

# 파랑에너지 해석 및 가용량 평가 연구

김 현 주\* · 최 학 선\*\* · 김 선 경\*\*\*

(97년 9월 24일 접수)

## Estimation of Wave Power in Korean Coastal Waters

Hyeon-Ju Kim\* · Hark-Sun Choi\*\* · Sun-Kyoung Kim\*\*\*

**Key Words** : Wave Power, Wave Simulation, Wave Power Analysis, Wave Power Distribution, Seasonal Variation.

### Abstract

The purpose of this study is to analyze the amount of available wave power and its characteristics related to the development of a practical system for ocean wave energy conversion in Korean coastal waters. The analysis method of wave power was established through comparison between theory and numerical simulation of deep sea wave by Inverse Fourier Transform with random phase method. Based on the results of comparison, wave power was estimated by use of data set from observed offshore and coastal waves and hindcasted deep sea waves around the Korean peninsula. Annual mean wave power is estimated as about 1.8~7.0 kW for every metre of wave frontage at East sea, 1.5~5.3 kW at South sea and 1.0~4.1 kW at West sea, respectively. Mean wave power along deep sea front of coastal waters of Korea amounts to about 4.7 GW. Regional distribution and seasonal variation of wave power were discussed to develop practical utilization system of wave power of not so high grade of available wave power.

### 1. 서 론

최근, 지구환경 보호와 대체에너지 개발을 위한 방안으로서 청정에너지 이용기술이 강조되고 있다. 특히 파랑, 조석, 해류, 온도차, 바람, 태양열 등의 자연에너지 이용방안이 연구 개발되고 있으며, 이미 실용화된 것도 있다. 이 중 파랑에너지 이용기

술은 파력발전을 중심으로 발전해 왔으며, 우리나라에서도 60kW급 파력발전장치<sup>1)</sup> 등에 대한 연구가 이루어지고 있다. 또한, 해역환경개선기술 및 해역정온화기술 등으로 확대되어 가고 있는 실정이다<sup>2)</sup>.

파랑에너지의 실용화를 위해서는 파랑에너지 취득 및 변환시스템의 효율성뿐만 아니라 에너지 가

\* 종신회원, 한국기계연구원 선박해양공학연구센터 해양기술연구부

\*\* 정회원, 한국기계연구원 선박해양공학연구센터 해양기술연구부

\*\*\* 한국기계연구원 선박해양공학연구센터 해양기술연구부

용량과 분포 및 출현특성에 적합한 시스템 개발이 필요하다<sup>1)</sup>. 파력발전을 위한 적지선정과 연안역의 종합이용 및 관리계획을 수립하기 위해서는 가용 에너지 부존량 및 출현 특성을 명확히 할 필요가 있으나, 아직까지 체계적인 연구는 찾아보기 힘든 실정이다.

본 연구는 파랑에너지 이용계획을 수립하고 다양한 이용시스템을 개발하기 위한 기초적 연구로서, 한국 연안의 해역별 파랑에너지 가용량 평가와 시공간적 분포 및 변동의 특성을 정리하는데 목표를 두고 있다. 이를 위해, 해양파의 수치시뮬레이션을 통해 불규칙파의 wave power를 산정하고 검토함으로써 유의파를 이용한 해석법을 정립하였다. 이를 기초로 관측 및 파후해석 결과를 이용하여 우리나라 주변해역의 심해 및 천해역의 파랑에너지 분포와 출현특성을 정리하고 고찰하였다.

## 2. 파랑 자료 및 에너지 해석

### 2.1. 파랑자료 취득 및 정리

우리나라 연안의 파랑에너지를 평가하기 위한 파랑자료는 매우 부족한 실정이나, 본 연구에서는

Table 1. Available data sets to analyse wave power

Data	Area	Period	Remarks
Global Wave Statistics	East sea, South sea, West sea	31yr	Deep water wave
Hindcasted Wave Data by Korea Ministry of Maritime and Fisheries	Geojin, Sokcho, Kangreung, Mookho, Dongho, Samcheok, Uleung, Hupo, Pohang, Ulsan, Pusan, Geoje, Chungmu, Namhae, Yeosu, Geomun, Daeduk, Seoguipo, Cheju, Heuksan, Chindo, Mokpo, Hongdo, Muan, Buan, Kunsan, Taean, Seosan, Incheon, Baekryunfdo	10yr	Deep water wave
Observed data by Korea Ministry of Maritime and Fisheries	Geojin, Geojin, Sokcho, Kangreung, Mukho, Bukpyung, Sancheok, Uleung, Hupo, Pohang, Mipo, Ulsan, Pusan, Yeosu, Kwangyang, Cheju, Seoquipo, Mokpo, Kunsan	13yr	Deep water wave or Shallow water wave

