

파력발전 적지 선정을 위한 제주 해역 파랑에너지 분포특성 연구

홍기용* · 류황진** · 신승호* · 홍석원*

*한국해양연구원 해양개발시스템연구본부

**홍익대학교 조선해양공학과

Wave Energy Distribution at Jeju Sea and Investigation of Optimal Sites for Wave Power Generation

KEY-YONG HONG*, HWANG-JIN RYU**, SEUNG-HO SHIN* AND SEOK-WON HONG*

*Ocean Development System Research Division, KORDI, Daejeon, Korea

**Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Hongik University, Jochiwon, Korea

KEY WORDS: Wave Energy Density 파랑에너지밀도, Wave Power Distribution 파력분포, Wave Power Generation 파력발전, SWAN (Simulating WAves Nearshore) Wave Model 천해역 파랑모사 모델, Jeju Sea 제주해역

ABSTRACT: Wave power distribution is investigated to determine the optimal sites for wave power generation at Jeju sea which has the highest wave energy density in the Korean coastal waters. The spatial and seasonal variation of wave power per unit length is calculated in the Jeju sea area based on the monthly mean wave data from 1979 to 2002 which is produced by the SWAN wave model simulation in prior research. The selected favorable locations for wave power generation are compared in terms of magnitude of wave energy density and distribution characteristics of wave parameters. The results suggest that Chagui-Do is the most optimal site for wave power generation in the Jeju sea. The seasonal distribution of wave energy density reveals that the highest wave energy density occurs in the northwest sea in the winter and it is dominated by wind waves, while the second highest one happens at south sea in the summer and it is dominated by a swell sea. The annual average of wave energy density shows that it gradually increases from east to west of the Jeju sea. At Chagui-Do, the energy density of the sea swell sea is relatively uniform while the energy density of the wind waves is variable and strong in the winter.

1. 서 론

해양의 재생 가능한 친환경에너지를 이용한 발전기술은 화석연료의 사용에 따른 환경오염과 자원고갈 문제를 극복할 수 있는 중요한 대체에너지 활용기술의 하나로 인식되고 있다. 해양에는 파랑, 조류, 수온 등 다양한 에너지원이 존재하며, 이를 이용한 에너지 추출기술에 대한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다(홍석원 등, 1998). 이 중에서 파랑은 모든 해역에 폭넓게 분포하므로 가용 에너지원이 풍부하고 설치 가능한 해역이 광범위하여 가장 활발한 연구가 진행되고 있는 해양에너지 자원이다.

파랑의 운동 및 위치 에너지를 물체의 운동에너지로 변환하여 전기를 생산하는 파력발전은 파랑에너지를 활용하여 직접적으로 기계장치를 구동시키는 초창기의 가동물체형 파력발전 시스템 개발에서 시작되어, 근래에는 파랑에너지를 유체의 운동에너지로 1차 변환하고, 이를 다시 기계장치의 운동에너지로 2차 변환하는 파력발전 방식에 대한 연구가 활발하다. 후자의 방식으로는 공기의 흐름을 이용하는 진동수주형 파력발전과

수류의 흐름을 이용하는 월파형 파력발전이 대표적이다

파력발전의 경제성은 무엇보다도 해역의 파랑에너지 밀도 크기에 크게 좌우된다. 그러므로 성공적인 파력발전 시설의 설계를 위해서는 고효율 에너지 변환장치의 개발과 함께, 대상 해역 파랑에너지의 시공간적 분포를 정확히 파악하여 최적의 입지를 선정하는 것이 매우 중요하다. 송무석 등(2004)은 제주해역이 우리나라에서 파랑에너지 밀도가 상대적으로 높은 해역임을 장기 파랑자료의 통계적 분석을 통해 규명한 바 있다. 본 연구는 평균적으로 파랑에너지 밀도가 높은 제주해역에 대해 상세한 파랑에너지 밀도 분포를 고찰함으로써 제주 주변해역의 파력발전 적지를 선정하고자 수행되었다.

제주 해역의 파랑분포 특성은 제3세대 파랑전파 모델에 의한 수치 시뮬레이션을 사용하여 류황진 등(2004)이 다룬 바 있다. 파랑에너지 밀도는 파랑특성 인자들인 파고 및 파주기의 함수로 표현되므로 이들 인자들의 분포 특성은 파력발전 효율을 지배한다. 한편 파력발전 장치는 일반적으로 방향성을 지니므로 파향 또한 파력발전 효율에 영향을 미치는 파랑특성 인자이다. 파랑특성 인자들은 공간적·시간적으로 변화하므로 파력발전 적지는 상기 파랑특성 인자들의 평균값 크기뿐 아니라 그 분포를 고려하여 선정되어야 한다.

제1저자 홍기용 연락처: 대전광역시 유성구 장동 171

042-868-7511 kyhong@kriso.re.kr

2. 파랑에너지 밀도의 산정

제주 해역의 파랑에너지 밀도는 선행 연구 결과를 바탕으로 산정되었다. 류황진 등(2004)은 HYPA 파랑모델(Günther et al., 1979)에 의해 산정된 우리나라 해역의 광역 파랑자료(전기천 등, 2003)를 경계조건으로 천해역 파랑전파 모델인 SWAN (Booij et al., 1999; Ris et al., 1999)을 사용하여 제주해역의 파랑분포 시뮬레이션을 수행함으로써 파력발전 효율에 영향을 미치는 파랑 인자들인 파고, 파주기, 파향 등을 계산하였다.

