

Evaluation of Coastal Sediment Budget on East Coast Maeongbang Beach by Wave Changes

Gweon-Su Kim^{ID*}, Ha-Sang Ryu^{ID*} and Sang-Hoon Kim^{ID*}

*Port & Coastal Development Institute, SEIL Engineering Co., Ltd., Seoul, Korea

파랑 변화에 따른 동해안 맹방 해수욕장 연안 표사수지 파악

김권수^{ID*} · 유하상^{ID*} · 김상훈^{ID*}

(주)세일종합기술공사 항만 및 해안개발 기술연구소

KEY WORDS: Sediment budget 표사, Delft3d model Delft3d 모델, Wave change 파랑 변화, Input reduction tool 입력 감소 기법, NOAA NCEP NOAA 파랑 자료

ABSTRACT: Numerical simulation of the sediment by the Delft3d model was conducted to examine the changes in the sediment budget transport caused by long-term wave changes at the Maeongbang beach. Representative waves were generated with input reduction tools using NOAA NCEP wave data for about 40 years, i.e., from January 1979 to May 2019. To determine the adequacy of the model, wave and depth changes were compared and verified using wave and depth data observed for about 23 months beginning in March 2017. As a result of the error analysis, the bias was 0.05 and the root mean square error was 0.23, which indicated that the numerical wave results were satisfactory. Also, the observed change in depth and numerical result were similar. In addition, to examine the effect due to long-term changes in the waves, the NOAA wave data classified into each of the representative wave grades, and then the annual trend of the representative wave was analyzed. After deciding the weight of each wave class considering the changed wave environment in 2100, the amounts of sedimentation, deposition, and the sediment transport budget were reviewed for the same period. The results indicated that the sedimentation pattern did not change significantly compared to the current state, and the amount of the local sediment budget shown in the present state was slightly less. And there has been a local increase in the number of sediment budget transport, but there is no significant difference in the net and amount of sediment movements.

1. 서 론

우리나라 연안은 하천 및 연안의 유사와 표사의 이동 불균형으로 인해 침식 및 퇴적 변화가 발생하고 있다. 특히 동해안은 파랑 특성의 변화와 하천에서의 모래 공급 감소와 해사채취, 항만 및 방파제 등의 인공 구조물 건설에 따른 모래의 이동 양상 변화에 의해 연안 침식이 크게 발생하고 있다. 이러한 연안 재해는 장기간의 파랑 및 기후의 변화를 반영하여 연안 표사수지를 평가하고, 이에 따른 명확한 연안관리체계를 수립함으로써 해결될 수 있으리라 사료된다.

본 연구에서는 파랑에 의한 모래의 이동 양상 변화를 검토하기 위해, 해양수산부 연안침식현황 자료(Ministry of Oceans and Fisheries, 2019)에서 2016년부터 “심각” 판정을 받은 맹방해수욕장에 대하여 퇴적물 이동 실험을 수행하고 표사 이동량을 산정하였다. 과거 파랑에 의한 퇴적물 이동 실험은 50년 빈도, 평상

파 또는 계절파(Kim et al, 2018)라는 단일 파랑 조건에 대해 수치모의가 수행되어 왔다. 또는 실시간 파랑 조건을 이용하여 파고와 주기, 파향 조건을 그대로 입력하여 5분, 10분 혹은 그 이상의 간격으로 해수유동과 파랑을 연계(Coupling)하여 수치모의를 수행하고 있다. 단일 파랑 조건의 경우 수치모의에 따른 계산 소요시간이 획기적으로 줄어드는 장점이 있고, 50년 빈도 파랑 조건의 경우 태풍 및 고파랑에 의한 퇴적물 이동을 모의할 수는 있다. 그러나 과도한 연간 침·퇴적량이 산정될 수 있고, 평상파의 경우 이와 반대로 고파랑에 의한 침·퇴적량을 과소 평가할 수 있는 것으로 판단된다.

또한 계절파의 경우 계절별 파랑의 영향을 고려할 수 있으나, 이벤트성 파랑에 의한 영향보다는 일반풍에 의한 영향이 상대적으로 크게 나타날 가능성이 높으므로(Kim and Lee, 2015) 다양한 파고와 주기, 파향에 대한 분석이 이뤄져야 할 것으로 판단된다. 그리고 실시간 파랑 조건을 이용하여 파랑을 계산하고

Received 6 November 2019, revised 5 December 2019, accepted 13 December 2019

Corresponding author Gweon-Su Kim: +82-70-8622-7985, kimknsu@hanmail.net ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0293-2832

© 2019, The Korean Society of Ocean Engineers

This is an open access article distributed under the terms of the creative commons attribution non-commercial license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

해수유동과 연계하여 퇴적물 이동을 모의할 경우, 5분, 10분 등 파랑 계산 간격에 따른 침·퇴적량의 민감도를 계산하여야 하며, 상당히 발달된 현대 기술에도 불구하고 계산 소요 시간은 막대하게 늘어날 것으로 판단된다. 따라서 실시간 파랑 조건을 이용한 퇴적물 이동 수치실험의 경우 향후 파고와 주기, 파향 등의 변화를 대변한 시나리오를 작성하는 것은 현실적으로 불가능하다 할 수 있다.

본 연구에서는 단일 파랑 혹은 실시간 파랑 등에 대한 파랑 조건이 아닌, 전체 파랑 조건을 대변할 수 있는 대표 파랑을 생성하고, 각각의 대표 파랑에 대해 퇴적물 이동 실험을 수행하여 최종 침·퇴적 결과를 도출하였다. 이를 위해 1979년 1월부터 2019년 5월까지 약 40년에 대한 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)의 WaveWatchIII 파랑 자료(NOAA / National Weather Service, 2019)를 수집하여, 입력 감소 기법(Input reduction tool)(Deltares, 2017)을 이용해 62개의 대표 파랑을 생성하였다. 그리고 모델의 적정성을 판단하기 위해 2017년 3월부터 약 23개월간 관측된 파랑 및 수심자료를 이용하여 파랑변화와 수심 변화를 비교 검증하였다.

또한 장기간의 파랑 변화에 의한 연안표사 수지 검토를 위해, 전술한 약 40년에 대한 NOAA의 파랑자료를 검토하여 각 대표 파랑별 등급으로 구분한 후, 대표 파랑의 연간추이를 분석하였다. 그리고 2100년 시점의 변화된 파랑 환경을 고려하여 각 파랑 등급의 가중치를 결정한 후, 전술한 관측 자료와 동일 기간에 대해 침·퇴적 및 표사 이동량을 검토하였다.

