대조차해안에서의 지형변화 특성 파악을 위한 현장관측 및 수치모델링

Field Observation and Numerical Modelling for Morphological Response in the Macro-tidal Beach

전현정* · 장태수** · 도기덕***
*한국해양대학교 해양과학기술융합학과
**전남대학교 지구환경과학부
***한국해양대학교 해양공학과

Hyunjung Jun* · Tae Soo Chang** · Kideok Do***

*Department of Convergence Study on the Ocean Science and Technology, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea
**Faculty of Earth Systems and Environmental Sciences, Chonnam National University, Gwangju, Korea
***Department of Ocean Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

Abstract

This study investigated the sediment transport and bed level change in the macro-tidal beach using field observation and numerical modelling. The study area is Sinduri beach, located on the west coast of Korea, which developed a large scale multi-sand bar with a tidal range of 5 to 7 m. The multi-sand bar is destroyed in the high-wave conditions (winter) and developed in the low-wave conditions (summer), which have different characteristics from the wave-dominated beach. Therefore, this study measured the wave level, current, and bed level change using ADCP (Acoustic Doppler Current Profilers) and VRS-GSP (Virtual Reference Station Global Positioning Systems) to investigate the mechanism of the multi-sand bar formation. Then, this study simulated sediment transport and bed level change, coupled with the Delft3D-FLOW and Delft3D-WAVE model. The numerical results show that sediment transport and bed level change dominantly occurred under the shore-normal wave condition and tend to develop a multi-sand bar. However, the destruction of the multi-sand bar was not reproduced. Delft3D-FLOW model is based on the two-dimensional depth-averaged shallow water equation and it is not applicable to simulate the wave-induced current near the seabed. Also, the aeolian sediment transport by north-west wind can not involve in the numerical simulation.

Keywords : wave, tide, macro-tidal beach, Delft3D, sediment transport

1. 서론

해안은 조석의 크기에 따라 대조차(> 4 m), 중조차(2-4 m), 소조차(< 2 m) 환경으로 구분되며(Davies, 1964), 해저지형, 해안선의 모양, 수심 등의 환경적 요인에 따라 다른 분포를 보인다. 소·중조차 환경이 나타나는 남·동해안에서는 비교적 단순한 환경요인들로 인해 파랑이 우세한 환경에 놓여져 있으며, 서해안과 같은 대조차 환경에서는 조석과 파랑의 복합적인 작용으로 인해 파랑우세해빈보다는 더 복잡한 지형변화적 특성이 나타난다(Short, 1991). 이러한 연유로 소·중조차 환경의 남·동해안 지역에서 파랑에 의해 이동하는 표사와 지형변화에 대한 수치모델링 연구(Son *et al.*, 2017; Park *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2019; Do and Yoo, 2020; Kim *et al.*, 2020; Shim *et al.*, 2020)는 많이 수행되었지만, 대조차환경을 가지는 서해안에 대한 수치모델링 연구

는 다소 제한적이다. 서해안에 위치한 만리포 해안에서 표사이동(sediment transport) 및 지형변화(bed level change) 특성을 파악하기 위한 관측자료분석 및 수치모델링 연구(Do *et al.*, 2016)가 수행된 바 있으나, 1차원 지형변화 모델인 CSHORE (Kobayashi, 2013)를 이용하여 수치모델링을 수행하여 연안 방향의 조류 성분을 고려하지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 서해안에 위치한 충청남도 태안군 신두리 해빈을 대상으로 하여 대조차 해안에서 나타나는 연안수리학적 특성을 관측하였으며, 2차원 평면 모델인 Delft3D 모델(Lesser, 2004)을 통해 수치모델링을 수행하여 조석과 파랑에 의한 표사이동 및 지형변화 매커니즘을 규명하고자 하였다.

신두리 해빈은 조차가 5-7 m에 이르는 조석우세해빈이며 해빈 뒤로 길이 약 3.4 km, 폭 0.5-1.3 km의 해안사가 발달하여 있다. 외해 쪽으로 돌출된 곳에 위치한 신두리 해빈은

북서풍과 파랑의 영향을 직접적으로 받아 다른 서해안에 위치한 해변과는 다르게 모래해안이 나타나며, 이를 통해 신두리 해변은 조석과 파랑이 모두 우세하다고 볼 수 있다(Yoon and Chun, 2019). 강한 조석과 파랑의 복합적인 작용과 겨울철 바람에 의한 표사이동 현상에 의해 신두리에서는 일반적인 파랑우세 해변과는 다른 사주 형성과정이 나타난다. 일반적인 파랑우세 해변의 경우, 겨울철에 사주가 형성되고 여름철에 사라지는 매커니즘이 나타나지만(Komar, 1976; Plant *et al.*, 1999; Vidal-Ruiz and Ruiz de Alegria-Arzaburu, 2019), 관측 결과 신두리에서는 이와는 반대의 사주 형성 매커니즘을 가진다. 따라서 본 연구에서는 신두리에서 나타나는 사주 형성 매커니즘을 과학적으로 규명하기 위해 층별유속관측장비(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)를 해안선 인근에 설치하여 수위, 층별 유속 및 유향에 대한 정보를 수집하였으며 Virtual Reference Station Global Positioning Systems (VRS-GPS)를 사용하여 약 2년 동안의 계절에 따른 지형자료를 관측하였다. 그리고 취득한 관측자료를 분석하여 신두리의 연안수리학적 특성을 파악하고자 하였으며, 이를 보완 설명하기 위해 2차원 평면 모델인 Delft3D 수치모델을 수립하여 조석과 파랑이 모두 우세한 해변에서의 지형변화 매커니즘을 규명하고자 하였다.

2. 현장관측 및 연안수리특성 파악

2.1 연구지역

본 연구의 대상 해역인 신두리 해변($36^{\circ} 49' N$, $126^{\circ} 12' E$)은 길이 약 3.6 km, 폭 500 m이며, 북북서-남동 방향으로 열린 반월 형태의 해안선을 가지고 있다(Fig. 1). 신두리 해변은 반일주조(semi-diurnal)와 일조부등(diurnal inequality)이 나타나고 조차가 5-7 m에 이르는 대조차환경이며, 대조기 평균 조차는 6.1 m로 Flemming(2012)에 의해 이는 고대

조차환경으로 분류된다. 신두리 해변은 겨울철 북서쪽에서 오는 바람과 파랑의 영향을 직접적으로 받아 모래해안이 나타나며, 조수 간만의 차가 큰 서해안의 특징으로 인해 갯벌과 백사장의 특징을 동시에 보이므로 신두리는 조석과 파랑이 모두 우세한 해변이라고 볼 수 있다(Yoon and Chun, 2019). 또한, 겨울철 강한 북서풍에 의해 표사가 이동하여 해변 뒤로 길이 약 3.4 km, 폭 0.5-1.3 km의 해안사구가 발달해 있으며, 바람에 의한 신두리 사구의 연간 순 퇴적량은 약 2.5 cm로 바람에 의한 표사이동이 우세한 지역으로 알려져 있다(Kennedy, 2004).