SWAN 모델은 파랑전파 과정에서, 파랑의 공간상 직선 전파, 수심과 조류에 의한 굴절, 수심과 조류에 의한 천해 현상, 반대 조류에 의한 파랑의 차단과 반사, 방해물에 의한 파랑의 전달 또는 반사를 고려할 수 있다. 파랑 생성과 소산 과정에서는 바람에 의한 파랑 생성, 백파에 의한 파랑 소산, 수심기인 쇄파에 의한 파랑 소산, 바닥 마찰에 의한 파랑 소산, 비선형 상호작용에 의한 에너지 교환, 장애물에 의한 에너지 소산을 고려할 수 있다. 그러나 산란은 고려되지 않기 때문에, 항구나 장애물에 인접한 곳에서는 일반적으로 정확한 계산이 어렵다.

제주 해역 파랑 시뮬레이션의 계산영역은 경도 125.67°-127.33°, 위도 32.86°-33.84°이다. 격자간격은 1km이며, 계산영역의 수심과 해안선은 전자해도에서 추출하였다. 경계조건은 장기 파랑산출자료 중에서 1979년부터 2002년까지의 월평균 파랑특성을 계산영역에 맞게 추출한 후, 1km격자로 선형 보간하여 사용하였다. 월평균 파랑특성 사용의 타당성과 관련하여 류황진 등(2004)은 매 시간별 경계조건을 적용하여 얻어진 파랑분포를 월평균 함으로써 구한 해역의 월평균 파랑분포와 월평균 경계조건을 적용하여 얻어지는 해역의 월평균 파랑분포 간의 차이가 크지 않음을 보인 바 있다. 이로부터 파랑의 월별 분포가 주된 관심인 파력발전의 경우에, 월평균 경계조건을 적용한 파랑분포 시뮬레이션에 의해 해역의 계절적 파랑분포 변화를 유추하는 것이 유효함을 알 수 있다.

파력(wave power)은 파 진행방향으로 전달되는 단위 시간당 평균에너지로 정의되며, 단위 폭당 파력 P 는 규칙파인 경우 선형파 이론의 범위 내에서 다음의 식으로 표현된다(Sorensen, 1993).

$$P = \bar{E} C_g \simeq \frac{\rho g^2 H_s^2 T}{32\pi K_s^2} \quad (1)$$

여기서 \bar{E} 와 C_g 는 단위표면적당 평균 파랑에너지와 파의 군속도를 나타내며, ρ 와 g 는 해수의 밀도와 중력가속도, H 와 T 는 규칙파의 파고와 파주기를 각각 나타내고, K_s 는 천해역으로 파랑이 진행할 때 수심 변화에 대응하여 파랑에너지의 연속성을 나타내는 천수계수(shoaling coefficient)로 아래와 같이 주어진다.

$$K_s = \sqrt{\tanh kh + \frac{2kh}{\cosh 2kh}} \quad (2)$$

여기서 k 와 h 는 파수와 수심을 각각 나타낸다.

불규칙파의 경우 단위 폭당 파력의 시간 평균치 \bar{P} 는 평균 영점상향통과 T_z 와 유의파고 H_s 의 함수로 아래와 같이 근사될 수 있다(송무석 외, 2004).

$$\bar{P} = \frac{\rho g^2 H_s^2 T_z}{64\pi K_{sm}^2} \quad (3)$$

여기서 K_{sm} 은 아래의 선형분산식을 만족하는 파수 k_m 에 의해 정의되는 천수계수이다.

$$\left(\frac{2\pi}{T_z}\right)^2 = gk_m \tanh k_m h \quad (4)$$

해역의 파랑에너지 밀도는 파향과 무관하나, 파력을 파향에 따라 전파되는 파랑에너지의 양이므로 파랑에너지 취득을 목적으로 하는 파력발전에서 효율적인 파력발전 시스템의 설계 및 배치를 위해서는 파향에 대한 고려가 필수적이다.

3. 제주 해역 장기 파랑에너지 분포

제주 해역 파랑에너지 분포 특성을 살펴보기 위해 SWAN 파랑모델 시뮬레이션에 의해 얻어진 1979년부터 2002년까지의 24년 장기 파랑자료를 이용하여 파의 진행방향으로 전달되는 단위 폭당 파력으로 주어지는 월별 파랑에너지 밀도를 산정하였다. 파랑성분을 풍파와 너울로 구분하여 계산하였으며, 이를의 합으로 주어지는 총 파랑에너지 밀도를 함께 제시하였다.