2. 대표 파랑 분석

연구 대상 영역은 강원도 삼척항으로부터 남측으로 약 4km

거리에 있는 개방형 해안으로, 북측에 한재밀 해수욕장과 상맹방 해수욕장, 남측에 하맹방 해수욕장이 있으며 본 연구에서는 전체를 맹방 해수욕장으로 명명하도록 한다(Fig. 1). 마읍천 하류의 덕봉산에 인접하여 남측에 덕산 해수욕장이 위치하고 있고, 마읍천 하구가 맹방 해수욕장과 덕산 해수욕장 사이에 발달되어 있으나, 하천으로부터의 유사 공급 경로는 대부분 맹방 해수욕장으로 흘러드는 형태를 나타내고 있다. 또한 맹방 해수욕장과 덕산 해수욕장을 잇는 평균 해안선은 북을 기준으로 반시계 방향으로 약 45° 기울어져 있고 해안선을 따라 수심 분포가 이루어져 있다.

파랑 특성을 분석하기 위해 NOAA WaveWatchIII 파랑자료를 수집하였다. 파랑자료는 1979년부터 최근까지 0.5° 해상도에 대해, 3시간 간격의 파고와 주기, 파향 등의 정보로 이루어져 있다. 본 연구에서는 맹방 해변으로부터 가장 근접하여 약 26km

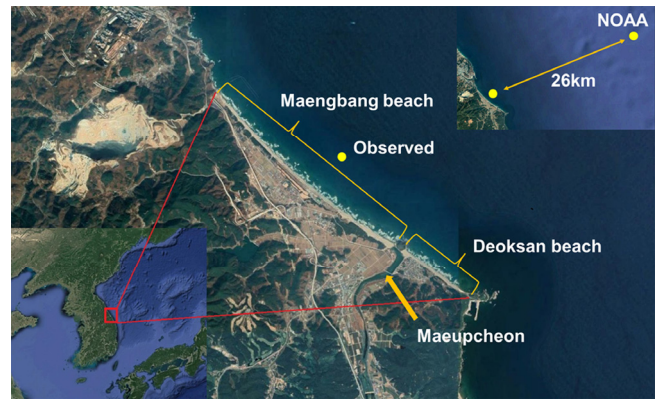
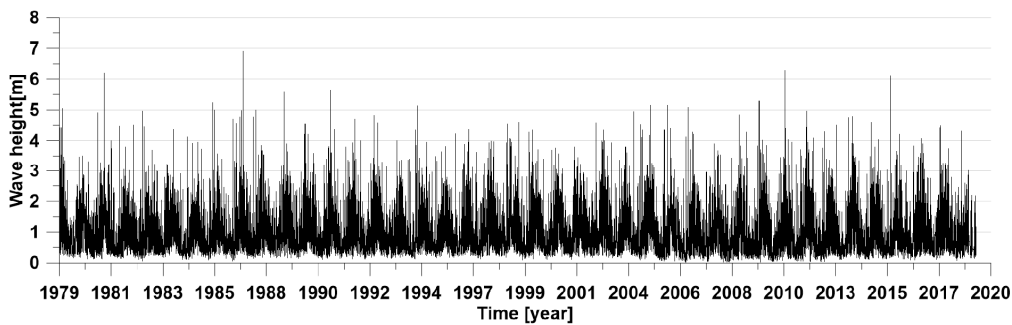
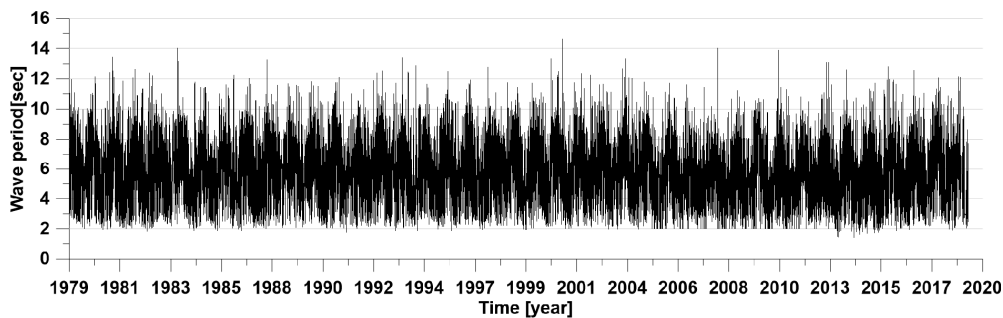


Fig. 1 Overview of target area and observation point (Maengbang beach, Gangwon, Korea)



(a) Time series of significant wave height



(b) Time series of wave period

Fig. 2 NOAA wave data at Maengbang beach offshore

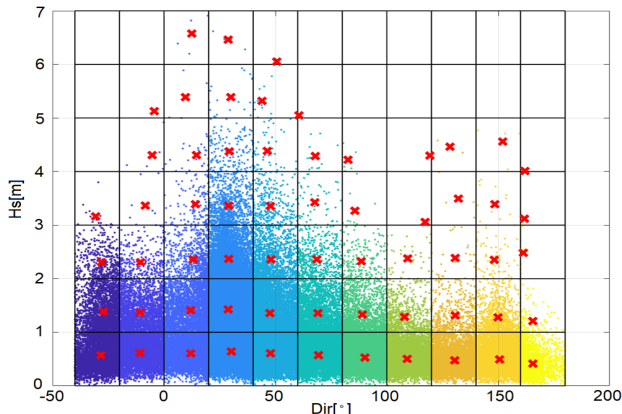


Fig. 3 Analysis of observation data using input reduction tool (The relationship between wave direction and significant wave height)

외해에 위치한 NOAA WaveWatchIII 격자(경도: 129.5°, 위도: 37.5°)로부터 약 40년간의 파랑자료를 수집하였고, 이 파랑자료에 대한 파고와 주기 시계열을 Fig. 2에 도시하였다.

대표 파랑은 입력 감소 기법(Input reduction tool)(Deltares, 2017)을 활용하여 생성하였다. 파고는 1m 고정 간격으로 0m ~ 7m까지 7등급, 파향은 -40° ~ 180°까지 20° 간격으로 11등급을 나눠 분석하였다. 다음에 분석된 파향-파고간의 관계를 Fig. 3에 도시하였다

분석된 대표 파랑 제원은 모두 62의 대표 파랑으로 구성되고 (Table 1), 순서는 수집된 파랑 전체 자료(118,083개) 중 각 대표 파랑의 비율에 따르며, Fig. 4에 도시한 바와 같다.

첫 번째 대표 파랑인 파고 0.61m, 주기 6.53s, 파향 47.74°인 파랑은 전체에서 약 12%를 차지하고 있고, 21번째 대표 파랑인 경우 전체에서 1%에도 미치지 못하는 결과를 보여주고 있다.

