혼합입경을 고려한 정선변화 예측의 고도화

Advancements in Shoreline Variation Prediction Considering Mixed Grain Sizes

김연중 · 우정운 · 윤종성
인제대학교 토목도시공학부

Yeon-Joong Kim · Jung-Woon Woo · Jong-Sung Yoon

Department of Civil and Urban Engineering, Inje University, Gimhae, Gyeongsangnam-do, South Korea

Abstract

Shoreline variations occurring in sea areas are caused by the combined effect of sediment transport due to the inflow and outflow of sediment caused by waves at the left and right boundaries of the sea area and the depth of movement limit. Although many studies have been conducted to understand the characteristics of sediment transport, assessment on valid sediment run-off supplied to the sea area from mountains and rivers in sea areas with river inflow and research on the sediment budget analysis considering the topographical characteristics of South Korean sea areas are insufficient. Therefore, the establishing mitigation measures considering comprehensive viewpoints is necessary to systematically respond to various natural and anthropogenic causes. Moreover, further research related to the setting and analysis of major parameters must be conducted for improving the prediction performance as well as the evaluation system for analyzing the sediment budget, which is a quantitative evaluation index for coastline management optimized for domestic waters. This study aimed to establish a comprehensive analysis system for analyzing the sediment run-off generated in domestic sea areas and develop a shoreline model (In-MPaS model) considering mixed grain sizes for advancing sediment run-off analysis. With the observation data, the parameters necessary for the numerical analysis were set, the sensitivity of the In-MPaS model according to the particle size distribution of the sediment constituting the sea area was evaluated, and the major parameters for improving the prediction performance were analyzed. Consequently, it was found that the prediction performance of the In-MPaS model improved in terms of valid sediment run-off as well as the sediments constituting the sea area (which was assumed to have mixed grain sizes rather than a single grain size(D_{50})). In particular, considering the topographical properties that regulate sediment transport due to the island (Deokbong Mountain) at the foreside of the river mouth bar, the shoreline prediction performance was significantly improved with the application of groins, which exhibit structurally similar performance.

Keywords : Shoreline, Sediment budget, Valid sediment run-off, Online model

1. 서론

연안 및 하천으로부터 공급되는 유사(유효유사량) 및 묘사의 이동 불균형으로 인해 침식 및 퇴적이 간헐적으로 발생하여 특히 우리나라 동해 지역에서는 심각한 연안침식이 가속화되고 있다. 연안침식의 원인에 따라 크게 장시간에 걸쳐 낮은 강도로 침식이 발생하는 자연적 연안침식과 강성공법과 같이 구조물의 설치 및 인위적인 개발과 행위로 인해 급작스럽게 발생하는 인위적 연안침식으로 구분할 수 있다. 세계적으로 해양국가 대부분은 산업화·도시화에 따른 지표 피복, 하천 정비, 댐·보 건설 등에 의한 육상으로 부터의 토사공급 감소, 항만·호안 등 해안구조물 증가에

따른 연안표사계 교란, 연안모래 채취 등 다양한 인위적 원인, 그리고 지표면 침식윤회, 해수면 상승 및 폭풍·해일 내습빈도·강도 증가를 유발하는 기후변화 등 자연적 원인에 의한 해안침식을 저감하기 위한 연구가 진행되고 있다.

파랑, 폭풍해일, 조석, 해류, 하천 배출, 해수면 상승 등과 같은 근해의 유체역학 과정은 단기(예 태풍 및 계절별 변동) 해안 형태학적 변화를 발생시키는 외력으로 작용한다(Splinter et al., 2014; Yates et al., 2009; Hansen and Barnard, 2010; Coco et al., 2014). Cho (2021)의 연구에서는 침퇴적으로 인해 변화를 겪는 해저지형과 내습하는 파랑간의 상호작용에 관한 연구를 진행하였다. 한편, 자연적(유효유사량) 및 인위적인 토사공급(양빈), 해수면 변화, 토지 이용 및 기후변화와

같은 원인으로는 장기적인(예; 10년 이상) 해안선 변화가 발생한다(Ashton and Murray, 2006; Warrick and Mertes, 2009; Sallenger et al., 2012). 이처럼 작용하는 다양한 원인에 따라 해안선의 전진과 후퇴가 간헐적으로 변화하며 해안선 변화 예측 성능과 메커니즘 분석의 효과를 향상하기 위해서는 자연적 변동성을 나타내는 광범위한 표사의 이동 환경에서 가능한 가장 지배적인 인자를 파악하기 위한 모니터링 분석이 중요하다(Splinter et al., 2013; Ibaceta et al., 2020; Toimil et al., 2020; Jun et al., 2021).

해빈(beach)을 유지하고 있는 해역에서 발생하는 토사의 이동은 해빈의 좌우측 경계 및 파랑작용에 의해 이동한계 수심 경계에서의 유입과 유출 등 해역내에서 발생하는 토사의 이동에 따라 정선이 변화한다. 하지만 하천이 해역으로 유입하는 해역의 경우는 산지와 하천을 통해 해역으로 공급되는 유효유사량에 따라 정선의 변화가 크게 발생하며 이처럼 해역의 지형적 특징(Fig. 1)을 고려한 표사수지 분석이 필요하다. 해역내에서 발생하는 토사의 이동과 관련된 연구 성과를 통해 연안침식 저감을 위한 대책이 수립되고 있다. 우선 하천에서 해역으로 유입되는 토사가 유입되는 과정에 대한 연구(Milliman and Meade, 1983)가 진행되었고, 단기적인 이벤트성 파랑에 의해 발생하는 정선변화 예측을 위해 Xbeach 모델(Jin et al., 2020)을 이용하였으며, 중장기적인 정선변화 예측을 위해 Delft3D 모델을 이용한 파랑변화에 따른 연안표사 수지 분석(Kim et al., 2019)과 표사이동 관련 매개변수의 민감도 분석(Yang and Son, 2019)을 수행하였다. 기후변화에 따른 해수면 상승 시나리오에 따른 장기적인 정선변화 예측(Vitousek et al., 2017) 및 해빈과정의

해안선 변화에 관한 실험적 연구(Son and Lee, 2000), 수치 모델을 통한 해안선 변형 예측(Park et al., 1993) 및 고파랑에 의한 해안 침식폭 예측 모델인 HaeSaBeenN을 통한 침식한계선(Erosion control line) 설정(Park et al., 2019)과 등 토사이동에 따른 해안선 변화예측에 관한 연구를 수행하였다. 한편 쇄파대내 파의 소상영역(swash zone)과 쇄파대 밖에서는 파랑에 의한 유체운동에 의하여 소류사(bed load) 형태로 퇴적물이 수송된다. 기후변화에 따른 해수면 상승과 함께 극한폭풍, 슈퍼태풍, 이상너울 등과 같은 영향으로 연안에 집중되는 재해를 저감하고 관리하기 위해서는 해빈표사의 이동이 극심하게 발생하는 포말대에서의 수리현상을 거동을 명확히 이해하기 위한 연구의 필요성이 강조되고 있다(Lee and Hur, 2019; Lee et al., 2019). 종합적인 관점으로 해안선 변화를 이해하고 예측하는 것은 해안 관리자와 정책 입안자에게 매우 중요한 사항이다(Stive et al., 2002).

