

제주 화순항 주변해안의 침식퇴적 현상분석을 위한 모래이동 조사연구방법 고찰

Comprehensive Analysis of Sand Movement for Erosion and Deposition on the Near Coast of Jeju Hwasun Harbor

권경환* · 최태진** · 박창욱*** · 박일흠****

Kyong Hwan Kwon*, Tae Jin Choi**, Chang Wook Park*** and Il Heum Park****

요 지 : 해저표층 모래이동을 분석하기 위해, 주로 해저질의 입경분포 특성을 이용한 STA(sediment trend analysis) 기법이 주로 사용되어 왔다. 이러한 STA 분석결과는 정량적인 표시이동량이 아닌 정성적인 특징을 표현하므로 실제 모래이동에 대한 전반적인 상황을 상세히 설명하기에 한계가 있었다. 본 연구에서는 이러한 기존 STA 방법을 보완한 종합적인 모래이동경향을 파악하기 위해, 채집모래의 성분분석과 입도분석 및 수중잠수조사 등을 병행하여, 제주 남서부에 위치한 화순항 주변해안을 대상으로 침식퇴적 현상을 분석하였다. 채집한 모래시료로부터 확인할 수 있는 해저퇴적물의 공간적인 입경분포 등을 이용한 기존 STA 분석과 모래의 성분분석을 이용한 기원지(육지, 해양) 추정 등을 통해 모래의 공간적 이동경향을 분석하였고, 추가적으로 수중잠수조사를 통해 모래량에 대한 탐침깊이측정과 사진촬영분석 등으로 모래의 공간적인 분포현황을 파악하였다. 이들 각각 방법들에 의한 분석결과에서 모래이동에 대한 유사경향성을 서로 확인할 수 있었다. 따라서, 해저표층 모래이동에 대한 이 같은 다양한 조사방법들을 이용한 종합적인 연구결과는 수치모형 및 수심측량자료 등이 부재한 해안역에서 공간적인 모래이동의 경향을 판단하고 분석하는 방법으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 모래이동조사, 모래성분분석, STA 기법, 수중잠수조사

Abstract : The most commonly adopted method to investigate the sediment transport trend is STA (sediment trend analysis) technique which utilizes the characteristics of grain size distribution on the bed. Typically, results from STA analysis represent qualitative features of sediment transport rather than quantitative aspects. This restricts from understanding the further details of actual sediment transport entirely. In this study, the erosion/deposition of seabed was analyzed around the coast of Hwasun Port in southwestern Jeju for the study of sand transport trend. As a means to complement the existing STA method, comprehensive investigations such as sand component analysis, particle size analysis, diving sand survey and gravity probing were conducted. The spatial grain size distribution of sand was analyzed through STA as well as the estimation of the origin (land, ocean) using the spatial distribution of the bottom sediment which can be achieved using collected sand samples. Analysis by each of these methods produced similarities in results for sand movement. Therefore, it can be deduced that comprehensive research adopting such various methods of investigation can be a great alternate method for the analysis of sand transport trend for areas without available numerical models or bathymetry data.

Keywords : sand movement survey, sand component analysis, particle size analysis, diving sand survey

1. 서 론

지구 온난화와 함께 발생하는 해수면 상승은 한반도의 해안지역을 비롯하여 제주도 등 도서지역 전반에 걸쳐 진행 중인 상황(Jung, 2014)이며, 장기적으로 연안의 침식퇴적현상에 영향을 준다. 즉, 모래질 퇴적물이 쌓여 있는 해안에서 수

위상승에 따른 수심증가는 이곳에 파에너지를 증가시켜 모래질 퇴적물을 바다 쪽으로 이동시키며, 이에 따라 해변이 소실되는 현상을 발생시킨다(Zhang et al., 2004). 또한, 인공구조물 설치에 따른 해양환경과 해안선의 변화는 연안침식현상을 가속화시킬 수 있다. 이 같은 해안모래의 소실은 제주도 남서측에 위치한 화순항 주변의 황우치 해변과 용머리 해변

*전남대학교 조선해양공학과 박사과정(PhD Candidate, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chonnam National University)

**조선대학교 에너지자원공학과 교수 (Professor, Department of Energy and Resources Engineering, Chosun University)

*** (주)오션닉 대표이사(CEO, OCEANIC C&T Co., Ltd)

**** 전남대학교 조선해양공학과 교수(Corresponding author: Il Heum Park, Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chonnam National University, 50 Daehak-ro, Yeosu, Jeonnam 59626, Korea, Tel: +82-61-659-7152, Fax: +82-61-659-7159, parkih@jnu.ac.kr)

등에서도 발생하고 있는 현상이다. 최근 연안모래의 침식 퇴적현상은 국토의 보존, 재산권의 보호 및 자연재해로부터의 방호 등과 같은 다양한 관점에서 중요한 사회적인 이슈로 부각되고 있다. 이에 연안에서 모래이동의 경향을 고정도로 분석하고 예측하기 위해서 기존의 전통적인 조사방법 이외의 다양한 조사연구기법들이 제시되고 검토되어야 한다.

연안에서 모래이동 분석에 사용되는 방법으로 크게 수심측량에 의한 지형변화분석, 수치모형 실험에 의한 모래이동 예측실험 그리고 모래입경 및 성분분석에 의한 방법 등이 있다. 여기에서 해저표층 모래이동을 분석하기 위해, 주로 해저질의 입경분포 특성을 이용한 STA(sediment trend analysis) 기법이 주로 사용되어 왔다. 이러한 STA 분석결과는 정량적인 표사이동량이 아닌 정성적인 특징을 표현하므로 실제 모래이동에 대한 전반적인 상황을 상세히 설명하기에 한계가 있었다. 본 연구에서는 이러한 기존 STA 방법을 보완한 종합적인 모래이동경향을 파악하기 위해, 채집모래의 성분분석과 입도분석 및 수중잠수조사 등을 병행하여, 제주 남서부에 위치한 화순항 주변해안을 대상으로 침식퇴적 현상을 분석하였다. 채집한 모래시료로부터 확인할 수 있는 해저퇴적물의 공간적인 입경분포 등을 이용한 기존 STA 분석과 모래의 성분분석을 이용한 기원지(육지, 해양) 추정 등을 통해 모래의 공간적 이동경향을 분석하였고, 추가적으로 수중잠수조사를 통해 모래량에 대한 탐침깊이측정과 사진촬영분석 등으로 모래의 공간적인 분포현황을 파악하고자 하였다. 이 같은 STA 분석, 모래성분 분석 및 수중잠수조사를 이용한 대상해역의 모래이동에 대한 종합적인 조사연구방법의 진행과정을 Fig. 1에 제시하였으며, 본 연구에서는 이들 각각 방법들에 의한 분석결과로부터 모래이동에 대한 유사경향성을 서로 확인하고자 하였다. 그리고 해저표층 모래이동에 대한 이 같은 다양한 조사방법들을 이용한 종합적인 연구결과가 수치모형 및 수심측량자료 등이 부재한 해안역에서 공간적인 모래이동의 경향

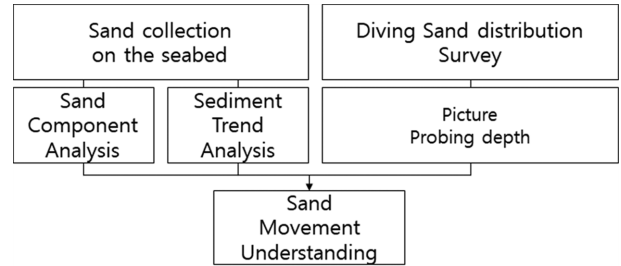


Fig. 1. Flow chart for comprehensive analysis method of surface sand movement.

을 판단하고 분석하는 방법으로 활용될 수 있을 것인지를 검토하고 기술하였다.

2. 대상 해안

제주도 남서부 화순항 주변에 위치한 사계, 용머리 및 황우치 해안은 화산암 침식토로 이루어진 모래해빈이 주를 이룬다. 화순항 동측의 화순리 하동마을 남단과 서측의 사계리 용머리 곳을 경계로 해수욕장으로 이용되고 있으며, 해저경사는 1/80로 완만한 형상을 유지하고 있다(Fig. 2). 연구영역은 제주도 화순항과 형제섬 등을 포함하는 연안역으로 동서방향으로 약 4 km, 남북방향으로 약 5 km를 포함한다. 영역 내 해안선의 형태는 북동-남서방향으로 이어지며, 화순항이 북동쪽 해안에 위치하고, 화순항으로부터 남서쪽으로 황우치 해빈, 용머리 해빈, 사계항, 사계 해빈 및 산이수동항 순으로 이어진다. 그 남측해역에는 형제섬이 위치하며, 지질도폭(Park et al., 2000)에 따르면, 연구지역은 대부분 현무암과 안산암으로 구성되어 있다. 또한, 산이수동항의 남서부와 형제섬은 조면현무암과 응회암으로 구성되어 있으며, 황우치와 사계 해빈일대는 연안을 따라 하모리층으로 명명된 현무암질 암편과 응회질 모래 및 잔자갈 크기의 입자로 구성된 퇴적층이 국지

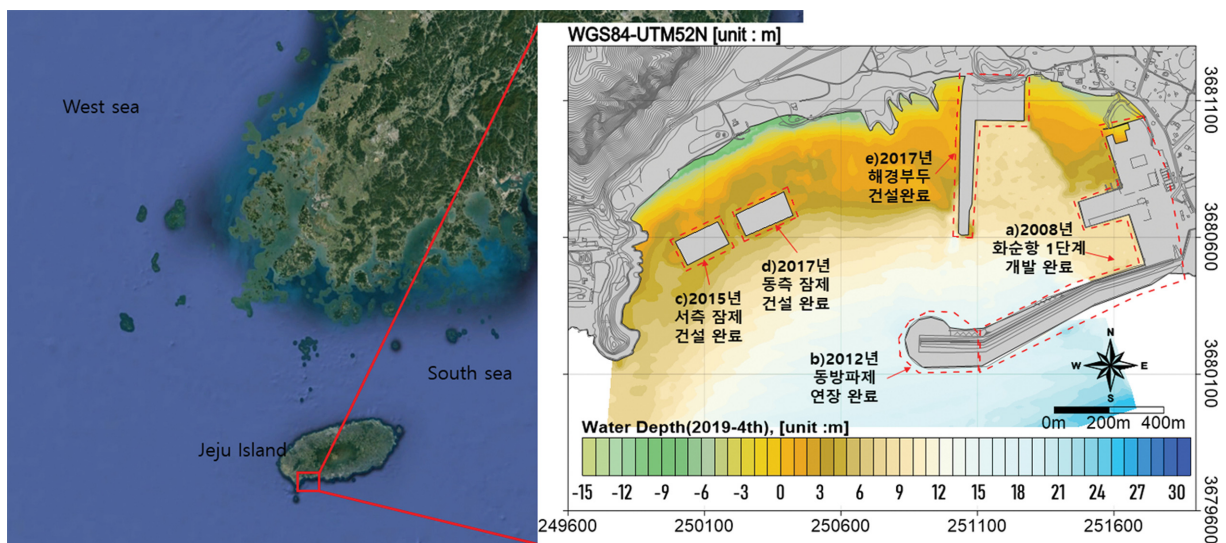


Fig. 2. Location and development history of the study area.