해양수산부(해운항만청)에서 관측·정리하고 있는 연안파랑자료<sup>3)</sup>, 최근 10년간의 기상자료로부터 해상풍 및 심해파를 추정한 장기파랑해석자료<sup>4)</sup>, 상선의 목시관측자료를 수집 정리한 심해파 자료로서 Global Wave Statistics<sup>5)</sup>의 파랑자료를 이용하였다. 각각의 개요를 Table 1에 요약하였으며, 본 연구에서는 이들 자료를 이용하여 해역별 파랑에너지 출현 및 분포 특성을 정리하였다.

### 2.2. 파랑에너지 해석

파고 H, 주기 T의 규칙파가 단위면적당 갖는 에너지 E는 다음 식과 같이 나타낸다.

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

여기서,  $\rho_w$ 는 물의 밀도, g는 중력가속도이다. 이 에너지는 파군속도  $C_g$ 에 의해 수송되고, 그 수송량을 wave power(W)라 하며 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

여기서, wave power는 와트(W, Nm/sec)의 단위를 가지며, 식(2)는 파봉선 1m당 wave power로서 W/m의 단위를 가진다. 심해파의 wave power를 나타내는 식(2)는 천해역으로 진입해움에 따라 파랑에너지의 연속성에 의해 천수계수  $K_s$ 를 이용하여 다음 식으로 나타내어진다.

$$W = \frac{1}{32\pi} \frac{\rho_w g^2 H^2 T}{K_s^2} \quad (3)$$

심해역의 경우( $K_s=1$ ), W는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$W = 0.995 H^2 T \quad (kW/m) \quad (4)$$

여기서, H, T의 단위는 각각 m, sec이다.

해양파는 불규칙하므로 불규칙파의 wave power 산정법이 필요하며, 이러한 방법에는 개별파의 에너지를 합산하는 방법과 스펙트럼의 에너지로부터 환산하는 방법이 있다. 전자는 개별파를 규칙파중의 하나로 보고 wave power를 계산하여 결과를 집계하여

시간평균치를 구하는 다음과 같은 방법이다.

$$W_m = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} 1/32\pi\rho_w g^2 H_i^2 T_i}{\sum_{i=1}^{N_0} T_i} \quad (kW/m) \quad (5)$$

여기서,  $N_0$ 는 총 파수이며, 계산에 있어서 에너지 레벨이 높은 고파고의 범위에서는 파고와 주기의 상관성이 거의 없으므로 주기를 모두 유의파주기 ( $T_{1/3}$ )로 가정하면 식(6)과 같이 정리된다.

$$W_m = K_w H_{1/3}^2 T_{1/3} \quad (kW/m) \quad (6)$$

여기서  $k_w$ 는 wave power계수이다.

후자는 스펙트럼 개념을 도입하여 미소한 각 성분 파들의 에너지를 합산하는 방법이다. 임의 주파수 구간( $f, f+df$ ) 및 파향 구간( $\theta, \theta+d\theta$ )의 wave power  $dW$ 는 그 대역의 단위면적당 전 에너지  $\rho_w g S(f, \theta) df d\theta$ 에 군속도  $C_g$ 를 곱하여 구할 수 있다. 이로부터  $W_m$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} W_m &= \rho_w g \int_0^\infty \int_0^{2\pi} S(f, \theta) C_g df d\theta \\ &= \rho_w g \int_0^\infty S(f) C_g df \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,  $S(f)$ 는 주파수 스펙트럼이며 다양하게 제시되어 있으나, 다음과 같은 형태로 정리할 수 있다.

$$S(f) = A f^{-5} \left[ \frac{\exp(-B f^4)}{\gamma \exp\left(\frac{-(f/f_p - 1)^2}{2\sigma^2}\right)} \right] \quad (8)$$

여기서,  $A, B$ 는 Table 2에 나타낸 바와 같고,  $\gamma$ 와  $\sigma$ 는 스펙트럼 형상모수,  $f_p$ 는 peak주파수를 의미한다.

Table 2는 대표적인 스펙트럼에 의한 심해파의 평균 wave power를 나타낸다. 이를 검토하기 위하여 일방향 불규칙파를 류·김<sup>6)</sup>의 방법으로 수치 시뮬레이션하고 식(5)에 의한 개별파의 에너지합의 평균치와 식(6)에 의한 계산결과치를 비교, 정리하였다. 수치시뮬레이션 및 wave power 시계열 계산 결과를 Fig. 1 나타내었고, 이들 에너지 평균값과 입사파의 유의파고 및 주기에 의한 결과를 비교하여 Fig. 2에 나타내었다. 동 그림으로부터  $k_w$ 는 0.475~0.5의 값을 가지며, 1파당 data point수

( $T_p/dt$ )에 따른 변동성도 그다지 크지 않았다. 따라서 본 연구에서 파랑에너지 분포 계산에서는  $k_w$  값을 0.5로 적용하였다.

