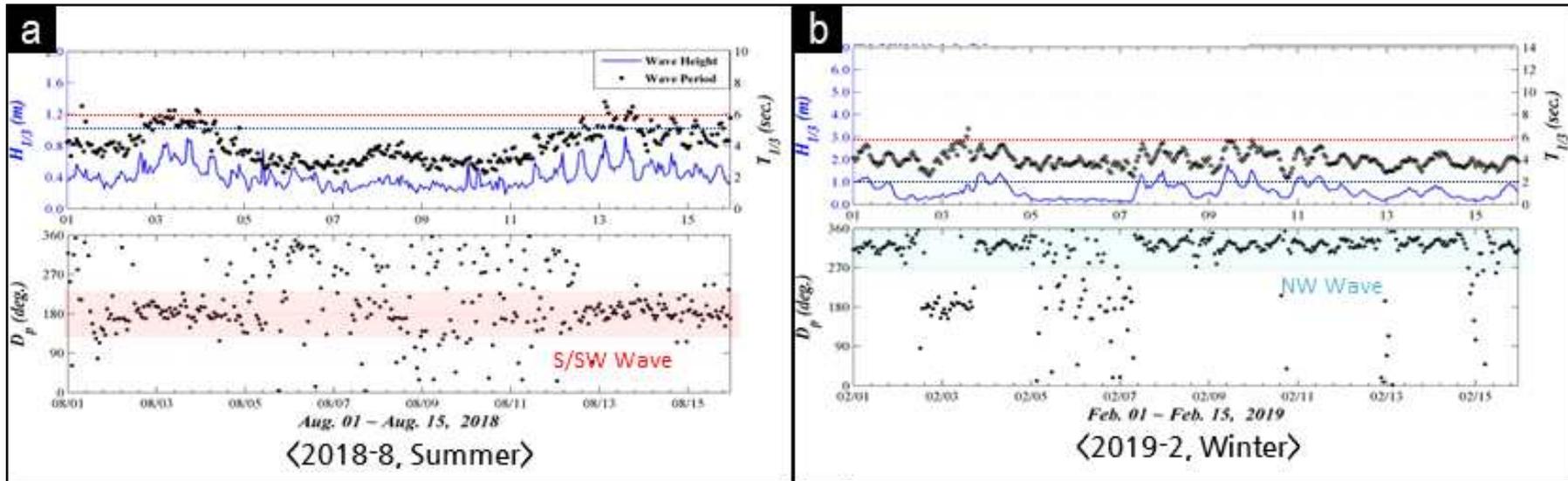


Fig. 7-3. (a) Time series of significant wave height and direction during the periods of 1–15 August 2018, and 1–15 February 2018. (b) Spatial patterns of simulated mean wave length (color) and direction (arrows) in August and February, 2019. Modified from Jeju Special Self-Governing Province (2020).

3) 연안류, 이안류 및 저층역류

파도가 해안선에 비스듬히 접근하는 경우, 이와 거의 동일한 방향으로 물의 이동이 일어나기 때문에 해안선에 평행한 방향으로 흐르는 연안류(longshore current)가 발생한다(Fig. 7-4)(Komar, 1976; Davis Jr and FitzGerald, 2004). 연안류는 일반적으로 해변면(전안)에 직접적인 영향을 미치는 것은 아니고 간조선 아래의 기파대(surf zone)나 세파대(breaker zone)에 주로 작용하기 때문에 홍조단괴 해변에서 연안류의 영향이 미치는 수심은 대부분 암반이 드러나 있는 수심 5 m 이하의 얕은 연안역이 될 것으로 추정된다. 따라서, 연안류는 외해역의 홍조단괴 분포지로부터 퇴적물을 공급하는 역할은 그다지 크지 않을 것으로 보이지만, 앞서 언급한 태풍이나 조류, 파랑에 의해 수심 5 m 내외의 천해역으로 운반되어 온 퇴적물을 다시 재동시키는 매개체로서 중요한 역할을 할 수 있다(Fig. 7-4).

한편, 해안선의 모양에 따라 서로 반대 방향의 연안류가 수렴하는 지점에서는 물이 모아져서 수면이 상승하게 되므로 이 물은 다시 외해역으로 빠져나가게 되는데, 이와 같이 해안선에서 바로 바다로 향하여 흐르는 해류를 이안류(rip current)라고 한다(Fig. 7-4). 이안류도 해수면 근처에서 시작하여 보통 해수 표층을 따라 이동하며 유속도 상당한 것으로 알려져 있으며, 이에 따라 이안류는 해변으로부터 유출되어 해수면 바로 아래의 조하대에 집적되어있는 퇴적물을 다시 외해역으로 운반하는 유출 수단으로 작용할 수 있다(Davis Jr and FitzGerald, 2004).

태풍이나 폭풍 시에는 단기간이지만 해안으로 접근하는 바람과 풍랑이 강화되고 이로 인해 해안선 부근에서 해수면 상승효과가 야기되면 해변의 후안까지도 해수와 파랑의 영향을 받게 되며 기존의 해변 퇴적물 중에 상대적으로 작은 입자들은 태풍과 폭풍 후반부에 바다 쪽으로 흐르는 강한 해류에 의해 해변으로부터 제거될 것이다. 아울러 조하대 근안에서는 이와 같이 일시적으로 상승된 해수면으로 인한 수압 상승으로 인해 바다 쪽으로 해저면을 따라 흐르는 해류가 발생하는데 이를 저층역류(undertow)라고 한다(Fig. 7-4; Lee and Yoo, 2012). 우도 해변 앞쪽에 있는 기반암 사이에 홍조단괴 입자들이 많이 흩어져 있는데 이들 중 상당 부분이 이와 같은 저층역류(undertow)에 의해 해변으로부터 유실될 수 있는 가능성이 존재한다. 따라서 홍조단괴 생산지인 상대적으로 깊은 수심에서 부유되어 이동된 홍조단괴 입자들 중에서 조립한 것들은 홍조단괴 해변에 남아있게 되고, 보다 세립한 입자들은 기반암 지역에 쌓이며, 그리고 가장 미세한 입자들은 다시 깊은 수심의 외해역으로 유실되는 것으로 퇴적-침식 시나리오를 구축할 수 있을 것이다. 기반암에 쌓인 중

립질 입자들은 태풍과 폭풍 이후에 생성되는 중급 규모의 파랑에 의해 서서히 홍조 단괴 해빈으로 이동되어 결국은 해빈 전안의 복원에 기여하는 것으로 보인다. 이러한 파랑 강도 변화에 따른 침식-퇴적 메커니즘은 육상의 정상적인 석영 입자의 해변에서 일반적으로 보고되고 있다(Lee et al., 2016).

4) 태풍

강한 바람을 동반한 태풍은 이상 파랑과 해류를 야기함으로써 해저 퇴적물 운반 매개체로서 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Swift et al., 1986). 폭풍에 의해 형성된 해류는 장주기와 높은 파고를 동반함에 따라 광역적인 범위로 연안에 영향을 미치게 된다(Snedden et al., 1988; Swift and Field, 1981). 조류·파랑 관측과 모델링 결과, 우도 해역에서는 태풍의 이동경로에 따라, 즉 제주도를 기준으로 동부 혹은 서부 해역 중에 어느 곳을 통과하는가에 따라 태풍 통과 시의 풍향이 달라지고, 그 결과 우도수로 해역의 해류와 단주기 풍파의 방향도 태풍 이동경로에 따라 정반대로 나타난다(Hong et al., 2021).

실제로 제주도 동부 해역을 통해 북상한 태풍 차마(2016년 10월) 통과 시에는 우도 해역에 북풍에 의한 남향류가 지배적이었고 파랑은 남쪽에서 유입되는 너울성 고파랑과 북풍에 의하여 급격하게 발달한 풍파 성분이 복합적으로 작용하였다(Fig 7-5a), 한편, 태풍 솔릭(2018년 9월)은 제주도 서편 경로를 통과하였는데, 강한 남풍에 의한 북향 해류(유속 1.5 m/s 이상)가 발달하였으며(Fig. 7-5b), 모두 북쪽으로 향하는 단주기 풍파성분과 장주기 너울성분이 겹쳐서(파고 5 m 이상) 나타나는 것으로 모사되었다(Fig. 7-6)(Hong et al., 2021). 상반된 이동경로를 보였던 두 태풍 사례의 모델링 실험 결과는 우도 홍조단괴 해빈의 경우 태풍 시 바람 방향과 함께 태풍의 이동속도와 조류 등도 복합적으로 작용하여 해류와 파랑 전파 특성에 매우 큰 변동이 나타날 수 있음을 지시한다(Jeju Special Self-Governing Province, 2021). 따라서, 태풍으로 인한 고에너지의 특성을 고려하면, 이 시기의 해류와 파랑은 우도수로 내 거의 대부분의 홍조단괴 분포지역에 영향을 미칠 가능성이 매우 크고, 이는 홍조단괴 퇴적물을 외해역에서 연안역을 거쳐 해빈의 전안 및 후안까지도 운반할 수 있는 가장 비중이 큰 수단으로 평가된다(Yoon et al., 2021). 다만, 태풍에 의한 해수 유동의 방향과 강도는 태풍 이동의 경로와 속도, 그리고 조석 시기 등에 따라 변동성이 크므로 태풍은 퇴적물의 공급요인이면서 동시에 유출요인으로도 작용할 것이다.

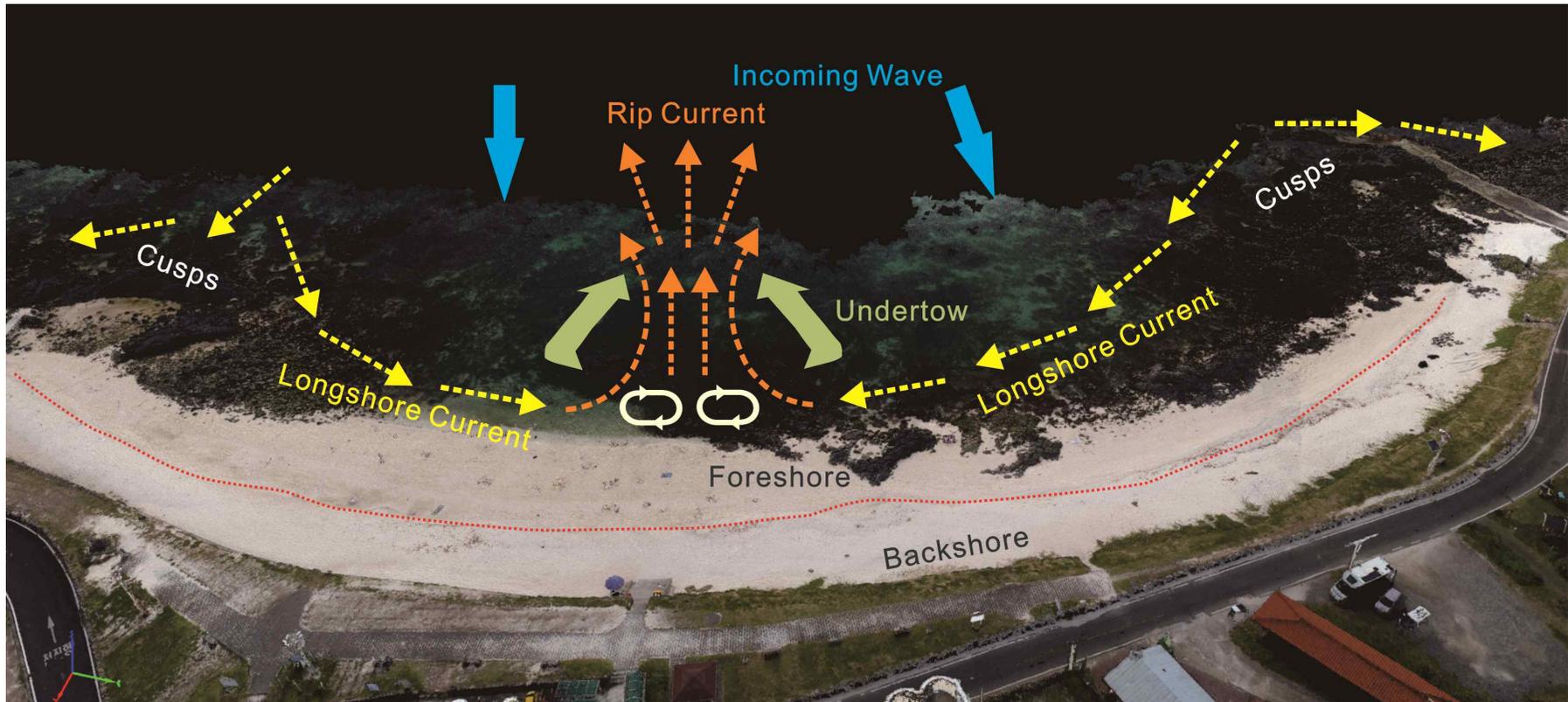


Fig. 7-4. Nearshore processes for sediment transportation in a subtidal beach.

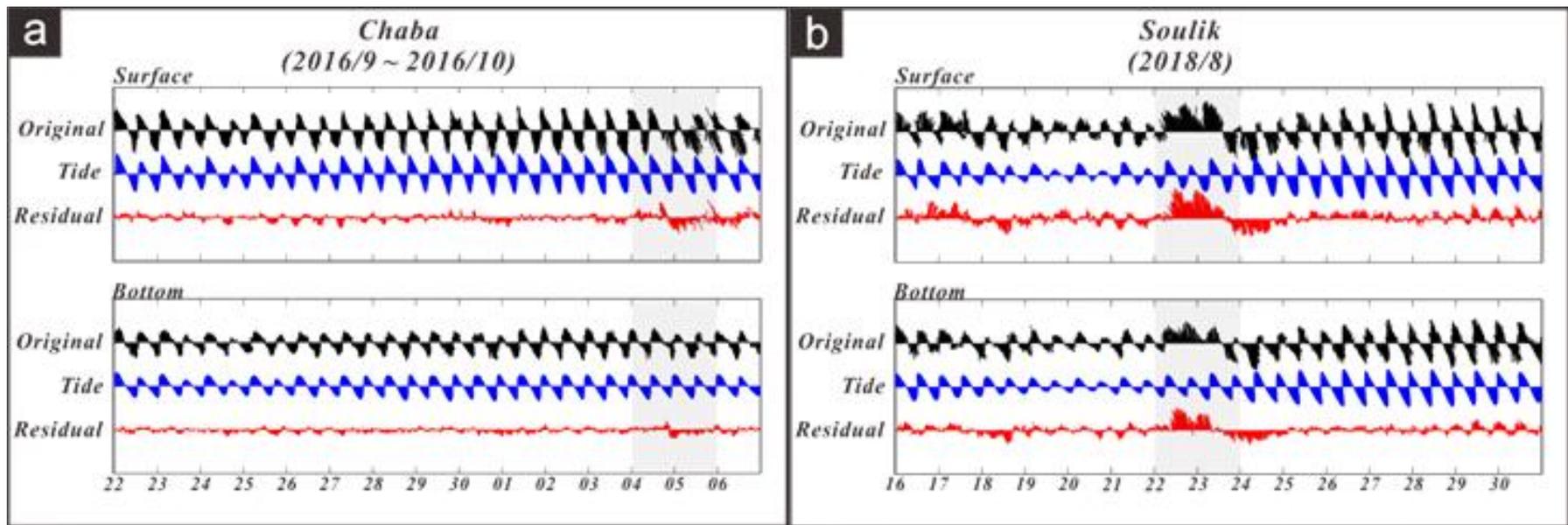


Fig. 7-5. Time series of current vectors at the ADCP site during the Chaba (a), Soulik (b). Modified from Yoon et al. (2021).