적으로 분포하고 있다. 또한, 인근해안은 현무암질 조면안산암, 조면암, 현무암, 조면안산암 등의 암석으로 이루어져 있다. 황우치와 사계 해변에는 하모리층으로 명명된 퇴적층이 일부 노출되어 있으며, 사계 해변의 남부에는 북서쪽으로부터 소규모 하천이 유입된다.

황우치 주변해역은 지속적인 화순항의 방파제 설치로 인해 표층모래의 이동경향이 변화해 왔다. 이에 황우치 해변은 급격한 침식이 발생하였고 인근 화순항 내측에서 모래퇴적이 발생하여 항내 유지준설이 정기적으로 수행되고 있다. Fig. 2는 화순항의 위치와 2000년대 이후의 화순항 개발이력을 보여주고 있다. 화순항은 1991년 연안항으로 지정된 후, 1995년 화순항 방파제 실시설계계획을 수립하면서 본격적으로 개발되기 시작하였으며, 화순항 1단계 개발사업, 동방파제 연장과 2단계 개발사업을 거쳐 현재의 모습을 갖추게 되었다. 화순항 동방파제 건설로 인해 황우치 해변의 침식문제가 지속적으로 발생함에 따라 이 해변의 전면에 2기의 잠제를 건설하였고, 여기에 22만 m^3 의 모래를 양빈하였다. 그러나 잠제건설과 양빈 이후에도 황우치 해변은 지속적으로 침식이 발생하여, 황우치 해변의 서측은 모래를 찾아보기 힘들게 되었다.

3. 모래 성분분석

대상해역에서 소실된 퇴적물이 운반되는 범위와 경로 등에 대한 정보를 파악하는 것을 목적으로 해변모래와 인근해역의 표층퇴적물에 대한 기원지분석을 수행하였다. 주로 모래질로 구성된 연안환경퇴적물의 기원지분석방법은 편광현미경을 이용한 박편관찰, X선 회절분석(XRD; X-Ray Diffraction), 전

암지화학분석(bulk-rock geochemistry) 등과 같은 다양한 연구기법들이 있으며(Armstrong-Altrin et al., 2014; Carranza-Edwards et al., 2018), 본 연구에서는 이러한 연구기법들을 이용하여 퇴적물 조성에 대한 종합적인 접근을 시도하였다. 편광현미경을 통한 박편관찰과 X선 회절분석을 통해서 퇴적물을 구성하고 있는 광물조성을 파악할 수 있으며, 이는 퇴적물의 화학조성에 반영되어 전암지화학조성으로 검증된다. 따라서 이러한 방법을 통해 퇴적물 입자의 성분을 다각적으로 분석하여 대상해역 모래의 공간적 성분 분포를 파악할 수 있다.

3.1 모래 성분분석 방법

기원지 연구를 위하여 Fig. 3과 같은 총 56개 정점에서 퇴적물시료를 분석하였다. 조하대 이하의 연안 51개 지점에서 해저표층퇴적물 시료가 채취되었으며, 화순항에서 사계항에 이르는 해변역에서 채취된 시료 중 4개(J1, J3, J4, J5)는 해변모래 시료이며, 1개(J2)는 황우치 해변에서 발견되는 하모리층 노두에서 직접 채취된 것이다. 채취된 시료들은 비닐백에 밀봉운반되었으며, 체를 이용하여 지름 2.8 mm 이상의 크기를 갖는 왕모래 및 자갈크기의 일부 입자들을 제거한 뒤 세척과 건조하였다. 이들 건조시료에 대해서 박편을 이용한 점샘(point counting), XRD 분석, 전암지화학분석의 세 종류 분석이 수행되었다.

박편관찰을 통한 조성분석은 건조된 퇴적물 시료를 에폭시 수지를 이용하여 고정된 뒤 연마편으로 제작하여, 편광현미경을 통해 200에서 300개 사이의 점샘을 수행하였다. XRD 분석은 분말화한 시료에 대해 조선대학교의 X선 회절분석기

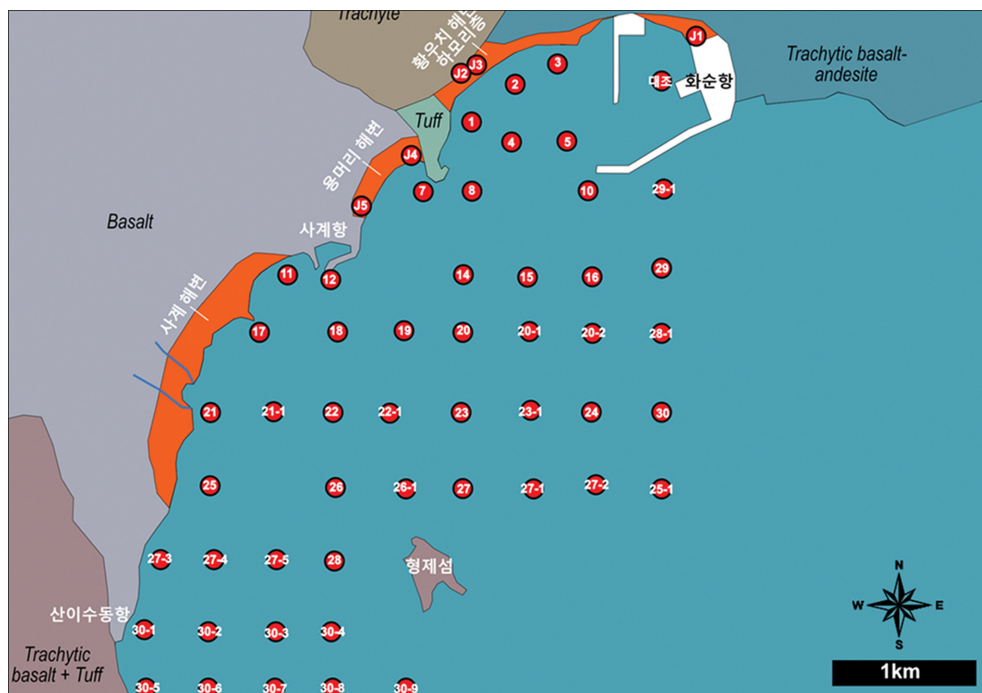


Fig. 3. Sampling positions and geological map near Hwasun Coast (modified from Park et al., 2000).

(기종 PW3064)를 이용하여 3~70°의 2 θ 에 대해 0.03°/초 간격으로 수행되었다. 전암지화학분석은 기초과학지원연구원(KBSI) 서울센터를 통해 수행되었으며 주요원소조성을 X선 형광분석기(XRF; 기종 Philips PW2404)를 통해, 미량원소와 희토류 원소조성은 유도결합 플라즈마 원자방출분광기(ICP-AES; 기종 Jobin Yvon Ultima 2)와 유도결합 플라즈마 질량 분석기(ICP-MS; 기종 Elan DRC II)를 통해 분석되었다.

3.2 박편 분석결과

연구지역의 표층퇴적물 및 해빈모래 시료는 주로 화산암편과 생물골격파편으로 구성되어 있으며 미량의 석영을 포함하고 있음을 확인할 수 있었다. 화산암편은 아원형(subrounded)의 형태로 산출되며, 편광현미경 상에서 흑색의 유리질 기질(glass matrix) 내에 침상의 사장석과 석영을 포함하고 있다(Fig. 4의 A와 B). 생물골격파편은 현미경의 폐쇄니콜 상에서 유백색 내지 암갈색을 띠는 탄산염질의 입자로써 일반적

인 쇄설성 퇴적물과는 달리 다양한 형태로 산출된다(Fig. 4의 C와 D). 본래의 형태를 보존하고 있는 일부 생물골격파편의 형태로 추정할 때 대부분은 조개껍질로 보이며 일부는 성게나 산호 등 다양한 해양생물체의 탄산염질 골격으로 판단된다. 석영은 아각형(subangular) 내지 아원형의 형태를 띤다(Fig. 4의 A). 세 가지 구성요소 중 일반적으로 가장 높은 함량을 보이는 것은 생물골격파편으로서 56개 시료 중 대부분에 해당하는 46개의 시료에서 50% 이상의 함량을 보인다. 화산암편은 생물골격파편 다음으로 함량이 높으며, 시료 내 생물골격파편의 함량이 줄어들수록 화산암편의 함량이 증가한다(Fig. 5). 가장 낮은 함량을 보이는 것은 석영으로 전체 시료에서 평균적으로 8%의 함량을 보이며 최대 26%를 넘지 않는다. 화산암편은 석영 대비 대체로 2~4배 정도 많은 함량을 보이며, 화산암편의 함량이 증가할수록 석영의 함량이 함께 증가하는 경향이 있다(Fig. 5).

생물골격파편의 상대적 함량을 공간적으로 도시하면 Fig.