한편, 심해파가 천해역으로 입사해 들어오면 임의 수심에서의 방향스펙트럼  $S_o(f, \theta_o)$ 은 굴절 등에 의해 변형된다. 수심  $h$ 에서의 주파수 스펙트럼을  $S(f, h)$ 라고 하면 그 지점에서의 평균 wave power  $W_m(h)$ 는 식(9)와 같다.

$$\begin{aligned} W_m(h) &= \rho_w g \int_0^\infty \int_0^{2\pi} S(f, h) C_g(f, h) df \\ &= \rho_w g \int_0^\infty C_{g, o}(f) \int_0^{2\pi} K_o^2(f, h, \theta_o) S_o(f, \theta) d\theta df \\ &= K_w K_d H_{1/3}^2 T_{1/3} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서,  $k_d$ 는 파랑변형계수이며, 불규칙파의 파랑변형 계산을 통한 국지적 wave power의 평가 및 적지 선정에 위한 중요한 수단으로 사용될 수 있다.

Table 2. Wave power based on various wave spectrum models<sup>7)</sup>

Spectrum type	A	B	$\gamma$	$K_w$
Pierson-Moskowitz	$0.0796 H_{1/3}^2 T_{m2}^{-4}$	$0.3183 T_{m2}^{-4}$	1	0.59
JONSWAP	$0.072 H_{1/3}^2 T_{m1}^{-4}$	$1.25 T_p^{-4}$	3.3	0.48
ISSC	$0.111 H_{1/3}^2 T_{m1}^{-4}$	$0.44 T_{m1}^{-4}$	1	0.56
Bretshneider -Mitsuyasu	$0.257 H_{1/3}^2 T_{m1}^{-4}$	$1.03 T_{1/3}^{-4}$	1	0.44

where,  $T_{m1} = \frac{\int_0^\infty S(f) df}{\int_0^\infty f S(f) df}$ ,  $T_{m2} = \frac{\int_0^\infty S(f) df}{\int_0^\infty f^2 S(f) df}$ ,  
 JONSWAP:  $\sigma=0.07$  ( $f < f_p$ ),  $\sigma=0.09$  ( $f > f_p$ )

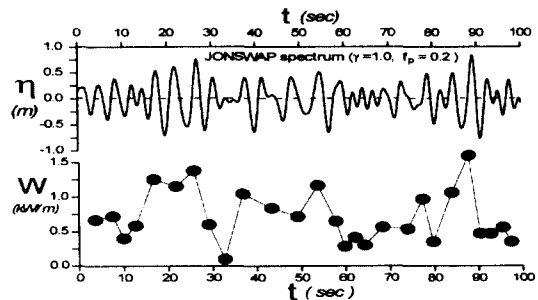


Fig. 1. Simulated wave signal and wave power history.

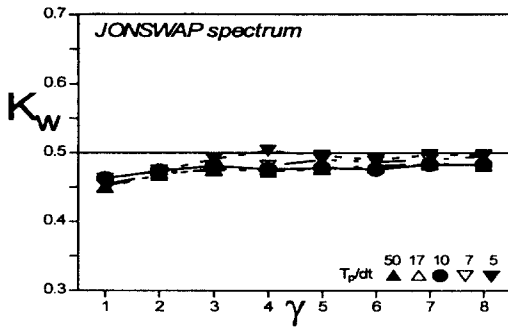


Fig. 2. Variation of wave power constant.

### 3. 파랑에너지 가용량 평가

#### 3.1. 심해 파랑 에너지 부존량

심해파의 에너지 부존량은 British Maritime Technology의 Global Wave Statistics 자료와 해양수산부의 장기파랑 수치해석 추정치를 사용하여 산정하였다. Global Wave Statistics 자료는 동해, 남해, 서해에 대한 전년 및 계절별 평균 유의파고 및 주기로서 정리되어 있으며, 해양수산부 자료는 우리나라 연안의 심해파 영역에 대하여 10년간의 월별 평균 유의파고 및 주기로 정리되어 있다. Global Wave Statistics 자료를 이용한 해역별 파랑에너지 이용가능량과 계절적 변동 특성을 Fig. 3에 나타내었다. 그림에 나타낸 바와 같이 동해, 남해 및 서해의 wave power 부존량은 각각 평균 7 kW/m, 14.3 kW/m, 8.3 kW/m으로 산정되었다. 남해의 wave power가 높은 이유는 고려된 남해안 해역이 일본의 동해측까지로서 태평양 연안의 파랑자료가 포함되어 있기 때문으로 생각된다. 동해 및 서해의 경우도 원양측의 심해파 자료로서 생각된다.