우리나라는 연안침식 저감을 위해 2000년대 초반부터 현재까지 장기적인 모니터링 조사 및 수치해석의 개발 및 적용 등 다양한 연구가 현재도 진행되고 있다. 수많은 연구 성과에 따라 적용되는 각각의 분야 및 목적에 따라 유의미한 성과가 나타나고 있지만, 여전히 우리나라 연안은 연안침식의 가속화에 따른 해안 관리의 필요성이 강조되고 있다. 지금까지의 수많은 연구 성과를 바탕으로 다양한 자연적 및 인위적 원인에 유기적으로 대응할 수 있는 종합적인 시각에서의 저감 대책 수립이 요구되며, 특히 우리나라 해역에 최적화된 해안선 관리를 위한 정량적인 평가 지표인 표사수지 분석을 위한 평가 체계와 예측성능 향상을 위한 주요한 파라미터 설정 및 분석에 관련된 연구가 필요하다.

Fig. 1. Comprehensive sediment budget system based on characteristics of the sea area

본 연구에서는 우리나라 해역에서 발생하는 표사수지 분석을 위한 종합적인 분석체계를 수립하고 이에 따른 표사수지 분석의 고도화를 위한 혼합입경을 고려한 정선모델(In-MPaS model)의 개발을 목적으로 한다. 관측자료를 활용하여 수치 해석에 필요한 매개변수를 설정하며 해역을 구성하는 토사의 입도분포에 따른 정선 모델의 민감도 평가와 예측성능 향상을 위한 주요한 파라미터의 분석을 수행한다. 또한 연구지역의 지형적 특성을 고려하여 하천으로부터 공급되는 유효유사량을 평가하였다. 그 결과, 정선변화 모델의 예측성능은 유효유사량의 고려와 함께 해안을 구성하는 토사 단일입경(D_{50})이 아닌 혼합입경의 형태로 고려할 때 예측성능이 향상되었으며, 특히 하구사주 전면에 있는 섬(덕봉산)에 의해 표사의 이동이 제어되는 지형적 특징을 고려하기 위해 구조적적의 유사한 성능을 갖는 돌제(groin)를 적용할 경우, 정선 변화의 예측성능이 크게 향상되었다.

2. 종합적인 표사수지 체계

하천은 유역 공간에서 발생한 지표수와 함께 다양한 토사(서로다른 입경의 토사) 등 수많은 물질을 산지영역으로부터 하구 및 해역으로 수송하는 기능을 담당하며, 해안은 하천으로부터 유입되는 토사와 해역 환경에 따른 파랑작용을 받아 해역내에서 이동하는 표사에 의해 정선이 변화한다. 해안으로 공급되는 토사는 유역내 산지지역에서 하천을 통해 해안(하구)으로 이동하는 연속적인 흐름에 의해 발생하며 특히 하천으로 유입되는 토사의 대부분은 집중강우 및 대규모 토사붕괴(토석류 발달) 등에 의해 침식이 발생한 토사가 하천을 통해 해역으로 유입한다. 또한 하구사주가 존재하는 해역에서는 홍수시 하천의 유량에 따라 폐색되어 있던 사주가 붕괴되어 갑작스런 토사 유출이 발생하고 다시 평상시의 파랑작용으로 붕괴된 사주가 점차 회복되는 현상이 반복된다. 이처럼 흐름 연속장「상류(산지)↔중류(하천)↔하류(해안)」 내에서 어떤 인위적·자연적인 원인이 발생하면 그에 따른 각각의 영역에서 환경적 변화가 발생하지만, 지금까지의 토사관리는 산지, 댐, 하천, 해안 등 각각의 영역에서 각각의 대책 방안에 의한 다양한 대책이 수립 및 관리되어 왔으며 그 결과 각각의 영역에서의 재해저감 및 토사관리를 위한 여러 대책의 효과가 가시적으로 표출되고 있으나 여전히 해안에서는 연안침식 등 여러 문제점이 발생하고 있다. 따라서 연안침식 저감을 위한 대책수립을 위해서는 우선 발생하는 토사의 유입과 유출의 관계를 정량적으로 나타내는 표사수지 분석에 대한 정확한 산정이 매우 중요하다. 하지만 유역(산지영역+하도영역)으로부터 공급되는 유효유사량의 경년적인 평가는 매우 어려워 주로 장기적인 관측 및 현장 조사에 의한 경험적인 관계식이 주로 사용되며 최근에는 GIS를 이용한 수치해석 모델에 의한 토사량이 평가되고 있다.

하구사주가 발달된 지역에서의 면밀한 유효유사량의 평가를 위해서는 홍수파에 의해 사주의 붕괴로 인한 갑작스런 토사유출과 평상파에 의해 다시 회복되는 토사량의 평가도 중요하다. 이처럼 해역의 환경에 따른 표사수지 분석방법이 상이하며 특히 하천으로부터 직접적인 토사의 공급과 하구사주가 존재하는 해역에서는 종합적인 표사수지 분석(Fig. 2)이 요구된다.

2.1 연구지역

본 연구의 검토대상지역인 강원도 맹방해변은 해양수산부 연안침식 현황 자료(Ministry of Oceans and Fisheries, 2019)에서 2016년부터 “심각” 판정을 받은 해변으로 연안침식 저감을 위한 대책이 요구되는 지역 중 한 곳이다. 강원도 삼척시에 위치한 맹방해변은 북으로부터 평균 약 45° 기울어진 준(quasi)일자형 개방 해안으로 북쪽으로는 맹방해변과 남쪽으로는 덕산해변이 있으며 두 해변을 경계로 마읍천으로부터 맹방해변 방향으로 지배적인 토사가 공급되고 하구사주가 형성되어 있는 지리적 특징이 있다(Fig. 3). 마읍천의 유역면적 143.83km^2 , 유로연장 30.98km 으로 유역을 형성하고 있고 유역의 평균고도와 평균경사는 각각 EL. 414.21m, 28.14° 이다. 특히, 2020년 9월 우리나라에 상륙한 태풍 9호 마이삭에 의해 집중호우가 발생하였으며 이때 덕산해변으로 월류하는 현상이 CCTV를 통해 확인되었다. 마읍천으로부터 공급되는 토사(유효유사량)는 맹방해변 방향으로 흐름이 발생하여 덕산해변으로의 직접적인 토사공급은 차단된 지형적 특징이 있지만, Kim et al.(2020)의 연구 결과에서는 홍수시 마읍천의 하천유량이 약 $600\text{m}^3/\text{sec}$ 을 초과하면 덕산해변으로의 월류가 발생하고 하천유량이 약 $1,050\text{m}^3/\text{sec}$ 을 초과하면 맹방해변과 덕봉산 사이에 발달된 하구사주가 붕괴되어 갑작스런 토사유출이 발생하는 것으로 나타났다. 태풍 마이삭(2020년 9호 태풍)에 의해 발생한 맹방해변 하구사주 주변의 급격한 정선변화의 특징을 Fig. 4에 나타내었다.

2.2 유효유사량

하천수계 내의 어느 특정지점의 토사유출량은 그 지점을 통과하는 총토사량으로 정의할 수 있다. 실제 유역내에서 지표수에 의해 이동이 발생한 토사량을 정확히 파악하는 것은 매우 어렵고 신뢰할 수 있는 데이터를 수집하는 것도 거의 불가능하다. 따라서 비교적 관측이 용이한 수위-유량 사이의 관계식을 산정하고 여기에 토사의 비율(농도)를 고려해 유량-유사량 곡선으로 이동 토사량을 평가하는 것이 일반적이며 현재는 다양한 수치해석 모델을 적용하여 유효유사량을 평가하고 있다. 아래에 유효유사량의 평가 방법을 나타내었다.

