

한국 연안의 노출 및 침수 양상 분석

Analysis on the Emersion and Submersion Patterns of the Coastal Zone in Korea

고동휘* · 정신태** · 조홍연***

Dong Hui Ko*, Shin Taek Jeong** and Hong-Yeon Cho***

요 지 : 연안 해역의 노출 및 침수양상은 연안 서식생물의 서식환경에 직접적인 영향을 미치는 중요한 인자이다. 본 연구에서는 우리나라 연안 8개 지점의 조위자료를 이용하여 연안의 노출 및 침수양상을 빈도에 따라 5개의 영역으로 구분하고, 구분된 영역의 특성 분석을 수행하기 위하여 기존의 AHHW, ALLW 기준조위와 더불어 국제적인 기준조위로 널리 이용되는 HAT, LAT 기준조위를 추정하였다. 연안 8개 지점에 대한 노출 및 침수형태를 분류된 5가지 종류의 구역 중심으로 분석한 결과, 모든 지점에서 1일 2회의 노출과 침수가 발생하는 영역 3의 점유 시간 빈도가 87.2-88.2% 범위로 가장 우세한 것으로 파악되었으며, 조위와는 무관하게 비교적 일정한 비율을 유지하는 것으로 파악되었으며, 영역 2, 4는 각각 4% 이하, 8% 이상의 비율을 유지하고 있다. 한편, 조석 형태수에 의하면 일주조 우세로 분류되는 포항에서는 조석의 뚜렷한 연주조와 반년주조의 영향으로 그 비율이 각각 1.4%, 10.8% 정도로 증감하는 양상을 보이고 있다.

핵심용어 : 노출 및 침수 양상, 저서생물, 기준조위, 연안 해역, 빈도분포, 해안 영역구분

Abstract : The submersion and emersion patterns are key factors that directly influence the habitat environment of the coastal plants and animals. In this study, the coasts are divided into five zones (zones 1, 2, 3, 4, and 5 - not flooded, flooded once, flooded and exposed to air twice, exposed to air once, continuously flooded in the day, respectively) based on the patterns using tidal elevation data at the major eight stations and the domestic and international reference tidal levels, i.e., AHHW, ALLW, HAT and LAT, are also estimated to analyse the characteristics of the five distinct zones. Based on the results, the frequency of the zone 3 are dominant and forms from 87.2% to 88.2% (nearly constant) irrelevant with the tidal ranges at all stations. The taking-up percentages of the zones 2 and 4 show nearly constant, below 4% and over 8%, respectively. In Pohang station classified as the mainly diurnal tide, the percentages are decreased to 1.4% in zone 2 and increased to 10.8% due to the effects of the annual and semi-annual tidal components.

Keywords : emersion and submersion patterns, benthic animals, reference tidal levels, coastal zone, frequency distributions, coastal zonation

1. 서 론

조간대 및 해안 습지에 서식하는 식물 또는 동물은 다양한 물리 환경인자의 복합적인 영향을 받고 있으나, 가장 두드러진 환경인자는 조간대의 대기노출 (또는 침수) 시간이다 (Swinbanks, 1982; Ahn and Ko, 1992; Cho et al., 2001; Hartnoll & Hawkins, 1982; Pugh, 2004; Pugh and Woodworth, 2014). 한편, 연안에서는 노출과 침식에 의해 조간대가 형성되고 다양한 생태적 환경에 의해 저서생물이 살고 있으며 이로 인해 연안 생태계가 유지되고 있다. 그러나 지난 오랜 시간에 걸쳐 국내 연안에서는 개발 및 인공 구조

물이 진행되었으며 이로 인해 지역별로 조석 형태 변화가 발생 되고 있다.

