

## 장기 수치모사 파랑자료를 바탕으로 한 한국해역의 파랑에너지밀도 분석

송무석<sup>1,†</sup> · 김도영<sup>1</sup> · 김 민<sup>1</sup> · 홍기용<sup>2</sup> · 전기천<sup>3</sup>

<sup>1</sup>홍익대학교 조선해양공학과

<sup>2</sup>한국해양연구원 해양시스템안전연구소 해양개발시스템연구본부

<sup>3</sup>한국해양연구원 연안항만공학연구본부

## Analysis of Wave Energy Density for Korean Coastal Sea Area Based on Long-Term Simulated Wave Data

Museok Song<sup>1,†</sup>, Doyoung Kim<sup>1</sup>, Min Kim<sup>1</sup>, Keyyong Hong<sup>2</sup> and Kichun Jun<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Naval Architecture and Ocean Engineering, Hongik University, Jochiwon, Chungnam 339-701, Korea

<sup>2</sup>Ocean Development System Research Division, KRISO, KORDI, Daejeon 305-343, Korea

<sup>3</sup>Coastal & Harbor Engineering Research Division, KORDI, Ansan 425-600, Korea

### 요 약

한국해양연구원(KORDI)의 파랑자료를 기초로 하여 한반도 근해의 파랑에너지 분포를 분석하였다. 파랑자료는 최근 24년(1979~2002)간의 바람자료를 바탕으로 HYPY와 WAM모델을 이용하여 모사된 것이다. 파랑에너지, 즉 파력의 평가는 선형이론에 근거한 파주기를 가정하는 형태를 이용하여 하였다. 대략 3 kw/m 정도의 가용 파랑에너지가 한반도 근해에 분포한다고 말할 수 있으며, 계절과 지역에 따라 10 kw/m이상의 파랑에너지가 나타나는 곳도 있다. 제주도의 남서쪽 해역이 상대적으로 양질의 파랑에너지가 존재하는 것으로 평가된다.

**Abstract** – Wave energy distribution along the Korean coastal sea area was analysed based on the calculated wave data at KORDI. The wave data for the analysis is for the last 24 years (1979~2002) and the model is HYPY and WAM using known wind field. The wave energy or wave power was evaluated based on the linear wave theory with a simple wave period assumption. The results shed some idea on the amount of usable wave energy and the sites of higher efficiency. It is fair to say that 3kw/m wave energy is easily observable and 10kw/m is frequently available depending on the season and location. The south west region of Jeju island is believed to have the highest overall wave energy density.

**Keywords:** Wave Energy Density(파랑에너지밀도), Wave Power Distribution(파력분포), HYPY Model, WAM Model, Convertible Wave Energy(가용 파랑에너지)

### 1. 서 론

환경파괴와 자원고갈 문제가 심각하게 받아들여지면서 대체 에너지의 개발을 위한 방안으로 청정에너지 이용기술이 중요하게 인식되고 있다(송무석[2003]). 그중 조수차, 파력, 해류, 온도차 발전 등 해양에서 제공받을 수 있는 에너지 자원을 활용하려는 노력이 선진국을 중심으로 있어 왔고, 이미 실용화되어 상용발전으로 확대된 경우도 있다(홍석원 등[1998]). 반면, 우리나라의 경우 기초

적인 연구 실적이 적은편이고, 본 연구에서는 우리나라 근해에서의 파력발전을 염두에 두고 기본 자료로서의 파랑분포 특성을 살펴 보았다. 단기 자료에 근거한 유사한 연구는 김현주 등[1998]에서 볼 수 있다.

본 논문에서는 1979~2002년 동안 우리나라 주변 해역의 파랑자료(해양수산부[2003])를 이용하여  $H_s$ , 파주기, 파향의 통계적 특성치를 파악하고 파에너지밀도의 형태로 우리나라 근해의 시공간적인 분포를 정리하였다. 본 연구의 결과는 파력발전 적지선정에 기초적인 자료로 활용 될 수 있을 것으로 사료된다.