2.2 현장관측

조석과 파랑의 복합적인 작용으로 인하여 발생하는 연안수리학적 특성을 규명하기 위해 본 연구에서는 ADCP를 연안정점에 설치하여 관측자료를 수집하였다. 본 연구에서 사용한 ADCP는 Teledyne에서 개발한 SENTINEL V ADCP-983kHz로 수심 1.86 m(인천 MSL 기준)에 설치하였으며, 신두리 해변의 중앙 부분에 위치한다($36^{\circ} 50' 39.74'' N$, $126^{\circ} 11' 21.85'' E$, Fig. 1). 관측기간은 2017년 2월 27일에서 3월 1일(약 3일)로 대조기에 수행되었다.

본 연구에서는 파랑 환경의 변화에 따른 표사이동 및 지형변화 특성을 규명하기 위해 신두리 해변에 ADCP가 설치된 중앙선 S3를 기준으로 총 6개의 관측선(S1-S6)을 설정한 후(Fig. 1), VRS-GPS를 사용하여 지형자료를 취득하였다. 계절별로 형성되는 다중사주의 특성을 파악하기 위해 2017년 2, 6, 9, 12월 그리고 2018년 3월까지 총 5회에 걸쳐 지형자료를 관측하였으며 모두 대조기에 수행하였다. 그리고 겨울과 여름에 따라 달라지는 입도 특성을 분석하기 위해 관측선 S3를 따라 겨울(2017년 2월 28일)과 여름철(2017년 9월 20일)의 표층 시료를 채취하여 관측자료 분석 및 수치모델링 입력자료로 활용하였다.

Fig. 1. Location of study area and observation lines (S1-S6) observed by VRS-GPS

2.3 연안수리특성 분석

2.3.1 지형자료 분석

신두리에서 계절에 따라 취득한 지형자료를 Fig. 2에 나타내었으며, 이를 통해 신두리 해변에서는 연안 사주의 형성 매커니즘이 일반적인 파랑우세해빈과는 다르게 나타나는 것을 확인하였다. 일반적인 파랑우세 해빈의 경우, 겨울철 강한 파랑이 해빈 모래턱(beach berm)의 표사를 외해로 이동시켜 쇄파대에 사주를 형성하고, 여름철에는 상대적으로 낮은 파랑에너지 환경으로 인해 해빈으로 표사가 복원되어 사주가 소멸되는 매커니즘을 보인다(Komar, 1976; Plant *et al.*, 1999; Vidal-Ruiz and Ruiz de Alegría-Arzaburu, 2019). 하지만 신두리 해변에서는 이와는 반대로 겨울철(2017년 2월)에 사주가 소멸되고 여름철(2017년 9월)에 형성되는 양상을 보이며, 이는 해빈의 양 끝보다 중앙(관측라인 S3)에서 가장 뚜렷하다(Fig. 2(c)). 또한, 신두리 해변은 여름철에 연안에 평행한 방향으로 5개 미만의 다중사주를 형성하며 형성된 사주의 높이는 1 m 이하로 발달하고 해안선에 수직

방향으로 50-140 m의 불규칙한 패턴으로 형성되는 특징을 보인다.

2.3.2 파랑자료 분석

신두리 해변에서 발생하는 표사이동 및 지형변화는 조석과 파랑의 복합적인 작용으로 인해 발생하며, 이러한 외력의 특성을 파악하는 것은 중요하다. 하지만, 신두리 인근 지역에는 파고, 주기 및 파향에 대한 정보를 얻을 수 있는 파랑관측장비가 설치되어 있지 않아, 본 연구에서는 수치모델을 이용하여 파랑장을 재생산한 ERA5 재분석자료(Hersbach *et al.*, 2019)를 연구에 활용하였다. ERA5 재분석자료는 미유럽 중기기상예보센터(ECMWF; European Centre for Medium-range Weather Forecasts)에서 격자 형태로 제공하는 기상 및 해양자료로 현재 연안공학분야에서(Do and Kim, 2018; Son *et al.*, 2018) 다양하게 활용되고 있다. 본 연구에서는 ERA5 자료 중 가장 해상도가 높은 0.125°의 자료를 사용하였으며, 육지와 다소 거리가 있으면서 신두리 해변과 근접한 지점

Fig. 2. Beach profiles at each observation line. (a) to (f) corresponds to S1 to S6, respectively.

의 파랑자료를 사용하였다(36° 52' 30" N, 126° E). 자료의 분석기간은 2017년 3월부터 2018년 2월까지 약 1년으로 지정하였으며, 여름(2017년 3월-9월)과 겨울(2017년 10월-2018년 2월)로 기간을 구분하여 파랑 특성을 분석하였다(Fig. 3). 계절풍의 영향으로 인하여 여름철에는 남서 및 북서파향이 우세하게 분포하였으며, 겨울철에는 북서파향이 우세하였다. 그리고 파랑에너지가 낮은 여름철에는 대부분 1 m 이하의 저파랑이 우세하며 1 m 이상의 고파랑은 약 3.9%로 나타났다. 파랑에너지가 높은 겨울철에는 여름철보다 1 m 이상의 고파랑이 우세하며 겨울철 파랑의 27%를 차지한다. 분석기간 동안 신두리 해변의 평균 유의파고는 0.53 m으로 대부분 1 m 이하이며, 1 m를 넘는 파랑은 약 14%로 나타나 신두리 해변에서는 1 m 이하의 저파랑이 고파랑보다 우세하였다. 결과적으로 신두리 해변에서는 지리적 요인으로 인해 여름철에도 북서파향이 다수 존재하며 이는 여름철 지형변화를 발생시키는 주된 원인임을 유추할 수 있다.

