

해수면 파랑 이미지로 부터 해류 속도를 산정하는 알고리즘의 개발 Algorithm for the Estimation of Current Velocity from Sea Surface Images

안경모¹, 천제호²

Kyungmo Ahn¹, Jeho Chun²

1. 서 론

1.1 연구배경

연안 및 해양에서 파랑을 관측하는 다양한 장비가 개발되어 사용되고 있다. 예를 들면 수압식 파고계, 부이형 파고계, 레이더형 파고계, 초음파식 파고계 등이 있는데, 각각의 파고계는 초기 도입가격, 유지관리 비용 및 유지관리의 용이성, 파랑측정의 정확성, 장비유실의 위험성 등에 따라 각각의 장단점이 있다. 최근 선박용 X-band 레이더를 이용한 파랑관측장비의 국산화 개발이 시도되어 파랑측정의 정확성을 높이기 위한 노력이 이루어지고 있다. (천 등, 2007)

X-band 레이더를 이용한 파랑측정장비는 해상뿐만 아니라, 육상에도 설치가 가능하여 유지 관리가 매우 용이하며, 장비망실의 위험도 매우 낮다. 그러나 X-band 레이더는 바다로부터 산란되는 전자기파를 분석하여 파랑정보를 추출하기 때문에 정확한 파랑 정보를 얻기 위해서는 아직도 해결해야 할 많은 문제들이 있다. (Nieto Borge et al., 1999, Izquierdo et al., 2005)

선박용 X-band 레이더를 이용하여 획득된 해수면 이미지는 파랑정보 및 해류속도 정보를 포함하고 있다. 레이더형 파고계가 선박에 장착되어 운항 중일 경우에는 해류와 선박운행의 상대속도에 의한 도플러 이동(Doppler-shift)이 생겨 파랑이 변형된다. 도플러 이동된 파랑정보를 분석하면 해류의 속도를 분리할 수 있게 된다.

해수면 이미지로부터 해류의 속도를 추출하는

방법이 Young and Rosenthal (1985), Senet et al. (2001), Gangeskar (2002) 등의 다수의 연구자들에 의해 제안되었으며, Bell (1999)은 X-band 레이더로부터 얻은 해수면 이미지로부터 천해의 수심을 추산하는 알고리즘을 제안한 바 있다. 그러나 해수면 이미지로부터 해류의 속도와 방향 그리고 해저 수심을 추산하는 방법의 정확도는 아직도 검증된 바가 없다. 이는 검증을 위한 측정의 어려움에 기인한다.

이에 본 연구에서는 파랑과 해류의 속도를 수치적으로 합성한 해수면 이미지로부터 해류의 속도와 방향을 정확히 추산할 있는 기초적인 수치실험을 수행하여 알고리즘의 정확성을 검증하였다.

1.2 연구방법

본 연구에서는 유한수심 파랑과 해류 흐름장이 포함되어 있는 3차원 수면 변위 이미지를 생성한 다음, 본 연구에서 제안하는 알고리즘을 이용하여 흐름 벡터와 수심을 추산하고 파랑 스펙트럼을 구하여 알고리즘의 정확도를 검증하였다.

2. X-band 레이더형 파고계 파랑 정보 자료 분석

레이더형 파고계는 3차원의 레이더 이미지 영상을 3차원 FFT 기법을 이용하여 분석하는 데, 분석 결과 얻어진 3차원의 레이더 영상 스펙트럼에는 파랑에 의한 에너지 성분과 잡음(noise)에 의한

1 발표자: 한동대학교 공간환경시스템공학부 교수

2 한동대학교 건설환경연구소 연구원

에너지 성분도 포함되어 있다. 이 때의 잡음은 분산관계식을 이용하여 제거되어지는데, 분산 관계식을 적용하기 위해서는 수심과 흐름 벡터 등의 정보가 주어져야 한다.

본 연구에서는 최소자승법을 이용하여 흐름 벡터와 수심을 산정하는 알고리즘을 사용하였다.

레이다형 파고계에서의 파향-주파수 파랑 스펙트럼 추출 과정은 아래 Fig.1 과 같다.

3차원 FFT 결과 얻어진, 레이다 이미지 스펙트럼은 경사 및 투영 변조(tilte and shadowing modulation)와 비선형 효과(nonlinear effect) 등과 같은 레이다 이미지 영상 생성 메카니즘이 포함된 것으로, 이로부터 파랑 스펙트럼을 구하기 위해서는 MTF(Modulation Transfer Function) 함수를 적용하기도 한다. MTF 함수는 레이다영상 스펙트럼에 직접 곱하여 구하는데, 그 식의 형태는 다음의 식 (1)과 같다.