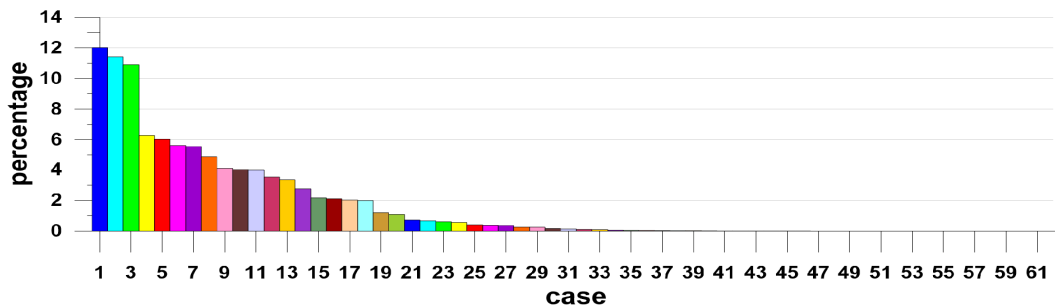


Fig. 4 Representative individual wave data ratio to total wave data

Table 1 Representative wave specifications

Order	H_s [m]	T_p [s]	θ_m [deg]	Count [%]	Order	H_s [m]	T_p [s]	θ_m [deg]	Count [%]
1	0.61	6.53	47.74	12.021	32	3.39	9.20	14.15	0.104
2	0.64	6.36	30.12	11.422	33	1.21	6.19	165.64	0.087
3	1.43	7.72	28.80	10.905	34	2.35	7.75	148.32	0.059
4	0.49	4.66	150.48	6.291	35	4.39	10.18	46.38	0.046
5	0.57	5.38	69.38	6.036	36	3.43	9.07	67.76	0.042
6	0.53	4.81	90.21	5.634	37	2.38	7.55	109.28	0.035
7	1.36	7.89	47.57	5.568	38	4.30	9.80	14.57	0.026
8	0.50	4.53	109.22	4.890	39	2.39	7.57	130.62	0.024
9	0.57	5.17	-28.36	4.083	40	5.39	10.72	30.08	0.016
10	0.47	3.97	130.38	3.985	41	3.16	8.12	-30.58	0.013
11	0.61	5.37	12.01	3.957	42	3.39	8.70	148.46	0.013
12	0.61	5.01	-10.89	3.527	43	4.29	9.43	67.98	0.011
13	2.37	8.78	29.01	3.323	44	5.32	10.40	43.94	0.010
14	1.41	7.12	11.95	2.743	45	3.27	8.51	85.56	0.008
15	1.36	6.83	69.07	2.164	46	3.37	8.31	-8.50	0.007
16	0.41	4.86	165.62	2.102	47	4.22	9.48	82.68	0.005
17	1.39	6.46	-27.04	2.026	48	2.48	8.61	161.21	0.004
18	1.36	6.54	-10.78	1.995	49	4.31	9.05	-5.39	0.004
19	1.33	6.63	88.93	1.196	50	4.56	9.83	151.96	0.004
20	2.36	8.75	48.02	1.085	51	3.50	8.33	132.06	0.004
21	1.28	6.34	149.99	0.712	52	6.46	11.09	28.90	0.004
22	3.36	9.44	28.97	0.664	53	6.58	11.59	12.33	0.004
23	1.29	6.23	107.93	0.606	54	5.39	10.34	9.53	0.004
24	2.36	8.39	13.20	0.562	55	4.47	9.63	128.43	0.002
25	2.36	8.03	68.64	0.406	56	6.06	11.19	50.69	0.002
26	2.31	7.50	-28.17	0.382	57	4.01	9.77	161.89	0.001
27	1.31	5.79	130.60	0.372	58	3.12	9.38	161.74	0.001
28	3.36	9.44	47.86	0.255	59	4.30	9.17	119.26	0.001
29	2.31	7.55	-10.59	0.250	60	3.06	8.50	117.08	0.001
30	2.33	7.80	88.48	0.163	61	5.05	8.95	60.46	0.001
31	4.38	9.88	29.36	0.131	62	5.13	9.69	-4.44	0.001

3. 수치모의

3.1 Delft3d 모델

Delft3d 모델은 흐름, 토사이송, 파랑, 수질, 바닥지형 변화와 생태환경의 모의를 수행하는 3차원 수치모형으로 네덜란드의 Delft 수리연구소에서 개발하였다. Delft3d 모델의 패키지는 상호 접속할 수 있는 다수의 모듈로 구성되어 있으며 수질, 파랑과 지형변화와 같은 모듈에 대한 동수역학적 기본 자료를 제공한다. Delft3d-flow의 연직방향 격자는 σ 좌표 접근법을 따르다고 정의하고 조석과 폭풍해일, 성층화되고 밀도가 지배적인 흐름, 강 흐름 모의, 담수가 만으로 유출되는 유출율, 염의 침투, 열 성층화, 냉각수 취수와 폐수 배출, 용해물질과 오염물의 이송, 파랑이 지배적인 흐름을 모의할 수 있다.

3.1.1 Delft3d-wave 모델

Delft3d-wave 모델(Deltares, 2018b)의 파랑변형 실험은 연안에서 파랑의 생성과 전파, 비선형 파랑상호작용 및 감쇄 등을 계산하기 위해 SWAN(Simulationg waved nearshore) 모델을 이용한다. 파랑작용 평형방정식(Wave action balance equation)을 기본 방적으로 하며, 파향 에너지 스펙트럼의 형태로 파랑 작용을 나타내고, 2차원 수평공간에 대해 파랑 스펙트럼의 변화를 식 (1)과 같이 에너지 평형방정식으로 계산한다.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} - \frac{S}{\sigma} = 0 \quad (1)$$

여기서, N 은 작용 밀도 스펙트럼, t 는 시간, x, y 는 수평방향 거리, σ 는 상대 각주파수, θ 는 방향, S 는 원천항(Source terms)을 나타낸다. 또한 $c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta$ 는 각각 x, y, σ, θ 에 대한 파랑의 전파속도를 나타내며, 작용 밀도 스펙트럼 $N(\sigma, \theta)$ 은 에너지 밀도 스펙트럼 $E(\sigma, \theta)$ 과 $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta)/\sigma$ 의 관계를 갖는다.

3.1.2 Delft3d-flow 모델

Delft3d-flow 모델(Deltares, 2018a)은 비압축성을 가정한 연속 방정식과 천수(Shallow water)화 및 Boussinesq 근사를 적용한 비압축성 유체에 대해 Navier Stokes 방정식을 계산한다. 조석, 파랑 및 바람 등의 외력 조건에 대해 해안, 강, 하구 등의 수리현상 및 유사 이동 등을 모의할 수 있으며, 연속 방정식은 다음과 같이 수심 평균한 편미분방정식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial (d+\eta)u}{\partial x} + \frac{\partial (d+\eta)v}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

여기서 η 는 해수면 높이, t 는 시간, d 는 수심, u, v 는 각각 x, y 방향에 대한 유속을 나타낸다.