2.3.3 흐름 특성 분석

신두리에 설치한 ADCP를 통해 0.25 m의 간격으로 39개의 층별 유속 및 유향에 대한 관측자료를 취득하였다. 본 연구에서는 층별로 취득한 유속 및 유향 자료를 수심평균하였으며, 이를 시계열 자료로 Fig. 4에 나타내었다. 신두리에서의 조석에 의한 흐름은 밀물 시에 남남서쪽으로 물이 들어오며, 썰물 시에는 반대 방향인 북북동쪽으로 빠져나가는 공간 분포를 보였다. 최대 유속은 물이 들어오는 밀물 시기에 나타났으며, 그 크기는 0.26 m s^{-1} 이다. 최저 유속은 정조를 지나 썰물 시에 나타나며 그 크기는 0.03 m s^{-1} 로 분석되었다. 이와 같은 ADCP 관측자료를 통해 해변류에 의해 부유된 퇴적물들의 흐름 방향을 유추할 수 있다.

3. 연구 방법

3.1 Delft3D를 통한 수치모델링

본 연구에서는 신두리 해안의 표사이동 및 지형변화 특성

Fig. 3. Wave rose for seasonal wave data near the Sinduri beach (a) summer, (b) winter, (c) entire period (March 2017 to February 2018)

Fig. 4. (a) Water level, (b) flow velocity, (c) flow direction of observation data from ADCP. The red lines indicate the high tides.

을 분석하기 위해 네덜란드의 Deltares사에서 개발한 Delft3D 모델을 사용하여 수치모델링을 수행하였다. Delft3D는 조석 및 바람에 의한 흐름, 파랑, 표사이동 및 지형변화 등을 모의할 수 있는 다양한 모듈을 가지고 있으며 각각의 모듈을 양방향 결합하여 연안에서 발생하는 수리학적 및 지형변화 특성을 정밀하게 모의할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 2절에서 분석한 조석과 파랑 분석을 토대로 신두리 해변에서 나타나는 지형변화를 도출하기 위해 Delft3D의 FLOW 모듈(Stelling, 1984; Deltares, 2018a)과 WAVE 모듈(Booij, 1999; Deltares, 2018b)을 양방향 결합하여 사용하였다. Delft3D-FLOW 모델은 비압축성 유체에 천수조건 및 부시네스크 근사를 적용한 나비에스톡스 방정식과 연속방정식을 계산하여 유속 벡터장을 산출해 낼 수 있으며, 이는 주로 수심평균한 2차원 영역에서의 수치모델링에 최적화되어 있다. Delft3D-WAVE 모델은 SWAN 모델을 기반으로 구성되어 있으며, 파랑작용 방정식을 통해 2차원 수평공간에 대한 파랑작용을 에너지 스펙트럼 형태로 표현하고 스펙트럼의 변화를 파랑작용 평형 방정식을 통해 계산한다. 따라서 Delft3D-WAVE 모델을 통해 연안에서 파랑의 형성과 전파 과정에 의한 이류 수송, 굴절 및 천수현상등을 포함한 해빈류를 계산할 수 있다. 그리고 수심평균모형의 한계로 인하여 해빈류 연산에 있어 3차원 수치모델보다는 정확도가 다소 떨어지지만, 오염물질 확산, 모래이동 및 지형변화 등을 모의할 수 있는 다양한 기능을 가지고 있어 공학적 활용성이 높다. 이 두 모델은 계산 시간 절감을 위해 모델 계산 시간 간격마다 계산된 모의 결과를 통신파일(Communication file)을 통해 주고받을 수 있도록 구성되어 있으며(Lesser *et al.*, 2004), 본 연구에서는 주고받는 계산 간격을 10분으로 설정하였다. 결합을 통해 연산된 파랑 변형과 쇄파, 그리고 조석과 해빈류를 통한 연안류는 표사이동을 계산하는 입력 인자로 사용되어 해저 지형변화를 연산

하게 된다. 그리고 이러한 지형변화 결과는 Delft3D-FLOW와 Delft3D-WAVE 모델로 전송되어 조석과 파랑에 의해 변화하는 해저지형을 반영할 수 있다. Fig. 5에서는 전체적인 모델의 연산 과정을 흐름도로 나타내었으며, Delft3D 모델의 지배방정식 및 수치모델 기법 등에 대한 자세한 사항은 Lesser(2004)에서 제시하였으므로 본문에서는 생략하였다.

3.2 파랑과 조석 모델의 격자체계와 경계조건 및 매개변수 설정

본 연구에서 구성한 FLOW와 WAVE 모델 격자는 Fig. 6과 같이 구성하였으며, nesting 기법을 사용하여 각각의 외해 격자에서 계산된 수치모델의 결과를 협역격자의 경계조건으로 사용하였다. FLOW 모델은 총 5개의 격자체계로 구성하였으며, WAVE 모델은 2개의 격자체계로 구성하였다(Fig. 6). 신두리 해안의 연안수리학적 특성 및 지형변화 특성을 모의하기 위한 최종 격자는 Nesthd4(FLOW)와 Nesthd1(WAVE) 격자체계이며, 직교곡선격자체계(curvilinear grid)로 구성하였다. 격자의 해상도는 쇄파대에서 형성되는 다중사주가 채현될 수 있도록 수심에 따라 5-10m의 크기를 가지도록 구성하였다(Figs. 6(c) and 6(d)). 수치모델에 사용된 수심자료는 외해에서 Korbathy 30s(Seo, 2008)을 사용하였으며 연안지역은 국립해양조사원의 수로도서지(KHOA, 2005)와 신두리 연안 수심자료를 사용하였다(해상도: 50 m).

FLOW 모델의 경계조건은 TOPEX Poseidon 7.2 database (Egbert and Erofeeva, 2002)로부터 추출한 13개의 조화상수(M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, MF, MM, M4, MS4, MN4)를 사용하였으며, 조화상수를 통해 광역모델에서 계산된 수위를 각각의 협역모델(Nesthd1-Nesthd4)의 경계조건으로 활용하였다. WAVE 모델에서는 본 연구에서 구축한 광역모델의 격자 경계를 따라 신두리 해변 외해(36° 52' 30" N 126° E)의 ERA5 재분석자료에서 유의파고, 침투주기 및 침

Fig. 5. Flowchart of simulating the bed level change in Delft3D

Fig. 6. Grid system of (a) FLOW model, and (b) WAVE model. The green, magenta, yellow, blue, and red grids in (a) indicate the Overall and Nesthd1 to 4, respectively. The green and blue grid in (b) indicate the Overall and Nesthd1, respectively. (c) Nested FLOW grid (Nesthd4) for coupling, (d) Nested WAVE grid (Nesthd1) for coupling.

두파향을 이용하여 2차원 JONSWAP 스펙트럼(Hasselmann *et al.*, 1973)을 생성하여 경계조건으로 활용하였다. 이때 재분석자료의 분석기간은 2017년 3월에서 2018년 2월로 설정하였다. 본 연구에서 입력값으로 사용한 유의파고, 침두 주기 및 침두파향은 입력감소기법(Input Reduction Scheme)을 이용하여 추정하였으며, 이는 3.4.1절에서 자세히 설명하였다.