계절적인 변화를 특징적으로 보여주는 1, 5, 8, 10월의 풍파와 너울의 파랑에너지 밀도가 Fig. 1과 2에 각각 보여진다. 단위 폭당 월평균 파력은 파고와 주기의 함수이므로 유의파고가 높고, 주기가 긴 겨울, 여름철이 전체적으로 높게 나타나며, 봄, 가을철은 상대적으로 밀도가 낮다. 파랑에너지의 밀도가 가장 높은 겨울의 경우 풍파에너지가 지배적이나, 여름의 경우는 풍파보다는 너울의 파랑에너지가 지배적으로 나타난다. 이는 겨울에는 북서풍이 대륙으로부터 불어오므로 너울의 발달에 필요한 충분한 바다 공간을 갖지 못한 반면에, 여름에는 태풍이 적도에서 형성되어 제주 남쪽의 대양을 거치면서 진행하므로 장주기 파랑이 발달되어 전파되기 때문이다. 공간적으로는 여름에는 풍파와 너울 모두 남쪽에서 높으나, 겨울에는 풍파의 경우는 서쪽에서 매우 현저하고, 너울의 경우는 북쪽에서 전반적으로 밀도가 높음을 알 수 있다. 상대적으로 밀도가 낮은 봄과 가을철은 해역에 따른 차이가 미약하게 나타난다. 다만, 봄철의 분포 특성은 여름과 유사한 반면에 가을철은 겨울과 유사한 분포를 보인다.

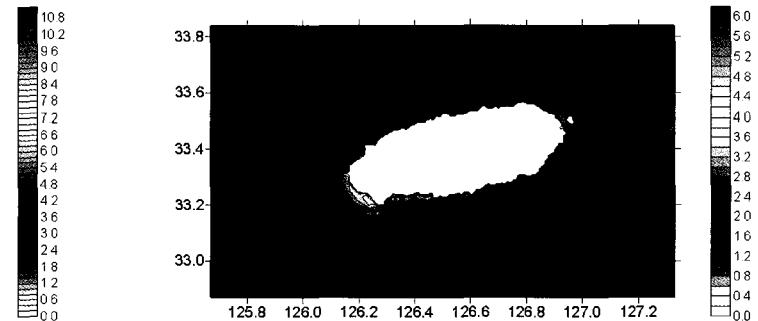
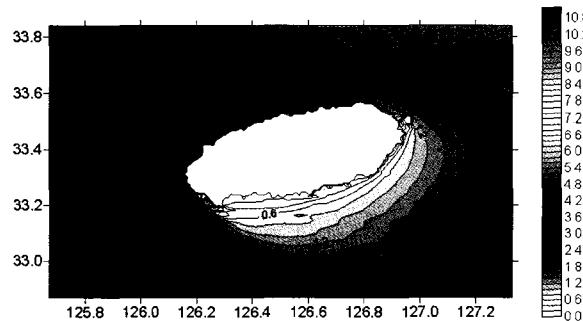
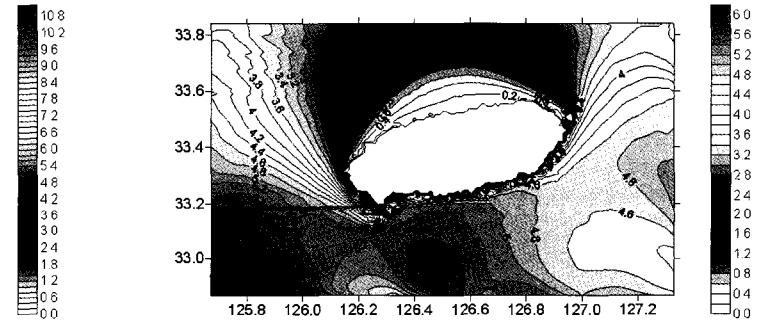
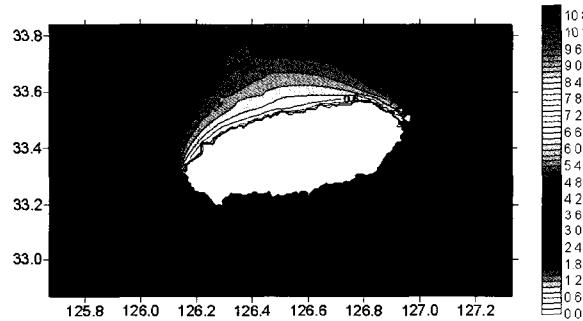
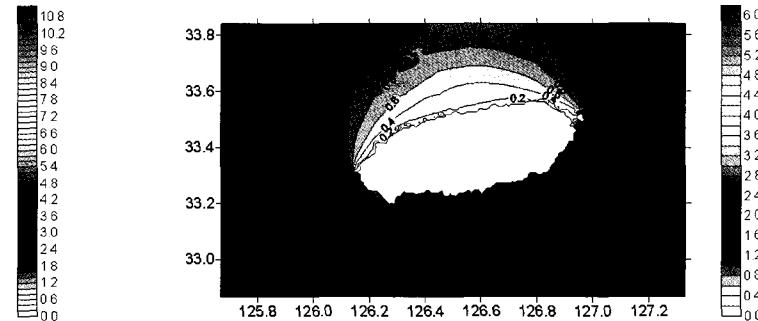
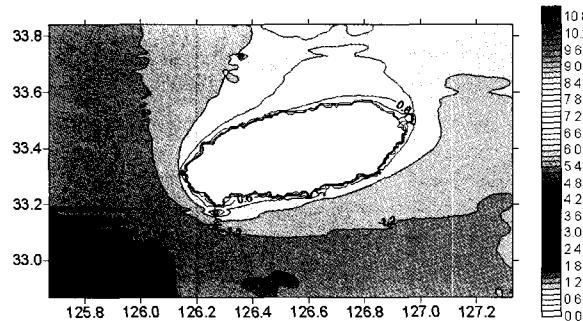
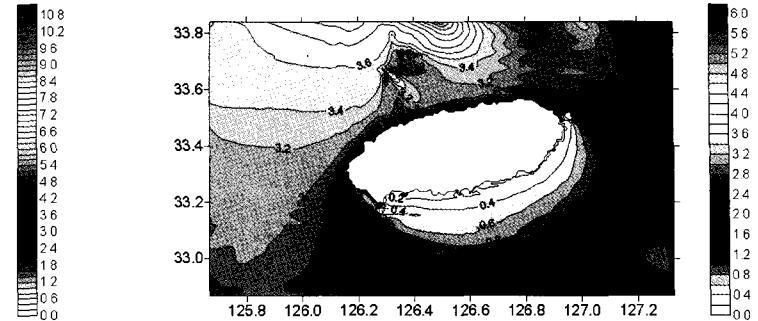
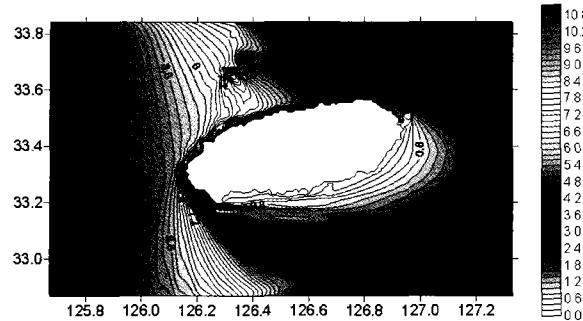


