

Original Article

파랑 관측 자료 기반 제주 서해 파랑자원의 분석

김정석¹ · 박지용² · 최중수³ · 신승호^{3,†}

¹한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 해양플랜트·에너지연구본부 OST협동연구생

²한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 해양플랜트·에너지연구본부 선임연구원

³한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 해양플랜트·에너지연구본부 책임연구원

Analysis of Wave Energy Resource in the West Sea of Jeju based on Wave Observation Data

Jeong-Seok Kim¹, Ji-Yong Park², Jong-Su Choi³, and Seung-Ho Shin^{3,†}

¹OST Student-in-training, Offshore Plant and Marine Energy Research Division, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

²Senior Researcher, Offshore Plant and Marine Energy Research Division, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

³Principal Researcher, Offshore Plant and Marine Energy Research Division, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

요 약

본 연구에서는 제주 서해의 장기 해양파 관측 자료를 활용하여 파랑에너지 자원의 특성에 관해 논하고자한다. 해양파의 출현 특성을 통해 대상해역 기후에 따른 해상상태의 계절 변동을 확인하였다. 대륙성 및 해양성 기후가 영향을 미치는 기간을 구분하여 해양파의 출현특성과 파랑에너지의 양과 변동 특성을 분석하였다. 겨울철에는 대륙성 기후의 영향으로 인하여 높은 파랑에너지를 갖는 해상상태가 지속되는 특징을 보였고, 이 기간의 파랑에너지는 자원으로서 활용 가치가 높은 것으로 평가되었다. 여름철에는 해양성 기후의 영향으로 겨울철과는 상반된 특징을 보였다. 해양파와 파랑에너지에 대한 분석을 통하여 대상해역에서 파력발전장치를 운용하기 위한 기본 개념을 수립하여 제안하였다. 이는 제주 서해의 파랑자원의 활용을 계획함에 있어서 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract – In this study, we discussed the characteristics of wave energy resources using long-term ocean wave observation data in the west sea of Jeju. The seasonal variation of the sea state according to the climate of the target sea was confirmed through the characteristics of the ocean wave. The characteristics of ocean wave and the wave energy were analyzed by dividing the periods affected by continental and maritime climate. In winter, due to the influence of the inland climate, the sea state with high wave energy was sustained, and the wave energy during this period was evaluated as having high utilization value as a resource. Through the analysis of ocean wave and wave energy, basic concept for operating the wave energy converters in the target area was established and proposed. This is expected to be used as basic data in planning the utilization of wave resources in the west sea of Jeju.

Keywords: Ocean Wave Observation(해양파 관측), Wave Energy(파랑 에너지), Seasonal Variation(계절 변동), Wave Climate(파후), Wave Resource Assessment(파랑 자원 평가)

1. 서 론

전 세계적으로 지구온난화 대응에 일환으로 해양의 무한한 파랑 자원을 활용하기 위한 파력발전장치에 관한 연구 및 개발이 진행되고 있다. 파랑은 전통적으로 해양구조물에 작용하는 외력으로서만

다뤄졌지만 파력발전장치의 개발에 있어서는 중요한 에너지원이다.

파력에너지를 활용한 발전을 위해서는 파력에너지의 흡수 및 변환을 위한 기계식 또는 유압식 기반의 구동 장치, 전력생산을 위한 발전장치 그리고 발전장치의 운용 및 제어를 위한 전자장비 등의 다양한 장비들이 연동되어 작동되고, 이 장치들은 고정식 또는 부유식 구조물에 탑재되어 하나의 파력에너지변환장치(Wave Energy

[†]Corresponding author: shinsh@kriso.re.kr

Converter)로 구성된다. 이처럼 파력발전장치는 기계/전기전자/해양공학 등의 다학제 간 연구를 통해 다뤄지고 있으며, 단위 기술에 대한 수치해석 및 실험실 규모의 모형시험뿐만 아니라 기술의 검증에 위해 모든 기술이 통합된 파일럿 플랜트(pilot plant)를 실제 해역에 설치하여 실증 시험하기 위한 프로젝트도 다수 수행되어왔다(Falcao and Henriques[2016]; EMEC[2020]).

파력발전장치의 실험실 실증 시험에서 장치의 성능은 에너지의 변환 효율의 측면에서 입사된 파랑에너지에 대한 발전량으로서 정의할 수 있고, 연간 최적의 성능을 발휘하도록 장치를 고안하기 위해서는 대상 해역의 파랑특성에 대한 분석이 필요하다. 에너지 자원으로서의 해양파는 양과 질의 관점에서 종합적인 분석을 통한 평가가 필요하다. 태풍의 내습에 따른 고파랑은 많은 에너지를 포함하고 있지만, 전반적인 해상상태에 대하여 높은 변동성을 갖는다면 효과적으로 에너지를 활용하기 어렵다. 반면 장기간 일정한 해상상태가 지속되어 변동성이 작은 양질의 파랑에너지자원에 대해서는 목표 파랑 조건 하에서 파력발전장치의 최적 성능이 발휘될 수 있도록 설계함으로써 효과적으로 발전이 가능하다.

제주 서해는 국내에서 파랑에너지가 높은 해역에 해당한다(Hong *et al.*[2004]; Ryu *et al.*[2004]). 이러한 이유로 대상해역에는 진동수주형 파력발전방식의 용수 시험 파력발전소가 설치되어 시험 운용하고 있을 뿐만 아니라 파력발전장치 및 해상풍력발전장치 등의 실증을 위한 실험장치가 구축되고 있다(Choi *et al.*[2018]). 대상 해역은 계절의 변화에 따라 파랑의 출현특성의 차이가 있는 특징을 보이며(Kim *et al.*[2016]), 파랑관측치의 변동성 및 비선형성에 대하여 검토된 바 있다(Shin *et al.*[2007]). 하지만, 파랑에너지의 활용이라는 측면에서 반드시 고려되어야 할 파랑자원의 변동성에 대한 고찰이 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 제주 서해의 파랑 관측 자료를 활용하여 해양파 및 파랑에너지자원의 계절에 따른 출현 특성과 이에 연계한 변동성에 대하여 분석하였다.

2. 제주 서해 파랑관측 개요

대상해역은 한반도 남쪽의 대륙붕에 위치하여 수심 100 m 이내의 완만한 해저 지형을 보인다. 제주 서해안으로부터 2.5 km 이안된 지점(33°19'41"N, 126°8'12"E)에서 2009년부터 2016년까지 장기

간 동안 수심 40 m 해저면에 고정식 관측 장치인 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)를 설치하여 해양파를 연속 관측하였고, 유지보수를 위해 3개월에 1회 회수 및 설치하였다. 해양파는 매 시간마다 약 17분에 해당하는 2,048개의 수면변위 자료를 2 Hz로 기록하였다.

제주 해역은 여름철 해양성 기후와 겨울철 대륙성 기후가 교호로 영향을 미친다. 이처럼 계절 기후의 변화가 파후(波候, wave climate)에 미치는 영향을 고려하여 파랑 특성을 분석하기 위해 관측 자료를 월 단위로 분류하였다. 2009년부터 2016년까지의 해양파 관측 현황은 Table 1과 같으며, 매 시간마다 한 번씩 17분간 기록된 수면변위 자료의 개수를 나타낸다.

