속초 연안의 파랑환경 변화양상 분석 Analysis of the Variation Pattern of the Wave Climate in the Sokcho Coastal Zone

조홍연* · 정원무** · 백원대*** · 김상익****

Hongyeon Cho*, Weonmu Jeong**, Wondae Baek*** and Sangik Kim****

요 지 : 속초 연안에서 관측한 장기간의 파랑자료를 이용하여 다양한 파랑환경 특성을 분석하였다. 파랑환경 분석 결과 발견된 대표적인 특성은 다음과 같다. 파고 및 주기의 평균에 대한 변동계수는 각각 0.11, 0.02 정도로 주기 평균의 변동계수가 매우 낮은 것으로 파악되었다. 또한 변동주기 성분분석결과 1년 주기성분이 우세하였으며, 변동 범위는 0.24 m, 주기는 0.56초로 파악되었다. 계절 변동범위도 연간 변동범위보다 약 2배 정도 크다. 한편 파고 및 주기자료의 확률밀도함수를 추정한 결과, 단주기파의 파고 및 주기는 대수정규분포와 GEV 분포함수와 유사하며, 장 주기파의 경우, 파고는 대수정규분포, 주기는 GEV 분포함수와 유사하지만, KS 검정결과는 모두 기각으로 판정되었다. 파고 및 주기자료는 AR(3) 모형으로 추정된다. 파랑 강도를 분석한 결과는 연속 지속시간의 평균 및 최대지속시간은 파고의 멱함수(power function) 함수로 감소하였으며, 전체 지속시간은 지수함수 형태로 감소하는 양상을 보였다. 또한 속초연안 환경은 전형적인 파랑 우세환경으로 파악되었다.

핵심용어 : 파랑환경, 빈도분포, 계절 변화, 자기상관함수, 교차상관함수, 파랑 지속시간

Abstract : Exploratory data analysis was carried out by using the long-term wave climate data in Sokcho coastal zone. The main features found in this study are as follows. The coefficient of variations on the wave height and period are about 0.11 and 0.02, respectively. It also shows that the annual components of the wave height and period are dominant and their amplitudes are 0.24 m and 0.56 seconds, respectively. The amount of intra-annual variation range is about two times greater than that of the inter-annual variation range. The distribution shapes of the wave data are very similar to the log-normal and GEV(generalized extreme value) functions. However, the goodness-of-fit tests based on the KS test show as “rejected” for all suggested density functions. Then, the structure of the time-series wave height data is roughly estimated as AR(3) model. Based on the wave duration results, it is clearly shown that the continuous and maximum duration is decreased as a power function shape and the total duration is exponentially decreased. Meanwhile, the environment of the Sokcho coastal zone is classified as a wave-dominated environment.

Keywords : wave climate, frequency distribution, seasonal variation, auto-correlation function, cross-correlation function, wave duration

1. 서 론

연안의 파랑환경(wave climate)은 조석환경과 더불어 지형 및 생물 서식환경에 직접적으로 영향을 미치는 대표적인 물리환경 인자이다. 국립해양조사원의 조위관측소 검조자료를 이용하여 조석환경을 파악하는 연구는 풍부한 반면, 파랑환경 분석에 관한 연구는 장기적이고 연속적인 관측 자료가 부족하여 상대적으로 미흡한 실정이다. 또한 파랑관측이 파랑모형 검증 및 단기간의 파랑정보 추출을 목적으로 수행되어 장기간의 파랑환경 특성 분석에는 부적합한 경우

도 빈번하다. 그러나 파랑환경은 연안의 퇴적환경, 생물 서식환경 등에 영향을 미치는 인자이고 파랑에너지 평가에 필수적이기 때문에 장기간의 자료를 이용한 파랑 환경 특성 분석 연구가 필요하다. 파랑환경 분석에서는 설계 관점에서 최대 또는 극한 파랑정보보다는 장기간의 평균 파랑정보에 관심을 두고 있다. 우리나라 연안의 장기간의 파랑에 대한 통계적인 특성분석 연구는 해안구조물 설계를 위한 후측(hindcasting) 자료 생성, 평상파 산정 및 연안 파랑에너지 평가 목적(이 등, 1988; 안·천, 2004; 송 등, 2004; 정 등, 2007)으로 수행된 바 있으나, 파랑 환경 특성 파악을