<sup>†</sup>Corresponding author: msong@hongik.ac.kr

## 2. 파랑에너지 이론해석

본 절에는 유의파고와 피크주기가 주어진 경우 파에너지 밀도를 구하는 식을 간략히 정리하였다. 관련된 이론과 상세한 내용은 Sorensen[1993]을 참조하면 된다.

파고가  $H$ 인 규칙파가 가지고 있는 단위 표면적당 파에너지의 평균 즉 에너지 밀도는 다음과 같다.

$$E = \frac{1}{8}\rho g H^2 \quad (1)$$

여기서  $\rho$ 는 물의 밀도,  $g$ 는 중력가속도이다. 선형파 이론의 적용 범위 내에서는 식 (1)은 심해에서 천수까지 적용할 수 있다. 파의 에너지 플럭스(flux) 또는 일률(power)은 파 진행 방향으로 전파되는 단위 시간당 평균에너지로, 단위 폭에 대하여 아래와 같이 주어진다.

$$P = \frac{\rho g H^2 L}{16 T} \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) \quad (2)$$

여기서  $T$ 는 파주기,  $k$ 와  $d$ 는 각각 파수와 수심이다.

이제  $n$ 을 정의하고 파의 위상전파속도( $C=L/T$ )와 파의군속( $C_g$ )을 이용하여 식 (2)를 다시 쓰면 아래와 같다.

$$n = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) \quad (3)$$

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

여기서 파력(wave power)은 단위 폭 당 값이므로 단위는  $w/m$ 이다.

한편 선형파 이론에서는 파의 전파속도,  $C=(gT/2\pi)\tanh kd$ , 이용하여 (4)를 다시 쓰면,

$$P = \frac{\rho g^2 H^2 T}{16\pi} n \tanh kd \quad (5)$$

로 되는데, 이식 역시 규칙파인 경우 선형파 범위 내에서 수심에 관계없이 사용할 수 있다.

파랑이 심해에서 천해역으로 진입해 올 때 파랑에너지의 연속성을 이용하여 나타내는 천수계수  $K_s$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_s = \frac{1}{\sqrt{2n \tanh kd}} \quad (6)$$

이를 이용하여 규칙파일 경우 파력은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$P = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi K_s^2} \quad (7)$$

한편, 실제 해양파는 불규칙하기 때문에 파력을 구하기 위해서 개별파를 규칙파로 가정하여 파력을 계산한 후 이를 합하여 시간 평균치를 구하는 방법을 사용하는 방법을 사용하기로 한다. 불규칙파 중에서 파력의 시간평균치는 다음과 같이 주어진다.

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^N \rho g^2 H_i^2 T_i}{32\pi K_s^2} \quad (8)$$

모든 파의 주기를 일정하다고 가정하고 평균파주기를 영점상향 통과주기  $T_z$ (zero up-crossng period)라 가정하면 식(8)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\bar{P} = \frac{\rho g^2 H_{ms}^2 T_z}{32\pi K_{sm}^2} \quad (9)$$

$$K_{sm} = \frac{1}{\sqrt{2n \tanh k_d d}} \quad (10)$$

여기서  $H_{ms}$ 는 파고의 제곱평균(root mean square)이고  $K_{sm}$ 은 아래의 분산관계식을 만족한다.

$$\left( \frac{2\pi}{T_z} \right)^2 = g k_m \tanh k_m d \quad (11)$$

파고의 분포를 레일리분포로 가정하면 다음 관계식이 있고,

$$H_s = 1.416 H_{ms} \approx \sqrt{2} H_{ms} \quad (12)$$

최종적으로 불규칙파 중에서 평균 파력을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\bar{P} = \frac{\rho g^2 H_s^2 T_z}{64\pi K_{sm}^2} \quad (13)$$

해양연구원 파랑자료에서는 바람의 속도를 이용하여 파랑산출을 하였으며, 파랑산출에서 JONSWAP 스펙트럼을 가정하여 사용하였고, 스펙트럼의 피크 주기(peak period)와 유의파고로 결과가 정리되어 있어서 식 (13)을 사용하기 위해서는 주기의 환산이 필요하다.