3.3 표사이동 및 지형변화 모델 매개변수 설정

Delft3D 모델에서 표사이동 및 지형변화는 Delft3D-FLOW 내에 구성된 Delft3D-SED와 Delft3D-Morphology 모듈을 통해 연산된다. 본 연구의 대상 해역인 신두리 해빈은 모래가 주성분을 이루고 있으므로, 비점착성(Non-cohesive) 표사를 모의하는 데 있어 기본적으로 이용되는 Van Rijn(1993)의 표사이동량 공식을 적용하였다. Van Rijn(1993)은 표사이동을 모의할 때 소류사와 부유사로 나누어 계산하며, 보정계수(Calibration factor: f_{bed} , $f_{sus,w}$, $f_{bed,w}$)를 포함하고 있어 파랑과 조석에 의한 소류사와 부유사의 영향력을 조절할 수 있다(Ruggiero *et al.*, 2009; Briere, 2011). 이때 Morphology 모듈은 표사이동을 가속화할 수 있는 파라미터(Morfac; Morphological time scale factor)를 포함하고 있어 모델의 계산 시간을 단축할 수 있다(Li, 2010). 본 연구에서 보정계수 및 Morfac은 기본 설정인 1.0의 값을 사용하였으며 계절변동에 따른 표사이동을 모의하기 위해 겨울과 여름 각각의

중양 입경(D_{50})은 관측자료를 바탕으로 겨울철에는 $171 \mu\text{m}$ 를, 여름철에는 $168 \mu\text{m}$ 로 입력하여 계절별 수치모의를 수행하였다. 그리고 해빈 양 끝의 기반암으로 이루어진 암반 지역(Yoon and Chun, 2019)에서 나타나는 이상 침식 현상을 완화하기 위해 표사의 두께를 0에서 5 m로 변화시켜주었다. 신두리 해빈은 큰 조차로 인해 썰물 시에 해빈 길이 약 500 m가 공기 중에 드러나는 조간대의 특성이 나타난다. Luijendijk *et al.*(2017)에서는 이러한 조위 변화나 조류, 바람과 파랑에 의한 흐름 간의 상호작용이 나타나 습식(wet)에서 건식(dry)으로의 전환이 나타나는 전이대(transition zone)에서 모델이 수치계산 시 습식격자로부터의 건식격자로 침식의 전도를 고려할 수 있는 매개변수 ThetSD 에 대한 민감도 실험을 수행하였으며, ThetSD 가 1.0일 때를 최적값으로 판단하였다. 따라서 본 연구에서는 조간대의 특성을 모의하기 위해 ThetSD 를 기본값 0.0이 아닌 1.0의 값을 사용하였다. Table 1에서는 FLOW 모델과 WAVE 모델, 그리고 표사이동 및 지형변화를 모의하기 위해 구성한 수치모델의 설정 및 매개변수를 요약하여 나타내었다.

3.4 모델 시나리오 작성

3.4.1 시나리오 1: 대표파랑 선출을 통한 시나리오 작성

신두리에서 계절에 따라 나타나는 표사이동을 모의하기 위해 입력감소기법(Scheel, 2017)을 이용하여 대표파랑을

Table 1. Model parameter settings applied in the Delft3D model

Module	Parameter	Value
Hydrodynamics	Grid size	Overall: 2,573-3,340 m Nesthd1: 875-1,113 m Nesthd2: 266-333 m Nesthd3: 72-69 m Nesthd4: 5-15 m
	Boundary condition	Topex Poseidon 7.2 database
Wave	Grid size	Overall: 53-67 m Nesthd1: 10-95 m
	Wave spectrum	JONSWAP spectrum (Default settings used)
	Boundary condition	ERA5 Reanalysis data
Transport	Formulation	Van Rijn(1993)
	D_{50}	Winter: 171 (μm)
		Summer: 168 (μm)
	Thickness	0-5 m (variable)
Morphology	ThetSD	1.0
	Morfac	1.0
	Calibration factor(f_{bed} , $f_{sus,w}$, $f_{bed,w}$)	1.0

Fig. 7. Representative waves from ERA5 reanalysis data using Input Reduction Tool. The red cross is representative wave of each cell.
(a) Winter wave condition (October 2017 to February 2018), (b) Summer wave condition (March 2017 to September 2017)

선정한 후(Kim *et al.*, 2019), 여름과 겨울 각각의 파랑을 빈도수, 유의파고 그리고 침투파향에 따라 총 16가지의 시나리오를 작성하였다. 3.2 절에서 설명한 ERA5 재분석자료를 입력감소기법을 통해 파고는 0 m에서 여름철에는 2 m, 겨울철에는 3 m까지 8등급, 파향은 0에서 360°까지 12 등급으로 나누어 분석하였으며(Fig. 7), 그 결과 신두리 해빈의 대표파랑은 여름철 60개, 겨울철 52개로 나타났다(Fig. 7). 선정한 대표파랑을 신두리 해안에 수직으로 입사하는 파향(310°)을 기준으로 1) 가장 빈도가 높은 파랑, 2) 해안선에 수직(북서 방향)으로 파랑이 들어오는 경우(310°), 3) 서쪽에서 들어오는 경우(260°), 4) 북동쪽에서 들어오는 경우(10°) 그리고 5) 파랑의 영향을 고려하지 않고 조석만 존재

하는 경우로 나누어 모의하였으며, 2), 3), 4)의 파향 조건에서 파고가 1 m 이상인 경우와 0.5 m 이상이면서 1 m 이하인 경우로 재분류하여 Table 2에 나타내었다. Case 2와 Case 3, 그리고 4는 파고가 0.5에서 1 m 사이의 크기를 가진 파랑이 해안선에 수직, 서측 그리고 북동에서 입사하는 파랑 중에서 빈도가 높은 대표파랑을 선정한 것이며, Case 5와 Case 6, 그리고 7은 동일한 파랑의 입사 조건에서 파고가 1 m 이상인 대표파랑을 의미한다. 하지만 Fig. 3의 파랑장미도를 확인해보면, 1 m 이상이면서 4)의 조건을 만족하는 파랑은 분포하지 않는다. 따라서 1 m의 파고에 근접한 파랑을 유의파고 1m 이상인 경우로 선정하였으며, 이를 Case 7의 여름파랑조건으로 사용하였다. 본 연구에서는 다중사주가

Table 2. Scenario 1: Seasonal classification of wave conditions by frequency, significant wave height, peak wave direction