* 한국해양연구원 해양환경보전연구부 책임연구원(Corresponding author, Marine Environment & Conservation Research Department, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan PO Box 29, Seoul 425-600, Korea. hycho@kordi.re.kr)

** 한국해양연구원 연안개발·에너지연구부 책임연구원(Coastal Engineering & Ocean Energy Research Department, KORDI)

*** 한국해양연구원 연안개발·에너지연구부 선임기술원(Coastal Engineering & Ocean Energy Research Department, KORDI)

**** 한국해양연구원 기후연안재해연구부 책임기술원(Climate Change & Coastal Disaster Research Department, KORDI)

위한 연구는 장기간의 관측자료 부재로 미흡한 실정이다. 장기간의 자료를 보유하고 있는 국가에서도 기후변화 영향분석의 관점에서 매우 다양한 통계적인 분석을 통하여 수행하고 있다(Marthiesen, 1994; Sobey & Orloff, 1999; Holthuijsen, 2007; Dodet et al., 2010). 그러나 단기 파랑정보와 설계 파랑정보 추출이라는 중간영역에 위치하는 파랑환경 특성분석에 관한 연구는 다소 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 장기 파랑자료의 통계적인 특성분석에 중점을 두고 속초 연안에서 약 8년 동안 관측한 파랑자료를 이용하여 기본적인 통계분석만이 아니라 탐구적 자료해석(exploratory data analysis, EDA)의 관점에서 다양한 파랑 특성 분석을 수행하여 뚜렷하고 기존의 분석결과에서 제시되지 않은 정량적인 파랑 환경 특성을 파악하여 제시하는 것을 목적으로 한다.

2. 속초연안의 파랑자료

본 연구에서 사용한 속초 연안의 파랑 관측 자료는 한국해양연구원에서 2003년 6월 1일부터 2011년 5월 31일까지 8년 동안 수압식 파고계를 사용하여 0.5초 간격으로 연속 측정된 자료이다(Fig. 1). 관측기기의 점검 및 교체시기에 해당하는 2~3시간 정도의 결측 기간과 2005년 8월 8일부터 11월 24일(약 3.5개월)까지의 결측 기간이 있으며, 전체 자료의 결측 비율은 3.7% 정도이다.

관측된 자료에 대해서는 스펙트럼법(spectral method)의 사용을 기본으로 하였으며, 보조적으로 파별분석법(wave by wave analysis method)도 사용하였다. 수압식 파고계로 취득된 자료의 경우에는 수심과 주기별로 미리 구해진 수압-해수면 변위간의 전달함수를 수압 스펙트럼에 곱하여 해수면 변위에 대한 스펙트럼을 구하게 된다. 본 연구에서는 전체 자료에서 90분마다 0.5초 간격의 연속된 8,192개의 자료(= 1시간 23분 정도에 해당)를 분석하여 식 (1)을 이용하여 파랑특성계수(유의파고와 평균주기)를 산정하였다. 파랑 특성계수 산정기간 동안의 평균해수면에 대한 추세(trend)는 선형함수로 가정하여 제거하였다.

$$H_s = 4\sqrt{m_0}, T_z = \sqrt{m_0/m_2} \quad (1)$$

여기서, $H_s(=H_{m0})$ 는 유의파고(m), T_z 는 평균주기(초)를 나타내며, m_0 와 m_2 는 각각 수면 변위 스펙트럼 함수에 대한 0차 및 2차 모멘트이다. 일반적으로 n 차 모멘트 m_n 에 대한 정의는 식 (2)로 표현된다.

$$m_n = \int_{f_1}^{f_2} f^n \cdot S(f) df \quad (2)$$

여기서, f 는 주파수(Hertz), $S(f)$ 는 주파수에 대한 수면변동에 대한 스펙트럼 밀도함수, f_1 과 f_2 는 각각 하한 및 상한 절단주파수이며, 하한 절단주파수 f_1 은 단주기파와 장주기파를