Chakrabati[1984]는 JONSWAP 스펙트럼에서 피크주기와 유의 주기의 관계를 다음과 같이 나타내었다.

$$T_p = T_z (1.49 - 0.102\gamma + 0.0142\gamma^2 - 0.0007\gamma^3) \quad (14)$$

여기서  $\gamma$ 는 JONSWAP 스펙트럼의 파라미터이다. 본 연구에서는 식 (14)에서  $\gamma=3.3$ 을 사용하여 주기를 환산하였다.

## 3. 파랑에너지밀도의 시공간적 분포특성

전절에서 정리한 식을 이용하여 우리나라 해역의 파력 분포(파랑에너지 밀도)를 살펴보았다. Fig. 1은 한국해양연구원(KORDI)의 파랑자료가 정리된 격자점을 보여주고 있다. 우리나라를 중심으로 동서로 157개, 남북으로 225개의 격자점이 있고 격자 간격은 약 15 km이다. 1979년에서 2002년까지의 바람자료를 기본으로 HYPA와 WAM 모델을 기초로 수치해석된 파랑정보는 유의파고, 피크주기 그리고 풍향이고 각각 너울성분과 풍파성분으로 구분되어 1시간 간격으로 정리되어 있다(해양수산부[2003]).

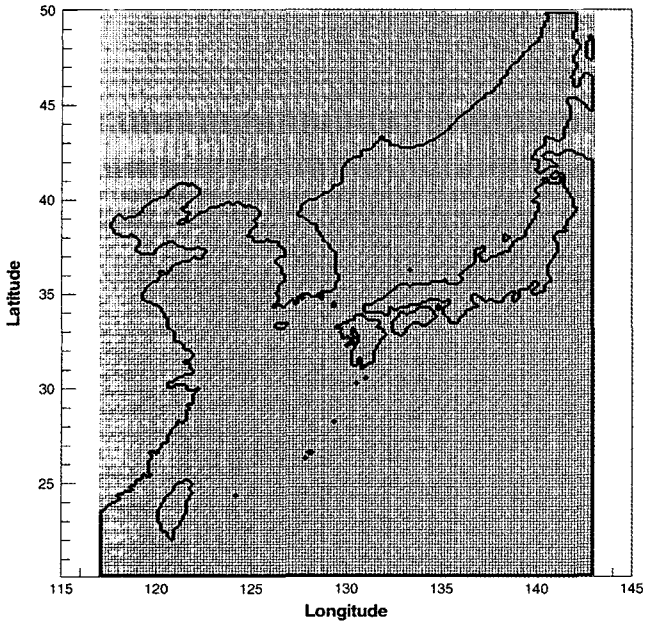


Fig. 1. Grid of KORDI wave data.

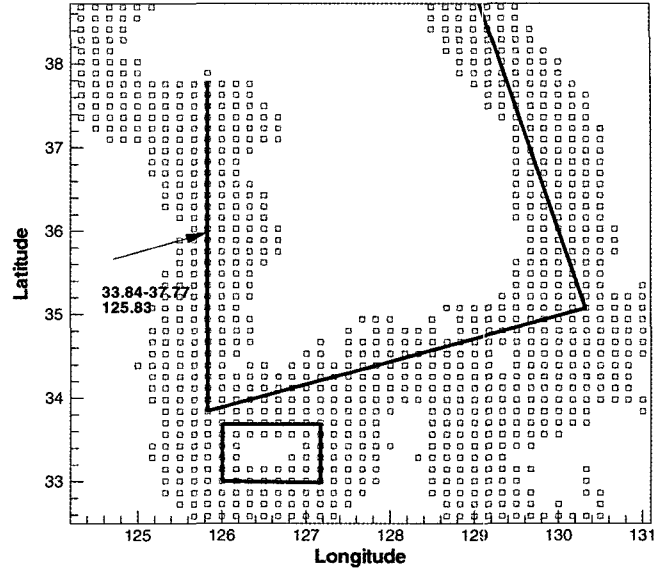


Fig. 2. Grid for analysis. Lines are for line data analysis.