2.2.1 경험식

비유출토사량(비생산토사량, 유출토사량/유역면적)은 유

Fig. 2. Flow chart of the comprehensive sediment budget system

Fig. 3. Study area (Maengbang beach, Gangwon-do)

Fig. 4. Assessment of valid sediment run-off using the sediment run-off model

역 전체의 평균적인 침식강도를 이해하는 개념으로서 그 값을 하천 유역과 직접 비교해서 각 하천유역의 토사유출 특성으로 간주하는 연구로 시작되었으며, 일본에서는 장기 간의 관측 데이터를 활용하여 아래와 같은 경험식(Ashida and Okumura, 1974)을 제안하였다. 측정된 데이터에 따라 예측 결과가 상이하며 신뢰성 확보와 지역별 토사유출강도 계수의 산정에 다소 어려움이 있지만, 손쉽게 연간 유출 토사량의 대략적인 파악이 용이하다. 여기서 q_s 는 연평균비유출토사량($m^3/km^2/year$), A 는 유역면적(km^2), K 는 토사유출강도 계수이다.

$$q_s = KA^{-0.7} \quad (1)$$

2.2.2 토사유출모델

유역의 토사이동과 하상고 저하와의 원인관계를 정량적인 해석을 통해 장기예측을 위한 토사유출 모델을 구축한다. 본 연구에서는 산지+하도영역에서 발생하는 유출토사량의 평가를 위해 강우와 유역의 지형적 특성에 따른 토사유출 모델(Kato et al., 2018)을 이용하여 연구지역의 다양한 유역 특성 매개변수를 산정하여 경년적인 유효유사량을 평가한다.

$$V = K_m \left(A^{3/4} (\sin \theta_1)^{9/20} (\sin \theta_2)^{3/10} R_e^{9/5} \right) \quad (2)$$

$$K_m = 0.007 \left(Ar \left(\frac{\rho w}{\sigma} \right) \right)^{0.64} \quad (3)$$

여기서, V : 유출토사량(m^3), $K_m (=0.6)$: 토사유출계수 ($0 \sim 0.02$), A : 유역면적(km^2), θ_1 : 유역평균사면경사, θ_2 : 하도경사, R_e : 유효강우량, ρ : 토립자의 단위체적중량($2.65t/m^3$), σ : 압축강도($2,200t/m^2$), w : 공극율(10%), A_r : 하도면적(m^2)이다. 평균강우량($1,316 \text{ mm/yr}$)에 따른 마읍천 유역에서 발생하는 유효유사량 산정 결과를 Fig. 4에 나타냈으며, 여기서 CN (Runoff curve number)은 무차원 유출곡선지수, S (Potential

maximum retention)는 잠재보유수량이다.

2.2.3 SWAT 모델

SWAT 모델은 미국 농무성의 농업연구국(Agricultural Research Service: ARS)에서 개발한 유역단위의 모델이며 미국 농무성에서 개발하여 이용해 온 CREAMS 모델, GREAMS 모델 및 EPIC 모델과 같은 농업연구국 모델들이 결합되었다. SWAT 모델을 이용하여 수문 및 수질을 시·공간적으로 분석하기 위해서 시간적으로 변화하는 기상자료(일 강수량, 기온, 풍속, 일조량, 상대습도)와 공간적으로 변화하는 토지이용현황, 토양속성, 그리고 지형자료 등이 필요하다(Neitsch et al., 2001). SWAT 모형의 운영에 필요한 기상자료는 일 강우(Precipitation, mm), 일 풍속(Wind Speed, m/s), 일 일사량(Solar Radiation, MJ/m²), 일 최고온도(Max Temperature, °C), 일 최저온도(Min Temperature, °C), 일 습도(Humidity, %)이다.

본 연구에서 기상현상에 따른 수문 및 유사발생을 정확하게 모의하기 위하여 유역 인근의 기상자료(KMA Weather data service, 1992~2019)를 이용하였다. 토양도(Fig. 5)는 농촌진흥청 국립농업과학원에서 제공해 주는 정밀토양도(1:25,000)를 이용하였으며, 토지이용도는 환경지리정보서비스(Environmental Geographic Information System; EGIS)에서 제공하는 1:25,000 중분류 토지이용자료(Fig. 6)를 이용하여 유역개발에 따른 변화를 고려하였다. 대상유역을 출구점(하구) 기준으로 소유역으로 분할하고, 이를 다시 토지피복 및 토양종류에 따라 앞서 설명한 다수의 HRU로 세분하여 물순환 및 유사량을 평가하였다. 기상 자료는 1992년 1월 1일~2019년 12월 31일까지 28년 동안 각 대상유역의 지배 기상관측소에서 관측된 일 강수량, 일 최고 및 최저온도, 일 풍속, 일 상대 습도, 일 일사량 자료를 이용하였으며, 1992년~1995년을 모형의 초기 안정화 기간(warm-up period)으로 설정하고, 1996년~2019년을 모의기간으로 설정하였다.

Fig. 5. Annual land use map (Maeupcheon)

Fig. 6. Main parameter of SWAT model (Basin of Maeupcheon)

3. 혼합입경을 고려한 정선변화 모델

본 연구에서는 흐름 공존장(산지, 하천, 해안영역)에서 변화하는 흐름 특성과 하천을 통해 해역으로 유출되는 토사량(유효토사량)을 산정하여 해역의 파랑 및 지형 특성 등을 분석하여 정선변화 예측을 목적으로 한다. 강원도 맹방해변의 정선변화 예측을 위해 모델의 입력 매개변수는 장기간의 관측자료를 면밀히 분석하여 적용하였다. One-line theory(Hanson, 1989; Tomasicchio et al., 2020)에 의거한 실용적인 정선변화 예측 수치모델을 이용하여 토사의 입도분포를 단일입경(D_{50})과 혼합입경이 고려 가능한 정선 모델(In-MPaS, Inje University-Mixture Particle Shoreline model)을 구축하였다.

3.1 정선모델 구축(IN-MPaS model)

3.1.1 입경별 연안표사량 계수

혼합입경 모델의 분급과정을 고려하기 위해서는 입경별 연안표사량 산정이 필요하다. 기존의 CERC형 표사량식에 표사량 계수 K_1 와 저질입경 D 에 관해 Kamphuis et al.(1986)가 제시한 관계식 Eq. 4를 사용하였으며 좌표계의 설정은 Fig. 7과 같다.

$$K_1 \propto D^{-1/2} \quad (4)$$

K_1 은 입자의 움직임의 정도를 나타내며 입경(D)이 크면 입자의 움직임이 둔해지므로 K_1 및 연안 표사량 Q 는 적어지게 된다. 또한, 해안선의 길이가 긴 경우에는 입경별(N) 체적 함유율 $\mu^{(K)}$ ($K=1 \sim N$)과 같다고 가정하여 입경별 Eq. 5에 작용하는 파랑 에너지의 플럭스는 Eq. 6과 같다(Fig. 8).

Fig. 7. Definition of coordinate

$$D^{(1)}, D^{(1)}, \dots, D^{(N)} \quad (K=1 \sim N) \quad (5)$$

$$F_x \mu^{(1)}, F_x \mu^{(1)}, \dots, F_x \mu^{(N)} \quad (K=1 \sim N) \quad (6)$$

따라서, 혼합입경별 연안표사량은 다음식으로 산정한다.

$$Q^{(K)} = \mu^{(K)} K_1^{(K)} F_x \quad (K=1 \sim N) \quad (7)$$

$$F_x = (EC_g)_B \sin \alpha_{Bs} \cos \alpha_{Bs} \quad (8)$$

$$K_1^{(K)} = A(D^{(K)})^{-1/2} \quad (K=1, 2, \dots, N) \quad (9)$$

여기서 $(EC_g)_B$ 는 해안선 단위폭당 쇄파점에서의 파랑에너지 플럭스와 연안방향 성분, α_{Bs} 는 쇄파시 파봉선과 해안선이 이루는 각이다. 식 (9)의 계수 A 는 표사량 계수를 규정하는 계수이며 대상 해안의 변형과정에 따라 설정한다.