구분하는 주파수이다. 일반적으로 약 95% 이상의 에너지가 포함되도록 상한 및 하한 절단 주파수(cutoff frequency)로 각각 $0.6f_p$, $3.0f_p$ (f_p = 첨두주파수)가 제안되고 있으나, 첨두주파수(peak frequency)가 시간에 따라 변하는 파랑특성으로 가변적인 적분영역을 가지게 되는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 단주기파와 장주기파 모두 식(2)를 적용하여 파

Fig. 1. Location of the wave monitoring station and instrument (Station W).

Fig. 2. Time-series plot of the short and long (FIG; Far-Infra-Gravity) wave data.

랑특성계수를 산정하였으며, 가변적인 주파수 영역설정이 아닌 고정 주파수 영역설정 방법을 이용하였다.

일반적으로 하한 및 상한 절단주파수를 어떻게 설정하느냐에 따라 파랑 특성이 영향을 받게 된다. 특히, 단주기파와 장주기파를 구분하는 주파수를 어떻게 설정하느냐는 중요한 의미를 지닌다. 본 연구에서는 국내·외에서의 다양한 연구 결과를 종합하여 이를 1/30 Hz로 설정하였다. 단주기파 특성을 분석할 경우에는 f_1 을 5/128 Hz, f_2 를 64/128 Hz로 설정하였으며, 장주기파 특성을 분석할 경우에는 f_1 을 1/300 Hz, f_2 를 1/30 Hz로 설정하였다.

2.1 파랑정보의 연간 통계정보 변화

속초 연안 파랑환경의 연간 변화(inter-annual variation) 양상은 관측 자료를 1년 기간의 자료로 재구성(해당연도 1월 1일부터 12월 31일까지가 아니라, 해당연도 6월 1일부터 다음 연도 5월 31일까지의 1년 기간의 자료로 구분)하여 분석하였다. 따라서 제1차년도 자료는 2003년 6월 1일부터 2004년 5월 31일까지가 되며, 동일한 과정을 순서대로 반복하면 제8차년도 자료는 2010년 6월 1일부터 2011년 5월 31일까지가

된다. 분석 항목은 기본적인 통계정보에 해당하는 평균, 표준편차 등 다양한 항목을 연차자료를 이용하여 계산·제시하였다(Table 1). 또한 연 변동범위 파악을 위하여 연차자료의 통계정보에 대하여 평균, 표준편차 및 변동계수도 추정하였으나, 약 3.5개월 정도의 결측 자료가 포함되어 있는 제3차년도 통계정보는 편기(bias)가 발생할 수 있기 때문에 제외하고 계산하였다.

파랑 환경의 연간 변동범위는 변동계수를 이용하여 판단하는 경우, 유의파고(이하 파고)는 대부분 0.1 정도를 유지하고 있으나, 최빈파고 및 최대파고에서 각각 0.51, 0.33 정도로 변동이 매우 크게 나타나고 있다. 반면 평균주기(이하 주기)는 최빈주기 및 최대주기에서 각각 0.05, 0.08 정도로 표준편차, IQR, MAD 항목의 0.13~0.16 정도에 비하여 작게 나타나고, 평균 및 중간주기의 경우 모두 0.02 정도로 연간 변동이 매우 작게 나타나고 있다. 따라서 약 1년 정도의 파랑정보만을 이용하여 파고의 평균 및 표준편차 등을 추정하는 경우 약 10% 정도의 편차가 발생할 수 있으나, 최대파고 및 최빈파고 등을 추정하는 경우에는 각각 51%, 33% 정도의 상당한 편차가 발생할 수 있다.