Fig. 1 Monthly mean wave power (kW/m) of wind waves at Jeju sea

Fig. 2 Monthly mean wave power (kW/m) of swells at Jeju sea

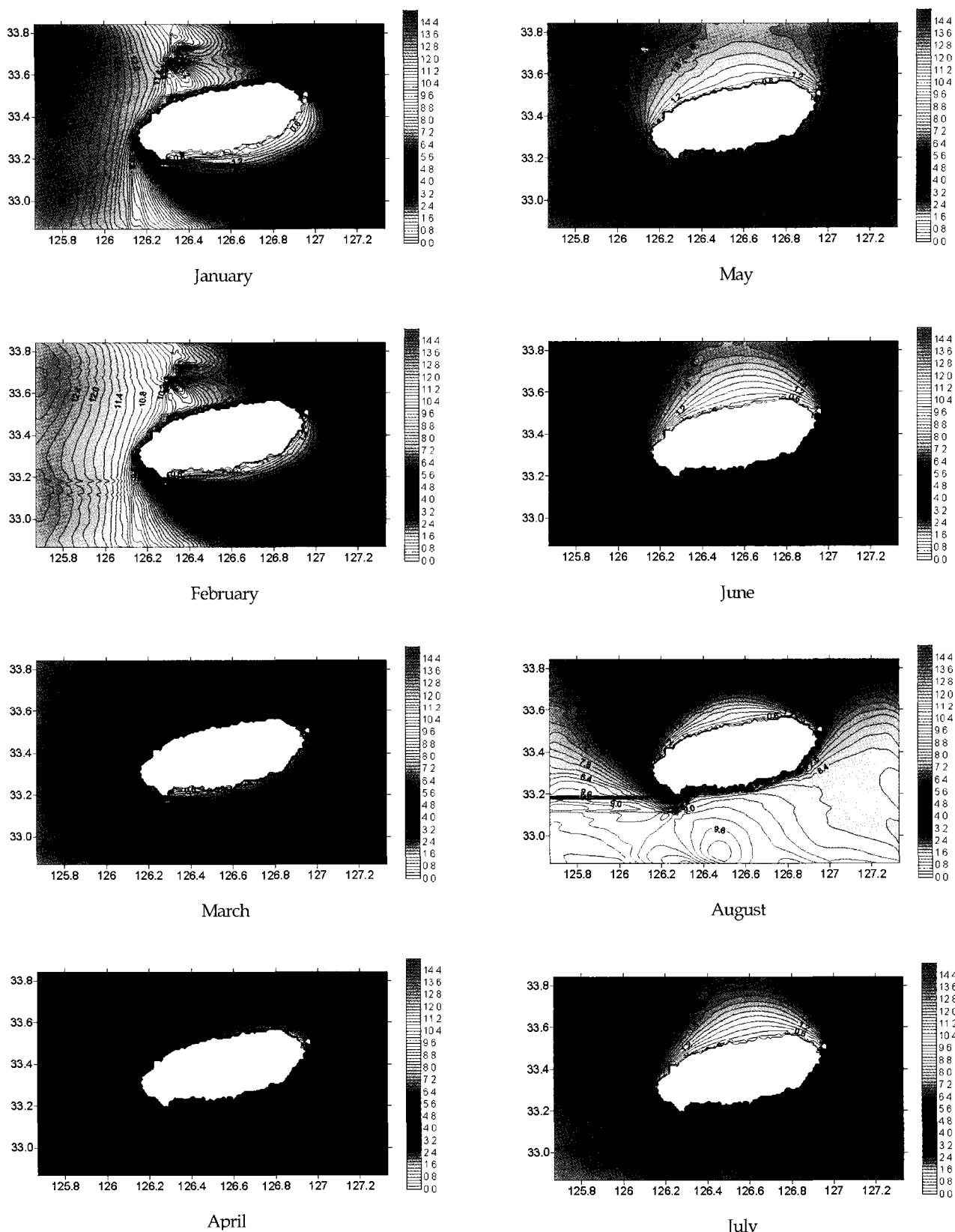


Fig. 3 Monthly mean wave power (kW/m) of total waves at Jeju sea

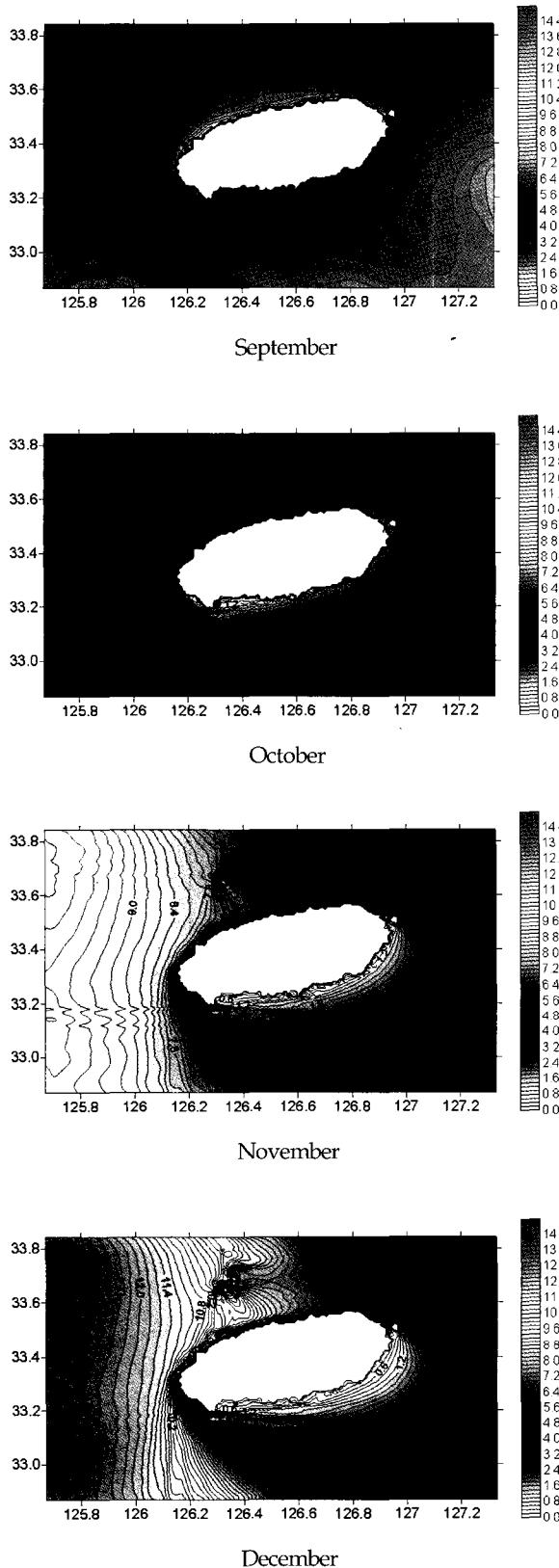


Fig. 3 Monthly mean wave power (kW/m) of total waves at Jeju sea (continued)