3.1.2 입경별 토사량 보존식

입경별 정선 변화량 $y_s^{(K)}$ 은 입경별 토사량 보존식(연속식) 다음의 식으로부터 산정한다.

$$\frac{\partial y_s^{(K)}}{\partial t} = -\frac{1}{D_s} \left(\frac{\partial Q^{(K)}}{\partial x} - q^{(K)} \right), \quad K=1, 2, \dots, N \quad (10)$$

여기서 x 는 연안방향 좌표, D_s 는 표사의 이동높이, $q^{(K)}$ 는 해안선 단위폭당 입경별 토사유입량(여기서는 하천유출 토사량)을 나타내며, 혼합입경(전입경)의 정선변화 Y_s 는 다음의 식으로 산정한다.

$$\frac{\partial Y_s}{\partial t} = \sum_{K=1}^N \frac{\partial y_s^{(K)}}{\partial t}, \quad K=1, 2, \dots, N \quad (11)$$

3.1.3 입경별 함유율 변화

파랑작용에 의해 모래는 혼합되고, 입도의 변화는 어떤 두께를 가진 교환층 내에서 발생한다. 해안영역에서 침식과 퇴적의 현상을 Hirano(1971)의 교환층의 개념을 이용하여 모래입경의 혼합을 변화를 계산하였다. 파랑에 의해 혼합이 발생하며 교환층은 아래의 그림(Fig. 9)과 같이 정선변화 모델에 준하여 표사의 이동고 D_s , 해빈경사 $\tan \beta$ 로 일정한 경사면의 해빈단면으로 가정하여 연안방향으로 폭 B , D_s 의 범위를 교환층으로 정의하였다. 교환층의 폭 B 는 혼합깊이 ΔD_s 와 기하학적으로 다음의 식으로 나타내었다.

Fig. 8. Wave energy flux acting on each coastline unit

Fig. 9. Range of grain size mix after shoreline variation (left: deposit, right: erosion)

$$B = \Delta D_s \frac{1}{\tan \beta} = \Delta D_s \cot \beta \quad (12)$$

여기서 B 는 ΔD_s 의 매개변수는 Kraus(1985)의 논문을 참고하여 산정하였다.

침식영역과 퇴적영역 각각의 변화에 대해서 토사 유입 및 유출에 의한 층 내 입경별 표사수지를 정식화함으로써 교환층 내 입경별 함유율 $\mu^{(K)}$ 의 변화를 기초방정식 나타내었으며 다음과 같다. 여기서 μ_B 는 정선변화 전의 교환층보다 해안측의 함유율을 나타낸다.

$$\text{Deposit: } \frac{\partial \mu^{(K)}}{\partial t} = \frac{1}{B} \left\{ \frac{\partial y_s^{(K)}}{\partial t} - \frac{\partial Y_s}{\partial t} \cdot \mu^{(K)} \right\} \quad (13)$$

$$\text{Erosion: } \frac{\partial \mu^{(K)}}{\partial t} = \frac{1}{B} \left\{ \frac{\partial y_s^{(K)}}{\partial t} - \frac{\partial Y_s}{\partial t} \cdot \mu_B^{(K)} \right\} \quad (14)$$

3.1.4 수치계산

초기 정선, 초기 입경별 함유율의 분포 및 입사파 조건에 대해 입경별 연안 표사량(Eq. 4)을 계산하여, 경계조건으로 해안의 좌우측(연안)에서 입경별 연안표사량을 부여하였다.

$$Q^{(K)} = Q_B^{(K)} \quad (K = 1, 2, \dots, N) \quad (15)$$

단, 연안 표사가 외부로 유출되는 경계의 경우 계산 과정에서 입경 함유율은 시간적으로 변화하므로 입경별 연안 표사량 배분이 시간적으로 변화하게 된다. 따라서 전체 연안 표사량은 감소할 수는 있지만 입경별 연안 표사량을 미리 줄일 수는 없다. 따라서 본 계산에서는 경계에서의 전체 연안 표사량 $(Q_B)_{ALL}$ 을 부여하고, 입경별 연안 표사량은 각 시각의 경계 인접점 함유율을 이용하여 다음 식으로 배분비를 계산하여 산정하였다.

$$Q^{(K)} = \frac{\mu^{(K)} K_1^{(K)}}{\sum_{K=1}^N \mu^{(K)} K_1^{(K)}} \cdot (Q_B)_{ALL} \quad (K = 1, 2, \dots, N) \quad (16)$$

하구로부터 해안으로 공급되는 토사유입(유효유사량)은 기초방정식 중 외부로부터의 토사유입량 $q^{(K)}$ 로 적용하며, $q^{(K)}$ 에 입경별 하천유입 토사량 $q_{in}^{(K)}$ 으로 공급하였다.

$$q^{(K)} = q_{in}^{(K)} \quad (K = 1, 2, \dots, N) \quad (17)$$

해안선에 설치한 돌제 등 돌출된 구조물로 인해 연안표사가 단절되어 흐름이 발생하지 않을 때에는 그 지점의 연안 표사량을 0으로 설정하며 교환층 내에서의 입경별 함유율 변화 산정식은 다음과 같다. 퇴적영역과 침식영역에 대해 각각, 각 시각의 정선변화에 의한 토사 유입 및 유출에 의한 층 내에서의 입경별 표수지를 정식화하는 것으로 얻을 수 있다. Fig. 10에 혼합입경을 고려한 정선변화 예측 모델의 계산 흐름도를 나타내었다.

Fig. 10. Flow chart of shoreline prediction model calculation

4. Methods

4.1 정선변화분석

본 연구에서는 우리나라 동해에 위치한 맹방해수욕장(Fig. 11)의 정선변화에 따른 표사수지 분석을 수행하였다. 해역은 longshore(6.4km)의 특징이 큰 해역으로 북측으로 맹방해수욕장, 마읍천(덕봉산) 그리고 남측으로 덕산해수욕장으로 구성되어 있다. 덕봉산을 중심으로 평상시 맹방해역으로 하천 유량이 흐르고 있고 홍수시 덕산해수욕장을 월류하여 양방향으로 유량이 흐르는 특징이 있다. 맹방해변의 위성사진(1971~2017)을 비교 분석하여 경년적인 정선변화의 특징을 파악하였다. 맹방해변과 덕산해변에서 발생하는 경년적인 정선의 전진과 후퇴를 파악하기 위해 연안정비가 완료된 최신의 위성사진(2017년)의 도로 경계선을 정선 변화의 기준선으로 설정하였으며 과거의 위성사진에 각각 적용하여 정선 변화량을 분석하였다.

4.2 대표파랑 산정

맹방해변의 파랑특성을 분석하기 위해 NOAA(2019) 파랑자료를 수집하였으며 파랑자료는 1979년부터 최근(2019)까지 0.5° 해상도에 대해, 3시간 간격의 파고, 주기 및 파향 등의 정보를 제공하고 있다. 맹방해변으로부터 가장 근접하게 위치한(약 26km 외해) NOAA(경도: 129.5°, 위도: 37.5°)에서 제공하는 약 40년간의 파랑자료를 수집하여 맹방해변으로

입사하는 파랑 특성을 분석하였다.