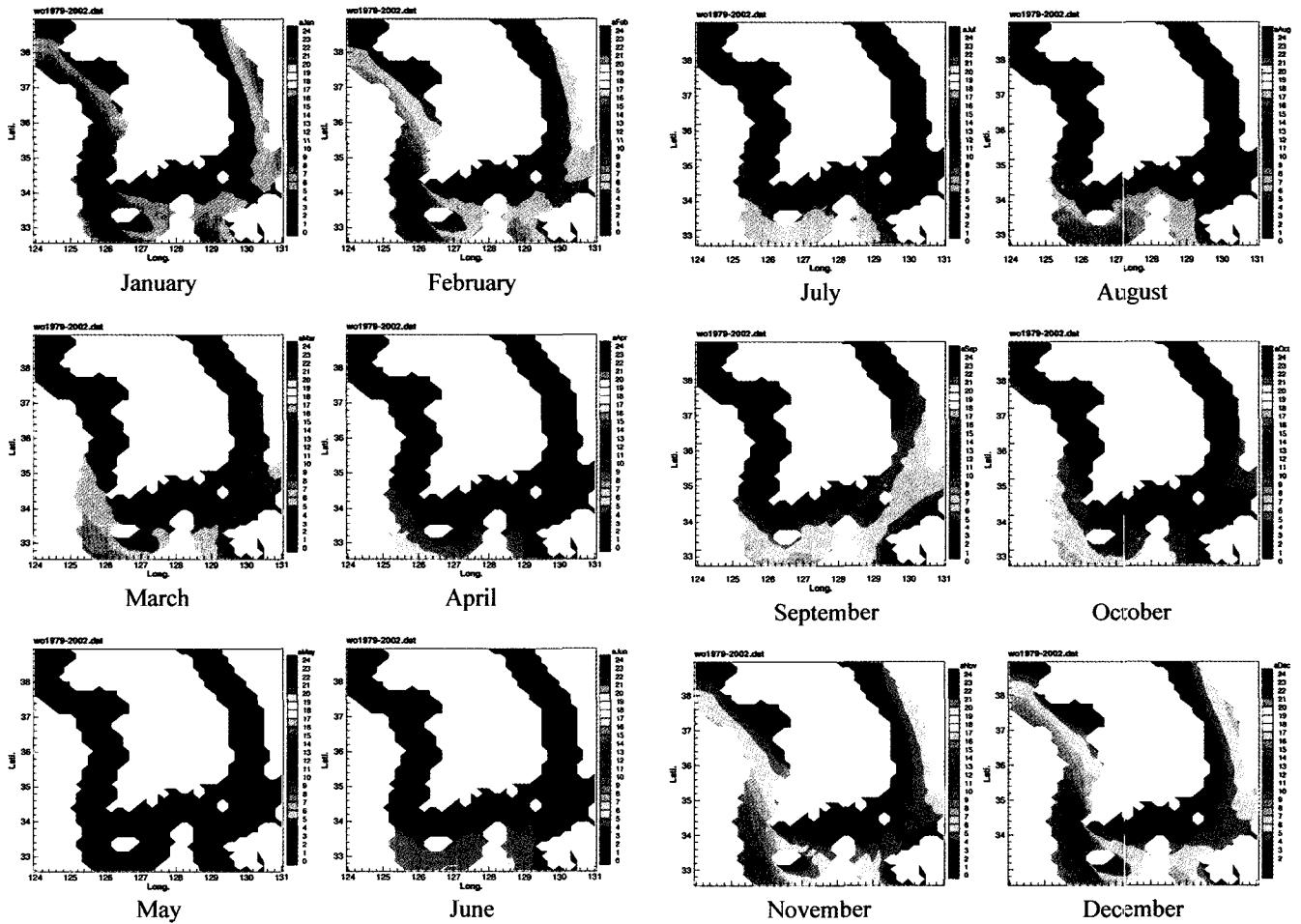


Fig. 3. Monthly averaged wave energy density for 24 years.



Fig. 4. Averaged wave power for 24 years.

본 연구의 초점을 우리나라 근해로 맞추어 해석용 격자점을 따로 정하고 Fig. 2에 보였다. 이는 현실적으로 발전된 전기의 송전 및 발전장치의 설치경제성 등을 고려하여 해안에서 100 km 떨어진 해역까지를 대상으로 한 것이다. 그림의 실선은 해역별 유입파력 분석을 위하여 따로 값을 추출한 라인으로 후에 설명한다.