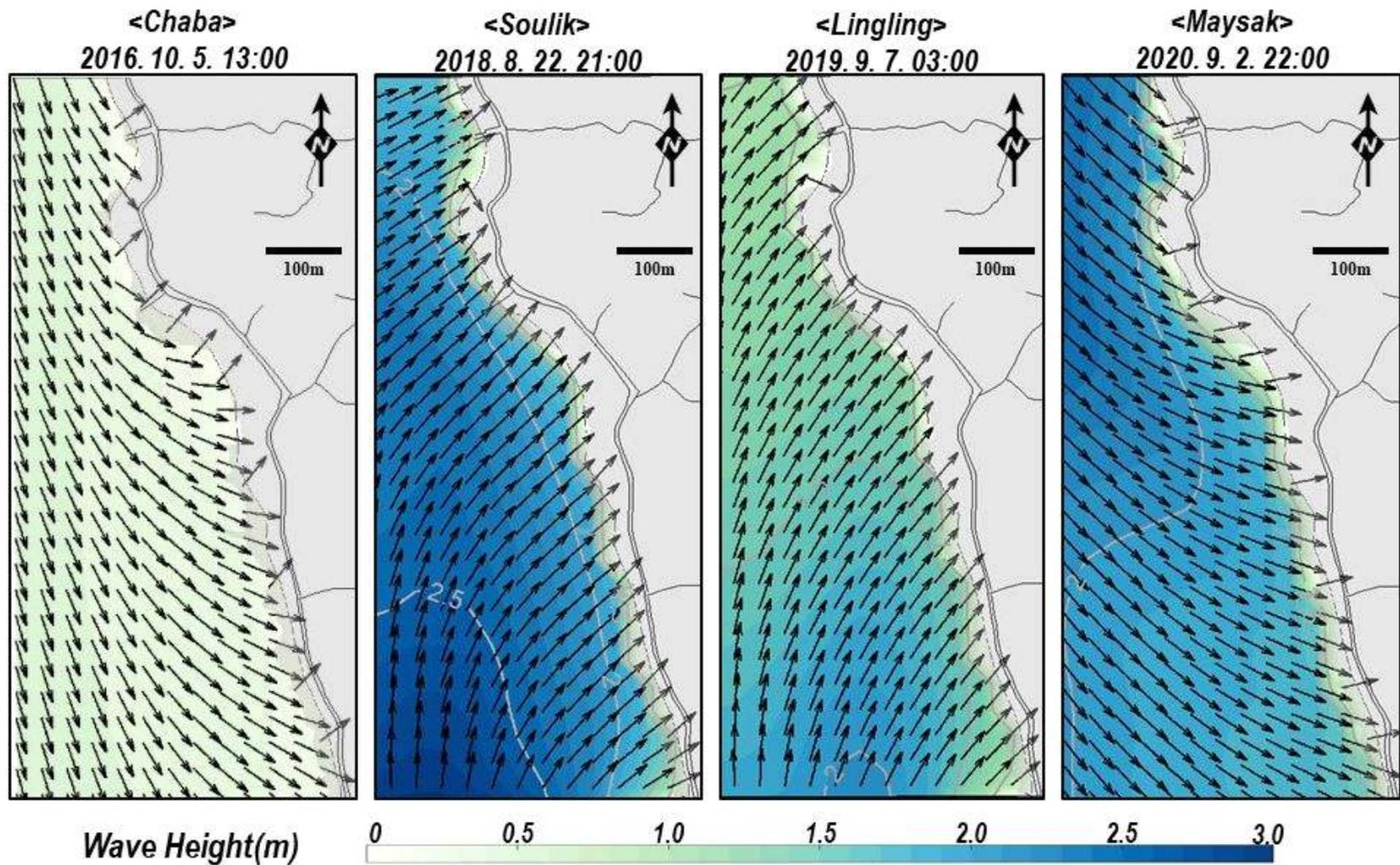


Fig. 7-6. Spatial patterns of simulated mean wave direction (arrows) and significant wave height (colors) during four typhoons. After Yoon et al. (2021).

7.1.3 퇴적물 재배치

해빈의 규모(부피와 면적)는 궁극적으로 최저 해수면(간조선) 상부의 전안과 후안에서의 퇴적물 집적과 침식(유실)에 의해 결정되는데, 주요 요인은 파도가 해빈면에 닿아 일으키는 물결과 건조한 모래가 쌓여있는 후안에 작용하는 바람이다(Fig. 7-7a, b)(Bird, 2010). 즉, 외해로부터 해류와 파도에 의해 충분히 퇴적물이 공급되더라도 해빈의 전안과 후안에 작용하는 파도나 바람의 세기가 크다면 해빈은 확장되기보다는 유실될 가능성이 커지게 된다. 물론 외해역에서 연안역으로의 퇴적물 운반 매개체와 해빈에서의 퇴적물 재배치 요인이 전혀 별개로 작용하는 것은 아니고 파도와 태풍의 경우에는 서로 밀접하게 연계되어 있으며, 조석에 의한 수위는 이들 매개체가 작용하는 지역을 결정함으로써 영향을 미치게 된다(Davis Jr and FitzGerald, 2004).

후안과 근안 사이에 발달하는 세파대(swash zone)는 파도 에너지가 직접 닿는 곳으로서, 파도가 유입되면 강한 수류가 평탄한 전안을 따라 밀고 올라가면서 세파(swash wave)를 형성하며, 상단부로 올라갔던 물결은 중력에 의해 다시 바다 쪽으로 되돌아 나오면서 뒷물결(backwash)을 형성한다(Fig. 7-6a). 이때 파랑이 닿는 곳에 위치한 퇴적물들은 일시적으로 부유하게 되며 해류에 의해 운반된다(Davis Jr and FitzGerald, 2004). 해빈에 작용하는 세파와 뒷물결에 의해 퇴적물 입자는 해빈면 위에서 지그재그 형태로 움직이면서 해안선에 평행한 방향으로 서서히 이동하게 되며, 이동 방향은 연안류와 동일하게 나타난다. 이때 세파가 뒷물결보다 강할 경우 퇴적물은 후안 쪽으로 이동되며, 뒷물결이 더 강할 경우에는 바다 쪽으로 운반되어 결국에는 해빈으로부터 빠져나가게 된다. 일반적으로 해빈면의 경사가 완만하고 조립질 퇴적물로 덮여 있는 경우에 뒷물결보다 세파의 영향이 더 크게 작용하는 경향이 있다(Davis Jr and FitzGerald, 2004).

바람에 의한 퇴적물 운반은 주로 파랑의 영향을 받지 않는 후안 지역에서 작용하며, 공기는 물에 비해 낮은 밀도와 점성도를 갖기 때문에 다양한 크기의 난류(turbulence)가 발생하게 된다. 바람에 의한 퇴적물의 이동은 입자와 매개체(공기) 사이의 밀도차가 크기 때문에 훨씬 작은 부력을 받아서 운반되는 입자의 크기는 상대적으로 작아짐에 따라 조립질 모래나 자갈 크기의 입자는 운반이 곤란하며, 세립질 입자라도 젖어 있는 경우에도 점착력이 커져서 이동이 어렵게 된다. 마른 상태의 세립질 모래와 더 크기의 입자들은 끌림이나 도약, 혹은 부유 방식으로 이동되

며, 작용되는 바람의 방향에 따라 운반된다(Davis Jr and FitzGerald, 2004; Fig. 7-6b). 우도 홍조단괴 해변에서는 계절에 따라 주로 계절풍과 연계된 연안류에 의해 지형변화가 발생하는데, 지형이 변화하는데, 춘계-하계 기간에는 남동풍이 우세함에 따라 남에서 북으로 퇴적물 이동이 발생하고 이와는 반대로 하계-추계-동계 기간에는 북서풍의 영향을 받아 북에서 남 방향으로의 퇴적물 이동이 발생하는 것으로 해석된다(Fig. 7-7c, d).

기존 연구에서는 후안 지역의 퇴적물 비사량을 측정하였으며, 주로 강한 북서계절풍이 부는 겨울철에 많은 양의 비사가 측정되었다(Jeju Special Self-Governing Province, 2021). 이를 통해 홍조단괴 해변 후안에서는 평상시 파도의 영향이 미치지 않는 상부 전안의 퇴적물이 해변의 후안으로 재동되는데, 후안에 호안이 설치되어 있어서 바람 운반 모래는 대부분 해변 구역 안에 보존되지만, 4구역 북부구간은 호안이 없거나 낮은 상태로 유지되고 있어 홍조단괴 퇴적물이 해변 뒤편의 도로나 농지로 유실된다(Fig. 7-6e).

7.2. 해변의 지형변화 특성

7.2.1 계절별 변화 특성

1) 하계(늦봄~가을)

라이다 측량에 의한 해변의 부피 변화를 보면, 2019년 5~10월에 해변의 모든 구역에서 규모가 확장되면서 전 조사기간 중 가장 큰 비율로 부피(라이다 기반)가 증가하였다(Fig. 7-8). 동시에 드론 측량 면적도 다소의 차이는 있지만 3구역을 중심으로 증가하여 나타난다(Fig. 7-9). 이로부터 외해역으로부터의 활발한 퇴적물 유입과 이에 따른 해안선의 전진이 일어났던 것으로 추정된다. 즉 외부로부터 퇴적물 순유입이 이루어지는 시기라고 할 수 있다.

앞서도 언급하였지만, 이 시기 파랑은 동계와는 대조적으로 남서쪽으로부터 유입되는데(Fig. 7-3a), 상세한 메커니즘은 아직 불확실하지만, 북향하는 파랑이 홍조단괴 해변의 유실을 최소화하거나 부양하는 효과를 주는 것으로 추정된다. 여름철에는 파장이 긴 해파가 우세하게 작용하는 것으로 알려져 있는데, 이 경우 파도는 상대적으로 깊은 수심의 외해역(퇴적물 공급지)에 작용하면서 퇴적물을 재동시켜 서서히 해안 쪽으로 운반하는 것으로 보고되어 있으며, 이로 인하여 일반적으로 해

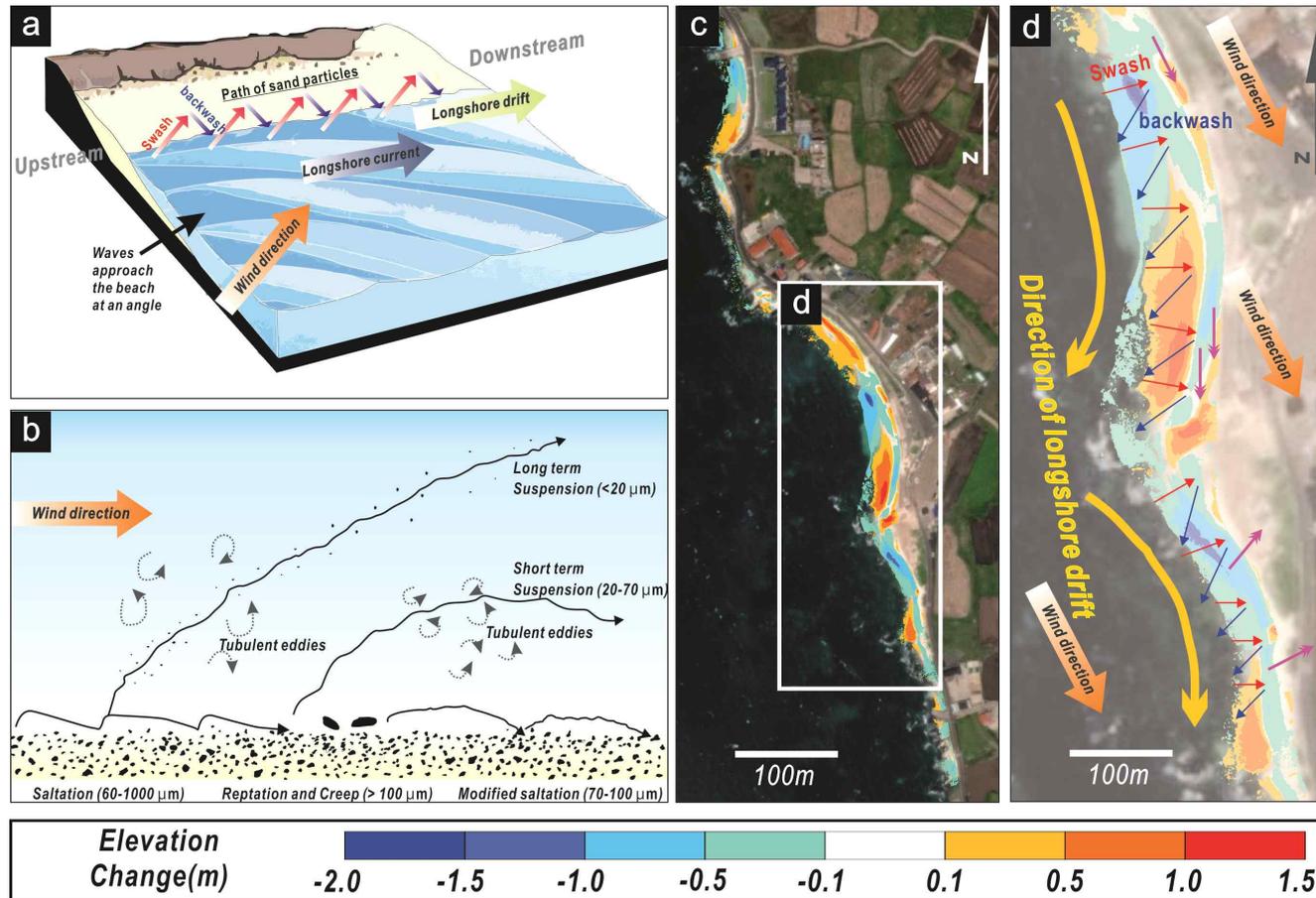


Fig. 7-7. (a) Conceptual diagram of the sediment transport by longshore current and wave swash-backwash process in a beach, the longshore current as part of the Udo rhodolith nearshore environment (modified from Trujillo and Thurman, 2008). (b) Various mechanisms of aeolian sediment transport (modified from Nickling and McKenna-Neuman, 2009). (c) Volume changes of the Udo Rhodolith Beach between July 2018 and April 2019. (d) Conceptual model of sediment transport processes governing the topographic change of the Udo Rhodolith Beach under the southeastward wind field.

빈에서는 여름철에 모래가 쌓이면서 해변 규모가 커진다(Fig. 7-9). 아울러 겨울철에 비해 파저면이 깊어지기 때문(긴 파장)에 해안으로 접근하는 동안 파도가 닿는 해저면의 면적이 증가하고, 그 결과 파도가 해안선에 도달했을 때에는 에너지의 상당량이 소모된 상태이므로 침식보다는 퇴적을 야기하게 된다(Fig. 7-9b).