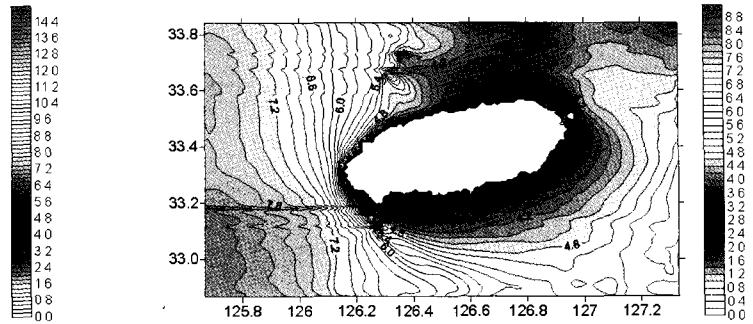


Fig. 4 Mean wave power (kW/m) at Jeju sea averaged from 1979 to 2002

풍파와 너울의 파랑에너지를 모두 포함하는 총 파랑에너지를 밀도가 Fig. 3에 도시된다. 각 계절의 공간적인 분포는 각 시기의 지배적인 파랑성분의 분포 특성을 따른다. 즉, 8월로 대표되는 여름철에는 8월의 너울에너지 분포 특성과 유사하게 공간적으로 분포하며, 1월로 대표되는 겨울철에는 1월의 풍파에너지 분포와 유사한 특성을 보인다.