	Winter profile (Summer profile)					Summer profile (Winter wave condition)				
	Height (m)	Period (sec)	Direction (°)	Percentage (%)	Run time	Height (m)	Period (sec)	Direction (°)	Percentage (%)	Run time
Case 1	0.35	3.88	224	11.53	24 days	0.55	3.68	342	8.33	12 days
Case 2	0.61	3.90	316	3.66	8 days	0.55	4.30	317	6.51	10 days
Case 3	0.60	4.04	257	1.11	2 days	0.55	4.67	253	2.62	4 days
Case 4	0.57	3.46	12	0.58	1 days	0.51	3.38	11	1.64	2 days
Case 5	1.12	4.82	319	1.07	2 days	1.31	5.29	321	7.09	11 days
Case 6	1.09	4.55	252	0.08	12 hours	1.18	4.65	268	0.03	12 hours
Case 7	0.87	4.17	11	0.10	12 hours	1.15	5.08	1	0.03	12 hours
Case 8	No wave condition (only flow)									

존재하는 여름철에는 겨울 파랑조건(2017년 10월-2018년 2월)을 통해 산출된 대표파랑을 수치모델의 시나리오로 사용하였으며, 다중사주가 존재하지 않는 겨울철에는 여름 파랑조건(2017년 3월-2017년 9월)을 통해 모델 시나리오를 구성하였다. Case 별 수치 모의기간은 여름철과 겨울철의 지형자료 관측 시점(여름: 9월 18일, 겨울: 2월 25일)을 시작으로 가정하였으며, 시나리오별 파랑의 가중치에 따라 모의기간을 다르게 하여 수치 모의를 수행하였다(Table 2).

3.4.2 시나리오 2: 조석 크기에 따른 시나리오 작성

신두리 해빈은 5에서 7 m의 큰 조차로 인해 쇄파대 및 조간대가 시기에 따라 크게 변화하는 특징을 가지고 있다. 그러므로 본 연구에서는 조석의 크기에 따라 대조기(겨울: 2017년 2월 28일, 여름: 2017년 9월 22일), 중조기(겨울: 2017년 3월 4일, 여름: 2017년 9월 26일), 소조기(겨울: 2017년 3월 23일, 여름: 2017년 9월 30일)로 분류하여 시나리오를 각각 구성하였다. 수치 모의기간은 하루에 두 번 나타나는 밀물과 썰물의 영향을 모두 고려하기 위해 24시간으로 설정하였으며, 파랑조건은 시나리오 1에서 입력감소기법을 통해 선출된 대표파랑을 여름과 겨울철에 각각 가장 우세한 첨두파향(Fig. 3)을 기준으로 나눈 후, 유의파고가 1 m 이상일 때와 이하일 때를 기준으로 재분류하여 구성하였다(Table 3).

4. 결 과

4.1 FLOW 모델 검증

FLOW 모델 결과를 검증하기 위해 태안조위관측소(36° 54' 47" N, 126° 14' 20" E)의 조위는 FLOW 모델의 Nesthd3 수치모의 결과와 비교하였으며 ADCP 관측자료는 FLOW 모델의 Nesthd4 수치모의 결과와 각각 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 비교 결과, FLOW 모델은 태안조위관측소 조위의 대조기와 소조기의 변동 폭을 잘 모의하였으며, 수심,

Table 3. Scenario 2: Classification of wave conditions by significant wave height and peak wave direction

	Height (m)	Period (sec)	Direction (°)
Run 1	0.35	3.88	224
Run 2	0.61	3.90	316
Run 3	1.12	4.82	319
Run 4	1.09	4.55	252

유속 및 유향 모두 ADCP 관측 값과 매우 유사한 패턴을 가지는 것을 확인할 수 있다. 모델이 썰물 시보다 밀물 시에 더 강한 유속과 밀물 시 남남서방향 및 썰물 시 북북동방향의 유향을 잘 재현하였다. 관측과 모델 결과 비교를 통해 신두리 해빈에서는 파랑에 의한 해빈류보다 조석에 의한 흐름이 우세하며, 표사이동 방향을 결정하는 주요 인자임을 추정할 수 있다.

4.2 시나리오 1: 대표파랑 선출을 통한 시나리오 결과

다중사주의 형성과 소멸이 가장 뚜렷하게 나타나는 관측 선 S3을 기준으로 다중사주가 존재하지 않는 지형조건에서의 표사이동 및 지형변화를 Fig. 9에 나타내었다. 가장 발생 빈도가 높은 파랑조건인 Case 1과 조석만 존재하는 경우인 Case 8은 지형변화 및 표사이동이 거의 나타나지 않았다. 이는 0.5 m 이하의 파랑이 발생한 환경하에서는 표사이동 및 지형변화가 제한적이며, 조석우세해빈에서도 표사를 이동시키는 주요 인자는 파랑에너지임을 보여준다. 1 m 이하의 저파랑조건인 Case 2(316°), Case 3(257°) 및 Case 4(12°)의 결과를 분석해보면, 수직으로 파랑이 입사하는 조건인 Case 2를 제외하고는 표사이동 및 지형변화가 미비하게 나타났다. 또한, 1 m 이상의 고파랑조건인 Case 5(319°), Case 6(252°) 및 Case 7(11°)의 모의 결과에서도 수직으로 파랑이 입사하는 경우에 표사이동 및 지형변화가 가장 활발하게 발생하였으며, 고파랑과 저파랑조건(Case 2, Case 5) 모두에

Fig. 8. (Left) Water level, flow velocity and flow direction from observation and Delft3D-FLOW model. The observation water level data in (a) is obtained from Taeon tide station, the other observation data in (b-d) are from ADCP. (Right) Location of ADCP and Taeon tide station.

서 다중사주가 형성되는 경향을 보였다.

