

항해용 레이더를 이용한 파랑 모니터링 시스템 개발

박준수* · 박승근* · 권순홍** · 박건일*** · 최재웅*** · 강윤태*** · 하문근***

*부산대학교 첨단조선공학연구센터

**부산대학교 조선해양공학과

***삼성중공업 조선해양연구소

Development of a Wave Monitoring System Using a Marine Radar

JUN-SOO PARK*, SEUNG-GEUN PARK*, SUN-HONG KWON**, GUN-IL PARK***,

JAE-WOONG CHOI***, YUN-TAE KANG*** AND MUN-KEUN HA***

*Advanced Ship Engineering Research Center, Pusan National University, Busan, Korea

**Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

***Marine Research Institute, Samsung Heavy Industries, Geoje, Korea

KEY WORDS: Ocean Wave 해양파, Marine Radar 항해용 레이더, SNR 신호대 잡음비, Wave Number Spectrum 파수 스펙트럼, Directional Wave Spectrum 방향파 스펙트럼, Significant Wave Height 유의파고, MTF 조정전달함수

ABSTRACT: In the ocean engineering field, information about the ocean environment is important for planning, design, and operation, especially the wave information. High precision wave data is also important for considering environmental problems, like efficient operation of ships. For this purpose, many methods were considered in the past. However, an on-board directing wave measurement system has not been incorporated. The use of conventional marine radar Plane Position Indicator (PPI) images allows the estimation of wave information on a real-time basis, using both space and time information, regarding the evolution of ocean surface waves. In order to achieve data acquisition, the Radar Scan Converter (RSC) has been developed. Three-dimensional analysis was performed. The comparison of wave information derived from this system, and that of wave buoy, shows that this wave field detecting system can be a useful tool.

1. 서 론

해상에서 선박 또는 해양구조물이 조우하는 파랑을 실시간으로 정확하게 계측 및 모니터링 하는 것은 지난 십 수 년간 계속해서 연구되어 온 과제이다. 파랑 모니터링이 가능하게 되면 선박 및 해양구조물의 운항이나 해상에서의 작업 등에 유효한 실시간의 정보를 제공 할 수 있을 뿐 아니라, 축적된 정보 데이터베이스로부터 선박이나 해양구조물의 건조에 필요한 설계파, 노후화로 인한 수리시점 및 지구환경 그리고 해양기상 평가 자료로 정보를 제공할 수 있다. 파랑을 계측하는 방법으로는 목측 및 부이와 같이 아주 오래전부터 이용된 방법부터 기술의 발달에 의해 가능하게 된 인공위성을 이용한 계측까지 다양한 방법이 있다. 그러나 이러한 방법들은 객관적이지 않거나, 실시간으로 획득할 수 없거나, 분실이나 파손에 노출되기 쉽거나, 해상 상태에 대한 정보를 얻기 위해 상당한 비용을 지불해야한다거나 하는 다양한 문제점을 안고 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위해서 제안된 것이 항해용 레이더를 이용한 파랑 모니터링 시스템의 개발이다.

이러한 필요성에 의하여, 모든 선박은 항해용 레이더를 설치하고 있으며, 선박이 운항을 중단 하지 않은 한 항상 레이더는 운용되고 있으므로 연속적인 정보 획득이 가능하다. 또한 레이더는 눈, 비, 야간 등의 악조건에 영향을 크게 받지 않기 때문에 실시간 파랑 모니터링 시스템으로 부각되었다. 시간적으로 연속된 PPI 이미지에 3차원 FFT 기법을 적용함으로써 방향의 모호성까지 제거된 방향파 스펙트럼을 얻는 기법이 제안되었고 (Young et al., 1985; Atanassov et al., 1985), 파고 보정을 위한 다양한 기법들이 소개 되었다(Alpers and Hasselmann, 1982; Nieto, 1996; Takase et al., 2000; Park et al., 2001).

본 논문에서는 이러한 시스템을 구현하기 위한 radar scan converter (RSC) 보드의 개발과 마라도에서의 계측 실험을 토대로 항해용 레이더를 이용한 해상 파고 계측 시스템의 정도를 확인하였다.