Fig. 3는 24년간의 파랑에너지밀도를 월별로 평균하여 보인 것이다. 파력의 크기는 0 kW/m(짙은 파란색)에서 붉은색(24 kW/m)까지 변하는데, 계절별로 그리고 지역별로 다소의 차이를 보이고 있으나, 대체로 3~5 kW/m의 파랑에너지 밀도를 보이고 있다. 지역적으로는 남서쪽 바다, 특히 제주도의 남서쪽 해역이 상대적으로 큰 에너지를 가지고 있음을 알 수 있고 계절별로는 12월에서 2월에 이르는 겨울철에 파랑에너지가 증대됨을 볼 수 있다.

Fig. 4에는 24년간의 정보를 총평균한 결과를 보이고 있다. 월별 결과에서 확인한대로 제주도 남서쪽 해역이 7 kW/m로 상대적



Fig. 5. Averaged wave power considering waves of 1 m to 4 m height only.

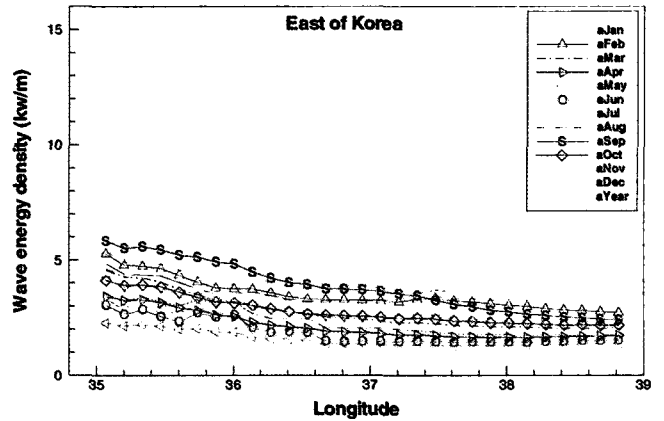


Fig. 6. Monthly wave powers along the east coast.

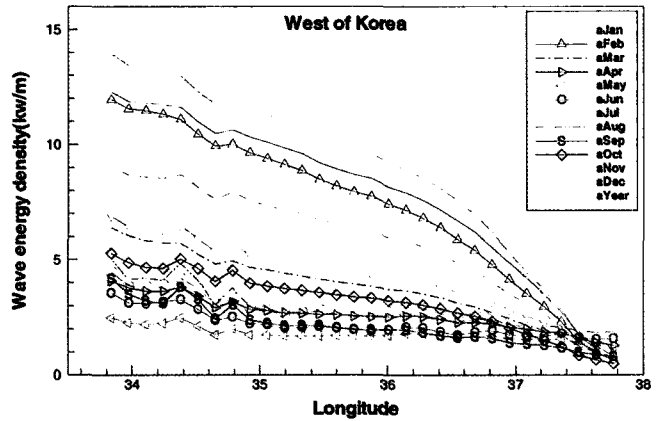


Fig. 7. Monthly wave powers along the west coast.

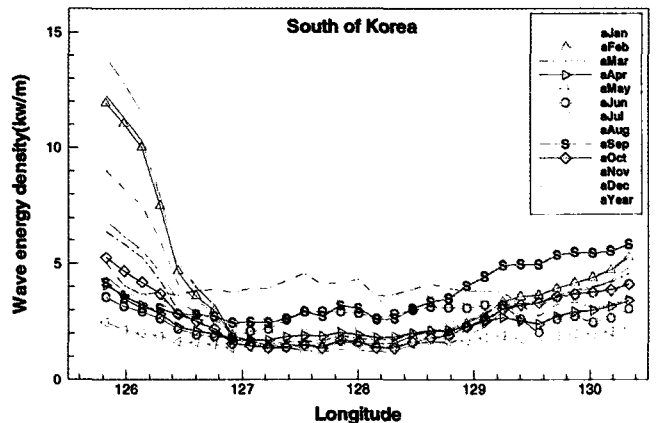


Fig. 8. Monthly wave powers along the south coast.

으로 높은 파력밀도를 보이고 있다. 육지와 근접한 동해의 경우 오히려 파력밀도가 낮게 나타나고 있는데, 북서풍에 의한 풍파가 덜 발달된데 기인한다.