파랑 관측 현황에 따르면 6월부터 10월 사이의 관측률은 상대적으로 낮은 편인데, 이 기간은 대상 해역에 태풍이 내습하는 시기에 해당하여 관측 장비의 파손 또는 유실로 인해 결측률이 높은 것으로 판단한다. 각 파랑 관측 자료는 한 시간 동안의 해상상태를 대표하는데, 이를 시간으로 환산하면 평균적으로 각 월별 14주(약 3.2개월)의 분량을 확보하였고 가장 관측률이 낮은 9월의 관측 자료는 6주(약 1.3개월)에 해당한다. IEC[2015]에 의하면 파랑에너지자원의 평가에 있어서 계절변동이 존재하는 경우에는 일 년 이상의 기간 동안 관측된 자료를 활용하여 분석할 것을 권고하고 있는데, Table 1의 파랑 관측 현황은 각 월별 1개월 이상의 분량을 확보하였으므로 파랑에너지자원을 평가를 위해 충분한 조건에 해당한다.

3. 관측 자료의 분석 방법

3.1 해양파의 대개변수

해양파의 불규칙한 수면의 변동은 정현파들의 중첩으로 표현할 수 있다. 이에 근간한 고속 푸리에 변환(FFT, Fast Fourier Transform)을 활용하여 산정된 파랑스펙트럼의 n 차 모멘트는 다음과 같이 정의된다(Cooley and Tukey[1965]).

$$m_n = \int_0^{\infty} E(f) f^n df \quad (1)$$

여기서 $E(f)$ = 에너지 밀도(spectral density),

f = 파의 주파수(wave frequency)

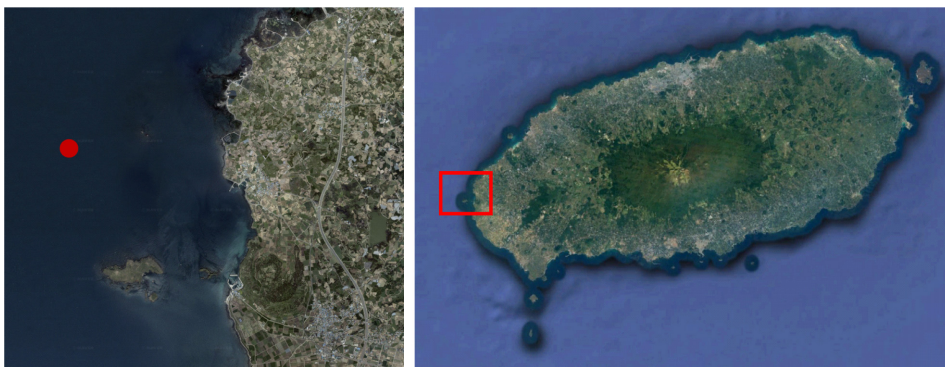


Fig. 1. The wave observation site.

Table 1. Wave measurement status (unit: number of data set)

| Year \ Month | JAN | FEB | MAR | APR | MAY | JUN | JUL | AUG | SEP | OCT | NOV | DEC | Sum. |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-----|-------|-------|--------|
| 2009 | - | - | - | - | - | - | - | 598 | - | - | 720 | 720 | 2,039 |
| 2010 | 566 | 720 | 720 | 623 | 720 | 229 | - | 245 | 720 | 719 | 712 | 610 | 6,584 |
| 2011 | 718 | 718 | 576 | 720 | 720 | 406 | - | - | - | 270 | 720 | 719 | 5,567 |
| 2012 | 445 | - | - | - | - | 454 | 720 | 709 | 240 | - | 178 | 720 | 3,466 |
| 2013 | 720 | 720 | 300 | - | - | - | - | - | - | - | - | 348 | 2,088 |
| 2014 | 645 | 712 | 720 | 720 | 720 | 181 | - | - | - | - | - | - | 3,698 |
| 2015 | 359 | 719 | 719 | 720 | 720 | 269 | - | - | - | - | - | - | 3,506 |
| 2016 | - | - | - | - | - | 30 | 282 | 319 | - | - | - | - | 631 |
| Sum. | 3,453 | 3,589 | 3,035 | 2,783 | 2,880 | 1,569 | 1,002 | 1,871 | 960 | 990 | 2,330 | 3,117 | 27,579 |

대표적인 해상상태 매개변수인 유의파고(H_{m0}), 에너지 주기(T_e)는 파랑스펙트럼의 주파수 성분별 파랑에너지의 분포를 고려한 n 차 모멘트(m_n)를 활용하여 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$H_{m0} = 4\sqrt{(m_0)} \quad (2)$$

$$T_e = m_{-1}/m_0 \quad (3)$$

단위 폭을 통과하는 파랑에너지 플럭스, 즉 파랑에너지밀도(P)는 식 (4)와 같다. 여기서 불규칙파에 대한 파의 전 에너지(E)와 군속도(C_g)는 식 (5), (6)과 같으며, 이때 파의 시공간 상의 관계는 식 (7)의 분산 관계를 통해 양함수적으로 추정할 수 있다(Holthuijsen[2010]).

$$P = EC_g \quad (4)$$

$$E = \rho gm_0 \quad (5)$$

$$C_g = \frac{1}{2} \frac{\omega}{k} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \quad (6)$$

$$\omega^2 = gk \tanh kh \quad (7)$$

여기서 ρ = 해수 밀도(sea water density),
 g = 중력 가속도(gravitational acceleration)
 k = 파수(wave number)
 ω = 파주파수(wave angular frequency)
 h = 수심(water depth)

3.2 변동성 매개변수

확률분포의 매개변수는 확률분포의 n 차 모멘트로서 정의할 수 있다. 모집단의 모멘트인 확률밀도함수의 모멘트가 표본 자료의 모멘트와 같다고 가정하면, 표본 자료를 통해 확률분포의 매개변수를 추정할 수 있다. 대표적인 확률분포의 매개변수로는 확률 변수(x)의 기대치인 평균(mean, \bar{x}), 평균값 주위에 확률 변수가 분포된 정도인 분산(variance, s^2) 그리고 변동성의 무차원 척도인 변동계수(coefficient of variation, C_v)가 있으며, 이들은 확률 변수의 표본 자료를 활용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (8)$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (9)$$

$$C_v = \frac{s}{\bar{x}} \quad (10)$$

Henriques *et al.*[2019]는 파랑에너지의 변동성은 에너지 변환 시스템(power take-off system, PTO system)의 설계에 있어서 고려해야 할 핵심 요소로 지적하고 있다. 본 연구에서는 변동성 검토를 위해 평균에 대한 최대 파랑에너지의 비(peak to average ratio of wave energy, PAE)로서 다음과 같이 정의하였다.

$$PA = \frac{x_{max}}{\bar{x}} \quad (11)$$

관측 자료의 분포특성을 검토하기 위해 누적확률분포와 백분위수(percentile, p)를 고려하였다.

$$n = \left[\frac{p}{100} \times N \right] \quad (12)$$

여기서 n = 관측 자료의 p (%)의 순위(rank of p -percentile),
 N = 관측 자료의 수(number of data)

4. 결과 및 분석

4.1 제주 서해 해양파의 출현 특성

파랑에너지의 자원 평가에 앞서 대상해역의 해양파에 대한 검토가 필요하다. 대표적인 해상상태 매개변수인 유의 파고(H_{m0})와 에너지 주기(T_e)에 대한 월별 평균(μ)과 변동 계수(C_v)를 Fig. 2에 나타내었다.