연안으로 입사해오는 심해파 에너지 부존량은 해운항만청의 수치해석 추정치를 사용하여 산정하였다. 동해, 남해, 서해를 각 10개 해역으로 구분하여 평균 에너지 분포량을 산정하였으며, 그 결과를 Fig. 4에 정리해 놓았다. 그림에서 알 수 있듯이 동해에는 1.79~6.96 kW/m, 남해에는 1.54~5.25 kW/m, 서해에는 1.00~4.13 kW/m의 파랑에너지가 분포하고 있으며, 평균 부존량을 격자점을 중심

으로 한 구간별 거리에 대한 분포량으로 산정하여 집계한 결과 한국 연안의 파랑에너지 부존량은 평균 4.7 GW에 달하는 것으로 나타났다. 또한, Fig. 5에서 알 수 있듯이 월별 평균 wave power 분포량은 계절적 변화가 심하고, 동해 및 서해는 동절기에, 남해는 하절기에 큰 에너지가 집중하는 것으로 나타났다.

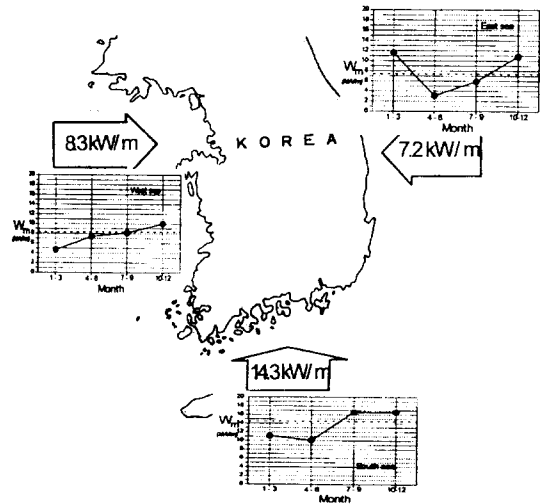


Fig. 3. Distribution and variation characteristics of wave power using Global wave statistics data.

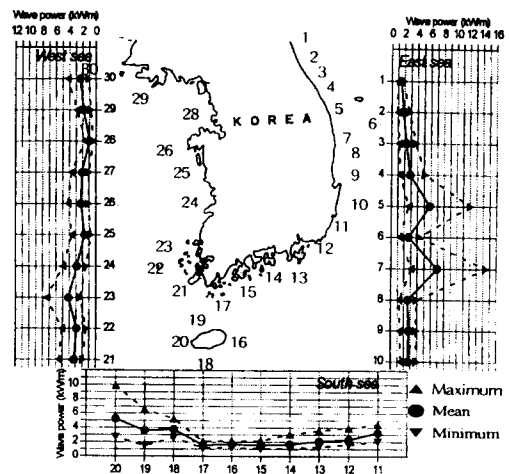


Fig. 4. Distribution of wave power in deep water.

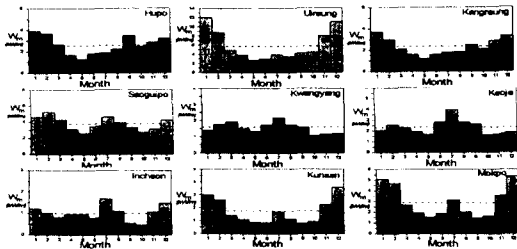


Fig. 5. Monthly variation of wave power in deep water.

### 3.2. 천해 파랑 에너지 부존량

연안 파랑관측소로부터 측정된 관측자료를 대상으로 천해파 에너지 부존량을 산정하였다. 계산은 식(6)을 이용하여 대표파의 천수변형을 고려하여 산정하였다. 천해파 에너지 부존량 평가는 '74~'82의 경우 천해파 영역에서 관측된 결과이며, '90~'94의 자료에서는 관측소에 따라 심해파에 해당하는 경우도 있었다. 산정결과를 Fig. 6에 나타내었으며, 동해는 1.5~2kW/m, 남해는 2~3kW/m, 서해는 1~2kW/m의 분포를 보여 일본의 6kW/m<sup>8)</sup>에 비해 매우 낮았고, 계절적 변동특성(Fig. 7)은 심해파 경우와 유사하였다.