2. 해상 파고 계측 시스템

2.1 PPI 이미지

레이더의 PPI 이미지는 레이더 안테나로부터 조사된 신호가 해수면에 부딪혀 되돌아오기까지 걸린 시간과 방향, 그리고 그때의 신호 크기를 나타내는 것으로 해수면의 높이를 직접적으로

제1저자 박준수 연락처: 부산시 금정구 장전동 산30번지

051-510-2753 jsocean@pusan.ac.kr

보여주지는 않지만(해수면의 경사도 분포라고 할 수 있음), 파의 주기와 높이 그리고 진행방향과 밀접한 정보를 내포하고 있다. 또한 넓은 범위의 공간적인 정보를 제공할 뿐만 아니라 연속된 이미지를 얻게 되면 시간적인 정보 또한 얻을 수 있다.

PPI 이미지의 신호 크기를 좌우하는 중요한 요소로는 파의 진행 방향과 레이더 안테나에서 조사되는 신호와의 조우각, 파면의 경사각, 풍속과 풍향 등이다. 이중에서도 풍속의 경우 파면에 잔물결이 일어나지 않는 낮은 속도에서는 실제 파고(1~2m) 일지라도 PPI 이미지에 나타나지 않는 경우가 많으므로 계측에 주의가 필요하다. Fig. 1은 항해용 레이더의 PPI 이미지의 전형적인 한 예이다.

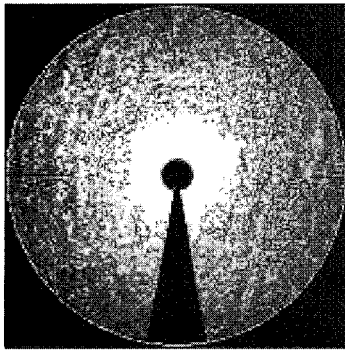


Fig. 1 An example of marine radar PPI image

2.2 3차원 FFT

한 장의 PPI 이미지로부터 2차원 FFT를 이용하여 스펙트럼을 구성하는 것은 가능하다. 그러나 이 스펙트럼에는 파의 진행 방향에 있어 180도 모호성을 내포하고 있다. 이를 극복하기 위해 시간적으로 연속된 PPI 이미지로부터 각각 2차원 FFT의 결과를 취하고, 그 결과들을 시간축에 대해 1차원 FFT를 수행하게 되면 주파수별로 분리된 파수(wave number) 스펙트럼을 구성하게 된다.

$$F(k_x, k_y, \omega) = \int \int \int \zeta(x, y, t) e^{-i(k_x x + k_y y + \omega t)} dx dy dt \quad (1)$$

여기서 ζ 는 PPI 이미지의 신호 크기, k_x, k_y 는 x축, y축 방향의 파수이다. 이 스펙트럼에는 파도 성분이 아닌 잡음 역시 파도 성분인 것처럼 평가되어 포함되어 있기 때문에 식 (2)와 같은 파의 분산성 관계를 이용하여 파도 이외의 성분을 제거해야 한다(Nieto et al., 1998; Nieto et al., 1999).

$$\omega = \sqrt{g|\vec{k}| \tanh(|\vec{k}|d)} + \vec{k} \cdot \vec{U} + \vec{k} \cdot \vec{C} \quad (2)$$

여기서 g 는 중력가속도, \vec{k} 는 파수, d 는 수심, \vec{U} 는 선속, \vec{C} 는 조류 등에 의한 해수면의 이동속도이다.

조류의 속도는 3차원 FFT 결과에서 에너지가 분포하는 주파수와 식 (2)에서 계산되는 주파수 사이의 오차가 최소가 되는

\vec{C} 의 값을 찾는 방법으로 추정 할 수 있다. 주파수의 오차 함수를 식 (3)과 같이 정의 하면, 이 함수가 최소값을 갖기 위한 조건이 식 (5)와 같이 되며 이 식을 통해 \vec{C} 의 값을 추정 할 수 있다.

$$J = \sum_{\omega} \sum_{k_x} \sum_{k_y} (\Delta\omega)^2 F(k_x, k_y, \omega) \quad (3)$$