2) 동계(가을~초봄)

동계 기간 드론 측량 면적을 보면 대체로 늦가을에 정체되어 있거나 다소 증가하다가 2월부터 4월 사이에 모든 구역의 퇴적물 분포면적이 감소한 것으로 나타났으며(Fig. 7-9), 해변의 라이다 측량 부피는 2016-2017년 늦가을(11월)에서 겨울을 거쳐 초봄(4월)에 이르는 기간에 감소한 반면, 2018-2019년과 2019-2020년 동일 계절에는 거의 변화가 없는 것으로 나타난다(Fig. 7-8). 따라서, 늦가을부터 초봄까지 홍조단괴 해변은 대체로 퇴적물 유실로 인해 부피가 축소하는 경향이 나타나며, 이로부터 유실된 퇴적물은 조하대 연안역으로 이동하였다가 이듬해 늦겨울부터 본격적으로 외해로 유출되는 것으로 추정된다(Fig. 7-11a).

동계(가을-초봄)에 나타나는 세부 지형변화는 가을-겨울 사이 침식부와 퇴적부의 분포패턴은 연도에 관계없이 서로 유사한(각 구역의 북부는 침식, 남부는 퇴적) 반면, 겨울에서 초봄 사이에는 연도별로 다소 상이하게 나타난다. 제주지역에는 춘계기간까지 북서풍 계열 바람이 우세하게 나타나는데, 북서풍의 영향이 늦봄까지 작용하는 경우 '북-중앙 침식 남부퇴적'의 지형변화 양상을 보이고, 남동풍의 영향이 있는 경우 '북적남식'의 지형변화 양상이 나타나는 것으로 해석된다(Fig. 7-11b). 본 연구에서 관측된 동계-초봄 사이의 해변 지형변화 분석 결과, 2016년 춘계기간에는 초봄(4월)까지 북서풍이 우세하게 발달하였으나, 늦봄에는 남동풍으로의 계절풍 변화가 발생하였다. 이로 인하여 해변 지형이 춘계-하계에 발달하는 '북적남식'지형이 발달한 것으로 해석된다. 반대로 2018년에는 우도 주변 해역에서 겨울철을 전후한 시기에 계절풍의 영향으로 북서로부터 유입되는 파랑이 우세하게 나타나는데 늦가을에서 초봄까지 나타나는 홍조단괴 해변의 규모 축소는 이러한 계절적 기상 및 해황 특성의 결과로 추정된다(Fig. 7-8). 일반적으로 해변에서는 겨울철에 파장이 짧고 파고가 높은 폭풍파가 전안에 파괴적으로 작용하는데, 이로 인해 퇴적물의 전안이 내륙방향으로 후퇴하게 된다. 이때 유실된 퇴적물들은 파도는 주로 수심이 얇은 해변의 상부 근안과 전안에 집중되면서 해변 퇴적물은 수층에

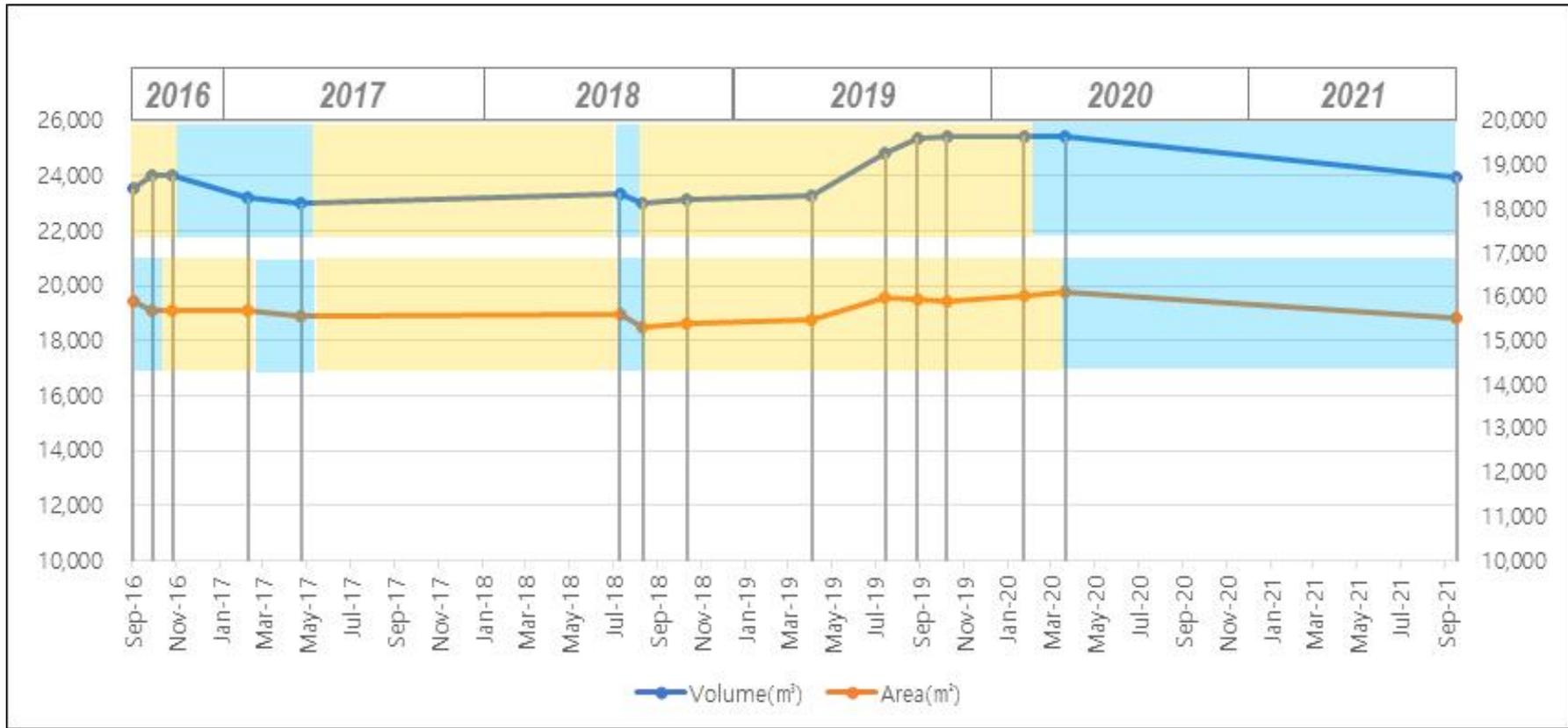


Fig. 7-8. Lidar-based on area (m²) and volume (m³) changes in the Udo Rhodolith Beach from 2016 to 2021. Yellow and blue squares denote accretion and erosion periods.

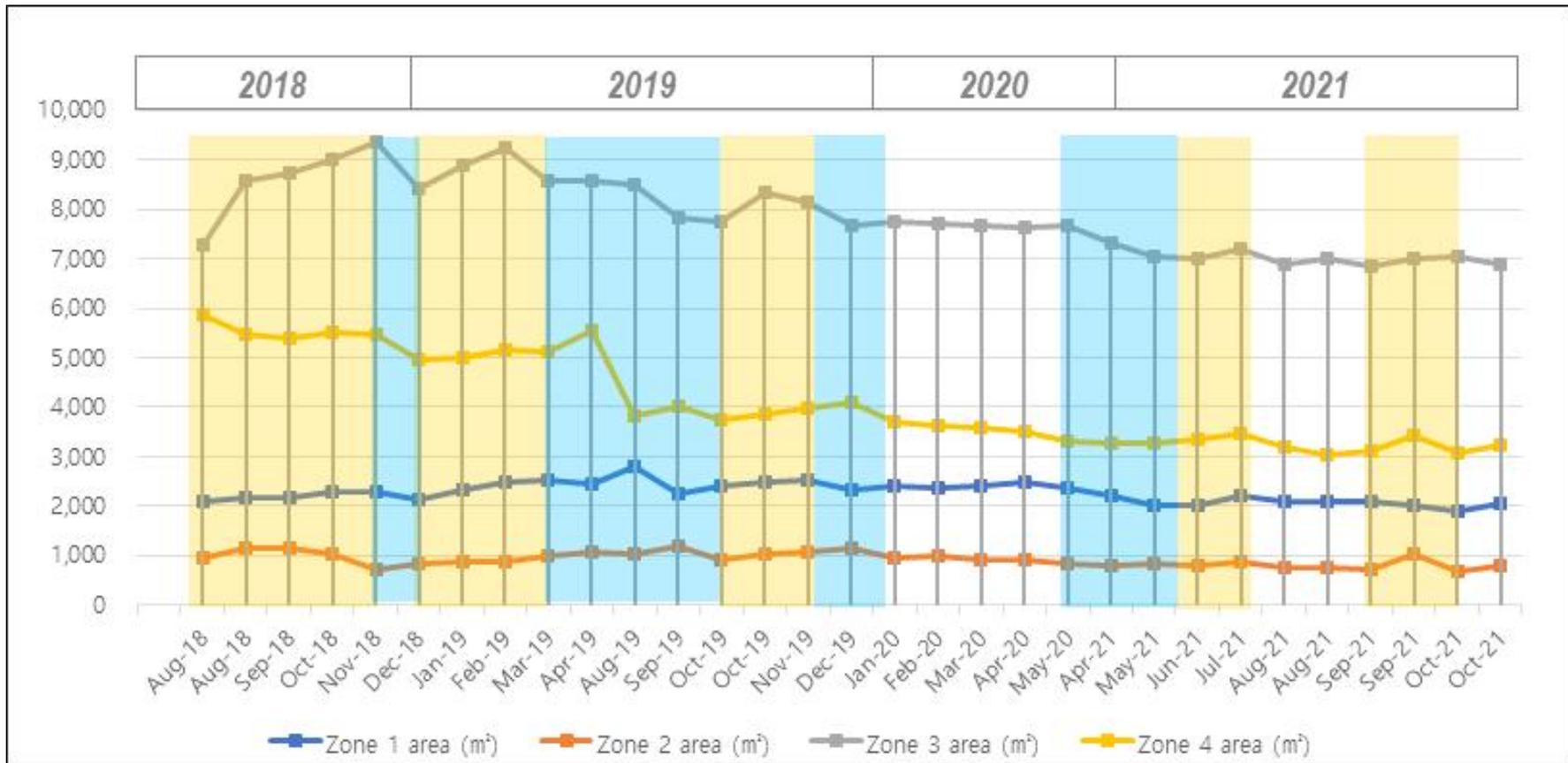


Fig. 7-9. Drone-based area (m²) change in the Udo Rhodolith Beach from 2018 to 2021. Red broken lines indicate the typhoon events with names, and yellow and blue squares denote accretion and erosion periods, respectively.

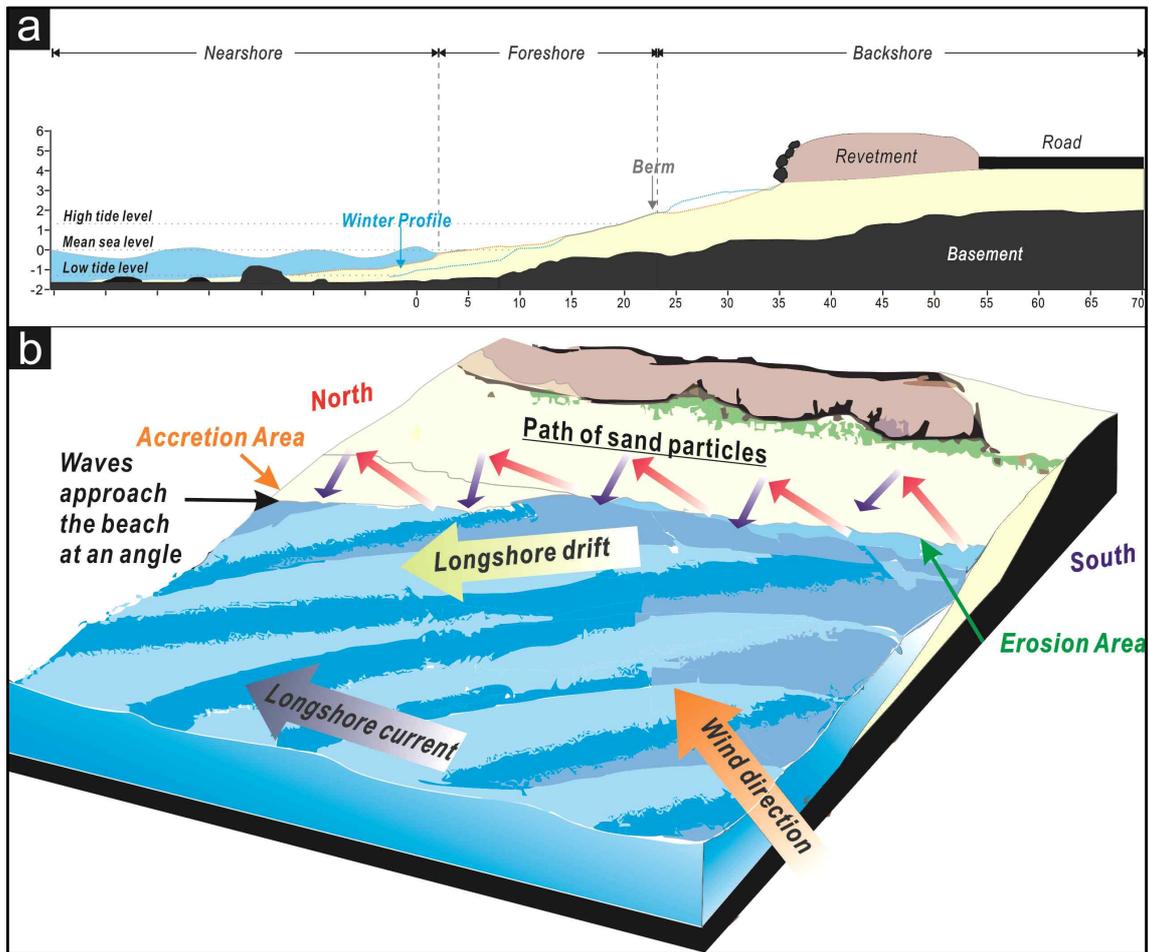


Fig. 7-10. (a) Schematic cross-section of the Udo Rhodolith Beach showing overall topography and distribution of the beach sediments and basement rocks during summer season. (b) Conceptual model of sediment transport processes governing the topographic change of the Udo Rhodolith Beach during summer season.

부유된 채로 외해로 빠져나가서 파도의 영향이 적은 근안과 원안에 집적되고, 이듬해 하절기에 이 퇴적물은 재동되어 해빈으로 공급되는 것으로 해석된다.

3) 태풍 시기 변화

본 연구기간 동안 차바(2016년 10월), 솔릭(2018년 9월), 링링(2019년 9월), 마이삭(2020년 10월) 등 네 번의 태풍이 홍조단괴 해빈을 통과하였는데, 해빈의 부피는 다소 증가(2016년 차바, 2019년 링링)하거나 미미한 침식(2018년 솔릭)이 나타났다(Table 5-9). 한편, 해빈 전안과 후안의 침식된 부분과 퇴적된 부분의 분포 양상은 솔릭과 링링 경우 '북적남식'으로 춘계-하계에서 나타나는 지형변화 양상과 유사하게 나타나며, 차바와 마이삭은 추계-동계-춘계에서 발생하는 지형변화 양상을 보인다(Fig. 5-26). 차바와 마이삭 시기에는 남향의 해류와 풍파 유입이 우세하였고, 솔릭과 링링은 모두 북향의 해류와 풍파 영향을 받았는데(Fig. 7-6), 다만, 차바 때에는 단주기 풍파와 장주기 너울성 파도가 반대 방향이고 솔릭과 링링은 동일 방향으로 발생하였다(Hong et al., 2021).