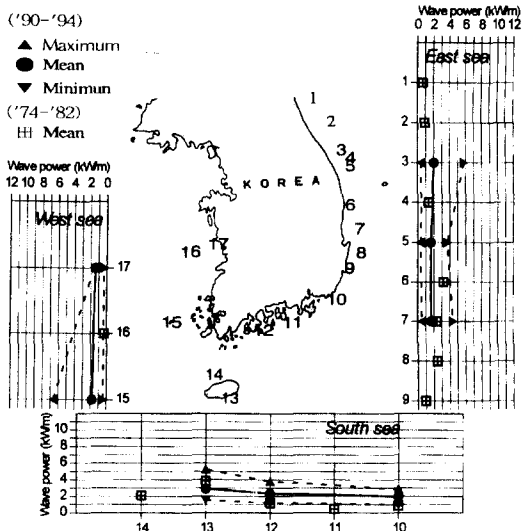


Fig. 6. Distribution of wave power in shallow water.

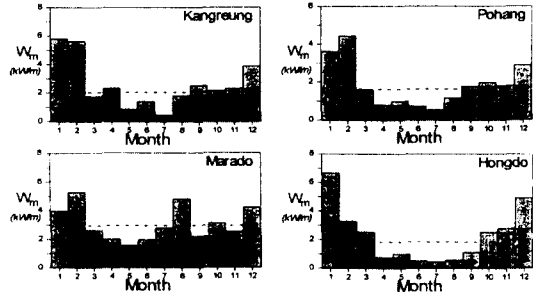


Fig. 7. Monthly variation of wave power in shallow water.

## 4. 결론

해양파 에너지의 이용과 개발을 위한 기초적 연구로서 관측 및 해석 파랑자료를 이용하여 파랑에너지의 분포 및 출현 특성을 해석하고 정리하였다. 연안 심해파 에너지는 동해에 평균 1.8~7.0 kW/m, 남해에 평균 1.5~5.3 kW/m, 서해에는 평균 1.0~4.1 kW/m의 wave power가 부존하고 있는 것으로 나타났다. 이들은 계절적 변화가 심하여 동해 및 서해는 동절기에, 남해는 하절기에 큰 에너지가 집중되고 있는 것으로 나타났다. 한편, 천해파 에너지는 동해, 남해, 서해에 각각 평균 1~3 kW/m, 0.5~4 kW/m, 0.5~2 kW/m의 wave power가 부존하고 있는 것으로 나타났다. Wave power의 변동특성은 심해파의 경우와 유사하였다. 이로부터, 연안으로 입사해오는 심해파를 기준으로 할 때 한국연안의 파랑에너지 가용량은 평균 4.7 GW에 달하는 것으로 평가된다.

파랑에너지 이용기술의 실용화를 위해서는 한국 연안 파랑에너지의 분포 및 변동특성을 고려한 에너지 개발·이용 계획의 정립이 요망된다. 이를 위해서는 변환시스템의 고효율화, 이용형태의 다양화 및 다목적화가 필요하다. 즉, 해역별 에너지 부존량을 고려하여 이용형태에 맞는 에너지 변환법의 개발과 다목적화를 통한 경제성 확보 등을 필요로 하는 것으로 고려된다. 또한, 해역별 에너지 변동특성을 고려한 에너지 저장·이용기술의 정립이 요망된다.

## 후 기

본 논문은 과기처 기관고유사업의 일환으로 수행된 “해역환경개선 핵심장치 성능평가 모형시험” 연구과제 결과의 일부임을 밝혀둔다.

## 참고문헌

- 1) 홍석원 등(1994, 1995): 해양에너지 이용 파력발전(60kW) 장치 개발(I,II). 한국전력.
- 2) 近藤 俣郎(1996): 海洋エネルギー-利用技術. 上北出版, 185p.
- 3) 해운항만청(1978,1984): 파랑자료분석보고서. (1973, 1982).
- 4) 해운항만청(1996): 장기 파랑 산출 자료집. 590p.
- 5) British Maritime Trchnology(1986): Global Wave Statistics. 661p.
- 6) 류청로, 김현주 (1987): 수치실험조건에 따른 해양파랑 특성의 통계적 안정한계. 한국수산학회지 20(5), 457-462.
- 7) 近藤 俣郎(1996): 海洋エネルギー-變換システム. 第24回水工學に關する夏期研修講義集, B-5. B.5.1-B.5.17.
- 8) Takahashi S. et al.(1987): Variatiion of wave power extraction due to incident angle and directional wave spreading. J. of Port and Harbour Res. Inst. 26(1),3-39.