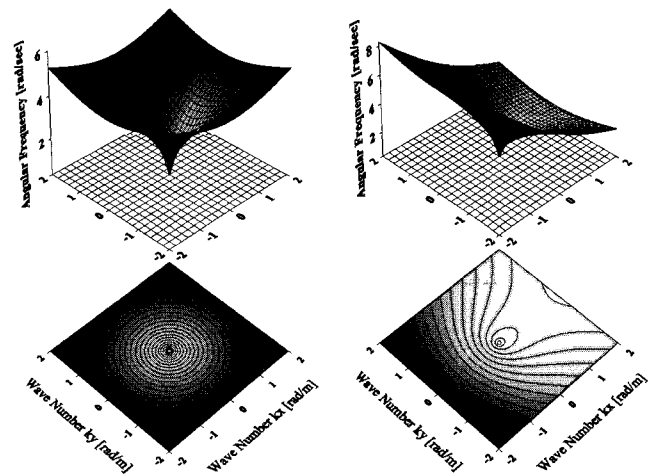
여기서

$$\Delta\omega = \omega - \sqrt{g|\vec{k}| \tanh(|\vec{k}|d)} - k_x U_x - k_y U_y - k_x C_x - k_y C_y \quad (4)$$

U_x, U_y 는 선속의 x, y 방향 성분, C_x, C_y 는 조류속도의 x, y 방향 성분이다. C_x, C_y 에 대해 최소자승법(least squares method)를 적용하면 조류 속도를 구할 수 있다(Gangeskar, 2002).

$$\begin{bmatrix} C_x \\ C_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum F k_x^2 & \sum F k_x k_y \\ \sum F k_x k_y & \sum F k_y^2 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \sum F(\omega - \omega_0 - k_x U_x - k_y U_y) k_x \\ \sum F(\omega - \omega_0 - k_x U_x - k_y U_y) k_y \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 $\omega_0 = \sqrt{g|\vec{k}| \tanh(|\vec{k}|d)}$ 이다. 추정된 조류의 속도를 식 (2)에 대입하여 Fig. 2에 나타난 「dispersion shell」을 구성한다. Fig. 2(a)는 파수-주파수에 의해 형성되는 「dispersion shell」의 한 예이며, Fig. 2(b)는 「dispersion shell」 도플러 효과(doppler effect)가 존재할 때의 한 예를 나타내고 있다.



(a) Without doppler effect (b) With doppler effect
Fig. 2 Two examples of a dispersion shell

방향의 모호성을 극복하기 위해서 3차원 FFT를 수행한 결과에서 양의 주파수 영역만을 적분하면 방향과 스펙트럼을 구할 수 있다 (Young et al, 1985).

$$F(k_x, k_y) = 2 \int_{\omega > 0} F(k_x, k_y, \omega) d\omega \quad (6)$$

2.3 파랑 정보

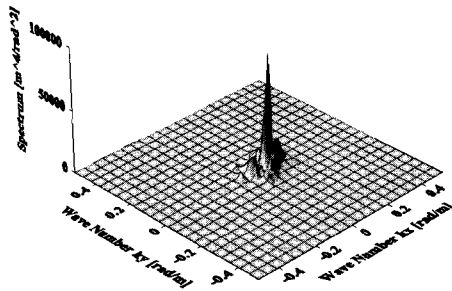
식 (6)의 $F(k_x, k_y)$ 는 서두에서도 언급하였듯이 파고에 대한 스펙트럼을 나타낸 것이 아니기 때문에 이를 파고에 대한 스펙트럼으로 변환할 필요가 있고, 이에 쓰이는 것이 조정전달함수(Modulation Transfer Function, MTF) (Ziemer and Rosenthal, 1987)이다.

$$S(k_x, k_y) = \alpha k^\beta \cdot F(k_x, k_y) \quad (7)$$

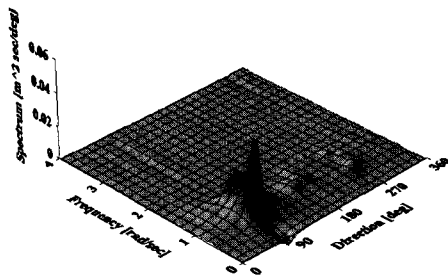
여기서 α, β 는 실험과 수치 시뮬레이션(Richard, 1976)을 통해 얻을 수 있는 상수이다. 이 스펙트럼으로부터 파의 진행방향과 주파수를 축으로 하는 방향과 스펙트럼을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} S(\omega, \theta) &= \frac{d(\vec{k})}{d(\omega, \theta)} S(k_x, k_y) \\ &= \frac{4\pi}{g^2} \omega^3 S(k_x, k_y) \end{aligned} \quad (8)$$

Fig. 3은 파수 스펙트럼과 방향과 스펙트럼의 한 예들을 나타내고 있다.