연안 환경을 조성하는 조간대의 노출 및 침수 시간은 주로 1시간 간격의 1년 이상 조위자료를 사용하여 추정할 수 있다. Cho et al.(2004)은 국립해양조사원에서 제공하는 조위자료를 통계적으로 분석하여 우리나라 연안 조위자료의 확률밀도 함수 형태로 Gaussian 혼합분포(Gaussian Mixture Distribution, GMD) 함수 형태로 제안하였다. Jeong et al.(2008)은 이 분포함수에 경계조위 상한-하한을 설정하여 분포함수의 범위를 제한하는 이중절단 GMD 함수를 제안하였다. 한편, Jeong et al.(2005)은 국립해양조사원에서 제공하는 인천(율도), 목포, 여

*(주)해풍기술(Hae Poong Engineering Inc.)

**원광대학교 토목환경공학과(Corresponding author: Shin Taek Jeong, Department of Civil and Environmental Engineering, Wonkwang University, Iksandae-ro 460, Iksan, Jeonbuk, 54538, Korea. Tel:+82-63-850-6714, Fax:+82-63-857-7204, stjeong@wku.ac.kr)

***한국해양과학기술원, 해양자료과학실(Ocean Data Science Division, Korea Institute of Ocean Science & Technology)

수, 부산, 포항, 속초의 조화상수자료를 사용하여 조위의 발생확률분포를 추정 분석하였고, Cho et al.(2006)은 서해안 인천, 평택, 군산외항 및 목포 검조소의 1시간 간격 조위자료를 이용하여 조간대의 연속노출시간 특성을 분석하였다. 또한 Cho et al.(2010)은 Gaussian 혼합분포 함수 형태를 따르는 조위에 대하여 등가평균 및 등가표준편차를 산정하여 구조물 신뢰성 설계 시 활용할 수 있도록 하였으며 Jeong et al.(2012)은 한국 서해안에 위치한 12개 지점에서의 조위자료를 분석하여 조화상수를 이용하여 조간대 노출시간을 추정하는 공식을 개발하였다. 그리고 Ko et al.(2013)은 한반도 연안 주요 조위관측소 조위자료를 선정하여 확률분포 측면에서 분석을 수행함으로써 조위 특성 및 통계적인 매개변수들을 분석하였다.

최근 연안 개발이 활발해지면서 다양한 오염물질들이 유입되어 생태계 파괴와 자정 작용을 저하시키고 있기 때문에 이러한 조위 자료에 대한 다각적인 연구는 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 저서 생물의 생태 유지 및 연안 관리를 위

해 한국 연안 8개 지점(인천, 군산, 목포, 제주, 여수, 부산, 포항, 속초)의 일일 1회조 및 2회조 조위자료를 대상으로 노출 및 침수형태를 분석하였다.

2. 자료 및 분석방법

2.1 조위자료

국립해양조사원(<http://www.khoa.go.kr>)은 한국 연안 조위 관측소에서 조위를 관측하고 있으며, 품질검정을 통해 1시간 간격 조위자료를 제공하고 있다.

본 연구에서는 한반도 연안에 위치한 주요 검조소의 2015년 1시간 조위자료를 이용하여 노출 및 침수형태를 분석하였다. 분석에 사용한 조위관측소 위치는 Fig. 1에 보인 바와 같이 인천, 군산, 목포, 제주, 여수, 부산, 포항, 속초 총 8개 지점이며, 각 지점의 경도·위도 및 관측기간은 Table 1에 정리하였다.

2.2 분석 프로그램

국립해양조사원 홈페이지에서 제공하는 1시간 조위자료는 1개월, 또는 1년 동안의 자료이다. 본 연구에서는 최근 자료인 2015년 조위 자료를 Spreadsheet 자료로 변환하여 정리하였으며, MATLAB 프로그램을 이용하여 도시한 후, 자료의 결측 및 이상 자료(outlier) 여부를 확인하였다. 이상과 같은 과정을 정리하면 Fig. 2와 같다.