태풍 통과 시의 부피 증감 관계를 보면, 솔릭과 링링 사례에서는 동일한 풍향과 해류의 조건이지만 링링은 증가가 우세하고 솔릭 때에는 미약하지만 감소, 마이삭 시기에는 상당 규모의 감소가 발생하였으며, 풍향이 서로 반대였던 차바와 링링 통과 후에 모두 부피 증가가 발생하였다(Table 5-9). 평상시 기상조건에서의 잔차류는 조류의 우세 여부에 따라 남동쪽 또는 북동 방향으로 향하는데, 일반적으로 태풍환경에서는 파랑 및 해류가 강화됨에 따라 해빈으로 퇴적물이 이동에 상당한 영향을 미칠 것으로 판단된다(Hong et al., 2021; Yoon et al., 2021).

하지만, 솔릭과 마이삭 태풍 시 태풍의 경로가 다름에도 불구하고 모두 해빈 규모 감소 현상이 나타났다. 위 두 개의 태풍이 발생기간 해황 특성을 보면 만조시간과 겹치는 공통적인 특징이 있는데(Table 7-1), 일반적으로 만조와 더불어 폭풍으로 인하여 파고가 높아지는 경우 파도 에너지는 후안까지 영향을 미치게 된다. 특히, 우도 홍조단괴 해빈은 호안이 설치되어 있는데 파도의 영향이 호안에 닿는 경우, 뒷물결의 에너지에 반사되는 힘이 가해져 퇴적물 유실의 원인이 되기도 한다. 이에 따라 조류가 매우 크게 나타나는 대조기에 풍속이 높고 이동속도가 느린 태풍이 제주도 인근 해역을 통과한다면, 우도 홍조단괴 해빈 인근의 해류 세기와 파랑 분포는 더욱 커질 수 있으며, 만조 시에 태풍이 통과할 경우에는 풍파가 후안까지

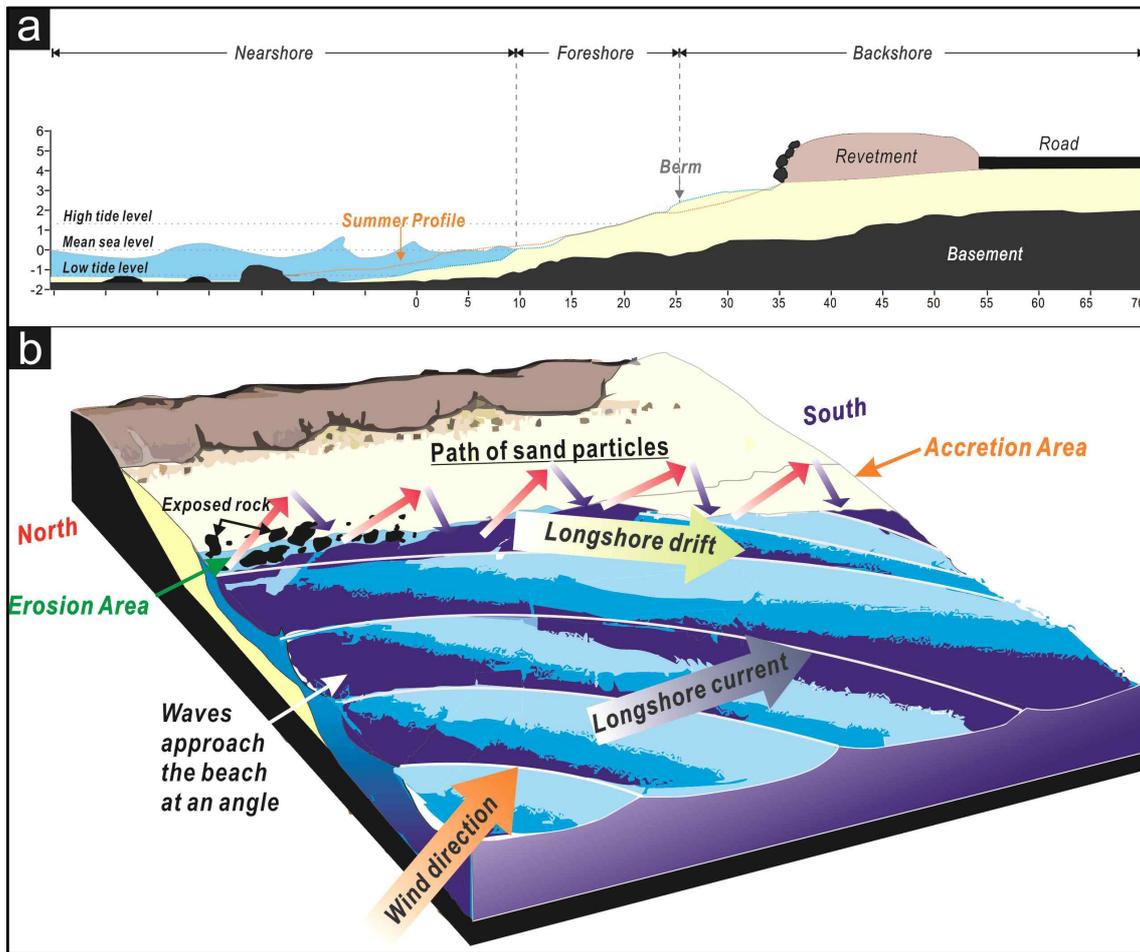


Fig. 7-11. (a) Schematic cross-section of the Udo Rhodolith Beach showing overall topography and distribution of the beach sediments and basement rocks during winter season. (b) Conceptual model of sediment transport processes governing the topographic change of the Udo Rhodolith Beach during winter season.

도달하면서 홍조단괴 해빈과 같이 호안이 설치된 곳에서는 뒷물결이 강화되어 상당한 침식이 야기될 수도 있다.

해빈의 부피증감과는 무관하게, 해빈 구역별로 침식부와 퇴적부의 분포패턴은 태풍에 의한 해류의 방향과 밀접한 관계를 갖는 것으로 보인다(Figs. 5-26, 7-6). 즉 남향류가 흐를 때는 북식남적, 북향류의 경우에는 북적남식의 패턴을 보이며, 이는 해빈 전면에서 나타나는 세파와 뒷물결의 지그재그형 퇴적물 이동에 따른 것으로 해석된다(Fig. 7-12).

4) 해빈-연안역간 퇴적물 교환

이 연구에서는 라이다와 드론 등 두 가지 방식으로 해빈의 면적을 측량하였다. 라이다 조사에서는 평균해수면 상부의 전안 및 후안 등 대기 중에 노출되어 있는 구간의 면적을 측량하며, 드론 촬영에서는 육상은 물론 가지적으로 확인 가능한 해수면 하 연안역까지도 측량범위에 포함된다. 따라서, 해수면 상부의 라이다와 드론의 촬영 범위가 동일하지 않고, 두 가지 측량방식이 오차 범위가 다르기 때문에 변화율의 절대값을 직접 비교할 수는 없지만, 다른 관점, 즉 증가 혹은 감소 등의 상대적인 변화 경향을 통해 해수면 상부의 홍조단괴 해빈과 이에 인접한 조하대, 그리고 외해역과의 퇴적물 교류 방식에 대해 추정해볼 수 있다.

제5장에서 두 가지 방식의 면적을 비교해 보았는데, 해빈 1구역에서 태풍 후-추계(2018년), 추계-춘계(2018-2019년), 하계-태풍 후(2019년) 시기에, 그리고 3구역에서 하계-태풍 후(2019년)와 태풍 후-추계(2018년)에 라이다와 드론의 면적은 서로 반대의 변화, 즉 한 쪽이 감소하면 다른 쪽은 증가하는 대조적인 양상으로 나타났다. 이는 외해역과의 퇴적물 교류가 매우 제한된 상태에서 해빈 전안과 조하대 사이에서만 국지적인 퇴적물 교환이 일어났음을 시사하는 것으로 해석할 수 있다. 한편, 2019년 춘계-하계에 모든 구역에서 라이다와 드론 면적이 동시에 증가하였는데 이는 외해역으로부터 조하대는 물론 해수면 상부의 해빈 전안과 후안까지 퇴적물이 이동하여 집적된 결과로 해석된다. 반대로, 라이다와 드론 면적이 모두 상당한 비율로 감소되었다면, 해빈 퇴적물이 외해로 유출된 것으로 판단할 수 있는데, 이 연구에서 이와 같은 사례는 나타나지 않았다.

이외에도 변화율의 차이는 있지만 라이다와 드론의 면적 변화양상이 서로 다른

Table 7-1. Weather information of the eastern Jeju Island during the typhoon events. Data from KMA (2017, 2019, 2020, 2021), Hong et al. (2021), and Yoon et al. (2021).

Name of typhoon		Chaba		Soulik	Lingling		Maysak
Peak date		Oct. 4 th 2016		Aug. 22 nd 2018	Sep. 6 th 2019		Sep. 3 rd 2020
Position of typhoon track relative to Jeju Island		Eastern side		Western side	Western side		Eastern side
Duration (hour)		36		43	24		36
Wind characteristics	Prevailing wind	E	N	SE	E	S	N
	Max wind speed (m/s)	35		25	25		35
	Average wind speed (m/s)	17.7		17.7	15.3		14.24
Wave characteristics	Max Wave height (m)			>3	2		
	Direction			N	N		
Residual current	Max current speed (cm/s)	60		100			
	Direction	SE		N	N		
Tide	Tidal range (cm)	174		165	99		194
	Mean sea level (cm)	156.9		174.6	166.9		172.3
	High water level (cm)	250		250	220		320
	Tide level during peak time	Low tide		Low and High tide	Low tide		High tide
Survey date	Pre-typhoon	Sep. 20 th 2016		Jul. 30 st 2018	Aug. 3 rd 2019		Aug. 27 th 2020
	Post-typhoon from peak date	Oct. 17 th 2016 (+13)		Aug. 31 st 2018 (+9)	Sep. 16 th 2019 (+10)		Sep. 4 th 2020 (+1)
Survey method		LiDAR		LiDAR	LiDAR		Drone

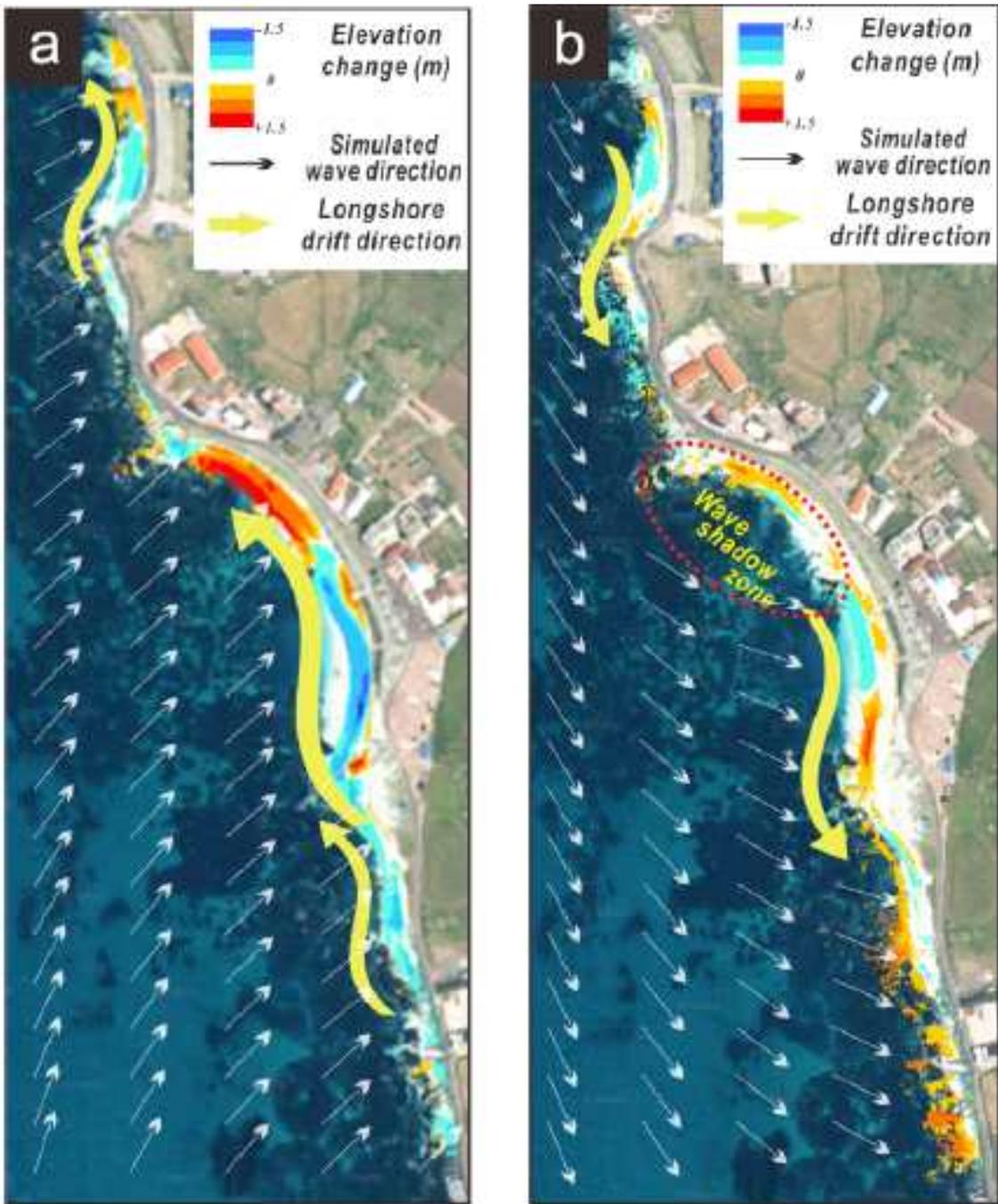


Fig. 7-12. Conceptual model of sediment transport processes governing the topographic change of the Udo Rhodolith Beach under the northeastward (a) and southeastward (b) wave fields. After Yoon et al. (2021).

경향을 보이는 사례가 다수 나타나며, 이는 홍조단괴 해빈을 구성하는 퇴적물의 유출입에 있어서 육상의 해빈 영역과 해수면 하의 조하대 영역이 연계는 되어 있지만 별개의 퇴적물 저장지로 작용한다는 것을 지시한다. 즉, 해빈 퇴적물은 단순히 외해역에서 과도나 해류에 의해 바로 해빈의 전안이나 후안에 집적되거나 이후에 해황에 따라 바로 외해역으로 유실되는 것이 아니라 중간에 위치한 조하대 연안역을 경유지로 하여 다양한 경로로 활발히 유출입되고 있는 것으로 보인다. 이는 해빈과 궁극적인 퇴적물 공급지가 되는 외해역 사이에 불규칙한 기반암대가 얇은 수심까지 돌출되어 있어서, 해빈과 외해역의 즉각적인 단기적 퇴적물 교류가 방해받기 때문으로 해석된다.