(a) Wave number spectrum



(b) Directional wave spectrum

Fig. 3 Two examples of a spectrum

그리고 파의 방향에 대한 적분을 통해 1차원의 point 스펙트럼 식 (9)을 구할 수 있으며, 이 스펙트럼에서 다음과 같은 파랑 정보, 즉 모멘트 식 (10)와 각 주기들 식 (11)을 계산 할 수 있다.

$$P(\omega) = \int_{-\pi}^{\pi} S(\omega, \theta) d\theta \quad (9)$$

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n P(\omega) d\omega \quad (10)$$

$$\begin{aligned} T_{01} &= 2\pi \frac{m_0}{m_1} \\ T_{02} &= 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \\ T_{24} &= 2\pi \sqrt{\frac{m_2}{m_4}} \end{aligned} \quad (11)$$

유의파고의 경우 별도의 매개변수를 이용하여 추정한다. 대표적인 것이 신호대 잡음비(Signal Noise Ratio, SNR) (Alpers and Hasselmann, 1982)이며 본 연구에서는 식 (10)의 m_0 도 이용하였다. 동일 지역·시간대의 해상에 대해, 부이를 이용한 유의 파고와 본 연구에서 개발한 계측 시스템으로 구한 매개변수간의 관계를 식 (12)와 같이 근사식으로 정의하여 유의 파고를 추정한다.

$$\begin{aligned} H_{1/3} &= A + B\sqrt{SNR} \\ \text{또는} \\ H_{1/3} &= A + B\sqrt{m_0} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 $H_{1/3}$ 는 유의파고, A, B 는 임의의 상수이다.

3. 실제측 적용

3.1 계측 장소 및 조건

본 연구에서 개발한 계측 시스템을 이용하여 제주도의 남쪽에 위치한 마라도에서 실제측을 수행하였다. 이 곳에는 본 연구의 결과와 비교 검증에 필요한 실시간 파고 계측 부이가 설치되어 있으며 장기간 전력을 공급받을 수 있고 다양한 해상 상태를 접할 수 있기에 최적의 장소라 판단하였다. 레이더 PPI 이미지는 10분 간격으로 획득하였고, 한번 획득할 때마다 32장의 연속된 이미지를 획득하였다. 부이로 계측된 데이터는 1시간 간격으로 획득할 수 있기 때문에 레이더를 이용한 계측 결과들의 1시간동안의 평균치를 비교 대상으로 정하였다. 또한 2장에서 언급하였듯이 풍속이 일정치 이하가 되는 경우는 해상 상태가 제대로 반영된 PPI 이미지를 얻을 수 없기 때문에 비교대상에서 제외시켰다.

3.2 계측 장비

본 연구가 수행된 마라도에서의 부이와 레이더의 계측 지점을 Fig. 4에 나타내었고, 본 연구에 사용된 레이더에 대한 간략한 사양은 Table 1과 같다.

그리고 레이더 PPI 이미지를 디지털화 시키는 RSC 보드의 간략한 사양은 Table 2와 같다.

위의 시스템을 이용하여 실제로 계측된 PPI 이미지의 한 예와 그 해석 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다.

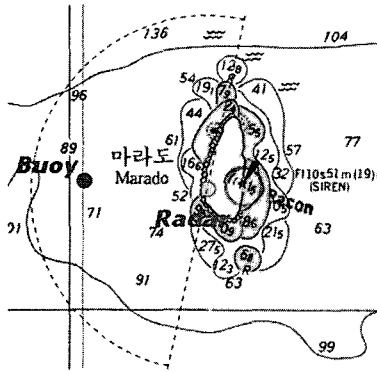


Fig. 4 Location of marine radar antenna and wave buoy in Mara-island.