Table 1. Basic statistical information of the short wave data

(a) Wave height											
	Mean	SD	n	Mode	Median	IQR	MAD ⁽¹⁾	MAD ⁽²⁾	Hmax	H ₉₀	H ₉₉
Y1	0.75	0.63	5,836	0.38	0.55	0.62	0.46	0.28	5.14	1.61	3.08
Y2	0.79	0.69	5,837	0.28	0.59	0.70	0.50	0.32	4.99	1.67	3.43
Y3	0.67	0.49	4,113	0.10	0.56	0.68	0.40	0.30	3.15	1.32	2.26
Y4	0.62	0.64	5,853	0.15	0.45	0.54	0.40	0.24	7.77	1.28	3.03
Y5	0.65	0.52	5,838	0.20	0.52	0.60	0.39	0.29	3.35	1.29	2.59
Y6	0.64	0.59	5,832	0.11	0.43	0.72	0.45	0.28	3.73	1.41	2.72
Y7	0.70	0.62	5,839	0.13	0.49	0.62	0.45	0.26	3.83	1.50	3.05
Y8	0.59	0.53	5,848	0.12	0.42	0.60	0.39	0.25	3.74	1.30	2.47
Mean*	0.68	0.60	5,625	0.20	0.49	0.63	0.43	0.27	4.65	1.44	2.91
SD*	0.07	0.06	7	0.10	0.06	0.06	0.04	0.03	1.53	0.16	0.33
COV	0.11	0.10	0	0.51	0.13	0.10	0.10	0.10	0.33	0.11	0.11
(b) Wave period											
	Mean	SD	n	Mode	Median	IQR	MAD ⁽¹⁾	MAD ⁽²⁾	Tmax	T ₉₀	T ₉₉
Y1	5.79	1.11	5,836	5.12	5.62	1.38	0.86	0.66	11.54	7.34	8.85
Y2	6.03	1.11	5,837	5.60	5.90	1.47	0.88	0.72	11.12	7.48	9.25
Y3	6.18	0.94	4,113	5.57	6.11	1.23	0.74	0.61	10.36	7.43	8.63
Y4	6.05	0.84	5,853	5.68	5.86	0.93	0.63	0.44	9.91	7.13	8.88
Y5	6.06	0.80	5,838	5.37	5.94	1.07	0.64	0.53	9.74	7.07	8.65
Y6	6.10	0.98	5,832	5.78	5.93	1.34	0.79	0.65	9.69	7.54	8.76
Y7	6.25	0.90	5,839	5.89	6.08	1.18	0.72	0.58	10.14	7.52	8.95
Y8	6.08	0.89	5,848	5.80	5.96	1.28	0.72	0.63	9.43	7.22	8.54
Mean*	6.05	0.95	5,840	5.61	5.90	1.24	0.75	0.60	10.22	7.33	8.84
SD*	0.14	0.12	7	0.27	0.14	0.19	0.10	0.09	0.79	0.19	0.23
COV	0.02	0.13	0	0.05	0.02	0.15	0.13	0.16	0.08	0.03	0.03

Ref. SD = standard deviation; IQR = inter-quartile range; MAD⁽¹⁾, MAD⁽²⁾ = mean and median absolute deviations, respectively; Hmax(Tmax) = maximum value; H₉₀(T₉₀), H₉₉(T₉₉) = the 90 and 99 percentile values, respectively; COV = coefficient of variation(= SD/mean); Yn = n-th year data from (n + 2002).6.1 to (n + 2003).5.31; Mean*, SD* = mean and SD value using Y1–Y8 data (Y3 data is excluded because it have a large missing interval and may have biased values).

Fig. 3. Annual variation of the Kernel density function (Short wave).

2.2 파랑정보의 계절변화 양상 - 기본적인 통계정보 및 확률밀도함수

파랑정보의 연 변화(intra-annual variation) 양상은 계절별 변화 양상을 중심으로 기본적인 통계정보를 분석하였다. 전체 자료에서 3-5월 자료, 6-8월 자료, 9-11월 자료, 12월과 1-2월 자료를 각각 봄, 여름, 가을, 겨울 자료로 구분하였다. 구분된 자료로부터 기본적인 통계정보를 산정하고, 비모수적인 연속적인 함수형태의 분포함수 추정이 가능한 Kernel 밀도함수를 이용하여 분포함수 형태로 비교하였다(Table 2, Fig. 4; Silverman, 1986; Wand & Jones, 1995). 파고를 기준으로 하는 경우, 겨울, 가을, 봄, 여름 순서로 점점 작아지는 양상이 뚜렷하게 보이고 있음을 알 수 있으며, 겨울대비 여름의 파고는 단주기파, 장주기파의 경우 각각 약 50%, 40% 정도에 해당된다. 반면 주기변동은 단주기파의 경우 6.1-7.3 초, 장주기파의 경우 47.4-49.7 초로 1-2 초 정도이다.