정선변형은 파고가 높고 주기가 긴 파랑성분을 많이 포함한 외해로부터의 침입파에 의해 주로 발생한다. 장기적인 해변 변형을 예측하는 등수심 변화 계산에서는 연간의 파랑 에너지를 표현하는 에너지 평균파 및 평균조위를 이용해 계산하며, 특히 Toril(2003)의 연구에서는 해안구조물에 따른 정선변화 예측을 위한 파랑의 성분은 에너지 평균파의 사용을 제안하였다. 본 연구에서는 경년적인 정선변화 예측을 위해 해역의 대표 파랑은 1년 단위(all season)의 에너지 평균파(Eq. 18)를 산정하여 정선모델에 적용하였으며, 그 결과를 Table 1에 나타내었다.

$$H_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (H_i^2 \cdot T_i)}{\sum_{i=1}^N T_i}}, T_m = \frac{\sum_{i=1}^N (T_i)}{N}, \quad (18)$$

$$\theta_m = \cos^{-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^N (\cos \theta_i \cdot H_i^2 \cdot T_i)}{\sum_{i=1}^N (H_i^2 \cdot T_i)} \right)$$

여기서 H_i , T_i , θ_i : 파고, 주기 파향의 관측치, H_m , T_m , θ_m : 에너지 평균파고, 주기, 파향을 나타낸다.

4.3 파랑변형

계절풍의 변화가 뚜렷하고 소조차의 해역환경특성을 가지고 있는 우리나라 동해안의 지형변화는 다양한 변동성을 가지는 해변상태(Wright and Short, 1984)를 보이지 않고 연속적인 고파랑으로 인한 근해의 지형변화와 호형사주를 지속적으로 유지하는 특징을 나타내고 있다(Athanasios, 2017). 이처럼 맹방해변에서는 계절풍과 지형적인 특징이 뚜렷하게 나타나며 특히 crescentic bar가 형성되어 있어 Longshore의 특징으로 축선별(No1~225) 파랑변형을 고려하기 위해 세계적으로 사용되고 있는 파랑모델인 SWAN(Simulating Waves Nearshore)을 이용하여 굴절, 천수변형, 해안 구조물에 의한 반사 및 회절 등을 고려하여 파랑특성을 분석하였다. 천수변형의 왜곡을 최소화하기 위해 계산영역을 크게 구축하였고 축선별 발생하는 파랑변형을 고려하기 위해 nesting에 의한 계산을 수행하였다(Fig. 12).

Fig. 11. Shoreline variation through satellite imagery

Table 1. Analysis results of wave characteristics (January 1979-May 2019)

Track	Energy Avg. wave heigh(H_m)	Period(T_m)	Wave direction(θ_m)	
Spring (03~05 month)	1.104	5.702	89.998	E
Summer (06~08 month)	0.892	5.278	68.241	ENE
Fall (09~11 month)	1.356	6.271	43.906	NE
Winter (12~02 month)	1.572	7.039	34.075	NE
All season	1.283	6.069	45.326	NE

Fig. 12. SWAN calculation area and bathymetric map

4.4 수심측량

수심 및 해빈 단면 측량은 RTK-GNSS와 고정밀 GNSS, 정밀음향측심기(AquaRuler 200S, MIDAS)를 장착하여 조사를 수행하였으며, 조사범위는 쇄파대 외측 MSL(-) 25m부터 해수면위 기준점 MSL(+) 6m로 설정하였다. 2017년 3월부터 2019년 12월까지 약 34개월 동안 진행된 22번의 수심 관측 결과 MSL(-) 10m 외측의 지형변화는 거의 일어나지 않았으므로 모래이동한계수심(depth of closure)은 수심 MSL(-) 10m 부근에 형성된 것으로 판단된다(Jin et al., 2020). 수심자료 분석결과 계절적인 파랑 특성의 변동성과 간헐적인 고파랑 및 호형 사주의 지형적 변동성이 강하기 때문에 맹방 해변의 호형 사주의 거동과 그로 인한 해빈 반응의 정확한 예측을 위해서는 횡단, 연안표사 및 해빈 순환류에 따른 표사이동 또한 고려해야 한다. 장기간의 수심측량 성과를 이용해 측선별 경년적인 해빈 단면도를 작성하여 표사수지 분석을 수행하였으며, 이 결과는 정선모델을 통한 표사수지의 결과와 비교 검토하여 모델의 신뢰성을 평가하였다(Fig. 13).

4.5 입도분포

해역을 구성하고 있는 토사의 특성을 고려하기 위해 해역의 주요 지점(64지점)을 선정하여 3년간(2017~2019) 해저질 조사를 수행하였으며 평균입도분포를 Fig. 14에 나타내었다. 본 연구에서는 혼합입경 형태에 따른 정선변화 모델을 적용하기 때문에 해역 및 유효유사량의 입도분포가 단일입경(D_{50}) 형태가 아닌 혼합입경 형태의 입도분포를 산정하였다. 정선별 토사의 입도구성을 적용하기 위해 관측값을 선형 보간하여 적용하였으며, 해역을 대표하는 혼합입경 형태의 입도분포 조사를 위해 3년간의 관측값을 각지점별 평균하여 5가지의 입자군(Table 2)에 따른 입도분포를 측선별(Mb. 1~225) 선형 보간하였으며, 이 결과를 이용하여 정선모델의 입력자료로 사용하였다. 하천으로부터 공급되는 유효유사량의 입도분포는 조사가 수행되지 않아 마읍천 하구주변에서 가장 근접한 지점(L01)의 해저질 조사성과를 이용하여 유효유사량의 입도분포를 설정하였다. 해저질 조사성과를 이용한 측선별(Mb. 1~225) 입도분포를 Fig. 15에 나타내었다.

4.6 실험조건

종합적인 표사수지 분석을 위해 정선 모델의 예측성능을 검토하였다. 연구지역의 특성을 고려하기 위해 하천으로부터 공급되는 유효유사량을 산정하여 고려하였으며 해역을 구성하고 있는 토사의 입도분포는 혼합입경의 형태 및 하구사주 전면에 있는 덕봉산(island)의 영향을 고려하기 구조물(돌제)을 고려하여 장기적인 정선변화를 예측한다. 연구지역으로 유입하는 토사는 외해(Q_c), 좌우경계(Q_l) 및 하천(Q_R)으로부터 토사의 공급이 발생하지만 유효유사량(Q_R)에 따른 표사수지 분석을 위해 토사량은 유효유사량만을 고려하였다(Fig. 16).

Fig. 13. (a) Maengbang beach sideline location map; (b) beach cross-section according to the water depth measurements; and (c) Sediment run-off variance analysis results (March 2017-January 2019; red: deposit, blue: erosion).

Fig. 14. (a) Seabed condition survey site, (b) seabed condition particle size distribution

Fig. 15. Diagram of the particle size distribution for each sideline

Fig. 16. Boundary of conditions

Table 2. Particle group setting by grain size

Grain size		Model application
D(1)= 0.001~0.280mm	→	D(1)= 0.140mm
D(2)= 0.280~0.600mm	→	D(2)= 0.420mm
D(3)= 0.600~1.000mm	→	D(3)= 0.770mm
D(4)= 1.000~1.825mm	→	D(4)= 1.190mm
D(5)= 1.825~4.750mm	→	D(5)= 2.460mm

5. Results

맹방해변의 표사수지 분석을 위해 정선모델을 구축하였으며 모델에 필요한 매개변수는 관측자료를 이용하여 설정하였다. 특히 해역을 구성하고 있는 해저질과 하천으로부터 공급되는 유효유사량의 입도분포를 단일입경(D_{50})이 아닌 혼합입경 형태로 고려하였으며 유효유사량의 산정은 토사유출모델의 결과를 이용하여 모델에 적용하였다. 본 연구에서 얻은 주요한 결과는 다음과 같다.