조화분석에 많이 사용되는 프로그램으로는 TASK(Tidal Analysis Software Kit) 2000과 T_Tide가 있다. TASK 2000은 TIRA tidal analysis programs(Murray, 1964)을 바탕으로 POL(Proudman Oceanographic Laboratory)에서 작성하였으며 35개 분조를 이용한다. 한편, T_Tide는 Foreman and Neufeld(1991)과 Godin(1991)이 Fortran 언어로 작성한 조화분석 프로그램을 MATLAB 언어로 변환하여 재작성한 프로그램으로 45개의 분조와 24의 천해 분조를 이용하여 조위를 예측할 수 있다. Pawlowicz et al.(2002)는 T_Tide를 이용하여 조화분석에 대한 오차분석을 수행한 바 있다. 본 연구에서는 MATLAB 언어를 사용하여 개발한 프로그램을 활

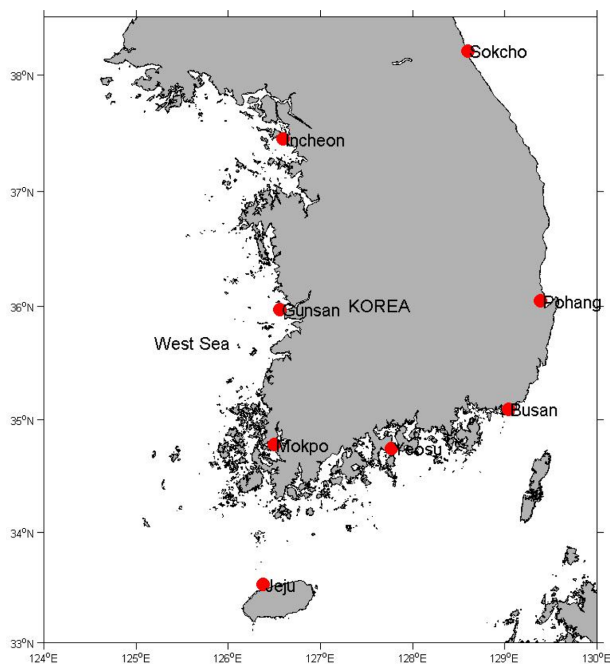


Fig. 1. Location map of the tidal gauging stations in Korean coasts.

Table 1. Information of the tidal gauging stations around the Korean coast.

Gauging stations	Location		Periods
	Latitude	Longitude	
Incheon	N 37° 27' 07"	E 126° 35' 32"	2015
Gunsan	N 35° 58' 32"	E 126° 33' 47"	2015
Mokpo	N 34° 46' 47"	E 126° 22' 32"	2015
Jeju	N 33° 31' 39"	E 126° 32' 35"	2015
Yeosu	N 34° 44' 50"	E 127° 45' 56"	2015
Busan	N 35° 05' 47"	E 129° 02' 07"	2015
Pohang	N 36° 02' 50"	E 129° 23' 02"	2015
Sokcho	N 38° 12' 26"	E 128° 35' 39"	2015