단기적으로 해빈에서 유실된 퇴적물은 해빈 연안의 암반돌출대를 통과할만한 강한 해양작용이 뒷받침되지 않으면 인접한 조하대 연안에 집적되며, 이후 해황에 따라 해빈으로 다시 유입되어 유실된 부분을 복원하기도 하는 것으로 보이는데, 이러한 단기적 퇴적물의 유출입은 대조기의 조류나 이상파랑이 주요인으로 판단된다. 따라서 단기적인 해빈 지형변화는 외해역 홍조단괴 서식지와 퇴적물 교환에 의한 것이라기보다는 해빈 인접 해저와의 퇴적물 교환에 의한 것으로 해석된다. 하지만 연간 규모의 해빈 지형의 변화는 외해역의 홍조단괴 서식지로의 유출이나 유입에 따른 것으로 봐야 할 것이다(Fig. 7-13).

7.2.2 해빈의 장기적 변화

라이다 측량자료에서 홍조단괴 해빈의 측량 총부피는 2016년에 증가하였다가 2017년 후반기와 2019년 전반기 사이에는 감소하였다가 다시 2020년까지 증가하는 것으로 조사되었으며 2021년 10월 측량에서는 감소하여 2016년 추계와 비슷한 총 부피량을 보인다(Fig. 7-8). 이와 같은 장기적 변화양상으로 볼 때, 홍조단괴 해빈의 유실은 1~2년 주기의 단기적인 현상일 가능성이 높으며, 장기적으로는 연도별 해황 특성에 따라 단기적으로 유실이 되었다가도, 이후 해빈 부양에 유리한 해황특성이 조성될 경우 원래 상태로 복원될 수 있는 자체 복원 잠재력을 지니고 있는 것으로 판단된다. 향후 지속적으로 모니터링 자료가 축적된다면 해빈규모에 대한 좀 더 상세하고 정량적인(주기와 규모 등) 변동 특성을 알 수 있을 것이다.

한편, 지난 5년간의 전체 조사기간 동안에 감소-증가-감소의 경향을 보이는데,

라이다 측량 부피는 1.9% 증가하고 면적은 2.5% 감소하는 역 상관관계를 보이는 데, 이는 육상 영역의 해빈 부피가 확대됨에도 불구하고 하부 전안과 조하대의 퇴적물은 유실되어 점진적인 해안선의 후퇴가 일어나고 있음을 지시하는 것으로 판단된다. 아울러, 드론 영상을 통해 산정된 평균해수면 하부의 조하대와 인근 연안역까지 포함된 영역에서도 퇴적물의 분포면적은 조사기간 동안 감소하는 추세가 나타나며, 최종 측량에서는 2018년 8월 대비 19.8% 감소하였는데, 조하대 지역과 더불어 암반사이에 분포하는 홍조단괴들 유실이 그 원인으로 판단된다.

Jeju Special Self-governing Province (2017)에서는 호안 축조 전, 후 위성사진에서 나타나는 면적 변화, 호안과 해빈을 연결하는 계단과 호안벽 하단부가 해파의 영향으로 훼손된 사례를 통해 호안 축조에 따른 연안환경의 변화를 주요 요인으로 제시하였다.

전안과 후안은 파도에 의해 모래 퇴적 한계선인 정단을 기준으로 구분할 수 있으며, 이 지점을 경계로 바다 쪽으로는 급한 경사, 내륙방향으로는 완만한 경사가 나타나는 지형적 특징이 나타난다(Komar, 1976). 홍조단괴 해빈은 겨울철 단주기의 고파랑에 의해 정단이 내륙방향으로 후퇴되어 후안의 폭은 약 1~2 m 범위를 보이는데, 겨울철 이상 파랑 또는 여름철 폭풍이 발생하는 경우 파랑에너지가 호안에 직접 영향을 미치게 될 가능성 또한 배제할 수 없다. 일반적으로 특히 파랑에 의한 해빈 침식을 방호하기 위하여 호안을 설치하는데, 일반적으로 직립제 형태의 호안은 반사파 등의 영향으로 전면의 해빈이 유실되는 단점이 있다(Kim and Koh, 2020). 홍조단괴 해빈에 설치된 호안은 직립형태로 축조되어 겨울철 이상파랑이 발생하는 경우 파랑에너지가 소멸되지 않고 반사되어 홍조단괴 퇴적물의 유실이 발생할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구 결과, 해빈 전안(해안선)의 후퇴가 일어나고 있음이 확인되며, 이는 시각적으로 해빈이 유실되고 있다는 인식의 주된 사유 중의 하나라고 할 수 있다. 다만, 일정 경사를 유지하려는 해빈의 특성상, 해빈 면적의 감소는 향후 점차 느려질 것으로 예측된다. 아울러, 기후 온난화와 우도 해안지역의 개발 등의 영향으로 해류와 파랑 특성이 변화되고 해수면 상승이 지속된다면 퇴적물 유출입의 평행이 교란되어 향후 홍조단괴 해빈의 지형변화가 급격히 진행될 가능성도 배제하지 못한다.

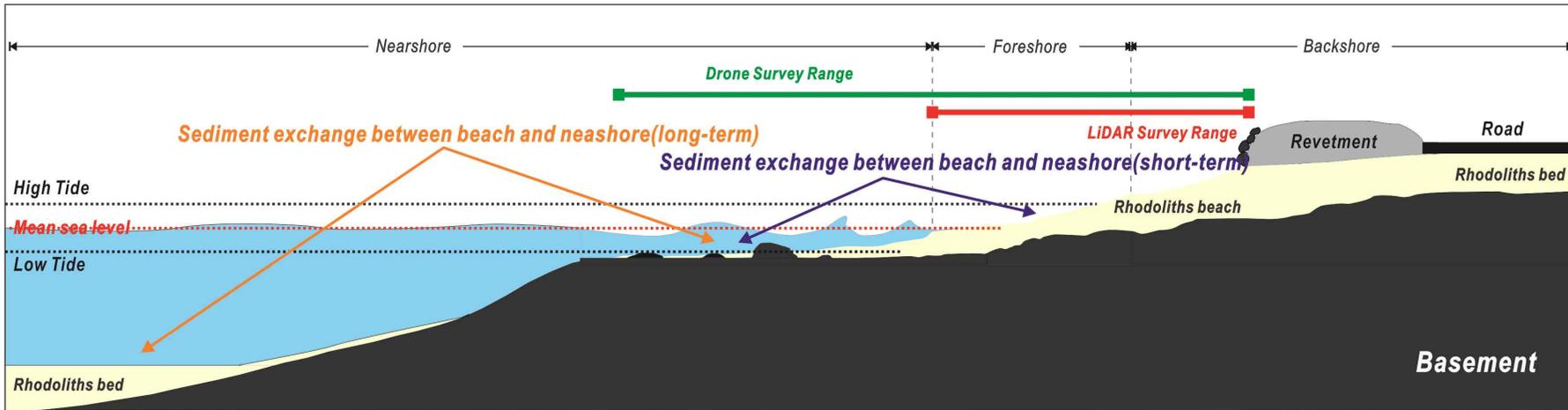


Fig. 7-13. Conceptual model of the sediment exchange in the Udo Rhodolith Beach.

7.3 우도 홍조단괴 해빈 최적 모니터링 기법

7.3.1 우도 홍조단괴 해빈 지형 모니터링 방법 비교

우도 홍조단괴 해빈의 지형변화 특성을 파악하기 위하여 비디오 모니터링, GPS 측량, 라이다 측량, 무인항공 측량 등 다양한 기법의 현장 조사가 실시되었다 (Table 7-2)(Jeju Special Self-Governing Province, 2021). 비디오 모니터링 시스템의 장점은 분 단위로 데이터를 저장됨에 따라 원하는 시기의 데이터를 추출하여 해안선을 모니터링할 수 있다. 하지만 초기 설치비용 및 데이터 후처리에 비용이 소모가 크고, 지형 기록 모니터링이 불가능하다. 또한 해안선에 대한 정량적 파악하기 위해서는 높은 지형이나 건축물을 이용하여 설치하여야 하며, 최소 4개 이상의 시스템 구축이 요구됨에 따라 많은 문제점이 내포되어 있다.

GPS 측량은 고정밀 GPS를 사용자가 직접 해빈면의 고도를 직접 측량함으로써 지형의 위치 및 고도 데이터를 취득하는 방법으로서 해빈면의 지형을 정확하게 파악할 수 있는 장점이 있다. 그러나 해빈 지형의 정확한 구현을 위해서는 최대한 많은 양의 데이터를 취득하여야 하는데, 이에 대한 상당한 시간이 필요하다.

라이다 측량은 레이더의 반사되는 시간을 이용하여 위치 데이터를 취득하는 시스템으로 짧은 시간안에 상당량의 데이터가 취득되어 매우 정밀한 지형기록이 표현되며 또한 분광특성으로 면적까지 계산할 수 있어 지형 모니터링에 최적화되어 있다. 하지만, 1회 운용에 따른 비용이 많이 소요되며, 해빈을 대상으로 실시하는 경우 작업시간이 간조 시간으로 한정되어 있어 현장조사에 필요한 최소 시간이 2일 이상 소요된다.

무인항공기를 이용한 지형 모니터링은 1시간 내에 무인항공기가 직접 공중에서 해빈을 촬영함에 따라 상대적으로 적은 시간에 넓은 지역을 파악할 수 있다. 뿐만 아니라 1회 작업으로 영상촬영과 동시에 지형측량을 할 수 있는 장점으로 최근 많은 분야에서 활용 중에 있다. 그러나 기상조건(눈, 비, 바람 등)에 따라 촬영 여건이 매우 제한적이라는 단점이 내포되어 있다.

7.3.2 드론을 이용한 우도 홍조단괴 해빈 모니터링 방법 제시

무인항공기를 이용한 연안지형 연구의 장점은 기체 운영이 용이하여 사용자가 원하는 지역, 시간에 촬영할 수 있으며, 특히 낮은 고도(150 m 이하)에서 운영되어 보정작업(대기보정 등)이 필요하지 않아서 최근 해양분야에서는 무인항공기를 활용하여 연구가 활발히 진행되고 있다(Bae et al., 2016; Cho et al., 2020; Lee and Huh, 2017; Oh et al., 2016; Pajares, G., 2015). 본 연구에서는 우도 홍조단괴 해빈 지형 변화를 파악하기 위하여 2018년부터 2021년까지 드론을 이용한 해빈 영상 촬영 및 지형표고모델 구축을 하였으며, 본 연구에서 분석되었던 지형 분석 방법에 대하여 논하고자 한다.

우도 홍조단괴 해빈에서는 퇴적물이 천연기념물 관리적 측면에서 중요함에 따라 퇴적물 분포를 파악하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 퇴적물 분포를 파악하기 위하여 이미지 분류법을 이용하여 면적을 분석하였다. 분광특성으로 구분되는 면적 분석의 장점은 기반암 사이의 홍조단괴 퇴적물을 인식과 더불어 해안으로 밀려오는 쓰레기와 감태 및 우뚝가사리 등 해조류 등 부유물질까지 분류하여 정확도가 매우 높다. 드론을 이용한 해빈지형 모니터링 수행 결과, 현장조사를 새벽 또는 오후에 실시하는 경우 호안, 기반암 사이에 음영이 발생하게 되어 홍조단괴로 인지하지 못하는 오류가 발생한다. 또한 외부에서 유입되는 물질은 퇴적물 분포면적을 정확하게 계산하는데 있어 오차 값을 발생시키는 주요 요인으로서 보정작업이 필요하다. 먼저, 음영대에 대한 계산을 최소화하기 위해서는 현장조사 계획 단계에서 카메라 밝기 조정을 통해 사전에 음영대가 발생을 최소화할 수 있다. 각종 부유물질은 일시적으로 퇴적되는 물질로서 실제로 하부에 홍조단괴 퇴적물 분포면적으로 계산하여야 하며, 이를 위해 실제 현장사진과 비교하여 외부 물질은 홍조단괴 해빈 퇴적물로 치환하는 경우 정확한 면적을 도출할 수 있다.

드론을 이용한 영상촬영은 SfM 알고리즘을 통해 지표면의 고도 값을 산출할 수 있으며, 이 연구에서는 최초 촬영조건을 고도 120 m, 중·횡 중복도를 70%로 설정하여 지형모델을 생성하였다. 생성된 결과에서는 등고선 형태가 다소 불규칙하고 비연속적으로 측량되었으며, 기존의 라이다 측량 고도값 및 지상기준점 고도 데이터와 비교한 결과, 오차가 발생하였다. 이를 해결하기 위하여 작업 규모 조정과 더불어 고도 60 m, 중·횡 중복도를 90%로 설정하여 촬영을 진행한 결과, 지상기준점 고도값과 비교해 보았을 때 최소 92%, 최대 99.77%, 평균 96.78%의 정확도가 산

출되었다.

저고도에서 촬영된 영상을 처리하여 생성한 표고지형모델의 정확도를 파악하기 위하여 동시기에 측량된 라이다 지형자료와 비교를 하였다(Fig. 7-14a). 라이다 측량 기반 지형도와 드론 사진측량 기반 지형도를 중첩시켜 비교한 결과, 해변면에서는 지상라이다 자료와 거의 일치하였지만, 파도의 영향을 직접 받는 쇄파대 지역에서는 일부 데이터가 고도값보다 높은 경우가 발생한다(Fig. 7-14b). 이는 촬영하는 동안 파랑은 지속적으로 해변에 작용하고 이에 따라 파랑 위치가 변이됨에 따라 지형 오차값이 중첩 과정에서 발생하는 것으로 해석된다. 정확한 지형정보를 도출하기 위하여 해변 지형모델에서는 쇄파대 지역에서의 이상값을 보이는 점군을 직접 제거하는 방법과 촬영 당시 가장 높은 조위 값보다 낮은 지형은 제거하는 등의 보정작업을 통해 정확한 지형정보 획득이 가능하다.

드론 사진측량 자료의 정확성을 정량적으로 파악하기 위하여 각 지형모델에서 5개 단면 라인 설정 및 단면도를 작성하였다. 5개 단면 비교 결과 라이다 지형 대비 드론 지형 분석 자료의 정확도는 94%로 도출되었다(Fig. 7-14c). 드론 사진측량을 통한 지형정보 모델 생성은 SfM 알고리즘 기반 프로그램을 이용한다. SfM 알고리즘은 카메라의 위치와 방향 그리고 3차원 특징점을 한번에 최적화하여 추정 정확도를 높이는 방법을 사용하며, 최적화 과정에서 추출된 특징점 수가 많을수록 보정값이 많이 생성되기 때문에 정확한 지형정보 생성이 가능하다(Kwon et al., 2020). 결론적으로 저고도에서 촬영되는 경우, 높은 종·횡 중복도로 촬영하는 경우 많은 양의 사진이 획득되어 정밀한 지형 데이터를 도출할 수 있다.

제주지역 해변은 폭과 길이가 1 km 이내로 주로 기반암인 화산암 사이에 소규모로 발달한다. 이러한 지형적 특징은 드론을 이용한 사진측량에서 반드시 수반되어야 하는 격자형 지상기준점 설치 최적화되어 있다. 드론을 이용한 해변 모니터링 조사 시간은 조석 상태를 고려하여 1시간 이내로 진행하여야 하는데, 해변 지형모니터링 촬영 최소 조건인 고도 80 m, 종·횡 중복도 80%로 설정하는 경우 제주지역 대부분의 해변 지형을 모니터링이 가능하다. 또한 수월봉, 광치기 해변과 같은 응회암의 침식 및 재동으로 형성된 해변에서 모니터링이 수행되는 경우 화산체의 침식되는 부피까지 파악할 수 있다는 장점이 있다.