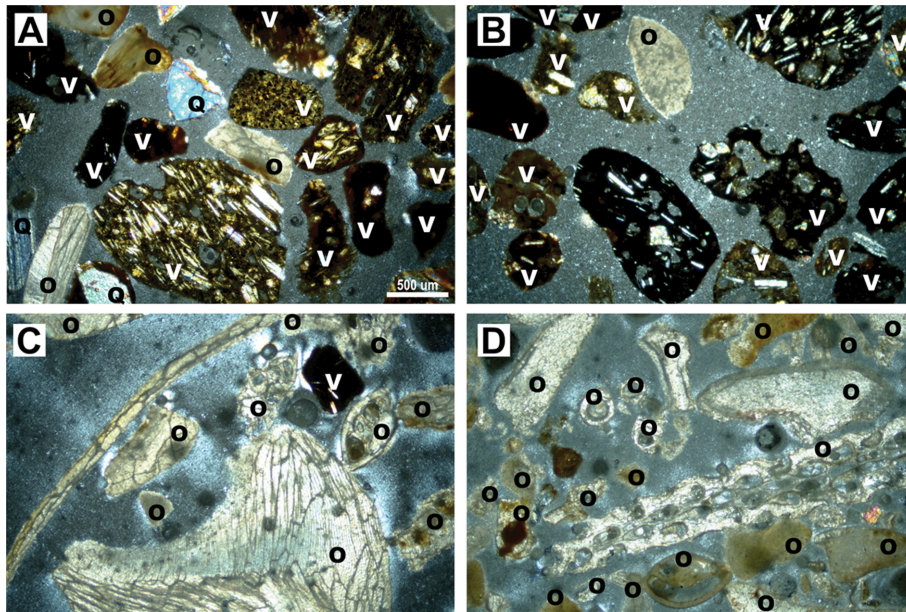


Fig. 4. Photomicrographs of the sand samples in the southwestern coast of Jeju under a cross-polarized microscope. Note that the thickness of the thin sections is thicker than 0.03 mm, to avoid destruction of the shell fragments. V: volcanic lithic fragment, Q: quartz, O: organic material (shell fragment).

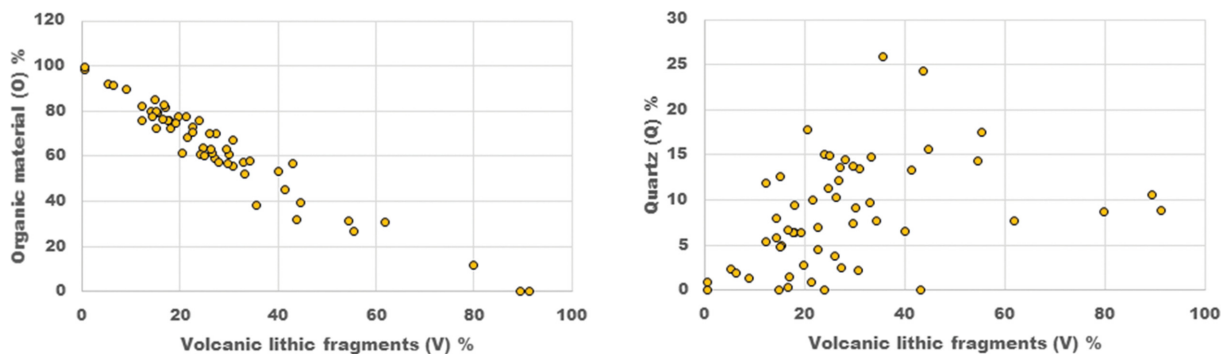


Fig. 5. Relationship between the modal percent of the components in the sand sediments of the southwestern Jeju coast. Left: volcanic lithic fragment vs. organic material; right: volcanic lithic fragment vs. quartz.

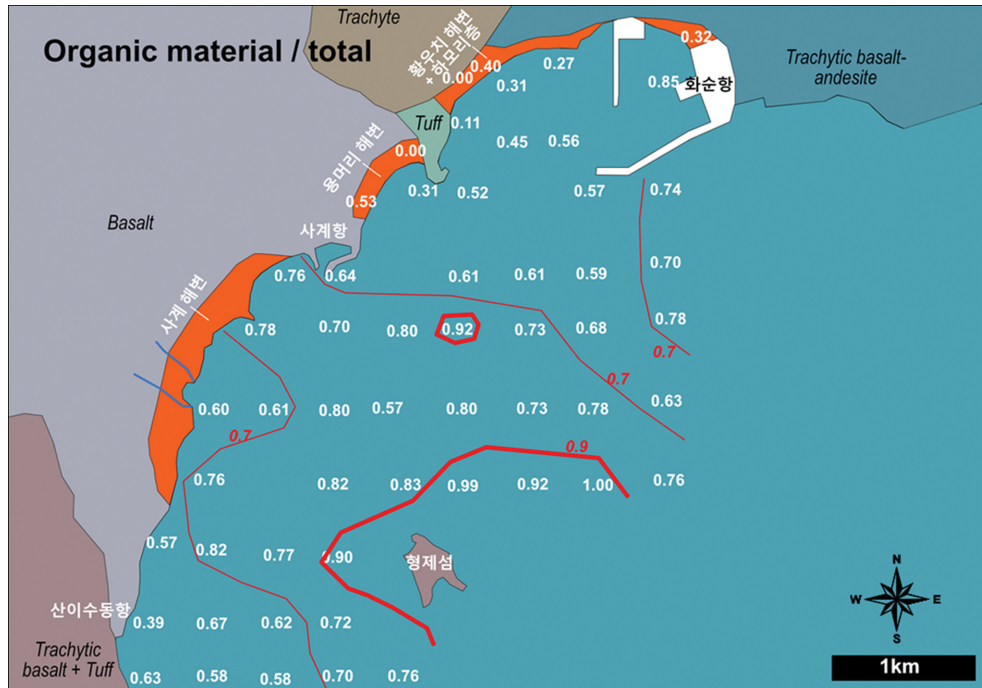


Fig. 6. Abundance of the organic material in the sandy sediments at the survey area.

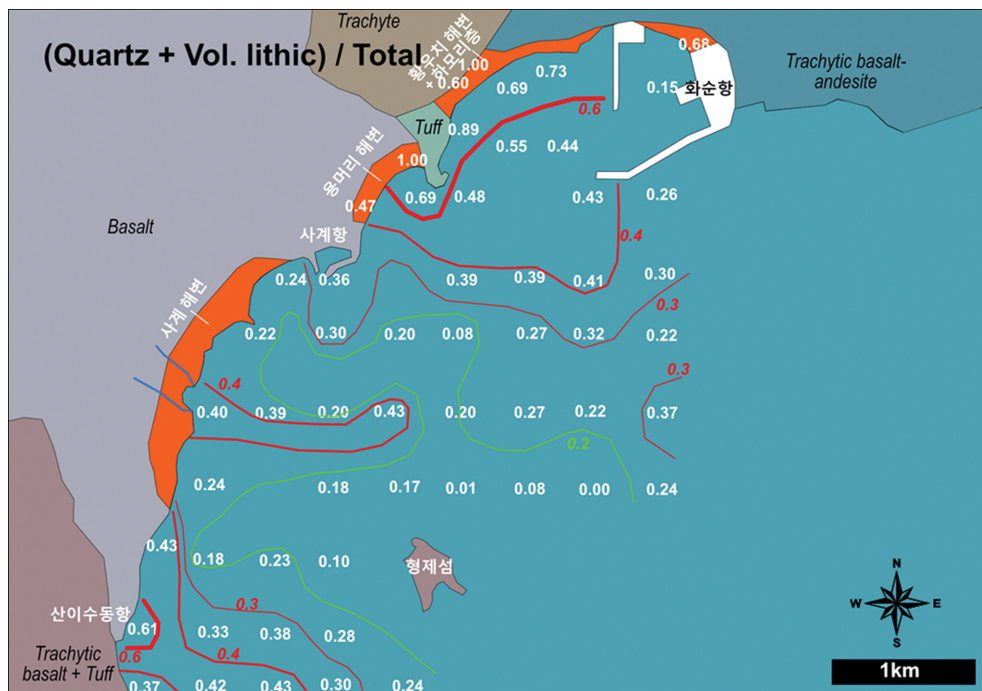


Fig. 7. Abundance of the quartz and volcanic lithic fragment in the sandy sediment at the survey area.

6과 같다. 생물골격파편의 함량은 특히 형제섬에서 1 km 이내로 인접한 지점에서 높게 나타나며 90% 이상에 이른다. 생물골격파편의 함량은 대체로 해변에 가까워질수록 낮아지는 경향을 보이나, 사계 해변의 북부와 남부에 인접한 지점에서는 생물골격파편의 구성비가 70% 이상이다. 생물골격파편의 함량은 황우치와 용머리 해변을 포함한 북쪽 해안과 인접한 지역에서 가장 낮다. 한편 석영과 화산암편을 포함한 함량은

생물골격파편과 공간적으로 반대되는 분포양상을 보인다(Fig. 7). 이들은 생물골격파편의 함량이 낮은 연구지역의 북쪽에서 가장 높은 함량을 보이며 황우치 해변에 인접한 지점에서 최고 89%에 이르는 함량을 보인다. 화산기원퇴적물로 구성되어 있는 것으로 보고된 하모리층 시료(J2)는 화산암편과 석영으로만 구성되어 있었으며, 용머리와 인근해안에서 채취한 해변모래시료(J4) 또한 생물골격파편을 거의 포함하지 않고

화산암편과 석영으로 구성되어 있다. 사계항, 사계 해변 중앙부, 그리고 상이수동항의 전방에도 화산암편과 석영의 함량이 높고 생물골격파편의 함량이 낮은 지점들이 관찰된다. 이

들 지점으로부터 약 1~2 km 전방까지 주변 대비 상대적으로 화산암편과 석영의 함량이 높은 구간이 이어지는 것을 확인하였다.

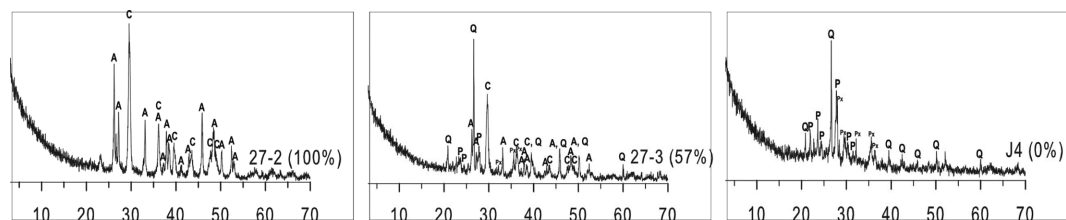


Fig. 8. Representative X-ray diffraction patterns of the sandy sediments in the southwestern Jeju Coast. A: aragonite, C: calcite, Q: quartz, P: plagioclase, Px: pyroxene.