3. 파랑환경 변화 특성분석

파랑환경 특성 분석은 파고 및 주기자료의 확률밀도함수 추정 및 분포적합성 검정을 중심으로 수행하였다. 또한 파랑정보의 개략적인 시계열모형 구조 및 차수를 추정하기 위하여 자기상관함수 및 교차상관함수 분석도 수행하였다.

3.1 파고 및 주기 자료의 확률밀도함수

파고 및 주기의 확률밀도함수는 대수정규분포 및 극치분포 함수형태가 제시되고 있으며, 대략적인 형태도 매우 유사함을 알 수 있다(Kotz & Nadarayah, 2000; Kamphuis, 2000; Holthuijsen, 2007). 본 연구에서는 전체 자료를 이용하여 대수정규분포와 GEV(Generalized Extreme Value) 분포함수에 대하여 분포 적합 여부를 판단하였다. 전체적인 형태를 보면, 단주기파의 경우 파고 및 주기 모두 대수정규분포 및 GEV 분

Table 2. Basic statistical information of the short and long (FIG) wave data

(a) Short wave						
	Mean of the wave height (m)	SD of the wave height (m)			Mean of the wave period (s)	SD of the wave period (s)
		SD	SD*	MAD		
Spring(MAM)	0.61	0.51	0.42	0.24	6.69	1.69
Summer(JJA)	0.46	0.45	0.33	0.18	6.07	1.28
Autumn(SON)	0.74	0.70	0.50	0.30	6.90	1.76
Winter(DJF)	0.90	0.63	0.55	0.35	7.31	1.81
Annual Mean	0.68	0.60	0.47	0.28	6.83	1.74

(b) Long wave						
	Mean of the wave height (m)	SD of the wave height (m)			Mean of the wave period (s)	SD of the wave period (s)
		SD	SD*	MAD		
Spring(MAM)	0.025	0.028	0.015	0.018	48.86	7.43
Summer(JJA)	0.015	0.023	0.008	0.012	49.71	8.76
Autumn(SON)	0.032	0.048	0.020	0.027	47.38	5.29
Winter(DJF)	0.037	0.038	0.024	0.026	47.96	5.33
Annual Mean	0.029	0.038	0.019	0.023	48.50	6.87

Median absolute deviation : Median(|X-Median(X)|), SD = Robust SD = 0.7413*IQR(X)

Fig. 4. Seasonal pdf variations of the short and long waves.

Fig. 5. Probability density function plots of the wave height and period.

포와 유사한 형태를 보이고 있으며, χ^2 검정결과 95% 신뢰수준에서 채택되었으며, 장주기파의 경우에는 파고의 경우 대수정규분포, 주기의 경우 GEV 분포함수와 유사한 형태를 보이며, 모두 χ^2 검정결과 95% 신뢰수준에서 채택되었다 (Fig. 5). 그러나 χ^2 검정은 비교를 하는 히스토그램의 막대개수에 영향을 받을 수 있기 때문에 자료 하나하나에 대한 CDF 함수의 적합을 검정하는 KS 검정(Kolmogrov-Smirnov test)도 수행하였다. 수행결과, 95% 유의수준에서 모든 자료에 대하여 대수정규분포 및 GEV 분포함수는 모두 기각되었다. 반면 비모수적 분포함수 추정기법에 해당하는 Kernel 함수를 이용하여 추정된 밀도함수는 KS 검정, 95% 유의수준에서 모두 채택되었다. 따라서 파랑정보의 확률밀도함수를 추정하는 경우, 확률수치에 매우 민감한 꼬리영역 등에서의 오차 및 분포적합여부에 대하여 보다 엄밀한 검정이 요구된다고 할 수 있다.