겨울과 초봄(12월-3월)에는 한반도에 위치한 대륙성 기단에 동반된 강한 바람으로부터 발달된 해양파는 유의파고가 높고 바람의 지속적인 공급에 따라 유의파고의 변동계수는 낮은 특징을 보였다. 해당 기간에 관측 지점의 북쪽에 위치한 대륙성 기단은 취송거리가 제한적인 서해를 통해 파를 발달시키므로 풍파가 지배적임을 짐작할 수 있다.

대륙성 기단이 해양성 기단으로 변화하기 시작하는 4월에는 서

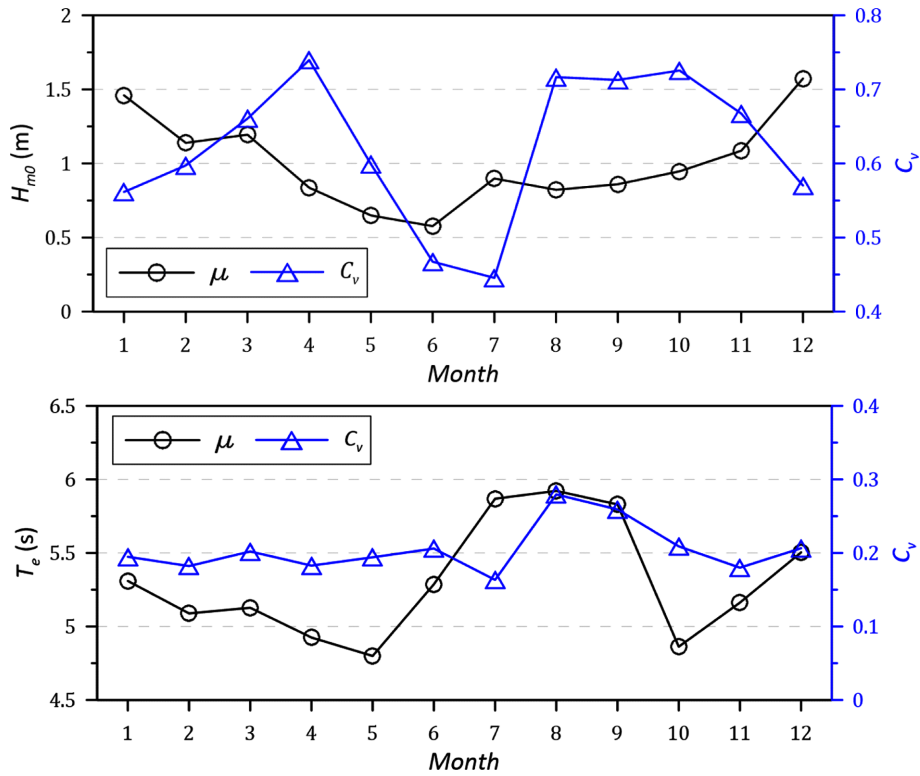


Fig. 2. Monthly ensemble average of significant wave height (H_{m0}) and energy period (T_e).

로 다른 특성을 갖는 두 기단의 영향이 혼재된 해상상태로써 해양파의 변동계수는 연중 가장 높았다. 4월부터 6월까지의 해양성 기단의 영향으로 인해 바람이 잦아들음에 따라 평균 유의파고가 감소하는 경향을 보였고, 4월부터 5월까지의 평균 에너지 주기도 감소하는 것으로 나타났다.

태풍으로 인해 발달된 고파랑은 발생역의 주변해역으로 방사되면서 단주기 성분은 곧 소산되지만 장주기 성분은 먼 해역까지 전파한다. 너울성파는 태풍의 이동속도에 비해 상대적으로 빠르기 때문에 태풍이 내습하기에 앞서 관측되며, 낮은 파고와 장주기의 특징을 보인다. 기상청의 태풍통계에 따르면 최근 10년간(2009년-2016년) 우리나라에 영향을 미친 태풍은 6월부터 10월 사이에 발생하였고 내습빈도는 평균적으로 3.2회이다(Table 2). 저위도에서 발달한 태풍이 우리나라에 직접적인 영향을 미칠 수 있을 만큼 북상하지 않았거나 소산되더라도 6월부터는 장주기파의 출현에 따라 평균 유의주기가 점차 증가하는 경향을 보였고 7월부터 9월 사이에 가장 긴 것으로 나타났다. 우리나라에 태풍이 내습하는 기간은 해양성 기단이 자리잡은 시기이므로 전반적으로 유의파고는 낮은 특징을 보이지만, 간헐적인 태풍의 내습에 따른 고파랑의 출현으로 인해 유의파고의 변동 계수는 높은 것으로 나타났다.

10월의 유의파고는 변동성이 높아 태풍의 영향이 여전히 지배적인 것으로 해석될 수 있으나, 평균 에너지 주기가 5월의 수준으로 현격히 감소하는 점을 보아 4월의 해상상태와 같이 해양성 기단이 대륙성 기단으로 변화하기 시작하는 시기인 것으로 이해할 수 있다.

해양파의 출현 특성을 분석하기 위해 유의파고와 에너지 주기에 대한 누적분포를 도시하였다(Fig. 3). 앞선 분석에 따르면 대륙해역에 교호로 영향을 미치는 두 기단은 4월과 10월을 기점으로 대륙성 기단에서 해양성 기단으로, 그리고 다시 대륙성 기단으로 변화하였다. 월별 누적분포에 있어서도 그 양상이 나타난다. Fig. 3에서 4월과 10월의 유의파고와 에너지 주기의 누적분포는 파란색 및 빨간색 점선에 해당한다.

유의 파고의 누적분포추이는 12월에 가장 우측으로 편향되어 높은 파고에 출현빈도가 집중된 것으로 나타났는데, 1 m, 2 m, 3 m 이하 유의파고의 누적확률은 각각 32%, 70%, 93%에 해당하였다. 반면에 6월에는 1 m, 2 m 이하 유의파고의 누적확률은 각각 92%, 99.9%에 해당하여 유의파고 1 m 이하인 해상상태가 대부분이었다. 7월 유의파고의 출현분포는 다른 기간에 비해 0.5 m 이하에서 낮고 0.5 m-1.5 m에서 높았는데, 이 점을 제외하면 각 월별 유의 파고의 누적분포는 두 계절이 변화하는 4월과 10월을 기준으로 좌우측으로

Table 2. Typhoon statistics in Korea. (2009-2018)

| Item | Month | JUN | JUL | AUG | SEP | OCT | All |
|-----------------------------------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Number of Typhoons | | 4 | 10 | 9 | 7 | 2 | 32 |
| Annual average number of typhoons | | 0.4 | 1 | 0.9 | 0.7 | 0.2 | 3.2 |