수리 현상 및 유사 이동을 모의하기 위해, 비압축성 유체에 대한 Navier Stokes 방정식에 대해 천수 및 Boussinesq 근사를 적용한 수평방향 운동량 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} - fu + \frac{\tau_{bx}}{\rho_w (d+\eta)} - \frac{F_x}{\rho_w (d+\eta)} - \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} - fv + \frac{\tau_{by}}{\rho_w (d+\eta)} - \frac{F_y}{\rho_w (d+\eta)} - \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (4)$$

여기서 f 는 코리올리스(Coriolis) 파라미터, g 는 중력가속도, τ_{bx}, τ_{by} 는 각각 x, y 방향에 대한 해저면 전단응력, F_x, F_y 는 각각 x, y 방향으로 작용하는 외력, ρ_w 는 물의 밀도, ν 는 물의 점성계수를 나타낸다. 본 연구에서는 수치모형실험을 위해 수심평균 2차원 모델을 사용하였다.

Delft3d-morphology 모델은 앞서 계산된 파랑 및 수리 현상에 의해 모래 이송을 계산하여 바닥 저면의 변화를 산출한다. 비점착성 퇴적물 이동을 모의하기 위해 다음과 같이 소류사와 부유사로 구분된 Van Rijn(2001) 및 Van Rijn et al.(2003) 경험식을 사용하였다.

$$S_b = 0.006 \rho_s w_s D_{50} \left(\frac{v_{eff}^2}{(s-1)gD_{50}} \right)^{0.5} \left(\frac{(v_{eff} - v_{cr})^2}{(s-1)gD_{50}} \right)^{0.7} \quad (5)$$

$$S_{s,w} = f_{susw} \gamma \left(\frac{U_{on}^4 - U_{off}^4}{U_{on}^3 + U_{off}^3} \right) (0.007 \rho_s D_{50}) \left(\frac{(v_{eff} - v_{cr})^2}{(s-1)gD_{50}} \right) \quad (6)$$

$$v_{eff} = \sqrt{v_R^2 + U_{on}^2} \quad (7)$$

여기서, S_b 는 소류사의 이송률, $S_{s,w}$ 는 파랑과 관련된 부유사 이송률, g 는 중력가속도, f_{susw} 는 사용자 정의 변수, ρ_s 는 퇴적물의 밀도, w_s 는 침강속도, D_{50} 은 중앙입경, v_{cr} 은 이동하기 시작하는 임계 깊이 평균 속도(m/s), v_R 은 대수 속도 프로파일을 가정하여 바닥층 속도로부터 계산된 등가 깊이 평균 속도(m/s), U_{on} 및 U_{off} 은 단파에 의한 바닥층 인근의 고주파 웨드 속도(m/s)를 나타낸다.

3.2 모델 수립

수치실험 시 수치모형의 영역은 동서방향 10.2km, 남북방향 10.0km의 해역으로 설정하여 맹방 해수욕장과 덕산 해수욕장, 마읍천을 모두 포함하였다. 격자간격은 최소 15m, 최대 45m로 대상영역의 해상도를 최대한 반영하였으며, 이때 격자망은 82,460개의 격자로 구성하였다(Table 2). Fig. 5에 격자망도와 수심도를 도시하였고, 초기 수심은 2017년 3월 관측된 자료를 활용하였다.

Table 2 Operating conditions for numerical simulation

Domain size	10.2 km × 10.0 km
Grid size	Δx or $\Delta y = 15 \text{ m} \sim 45 \text{ m}$
Grid number	82,460 (434×190)
Computing time	1 day
Offshore boundary	Representative wave specifications

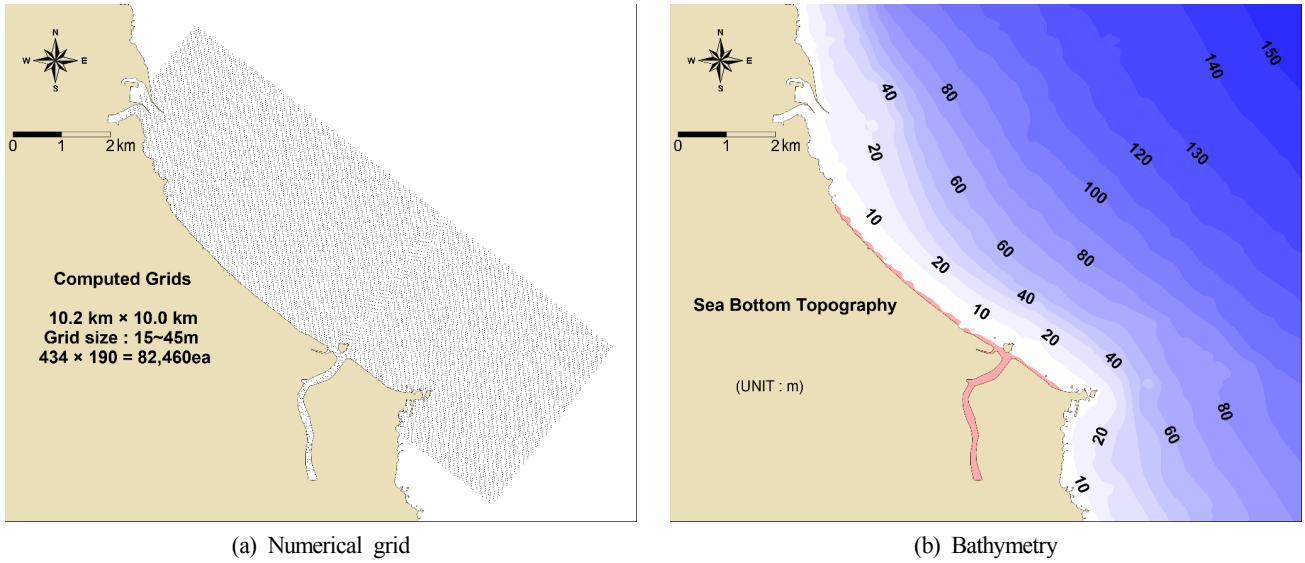


Fig. 5 numerical grid and bathymetry

3.3 모델 검증

3.3.1 파랑 검증

NOAA 자료를 이용하여 외해 경계조건을 구성한 후, 파랑변형 실험에 따른 파고의 변화를 비교·검토하였다. 비교 자료는 해안선으로부터 약 800m 이격되어 약 31.5m 수심 저면에 설치된 초음파식 기기로부터 2017년 3월 1일부터 2019년 1월 26일까지 약 23개월간 수집된 파랑 관측 자료를 이용하였다.