3.2 자기상관함수 및 교차상관함수 분석

자기상관함수와 편자기상관함수(partial autocorrelation function)의 형태는 시계열자료의 AR(auto-regressive) 모형 구조를 개략적으로 초기 추정할 수 있는 유용한 정보이다(Cryer, 1986). 본 연구에서는 파랑정보의 시계열 구조에 대한 상세한 분석은 생각하였으며, 기본적인 자기상관함수와 편자기상관함수, 교차상관함수 분석만을 수행하였다. 자기상관함수를 추정한 결과, 파고 및 주기 모두 높은 상관성을 보이고 있는 것으로 파악되었으며, 교차상관함수에서도 단주기파의 파고와 주기의 상관관계 및 단주기파와 장주기파 파고의 상관관계는 높게 나타나고 있는 반면, 장주기파의 파고 및 주기관계, 장주기파와 단주기파의 주기의 상관관계는 매우 낮게 나타나고 있다(Fig. 6).

한편 편자기상관함수는 단주기파의 경우, 파고 및 주기 모두

Fig. 6. Auto- and cross-correlation functions of the short and long waves.

Fig. 7. Partial autocorrelation functions of the short and long waves.

지체단위 3 정도부터는 매우 미미한 수준을 보이고 있으며, 장주기파의 경우에는 파고 및 주기 모두 지체단위 4 정도부터는 미미한 수준을 보이고 있다(Fig. 7). 따라서, 서서히 감소하는 자기상관함수와 지체단위 3-4 단위에서 급격한 감소를 보이는 편자기상관함수 변화 양상으로부터, 단주기파는 AR(3), 장주기파는 AR(4) 모형의 구조를 보이고 것으로 추정된다.

3.3 파고 및 주기의 변화양상 성분분석

파랑정보의 주기성분 분석을 위하여 조화분석을 수행하였다. 조화분석에 사용된 주기함수는 연간(inter-annual) 빈도 성분의 경우, 전체 자료기간 8년을 기준으로 1/8(8년주기),

2/8, ..., 8/8(1년주기) 성분만을 추출하였으며, 연(intra-annual) 변화성분도 1년 주기성분과 반년(1/2년) 주기, 1/3년주기 등의 성분의 진폭을 비교하였다. 조화분석 성분함수에 대한 진폭 및 지각추정은 전통적인 최소자승법을 이용하였다(Emery & Thomson, 2004; Fig. 8). 파고 등 연안 환경자료에 대한 성분분석은 조화분석과 더불어 Wavelet 분석도 이용되고 있다(Rozynski et al., 2005).

파고의 연간 변동성분의 크기는 8년 주기 성분이 0.10 m로 가장 크게 나타났으며, 2년 주기가 0.08 m로 파악되었다. 반면, 파고의 1/2년 이하의 단주기 성분은 매우 미미하였으며, 1년 주기 성분이 우세하였다. 장주기파 주기의 경우 1년주기 및 1/2년주기 모두 대등하였으며, 1/3년 이하 주기변화는 미

Fig. 8. Comparison of the raw data and composition data using a harmonic function.

미하였다.

단주기 파랑의 경우, 파고의 연주기 성분은 0.24 m; 주기의 연주기 성분은 0.56 초로 파악되었다. 반면, 장주기 파랑의 경우, 파고의 연주기 성분은 0.015 m; 주기의 연주기, 반년주기 성분은 각각 1.26 초, 1.14 초로 파악되었다. 이러한 분석결과로부터, 속초 연안의 파랑환경정보는 연 변화 및 반년주기의 변화양상이 우세함을 보이고 있음을 알 수 있다. 파

라서 특정계절 또는 특정 시기의 단기간의 관측으로는 관측해역의 파랑환경정보를 대표할 수 없음을 알 수 있다. 또한 연간 변동범위도 연 변동범위에 비하여 50% 정도로 작은 수준이기 때문에 어떤 해역에서의 1-2년 정도의 단기 관측정보를 이용하여 파랑 환경정보를 대표하는 경우 편기(bias) 오차가 발생할 수 있다.