5.1 유효유사량

본 연구에서는 해역으로 공급되는 경년적인 유효유사량의 평가를 위해 지역적 특성을 나타내는 매개변수와 지형

정보를 이용하여 토사량 유출산정식에 의한 방법과 GIS 정보를 이용한 수치해석(SWAT model)에 따른 유사량을 비교 평가하여 정선모델의 입력자료로 활용하였다.

정선변화 예측을 위해 해역으로 공급되는 토사량을 평가하기 위해 토사유출모델과 SWAT 모델을 이용하여 유효유사량을 평가하였고 결과를 Fig. 17에 나타내었다. SWAT 모델과 토사유출 모델간의 유효유사량 결과로부터 2002~2007년에 발생한 유효유사량에서 토사유출 모델의 결과가 SWAT 모델의 결과보다 과대평가 되고 있다. SWAT 모델에서는 년도별 유역정보를 반영하여 유효유사량을 산정하지만, 토사유출 모델에서는 이 기간에 수행된 유역개발(광산공사)에 따른 절토 토사량의 고려가 되지 않아 비교적 높게 평가되었다. 하지만 전반적으로 토사유출 모델의 정도가 우수하며 간단하게 적용 가능한 토사유출모델의 적용성이 높다고 판단된다. 또한 유역에 발생하는 강우량(mm/yr)과 유효유사량간의 관계식(Fig. 18)을 산정하였으며 강우량에 따른 맹방해역으로 유출되는 유효유사량을 평가하여 장기간의 정선변화 예측에 있어 중요한 입력조건의 설정이 가능하다.

5.2 파랑변형

우리나라 동해는 수심이 깊고 근해로 접근함에 따라 해저경사가 급해 입사 파랑의 변화가 심한 지역적 특징이 있다.

Fig. 17. Results of valid sediment run-off (Sediment runoff and SWAT models) **Fig. 18.** Equation of the relationship between rainfall and valid sediment run-off (a: sediment runoff model, b: SWAT models)

검토대상 지역에서 산정한 대표파랑이 근해로 접근함에 따라 천수효과에 의한 파랑 변형과 함께 지형적 특징과 대상 영역이 광범위한 경우(연안길이: 5.8km) 국소적인 파랑 변형이 발생한다. 따라서 정확한 정선변화 예측을 위해서는 측선별 변화하는 파랑 특성에 대한 평가 및 고려가 중요하다. 본 검토에서는 맹방해변에 작용하는 측선별 입사파 조건에 따른 파랑 변형을 계산하였다. 파랑 변화를 계산하기 위해 세계적으로 사용되고 있는 SWAN 모델을 이용하였으며 측선별 변화하는 쇄파점에서의 파고 및 파향을 추산하였고 그 결과를 Fig. 19에 나타내었다. 이 결과를 이용하여 측선별 작용하는 파랑변형의 결과를 정선변화 모델의 입력자료로 활용하였다.

5.3 매개변수에 따른 정선변화 민감도 분석

해안선의 전진과 후퇴는 토사의 이동에 따라 변화가 발생한다. 해역을 구성하는 토사와 해역으로 유입되는 토사를 구성하는 특성에 따라 정선 변화는 민감하게 반응한다. 따라서 토사를 구성하는 입경분포 및 유효유사량에 따른 정선변화의 민감도 분석을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 20에 나타내었다. 해안으로 유입되는 토사의 공급(유효유사량)을 고려하지

않는 경우, 해역을 구성하는 토사의 입도분포(단일입경, 혼합입경)에 따른 정선변화의 민감도 분석결과와 정선 변화의 차이는 거의 없는 것으로 나타났지만 유효유사량을 고려할 경우에는 토사를 구성하는 입도분포에 따라 정선변화의 차이가 뚜렷하게 나타났다. 토사가 공급되는 마음천(Mb. 175)을 기준으로 좌측방향으로 심방천(맹방해변으로 약 1175m)이 유입되는 지점까지는 단일입경(D_{50})의 토사형태가 최대 4.7m 정선이 전진하며 이외의 지역에서는 혼합입경 형태가 최대 0.6m 정선이 전진하는 것으로 나타났다(Fig. 21).

토사의 이동이 발생하는 해역내에서는 해역의 좌우측 경계로부터 연안표사가 발생하며 정확한 토사의 이동을 평가하기 위해서는 정확한 경계조건의 설정이 중요하다. 본 연구에서는 해역의 특성을 고려하여 경계 좌우측으로부터 공급 및 유출되는 토사량은 $0.0\text{ m}^3/\text{year}$ 으로 설정하였으며, 경계에서 발생하는 표수사지 균형을 평가하기 위해 경계조건 $Q_b (=1, \text{openboundary})$ 에 따른 1980년의 정선을 기준으로 장기간(2013년)의 정선변화 예측성능을 평가하였으며 그 결과를 Fig. 22에 나타내었다.

Case A는 좌우측 경계조건 $Q_b=1$, 유효유사량의 고려와 함께 토사를 구성하는 입도분포를 단일입경 및 혼합입경에

Fig. 19. Calculation results of wave deformation

Fig. 20. Shoreline variation prediction results according to sediment grain size composition

Fig. 21. Shoreline variation sensitivity analysis according to sediment grain size composition

Fig. 22. Shoreline variation sensitivity analysis according to boundary conditions

따른 정선변화 예측 결과를 나타냈으며, Case B는 좌우측 경계조건 $Q_b = 0.9$ 에 따른 정선변화 예측 결과를 나타냈다. 이 결과로부터 좌측의 경계조건은 유효유사량이 공급되는 지점으로부터 영향이 없는 것으로 나타났지만, 우측의 경계조건의 영향을 받아 마읍천 주변의 정선변화는 크게 변화하는 것으로 나타났다. 이 결과로부터 Q_b 의 설정에 따라 해역의 정선변화의 예측성능이 향상되며 해역에 적합한 파라미터 설정이 중요한 것으로 판단된다.

위의 결과를 바탕으로 좌우측 경계조건 $Q_b = 0.9$, 유효유사량을 고려하여 입경분포의 형태에 따른 장기적인 정선변화 예측 결과를 Fig. 23에 나타내었다. 이 결과로부터 단일 입경 보다 혼합입경으로 고려했을 경우의 정선변화 예측성능이 더 우수한 것으로 나타났다.