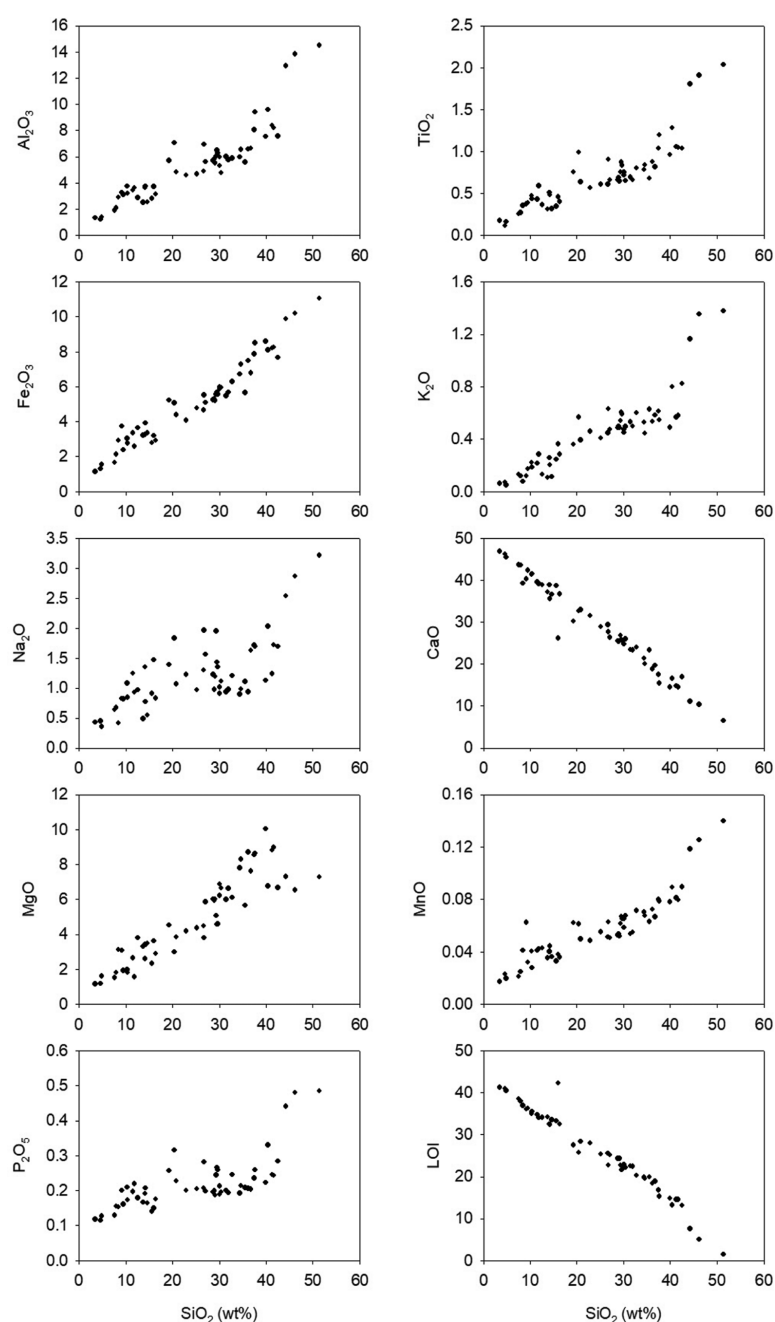


Fig. 9. Binary plots of major elements and LOI (loss on ignition) versus SiO_2 for the sandy sediments in the southwestern Jeju Coast.

3.3 XRD 분석

광물에 X선을 주사하며 입사각을 변화시키면 해당광물의 결정구조에 따라 특정한 각도에서 X선의 회절에 의한 피크(peak)들이 측정된다. XRD 분석은 이러한 성질을 이용하여 시료에 포함되어있는 광물의 종류를 파악할 수 있는 연구방법이다. 표층시료와 해빈모래 시료들에 대한 XRD 분석결과는 Fig. 8과 같다. 생물골격파편의 상대적 구성비가 감소하고 화산암편과 석영의 양이 증가함에 따라 XRD 분석에서 관찰되는 피크의 위치와 상대적 강도가 변화하는 것을 볼 수 있다. 표층퇴적물 시료 27-2와 같이 생물골격파편만으로 구성된 시료는 XRD 자료에서도 해양생물체의 골격을 구성하는 탄산염광물인 아라고나이트(aragonite)와 방해석(calcite)의 존재를 지시하는 피크만이 관찰되고 다른 종류 광물의 존재를 지시하는 피크는 관찰되지 않는다. 반면, 생물골격파편을 거의 포함하고 있지 않은 하모리층 시료 J4는 탄산염광물의 피크가 나타나지 않고 석영, 사장석, 휘석의 피크가 확인된다. J4 시료와 같이 화산암편의 구성비가 매우 높은 시료들은 2θ각 20-30° 사이 구간 전체의 기저 값(background)이 다른 시료들과 동일 구간과 비교해서 상대적으로 약간 상승해 있는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 화산기원퇴적물을 다량 포함하고 있는 경우에 비정질유리(amorphous glass)의 함량이 높아져 발생하는 현상으로 알려져 있다(Andrews et al., 2013). 시료 27-3과 같이 박편 관찰 결과에서도 생물골격파편과 화산암편 및 석영 등이 혼합되어있는 경우에는 XRD 자료에서도 아라고나이트, 방해석, 석영, 사장석 등의 다양한 피크가 혼합되어 나타난다(Fig. 8).

3.4 전암지화학 분석

전암지화학분석으로 얻어진 조사지역 내 시료들은 주요원소 중 SiO₂, CaO의 함량을 비롯하여 LOI(loss on ignition) 값이 높은 양상을 보인다(Fig. 9). LOI란 전암지화학분석의 초기단계에서 시료를 섭씨 1000도까지 가열할 때 빠져나가는 물질의 양으로 시료 내 유기물, 수분 및 탄산염광물 등의 함유량에 비례한다. 분석된 시료들은 CaO 함량이 높을수록 LOI 값 또한 커지는 양상을 보일 뿐만 아니라, 표층퇴적물 시료 27-2와 같이 박편에서 생물골격파편의 함량이 극도로 높은 시료는 LOI 값과 CaO 함량의 합이 87% 정도에 달한다. 생물골격파편을 포함하고 있지 않은 시료 J2는 반대로 LOI 값과 CaO함량의 합이 8% 정도로 매우 낮으며 대신 SiO₂와 Al₂O₃ 등 다른 주요원소의 함량이 높다. 이는 생물골격파편의 함량이 시료 내 CaO와 LOI 값을 결정하고 있는 반면, 화산암편과 석영의 함량은 SiO₂를 포함한 다른 주요원소의 함량을 결정하고 있다는 것을 의미한다. 따라서 Fig. 9과 같이 SiO₂는 Al₂O₃, TiO₂, Fe₂O₃, K₂O, Na₂O, MgO, MnO, P₂O₅와 같은 주요원소들과는 양의 상관관계를 보이며 화산암편과 석영을 많이 포함하고 있는 시료일수록 이들 주요원소의 함량이 함께 증가하는 경향을 보이게 된다. 반대로 생물골격파편을 많이 포함하고 있는 시료일수록 CaO 함량 및 LOI 값이 높고 다른 주요원소들의 함량은 낮아진다.

공간적으로 주요원소의 함량은 박편관찰을 통해 확인한 것과 동일한 변화양상을 보인다. 생물골격파편의 함량에 의해 결정되는 것으로 추정되는 시료 내 CaO 함량은 형제섬 인근에서 45%를 넘는 반면 해빈으로 접근할수록 낮아지는 경향이 관찰된다. SiO₂의 함량은 이와 반대로 형제섬 인근 지역

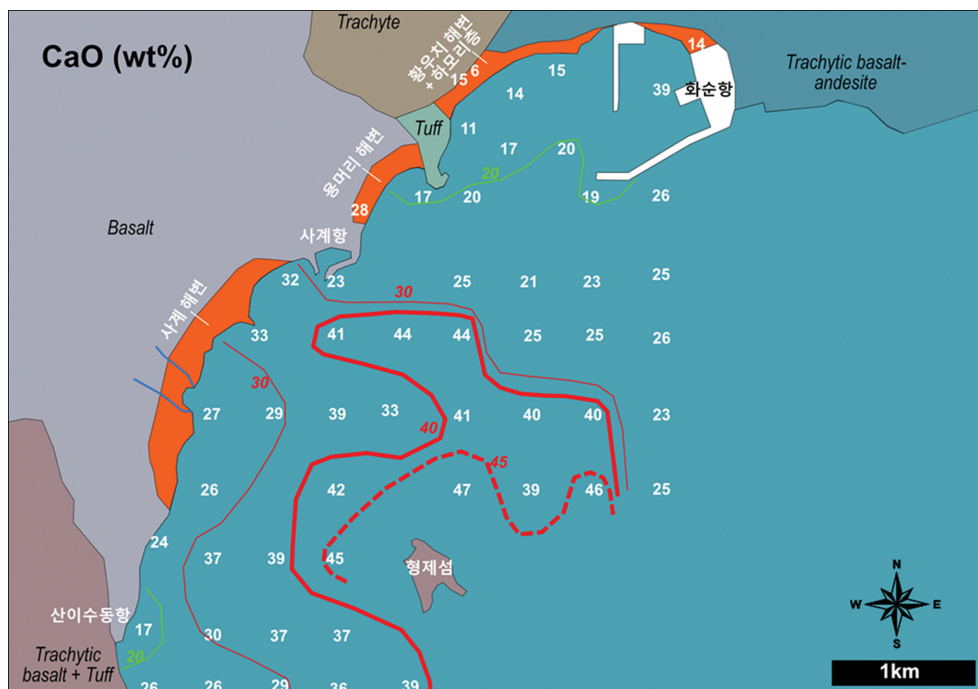


Fig. 10. CaO concentration (wt.%) of sandy sediments in the study area.