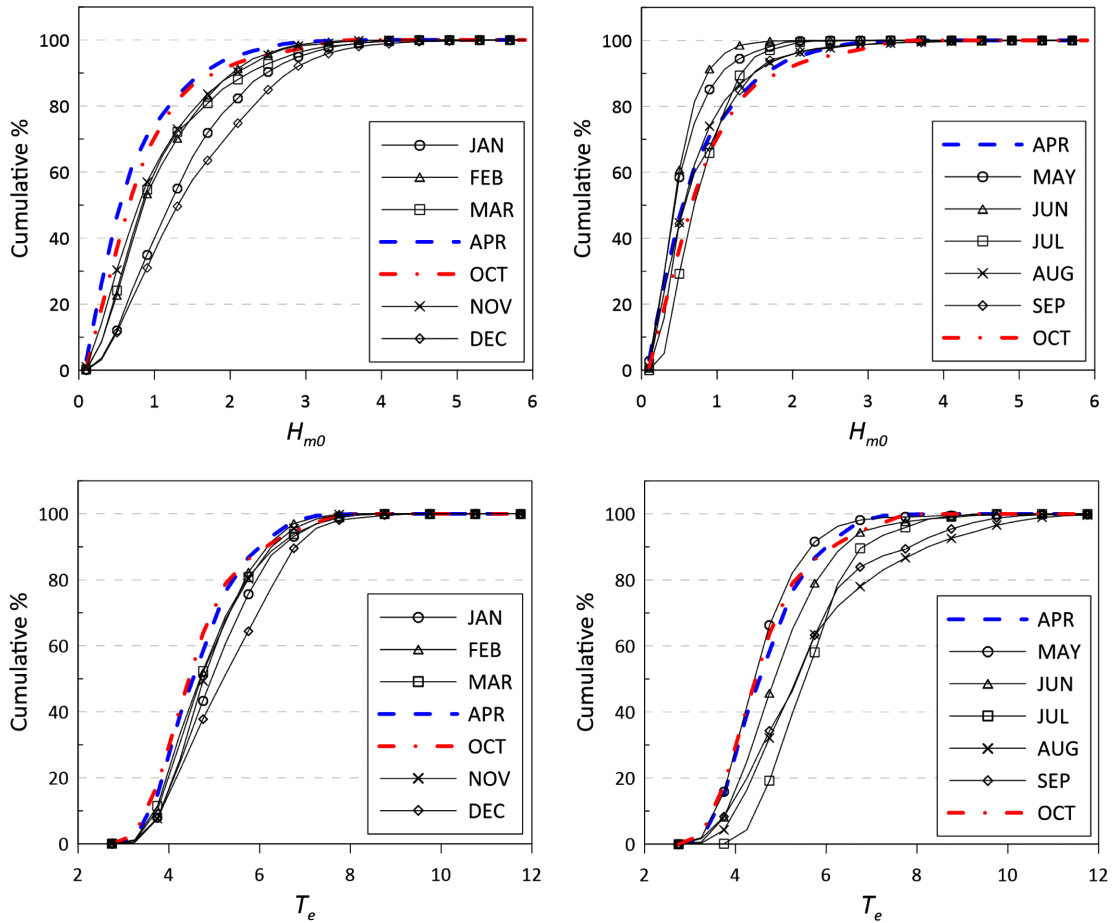


Fig. 3. Seasonal cumulative distribution of significant wave height (H_{m0}) and energy period (T_e) for continental (left) and maritime (right) wave climate.

구분되는 분포특징을 보였다.

에너지 주기의 누적분포도에서 7월부터 9월까지 다른 기간에 비해 5초보다 단주기 파에 대한 출현빈도는 감소, 그보다 장주기 파에 대해서는 증가하는 것으로 나타났다. 이는 앞서 기술된 바와 같이 태풍의 내습에 따라 강한 바람에 의해 발달된 장주기의 풍파 뿐만 아니라 너울성파의 출현에 따른 것으로 이해된다. 계절이 전환하는 4월과 10월에는 단주기 파의 출현빈도가 높아 에너지 주기의 누적분포는 좌측으로 편향되었고, 이를 기준으로 나머지 기간의 누적분포는 우측에 위치하였다. 단, 5월은 예외적으로 해양성 기후의 영향에 따른 바람 에너지 공급의 감소로 인해 파의 발달이 미비하고 시기적으로 장주기 파가 관측되지 않아 전 계절 중에서 에너지 주기가 가장 짧은 특징을 보였다.

Fig. 2와 3의 파랑 관측 결과에 대한 종합적인 분석을 통하여 대상해역 해양파의 출현 특성은 두 계절에 따라 변동하는 특성을 보이고 있음을 확인하였다. 이를 토대로 본 연구에서는 제주 서해의 해양파 특성을 10월-3월에 대하여 대륙성 파후(continent wave climate) 그리고 4월-9월을 해양성 파후(maritime wave climate)로 구분하여 정의하였다.

해양파의 출현 특징으로 분류한 두 계절의 유의파고와 에너지 주

기의 결합분포(Fig. 4)는 각 bin에 해당하는 해양파의 빈도수를 통해 산정한 출현확률밀도를 나타낸다. 여기서 파란색은 낮고 붉은색은 높은 출현확률밀도를 의미한다. 결합분포도 bin의 크기는 유의파고 $\Delta H_{m0} = 0.1$ m, 에너지 주기 $\Delta T_e = 0.2$ s에 해당한다. 그리고 두 계절의 파랑 장미도(Fig. 5)는 파향별 출현확률을 나타내며, bin의 크기는 $\Delta\theta = 11.25^\circ$ 에 해당한다.

대륙성 파후 기간에 출현빈도가 집중된 파랑 조건(출현확률밀도 > 0.4)은 유의파고 $0.35 \text{ m} < H_{m0} < 1.15 \text{ m}$, 에너지 주기 $3.7 \text{ s} < T_e < 4.9 \text{ s}$ 로 나타났고(left of Fig. 4), 이 기간에는 유의파고가 증가할수록 유의주기가 증가하는 경향을 보였다. 파향에 있어서는 북서-북(NW-N)방향의 파가 집중적으로 나타났는데(left of Fig. 5), 이는 대상해역으로부터 북서쪽에 위치한 대륙성 기단이 한반도 전체에 영향을 미치고, 그로 인한 북서계절풍이 지배적이기 때문으로 해석된다. 해양파의 결합분포도와 파향 장미도에 나타난 관측 결과와 대상해역의 기후에 대한 종합적인 특징을 고려하면, 해당 기간 동안에 제주 서해는 북서-북방향의 풍파가 지배적인 해상상태가 지속되는 것으로 판단된다.

해양성 파후 기간에는 유의파고 $0.25 \text{ m} < H_{m0} < 0.75 \text{ m}$, 에너지 주기 $3.7 < T_e < 5.5 \text{ s}$ 에 해당하는 해양파의 출현빈도가 높았다(right of Fig.