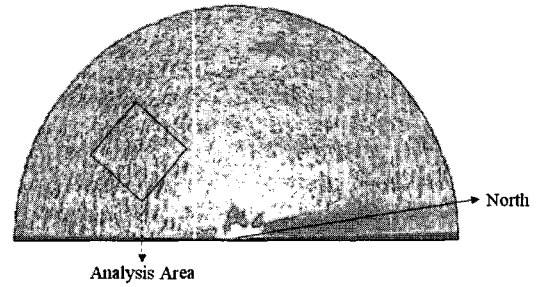


Fig. 5 An example of marine radar PPI image

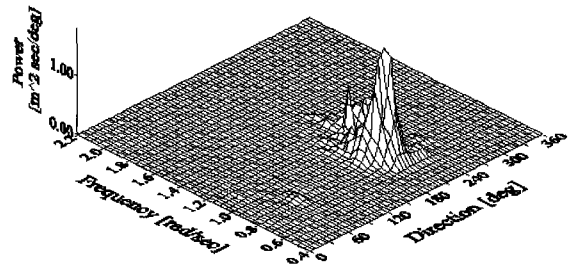


Fig. 6 Directional wave spectrum

Table 1 Marine radar system characteristics.

Antenna Radiator	
Beamwidth (H)	1.23°
Beamwidth (V)	20°
Rotation Speed	42 rpm
RF Transceiver	
Frequency	9410 ± 30 MHz (X-band)
Operating Parameters	
Range scale	1.5 nm
Plus length / PRF	0.07 μs / 3000 Hz

Table 2 Radar scan converter characteristics.

Main Item	
CPU	ADSP 2191M
PCI-Bridge	PLX9054
ROM(Flash)	AT49LV002[256K*8]
SRAM	K6R4016V1D[256K*16]
A/D	14bit, 50 MS/Sec
CPLD	XC95144XL
Channels	
Video	0~3V, Positive or Negative
Trigger	TTL type
Bearing	TTL type
Heading	TTL type
Serial Port	38,400 bps

4. 실계측 자료 해석 결과

4.1 파 고

부이로 계측된 파고와 레이더를 이용한 해석 결과의 매개변수 SNR 및 m_0 와의 관계로부터 식 (12)의 상수 A, B를 결정한 후 최종 유의파고를 추정하였으며, 이를 부이의 계측 결과와 비교하였다. Fig. 7은 부이와 레이더의 유의파고(Significant wave height)를 비교하여 나타내었다. Fig. 7에서 부이와 비교하여 볼 때 매개변수 m_0 에 비하여 SNR을 사용한 결과가 훨씬 정성적, 정량적으로 비교적 잘 일치하는 것으로 보여진다.

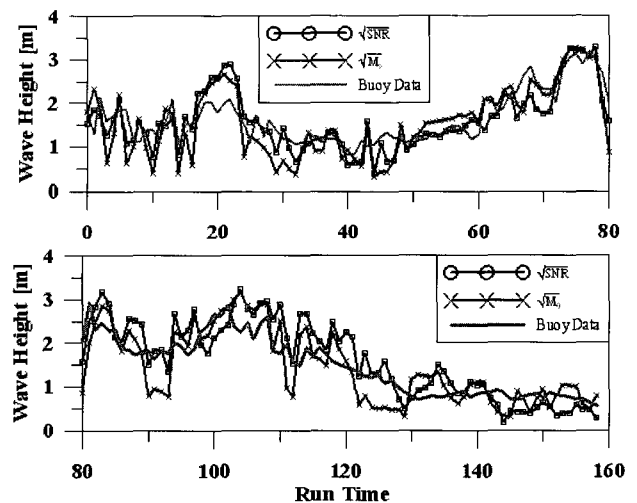


Fig. 7 Comparison of a significant wave height

4.2. 주기

식 (11)에 의해 계산되는 파의 주기와 부이로 측정한 파의 주기를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 부이와 WF의 평균 주기의 오차가 약 1.5초이다. 여기서 WF (Wave Finder)라고 표기한 부분은 본 연구에서 개발된 시스템의 명칭이다.