Table 7-2. Technical comparison of topographic monitoring methods by video, GNSS, LiDAR and UAV operated in the Udo Rhodolith Beach. Modified from Kwon et al. (2020).

Class	Video Monitoring	GNSS Monitoring	Lidar Monitoring	UAV Monitoring
Observation time	Minute scale	Day Scale	Month Scale	Day Scale
Survey cost	Very high	Low	high	Low
Work time	–	1 day/20,000 m ²	2 day/20,000 m ²	1 hour/20,000 m ²
Analysis time	3 day	1 day	Week	2 day
Accuracy	Low	Low	Very high	High
Equipment				

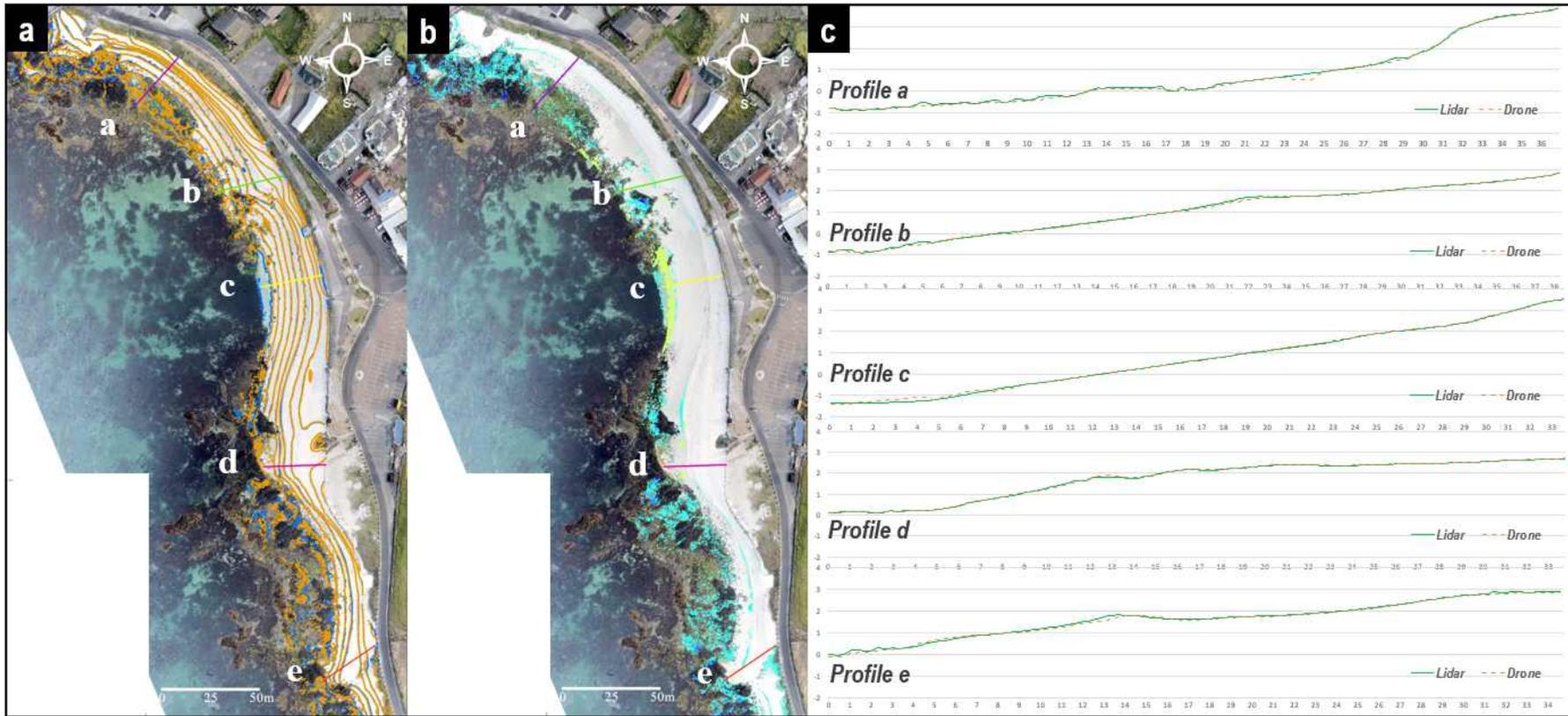


Fig. 7-14. (a) Topographic map based on LiDAR and Drone (photogrammetric) measurements. (b) Elevation difference subtracting Drone values from LiDAR values. (c) Comparison of beach profiles by Lidar and Drone measurements. Accuracy comparison graph for LiDAR-Drone elevation model.

제8장 결론

우도 홍조단괴 해변은 우도 서쪽 해안을 따라 길이 약 850 m, 최대폭 30~35 m로 분포하는 소규모 해변으로서, 암반 돌출부를 경계로 완만하게 만입된 4개 구역으로 구분된다. 2016년부터 실시된 해변 모니터링 결과, 평균해수면을 기준으로 한 해변의 측량부피(평균해수면 상부의 기반암 및 해변퇴적물의 전체 부피)는 평균적으로 3구역이 전체 부피의 약 47%로 가장 크고, 4구역이 31%, 1구역이 12%, 2구역이 10%를 차지하는 것으로 조사되었으며, 각 구역 해안선의 길이는 140~310 m이며, 전개 방향은 남북, 북북서, 북북동, 북서 등 위치에 따라 변화된다.

해빈퇴적물은 대부분 홍조단괴기원으로서 역(gravel), 사질역(sandy gravel), 역질사(gravelly sand)의 조직특성을 보이며, 용암류 화산암반 위에 평균 1.5m 내외, 최대 4.5m 두께로 집적되어 있다. 해변퇴적층은 바다 쪽으로 가면서 두께가 감소하여 간조선 아래의 수심 5m 이내의 쇄파대(surf zone)에는 주로 불규칙한 기복을 갖는 현무암 암반이 해저에 노출되어 있으며, 홍조단괴 퇴적물은 돌출된 암반 사이의 저지대에 국지적으로 분포한다. 특히, 조하대의 암반노출대는 2-3구역 경계부와 3구역 북부에서 가장 넓게 외해쪽으로 연장되어 나타난다. 만조선과 간조선 사이의 해변 전안은 파도의 스위시(swash) 작용으로 인해 비교적 평탄한 해변면(beachface)을 보이며 평균 15° 정도로 바다 쪽으로 경사져 있고, 일부 전안의 하단부에는 암반이 부분적으로 노출되어 나타나기도 한다. 전안 상단부에는 기상조건이나 해황, 시기에 따라 다르지만 부분적으로 폭 1~2 m, 높이 10~30 cm 내외의 소규모 능(ridge)이나 정단(berm)이 해안선에 평행하게 발달하기도 있다. 만조선 상부의 후안은 전안에 비해 경사가 감소하여 다소 완만한 사면을 보이는데, 후안의 육지쪽 경계에는 1995년에 해안도로 포장과 함께 축조된 1~3 m 높이의 호안이 3구역과 4구역 경계부를 제외한 전 구역에 축조되어 있다.

홍조단괴 해변을 구성하는 단괴 퇴적물의 주요 공급지는 홍조단괴 해변 북서쪽의 홍조단괴가 우세하게 분포하는 A-유형 해저(하우목동향 북쪽구역)와 서쪽의 연안사퇴(B-유형 해저)로 판단되며, 이곳에는 자갈 크기의 생존하는 홍조류가 부착된 단괴들과 모래 크기의 단괴편이 패각편과 함께 분포한다.

과거 항공사진을 이용한 장기지형 분석결과, 1948~1969년 영상에서 해변 배후지역(주차장 및 해안도로 지역)은 대부분 초지로 보이며 당시에 농경지로 활용되지 않은 것으로 보아 홍조단괴 퇴적물이 비교적 안정적 환경(후안)에서 분포하는

것으로 추정된다. 해빈의 전체 길이(남북 방향)는 현재 홍조단괴 해빈의 길이보다 남쪽으로 약 150 m 확장되어 나타난다. 1969~1985년 영상에서 해빈 면적이 최대 로 축소되는 시기로서, 해빈 면적 축소는 44.6% 큰 폭으로 발생하였는데, 해빈 전 구역 걸쳐 전안 전단부가 최소 5~26 m 폭이 줄어들어 해안선이 내륙방향으로 후 퇴되었다. 특히, 해빈 중앙부-남부 구역에서 많은 퇴적물이 유실 또는 이동으로 인 하여 상당 규모의 해빈 면적이 축소되었다. 1985년에서 2015년 30년간 해빈 면적 은 증가(1985~1995년), 감소(1995~2008년), 증가(2008~2015년)되는 경향을 보 이고 있으며, 30년간 해빈 면적은 15% 증가를 보이고 있다. 장기지형 분석결과, 호 안 축조 이전 시기인 1985년 면적이 최소였으며, 호안 축조시기인 1995년까지 면 적은 지속적으로 상승 추세를 보이는데, 홍조단괴 해빈 퇴적물 유실은 배후지역 개 발 외에도 해양환경 변화, 주변 항만 확장 등 다양한 요인들이 복합적으로 작용에 의한 것으로 판단된다.

계절에 따른 해빈 규모변화는 대체로 춘계-하계, 하계-추계 기간 동안 증가하는 경향을 나타내며 반면에 추계-동계, 동계-춘계 기간은 규모가 감소하는 경향이 우 세하다. 한편, 5년간의 해빈 모니터링 동안에 감소-증가-감소의 경향을 보이는데, 라이다 측량 부피는 1.9% 증가하고 면적은 2.5% 감소하는 역 상관관계를 보이는데, 이는 육상 영역의 해빈부피가 확대됨에도 불구하고 하부 전안과 조하대의 퇴적 물은 유실되어 점진적인 해안선의 후퇴가 일어나고 있음을 지시하는 것으로 판단된 다. 아울러, 드론 영상을 통해 산정된 평균해수면 하부의 조하대와 인근 연안역까지 포함된 영역에서도 퇴적물의 분포면적은 조사기간 동안 감소하는 추세가 나타나며, 최종 측량에서는 2018년 8월 대비 19.8% 감소하였는데, 조하대 지역과 더불어 암 반사이에 분포하는 홍조단괴들 유실이 그 원인으로 판단된다.

홍조단괴 해빈 세부지형 변화는 ‘북적남식’양상과 ‘북식남적’형태 두 가지 형태로 구분되는데, ‘북적남식’ 양상은 퇴적부가 각 구역 북부구간에 발달하고 침식부는 남부 구간에서 우세하게 나타난다. 해빈 최대 점유구역인 3구역에서는 이러한 양상이 교호 하게 나타나는데, 북부에서 남부방향으로 퇴적-침식-퇴적-침식 양상이 뚜렷하게 나 타난다. 이러한 세부지형 변화는 주로 춘계-하계 동안 발생하며, 2017년 2월-2017 년 5월 자료에서도 관찰된다. 반면에 ‘북식남적’ 지형변화 양상은 퇴적부가 각 구역 남쪽에 발달하고 침식부는 북부구간에 나타난다. 위 형태는 계절별로 다소 변화의 차 이가 나타나는데, 하계-추계 동안 3구역에서는 북부에서 남부방향으로 침식-퇴적- 침식-퇴적 양상에서 추계-동계 동안 침식-침식-침식-퇴적 양상으로 변화한다. 이 후 동계-춘계 기간에서는 측량 시점에 따라 다르게 나타나지만, 2019년 2월-2019

년 4월 자료의 경우 지형변화 양상은 추계-동계기간과 유사하지만, 퇴적물의 유실 및 집적 양이 다소 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

태풍 시기에 해빈의 규모는 다소 증가하거나 감소하는 등 태풍 사례마다 다르게 나타난다고 할 수 있는데, 대체적으로 태풍이 연구지역 최대 근접 시기에 조석상태가 만조인 경우 해빈 규모가 감소하였으며, 반면에 간조 시기인 경우 규모가 증가하였다. 태풍 시기의 구역 내의 지형변화는 태풍 사례별로 세부적으로는 다르게 발생하지만, 대체로 솔릭과 링링 시기(제주도 서쪽)에는 '북적남식'의 특징으로 춘계-하계 기간과 유사한 양상으로 나타난다. 반면에 차바와 마이삭 시기에는 하계-추계, 추계-동계, 동계-춘계와 유사한 형태인 중앙부에서는 침식, 남부구역에는 퇴적이 발생하였다. 구역별로 해빈 지형변화는 1구역에서 차바와 솔릭 통과 시에 전안과 하부 후안에 퇴적물 유실이 우세하게 일어났고, 3구역에서는 솔릭과 링링 통과 시에 구역 남부에서 광범위하게 퇴적물 유실이 발생하였다.

연구지역인 우도 홍조단괴 해빈이 위치한 제주 동부 연안역에서는 주로 북북서-남남동의 왕복성 조류운동이 우세하게 나타나는데, 우도 연안역에 관측된 조류 유속 결과는 홍조단괴 퇴적물 성장 및 이동에 조류가 잠재적 주요 요인을 간주될 수 있음을 지시한다. 특히, 홍조단괴 해빈 인근에서는 낙조기에 높은 유속의 조류가 북에서 남으로 발달하기 때문에 홍조단괴 해빈의 북서쪽에 위치한 공급 해역에서 홍조단괴 해빈 연안역 조하대로 운반할 수 있는 주요 요인으로 작용할 가능성이 높은 것으로 판단된다. 기존 연구에서 보고된 홍조단괴 해빈 연안역 저층에서의 잔차류 분포 결과, 시기에 따라 이동 방향이 다소 차이가 나지만 계절에 관계없이 전반적으로 홍조단괴 해빈 쪽으로 향하는 동향류가 지속적으로 관측되고 있어서 해빈으로 운반하여 공급하는 주요 수단으로 작용할 가능성이 높다.

홍조단괴 해빈 연안역에서의 파도는 여름철에 남동계절풍의 영향으로 남쪽 방향에서 들어오는 파랑이 우세하였고, 겨울철에는 북서계절풍의 영향으로 북쪽 방향에서 들어오는 파랑이 우세하게 관측되는데, 파랑의 파고는 우도수로의 수심이 얇고 길이가 짧아서 취송거리가 제한되기 때문에 계절별로 뚜렷한 차이 없이 유의파고의 평균값은 0.5~1.5 m 내외로 크지 않다. 다만, 기존 연구에서의 수치모델링을 통한 계절별 파랑의 평균 파장 모의실험 결과 동계와 하계에 모두 높지 않은 파고에도 불구하고 파장은 대체로 20 m 이상이며 이는 10 m 이상의 파저면을 지시하므로 홍조단괴 해빈에 인접한 얇은 수심의 연안역에서 해저 퇴적물이 유동할 가능성이 높음을 지시한다. 또한, 강한 바람이 불어오는 겨울철 폭풍이나 여름철 태풍 시기에 특별히 높게 발달하는 이상파랑이 유입된다면 수로 내부의 깊은 해역에서도 해파

에너지가 작용하고 저층에 발달하는 해류의 에너지가 커지게 됨에 따라 퇴적물 이동이 발생할 수 있을 것이다. 아울러 우도수로의 지형적 특성과 더불어 연구지역에 작용하는 계절풍은 통상 겨울철에 더 강하기 때문에 홍조단괴가 풍부하게 분포하는 주요 서식지인 북부 해역의 해저에서 겨울철 파랑에 의한 퇴적물 이동이 일어날 가능성이 큰 것으로 판단된다. 이처럼 파랑의 역할은 홍조단괴 퇴적물 공급원(분포지)으로부터 해빈까지 퇴적물을 공급하는 역할은 크지 않으나, 태풍이나 조류, 파랑에 의해 수심 5 m 내외의 천해역으로 운반되어 온 퇴적물을 다시 재동 또는 홍조단괴 해빈으로 운반시키는 매개체로서 중요한 역할을 하며, 특히 계절적으로 변화되는 우도 홍조단괴 해빈의 세부 지형변화는 연안류에 의한 퇴적물의 운반에 의한 것으로 해석된다.