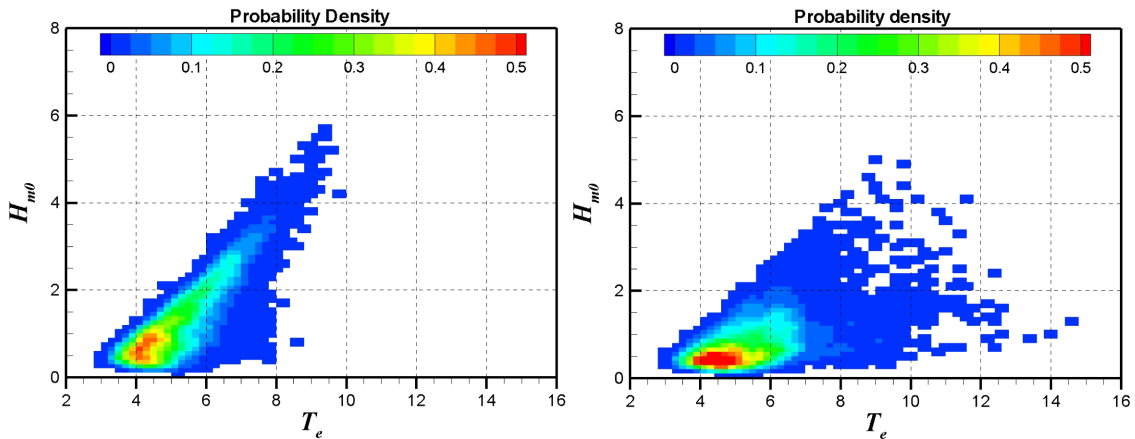


Fig. 4. Seasonal joint distribution of significant wave height (H_{m0}) and energy period (T_e) for continental (left) and maritime (right) wave climate.

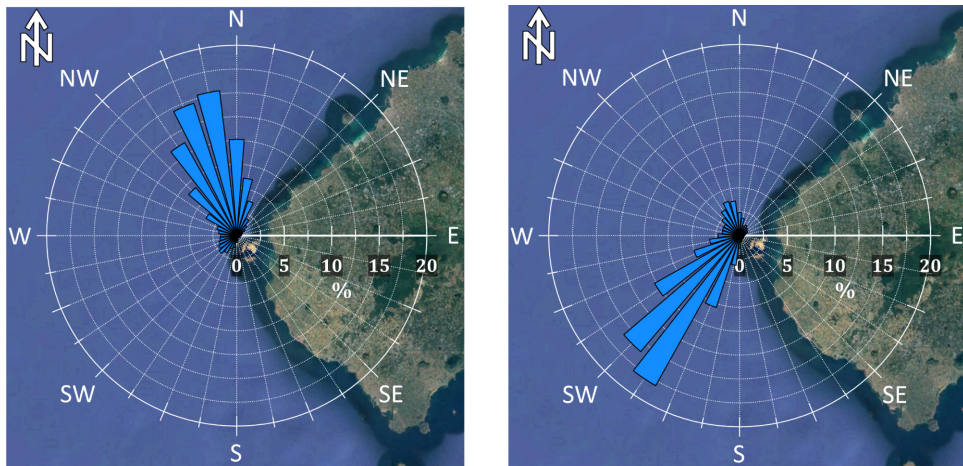


Fig. 5. Seasonal occurrence rate of wave direction for continental (left) and maritime (right) wave climate.

4). 대륙성 파후가 지배적인 해상상태와는 달리 해양성 파후 하에서는 유의파고와 에너지 주기 간의 상관성이 부각되지 않았고, 8초 이상 장주기파에서는 유의파고의 출현빈도는 분산된 특징을 보인다. 또한 대륙성 파후 보다 장주기의 파의 출현빈도가 증가하는 것으로 나타났다. 파향은 남남서-서남서(SSW-WSW)방향의 파가 주를 이루었는데, 이는 여름철 북상하는 해양성 기단에 의해 발달된 풍파와 원해에서 전파되어온 장주기 파의 내습에 따른 것으로 해석된다. 남쪽(S)방향의 파는 관측 지점 남쪽의 차귀도를 포함한 연안역으로 인해 차폐되어 관측빈도가 낮은 것으로 사료된다.

4.2 파랑에너지의 변동성

제주 서해의 파랑에너지의 월별 출현 분포 특성을 분석하기 위하여 각 월별 파랑에너지밀도의 백분위 값을 Fig. 6에 나타내었다. 매 시간별 해양파의 에너지밀도는 관측된 파랑스펙트럼을 활용하여 산정한 유의파고와 에너지 주기를 식 (4)-(7)에 적용하여 계산하였다. Fig. 6에서 월별 파랑에너지밀도의 최대 및 최소값을 포함한 백분위 값을 실선으로 연결하였고 기호로 구분하여 나타냈다. 월별 파랑에너지밀도의 높은 변동성을 고려하여 Y축은 로그자로 표현

하였다.

대륙성 기후가 영향을 미치는 기간에 파랑에너지 밀도는 다른 기간에 비해 높은 경향을 보인다. 12월과 1월에 파랑에너지밀도의 백분위 값은 연간 가장 높았는데, 해당 기간의 상위 10%, 25%, 50%의 백분위 파랑에너지밀도는 각각 20 kW/m, 10 kW/m, 4 kW/m를 상회하였다. 파력발전장치의 발전이 가능한 수준의 파랑에너지를 엄밀히 정의하기는 어렵지만, 대상해역에서는 겨울철 거센 풍파로 인해 파력발전에 적합한 높은 파랑에너지의 해상상태가 장기간 지속되는 것으로 나타났다.

해양성 기후의 영향으로 4월부터 6월까지 파랑에너지밀도의 백분위 값은 점차 감소하였고, 7월에 소폭 증가하는 경향을 보였다. 8월과 9월에 25% 이하 백분위 파랑에너지밀도의 분포는 4월-6월과 유사하지만, 상위 10% 이상의 백분위 파랑에너지밀도는 대륙성 파후 기간에 동등한 수준으로 높았다. 또한 이 기간의 최대 파랑에너지 밀도는 태풍 내습으로 인해 100kW/m를 상회하여 통상적인 해양성 파후와 상이한 특징을 보였다. 전반적으로 해양성 파후의 특징을 보이며 간헐적으로 태풍이 내습하는 8월과 9월의 파랑에너지밀도는 연간 변동 폭이 가장 크다.

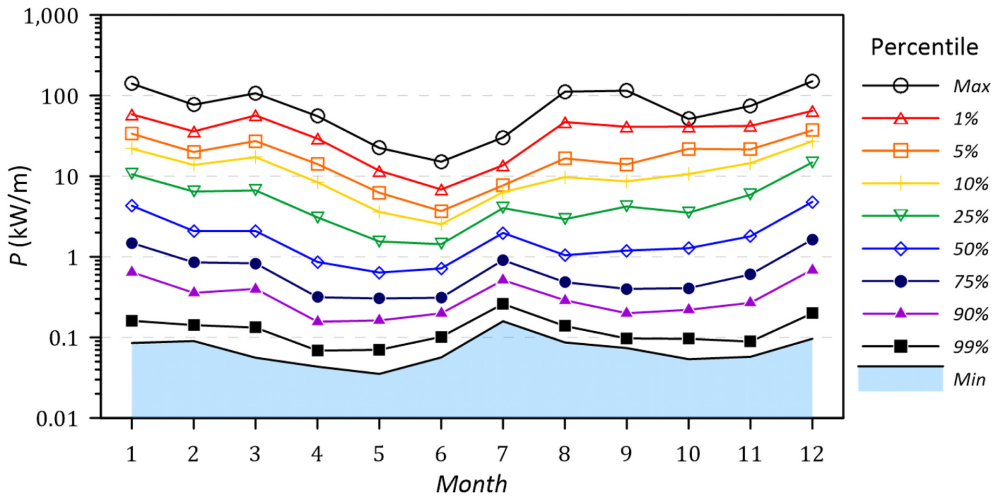


Fig. 6. Monthly ensemble percentiles of wave energy density.