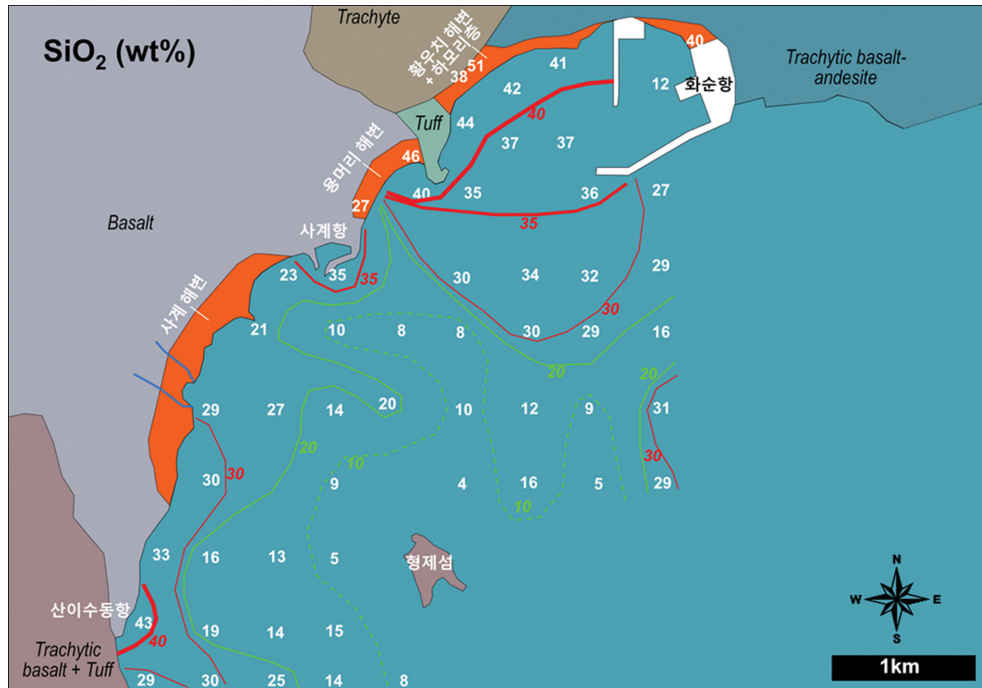


Fig. 11. SiO₂ concentration (wt.%) of sandy sediments in the study area.

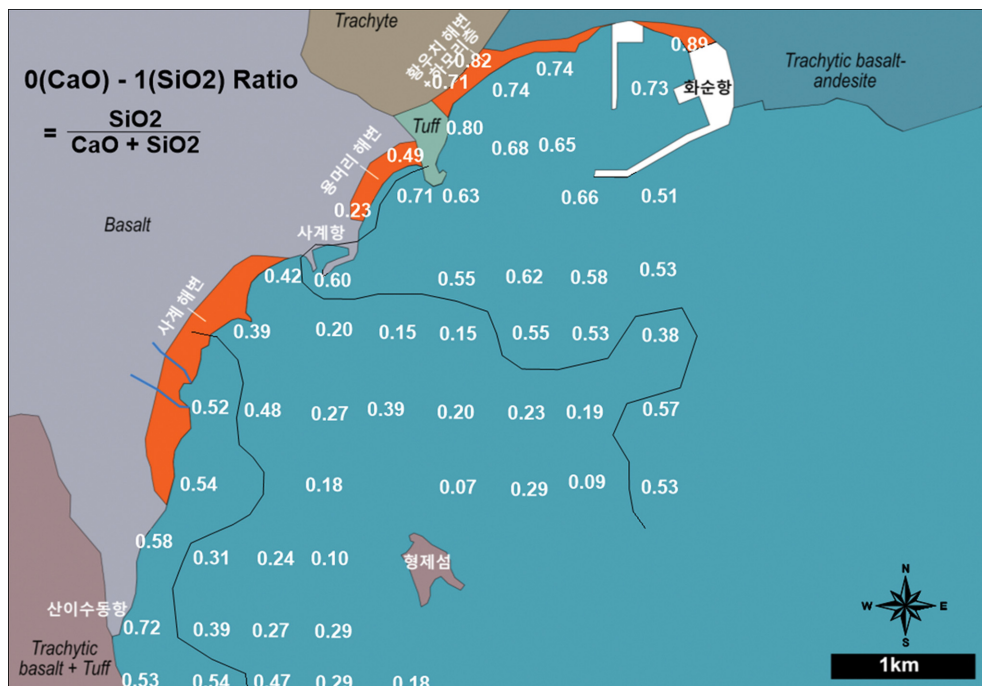


Fig. 12. Spatial distribution of the ratio between CaO and SiO₂ concentration of the sandy sediments in the study area.

에서 10% 미만의 낮은 값을 보이고 황우치 해변과 용머리 해변, 사계항, 산이수동항 등에 가까울수록 높은 값을 보인다 (Fig. 10과 Fig. 11).

육상기원인 화산암편과 석영(SiO₂)과 해양기원 생물골격 파편(CaO)의 함량비를 Fig. 12에 도시하였다. 1에 가까운 값일수록 육상기원의 모래이고, 0에 가까울수록 해양기원의 모래로 설명될 수 있다. 형제섬 중심의 해양측과 사계해빈

북측에서는 해양기원의 모래가 우세하고 황우치, 용머리 해변과 사계해빈 남측에서 육상기원의 모래가 우세한 것으로 나타난다. 해상기원의 모래가 우세한 지역은 해양의 해저 퇴적물이 연안으로 이동하는 것으로 해석할 수 있다. 반면 육상기원의 모래가 우세한 지역은 육상에서 공급되는 모래가 해상으로 유입되어 해안선의 침식이 우세하다고 판단할 수 있다.

3.5 결과 해석

광물학적 구성과 지화학적 구성에 대한 분석결과는 일관되게 조사지역 퇴적물조성이 연안지역을 구성하고 있는 화산암 및 화산기원퇴적층 등으로부터 공급되는 화산암편 및 석영과 조개 등 해양생물로부터 유래한 생물골격파편 간의 상대적 함량에 의해 결정된다는 것을 지시한다. 형제섬 인근 지역의 표층퇴적물은 거의 생물골격파편 만으로 구성되어 있으며, 대체로 형제섬으로부터 해변에 가까워질수록 화산암편과 석영의 함량이 증가하는 경향이 관찰된다. 그러나 해변과 인접한 모든 지역에서 화산암편과 석영의 함량이 높은 것은 아니다. 먼저 황우치와 용머리 해변을 포함하는 연구지역 북쪽, 사계항, 사계 해변 중앙부, 산이수동항 등의 전방에서 화산암편과 석영의 함량이 높게 나타난다. 황우치와 용머리 해변, 사계항 및 산이수동항은 주변에 화산암 내지 미고화된 화산기원퇴적층 등으로 이루어진 절벽을 지니고 있어 이로부터 화산암편 등이 공급되는 것으로 추정된다. 또한, 사계 해변 남부는 소규모 하천이 흐르고 있어 상류로부터 화산암 등을 침식하여 해변으로 공급하는 것으로 추정된다. 이렇게 화산암편 등을 공급받지 못하는 곳은 해변에 인접하고 있다고 해도 상대적으로 생물골격파편의 함량이 높은 특성을 가진다. 화산암편과 석영 등의 공급이 우세해 보이는 지역이라고 하더라도 해변으로부터 약 2 km 이상 멀어지게 되면 화산암편 및 석영의 함량이 급격히 감소하고 생물골격파편이 우세하게 변하게 된다.

4. 표층퇴적물 경향분석(STA)

표층퇴적물 경향분석 STA(sediment trend analysis)는 채가름 실험을 수행 후 σ 스케일로 측정된 평균입도(μ), 분급도(σ)와 편왜도(Sk)의 세 가지 퇴적물 입도상수를 공간적으로 비교하여 그 경향을 파악하고 퇴적물 이동경로를 추정하는 기법이다. 퇴적물 입도상수의 공간적인 분포자료를 확보하기 위하여 2019년 추계인 11월 29~30일과 2020년 춘계인 5월 26~27일에 해저질의 샘플을 채취하여 분석에 활용하였다. 해저질 입도분석에 사용된 시료의 정점은 Fig. 3에 도시되어 있으며 이들 정점에서 J1~J5 및 30-9를 제외한 총 50개 정점이 해당한다. 해저질시료는 그랩형 시료채취기(grab sampler)를 이용하여 채취한 후, 플라스틱 재질의 주걱으로 교란되지 않은 부분의 표층에서 2 cm 깊이까지 표층퇴적물을 취하였다. 이후 해양환경공정시험기준: 해양퇴적물편(Ministry of Oceans and Fisheries of Korea, 2013)에 준하여 분석하였다.

4.1 표층퇴적물 입도분석

1차 조사는 추계인 2019년 11월 제주도 화순항 해역의 해저질 입도 분포특성을 파악하기 위하여 50개의 정점을 산정한 후 입도분석을 진행하였다. 추계조사결과인 Fig. 13과 같이 전조사정점에서 퇴적상은 사질역(sG), 역질사(gS), 약역질

사((g)S), 모래(S)로 나타났다. 평균입도는 $-0.91 \sim 2.42\phi$ (평균 1.11ϕ)의 범위로 분포하였으며, 대부분 정점에서 모래가 우세한 것으로 나타났고, 자갈 : 모래 : 실트 : 점토의 평균 구성비는 $6.74 : 92.86 : 0.34 : 0.06$ 으로 나타났다. 분급도는 $0.50 \sim 1.56\phi$ (평균 0.78ϕ)의 범위로 정점별 차이는 있으나, 평균적으로 보통($0.7\phi \leq S0 < 1.0\phi$)의 분급을 보였다. 2차 조사는 춘계인 2020년 5월 동일 정점에서 시료를 채취한 후 입도분석을 진행하였다. 춘계인 2차 조사결과, Fig. 13과 같이, 전조사정점에서 퇴적상은 사질역(sG), 역질사(gS), 약역질사((g)S), 모래(S)로 나타났다. 평균입도는 $-0.88 \sim 2.51\phi$ (평균 1.16ϕ)의 범위로 분포하였으며, 대부분의 정점에서 모래가 우세한 것으로 나타났고, 자갈 : 모래 : 실트 : 점토의 평균 구성비는 $5.61 : 94.24 : 0.08 : 0.08$ 로 나타났다. 분급도는 $0.55 \sim 1.83\phi$ (평균 0.82ϕ)의 범위로 정점별 차이는 있으나, 평균적으로 보통($0.7\phi \leq S0 < 1.0\phi$)의 분급을 보였다.