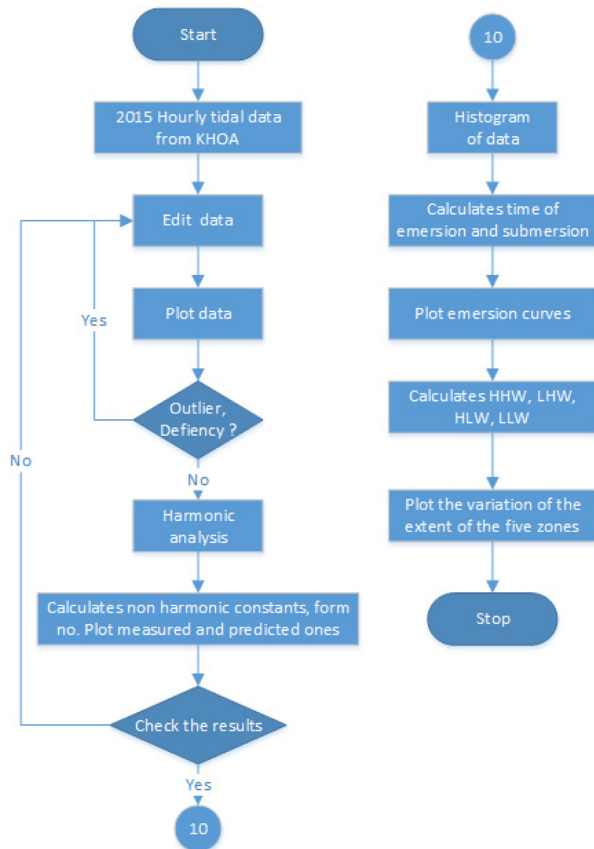


Fig. 2. Steps of hourly tidal data analysis.

용하여 145개의 분조를 사용하여 분석을 수행하였다.

해수면 관측결과를 조화분석을 이용하여 나타내는 경우, 다음과 같이 표현한다(Pugh and Woodworth, 2014).

$$h(t) = Z_0 + \sum_{j=1}^m A_j f_j \cos[\omega_j \cdot t - g_j + (V_j + u_j)] \quad (1)$$

여기서, Z_0 는 평균 해수면, A_j 는 진폭, ω_j 는 각속도, g_j 는 지각, V_j 는 시각 $t=0$ (초기 기준시각, 본 연구의 경우, 1989년 12월31일 12시 기준)에서 위상각이며, f_j , u_j 는 각각 조석분조(j)의 nodal factor와 nodal angle이다.

일조부등은 반일조와 일일조가 겹쳐 생기는 것이지만, 일

일조의 진폭의 합의 반일조 진폭의 합에 대한 비가 커질수록 심해진다. 이 비를 조석의 형태수, F 라하며, 다음과 같이 표현된다.

$$F = \frac{H_o + H'}{H_m + H_s} \quad (2)$$

해상풍력 발전시설은 국제적인 설계기준조위로 최고천문조위(highest astronomical tide, HAT)와 최저천문조위(lowest astronomical tide, LAT) 기준을 요구하고 있다. 우리나라는 설계기준조위로 약최고고조위(AHHW)와 약최저저조위(ALLW) 기준을 사용하여 왔기 때문에 국제적인 설계기준을 만족하기 위해서는 HAT, LAT 추정이 필요하다. 본 연구에서는 조위 자료를 이용하여 HAT, LAT 기준조위를 추정하였다. HAT와 LAT는 태음의 완전한 주기인 18.6년간 발생할 수 있는 최고 극 조위와 최저극 조위이며, 수개의 분조에 의해 이론적으로 추정할 수 있다(IEC, 2009).

3. 조화분석 결과

8개 지점에 대한 조화분석결과를 Table 2에 정리하였다. 형태수의 경우 부산, 포항, 속초의 경우 형태수가 일반적인 경향을 보이지 않는다. 따라서 이들을 포함한 대부분의 동해안은 연주조인 S_a 분조와 반년주조인 S_{sa} 분조를 포함시키는 방법을 고려할 만하다(Jeong et al., 2005; Kang et al., 2014).

또한 산정된 HAT는 현행 기준 설계기준인 약최고고조위(AHHW)에 비하여 크고, LAT는 약최저저조위(ALLW)에 비하여 작은 일반적인 경향을 보이고 있으나(Jeong et al., 2016), 그 정량적인 크기 차이는 해역에 따라 HAT-AHHW 차이가 ALLW-LAT 차이보다 크게 또는 작게 나타나는 비대칭 양상을 보이고 있는 것으로 파악되었다.