3.4 파고 지속시간 분석

어떤 기준을 상회하는 파랑의 지속특성(wave persistence)은 환경에 미치는 영향분석에 매우 중요한 정보이다(Sobey & Orloff, 1999). 본 연구에서는 파랑의 지속특성을 분석하기 위하여 기준 파고를 초과하는 시간(지속시간)을 추산하였다. 파고 지속시간은 기준파고에 대한 교차방법(기준이 영(zero)이 되는 경우, zero crossing method)으로 추산하였으며, 추산결과는 평균 지속시간, 최대지속시간, 전체 지속시간으로 구분하여 특성을 분석하였다. Table 3에 제시된 발생회수 및 전체 지속시간은 자료 분석기간(8년)에서 결측기간 3.5개월(0.3년)을 제외한 기간(7.7년)으로 나누는 경우, 연간 지속시간에 해당되며, 최대 지속시간은 8년 동안의 자료를 분석한 결과이다.

Table 3. Duration information of the wave heights

Wave height (m)	average duration	SD	max. duration	min duration	occurrence number	Total duration
0.25	67	112	939	-	763	51,219
0.50	36	53	440	-	921	33,431
0.75	24	33	249	-	894	21,849
1.00	20	25	168	-	700	13,975
1.25	16	21	147	-	552	9,101
1.50	15	17	117	-	390	5,931
1.75	13	15	81	-	311	4,011
2.00	14	14	74	-	196	2,697
2.25	13	13	72	-	149	1,945
2.50	10	11	53	-	142	1,359
2.75	9	10	48	-	92	852
3.00	8	9	47	-	71	542
3.25	8	9	45	-	43	348

Fig. 9. Coastal environment classification of the Sokcho coastal zone (solid circle : mean position).

표에 제시된 정보를 이용하여 다양한 지속시간과 파고와의 회귀분석을 실시한 결과, 다음과 같은 관계를 발견하였다. 즉, 평균 지속시간 및 최대 지속시간은 파고의 Power 함수 형태로 감소하는 반면, 전체 지속시간은 지수함수 형태로 감소하고 있다.

$$\begin{aligned} &[\text{기준 파고의 평균 지속시간(hour)}] \\ &= 63.81 \times [\text{파고(m)}]^{-0.81} \quad (R^2 = 0.98) \\ &[\text{기준 파고의 최대 지속시간(hour)}] \\ &= 970.95 \times [\text{파고(m)}]^{-1.23} \quad (R^2 = 0.99) \\ &[\text{기준 파고의 전체 지속시간 (hour)}] \\ &= 73,586 \times \exp(-0.409 \times [\text{파고 (m)}]) \quad (R^2 \approx 1.00) \end{aligned}$$

4. 속초연안 물리환경

속초연안은 급변 연구를 통하여 파랑환경이 파악되었으며, 기존의 조석환경 정보와의 상대적인 비교를 통하여 연안 환경영역을 판단할 수 있다. 전통적으로 연안 환경은 “파랑우세(wave-dominated) 환경”과 “조석우세(tide-dominated) 환경” 구분하여 왔으며, 구분 기준으로 평균 파고 및 평균 조차 정보를 이용하고 있다(Davis & Hayes, 1984; Anthony & Orford, 2002; Short, 2006). 속초의 조석정보와 파랑(평균 및 표준편차) 정보를 구분하여 사용하 그림에 표시하여 판단한 결과, 속초 연안은 전형적인 파랑우세환경으로 파악되었다(Fig. 9).