4.2 STA 기법의 개요

McLaren(1981)은 평균입도(μ), 분급도(σ)와 편왜도(Sk)를 퇴적물운반양상과 관련하여 입도의 세립화나 조립화와 관계없이 운반경로에서 퇴적물은 분급도가 양호하고 편왜도는 양의 값으로 증가하는 것을 밝혔다. McLaren and Bowles(1985)는 평균입도(μ), 분급도(σ)와 왜도(Sk) 3가지 통계변수의 조합 8가지 가운데 다음 두 가지 조건이 퇴적물의 순운반방향과 결부된다고 제시하였다(Table 1). Type 1의 경우 하류의 퇴적물은 상류에 비해 분급도 양호, 세립, 음의 왜도 증가하고, Type 2의 경우 하류의 퇴적물은 상류에 비해 분급도 양호, 조립, 양의 왜도 증가를 나타낸다.

Gao(1996)는 위 결과에 근거하여 입도경향해석 프로그램(GSTA)을 작성하여 공개한 바 있으며, 이러한 방법은 하천, 하구, 만, 항구 및 대륙붕 환경에 적용된 바 있다(Poizot et al., 2006). Gao(1996)의 모형의 실험과정은 첫째, 특성거리와 경향벡터를 정의하고, 둘째, 합경향벡터를 산정하고 셋째, 운반벡터를 결정하는 순서로 수행된다. 한편, 연안에서 침식퇴적현상은 조류, 파랑, 폭풍, 하천유입 등의 다양한 흐름과 이에 의해 퇴적물이 운반된다. 채집된 시료는 채집지점에 작용하는 모든 운반기구들이 미치는 영향의 최종결과라고 할 수 있다. 서로 다른 시료는 서로 다른 운반 사건 때문에 발생할 가능성도 존재한다. 퇴적을 일으키는 단일 물리기구의 시간적 간격은 조석, 폭풍에서 년 단위에 이르기까지 다양하다. 본 모형으로는 다양한 퇴적기구와 관련된 시간을 분리하여 해석할 수 없으므로 순침식 혹은 순퇴적만을 지시할 뿐 시간에 관련한 침식퇴적속도는 결정할 수 없으며, 두 개의 퇴적물 유형 간에 퇴적물 운반 관계가 있지만 결정할 수 있다(Yeosu City, 2012).

4.3 표층퇴적물 이동경로 분석

본 연구에서 STA 분석의 임계최대거리는 조사정점간의 거

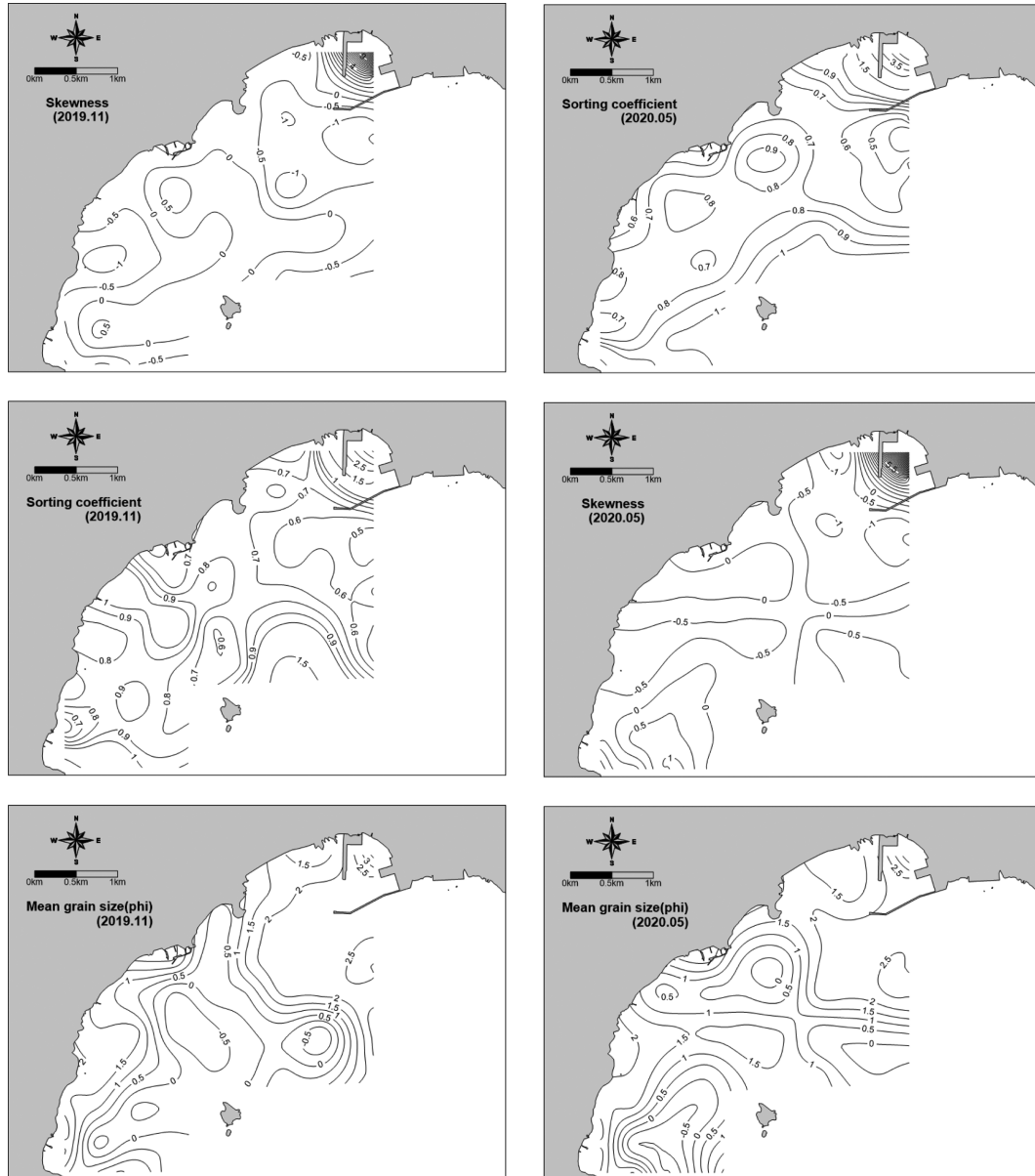


Fig. 13. Various texture parameters at Nov. 2019 and May 2020.

Table 1. Statistical variables of sediment movement trend (after Gao, 1996)

Movement direction	1 → 2	1 ← 2
Type 1	$\sigma_2 \leq \sigma_1, \mu_2 \geq \mu_1, Sk_2 \leq Sk_1$	$\sigma_2 \geq \sigma_1, \mu_2 \leq \mu_1, Sk_2 \geq Sk_1$
Type 2	$\sigma_2 \leq \sigma_1, \mu_2 \leq \mu_1, Sk_2 \geq Sk_1$	$\sigma_2 \geq \sigma_1, \mu_2 \geq \mu_1, Sk_2 \leq Sk_1$

리와 비교적 강한 외력에 노출된 연안환경을 고려하여 800 m로 설정하였고, 1, 2차에 걸쳐 수집분석된 50개 정점의 평균 입경, 분급도 및 편도도를 입력하여 분석하였다. 벡터가 나타내는 크기는 표사이동의 양이 아닌 해저모래의 이동에 대한 정성적 경향성을 나타낸다. Fig. 14와 같이 2019년 추계의 1차 및 2020년 춘계의 2차 해저질 분석결과를 이용한 퇴적물 이동결과를 분석한 결과, 형제도 남서측에서 공급되는 퇴적물과 사계 해빈에서 공급되는 퇴적물에 의해 형제도 서북서측의 A 지점에서 해저질이 퇴적될 것으로 기대되는 수렴구

역이 나타났으며, 주로 황우치와 용머리 해빈에서 공급되는 해저질에 의한 수렴구역 B 지점이 유력한 퇴적구역으로 분석되었다. 물론 STA 벡터는 정성적인 결과이고 그 크기는 큰 의미는 없지만, 수렴구간이 나타난 것은 그곳에 해저질이 퇴적될 가능성이 큰 곳으로 판단할 수 있다. 이것을 기존의 표사량에 관한 과정에 기초한 개념(process based conception)으로 판단하면 B 지점의 수렴역은 황우치 해빈이 준설과 양빈 등으로 해저질이 이미 교란된 곳이라 STA 분석의 기대치가 떨어지고, 형제도 배후의 A 지점은 앞으로 육계사주 형

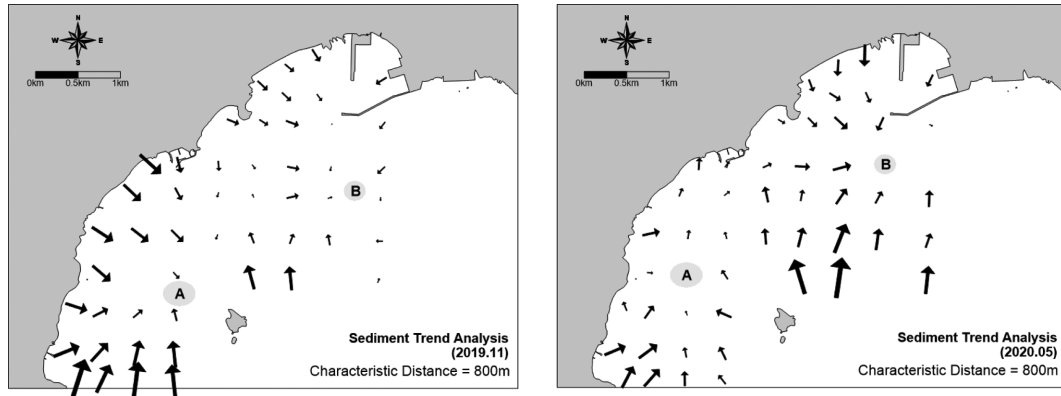


Fig. 14. Sediment transport vector diagrams at Nov., 2019 and May, 2020.