Fig. 6은 동기간의 관측자료와 수치결과에 대한 시계열을 비교한 결과이며, 관측치의 고파랑에 비해 수치결과의 파고가 다소 낮게 계산되었다. 이 결과는 NOAA WaveWatchIII 격자 간격이 0.5°로써 수심 및 지형의 해상도가 낮게 재현되어, 모델 입력 자료로 구성한 NOAA의 파고 자료가 낮게 산출된 결과로 판단된다. 오차 분석 결과 Bias는 0.05, RMSE(Root mean square error)는 0.23으로 산출되어, 진폭 및 위상 예측결과가 비교적 유사한 것으로 사료된다.

3.3.2 대표 파랑 및 가중치

2017년 3월부터 2019년 1월까지 약 23개월 내습한 파랑에 대해 각 대표 파랑 등급 별 퇴적물 이동 실험 결과에 미치는 가중치를 산정하였다. 가중치는 전술한 퇴적물 이동 실험 결과가 1일(24시간) 기준이므로, 각 파랑이 3시간 간격임을 고려하여 각

대표 파랑 등급별 파랑수를 8시간으로 나눠 산정하였고 Table 3에 제시된 바와 같다. 이 때 전체 파랑 수 5,617개 중 대상지에 내습할 가능성이 낮은 파향 각도를 고려하여, -40° ~ 180° 이외의 구간에 존재하는 파랑은 제외하여 검토하였고, 제외된 파랑 수는 230개이다.

3.3.3 침·퇴적량

각 대표 파랑별 퇴적물 이동 결과에 대표 파랑별 가중치를 적용하여 산정한 침·퇴적 결과 및 묘사 이동량을 Fig 7과 Fig 8에 도시하였다. 관측치의 경우 퇴적구간의 등고선 윤곽실선을 없애고 불투명도를 50%로 하여 도시하였고, 수치결과의 경우 퇴적구간의 등고선 윤곽실선을 적용하고 불투명도를 100%로 하여 중첩한 후 도시하였다. 2017년 3월과 2019년 1월 관측된 수심 변화결과로부터, 북측의 맹방 해수욕장과 남측의 덕산 해수욕장 모두 연안을 따라 300m ~ 400m의 구간마다 침식과 퇴적이 반복되는 양상을 나타내고 있다. 수치실험 결과를 관측치와 중첩하여 비교한 결과, 해안선으로부터 500m 이상 이격된 깊은 수심에서 나타난 관측치의 침·퇴적 양상은 수치결과에서는 나타나지 않고 있다. 그러나 연안을 따른 침·퇴적 양상 및 크기, 위치 등이 유사한 것으로 나타나, 가중치를 적용한 침·퇴적 실험 결과는 만족할 만한 것으로 판단된다.

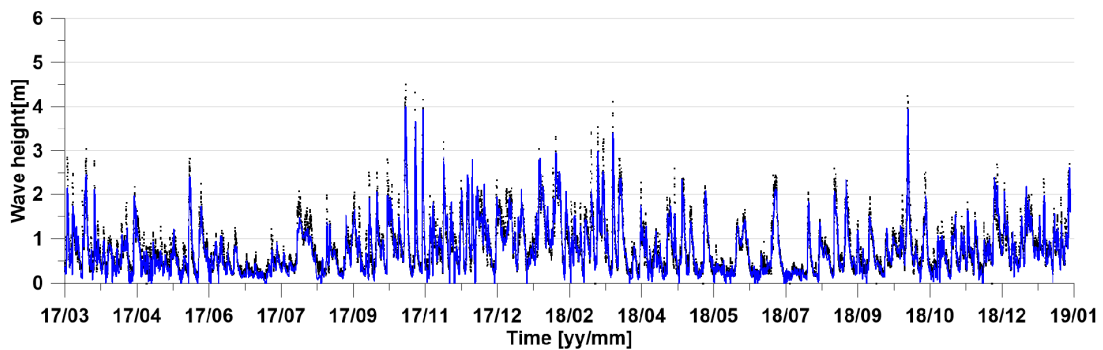


Fig. 6 Comparison of numerical results with observation data (● : Obs. ; — : Num.)

Table 3 Wave number and weighting factor of Representative wave specifications

Order	Wave number	Weighting factor	Order	Wave number	Weighting factor
1	505	63.13	32	2	0.25
2	534	66.75	33	4	0.50
3	432	54.00	34	0	0.00
4	572	71.50	35	5	0.63
5	276	34.50	36	0	0.00
6	312	39.00	37	1	0.13
7	287	35.88	38	0	0.00
8	198	24.75	39	0	0.00
9	221	27.63	40	0	0.00
10	299	37.38	41	2	0.25
11	260	32.50	42	0	0.00
12	186	23.25	43	0	0.00
13	122	15.25	44	0	0.00
14	187	23.38	45	0	0.00
15	135	16.88	46	0	0.00
16	162	20.25	47	0	0.00
17	161	20.13	48	0	0.00
18	115	14.38	49	0	0.00
19	78	9.75	50	0	0.00
20	62	7.75	51	0	0.00
21	59	7.38	52	0	0.00
22	20	2.50	53	0	0.00
23	42	5.25	54	0	0.00
24	37	4.63	55	0	0.00
25	12	1.50	56	0	0.00
26	29	3.63	57	0	0.00
27	19	2.38	58	0	0.00
28	10	1.25	59	0	0.00
29	28	3.50	60	0	0.00
30	6	0.75	61	0	0.00
31	7	0.88	62	0	0.00

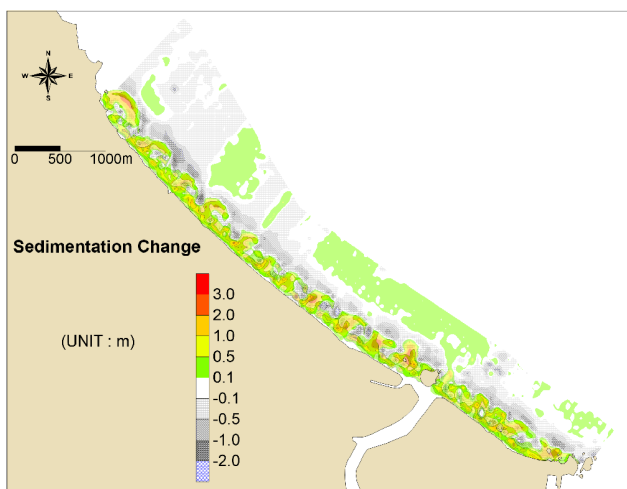


Fig. 7 Comparison of bathymetry change between observation data and numerical result (2017. 03 ~ 2019. 01)