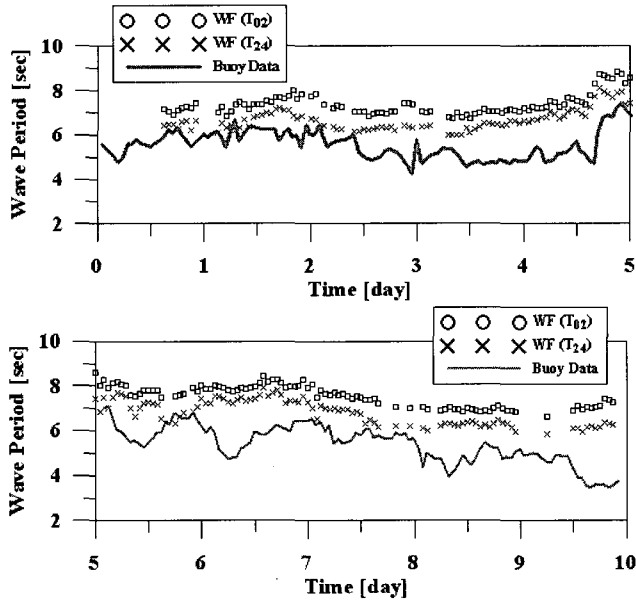


Fig. 8 Comparison of a wave period

4.3 방향

식 (8)에서 구한 방향과 스펙트럼에서 최대 에너지가 분포하는 방향을 부이로 측정한 결과와 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 부이와 WF 평균 파향 오차는 약 10도 이내이다.

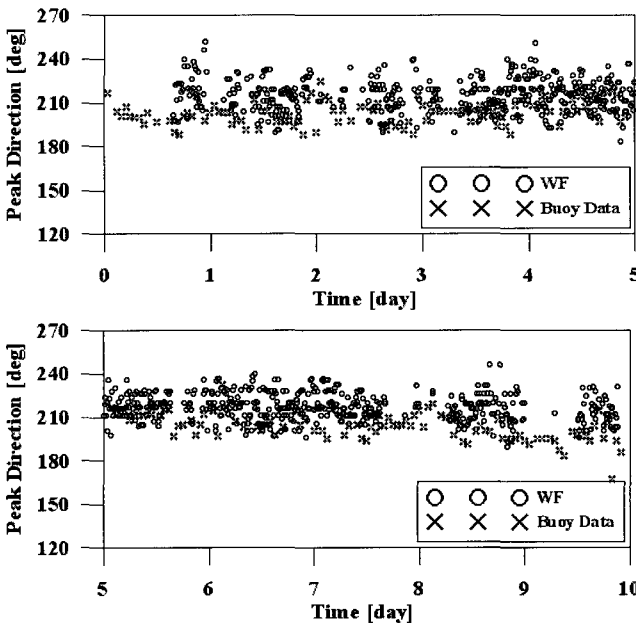


Fig. 9 Comparison of a wave direction

4.4 조류

부이로 측정한 결과에는 조류에 대한 정보가 없기 때문에, 레이더를 이용한 조류에 대한 결과와 비교할 수는 없었다. 단지 조류의 속도 및 방향을 추정하기 위해 식 (5)를 적용한 결과를 Fig. 10에 나타내었으나, 본 연구에 적용된 조류의 추정이 활용될 수 있는 가능성을 Fig. 10에서 알 수 있다.

따라서 본 연구에 적용된 조류에 대한 추정을 검증하기 위하여서는, 조류를 측정할 수 있는 검증된 장비를 이용한 연구의 필요성이 요구되어 진다.