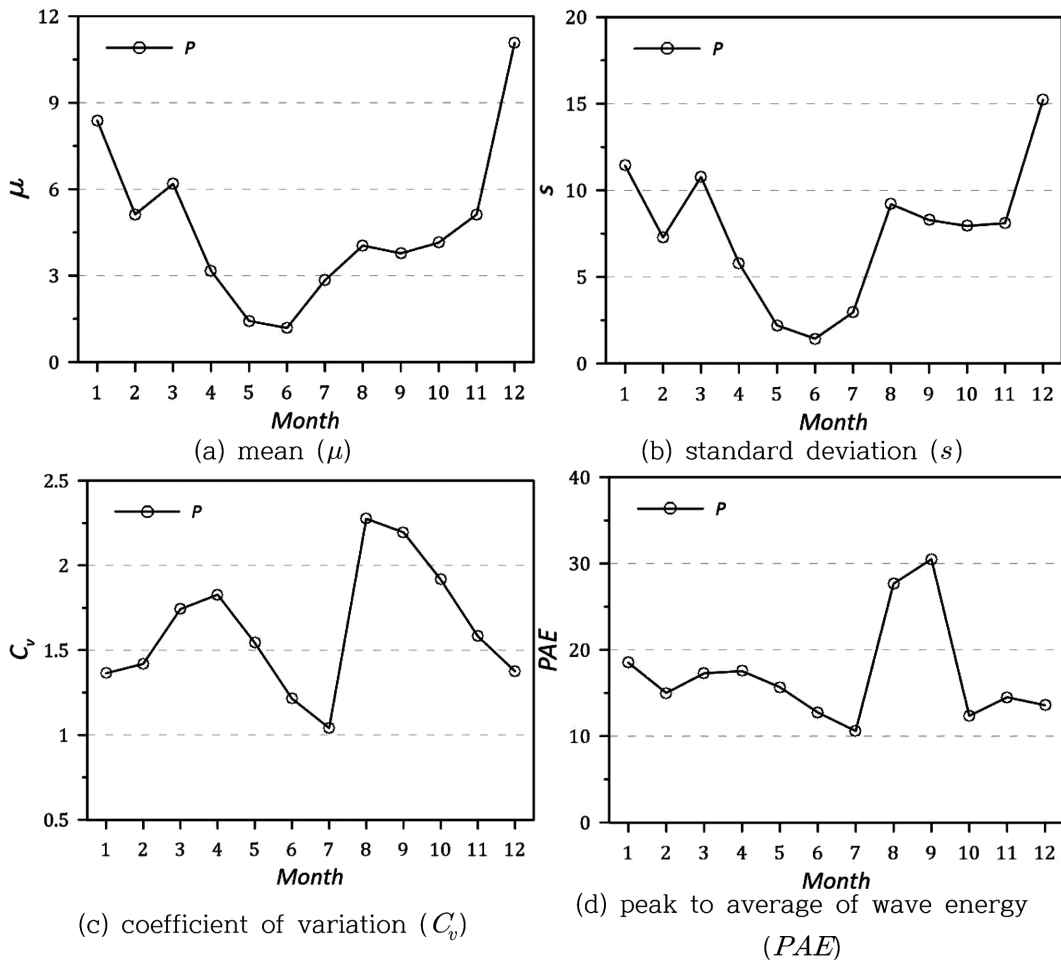


Fig. 7. Monthly statistical variation of wave energy resource.

해양파는 바람에 기인하여 발달하므로 기단의 특성에 지배적인 영향을 받는다. 바람 공급의 증감은 해양파의 발달과 쇠퇴를 반복 시키므로, 결국 파랑에너지는 변동성을 갖는 특징을 갖는다. 따라서 파랑에너지는 양뿐만 아니라 변동성의 측면에서 자원에 대한 중

합적인 분석이 필요하다. 대상해역 파랑자원의 특징을 분석하기 위해 파랑에너지밀도에 대하여 대표적인 통계 지표인 평균(μ), 표준 편차(s), 변동계수(C_v)와 평균에 대한 최대값의 비(PAE)를 적용하여 Fig. 7에 나타내었다.

월별 평균 파랑에너지밀도(μ)는 12월에 10.5 kW/m로 가장 높았고 6월에 1.1 kW/m로 가장 낮았으며, 전반적으로 평균 파랑에너지가 높을수록 표준편차(s)도 증가하는 경향을 보였다(Fig. 7(a), (b)). 4월부터 평균 파랑에너지밀도는 해양성 기후의 영향으로 점차 감소하였고, 7월부터는 태풍의 영향으로 인해 파랑에너지밀도의 평균치와 표준편차가 증가하는 점을 확인하였다.

Hong *et al.*[2004]은 SWAN모형을 통해 얻어진 1979년부터 2002년까지의 24년 장기 파랑추산자료를 이용하여 본 연구의 대상 해역에 해당하는 차귀도 주변 파랑에너지 밀도를 제시한 바 있다. 해당 연구에서는 차귀도 인근 해역에서 해안으로부터의 이안거리 1, 2, 3, 5, 10 km인 지점에 대한 연평균 파랑에너지 밀도는 각각 5.51, 6.00, 6.27, 6.52, 6.90 kW/m로써 해안에서 심해로 깊어질수록 파랑에너지가 증가되는 일반적인 경향이 잘 나타나 있다. 본 연구에서 다른 파랑 관측 위치는 수심 40 m로서 이안거리는 약 2 km 정도이다. 관측 자료 분석에 따르면 대상해역의 연평균 파랑에너지밀도는 4.7 kW/m로 나타났는데, 시물레이션을 통한 파랑 추산의 경우 수심 영향으로 인한 파고의 감소 효과가 다소 미진하여 상대적으로 낮은 수심에서 파고가 과대평가될 소지가 있음을 감안할 때, 당시의 파랑추산의 결과가 공학적으로 충분히 사용될 수 있는 수준임을 알 수 있다. 또한 Fig. 7의 월별 평균 파랑에너지 밀도는 전반적으로 Hong *et al.*[2004]이 제시한 자료보다 정량적으로 소폭 작지만 유사한 계절 변동의 경향이 동일한 수준으로 나타나고 있음을 확인하였다.