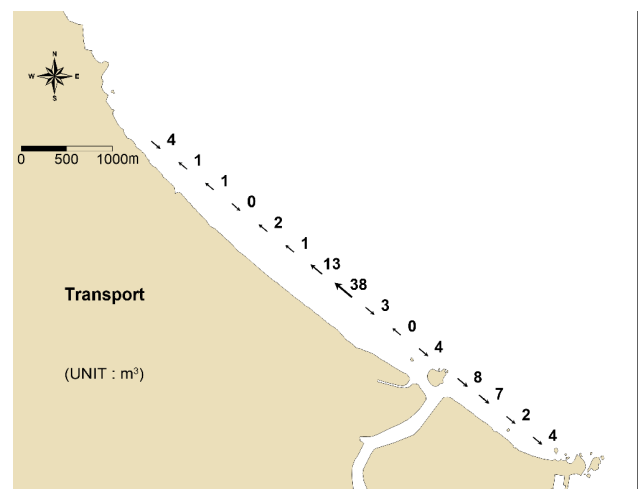


Fig. 8 Sediment budget transport result (2017. 03 ~ 2019. 01)

표사 이동량을 산정한 결과, 덕산 해수욕장의 경우 10m³/day 이하의 표사량이 연안을 따라 남측으로 이동하는 경향을 보이고 있다. 맹방 해수욕장의 경우 마읍천으로부터 약 1.3km 북측 해안 인근에서 국지적으로 많은 표사가 북으로 이송되는 양상을 나타내고 있다. 그러나 마읍천 북측의 맹방 해수욕장 전체를 고려할 때, 표사는 연안을 따라 남과 북으로 이송되는 양상이 혼재된 것으로 판단된다.

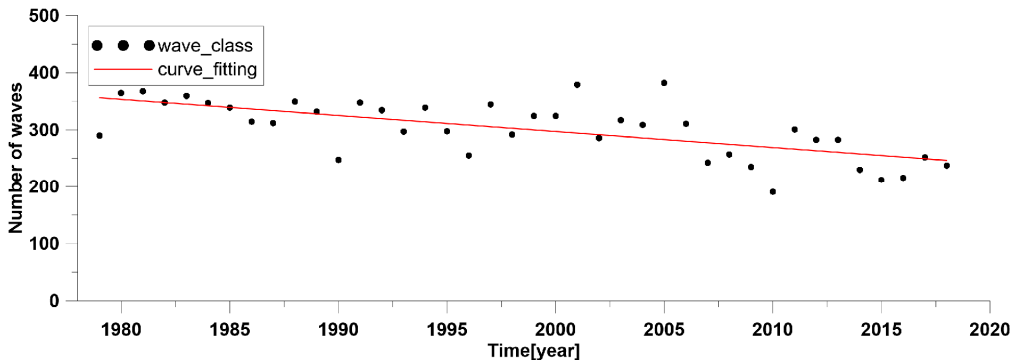
3.4 파랑 변화에 따른 표사환경의 변동 경향 분석

3.4.1 파랑 변화 분석

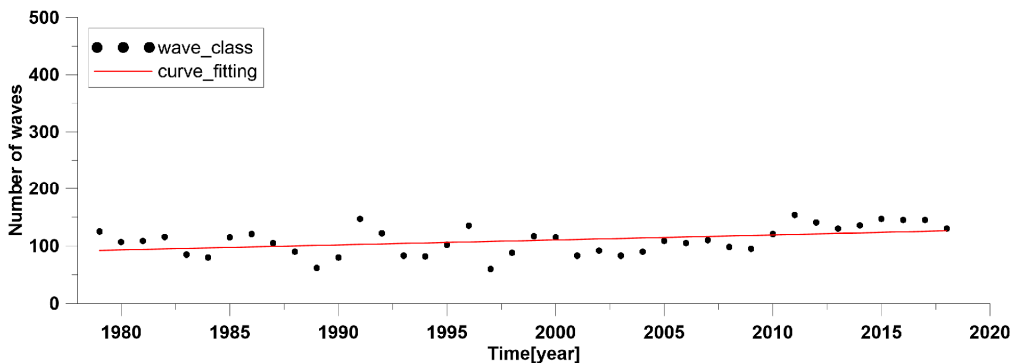
파랑 변화에 따른 표사환경의 변동 경향을 분석하기 위하여, NOAA의 파랑 자료를 활용하였다. 전체 파랑 자료를 앞서 생성한 62개의 대표 파랑 등급별로 분류한 후, 각 등급별 매년 파랑 개수의 추세를 분석하였다. 다음은 그 중 대표 파랑의 추세가

감소하는 경우(대표 파랑 3)와 증가하는 경우(대표 파랑 11) 및 거의 일정한 경우(대표 파랑 9)에 대한 결과를 Fig. 9에 도시하였다.

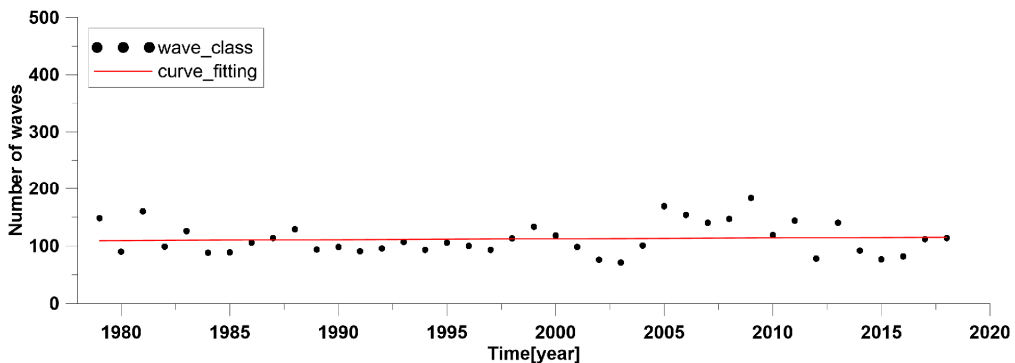
전술한 파랑 변화 분석 자료를 이용하여, 2100년경에 예상되는 대표 파랑의 개수를 검토하였고, 2018년을 비교 대상으로 하여, 2018년 대비 2100년의 파랑 변화 추이를 Fig. 10에 도시하였다. 대표 파랑 1의 경우 2018년 292개에서 2100년 126개로 약 57%가 감소하였고, 대표 파랑 4의 경우 2018년 230개에서 2100년 471개로 약 100% 증가한 모습을 보이고 있다. 파향-파고별 파랑 변화 추이(Fig. 11)를 살펴보면, 파향 20° ~ 100°, 파고 2m 이하의 파랑은 감소하는 반면, 2m 이상의 파랑은 증가하는 것으로 나타났다. 또한 파고 3 ~ 4m의 파랑은 0° 이하의 북측계열은 증가한 반면, 100° 이상의 남측계열에서는 감소하는 추세로 검토되었다.