다중사주가 존재하는 지형조건의 모의 결과(Fig. 10)를 분석해보면, 조석만 존재하는 경우인 Case 8은 표사이동이 거의 나타나지 않았다. 고파랑이 해안선에 수직으로 입사한 Case 5의 수치 모의결과에서는 다중사주를 연안방향으로 이동시켰으며 해빈에서는 과도한 퇴적이 모의되었다. 본 수치모의 결과는 지형관측결과 나타난 다중 사주의 소멸과는 상반된 결과로 본 연구에서 사용한 Delft3D 모델의 한계로 보여진다. Delft3D 2차원 수심평균 모델을 적용하였을 때 해저면에서 나타나는 해빈류를 재현하기에는 한계가 있으며 이는 연안방향의 횡단표사가 우세하게 나타나는 결과를 보였다. 파랑이 해안선에 수직으로 입사하는 Case 1과 Case 2의 모의 결과는 다중사주의 마루(crest)의 표사가 연안방향으로 이동하는 것처럼 나타났지만, 다중사주가 소멸되는 것이 아닌 기존에 형성되어 있는 마루의 전면부에 퇴적되는 경향을 보였다. 해안에 사선으로 입사하면서 1 m 이하의 저파랑조건에 해당하는 Case 3과 Case 4는 파랑의 굴절현상으로 인해 해빈에 영향을 미치는 파랑에너지가 감소하여 표사이동 및 지형변화가 거의 발생하지 않았다. 또한, 해안에 사선으로 입사하며 1 m 이상의 고파랑조건인 Case 6과 Case 7은 표사이동이 저파랑조건(Case 3, Case 4)에 비해서는 크게 나타났지만, 짧은 수치 모의 기간으로 인해 지형변화는 제한적이었다.

본 연구에서는 신두리 해빈의 지형관측결과에서 나타난 다중사주의 형성 및 소멸을 모의하기 위해 겨울 및 여름철의 파랑조건을 이용하여 표사이동 및 지형변화를 모의하였다. 먼저, 다중사주가 형성되지 않은 겨울철 지형관측결과를 입력조건으로 하여 수치모델링을 수행한 결과 육지방향의 횡단표사(cross-shore sediment transport)가 우세하였다. 이러한 육지 방향의 표사이동은 다중사주가 형성되는 지점에서 표사가 퇴적되는 경향을 보였지만, 그 크기는 재현하

지 못하였다. 다중사주가 형성된 여름철 지형관측을 입력 조건으로 하여 모의한 결과 역시 파랑에너지가 큰 경우에 횡단 방향으로의 표사이동이 우세하였지만, 다중사주의 소멸을 재현하지 못하였다. 이는 본 연구에서 사용한 수치모델인 Delft3D-FLOW는 수심평균된 천수방정식을 기본으로 하여 흐름벡터장을 산출해내며, 이를 기반으로 하는 Delft3D 모델은 해저면 인근에서 발생하는 해빈류를 정밀하게 모의하기에는 근본적인 한계가 존재한다. 이로 인해, 신두리 해빈에서 나타나는 다중사주의 형성 및 소멸을 재현하기에는 한계가 있으며 지속적인 연구가 필요하다. 또한, 본 논문의 서론부에 기재한 바와 같이 신두리 해빈은 겨울철 강한 북서풍에 의한 비사 활동이 활발한 지역이지만 Delft3D에서는 이를 고려하지 못한 결과로 추정된다.

신두리 해빈에서 연안표사(longshore sediment transport) 특성을 분석해보면 일반적인 파랑우세 해빈과는 다른 특성을 보인다. 일반적인 파랑우세해빈에서의 표사이동은 파향에 따라서 크게 좌우되며(Quick, 1983), 해안에 파랑이 수직으로 들어올 경우, 해빈류에 의해 연안표사보다 횡단표사가 우세하게 나타나고, 해안에 사선으로 파랑이 들어올 경우에는 횡단표사보다 연안표사가 우세하다. 하지만 수치모의 결과(Fig. 9, Fig. 10)에서는 사선으로 파랑이 해안에 들어오는 조건인 Case 3, Case 4, Case 6 및 Case 7보다 해안선에 수직으로 들어오는 조건인 Case 2와 Case 5에서 연안표사가 가장 크게 발생하였으며, 파랑에너지가 클수록 연안표사가 크게 발생하였다. 또한, 조석만 존재하는 경우(Case 8)에는 연안표사와 횡단표사가 모두 나타나지 않았다. 이러한 수치 모의 결과는 신두리와 같은 조석과 파랑이 모두 우세한 해빈에서의 표사이동이 일반적인 파랑우세해빈과는 다르게 파랑이 쇄파되면서 부유된 표사가 해빈류가 아닌 조차에 의해 발생한 조석류를 따라 이동하는 특징을 가지고 있으며, 신두리와 비슷한 환경을 가지는 해빈에서

Fig. 9. Bed level change, longshore and cross-shore sediment transport during the winter at observation line S3 under scenario 1. Each figure (a-h) shows the results of each experiment (Case 1-8). The magenta circles in the top panel of each figure indicate the positions of sand bar.

Fig. 10. Same as Fig. 9 but during the summer under scenario 1.

Fig. 11. Same as Fig. 9 but during the winter (a-c) and the summer (d-f) under scenario 2 (Result of the Run 3). (a, d) are spring tide, (b, e) are mean tide, and (c, f) are neap tide.

는 조석과 파랑의 복합적인 작용을 해석하는 것이 중요함을 보여준다.

4.3 시나리오 2: 조석 크기에 따른 시나리오 결과

본 연구에서는 조석의 크기에 따른 표사이동 및 지형변화를 분석하기 위해 Table 3의 파랑조건에서 조석의 크기를 대조기(겨울: 2017년 2월 28일, 여름: 2017년 9월 22일), 중조기(겨울: 2017년 3월 4일, 여름: 2017년 9월 26일) 및 소조기(겨울: 2017년 3월 23일, 여름: 2017년 9월 30일)로 설정하여 수치모델링을 수행하였다. 조석의 크기에 따라 여름과 겨울의 지형변화를 모의한 결과, 계절에 따른 변동성은 나타나지 않아 여름과 겨울의 결과를 종합적으로 분석하였다. 출현 빈도는 높지만, 파랑에너지가 작은 Run 1에서는 표사이동 및 지형변화가 제한적이었으며, 시나리오 1의 모의 결과와 같이 고파랑이 해안선에 수직으로 입사하는 Run 3에서 표사이동 및 지형변화가 가장 많이 발생하였다. 그러므로 표사이동 및 지형변화가 가장 활발한 Run 3에서 조석의 크기(대조기, 중조기, 소조기)에 따라 변화하는 표사이동 및 지형변화를 Fig. 11에 나타내었으며, 이를 토대로 시나리오 2의 결과를 분석하였다.