5. 결론 및 제언

속초 연안의 파랑환경 자료를 분석한 결과로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 파랑환경의 계절변화 양상이 뚜렷하며, 확률밀도함수는 파고의 경우 대수정규분포가 적합하며, 주기의 경우 대수정규분포 또는 일반 극치분포(GEV)가 적합한 함수로 보여지고 있으나, 분포적합성(goodness-of-fit)을 판단하는 95% 유의수준의 KS 검정결과에서는 모두 기각되어 일반적으로 제시되는 분포함수로 가정하는 경우 오차가 발생할 수 있다.
- (2) 연간 변화는 연 변화의 50% 정도로 파악되었으며, 연 변화는 1년주기 및 반년주기의 변화양상이 우세함을 보이고 있다.
- (3) 단주기파와 장주기파는 높은 상관성을 보이고 있으며, 약 3시간 정도의 시간격차가 보이는 것으로 파악되었다. 한편 단주기파는 AR(3), 장주기파는 AR(4) 모형이 적합한 것으로 파악되었다.
- (4) 속초연안은 대표적인 파랑우세(wave-dominated) 환경해역이다.

감사의 글

본 논문은 국토해양부가 지원하고 한국건설교통기술평가원

이 시행하는 2010 건설기술혁신사업(과제번호: 10기술혁신E04)과 한국해양연구원의 “연안파랑 관측, 분석 및 장기산출” 과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- 송무석, 김도영, 김민, 홍기용, 전기천 (2004). 장기 수치모사 파랑자료를 바탕으로 한 한국해역의 파랑에너지밀도 분석. 한국해양환경공학회지, 7(3), 152-157.
- 안경모, 천제호 (2004). 장기 파랑 측정자료를 이용한 평상파 산정 방법론. 한국해양·해양공학학회지, 16(3), 178-189.
- 이달수, 안희도, 채장원, 이광수 (1988). 후포해역의 파랑에너지 분포특성. Ocean Research, 10(2), 43-49.
- 정원무, 오상호, 이달수, 이동영 (2007). 실측 파랑자료를 이용하여 추정된 우리나라 동해 연안역의 파력부존량 비교. 신재생에너지, 3(3), 28-35.
- Anthony, E.J. and Orford, J.D. (2002). Between wave- and tide-dominated coasts: the Middle Ground revisited. Journal of Coastal Research, Special Issue 36, 8-15.
- Cryer, J.D. (1986). Time Series Analysis, PWS-KENT Publishing Co., Boston, 286.
- Davis Jr., R.A. and Hayes, M.O. (1984). What is a wave-dominated coast?. Marine Geology, 60, 313-329.
- Dodet, G., Bertin, X. and Taborda, R. (2010). Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades. Ocean Modelling, 31, 120-131.
- Emery, W.J. and Thomson, R.E. (2004). Data Analysis in Physical Oceanography, Second and Revised Edition, Sec. 5.5, Elsevier.
- Holthuijsen, L.H. (2007). Waves in Oceanic and Coastal Waters, Cambridge Univ. Press., Cambridge, 387
- Kamphuis, J.W. (2000). Introduction to Coastal Engineering and Management, Advanced Series on Ocean Engineering, 16, World Scientific.
- Kotz, S. and Nadarajah, S. (2000). Extreme Value Distributions, Theory and Applications, Imperial College Press.
- Marthiesen, M. (1994). Estimation of wave height duration statistics, Coastal Engineering, 23, 167-181.
- Rozynski, G. and Reeve, D. (2005). Multi-resolution of near-shore hydrodynamics using discrete wavelet transformations, Coastal Engineering, 52, 771-792.
- Short, A.D. (2006). Australian beach systems - nature and distribution. Journal of Coastal Research, 22(1), 11-27.
- Silverman, B.W. (1986). Density Estimation for Statistics and Data Analysis, Monographs on Statistics and Applied Probability, 26, Chapman & Hall/CRC.
- Sobey, R.J. and Orloff, L.S. (1999). Intensity-duration-frequency summaries for wave climate, Coastal Engineering, 36, 37-58.
- Wand, M.P. and Jones, M.C. (1995). Kernel Smoothing, Monographs on Statistics and Applied Probability, 60, Chapman & Hall/CRC.

원고접수일: 2012년 3월 5일

수정본채택: 2012년 4월 16일

게재확정일: 2012년 4월 26일