5.4 정선변화 예측의 고도화

Fig. 23의 결과와 같이 여전히 유효유사량이 공급되는 마읍천 주변(Mb. 175)의 정선변화의 재현성이 좋지 않은 것으로 나타났으며, 이 결과는 마읍천 하구의 지형적 특징인 하구 전면에 덕봉산(섬)의 영향이 고려되지 않는 것으로 판단된다. 마읍천 하구의 지형적 특징으로는 덕봉산의 영향을 받아 마읍천으로부터 공급되는 유효유사량의 지배적인 이동은 맹방해변 방향으로 발생하며 연안표사의 이동이 차단되는 지형적 특징이 있다. 따라서 본 연구에서는 덕봉산의 영향에 따른 표사이동의 형태를 구조적으로 유사한 성능을 갖는 돌제(groin)를 적용하여 정선변화를 예측하였으며 그 결과를 Fig. 24에 나타내었다. 덕봉산을 돌제로 적용하고 토사의 입경형태를 단일입경과 혼합입경으로 고려했을 경우의 결과로부터 정선변화의 예측성능이 크게 향상되었으며 특히 토사를 구성하는 입경분포는 혼합분포의 경우가 재현

Fig. 23. Long-term shoreline variation prediction results

Fig. 24. Shoreline variation prediction results considering topographical characteristics

성능이 높게 나타났다. 수치모델의 검증에 위해 다년간의 관측치와의 비교 검토에서도 지형적 특징과 토사의 입경분포를 혼합입경으로 고려했을 경우 예측성능이 높게 나타났다(Fig. 25). 정량적인 예측성능을 분석하기 위해 관측치와 계산치와의 표준오차를 Table 3에 나타내었다. 이 결과로부터, 유효유사량의 지배적인 영향이 없는 구간(Mb. 1~134)에서는 단일입경과 혼합입경의 경우 유사한 예측 결과가 나타났지만, 마읍천 주변 지역(Mb. 135~225)에서는 예측성능이 크게 향상되는 것으로 나타났다.

5.5 토사의 입도구성

해역을 구성하는 토사는 입경별 서로 다른 이동 특성을 나타낸다. 해역으로 유입되는 유효유사량(Q_{River})의 영향을 받아 변화하는 정선을 관리하기 위해서는 토사유입에 따른 해역의 토사구성을 파악해야 한다. 특히 양빈을 통한 정선관리에 있어서는 양빈토사의 입도 구성을 평가하여 인위적인 토사 유입에 따른 장기적으로 변화하는 토사의 구성 파악이 중요하다. 따라서 혼합입경을 고려한 정선모델을 통한 해역의 토사 구성의 변화를 예측하였으며 그 결과를 Fig. 26에 나타내었다. 이 결과로부터, 초기상태로 유효유사량이 없는

Fig. 25. Long-term shoreline prediction results according to shoreline variation prediction advancement

Table 3. Standard deviation results for both particle size distribution

Shoreline No.	Standard deviation					
	Single-grain			Multi-grain		
	1988	2011	2013	1988	2011	2013
1~135	4.98	6.24	7.06	4.86	6.13	7.09
135~225	7.67	9.23	10.54	6.36	6.21	7.14
1~225	8.05	8.07	8.83	7.13	6.19	7.09

Fig. 26. Properties of change in grain size distribution

Fig. 27. Comprehensive sediment budget analysis results

경우에는 마음천 주변(Mb. 175)에서는 다소 굽은 입자의 토사가 분포되어 있지만, 유효유사량의 공급에 따라 미세한 입자의 토사가 분포하는 것으로 나타났다.

5.6 종합표사수지 산정

수심측량 성과를 이용한 표사수지 분석결과와 정선모델의 예측 결과를 이용한 표사수지를 분석한 결과를 Fig. 27에 나타내었다. 모델의 성능을 비교 분석하기 위해 비교적 최근에 실시된 관측자료(2017~2019)를 이용하였으며 관측자료로부터 유효유사량이 공급되는 마음천(Mb. 175)으로부터 좌우측으로 표사가 이동하는 것으로 나타났다. 특히 맹방해면에서는 침식과 퇴적이 반복적으로 발생하는 crescentic bar의 특성이 있으며 정선변화 모델(In-MPaS)의 결과에서도 관측결과와 매우 유사한 표사이동의 형태를 나타내고 있다. 이 결과로부터 유효유사량을 고려한 맹방해면에서의 표사수지의 정량적인 예측성능이 우수한 것으로 판단된다.

6. Discussion

우리나라 해역에서 발생하는 표사수지 분석을 위한 종합적인 분석체계를 수립하고 이에 따른 표사수지 분석의 고도화를 위한 혼합입경을 고려한 정선모델(In-MPaS model)을 개발하였다. 분석에 필요한 매개변수 설정을 위해 다년간의 관측자료를 활용하였으며 정선 모델의 민감도 평가와 예측성능 향상을 위한 주요한 파라미터의 분석을 수행하였다. 본 연구에서 얻은 주요한 결과는 다음과 같다.

1. 해역에서 발생하는 장기적인 정선변화를 예측하기 위해서는 장기간의 파랑 특성과 해역으로 공급되는 유효유사량의 평가가 매우 중요하다. 하지만 하천으로부터 공급되는 토사량(유효유사량)의 평가는 여전히 난해하며 신뢰성 높은 데이터 확보를 위한 관측은 사실상 불가능하다. 따라서 유역으로부터 유출되는 토사량을 평가하기 위해 비교적 많은 연구 결과와 함께 검증이 수행된 SWAT model을 이용하여 맹방해면으로 공급되는 유효유사량을 평가하였다. 본 연구에서는 비교적 간단히 유효유사량을 평가할 수 있는 토사유출모델을 적용하여 SWAT model과의 예측성능을 비교 분석하였으며 그 결과 토사유출모델의 적용성이 높은 것으로 나타났다.
2. 연구지역은 계절풍과 지형적인 특징이 뚜렷하게 나타나고 있으며 특히 crescentic bar가 형성되어 있어 측선(Mb. 1~225, 5,875m)의 위치에 따른 파랑변형이 발생한다. 따라서 이러한 지역적 특성을 고려하기 위해 측선별 입사하는 파랑변형을 SWAN을 이용하여 계산하여 측선별 변형된 입사조건을 모델에 적용하였다.
3. 해역과 유효유사량을 구성하고 있는 토사의 입경분포에 따라 정선변화 예측성능이 상이하며 하천을 통해 해역으로 유효유사량이 공급되는 해역에서는 단일입경(D_{50}) 보다 혼합입경의 형태로 토사를 고려할 경우 예측 성능이 크게 향상되는 것으로 나타났다.
4. 맹방 하구지역과 같이 지형적 특징이 뚜렷한 지역에 대해서는 구조적으로 유사한 성능을 갖는 구조물(돌제)을 적용함으로써 예측성능의 향상을 기대할 수 있다.