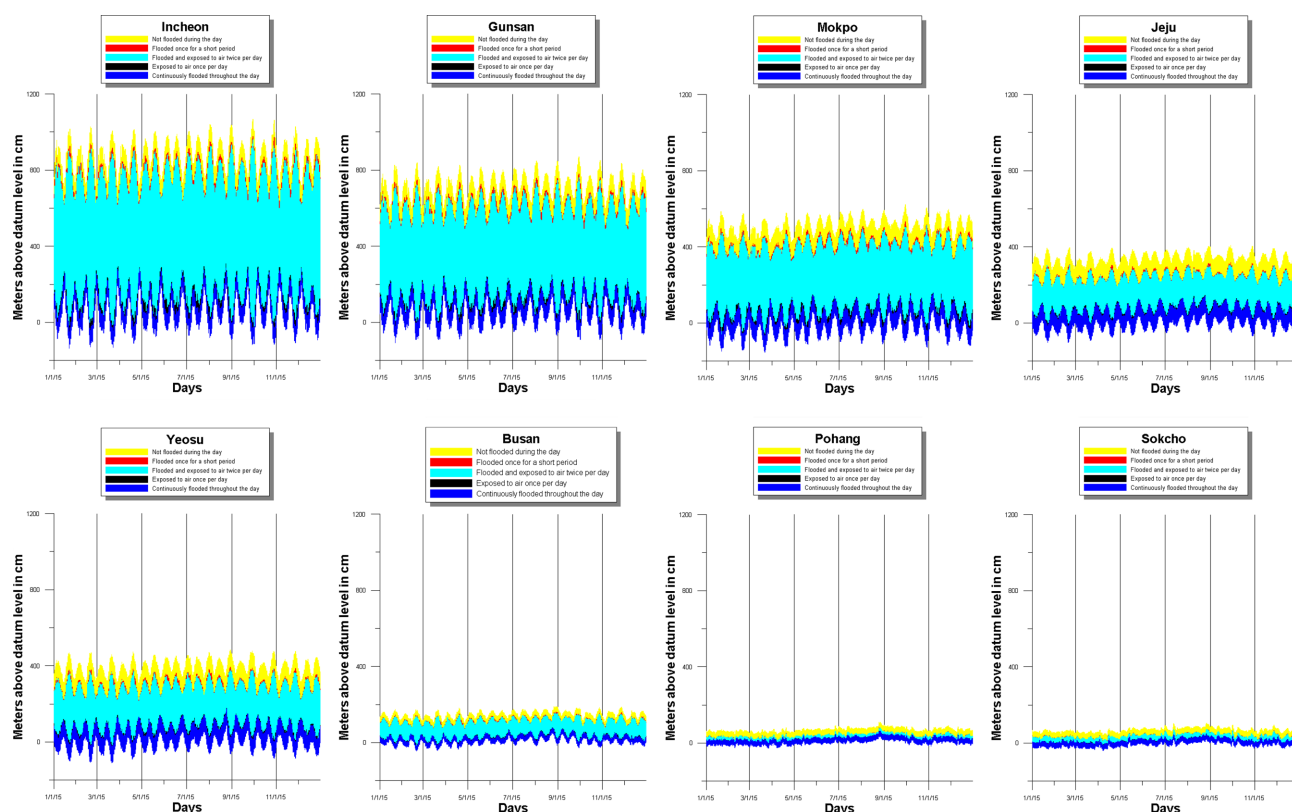
주요 8개 지점에 대한 비조화상수를 Table 3에 정리하였다. 이미 알려진 바와 같이 서해, 남해, 동해 각 해역별로 대조차, 소조차, 평균조차에 큰 편차가 있음을 알 수 있다. 한편, 국제적인 조위기준으로 이용되는 HAT-LAT 범위는 평균 조차의 범위에 비하여 대략 2배 내외(1.8 - 2.6)인 것으로 파

Table 2. Harmonic analysis results for the tidal gauging stations.