Fig. 4는 24년 전 기간에 대한 파랑에너지 밀도의 평균 분포이다. 제주도의 동쪽보다는 서쪽의 파랑에너지 밀도가 높아서 파랑에너지의 관점에서는 제주 서쪽 해역이 파력발전에 유리함을 알 수 있다. 그러나 파력발전은 평균 파랑에너지 밀도의 크기뿐 아니라, 계절적인 균일성 및 파랑주기 크기에 따라서도 효율성이 좌우되므로 파력발전의 적지 선정 시에는 파랑에너지 밀도의 공간적, 시간적 분포 파랑특성 인자들의 분포 특성을 함께 고려하는 것이 필요하다.

4. 제주 해역 파력발전 적지분석

제주 해역의 파력발전 적지 평가를 위해 제주도의 동서남북에 위치한 대표적인 예상적지에 대한 비교분석을 수행하였다. 예상적지는 연평균 파랑에너지 밀도가 높은 해역 중에서 현장답사를 통해 지리적 여건이 파력발전에 적합한 곳을 선정하였으며, 우도(동), 차귀도(서), 남원(남), 한림(북)을 검토 대상지로 최종 선정하였다(Fig. 5). SWAN 파랑모델 시뮬레이션에 의한 파랑에너지 밀도의 평균 분포는 서쪽 해역이 가장 우수하게 나타나지만, 모든 계절에 서쪽 해역이 가장 높은 파랑에너지 밀도를 갖는 것은 아니며, 각각의 해역은 계절에 따라 서로 상이한 밀도 변화를 보여준다.

선정된 4개 해역에 대해 연중 월평균 파랑에너지 밀도의 변화를 Fig. 6에 도시하였다. 각각의 해역에서 해안으로부터의 이안거리 1,2,3,5,10km인 지점들에서의 파랑에너지 밀도를 서로 비교하였다. 우도와 남원 해역은 여름철에 파랑에너지 밀도가 높은 반면에 차귀도와 한림해역은 겨울철에 파랑에너지 밀도가 높게 나타난다. 다만, 차귀도 해역은 태풍의 영향으로 여름철에도 파랑에너지 밀도가 증가함을 알 수 있다. Table 1에는 각 해역에서 산정된 연평균 파랑에너지 밀도를 제시하였다. 차

귀도 해역의 밀도가 가장 높고, 한림, 우도, 남원의 순으로 밀도의 크기가 작아진다. 한편 우도의 경우에는 이안거리의 증가에 따른 밀도 크기의 증가가 상대적으로 작으며, 이는 부근 수심이 깊어서 친해효과가 미약한 때문으로 생각된다.

제주 해역의 파력발전 예상 적지 중에서 차귀도 해역은 평균 파랑에너지 밀도가 높고 겨울과 여름의 비교적 오랜 기간 동안 높은 파랑에너지 밀도가 유지되어 효율적인 파력발전이 가능한 최적의 해역으로 평가된다. 차귀도 해역의 보다 상세한 파랑특성이 Fig.7(연중 월평균 유의파고 분포), Fig.8(연중 월평균 파주기 분포) 및 Fig.9(연중 월평균 파랑에너지 밀도 분포)에 보여지며, 각각은 풍파와 너울 성분을 구분하여 도시하였다. 너울 성분의 파고와 파주기는 연중 비교적 균일하게 나타나며, 이에 따라 너울 성분의 파랑에너지 밀도 역시 연중 큰 변화를 보이지 않는다. 반면에 풍파 성분의 유의파고는 겨울철에 현저하게 크게 나타나며, 이에 따라 파주기의 양호한 균일성에도 불구하고 풍파의 파랑에너지 밀도는 겨울철에 매우 높아진다.

파력발전장치의 설계에서 파랑에너지밀도와 더불어 파주기와 파향은 중요한 설계조건이다. 파력발전시설의 핵심장치인 에너지변환장치는 파주기에 따라 효율이 민감하게 변화하므로 통상 주 대상으로 하는 파주기를 설정하여 설계가 이루어진다. 살펴본 바와 같이 차귀도 해역의 파주기는 비교적 일정하므로 이는 파력발전에 유리한 조건이 된다. 다만, 풍파와 너울의 주기가 상이하므로 이를 고려한 설계가 필요하다. 파향과 관련해서는 파향의 변화가 크지 않은 해역이 파력발전에 유리하므로 적지선정 시 파향의 연중 변동성을 확인할 필요가 있다.