(a) Representative wave number 3



(b) Representative wave number 11



(c) Representative wave number 9

Fig. 9 Annual wave number changes

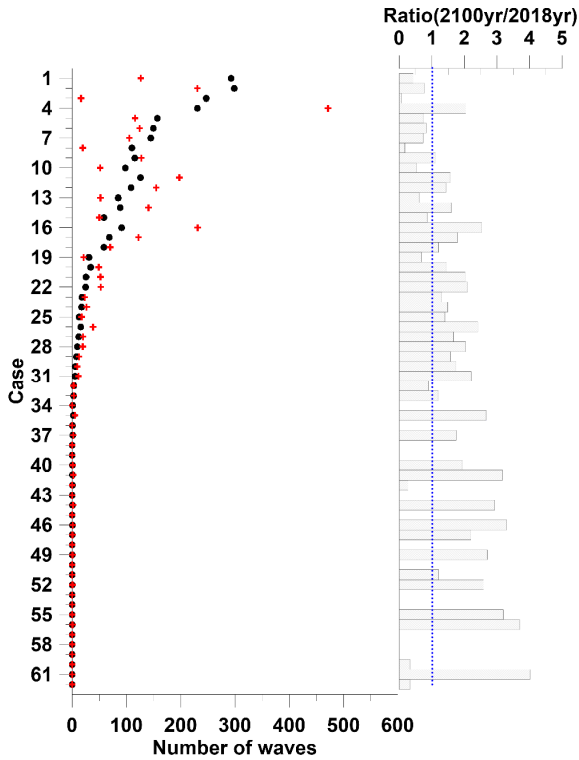


Fig. 10 Change rate of representative wave of 2100 year (black circle : 2018 year ; red cross : 2100 year)

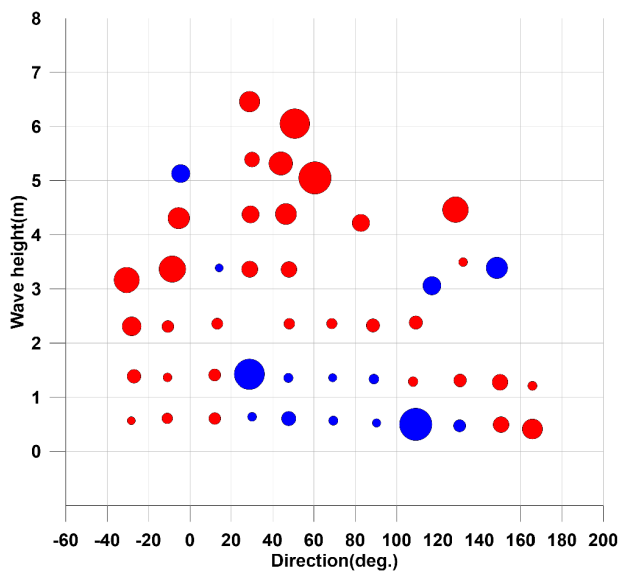
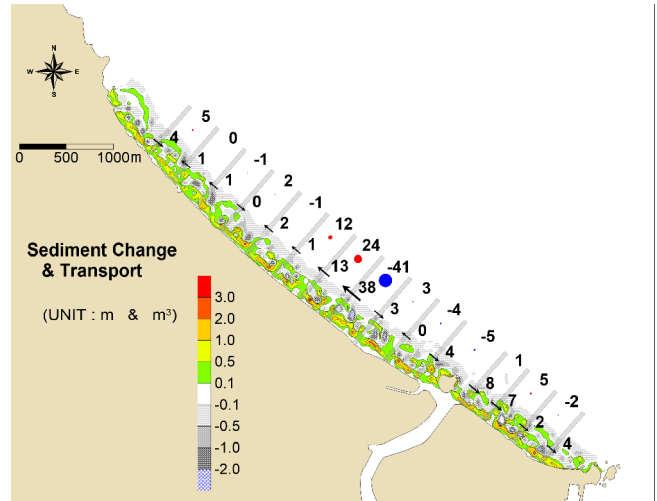


Fig. 11 Change rate bubble plot of representative wave of 2100 year (blue circle : minus ; red circle : plus)

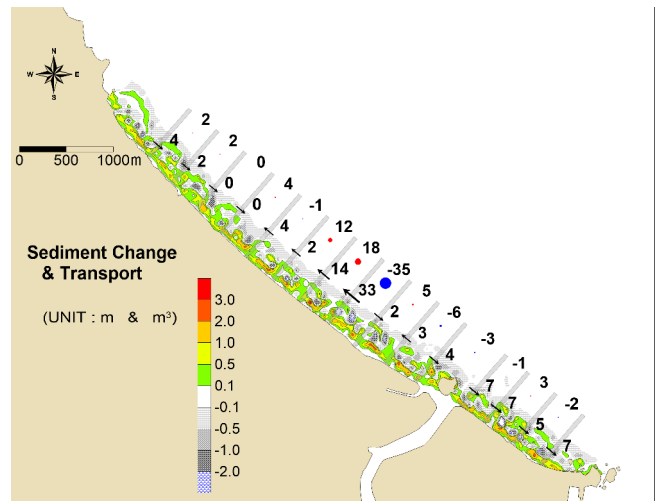
3.4.2 표사 환경의 변화 검토

대표 파랑의 연간 추이를 고려한 가중치를 적용하여, 최종 침·퇴적 결과를 산정하였다. 2100년 환경하의 동일기간(2099.03 ~ 2101.01)에 대한 수치 실험 결과를 현재 상태(2017.03 ~ 2019.01)와 비교하여 Fig. 12에 도시하였다.

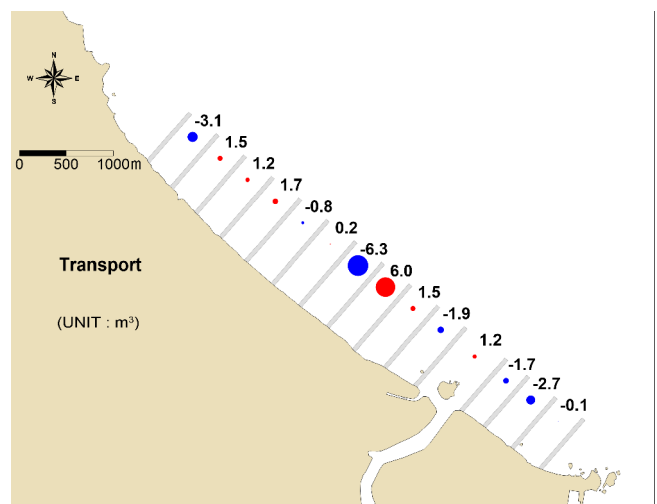
파랑 변화를 고려한 수치실험 결과, 연안을 따라 침식과 퇴적이 반복되는 양상은 등고선으로 확인할 수 있다. 이는 맹방 해수



(a) 2017.03 ~ 2019.01



(b) 2099.03 ~ 2101.01



(c) Comparison of sediment budget (2099.03 ~ 2101.01 - 2017.03 ~ 2019.01)

Fig. 12 Numerical result of sedimentation changes and sediment budget transport

육장을 비롯하여 덕산해수욕장까지 계속되고 있어, 현재의 수치 결과와 비교하여 큰 차이를 나타내지 않는 것으로 판단된다.