대륙성 파후가 지속됨에도 2월보다 3월에 평균 파랑에너지밀도가 증가하는 점은 특징적이다. 한반도 일대에 영향을 미치는 대륙성 기단은 봄이 됨에 따라 점차 세력이 약해지는데, 2월 말부터 4월 초의 기간 중에 일시적으로 강화되는 특성을 보인다. 이른바 꽃샘추위라 불리는 현상은 매년 비슷한 시기에 나타난다(Doopedia). 제주 서측 해역에 있어도 이러한 영향이 반영되어 3월의 파랑에너지가 2월에 비해 증가된 것으로 판단된다.

평균 파랑에너지로 정규화된 무차원 변동성 지표인 변동계수(C_v)의 월별 분포는 표준편차(s)와는 다른 특징을 보였다(Fig. 7(c)). 변동계수는 태풍 시즌인 8월과 9월에 가장 높았고, 이를 제외하면 파후가 변화하는 시점인 4월과 10월을 기준으로 점차 감소하는 경향을 보였다. 12월과 1월의 파랑에너지밀도는 평균치는 높고 변동계수가 작아 파랑에너지를 활용하는 측면에서 양질의 자원에 해당하는 것으로 판단된다.

반면 태풍 시즌인 8월과 9월에는 변동계수가 높을 뿐만 아니라 평균에 대한 최대 파랑에너지의 비(PAE)도 가장 높은 것으로 나타났다(Fig. 7(d)). 해양성 기후로 인해 바람의 공급이 감소하여 전반적으로 파랑에너지밀도가 낮은 해상상태가 지속되지만 간헐적인 태풍의 내습으로 인해 최대 파랑에너지밀도는 높아 PAE 측면의 변동성이 높게 평가되었다.

대상해역의 계절 파후에 따른 파랑에너지의 출현 특성을 비교하기 위해 두 계절 기간에 대하여 월별 파랑에너지밀도의 백분위 값을 평균하여 Fig. 8에 나타내었다. 그리고 해양성 계절에 대한 대륙성

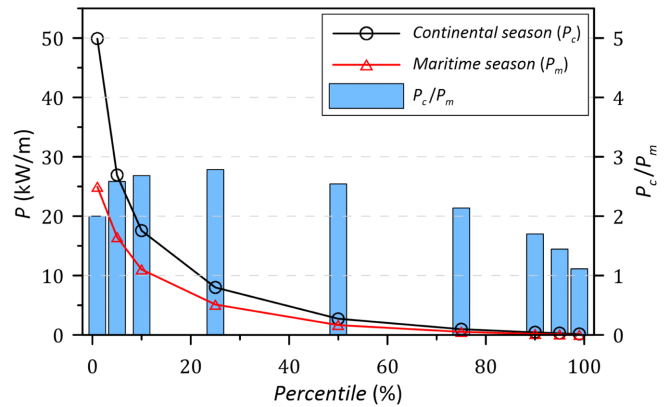


Fig. 8. Seasonal percentiles of wave energy density.

계절의 파랑에너지 밀도의 비(P_c/P_m)를 막대그래프로 표현하여 두 계절의 파랑에너지밀도의 차이를 비교하였다.

높은 백분위 수에 해당하는 온화한 해상상태의 파랑에너지밀도는 두 계절에 차이가 작았지만, 백분위수가 낮을수록 정량적인 파랑에너지밀도의 차이는 증가하는 경향을 보였다. 대륙성 계절의 상위 10%, 25%, 50% 백분위 파랑에너지밀도의 평균치는 각각 17.6 kW/m, 8.0 kW/m, 2.7 kW/m이다. 이는 해양성 계절의 동일 백분위 파랑에너지밀도에 비해 두 배 이상 높은 것에 해당하여 전반적으로 파랑에너지는 대륙성 계절에 높음을 확인하였다.

해양성 계절에 대한 대륙성 계절의 파랑에너지밀도의 비(P_c/P_m)는 백분위수가 증가함에 따라 1.1배(99% 백분위수)부터 2.8배(25% 백분위수)까지 점차 증가하였다. 25% 이상의 백분위 수에서는 두 계절의 파랑에너지밀도의 비는 점차 감소하는 경향을 보였는데, 이는 앞서 기술된 바와 같이 태풍 내습으로 인한 고파랑의 출현으로 인해 상위 파랑에너지밀도에서는 두 계절간의 차이가 소폭 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

4.3 파랑에너지 자원 평가

파랑에너지 자원의 특성을 평가하기 위해서 자원의 양과 변동성을 함께 검토해야한다. 각 계절과 태풍 시즌에 대한 파랑에너지밀도와 관련 통계 변수를 Table 3에 요약하였다. 파랑에너지밀도는 자원량의 측면에서 기간별 평균($\bar{\mu}$), 최댓값(maximum), 최솟값(minimum), 그리고 변동성의 측면에서는 변동 계수(C_v) 및 최대평균비(PAE)를 함께 나타내었다.

태풍 시즌을 제외한 해양성 계절의 평균 파랑에너지밀도는 2.2 kW/m로 가장 낮는데 반해 대륙성 계절에는 6.7 kW/m로 약 3 배가량 높은 것으로 나타났다. 이와 같은 차이는 최대 파랑에너지 밀도에서도 유사하여 대륙성 계절의 최대 파랑에너지밀도는 151 kW/m로 해양성 계절에 비해 2.7배 높았다. 반면 해상상태는 바람의 공급여부에 따라 발달과 쇠퇴를 반복하므로 최소 파랑에너지밀도는 계절에 관계없이 0.1 kW/m 이하로 같은 수준이었다. 계절에 따른 파랑에너지 변동계수(C_v)와 최대평균비(PAE)에 따르면 태풍 시즌을 제외하면 두 계절은 유의미한 변동성의 차이는 나타내지 않았다.

Table 3. Wave resource characteristics for each duration in the west sea of Jeju

| Variables for (P) | Duration | | |
|-------------------|--|--------------------------|------------------------------------|
| | Maritime wave climate w/o typhoon season (APR-JUL) | Typhoon season (AUG-SEP) | Continental wave climate (OCT-MAR) |
| $\bar{\mu}$ | 2.2 kW/m | 3.9 kW/m | 6.7 kW/m |
| Maximum | 55.6 kW/m | 115.2 kW/m | 150.6 kW/m |
| Minimum | 0.04 kW/m | 0.07 kW/m | 0.05 kW/m |
| \bar{C}_v | 1.42 | 2.23 | 1.57 |
| \overline{PAE} | 14.2 | 29.4 | 14.9 |

Table 4. Operation strategy of WECs based on wave and its resource characteristics for each duration in the west sea of Jeju

| Purpose | Duration | | |
|----------------------|--|--|---|
| | Maritime wave climate w/o typhoon season (APR-JUL) | Typhoon season (AUG-SEP) | Continental wave climate (OCT-MAR) |
| Verification test | - installation - maintenance - decommission | - survivability assessment - evacuation | - operation test - performance assessment - durability assessment |
| Commercial operation | - trial-test | - survival mode | - main operation |

태풍 시즌은 해양성 계절 기간에 속하지만 태풍의 내습으로 인하여 평균 및 최대 파랑에너지밀도에서 뚜렷한 차이를 보였다. 평균 파랑에너지밀도는 3.9kW/m로서 최대 파랑에너지밀도인 115 kW/m에 비해 상대적으로 작으므로 PAE는 29.4로 연간 가장 높았다. 마찬가지로 해당기간의 변동계수는 대륙성 및 해양성 파후 기간에 비해 1.4배-1.6배 큰 것으로 나타났다. 이 시기에는 원해에서 전파되어온 장주기 파의 출현과 태풍 내습에 따른 간헐적인 유의파고의 증가로 인해 다른 계절에 비해 파랑에너지밀도의 변동성이 높은 것으로 해석된다.