라이다와 드론의 면적 변화양상이 서로 다른 양상을 보이는 사례는 드론 촬영과 라이다 측량 방식 및 범위가 다르기 때문에 발생하는 현상으로 이를 통해 홍조단괴 해빈의 퇴적물 교류 방식에 대해 추정이 가능하다. 홍조단괴 해빈을 구성하는 퇴적물의 유출입에 있어서 육상의 해빈영역과 해수면 하의 조하대 영역이 연계는 되어 있지만 별개의 퇴적물 저장지로 작용한다는 것을 지시하는데, 즉, 해빈 퇴적물은 단순히 외해역에서 파도나 해류에 의해 바로 해빈의 전안이나 후안에 집적되거나 이후에 해황에 따라 바로 외해역으로 유실되는 것이 아니라 해빈과 궁극적인 퇴적물 공급지가 되는 외해역 사이에 불규칙한 기반암대가 얇은 수심까지 돌출되어 있어서, 즉각적인 단기적 퇴적물 교류가 방해받기 중간에 위치한 조하대 연안역을 경유지로 하여 다양한 경로로 활발히 유출입되고 있는 것으로 해석된다.

홍조단괴 해빈의 규모는 2016년에 증가, 2017년 후반기와 2019년 전반기 사이에는 감소, 다시 2020년까지 증가하는 것으로 조사되었으며 2021년 10월 측량에서는 다시 감소하여 2016년 추계와 비슷한 총 부피량을 보인다. 이와 같은 장기적 변화양상으로 볼 때, 홍조단괴 해빈의 유실은 1~2년 주기의 단기적인 현상일 가능성이 높으며, 장기적으로는 연도별 해황 특성에 따라 단기적으로 유실이 되었다가도, 이후 해빈 부양에 유리한 해황특성이 조성될 경우 원래 상태로 복원될 수 있는 자체 복원 잠재력을 지니고 있는 것으로 판단된다. 일정 경사를 유지하려는 해빈의 특성상, 해빈 면적의 감소는 향후 점차 느려질 것으로 예측된다. 아울러, 기후 온난화와 우도 해안지역의 개발 등의 영향으로 해류와 파랑 특성이 변화되고 해수면 상승이 지속된다면 퇴적물 유출입의 평행이 교란되어 향후 홍조단괴 해빈의 지형변화가 급격히 진행될 가능성도 배제하지 못한다.

참고문헌

- Bae, S.J., Yu, J.H., Jeong, Y.S., Yang, D.Y. and Han, M., 2016, Thematic and geometric analysis of Bangpo beach based on UAV Remote Sensing. Journal of the Geomorphological Association of Korea, 23(1), 117–128 (in Korean with English abstract).
- Bird, E.C.F., 2010, Coastal Geomorphology: An Introduction. John Wiley and Sons, LTD, New York, 315 p.
- Boggs, S.J.R., 2006, Principles of Sedimentology and Stratigraphy, Fourth Edition, Pearson Prentice Hall, New Jersey, 662 p.
- Bosence, D.W.J., 1983b, The occurrence and ecology of recent rhodoliths – a review. In: Peryt TM(ed) Coated grains. Springer, Berlin, 242 p.
- Brown, M. and Lowe, D. G., 2007, Automatic panoramic image stitching using invariant features. International journal of computer vision, 74(1), 59–73.
- Bruun, P., 1954, Coast erosion and the development of beach profiles. US Beach Erosion Board, Urbana, 79 p.
- Bruun, P., 1962, Sea-level rise as a cause of shore erosion, Journal of the Waterways and Harbors division, 88(1), 117–130.
- Cha, S.C. and Moon, J.H., 2020, Current Systems in the adjacent seas of Jeju Island using a high-resolution regional ocean circulation model. Ocean Polar Research, 42(3), 211–223 (in Korean with English abstract).
- Cho, G.-S., Hyun, J.-H. and Lee, G.-S., 2020, Erosion and Sedimentation Monitoring of Coastal Region using Time Series UAV Image. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, 23(2), 95–105 (in Korean with English abstract).
- Clifton, H.E., 2006, A reexamination of facies models for clastic shorelines. Society for Sedimentary Geology, 293–337.
- Davis, R.A. Jr., 1985, Coastal Sedimentary Environments. Springer-Verlag, New York, 733 p.

- Davis, R.A. Jr. and FitzGerald D.M., 2004, *Beaches and Coasts*. Blackwell Science Ltd, Vitoria, 419 p.
- Esri, 2012, https://services.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World_Imagery/MapServer (Feb. 19, 2012).
- Folk, R.L., 1954, The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary rock (sic) nomenclature. *Journal of Geology*, 62, 344–359.
- Folk, R.L. and Ward, W.C., 1957, Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 3–27.
- Foster, M.S., Riosmena–Rodriguez R., Steller D.L. and Woelkerling, W.J., 1997, Living rhodolith beds in the Gulf of California and their implications. Pliocene carbonates and related facies flanking the Gulf of California, Baja California, Mexico. *Geological Society of America*, 318. 127–140.
- Foster, M.S., 2001, Rhodoliths: between rocks and soft places. *Journal of phycology*, 37(5), 659–667.
- Friedman, G.M. and Sanders, J.E., 1978, *Principles of Sedimentology*. Wiley, New York, 208 p.
- Hayakawa, Y. S. and Obanawa, H., Volumetric Change Detection in Bedrock Coastal Cliffs Using Terrestrial Laser Scanning and UAS–Based SfM. *Sensors*, 2020, 20(12), 1–16.
- Heo, N.G., Woo, K.S. and Hong, W., 2012, Sea–water paleotemperature and growth rate estimation using a rhodolith near Udo, Jeju Island: a preliminary study for paleo environmental reconstruction., *J Geol Soci Korea*, 48(4), 285–297 (in Korean with English abstract).
- Hong, J.S., Moon, J.H., Yoon, S.H. and Yoon, W.S., 2021, Changes of current and wave patterns depending on typhoon pathways in a shallow channel between Jeju and Udo Island. *Ocean Polar Res*, 43(4), 205–217 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.G., 1993, Process of one cycle of volcanic eruption in the Udo crater. *J. Korean Inst. Min. Geol*, 26, 55–65 (in Korean with English

abstract).

Jeju Special Self-governing Province, 2007, Report on academic research in Udo. Jeju Special Self-Governing Province, Jeju, 126 p (in Korean).

Jeju Special Self-governing Province, 2017, Report on establishment of comprehensive maintenance plan of Udo Rhodolith beach in Jeju. Jeju Special Self-Governing Province, Jeju, 256 p (in Korean).

Jeju Special Self-governing Province, 2018, Report on Ecological Characteristics of the *Undariopsis peterseniana* in Udo Island. Jeju Special Self-Governing Province, Jeju, 150 p (in Korean).

Jeju Special Self-governing Province, 2019, Report on the 3rd Monitoring survey of Udo/Jeju rhodoliths beach. Jeju Special Self-Governing Province, Jeju, 247 p (in Korean).

Jeju Special Self-governing Province, 2020, Report on the 4th Monitoring survey of Udo/Jeju rhodoliths beach. Jeju Special Self-Governing Province, Jeju, 346 p (in Korean).

Jeju Special Self-governing Province, 2021, Report on Integrated Monitoring of Jeju Udo Rhodolith beach. Jeju Special Self-Governing Province, Jeju, 274 p (in Korean).

Jeon Y.-J. and Kim, J.-I., 2003, Supervised Classification Systems for High Resolution Satellite Images. *Journal of KIISE : Computing Practices and Letters*, 9(3), 301-310 (in Korean with English abstract).

Jeong, J.B., 2016, Spatiotemporal variations of sedimentary characteristics in the Rhodolith beach and nearshore of Udo, Jeju, Korea. Ph. D. thesis, Pukyong National University, Pusan, 177p (in Korean with English abstract).

Jeong, J.B., Kim, S.Y., Seo, Y.K., Kim, J.K., Shin, J.K. and Woo, K.S., 2020, Influence of submarine topography and associated sedimentary processes on the distribution of live and dead rhodoliths near Udo Island, Korea. *Geo-Mar Lett*, 40, 35-51.

Jeong, J.B., Lim, M.S., Seo, Y.K. and Woo, K.S., 2022, An uneven rhodolith

- distribution controlled by sea-bottom conditions near Jeju Island, Korea. *Marine Geology*, 448, 106799.
- Kang, J.C., 2011, Seasonal variation of macroalgal community structure and biomass at Udo, Jeju island, Korea. Ph, M, thesis, Jeju National University, Jeju, (in Korean with English abstract).
- KHOA, 2022, <http://www.khoa.go.kr/oceangrid/gis/category/reference/distribution>. do.
- Kim, C.H., Kim, H.W., Kang, G.M., Kim, G.Y., Kim, W.H., Park, C.H., Do, J.D., Lee, M.H., Choi, S.Y. and Park, H.Y., 2016, Shipborne Mobile LiDAR(Light Detection and Ranging) System for the Monitoring of Coastal Changes. *Economic and Environmental Geology*. The Korean Society of Economic and Environmental Geology, 49, 281–290 (in Korean with English abstract).
- Kim, I.O. and Rho, H.K., 1994, A Study on China Coastal Water Appeared in the Neighbouring Seas of Cheju Island, *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 27(5), 515–528 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.K., Woo, K.S. and Kang, S.S., 2003, Characteristics and formation conditions of the rhodoliths in Wu Island beach, Jeju-do, Korea. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 8(4), 401–440 (in Korean with English abstract).
- Kim, N.H. and Ko, H.S., 2020, Coastal Engineering, CIR Corp., Seoul, 227p (in korean)
- Kim, S.H. and No, H.G., 2004, Oceanographic Conditions in the Neighboring Seas of Cheju Island and the Appearance of Low Salinity Surface Water in May 2000, *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 37(2), 148–158 (in Korean with English abstract).
- Kim, T.H. and Park, S.H., 1997, Characteristics of the coastal landforms in Jeju island Ministry of Environment, National Ecosystem Survey, Seoul, 170 p (in Korean).
- Kim Y.H., 1991, Seagrass resources of Jeju Island. *Journal of Jeju Studies*, 8, 137–156 (in Korean).

- King, C.A., 1972, Beaches and coasts. Edward Arnold. London, 570 p.
- KMA, 2017, Typhoon analysis report 2016. Korea Meteorological Administration, Jeju, 198 p (in Korean).
- KMA, 2019, Typhoon analysis report 2018. Korea Meteorological Administration, Jeju 122 p (in Korean).
- KMA, 2020, Typhoon analysis report 2019. Korea Meteorological Administration, Jeju, 130 p (in Korean).
- KMA, 2021, Typhoon analysis report 2020. Korea Meteorological Administration, Jeju, 142 p (in Korean).
- Ko, J.C., Kim, J.T., Kim, S.H. and Rho, H.K., 2003, Fluctuation characteristic of temperature and salinity in coastal waters around Jeju Island. Korean J Fish Aquat Sci, 36(3), 306-316 (in Korean with English abstract).
- Koh, G.W., Park, J.B. and Park, Y.S., 2008, The study on geology and volcanism in Jeju Island (I): Petrochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ absolute ages of the subsurface volcanic rock cores from boreholes in the eastern lowland of Jeju Island. Economic and Environmental Geology, 41, 93-113 (in Korean with English abstract).
- Komar, P.D., 1976, Beach Processes and Sedimentation. Prentice Hall, New Jersey, 429 p.
- Komar, P.D. and Terich, T. A., 1976, Oregon coast shoreline changes due to jetties. Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, 102(1), 13-30.
- Kwon, S.H., Shon, H.W., Kim, T.H. and Lee, K.W., 2020, Pix4Dmapper for Drones. Goomibook, Seoul, 296 p.
- Kwon, Y.A., Kwon, W.T., Boo, K.O. and Choi, Y., 2007, Future Projections on Subtropical Climate Regions over South Korea Using SRES A1B Data. Journal of the Korean Geographical Society, 42(3), 355-367 (in Korean with English abstract).
- Lee, H.J. and Yoo, J., 2012, Macrotidal beach processes dominated by winter

- monsoon: Byunsan, west coast of Korea. *Journal of Coastal Research*, 28(5), 1177–1185.
- Lee, H.J., Do, J. D., Kim, S. S., Park, W. K. and Jun, K., 2016, Haeundae Beach in Korea: Seasonal-to-decadal wave statistics and impulsive beach responses to typhoons. *Ocean Science Journal*, 51(4), 681–694.
- Lee, I.K. and Boo, S.M., 1993, Marine flora of Jeju Island focused on algae. *Bioscience Symposium*, 14, 132–129 (in Korean).
- Lee, J.B., Jwa, J.H., Go, Y.B. and Choe, Y.C., 1993, Bioecological Studies of the Eastern Coastal Area in Cheju Island (II) Phytoplankton Dynamics and primary Productivity around U-do. *J. Korean Earth Sci. Soc*, 14(4), 458. (in Korean with English abstract).
- Lee, J.B. and Huh, Y., 2017, A Study on Modeling Tidal Flats and Extracting Tidal Creeks using Drones Aerial Photogrammetry. *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science*, 25(3), 43–52 (in Korean with English abstract).
- Lie, H.-J., Na, J.Y., Han, S.K. and Seo, J.W., 1994, Monthly mean sea surface winds over the East China Sea. KORDI, Ansan, 91 p (in Korean).
- Lie, H.J., Cho, C.H., Lee, J.H., Lee, S. and Tang, Y., 2000, Seasonal variation of the Cheju warm current in the northern East China Sea. *J Oceanogr*, 56(2), 197–211.
- Littler, M.M. and Littler, D.S., 1984, Models of tropical reef biogenesis: the contribution of algae. *Progress in phycological research*, 3, 323–364.
- Lowe, D.G., 2004, Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International journal of computer vision*, 60(2), 91–110.
- Marrack, E.C., 1999, The Relationship between Water Motion and Living Rhodolith Beds in the Southwestern Gulf of California, Mexico. *PALAIOS*, 14, 159–171.
- Moore, D., 1970, The mass transport velocity induced by free oscillations at a single frequency. *Geophysical Fluid Dynamics*, 1, 237–247.