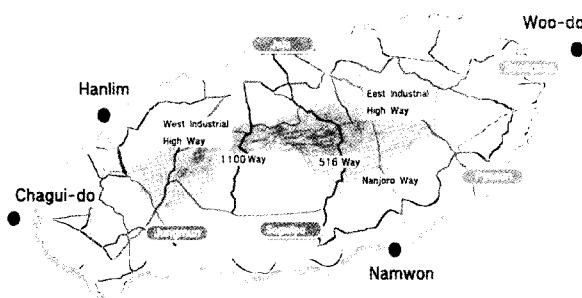


Fig. 5 Locations of favorable wave power generation sites at Jeju sea

Table 1 Mean wave powers of total waves around favorable wave power generation sites averaged from 1979 to 2002

Location Distance	Woo-Do (kW/m)	Chagui-Do (kW/m)	Namwon (kW/m)	Hanlim (kW/m)
1km	3.67	5.51	2.81	3.87
2km	3.98	6.00	3.06	4.00
3km	4.17	6.27	3.29	4.17
5km	4.37	6.52	3.59	4.60
10km	4.58	6.90	4.01	5.15

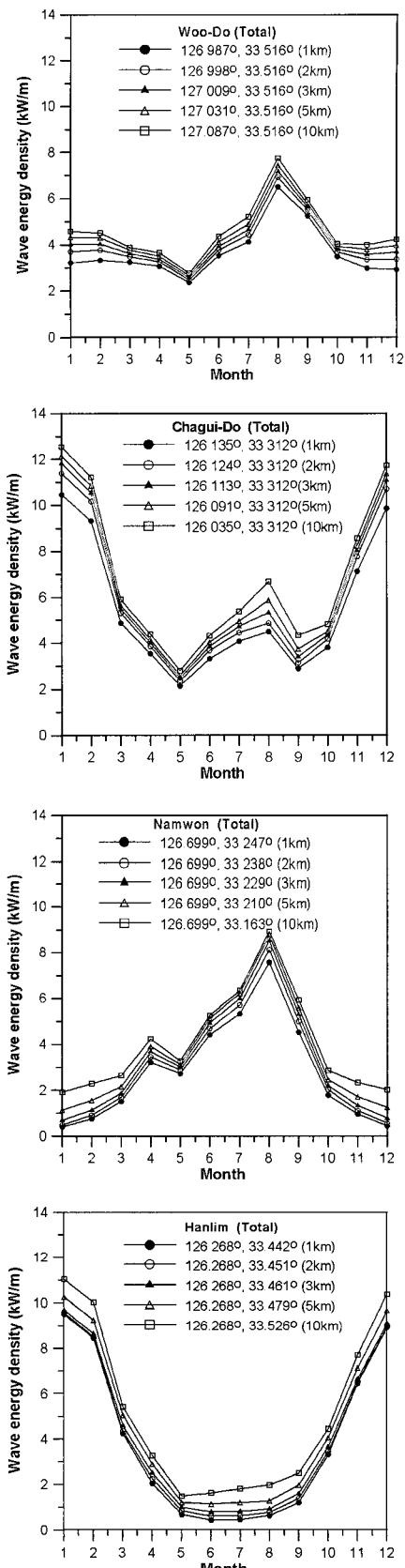


Fig. 6 Monthly mean wave powers of total waves around favorable wave power generation sites

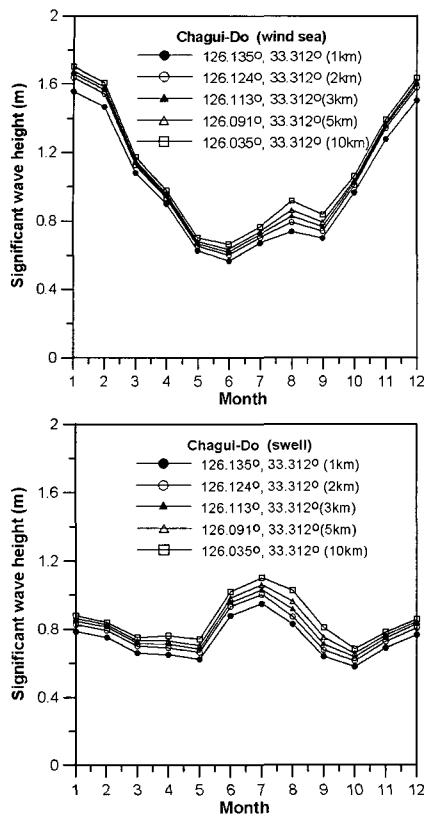


Fig. 7 Monthly mean significant wave heights of wind waves and swells around Chagui-Do