서해안과 같이 조차가 큰 해역에서는 해수면의 반복적인 상승 및 하강 현상에 따라 쇄파대(beaker zone) 이동이 발생하면서 표사이동 및 지형변화에 직접적인 영향을 준다. 이를 바탕으로 신두리 해빈의 표사이동 및 지형변화 수치 모의 결과를 분석해보면, 대조기에는 해수면의 수위 상승 및 하강 폭이 크므로 넓은 범위의 해빈에서 표사이동 및 지형변화가 나타나며, 중조기에서도 그 범위는 다소 감소하였

지만 유사한 패턴을 보인다. 하지만 소조기(Fig. 11(c), 11(f))에서는 특정 수심(0.5 m에서 -1 m 사이)에서 횡단표사 및 연안표사가 우세하였으며, 이는 해수면의 변화 폭이 제한적인 소조기에서는 특정 지점에서 지속적인 쇄파로 인해 퇴적물들이 부유되고, 부유된 퇴적물은 조류를 통해 이동됨을 보여준다. 따라서 상대적으로 조류가 약한 소조기에 높은 파고를 가지는 파랑이 해안에 들어오면, 파랑에 의해 많은 양의 퇴적물이 부유되어 연안의 지형변화에 미치는 영향이 크며, 이는 Lee(2004)의 관측결과와도 일치한다.

5. 결론

본 연구에서는 대조차해안에서의 계절에 따라 다르게 분포하는 다중사주의 형성과정을 파악하기 위해 현장관측 및 수치모델링을 수행하였다. 먼저 ADCP와 VRS-GPS를 사용하여 수위, 유속, 유향 그리고 지형자료를 취득하였으며, 취득한 관측자료는 수치모델의 검증 및 입력값으로 활용하였다. 그 후, 연구지역인 신두리 해빈에서의 표사이동 및 지형변화를 모의하기 위해 Delft3D 모델의 FLOW 모델과 WAVE 모델을 양방향 결합하여 조석과 파랑의 복합적인 작용을 수치모의하였다. 이를 위해 파랑 모의 시나리오는 신두리 해빈과 인접한 ERA5 재분석자료의 파랑 자료를 활용하였으며, 입력감소기법을 통해 계절 및 시기별 대표파랑을 산출하였다. 그 후, 선출된 대표파랑을 파랑의 출현 확률인 빈도수와 유의파고, 첨두파향을 기준으로 나누어 수치모델의 파랑 시나리오를 구성하였다. 그리고 조석의 크기에 따른 표사이동 및 지형변화의 민감도를 분석하기 위해 수치

모델을 대조기, 중조기 및 소조기로 구분하여 각각의 파랑 시나리오에 따른 표사이동 및 지형변화를 수치모의한 후, 그 결과를 분석하였다.

다중사주가 형성되지 않은 겨울철 지형자료를 이용하여 표사이동 및 지형변화를 수치모의한 결과, 파고가 수직으로 입사하는 파랑 조건하에서 표사이동 및 지형변화가 가장 활발하게 나타났다. 그리고 조석과 파랑의 복합적인 작용으로 인하여 연안방향의 횡단표사가 우세하였으며, 이로 인하여 여름철 다중사주가 형성되는 지점에서 표사가 퇴적되는 경향을 보였지만, 그 크기는 재현하지 못하였다. 다중사주가 형성된 여름철 지형관측자료를 입력조건으로 하여 모의한 결과에서도 해안에 들어오는 파랑에너지가 클 경우 횡단표사가 우세하였지만, 다중사주의 소멸은 재현하지 못하였다. 이는 본 연구에서 사용한 모델이 수심평균 2차원 모델로 해저면 인근에서 외해 방향으로 강한 흐름을 가지는 해빈류를 재현하지 못하며, 겨울철 강한 북서풍으로 인한 비사활동을 모델 내에서 고려하지 못한 것이 주요 원인으로 분석된다. 현재 기술력으로는 연안에서 발생하는 조석과 파랑, 그리고 바람에 의한 표사이동은 재현하기 쉽지 않으므로 우리나라 서해안과 같은 지역에서 표사이동과 관련된 수치모델을 적용하기 위한 지속적인 연구가 필요하다. 또한, 연안표사 분석을 통해 신두리 해빈에서 나타나는 표사이동은 일반적인 파랑우세 해빈과는 달리 파랑의 방향보다는 조류의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 이는 파랑이 쇄파되면서 부유된 표사가 해빈류가 아닌 조석에 의해 발생한 조류를 따라 이동하는 특징에서 기인하며, 우리나라 서해안과 같은 조석이 우세한 해빈에서는 조석과 파랑의 복합적인 작용을 이해하는 것이 중요함을 보여준다. 다음으로 조석의 크기에 따른 표사이동 및 지형변화를 수치모의한 결과, 조석이 큰 대조기 시기에는 수위 상승의 폭이 커져 넓은 범위의 해빈에서 표사이동 및 지형변화가 나타나지만, 그 크기는 제한적이었다. 상대적으로 조석이 작은 소조기에는 특정 수심에서 표사이동 및 지형변화가 뚜렷하게 나타났으며, 이는 쇄파지점이 일정 지점에서 지속적으로 발생하여 부유사 및 표사이동이 발생함을 보여준다. 결론적으로, 본 연구에서 수행한 현장관측 및 수치모델의 결과를 종합해 보면, 신두리 해빈과 같은 대조차해안에서는 2차원 수심평균 모델인 Delft3D 모델을 통해 다중사주의 형성과정을 재현하기에는 한계가 있는 것으로 나타났다. 따라서, 향후 바람에 의한 표사이동을 모의하기 위한 수치모델 기법의 개발과 적용, 그리고 해빈류의 2차원적인 공간모의가 가능한 phase-resolving 모델과의 결합 등과 같은 지속적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2020년 해양수산부의 재원으로 한국해양과학

기술진흥원(중합해양과학기지 구축 및 활용 연구)과 한국연구재단(NRF-2019R1C1C1003160)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

References

- Booij, N., Ris, R. C. and Holthuijsen, L. H. (1999). "A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation." *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol. 104, No. C4, pp. 7649-7666.
- Briere, C., Giardino, A. and van der Werf, J. (2011). "Morphological modeling of bar dynamics with DELFT3d: the quest for optimal free parameter settings using an automatic calibration technique." *Coastal Engineering Proceedings: sediment*, Vol. 1, No. 32, pp. 1-12.
- Davies, J. L. (1964). "A morphogenic approach to world shorelines." *Zeitschrift fur Geomorphologie*, Vol. 8, No. 5, pp. 127-142.
- Deltares (2018a). "Delft3D-FLOW User Manual: Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments." Deltares, Netherlands.
- Deltares (2018b). "Delft3D-WAVE User Manual: Simulation of short-crested waves with SWAN." Deltares, Netherlands.
- Do, K., Kobayashi, N., Suh, K. D. and Jin, J. Y. (2016). "Wave transformation and sand transport on a macrotidal pocket beach." *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 142, No. 1, 04015009p.
- Do, K. and Kim, J. (2018). "A study on the predictability of eastern winter storm waves using operational wind forecasts of KMA." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 30, No. 5, pp. 223-233 (in Korean with English abstract).
- Do, K. and Yoo, J. (2020). "Morphological response to storms in an embayed beach having limited sediment thickness." *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 234, 106636p.
- Egbert, G. D. and Erofeeva, S. Y. (2002). "Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 19, No. 2, pp. 183-204.
- Flemming, B. W. (2012). "Siliciclastic back-barrier tidal flats." In: R. A. Davis Jr, (ed.). "Principles of tidal sedimentology." Springer, Dordrecht, pp. 231-267.
- Hasselmann, K., Barnett, T. P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D. E., Enke, J., Ewing, J. A., Gienapp, H., Hasselmann, D. E., Kruseman, P., Meerburg, A., Müller, P., Olbers, D. J., Richter, K., Sell, W. and Walden, H. (1973). "Measurements of wind wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)." Report, UDC 551.446.31, Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg, pp. 8-12.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Horányi, A., Sabater, J. M.,