- NGII, 2009, History of the development of Korean cartography. National Geographic Information Institute, Suwon, 631 p (in Korean).
- NGII, 2018, A study on the efficiency of the connection of HDmaps and the study on the construction and renewal of HDmaps. National Geographic Information Institute, Suwon, 10 p (in Korean).
- Nickling, W. G. and Neuman, C. M., 2009, Aeolian sediment transport. In Geomorphology of desert environments, Springer, Dordrecht, 555 p.
- NRICH, 2010, Evaluation of natural heritage values in Udo Island for the designation of World Heritage Site and natural monuments and strategic development for conservation. National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon, 151 p (in Korean).
- Oh, S.-Y., Kim, D.H. and Yoon, H.-J., 2016, Application of unmanned aerial image application red tide monitoring on the aquaculture fields in the coastal waters of the South Sea, Korea. Korean Journal of Remote Sensing, 32(2), 87-96 (in Korean with English abstract).
- Pajares, G., 2015, Overview and Current Status of Remote Sensing Applications Based on Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 81, 281-330.
- Pang, I.C., Rho, H.K. and Kim, T.H., 1992, Seasonal Variations of Water Mass Distributions and Their Causes in the Yellow Sea, the East China Sea and the Adjacent Seas of Cheju Island', Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 25(2), 151-163.
- Park, J.H., Yoon, H.-S., Yoo, C.-I. and Ryu, C.-R., 2010, Video monitoring of shoreline changes of an offshore bar in the Nakdong River Estuary, South Korea. Journal of Advanced Marine Engineering and Technology, 34(4), 575-584 (in Korean with English abstract).
- Rivera, M.G., Riosmena-Rodríguez, R. and Foster, M.S., 2004. Age and growth of *Lithothamnion muelleri* (Corallinales, Rhodophyta) in the southwestern Gulf of California, Mexico. Ciencias Marinas. 30, 235-249.

- Tee, K.T., 1976, Tide-induced residual current—A two-dimensional nonlinear numerical tidal model. *J. Mar. Res.*, 34, 603–628.
- Shim J.S., Kim, J.A., Kim, S.J. and Kim, S.I., 2010, Construction of High-Resolution Topographical Map of Macro-tidal Malipo beach through Integration of Terrestrial LiDAR Measurement and MBES Survey at inter-tidal zone. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 22(1), 58–66 (in Korean with English abstract).
- Snedden, J.W., Nummedal, D. and Amos, A. F., 1988, Storm-and fairweather combined flow on the central Texas continental shelf. *Journal of Sedimentary Research*, 58(4), 580–595.
- Swift, D.J.P. and Field, M. E., 1981, Evolution of a classic sand ridge field: Maryland sector, North American inner shelf. *Sedimentology*, 28(4), 461–482.
- Swift, D.J.P., Han, G. and Vincent, C.E., 1986, Fluid Processes and Sea-Floor Response on a Modern Storm-Dominated Shelf: Middle Atlantic Shelf of North America. Part I: The Storm-Current Regime. *Shelf Sands and Sandstones: Canadian Society of Petroleum Geologists*, 11, 99–119.
- Sohn, Y.K. and Chough, S.K., 1993, The Udo tuff cone, Cheju Island, South Korea: transformation of pyroclastic fall into debris fall and grain flow on a steep volcanic cone slope. *Sedimentology*, 40, 769–786.
- Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L. and Ergul, A., 2009, Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0; An ArcGIS extension for calculating shoreline change, U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278. Massachusetts, 81 p.
- Trujillo A.P. and Thurman, H.B. 2008, *Essentials of Oceanography* 9th Edition, Pearson-Prentice Hall, New jersey, 534 p.
- Wilson, S., Blake, C., Berges, J.A. and Maggs, C.A., 2004, Environmental tolerances of free-living coralline algae (maerl): implications for European marine conservation. *Biol Conserv*, 120(2), 279–289.

- Woo, K.S., 2001, Annual Report on Geoheritage Assessment. Cultural Heritage Administration, Daejeon, 226-229 (in Korean).
- Woo, K.S., 2002. Report on Geoheritage Assessment. Cultural Heritage Administration, Daejeon, 173-216 (in Korean).
- Woo, K.S., Yoon, S.H., Sohn, Y.K., Kim, R., Lee, K.C. and Lim, J.D., 2013, Natural heritage values and diversity of geoheritages on Udo Island, Jeju Province. *Kor J Cult Herit Stu*, 46(1), 290-317 (in Korean with English abstract).
- Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J. and Reynolds, J.M., 2012, 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications, *Geomorphology*, 179, 300-314.
- Yoon, H.S., Choi, Y.S., Lee, Y.J. and Song, H.K., 2010, A study on the optimum point density of Lidar using aero LiDAR for shoreline extraction - Bo Sung · Yeosu the area around-. *Proceedings of Korean Society for Geospatial Information Science*, 113-114 (in Korean).
- Yanagi, T., 1999, Coastal oceanography. Terra Scientific Publishing Company, Tokyo. 172 p.
- Yoon, J.J., and Kim, S.I., 2012, Analysis of Long Period Sea Level Variation on Tidal Station around the Korea Peninsula, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 12(3), 299-305 (in Korean with English abstract).
- Yoon, W.S., Yoon, S.H., Moon, J.H. and Hong, J.S., 2021, Topographic Variability during Typhoon Events in Udo Rhodoliths Beach, Jeju Island, South Korea. *Ocean and Polar Research*, 43(4), 307-320 (in Korean with English abstract).
- Zhang, K., Douglas, B.C. and Leatherman, S.P., 2004, Global warming and coastal erosion. *Climatic change*, 64(1), 41-58.

국문요약

제주도 동부에 위치한 우도 홍조단괴 해빈은 길이 약 850 m, 최대폭 30~35 m로 분포하는 소규모 해빈으로서, 홍조단괴 기원 퇴적물이 대부분을 차지하고 있는 세계적으로도 희귀한 제주도의 대표적 해안지형 중의 하나이다. 이 논문에서는 2016년부터 2021년까지 취득된 우도 홍조단괴 해빈의 지상라이다 측량 및 드론 영상촬영을 통한 정밀 지형정보, 해빈퇴적물의 조직특성 분석자료, 그리고 인근 연안역의 해저 저질, 해류 및 파랑, 기상 조사자료를 종합하여 분석함으로써 인위적으로 조성된 홍조단괴 해빈의 계절 및 다년간 지형변화의 영향요인과 과정을 밝히 고자 한다.

홍조단괴 해빈은 암반 돌출부를 경계로 하여 완만하게 만입된 4개 구역으로 구분되는데, 각 구역 해안선의 길이는 140~310m이며, 전개 방향은 남북, 북북서-남남동, 북북동-남남서, 북서-남동 등 위치에 따라 변화된다. 평균해수면을 기준으로 한 해빈의 측량부피(평균해수면 상부의 기반암 및 해빈퇴적물의 전체 부피)는 평균적으로 3구역이 전체 부피의 약 47%로 가장 크고, 4구역이 31%, 1구역이 12%, 2구역이 10%를 차지하는 것으로 조사되었다.

해빈퇴적물은 95% 이상이 홍조단괴 기원으로서 역(gravel), 사질역(sandy gravel), 역질사(gravelly sand)의 조직특성을 보이며, 용암류 화산암반 위에 평균 1.5m 내외, 최대 4.5m 두께로 집적되어 있다. 홍조단괴해빈을 구성하는 단괴 퇴적물의 주요 공급지는 홍조단괴 해빈 북서쪽의 홍조단괴가 우세하게 분포하는 A-유형 해저(하우목동향 북쪽구역)와 서쪽의 연안사퇴(B-유형 해저)로 판단되며, 이곳에는 자갈 크기의 생존하는 홍조류가 부착된 단괴들과 모래 크기의 단괴편이 패각편과 함께 분포한다.

외해역에 분포하는 홍조단괴 퇴적물의 공급지에서 해빈 인근 연안역까지의 퇴적물 이동에는 연중 동쪽으로의 흐름을 동반하는 조류(잔차류), 겨울철 북서계절풍

에 의한 강화된 파랑 및 여름철 태풍에 의한 장주기 너울성 파랑 등이 중요한 역할을 하는 것으로 보인다. 한편, 해빈의 규모를 결정하는 전안과 후안에서의 퇴적물 집적과 침식은 파도가 해변면에 닿아 일으키는 세파와 뒷물결의 상대적 세기에 의해 결정되며, 바람은 건조한 상태의 후안 퇴적물의 재배치에 영향을 미친다.

홍조단괴 해빈의 계절별 세부지형 변화는 ‘북적남식’ 양상과 ‘북식남적’의 두 가지 유형으로 구분되는데, ‘북적남식’ 양상은 퇴적부가 각 구역 북부구간에 발달하고 침식부는 남부구간에서 우세하게 나타난다. 춘계-하계 기간에는 남에서 북으로의 우세한 파랑 전파 특성으로 인해 ‘북적남식’ 유형의 지형변화가 발생한다. 반면에 ‘북식남적’ 지형변화 양상은 추계-동계 기간에 주로 나타난다. 이러한 두 유형의 지형변화는 태풍 통과 후에도 관측되는데, 태풍 시기의 구역 내의 지형변화는 슬릭과 링링 시기(제주도 서쪽)에는 ‘북적남식’의 특징으로 춘계-하계 기간과 유사한 양상으로 나타난다. 반면에 차바와 마이삭 시기에는 하계-추계, 추계-동계, 동계-추계와 유사하게 중앙부에서는 ‘북식남적’ 유형이 야기되었다. 북남방향으로 발달한 해안의 형태로 인하여 파도와 해류는 북동 또는 남동쪽으로 비스듬하게 해안에 접근하게 되고 이로 인해 연안류에 의한 해빈 변화가 발생한다. 궁극적으로 계절풍 또는 태풍 경로에 따라 해빈 지형 변화 양상이 결정된다. 계절에 따른 해빈의 규모변화는 대체로 춘계-하계, 하계-추계 기간 동안 해빈 규모는 증가하는 경향을 나타내며 반면에 추계-동계, 동계-춘계 기간은 해빈 규모가 감소하는 경향이 우세하다.

전체 조사기간 동안 해빈의 부피는 기상 또는 해황에 특성에 따라 변동되는 특성을 보이지만 장기적으로는 일정 수준을 유지하는 반면, 해빈의 면적은 지속적으로 감소하는 추세로 나타난다. 이는 육상 영역의 해빈부피가 크게 변하지 않음에도 불구하고 하부 전안과 조하대의 퇴적물은 유실되어 점진적으로 해안선이 후퇴하고 해빈 면적이 감소하고 있음을 지시한다. 이와 같은 점진적인 해빈의 축소는 해수면 상승 및 이상파랑 등 자연적 요인으로 인한 침식과 해안도로, 호안 설치 등 인위적 요인에 따른 배후지 침식이 복합적으로 작용하여 야기된 것으로 해석된다.

감사의 글

2018년 다시 학교에서 공부를 시작한지 어느덧 5년이라는 시간이 흘러 학위를 마치게 되었습니다. 박사과정 입학 당시의 마음가짐에 비해 많은 연구를 수행하지 못한 점이 아쉬움에 남습니다. 그럼에도 불구하고 많은 사람들의 도움과 격려가 있었기에 학위과정을 마무리 할 수 있게 되어 이 장을 빌려 감사의 말씀을 올리고자 합니다.

2009년 처음 연구실에 들어와 2023년까지 부족한 저에게 지질학의 가르침과 더불어 학자가 가져야 할 바람직한 마음가짐과 자세를 지도해주신 윤석훈 교수님께 감사의 말씀을 드립니다. 마지막까지 교수님께서 격려와 논문지도 덕분에 과정을 마무리 할 수 있었으며, 교수님의 가르침이 부끄럽지 않도록 앞으로 지질 분야 발전을 위하여 더욱 연구에 매진하는 전문가가 되도록 노력하겠습니다.

학위과정을 시작하고 지금까지 저에게 많은 응원과 격려를 해주시고 해양 분야에 많은 가르침을 주신 이준백 교수님, 송상근 교수님, 문재홍 교수님, 김정현 교수님, 김진호 교수님, 김태훈 교수님께도 감사의 말씀드립니다. 더불어 학위논문에 대한 귀중한 조언과 심사를 하여 주신 이광춘 교수님, 안웅산 박사님, 강정찬 박사님에게도 전문가의 길을 열어주신데에 감사의 말씀드리며, 앞으로 제주지역 자연유산 및 해양분야에서 많은 연구 수행을 통해 보답하도록 하겠습니다.

학위논문을 작성할 수 있도록 우도 홍조단괴 해빈 자료 사용을 허락하여 주신 변성훈 주무관님 및 제주특별자치도 세계유산본부 관계자 분들과 더불어 태풍 후 우도 홍조단괴 해빈 현장사진을 제공하여 주신 한치성 문화재 돌보미 선생님, 그리고 현장조사를 허락하여 주신 서광리 어촌계장님을 비롯한 우도지역 주민들에게도 감사드리며, 지속적으로 우도 홍조단괴 해빈에 관심을 갖고 연구를 수행하도록 하겠습니다. 또한 해양물리자료 분석을 통해 논문 작성에 큰 힘이 되어준 홍지석 박사와 다이빙 조사를 함께해준 조영현 박사에게도 깊은 감사를 드립니다.

늦은 나이에도 불구하고 학위과정을 수행하는데 있어 지구해양과학과 대학원 후배들이 도움이 있어 학위 과정을 마칠 수 있었습니다. 해양 물리자료 해석에 도움을 준 차현수, 김수빈, 조성현, 김진호 등 해양순환과 기후변화 연구실 후배들과 기상자료 분석에 도움을 준 문수환 후배, 더불어 대학원 생활에 큰 활력이 되었던 이민영, 송병찬, 김용원 후배들에게도 감사의 말씀드립니다. 그리고 홍조단과 해빈 현장조사를 함께해 준 우성이와 민재에게는 큰 마음의 빔을 지고 있으며 앞으로 살아가면서 갓도록 하겠습니다. 또한 논문 작성 과정에서 같이 밤을 새우며 도와준 채슬이, 논문 검토를 도와 준 현지에게도 감사하며, 저 또한 후배들이 연구를 수행하는데 도움이 되도록 최선을 다하겠습니다.

특히, 오랜 시간 동안 연구실에서 추억을 쌓고, 연구자를 꿈꿔왔던 동기인 고창성 박사, 조영진 박사에게도 깊은 감사를 드리며, 더불어 물심양면으로 도움을 주신 우경식 교수님, 손영관 교수님, 김기범 교수님, 전용문 박사님, 김지수 박사님, 김근형 박사님, 고은희 교수님과 홍석우, 기진석, 고수연 선배님 및 최윤호 동기, 연구실 후배인 홍정균, 김성현, 강수연 등 환경지질학연구실 동문들에게도 감사의 인사를 드립니다. 또한 직장을 그만두고 학위과정 진학을 선택하였을 때 응원해 주신 고인종 박사님, 문덕철, 김경민, 강재선 선배, 강혁진 선배와 더불어 제 오랜 벗들인 신동현 박사를 비롯한 이원우, 강민형 등 오현고등학교 54회 친구들과 하늘에서 응원 해주는 봉석이에게도 감사한 마음 전합니다.

마지막으로 저를 믿어주시고 묵묵히 응원해주시는 부모님과 동생, 그리고 친척분들에게 감사드립니다. 대학원 진로를 선택하였을 때, 저를 지지해주고 오랜 기간 동안 연구에 매진할 수 있도록 지원해준 배우자 한규비에게 사랑하고 고마운 마음을 이 글을 통해 전합니다. 앞으로 살아가는데 있어 많은 일이 있겠지만, 지금 이 순간을 생각하며 더 좋은 남편이 되도록 노력하겠습니다. 그리고 항상 행복을 주는 딸 서아와 출·퇴근 때 마다 힘이 되는 응원을 주는 아들 서호에게도 항상 고맙고 사랑한다는 말과 함께 부끄럽지 않은 아버지가 되도록 노력하겠다는 약속을 하고 싶습니다.