Gauging stations	H_m (cm)	H_s (cm)	H_o (cm)	H' (cm)	Form no, F	AHHW (cm)	ALLW (cm)	HAT (cm)	LAT (cm)
Incheon	284.57	112.90	28.59	38.85	0.17	464.91	-464.91	508.59	-515.83
Gunsan	215.96	83.25	26.11	34.55	0.20	359.87	-359.87	400.95	-390.35
Mokpo	145.74	49.32	23.61	30.42	0.28	249.10	-249.10	287.88	-315.33
Jeju	68.77	28.05	16.96	22.98	0.41	136.76	-136.76	166.21	-187.90
Yeosu	94.56	43.69	12.85	18.80	0.23	169.91	-169.91	214.20	-209.69
Busan	38.06	18.06	1.57	4.37	0.11	62.06	-62.06	87.15	-84.40
Pohang	3.22	0.68	4.21	4.07	2.12	12.18	-12.18	30.73	-25.17
Sokcho	6.93	2.47	4.66	5.04	1.03	19.11	-19.11	39.93	-32.19

Table 3. Non-tidal constants of the tidal gauging stations.

Gauging stations	HWOSt (cm)	HWONT (cm)	LWONT (cm)	LWOSt (cm)	Spring Range (cm)	Neap Range (cm)	Mean Range (cm)
Incheon	862.37	636.58	293.23	67.44	794.93	343.35	569.14
Gunsan	659.09	492.58	227.16	60.66	598.43	265.42	431.92
Mokpo	444.16	345.52	152.68	54.03	390.13	192.84	291.48
Jeju	233.58	177.49	96.03	39.94	193.64	81.46	137.55
Yeosu	308.16	220.78	119.04	31.66	276.50	101.74	189.12
Busan	118.17	82.06	42.06	5.94	112.23	40.00	76.11
Pohang	16.08	14.72	9.64	8.28	7.80	5.08	6.44
Sokcho	28.52	23.57	14.66	9.71	18.81	8.91	13.86

**Fig. 3.** The variations of the extent of the five zones for 8 tidal stations.

악되었으나, 동해안의 경우 포항, 속초에서 각각 8.7배, 5.2배로 파악되었다.

4. 노출 및 침수형태

조간대에 서식하는 식물 및 동물에 있어서 대기중에 노출되는 시간은 이들의 생존에 지대한 영향을 미친다. 특정 해역에 있어서 조위자료를 분석하면 모두 5가지 형태의 지역이 존재한다. 이들 지역은 고고조(Higher High Water; HHW), 저고조(Lower High Water; LHW), 고저조(Higher Low Water; HLW), 그리고 저저조(Lower Low Water; LLW)에 의하여 구분된다. 구역 1은 HHW보다 높은 해역으로 항상 대

기중에 노출된다. HHW와 LHW 사이 구역 2는 하루에 한번 짧은 시간동안 침수되며, 장시간 동안 노출되는 구역이다. 구역 3은 LHW와 HLW 사이로서 일일 2회의 노출과 침수가 발생한다. 구역 4는 HLW와 LLW 사이로서 하루 한번 짧은 기간 동안 노출된다. 구간 5는 LLW보다 낮은 구간으로 연속적으로 침수되어 있는 구역이다.

주요 8개 지점에 대한 노출 및 침수형태를 5가지 종류의 구역 중심으로 Fig. 3에 도시하였다. 인천, 군산, 목포, 제주, 여수, 부산, 포항, 속초 8개 지점 모두 구역 3, 즉 일일 2회의 노출과 침수가 발생하는 구역이 87%이상으로 다른 구역에 비하여 넓다는 것을 알 수 있다. 반면 동해안에 위치한 포항과 속초의 경우 구역 2는 줄어들고, 구역 4는 증가한다는 것을 알 수 있다.

Table 4. The period of different levels for the tidal gauging stations.