구간별 표사 이동량과 함께 구간별 순 표사량을 함께 나타내었고, 구간별 북측과 남측 경계로 이동하는 표사량을 계산하여 표사량이 증가한 경우 빨간 원으로, 감소한 경우 파란 원으로 값과 함께 도시하였다(Fig. 12(a), (b)). 표사 이동량을 산정한 결과, 현재상태와 유사하게 덕산 해수욕장의 표사량이 연안을 따라 남측으로 이동하는 경향을 보이고 있다. 그리고 맹방 해수욕장의 해안 인근에서 국지적으로 많은 표사가 북으로 이송되는 양상과 함께 마음천 북측의 해수욕장 전체에서 표사는 연안을 따라 남과 북으로 이동하는 양상이 혼재하는 것으로 나타났다. 또한 현재상태에 국지적인 표사 이동량을 보인 마음천 북측 1.3km 구간의 순 표사량 변화는, 파랑 변화가 발생한 경우 조금 둔화된 모습을 보이고 있으며, 구간에 따라 남하하는 표사 이동량이 국지적으로 증가하는 곳이 나타나고 있다. 현재 상태(2017.03 ~ 2019.01)와 비교하여 2100년 환경하의 동일기간(2099.03 ~ 2101.01) 표사량 차이를 각 구간별로 Fig. 12(c)에 도시하였다. 덕산해수욕장의 북측구간에서 표사량이 다소 감소하고 있고, 국지적 표사 이동량을 보인 맹방해수욕장 일부 구간에서 약 6m³의 표사량 증가와 감소 구간이 이웃하고 있다. 또한 맹방해수욕장 북측구간은 끝단을 제외하고 표사량이 다소 증가하는 결과를 나타내고 있다. 그러나 전체적인 구역별 순 표사량과 표사 이동량에서 큰 차이는 발생하지 않는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 장기간의 파랑과 기상 변화에 의한 모래의 이동 양상을 검토하기 위해, 동해 맹방 해수욕장을 대상으로 퇴적물 이동 실험을 수행하고 표사 이동량을 산정하고자 하였다.

파랑을 고려한 퇴적물 이동 실험을 수행하기 위해, 1979년부터 약 40년간의 NOAA 파랑 자료를 수집하였다. 퇴적물이동 실험은 초기 수심을 설정하고, 수집된 파랑 시계열 자료를 이용하여 입력조건을 구성하여, 퇴적물이동 실험을 실시하는 것이 정석이나, 이처럼 장기간의 수치모의를 수행하기 위해서는 막대한 계산 시간이 소요될 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 40년 간의 파랑자료를 입력 감소 기법(Input reduction tool)을 이용하여 1m 간격의 파고와 20도 간격의 파향으로 구분된 62개의 대표 파랑을 생성하여 전체 파랑을 대변하였다.

모델의 적정성 검토를 위해 2017년 3월부터 2019년 1월까지 NOAA 파랑 시계열을 입력조건으로 파랑변형 실험을 실시하였다. 동기간 맹방 해수욕장 전면의 파랑 관측자료와 비교한 결과, 관측치의 고파랑에 비해 수치결과의 파고가 다소 낮게 계산되었는데, 이는 NOAA WaveWatchIII 격자의 해상도가 낮아 발생한 결과로 판단된다. 그러나 오차분석결과 Bias는 0.05, RMSE는 0.23으로 나타나 수치결과에 의한 파랑 예측결과는 만족할 만한 수준으로 사료된다. 또한 동기간 관측된 수심 변화자료를 검증하기 위해, 전술한 대표 파랑에 의한 퇴적물이동 실험을 수행하였다. 실험 결과 연안을 따른 침·퇴적 양상 및 크기와 위치 등이 관측결과와 유사한 것으로 나타나, 대표 파랑을 이용한 수치 모의 결과는 타당한 것으로 판단된다.

장기간의 파랑 변화에 의한 연안표사 수치 평가를 위해, NOAA 전체 자료 중 대표 파랑별 연간추이를 분석하여 가중치를 산정하였다. 가중치가 적용된 2100년 환경의 퇴적물이동 실험 결과, 현재상태와 비교하여 침·퇴적 양상은 큰 변화가 발생하지 않는 것으로 나타났으며, 현재 상태에서 보인 국지적인 표사 이동량이 다소 둔화된 모습을 보이고 있다. 그리고 구간에 따라 남하하는 표사 이동량이 국지적으로 증가하는 곳이 나타나고 있으나, 전체적인 구역별 순 표사량 및 표사 이동량에서는 큰 차이가 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 장기간의 파랑 변화가 NOAA 자료에 의해 각 대표파랑의 연간 추이만을 반영한 것으로, 해수면 상승 및 풍속, 풍향의 변화 등을 고려한 기후 변화를 반영 시 표사 이동량 및 경향이 더 뚜렷해질 것으로 예상된다. 본 연구의 장기간 파랑 변화에 의한 모래의 이동 양상 결과를 통해 동해안의 연안 표사 수치 평가와 관리체계 수립의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2019년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Deltares, 2017. Description_and_User_Manual_Input_Reduction_Tool.
- Deltares, 2018a. Delft3D-FLOW User Manual.
- Deltares, 2018b. Delft3D-WAVE User Manual.
- Kim, D.S., Lee, G.R., 2015. Seasonal Changes of Shorelines and Beaches on East Sea Coast, South Korea. *Journal of the Korean Geographical Society*, 50(2), 147-164.
- Kim, M.J., Son, D.H., Yoo, J.S., 2018. Analysis of Seasonal Morphodynamic Patterns using Delft3D in Anmok Coast. *Journal of Coastal Disaster Prevention*, 5(4), 183-192. <http://doi.org/10.20481/kscdp.2018.5.4.183>
- Ministry of Oceans and Fisheries, 2019. Coast Erosion Status. [Online] Available at: <<http://coast.mof.go.kr/coastErosion/status/erosionLoad1.do>> [Accessed October 2019].
- NOAA/ National Weather Service, 2019. NWW3 Data Access. [Online] Available at: <<https://polar.ncep.noaa.gov/waves/download.shtml>> [Accessed October 2019].
- Van Rijn, L.C., 2001. General View on Sand Transport by Currents and Waves: Data Analysis and Engineering Modelling for Uniform and Graded Sand (TRANSPOR 2000 and CROSMOR 2000 models). Delft Hydraulics, The Netherlands.
- Van Rijn, L.C., Walstra, D.J., Grasmeyer, B.T., Sutherland, J., Pan, S., Sierra, J., 2003. The Predictability of Cross-shore Bed Evolution of Sandy Beaches at the Time Scale of Storms and Seasons using Process-based Profile Models. *Coastal Engineering*, 47, 295-327.