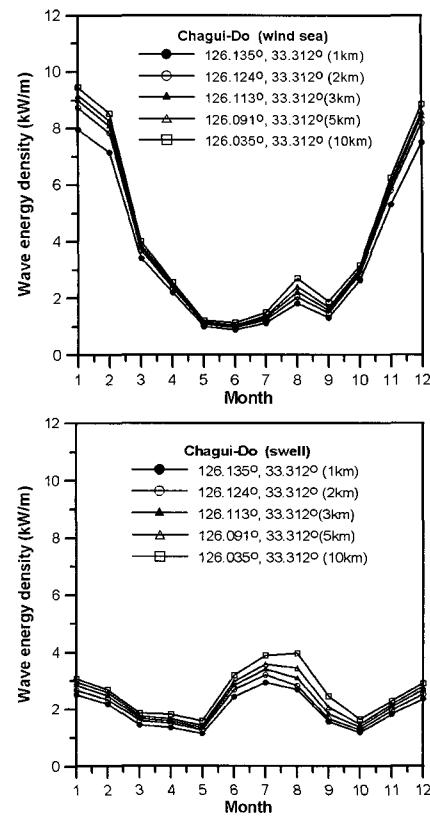


Fig. 9 Monthly mean wave powers of wind waves and swells around Chagui-Do

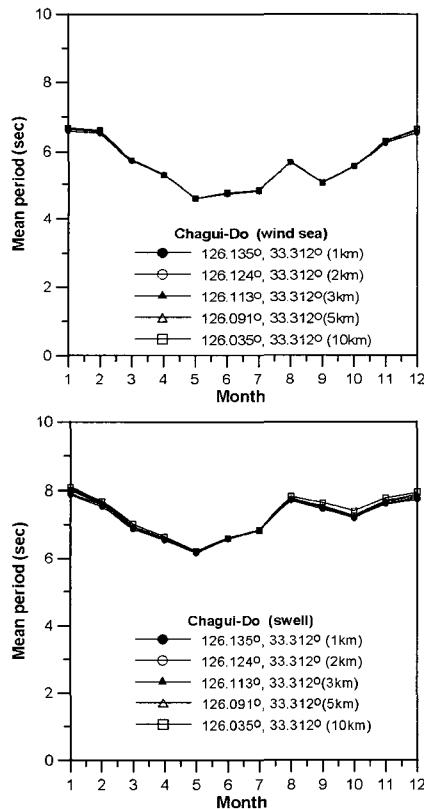


Fig. 8 Monthly mean wave periods of wind waves and swells around Chagui-Do

5. 결 론

우리나라 연안해역에서 상대적으로 파랑에너지 밀도가 높아서 파력발전의 대상지로 가능성이 큰 제주 해역의 파랑에너지 밀도 분포를 SWAN 파랑모델에 의한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 분석하였다. 또한 동서남북의 대표적인 파력발전 예상적지에 대한 비교 분석을 수행하여 제주 해역의 파랑에너지 분포 특성을 고찰하였다. 이로부터 다음의 결론을 얻었다.

(1) 계절중에서 파랑에너지 밀도가 가장 높은 겨울에는 풍파에너지가 지배적이나, 다음으로 높은 여름에는 너울에너지가 지배적이다.

(2) 공간적으로는 여름에는 풍파와 너울 모두 남쪽에서 높으나, 겨울에는 풍파는 서쪽에서 현저하고 너울은 북쪽에서 전반적으로 밀도가 높다. 봄과 가을은 해역에 따른 차이가 미약하나, 봄의 파랑에너지 밀도 분포는 여름과 유사하고, 가을은 겨울과 유사하게 나타난다.

(3) 총 파랑에너지 밀도의 계절적 분포는 각 시기의 지배적인 파랑성분 분포특성을 따르며, 공간적으로는 동쪽에서 서쪽으로 갈수록 밀도가 높아진다.

(4) 제주 해역 서쪽의 차귀도 해역은 타 해역에 비해 평균 파랑에너지 밀도가 현저히 높고, 겨울과 여름의 비교적 오랜 기간 동안 높은 파랑에너지 밀도가 유지되어 파력발전의 최적 해역으로 평가된다.

(5) 차귀도 해역의 너울에너지는 연중 비교적 균일한 반면에 풍파에너지는 겨울에 집중적으로 높게 나타난다. 파주기의 균일성에도 불구하고, 너울과는 달리 풍파의 경우 유의파고의 계절적 변화가 심하기 때문이다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 지원으로 한국해양연구원에서 수행한 "파력발전 실용화 기술 개발"과 한국전력연구원의 지원으로 한국해양연구원에서 수행한 "월파형 파력발전 기반기술 연구"의 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 류황진, 홍기용, 신승호, 송무석, 김도영 (2004). "SWAN 모델을 이용한 제주해역 장기 파랑분포 특성 연구", 한국해양환경 공학회지, 제7권, 제3호, pp 137-145.
- 송무석, 김도영, 김민, 홍기용, 전기천 (2004). "장기 수치모사 파랑자료를 바탕으로 한 한국해역의 파랑에너지밀도 분석", 한국해양환경공학회지, 제7권, 제3호, pp 152-157.

전기천(2003). 해상파랑관측 및 조사, 해양수산부 해양수산연구 개발사업 보고서.

홍석원, 김현주, 강윤구 역 (1998). 해양에너지공학, 신기술.

Booij, N., Ris, R.C. and Holthuijsen, L.H. (1999). "A Third-Generation Wave Model for Coastal Regions, Part I. Model Description and Validation", J. Geophys. Res., Vol 104, C4, pp 7649-7666.

Günther, H., Rosenthal, W., Weare, T.J., Worthington, B.A., Hasselmann, K. and Ewing, J.A. (1979). "A Hybrid Parametric Wave Model", J. Phys. Oceanogr., Vol 84, pp 5727-5738.

Ris, R.C., Booij, N. and Holthuijsen, L.H. (1999). "A Third-Generation Wave Model for Coastal Regions, Part II. Verification", J. Geophys. Res., Vol 104, C4, pp 7667-7681.

Sorensen, R.M. (1993). Basic Wave Mechanics for Coastal and Ocean Engineers, John Wiley and Sons, Inc.

2004년 9월 8일 원고 접수

2004년 11월 12일 최종 수정본 채택