Station \ zone	2 (unit: hour/%)	3 (unit: hour/%)	4 (unit: hour/%)	Total (unit: hour/%)
Incheon	362/4.1	7,663/87.5	735/8.4	8,760/100
Gunsan	358/4.1	7,663/87.5	739/8.4	8,760/100
Mokpo	356/4.1	7,665/87.5	739/8.4	8,760/100
Jeju	332/3.8	7,689/87.8	739/8.4	8,760/100
Yeosu	357/4.1	7,655/87.4	748/8.5	8,760/100
Busan	322/3.7	7,642/87.2	796/9.1	8,760/100
Pohang	122/1.4	7,694/87.8	944/10.8	8,760/100
Sokcho	196/2.2	7,723/88.2	841/9.6	8,760/100

이러한 경향은 노출 및 침수 양상에 따라 구분된 영역이 전체 영역에서 차지하는 비중을 정리한 Table 4에도 나타나고 있다. 우리나라의 경우 전 해역에서 일일 2회의 노출과 침수가 발생하는 영역 3의 확률빈도가 87.2 - 88.2%에 이를 정도로 높게 나타난다. 그리고 이런 확률빈도는 조위와는 무관하게 비교적 일정한 비율을 유지하는 것으로 파악되었다. 영역 2, 4의 발생빈도는 각각 4% 이하, 8% 이상의 비율을 유지하고 있다. 한편, 조석 형태수에 의하면 일주조 우세로 분류되는 포항에서는 조석의 뚜렷한 연주조와 반년주조의 영향으로 영역 2, 4에서의 발생빈도 비율이 각각 1.4%, 10.8% 정도로 증감하는 양상을 보이고 있다.

5. 결론 및 토의

본 연구에서는 한반도 연안에 위치한 인천, 군산, 목포, 제주, 여수, 부산, 포항, 속초 총 8개 검조소의 1시간 조위자료를 이용하여 조화분석을 실시하고, 노출 및 침수형태를 분석하였다. 조화분석은 MATLAB 언어를 사용하여 개발한 프로그램을 활용하여 145개의 분조를 사용하여 수행하였으며, Nodal factor를 고려하였다.

Table 2의 결과, 부산, 포항, 속초의 경우 형태수가 일반적인 경향을 보이지 않는다. 따라서 이들을 포함한 대부분의 동해안은 연주조인 S_a 분조와 반년주조인 S_{sa} 분조를 포함시키는 방법을 고려할 만하다. 또한 선정된 HAT는 현행 기준 설계기준인 약최고고조위(AHHW)에 비하여 크고, LAT는 약최저저조위(ALLW)에 비하여 작다. 따라서 설계 시 적용하고자 하는 기준의 선택에 신중을 기하여야 한다.

인천, 군산, 목포, 제주, 여수, 부산, 포항, 속초 8개 지점 모두 구역 3, 즉 일일 2회의 노출과 침수가 발생하는 구역이 차지하는 비중이 87% 이상으로 다른 구역에 비하여 높다는 것을 알 수 있다. 반면 동해안에 위치한 포항과 속초의 경우 구역 2의 비중은 감소하는 반면, 구역 4의 비중은 증가한다는 것을 알 수 있다. 우리나라의 경우 전 해역에서 일일 2회의 노출과 침수가 발생하는 확률이 87.2-88.2%에 이를 정도로 높게 나타났다.

이 결과는 생태계 및 연안 관리의 기초 자료로서 활용될 수 있으며, 해상 작업시간 분석 및 구조물 설계에도 사용이 가능하여 사업 리스크를 최소화 할 수 있다. 차후 추가적으로 한반도 연안 주요 검조소의 1시간 조위자료를 이용하여 Nodal factor를 고려한 조화분석을 실시하고, 노출 및 침수형태를 분석하는 것이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 에너지기술개발사업인 “해상풍력발전단지 해저 전력망 설치 및 운영 기술개발(과제번호 : 20153010024550)”과 교육과학기술부의 재원으로 지원을 받아 수행된 산학협력 선도대학(LINC) 육성사업의 연구결과입니다.