4.4 파랑에너지 자원의 특성에 따른 운용 전략의 검토

파랑관측자료의 분석으로부터 제주 서해의 파랑자원의 활용가치는 파랑에너지의 양과 변동성의 측면에서 대륙성 파후 기간에 우수한 것으로 나타났다. 파랑에너지 자원의 평가 결과는 파력발전장치의 개념 설계 및 기본 제원의 선정 등에 기초자료로 활용될 수 있으며, 실험역 파랑특성을 고려한 운용전략의 수립에 있어서 필수적이다. 파력발전장치의 실험역 실증 시험 및 상용 발전에 대한 측면에서 운용전략을 Table 4와 같이 제안하였다.

앞서 기술되었듯이 태풍 시즌을 제외한 해양성 계절 기간(4월-7월)에는 낮은 유의 파고와 짧은 에너지 주기가 대부분으로서 정온한 해상상태가 지속된다. 또한 Table 3에 의하면 이 시기는 파랑에너지의 양과 변동성이 연간 가장 낮은 기간에 해당한다. 파랑에너지를 활용하는 측면에서는 해양성 계절 기간의 낮은 파랑에너지밀도로 인해 대용량의 파력발전장치를 가동하기에는 어려움이 있지만, 정온한 해상상태가 지속되는 점은 안전의 측면에서 파력발전장치의 설치/유지보수/회수 등의 해상작업과 해상시운전에 최적의 조건이라 할 수 있다.

태풍 시즌도 해양성 파후로 인해 정온한 해상상태가 지속되지만, 태풍의 간헐적 내습으로 인해 강한 파랑하중이 파력발전장치에 작

용할 수 있다. 해당 기간은 실증 시험의 경우 파력발전장치의 선체 또는 구조물, 에너지 변환장치, 계류 시스템 또는 지지구조물 등의 생존 성능을 시험하거나 장치의 보호를 위해 피항이 필요할 수 있다. 상용발전을 위한 대용량의 파력발전장치 또는 다수의 장치가 운용 중인 경우에는 피항이 불가할 수 있으므로 시스템을 보호할 수 있도록 제어 및 운용해야하며, 이는 파력발전장치의 가동 형식 또는 제어 기능 등에 따라 적절한 계획의 수립이 필요하다.

대륙성 파후에 파랑에너지는 자원의 양이 풍부할 뿐만 아니라 변동성이 낮은 특징을 보이므로, 파력발전장치를 높은 파랑에너지의 해상상태에서 지속적으로 가동할 수 있는 기간에 해당한다. 파력발전장치의 실증 시험에 있어서는 최대의 전력생산을 위한 운용 및 제어 기술의 시험, 그리고 장치의 발전능력과 더불어 운용 내구성을 평가하기 위한 적기이다. 이 기간의 파랑에너지 자원은 양과 변동성을 고려하면 자원으로서 활용가치가 높으므로 상용 발전에 있어서는 안정적인 지속적인 발전에 중점한 운용이 필요하다.

5. 결 론

본 연구에서는 해양파의 장기 관측 자료를 활용하여 제주 서해의 해양파의 출현특성을 분석하고 파랑에너지자원을 평가하였다. 대상해역은 대륙성 및 해양성 기후가 교호로 해양파와 파랑에너지자원에 지배적인 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 해양성 계절에는 간헐적인 태풍의 내습으로 인해 고파랑이 발생하는 점은 특징적이다. 파랑에너지의 양과 변동성의 측면에서 종합적인 자원의 평가를 통해 실증 시험용 및 상용 파력발전장치의 운영 방안을 계절별로 제안하였다. 파랑에너지 자원의 평가 결과는 대상해역에서의 파력발전장치의 실증 시험 또는 발전 운용 계획의 수립에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 국가 R&D사업 “파력발전 실험역 시험장 구축(PMS4040)”과 “진동수주형 파력발전 실용화 기술 개발”에 의해 지원되었습니다.

References

- [1] Choi, J. S., Lee, J., Lim, C. H., Ko, T. K., Park, J. Y., Kim, K., Hong, K., Shin, S. H., Kim, J. S., Oh, J. H., Kim, K. H., Kim, Y. D., Cho, I. H., 2018. Status for Development of the Open Sea Test Site for Wave Energy Converters in Korea. In *Proc. of 4th The Asian Wave & Tidal Energy Conf.*
- [2] Cooley, J.W. and Tukey, J.W., 1965, An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Mathematics of computation*, 19(90), 297-301.
- [3] Doopedia. Cold spring. http://www.doopedia.co.kr/doopedia/master/master.do?_method=view&MAS_IDX=170630001550798. (accessed 2020. 1. 10)
- [4] European Marine Energy Centre(EMEC). Wave clients. <http://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/>, 2020 (accessed 2020. 1. 3.)
- [5] Falcao, A.F.O. and Henriques, J.C.C., 2016, Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review. *Renewable Energy*, 85, 1391-1424.
- [6] Henriques, J.C.C., Carrelhas, A.A.D., Gato, L.M.C., Falcao, A.F.O., Portillo, J.C.C. and Varandas, J., 2019, September. Peak-shaving control – a new control paradigm for OWC wave energy converters. In *The 13th European Wave and Tidal Energy Conf.*
- [7] Holthuijsen, L.H., 2010, *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge university press.
- [8] Hong, K., Ryu, H.J., Shin, S.H. and Hong, S.W., 2004, Wave Energy Distribution at Jeju Sea and Investigation of Optimal Sites for Wave Power Generation. *J. of Ocean Eng. Tech.*, 18(6), 8-15.
- [9] International Electrotechnical Commission (IEC), 2015, IEC TS 62600-101.
- [10] Kim, J.S., Kim, S.H., Choi, J.S. and Shin, S.H., 2016, June. Evaluating Proper Wave Measuring Instrument Locations: Ensuring Representative Waves at Wave Energy Converter. In *The 26th Int. Ocean and Polar Eng. Conf.*
- [11] Korea Meteorological Administration. Status of typhoons that have affected Korea. <https://www.weather.go.kr/weather/typhoon/statistic.jsp>, 2019 (accessed 2019. 12. 3.)
- [12] Ryu, H.J., Hong, K., Shin, S.H., Song, M. and Kim, D.Y., 2004, Analysis of Long-Term Wave Distribution at Jeju Sea Based on SWAN Model Simulation, *J. Korean Soc. Marine Environ. Eng.*, 7(3), 137-145.
- [13] Shin, S.H., Hong, K. and Moon, J.S., 2007, Wave Data Analysis for Investigation of Freak Wave Characteristics. *J. Korean Navi. and Port Research*, 31(6), 471-478.

Received 29 January 2020

Revised 24 February 2020

Accepted 24 February 2020