이 결과로부터 해역에서 발생하는 정확한 표사수지 분석을 위해서는 우선 정선 모델의 예측성능이 중요하며 예측성능을 위해서는 측선별 작용하는 대표 파랑의 설정, 하천으로부터 공급되는 유효유사량의 평가, 해역과 유효유사량을 구성하는 토사의 입도분포(혼합입경) 및 지형적 특징을 반영할 수 있는 모델의 수립이 중요하다. 한편 하구 주변(Mb. 161~181)의 정선변화 예측의 고도화를 위해서는 태풍이 동반한 강우 및 집중강우에 의해 마읍천의 유량이 급격히 증가하여 하구사주가 붕괴되어 추가적인 유출 토사량의 증가와 이벤트성 강우 이후 평상파에 의해 붕괴된 하구사주가 다시 회복되어 유입되는 토사량이 고려된다면 정선변화 예측성능이 향상될 것으로 판단되며 향후 이와같은 연구를 수행할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2021년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(20180404 연안침식 관리 및 대응기술 실용화)의 지원을 받아 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Ashton, A. D. and Murray, A.B. (2006). "High-angle wave instability and emergent shoreline shapes: 1. Modeling of sand waves, flying spits, and capes." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 111, F04011, pp. 1-19. <https://doi.org/10.1029/2005JF000422>
- Ashida, K. and Okumura, T. (1974). "Study on sedimentation in reservoirs." *Annals of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, No. 17, B-2, pp. 555-570 (in Japanese with English Synopsis).
- Athanasiou, P. (2017). "Understanding the interactions between crescentic bars, human interventions and coastline dynamics at the East coast of South Korea." Master's Thesis, Delft University of Technology, Delft.
- Cho, Y. J. (2021). "Development of physics-based morphology model with an emphasis on the interaction of incoming waves with transient bed profile due to scouring and accretion using dynamic mesh." *Journal of Coastal Disaster Prevention*, Vol. 8, No. 4, pp. 211-219.
- Coco, G., Senechal, N., Rejas, A., Bryan, K. R., Capo, S., Parisot, J.P., Brown, J.A. and MacMahan, J. H. (2014). "Beach response to a sequence of extreme storms." *Geomorphology*, Vol. 204, pp. 493-501.
- Environmental Geographic Information System(EGIS) (2020). [Online] Available online: <https://egis.me.go.kr/main.do> <<https://egis.me.go.kr/main.do>> (accessed on 3 October 2020)
- Hansen, J. E. and Barnard, P. L. (2010). "Sub-weekly to inter-annual variability of a high-energy shoreline." *Coastal Engineering*, Vol. 57, No. 11, pp. 959-972.
- Hirano, M. (1971). "River-bed degradation with armoring." *Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 1971, No. 195, pp. 55-65.
- Ibaceta, R., Splinter, K. D., Harley, M. D. and Turner, I. L. (2020). "Enhanced coastal shoreline modeling using an ensemble Kalman filter to include nonstationarity in future wave climates." *Geophysical Research Letters*, Vol. 47, No. 22, pp. 1-12. <https://doi.org/10.1029/2020GL090724>
- Jin, H., Do, K., Chang, S. and Kim, I. (2020). "Field observation of morphological response to storm waves and sensitivity analysis of XBeach model at beach and crescentic bar." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 32, No. 6, pp. 446-457.
- Jun, H., Chang, T. S. and Do, K. (2021). "Field observation and numerical modelling for morphological response in the macro-tidal beach." *Journal of Coastal Disaster Prevention*, Vol. 8, No. 2, pp. 55-68.
- Kamphuis, J. W., Davies, M. H., Nairn, R. B. and Sayao, O. J. (1986). "Calculation of littoral sand transport rate." *Coastal Engineering*, Vol. 10, pp. 1-12.
- Kato, K., Inoue, T., Yamaguchi, M., Sumner, T. and Shimizu, Y. (2018). "Proposition of sediment runoff model considering changes in watershed conditions." *Journal of Japan Society of Civil Engineers Ser B1 (Hydraulic Engineering)*, Vol. 74, No. 4, pp. I901-I906 (in Japanese with English Abstract).
- Kim, T. W., Kim, Y. J., Yoon, J. S. and Kim, M. K. (2020). "Study on the sandbar collapse in an estuary." *Journal of Coastal Disaster Prevention*, Vol. 7, No. 4, pp. 267-273.
- 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.
- KMA Weather Data Service (2021). [Online] Available online: <https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do> <<https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>> (accessed on 1 February 2021)
- Kraus, N. C. (1985). "Field experiments on vertical mixing of sand in the surf zone." *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 55, pp. 3-14.
- Lee, W. D. and Hur, D. S. (2019). "Effects of coastal groundwater level on beach deformation." *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 33, No. 6, pp. 581-589.
- Lee, W. D., Kim, J. O. and Hur, H. S. (2019). "Effects of waveform distribution of tsunami-like solitary wave on run-up on impermeable slope." *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 33, No. 1, pp. 76-84.

- Milliman, J. D. and Meade, R. H. (1983). World-wide delivery of river sediment to the oceans. *The Journal of Geology*, Vol. 91, No. 1, pp. 1-21.
- Ministry of Oceans and Fisheries (2019). [Online] Available online: <https://www.mof.go.kr/en/index.do> (last data accessed on 3 May 2021)
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R. and Williams, J. R. (2001). Soil and water assessment tool. *Theoretical documentation, SWAT*, [Online] Available online: <https://swat.tamu.edu/> (last accessed on 1 May 2020)
- NOAA (2019). NW3 Data Access, *NOAA*, <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/download.shtml> (last date accessed: 3 October 2020)
- Park, J. C., Han, K. M. and Kim, J. J. (1993). "A study on the numerical model for predicting shoreline changes." *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 7, No. 1, pp. 156-161.
- Park, S. M., Park, S. H., Lee, J. L. and Kim, T. K. (2019). "Erosion control line (ECL) establishment using coastal erosion width prediction model by high wave height." *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 33, No. 6, pp. 526-534.
- Sallenger, A. H., Jr, Doran, K. S. and Howd, P. A. (2012). Hotspot of accelerated sea-level rise on the atlantic coast of North America, *Nature Climate Change*, Vol. 2, No. 12, pp. 884-888.
- Son, C. B and Lee, S. K. (2000). "An experimental study on the shoreline change during beach process." *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 14, No. 3, pp. 55-60.
- Splinter, K., Turner, I. L. and Davidson, M. A. (2013). "How much data is enough? The importance of morphological sampling interval and duration for calibration of empirical shoreline models." *Coastal Engineering*, Vol. 77, pp. 14-27. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.02.009>
- Splinter, K. D., Turner, I. L., Davidson, M. A., Barnard, P., Castelle, B. and Oltman-Shay, J. (2014). "A generalized equilibrium model for predicting daily to interannual shoreline response." *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, Vol. 119, pp. 1936-1958.
- Stive, M. J. F., Aarninkhof, S. G. J., Hamm, L., Hanson, H., Larson, M., Wijnberg, K. M., Nicholls, R. J. and Capobianco, M. (2002). "Variability of shore and shoreline evolution." *Coastal Engineering*, Vol. 47, No. 2, pp. 211-235. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(02\)00126-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00126-6)
- Toimil, A., Camus, P., Losada, I. J., Le Cozannet, G., Nicholls, R., Idier, D. and Maspataud, A. (2020). "Climate change-driven coastal erosion modelling in temperate sandy beaches: Methods and uncertainty treatment." *Earth-Science Reviews*, Vol. 202, No. 103110, pp. 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103110>
- Torii, K. (2003). "Performance based design of beach." *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, No. 39, pp. 1-24 (in Japanese).
- Vitousek, S., Barnard, P. L., Kimber, P., Erikson, L. and Cole, B. (2017). "A model integrating longshore and cross-shore processes for predicting long-term shoreline response to climate change." *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, Vol. 122, pp. 782-806. <https://doi.org/10.1002/2016JF004065>
- Wright, L. D. and Short, A. D. (1984). "Morphodynamic variability of surf zones and beaches, A synthesis." *Marine Geology*, Vol. 56, No. 1-4, pp. 93-118.
- Warrick, J. A. and Mertes, L. A. (2009). "Sediment yield from the tectonically active semiarid western transverse ranges of California." *Geological Society of America*, Vol. 121, No. 7-8, pp. 1054-1070. <https://doi.org/10.1130/B26452.1>
- Yates, M. L., Guza, R. T. and O'Reilly, W. C. (2009). "Equilibrium shoreline response: Observations and modeling." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 114, C09014, pp. 1-16. doi:10.1029/2009JC005359
- Yang, J. A. and Son, S. (2019). "Sensitivity analysis of sediment transport scaling factors on cross-shore beach profile changes using Delft3D." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 31, No. 6, pp. 493-500.