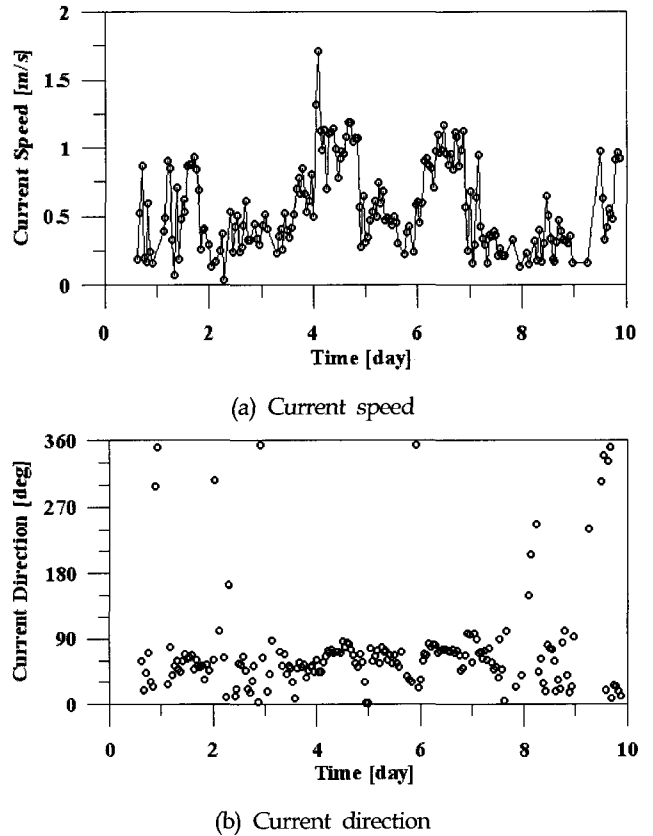


Fig. 10 Estimation of a current

5. 결 론

본 연구에서는 항해용 레이더를 이용하여 해상파고를 측정하는 시스템의 개발과 이를 이용한 실제측을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 본 연구를 통하여 항해용 레이더를 이용한 파랑 및 조류 추정을 위한 하드웨어와 소프트웨어를 개발하였다.
- (2) 부이로 측정한 결과와 비교하였을 때, 파고와 파의 진행방향이 비교적 잘 일치 하였으며, 주기의 경우는 MTF의 형태에 따라 약간의 오차를 보일 수 있음을 알았다. 이는 MTF의 상수 부분이 주 관심대상이 되는 주파수 영역에 따라 달라짐을 의미한다.
- (3) 조류 속도의 추정에 있어서도 본 연구에서 개발한 측정 시스템이 유용함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 삼성중공업(주)의 지원으로 수행된 연구결과 중 일부를 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

아울러 비교 대상 부이 데이터를 제공해 주신 한국해양연구원 연안방재연구사업단과 부산대학교 첨단조선공학연구센터를 통한 한국과학재단의 지원에 사의를 표하는 바입니다.

참 고 문 헌

- Alpers, W., and Hasselmann, K. (1982). "Spectral Signal to Clutter and Thermal Noise Properties of Ocean Wave Imaging Synthetic Aperture Radars", *Int. J. Rem. Sens.*, Vol 3, pp 423-446.
- Atanassov, V., Rosenthal, W. and Ziemer, F. (1985). "Removal of Ambiguity of Two-Dimensional Power Spectra obtained by Processing Ship Radar Images of Ocean Waves", *J. of Geophysical Research*, Vol 90, No C1, pp 1061-1067.
- Gangeskar, R. (2002). Ocean Current Estimated from X-Band Radar Sea Surface Images, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol 40, No 4, pp 783-792.
- Nieto, J.C. (1996). "Análisis de Campos de Oleaje Mediante Radar de Navegación en Banda X", Ph.D. Universidad de Alcalá de Henares-Departamento de Física, Diciembre.
- Nieto, J.C., Ziemer, F., Seemann, J. and Senet, C. M. (1998). "Overcome the Nyquist Limit in Frequency in Nautical Radar Measurement of Wave Field", 17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE) Portugal, Lisboa.
- Nieto, J.C., Reichert, K. and Dittmer, J. (1999). "Use of Nautical Radar as a Wave Monitoring Instrument", *Coastal Engineering*, Vol 37, pp 331-342.
- Park, S.G., Hirayama, T., Hirakawa, Y. and Takayama, T. (2001). "Development of a Wave Field Detector using the Marine Radar and Measured Example", *J. of SNAJ*, Vol 191, pp 51-56.
- Takase, F.K., Hirayama, T. and Park, S.G. (2000). "Evaluation of Marine Wave Radar (Part II)", *J. of SNAJ*, Vol 188, pp 225-237.
- Richard L. M. (1976). "Radar signal Simulation", Artech House Inc..
- Young, I.R., Rosenthal, W. and Ziemer, F. (1985). "A three-dimensional analysis of marine radar images for determination of ocean wave directionality and surface currents", *J. Geophysical Research*, Vol 90, No C1, pp 1049-1059.
- Ziemer, F. and Rosenthal, W. (1987). "On the Transfer Function of a Shipborne Radar for Imaging Ocean Waves", *Proc. IGARSS87 Ann- Arbor*, pp 1559-1564.

2005년 12월 6일 원고 접수

2006년 2월 1일 최종 수정본 채택