대로 충분히 발달할 수 있는 곳이라 퇴적되기 적합한 곳이라 판단된다.

5. 수중잠수조사

화순항 인근해안의 해저면 모래분포와 이동경향을 파악하기 위하여 잠수부를 이용한 수중잠수조사를 수행하였다. 조사수행방법은 입수지점에서 출수지점으로 잠수사가 이동하면서 해저의 모래층 두께 및 퇴적상을 측정하고 촬영하는 방법으로 수행하였다. 해초, 암초 및 퇴적모래의 두께 및 다짐정도 등으로 판단하여 모래이동경로를 경험적으로 설정하였다.

5.1 조사방법

수중잠수조사는선상법(Line Transect Method)을 이용하여 수중촬영 잠수사 1인은 수평라인에 대해 해저지형, 암반형태, 부착서식생물 및 해조상 등을 비디오로 촬영하였다.수중카메라 촬영잠수사 1인은 1500만 화소급 디지털 수중카메라를 이용하여 수평라인 시작점부터 출수지점까지 촬영해야 하며 특히 서식생물 및 해조상, 각 라인별의 저질 및 수심대 파악 등 각 해역특성을 분석하기 위해 근접 촬영하고 수중사진을 이용하여 현황분석하고 출수 후 각 라인별 특성과 서식생물 및 해조상 수심대 및 저질성향 탐침 깊이 등을 야장에 기록하여 데이터 수집에 활용해야 한다.

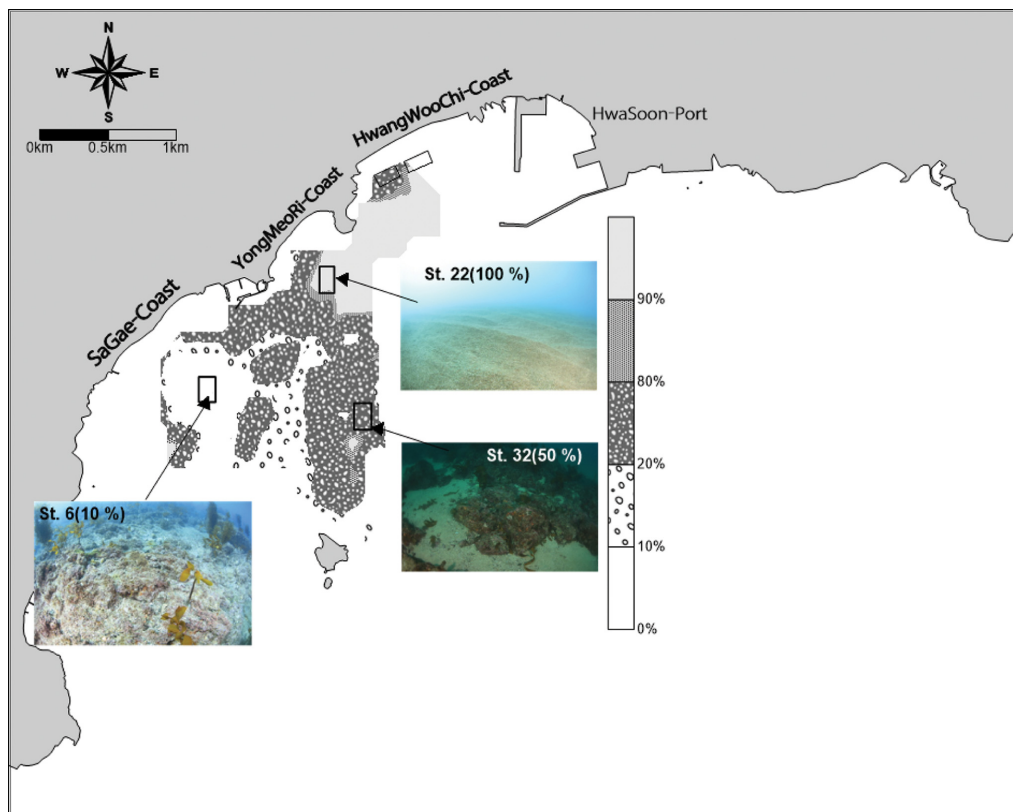


Fig. 15. The sand content of the surface layer as a result of underwater investigation.

5.2 조사결과

수중잠수조사에 의한 모래퇴적 현황분석 중 사질비율 및 탐

침깊이에 대한 조사결과를 Fig. 15와 Fig. 16에 도시하였다.
조사결과, 용머리 해빈 동측에서 황우치 해빈의 남서쪽까지

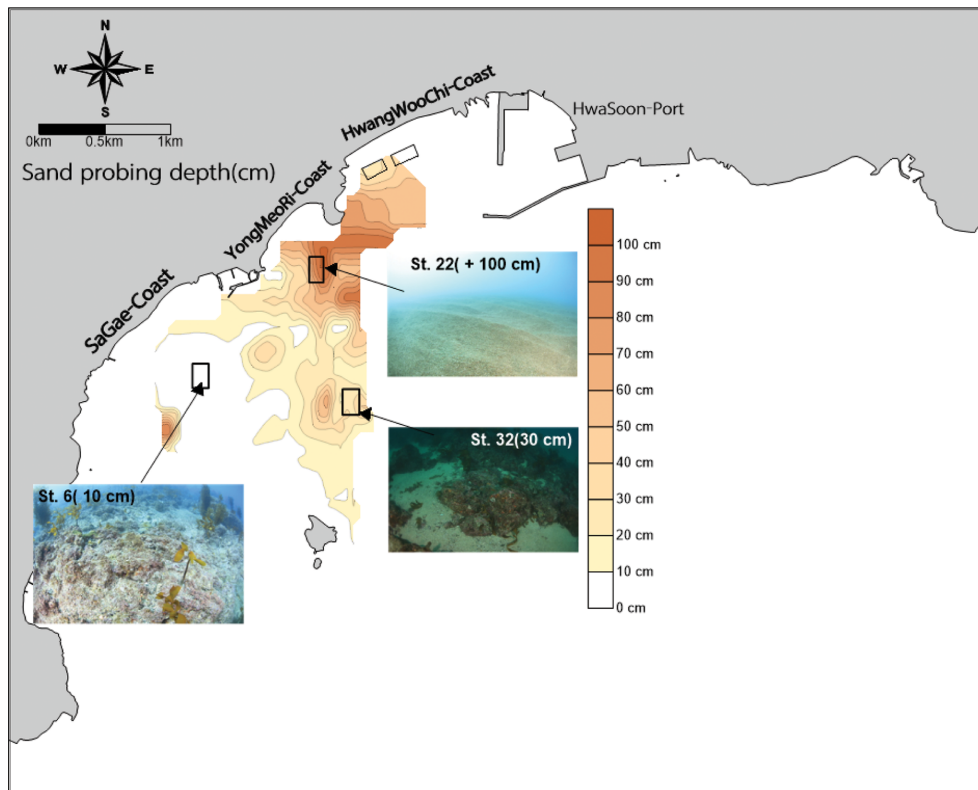


Fig. 16. The sand content of the surface layer as a result of underwater investigation.

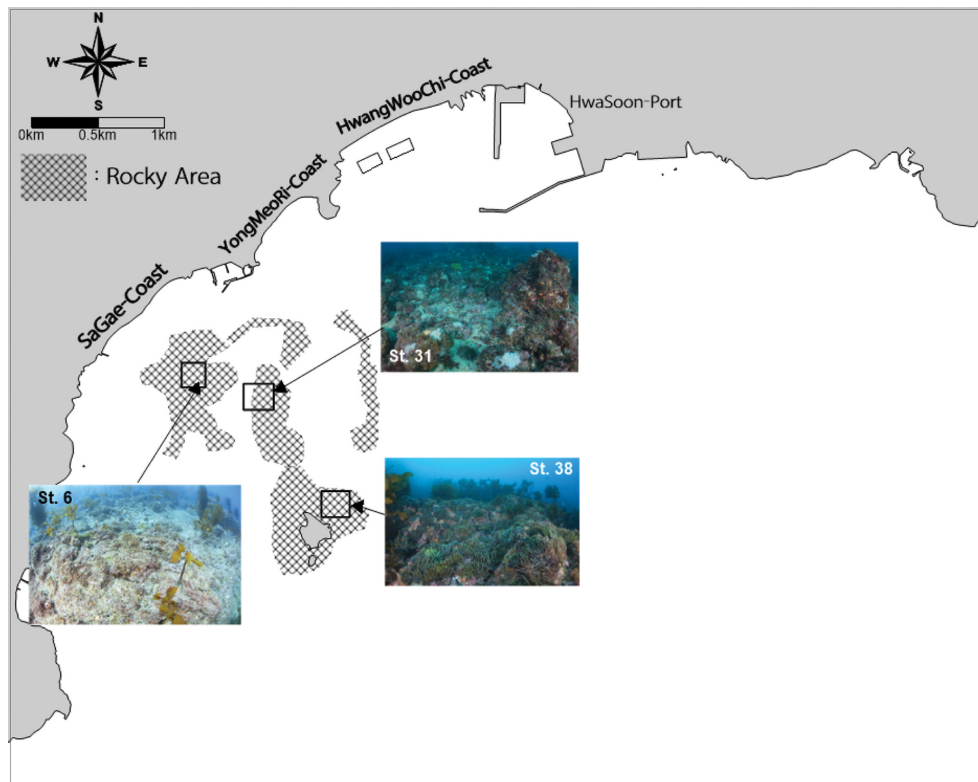


Fig. 17. Estimated rock mass area based on underwater survey results.