References

- An, S.M., and Koh, C.-H. (1992). Environments and distribution of Benthic Animals on the Mangyung-Dongjin Tidal Flat, West Coast of Korea, Journal of the Oceanological Society of Korea, 27(1), 78-90 (in Korean).
- Cho, H.Y., Jeong, S.T., and Oh, Y.M., (2004). Estimation of Probability Density Function of Tidal Elevation Data, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 16(3), 152-161 (in Korean).
- Cho, H.Y., Jeong, S.T., Lee, K.-H., and Kim, T.H., (2010). Analysis of the Mean and Standard Deviation due to the Change of the Probability Density Function on Tidal Elevation Data, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 22(4), 279-285 (in Korean).
- Cho, H.Y., Kim H., and Cho. B.J., (2006). Characteristic analysis of the exposure durations in the western tidal flat, Vol. 8, 73-84. Research on Fisheries Infrastructure Promotion, Korea Fisheries Infrastructure Promotion Association.
- Choi G.W., Hwang J.S., Ji K.J., and Lee E.H., (2001). Research on the characteristics of the tidal flats in Korea. Rural Research Institute, Korea Agricultural and Rural Infrastructure Corporation, Report No. 2001-05-16.

- Foreman, M.G.G. and Neufeld, E.T. (1991). Harmonic tidal analyses of long time series. *International Hydrographic Review* 68(1), 85-108.
- Godin, G. (1991). The analysis of tides and currents. In: Parker, B.B. (Ed.), *Tidal Hydrodynamics*. Wiley, New York, 675-709.
- Hartnoll, R.G. and Hawkins, S.J., (1982). The emersion curve in semidiurnal tidal regimes, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 15, 365-371.
- IEC (2009). IEC 61400-3: Wind turbines-Part 3: Design requirements for offshore wind turbines.
- Jeong, S.T., Cho, H.Y., Jeong, W.D., and Yang, J.-S., (2005). Analysis on the Occurrence Probability Distribution of Tidal Levels using Harmonic Constants. *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, 25(1B), 51-57 (in Korean).
- Jeong, S.T., Cho, H.Y., Kim, J.D., and Ko, D.H., (2008). Estimation of Probability Density Function of Tidal Elevation Data using the Double Truncation Method. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 20(3), 247-254 (in Korean).
- Jeong, S.T., Cho, H., and Ko, D.H., (2012). Development of the Inter-tidal Exposure Duration Formulae Using Tidal Harmonic Constants, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 24(5), 319-325 (in Korean).
- Jeong, S.T., Yoon, J.T., Cho, H., Ko, D.H., and Kang, K.S., (2016). Analysis on the Estimation Error of the Lowest and Highest Astronomical Tides using the Wido Tidal Elevation Data, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 28(2), 101-108 (in Korean).
- Kang, J.W., Joo, Y.-M., Cho, H., and Kweon, H.-M., (2014). Spatio-temporal Variability of AHHW in Relation with the Design Sea Level, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 26(2), 72-80 (in Korean).
- Ko, D.H., Jeong S.T. and Cho, H., (2013). Statistical characteristics of hourly tidal levels around the Korean Peninsula, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 25(6), 365-373 (in Korean).
- Korea Hydrographic and Oceanographic Administration (KHOA), Homepage <http://www.khoa.go.kr> (in Korean).
- Pawlowicz, R., Beardsley, B. and Lentz, S. (2002). Classical Tidal Harmonic Analysis Including Error Estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers and Geosciences*, 28, 929-937.
- Pugh, D. (2004). *Changing Sea Levels: effects of tides, weather and climate*, Chapter 9, Cambridge University Press.
- Pugh, D. and P. Woodworth. (2014). *Sea-Level Science: Understanding Tides, Surges, Tsunamis and Mean Sea-Level Changes*, Cambridge University Press.
- Swinbanks, D.D., (1982). Intertidal exposure zones: A way to subdivide the shore, *J. of Experimental Marine Biology and Ecology*, 62, 69-86.

Received 29 September, 2016

Revised 26 October, 2016

Accepted 28 October, 2016