- Nicolas, J., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C. and Dee, D. (2019). "Global reanalysis: goodbye ERA-Interim, hello ERA5." *ECMWF Newsletter*, Vol. 159, pp. 17-24.
- Kennedy, M., Kim, J. W., Choi, J. H., Choi, K. H. and Byun, J. M. (2004). "The development and luminescence chronology of a coastal dune from the Shindu dunefield, T'aeon peninsula." *Journal of the Korean Geographical Society*, Vol. 39, No. 2, pp. 269-282.
- KHOA (2005). "Nautical Charts and Publications." Korea Hydrographic and Oceanographic Agency, Incheon, Korea, 52p (in Korean).
- Kim, G. S., Ryu, H. S. and Kim, S. H. (2019). "Evaluation of coastal sediment budget on east coast Maeongbang beach by wave changes." *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 33, No. 6, pp. 564-572 (in Korean with English abstract).
- Kim, G. S., Ryu, H. S., Kim, M. J. and Kim, S. C. (2020). "Evaluation of Coastal Sediment budget on Bongpo Beach by Structure installation." *Journal of Coastal Disaster Prevention*, Vol. 7, No. 4, pp. 251-258 (in Korean with English abstract).
- Kobayashi, N. (2013). "Cross-shore numerical model CSHORE 2013 for sand beaches and coastal structures." Report. CACR-13-01, Center for Applied Coastal Research, Univ. of Delaware, Newark, DE.
- Komar, P. D. (1976). "Beach Processes and Sedimentation." PrenticeHall, Englewood Cliffs, N.J., New York, 429p.
- Lee, H. J., Jo, H. R., Chu, Y. S. and Bahk, K. S. (2004). "Sediment transport on macrotidal flats in Garolim Bay, west coast of Korea: Significance of wind waves and asymmetry of tidal currents." *Continental Shelf Research*, Vol. 24, No. 7-8, pp. 821-832.
- Lesser, G. R., Roelvink, J. A., van Kester, J. A. T. M. and Stelling, G. S. (2004). "Development and validation of a three-dimensional morphological model." *Coastal Engineering*, Vol. 51, No. 8-9, pp. 883-915.
- Li, L. (2010). "A Fundamental Study of the Morphological Acceleration Factor." Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, Zuid-Holland, Netherlands, 102p.
- Luijendijk, A. P., Ranasinghe, R., de Schipper, M. A., Huisman, B. A., Swinkels, C. M., Walstra, D. J. R. and Stive, M. J. F. (2017). "The initial morphological response of the Sand Engine: A process-based modelling study." *Coastal Engineering*, Vol. 119, pp. 1-14.
- Park, W. K., Moon, Y. H., Chang, S. Y., Jeong, W. M., Chae, J. W., Ryu, K. H., Chang, Y. S. and Jin, J. Y. (2018). "Nonlinear transformation of storm waves and impacts on nearshore mound in Haeundae beach, Korea." *Journal of Coastal Research*, Vol. 85, pp. 1131-1135.
- Plant, N. G., Holman, R. A., Freilich, M. H. and Birkemeier, W. A. (1999). "A simple model for interannual sandbar behavior." *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol. 104, No. C7, pp. 15755-15776.
- Quick, M. C. (1983). "Sediment transport by waves and currents." *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 10, No. 1, pp. 142-149.
- Ruggiero, P., Walstra, D. J. R., Gelfenbaum, G. and van Ormondt, M. (2009). "Seasonal-scale nearshore morphological evolution: Field observations and numerical modeling." *Coastal Engineering*, Vol. 56, No. 11-12, pp. 1153-1172.
- Scheel, F. (2017). "Input reduction tool - Description and user manual." Report. 1221439-000-HYE-0004, Deltares.
- Seo, S. N. (2008). "Digital 30sec gridded bathymetric data of Korea marginal seas-KorBathy30s." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 20, No. 1, pp. 110-120 (in Korean with English abstract).
- Shim, K. T., Kim, K. H., Kim, H. D. and Kwak, K. S. (2020). "Analysis on sediment transport system in the east coast of Korea." *Journal of Coastal Research*, Special Issue, No. 95, pp. 643-648.
- Short, A. D. (1991). "Macro-meso tidal beach morphodynamics: an overview." *Journal of Coastal Research*, Vol. 7, No. 2, pp. 417-436.
- Son, D., Yoo, J. and Shin, H. (2018). "A Study of Applicability of ERA5 dataset for Nearshore Wave Simulation." *Korea Society of Coastal Disaster Prevention*, Vol. 5, No. 2, pp. 81-92 (in Korean with English abstract).
- Son, S., Kim, J., Yoon, H. D., Jung, T. H., Do, K. and Shin, S. (2017). "An Observational and numerical study of storm-induced morphologic changes at sanpo beach, Korea." *Journal of Coastal Research*, Special Issue, No. 79, pp. 334-338.
- Stelling, G. S. (1984). "On the construction of computational methods for shallow water flow problems." Ph. D. dissertation, Delft University of Technology, Zuid-Holland, Netherlands, 226p.
- Van Rijn, L. C. (1993). "Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas." Aqua Publications, Amsterdam, 715p.
- Vidal-Ruiz, J. A. and Ruiz de Alegria-Arzaburu, A. (2019). "Variability of sandbar morphometrics over three seasonal cycles on a single-barred beach." *Geomorphology*, Vol. 333, pp. 61-72.
- Yoon, H. and Chun, S. (2019). "Rapid shift of surface sedimentary facies and its depositional mechanism in the macrotidal wave-dominated Sinduri Bay, west coast of Korea." *Journal of the Geological Society of Korea*, Vol. 55, No. 3, pp. 257-276.