표층모래가 면적의 90%를 차지하고 모래탐침깊이는 약 100 cm 이상인 것으로 나타났으며, 용머리 해빈 남측해역에 모래 퇴적 우세지역이 동서-남북방향으로 약 1 km 분포하는 것을 확인할 수 있었다. 사계와 용머리 해빈 동측해역은 사질면적이 50% 이하이거나 암반으로 형성된 구역임을 확인할 수 있었다. 표층모래의 면적이 모래수증조사 중 20% 이하의 분포를 가지는 구역에 대해 Fig. 17과 같이 암반구역을 추정하였으며, 대상지 주변에 암반구역이 위치한다는 것은 퇴적환경이 지속될 수 없는 큰 외력의 영향을 받고 있다는 것을 의미한다. 암반추정구역이 위치한 외해측 형제섬에서 사계와 용머리 해빈에 이르는 구역은 파랑외력(하계태풍 및 동계폭풍)에 의해 매년 퇴적경향이 급격하게 바뀔 수 있는 조건을 갖추고 있다고 할 수 있다.

6. 종합분석 및 결론

기존의 해저 표층의 모래이동을 분석하기 위해 사용되는 분석방법으로 주로 표층 모래입경 분포를 이용한 STA 기법을 사용해 왔다. 기존의 STA 분석만을 이용한 표층모래의 이동경향분석은 표사이동의 정량적 해석 아닌 해저모래의 이동에 대한 정성적인 형상 만을 표현하므로 실제 표층모래이동에 대한 전반적인 경향을 상세히 설명하기에 한계가 있다.

본 연구에서는 이러한 기존 STA 분석의 보완으로 종합적인 해저모래의 이동경향을 파악하기 위해 채집모래의 성분분

석, 입도분석과 수증조사를 이용하여 제주도 남서부 해안에 위치한 화순항 주변의 사계, 용머리 및 황우치 해빈을 대상으로 종합분석을 수행하였다. 수행방법은 모래성분분석을 통한 퇴적물 기원지분석을 수행하였고, 체가름실험과 입도분석을 통한 모래이동경향분석(STA)을 수행하였다. 추가적으로 수증조사수를 통해 해저면의 현황을 조사하여 공간적인 모래의 분포, 깊이 및 암반 구역 등을 확인하였다. 모래성분분석을 통한 퇴적물 기원 분석결과, 연안침식이 활발할 것으로 추정되는 해빈(황우치, 용머리, 사계리 남측해빈)에서 공급받는 화산기원 퇴적물이 외해로 유출되는 것을 나타내고 있으며, 조개 등 해양생물체의 입자들이 해안방향으로 이동하는 것을 나타내고 있었다.

Gao(1996)의 GSTA(grain size trend analysis) 모형을 이용하여 2회(연속된 추측계)에 걸친 해저질조사에 의한 퇴적물 이동경로를 분석한 결과, Fig. 18에 나타난 바와 같이 화순항 남측과 형제섬 서측에서 해적퇴적물이 수렴함을 확인하였다. 이것은 수증조사수에 의한 모래퇴적 현황분석 중 탐침깊이 조사결과가 잘 일치하고 있어 현재 화순항 인근 해역의 퇴적구역 위치에 대한 신뢰성을 확인시켜주고 있다. 또한, 모래성분분석을 통한 퇴적물기원 분석결과, STA 분석결과 확인된 화순항 남측의 해저퇴적물 수렴구역에는 육상에서 공급받는 화산기원 퇴적물이 주로 분포함을 확인하였다. 수증조사, 모래성분 분석 및 퇴적물 이동경로 분석결과를 종합하면 용머리 해빈전면에 퇴적구역이 발생함을 확인하였다.

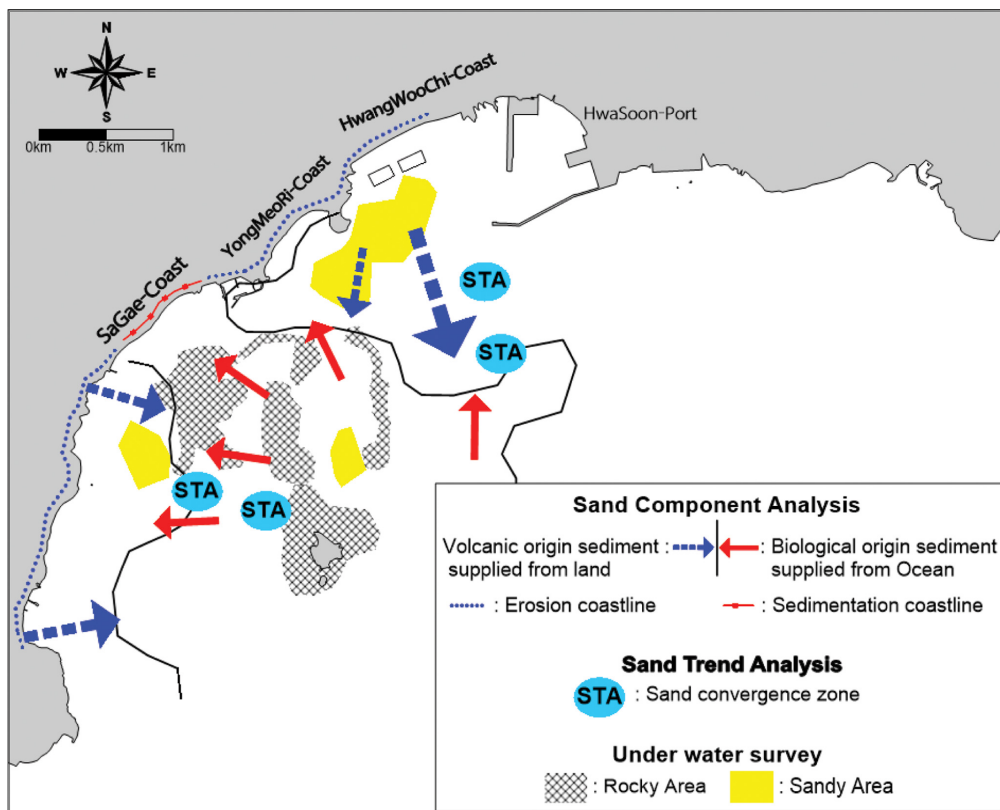


Fig. 18. Sand distribution and movement trend by comprehensive analysis of sand survey.

수중조사에 의한 모래퇴적 현황분석 중 탐침깊이 조사결과, 용머리 해변전면과 남쪽 어장의 서쪽에서 100 cm 이상의 모래가 퇴적되어 있음을 확인하였다. 수중조사에서 10% 이하의 사질 분포와 위성사진 등을 바탕으로 암반구역을 추정하였으며, 대상지 주변에 암반구역이 위치한다는 것은 퇴적환경이 지속될 수 없는 큰 외력의 영향을 받고 있다는 것을 의미한다.

모래성분 분석, STA 분석 및 수중잠수조사에 의한 대상해역의 모래퇴적상황을 Fig. 18에 도시하였다. 분석결과를 종합해 보면, 모래성분분석 결과로 추정된 해상과 육상기원 모래입자의 이동경향과 STA 결과에 의한 모래이동 수렴구역의 위치가 유사한 경향을 보인다. 그리고 수중잠수조사에 의한 모래분포 결과를 보면 모래성분분석 및 STA 분석의 모래이동 벡터와 유사한 경향을 보인다. 특히 황우치 및 용머리 해변의 남측해역에 분포하고 있는 다량의 모래가 육상기원의 모래이며, STA 분석결과 황우치 및 용머리 해변에서 해양방향의 모래이동을 확인할 수 있었다.

결론적으로 본 연구와 같이 해저모래의 채취를 통한 정성적인 STA 기법과 모래기원지분석을 종합적으로 검토하여 각각의 분석결과에 해석에 도움을 줄 수 있었으며, 수중잠수조사를 이용한 해저모래의 분포를 확인하여 이들 정성적인 연구결과의 신뢰도를 확보할 수 있었다.

References

- Andrews, J.T., Kristjansdottir, G.B., Eberl, D.D. and Jennings, A.E. (2013). A quantitative x-ray diffraction inventory of volcaniclastic inputs into the marine sediment archives off Iceland: a contribution to the Volcanoes in the Arctic System programme. *Polar Research*, 32, 11130p.
- Armstrong-Altrin, J.S., Nagarajan, R., Lee, Y.I., Kasper-Zubillaga, J.J. and Cordoba-Saldana, L.P. (2014). Geochemistry of sands along the San Nicolas and San Carlos beaches, Gulf of California, Mexico: implications for provenance and tectonic setting. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 23, 533-558.
- Carranza-Edwards, A., Kasper-Zubilaga, J.J., Martinez-Serrano, R.G., Cabrera-Ramirez, M., Hoz, L.R., Mendieta, M.A.A., Marquez-Garcia, A.Z. and Cruz, R.L.-S. (2018). Provenance inferred through modern beach sands from the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Geological Journal*, 1-12.
- Gao, S. (1996). A fortran programming for grain-size trend Analysis to define net sediment transport pathways. *Computers & Geosciences*, 22(4), 449-452.
- Jung, T.S. (2014). Change of mean sea level due to coastal development and climate change in the western coast of Korean Peninsula. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 26(3), 120-130.
- McLaren, P. (1981). An interpretation of trends in grain size measures. *Journal of Sedimentary Petrology*, 51(2), 611-624.
- McLaren, P. and Bowles, D. (1985). The effects of sediment transport on grain-size distributions. *Journal of Sedimentary Petrology*, 55(4), 457-470.
- Ministry of Oceans and Fisheries of Korea. (2013). Sediment process test standards. Marine environmental process test standards, 2013-230.
- Park, K.H., Jo, D.R. and Kim, J.C. (2000). Moseulpo-Hanlim maple geological report 1:50,000. Korea Resources Research Institute, 18p.
- Poizot, E., Mear, Y., Thomas, M. and Garnaud, S. (2006). The application of geostatistics in defining the characteristic distance for grain size trend analysis. *Computers & Geoscience*, 32(3), 360-370.
- Yeosu City. (2012). Report for simulation investigation of the Manseongri black sand. 125p.
- Zhang, K., Douglas, B.C. and Leatherman, S.P. (2004). Global warming and coastal erosion. *Climatic Change*, 64, 41-58.

Received 5 March, 2021

Accepted 24 March, 2021