Fig. 5에는 발전이 가능한 최저/최고 파고를 1 m~4 m라고 가정했을 때 주어진 파랑자료를 활용하여 확률분포를 가정하여 나타내고 있다. 파력발전장치의 기계적 특성에 따라 효과적인 발전이 가능한 파고 혹은 파주기가 존재하고, 따라서 이러한 조건에

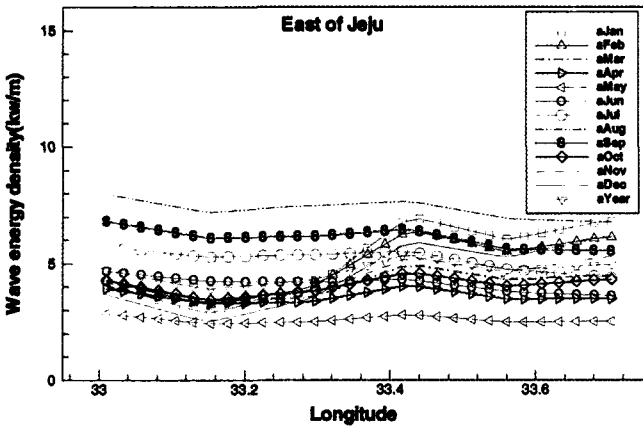


Fig. 9. Monthly wave powers along the east coast of Jeju island.

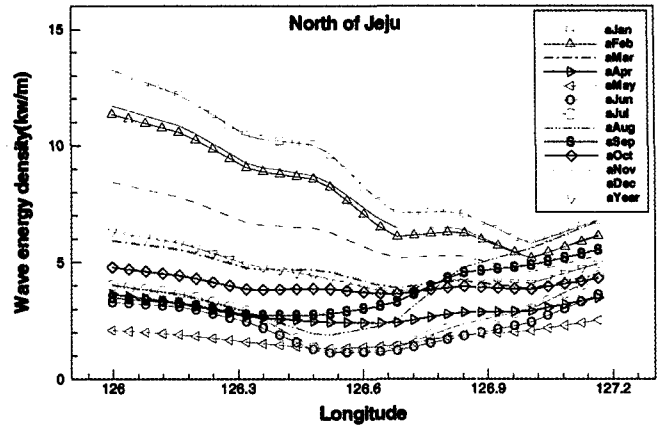


Fig. 12. Monthly wave powers along the north coast of Jeju island.

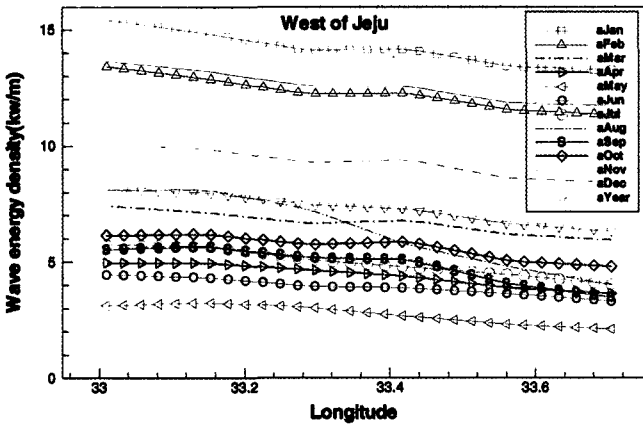


Fig. 10. Monthly wave powers along the west coast of Jeju island.

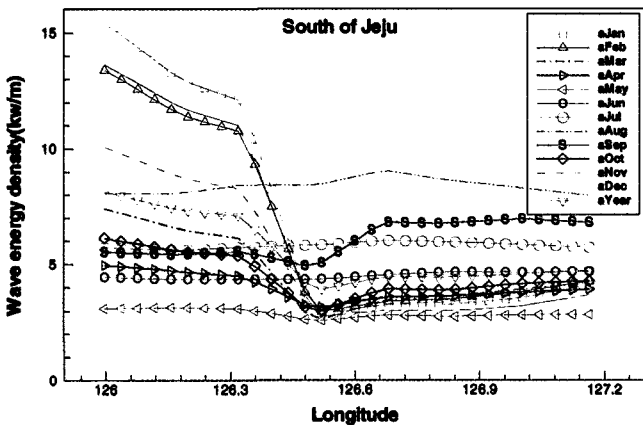


Fig. 11. Monthly wave powers along the south coast of Jeju island.

부합되는 파랑밀도에 대한 분석이 필요할 수 있다. 역시 제주도 남서쪽 해역이 상대적으로 큰 에너지 분포를 보이고 있으나, 그 크기는 3 kw/m~4 kw/m 정도로 줄어드는 것으로 나타난다.

보다 구체적으로 가용 파랑에너지를 살펴보기 위하여 Fig. 2에 보인 선을 따라 에너지 밀도를 Fig. 6~12에 해역별로 보였다. 그림에서 가로축은 위도 혹은 경도를 나타내고 각 선들은 24년간의 월평균 혹은 총평균을 나타낸다.

제주도부근 해역은 Fig. 9~12에 따로 나타내었다.

### 4. 결 론

HYPRA와 WAM 모델을 이용한 24년간의 파랑자료를 기초로 하여 한반도 근해의 파랑에너지 분포를 분석하였다. 파랑정보는 대략 15 km 간격으로 되어 있고 각 위치에서 1시간 간격으로 유의 파고, 파스펙트럼 피크의 파주기 및 파향이 1979년부터 2002년까지 정리되어 있다. 이를 간단한 파에너지 모델을 이용하여 월별로 에너지 밀도를 계산하고 이를 한반도 근해의 파랑밀도분포지도로 작성하였다.

대략 3 kw/m 정도의 가용 파랑에너지가 한반도 근해에 분포한다고 보는 것이 타당하며, 남서쪽 해역, 특히 제주도의 남서쪽 해역이 상대적으로 큰 에너지 밀도를 가지고 있다. 년 중 상대적으로 큰 파랑에너지가 나타나는 기간은 12월에서 2월까지 이어지는 겨울철이고, 제주도 남서쪽을 기준으로 5, 6월의 3 kw/m에 비하여 14 kw/m의 높은 에너지 밀도가 존재한다. 년별 변화는 그리 크지 않고 태풍이 발생하는 8, 9, 10월은 다소의 변화를 관찰할 수 있다.

본 연구의 결과를 바탕으로 제주도의 남서쪽 해역이 효과적인 파력발전 후보지로 평가할 수 있을 것이라 판단된다.

### 후 기

본 연구는 해양수산부지원 한국해양연구원의 파력에너지 실용화 기술개발 위탁과제의 결과이며, 일부 한국과학재단의 첨단조선공학연구센터의 지원으로 수행되었다.

### 참고문헌

[1] 김진현, 홍승용 공편, 1998, 해양21세기, 나남출판  
 [2] 김현주, 최학선, 김선경, 1998, 파랑에너지 해석 및 가용량 평

- 가 연구, 한국해양공학회지, 제 12권, 제 1호, pp. 107~112.
- [3] 송무석, 2003, 청정생산과 해양에의 적용성에 관한 연구, 한국해양환경공학회지, 제 6권, 제 3호, pp. 03~15.
- [4] 송무석, 김도영, 조윤태, 김민, 홍기용, 2004, 한국해역의 파랑에너지 밀도 분석, 대한조선학회 춘계학술대회논문집(1), pp. 529~534.
- [5] 한국해양연구원, 2004, 장기파랑관측자료의 해석모델 개발 및 분포특성의 통계적 분석.
- [6] 해양수산부, 1997, 장기파랑(심해·천해)자료 통계산출 시스템 매뉴얼.
- [7] 해양수산부, 2002, 해상파랑관측 및 조사 보고서.
- [8] 해양수산부, 2003, 해상파랑관측 및 조사 보고서.
- [9] 홍석원, 김현주, 강윤구 역, 1998, 해양에너지공학, 신공학.
- [10] Rober M. Sorensen, 1993, Basic Wave Mechanics: For Coastal and Ocean Engineers.

---

2004년 3월 22일 원고접수

2004년 8월 2일 수정본 채택