$$MTF(k) = k^{-1.2} \quad (1)$$

여기서, k : 파랑의 파수

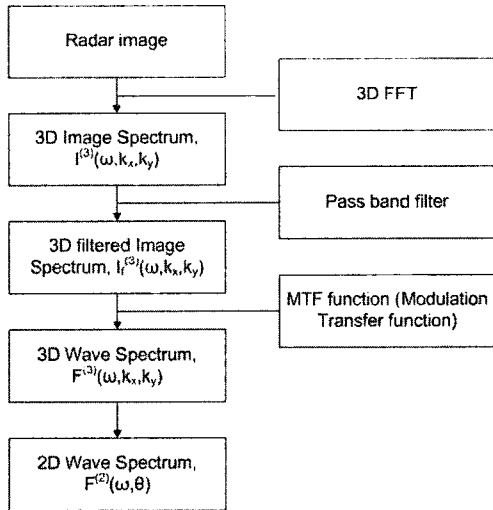


Fig. 1. Algorithm for estimating wave spectra from Radar images

3. 흐름 벡터 및 수심 추정 기법

3.1 흐름 벡터 및 수심 추정 알고리즘

선형 불규칙 파랑과 흐름이 공존해 있을 경우에 대한 분산관계식은 다음의 식 (2)와 같이 쓸 수 있다.

$$\omega = \vec{k} \cdot \vec{U} + \sqrt{gk \tanh kh} \quad (2)$$

여기서, ω : 각진동수, \vec{k} : 파수벡터, \vec{U} : 흐름벡터, g : 중력가속도, k : 파수, h : 수심

본 연구에서는 다음의 식 (3)을 풀어, 흐름벡터를 산정한다. 흐름 벡터를 산정하기 위해서 수심 정보와 3차원 레이다 이미지 스펙트럼의 에너지 성분의 좌표인 (ω, k_x, k_y) 등의 정보를 이용한다.

$$Q^2 = \sum_{j=1}^N (\omega_j - k_{xj} U_x - k_{yj} U_y - \sigma)^2 \quad (3)$$

여기서, k_x : x 방향의 파수, k_y : y 방향의 파수, U_x : x 방향의 유속, U_y : y 방향의 유속, σ : 상대각진동수(relative frequency), $\sigma = \sqrt{gk \tanh kh}$

최소자승법을 위의 식 (3)에 적용하여 흐름벡터 및 수심을 산정하는데, 최소자승법을 적용한 결과는 다음의 식 (4), (5), (6)와 같다.

$$\frac{\partial Q^2}{\partial U_x} = 0 : \quad U_x \left(\sum_{j=1}^N k_{xj}^2 \right) + U_y \left(\sum_{j=1}^N k_{xj} k_{yj} \right) = \sum_{j=1}^N (\omega_j - \sigma) k_{xj} \quad (4)$$

$$\frac{\partial Q^2}{\partial U_y} = 0 : \quad U_x \left(\sum_{j=1}^N k_{xj} k_{yj} \right) + U_y \left(\sum_{j=1}^N k_{yj}^2 \right) = \sum_{j=1}^N (\omega_j - \sigma) k_{yj} \quad (5)$$

$$\frac{\partial Q^2}{\partial h} = 0 \quad (6)$$

3.2 흐름 벡터 추출 기법의 검증

흐름 벡터 추정기법의 검증을 위해 흐름장이 포함되어 있는 3차원의 수면변위 자료를 만든 다음, 본 연구의 알고리즘을 적용하여 검증하였다. 이 때의 수면 변위 자료는 일방향 불규칙파와 다방향 불규칙파랑에 흐름을 추가하여 생성되었다.

검증을 위해 생성된 일방향 규칙파에 의한 수면 변위는 다음과 같다.

$$\eta = \frac{3}{2} \cos(k_x x + \omega t) + 2 \cos(k_x x + \omega t + \phi) \quad (7)$$

여기서, η : 수면변위, ϕ : 위상각, $0 \leq \phi \leq 2\pi$

위의 식 (7)에서 흐름의 방향은 일정하게 하고, 유속을 4m/s에서부터 22m/s 까지 증가시켜 다양한 흐름장에 대한 수면변위를 생성하였다. 생성된 수면 변위 등에 대해 본 연구의 알고리즘을 적용하여 유속을 계산하는데, 계산된 유속과 실제의 유속을 비교하여 본 연구의 알고리즘을 검증하였다.

이 때, 14m/s 의 흐름장이 있을 경우에 대한 수면 변위의 예시를 다음의 Fig.2 에 나타내었다.

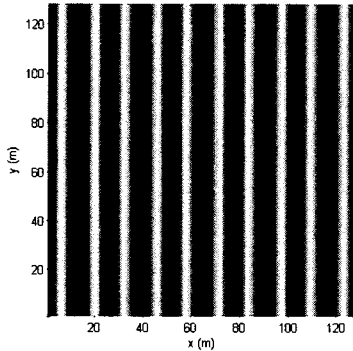


Fig. 2. Instantaneous surface elevation generated by Eq.(7) for surface current speed=14m/s.

본 실험에서 계산된 유속과 실제의 유속을 비교하여 다음의 Fig. 3에 나타내었다.

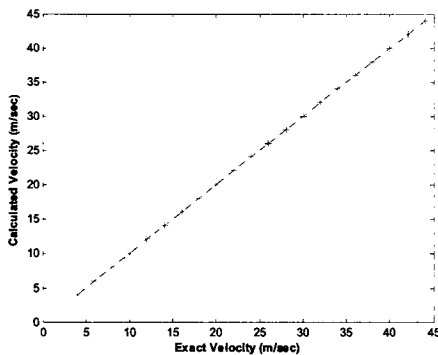


Fig. 3. Comparison between the estimated current speed and the exact current speed.

본 모의실험 결과 얻은 계산된 유속에 대해서 잔여오차분석(residual analysis)을 실시한 결과, 잔여오차는 2.23×10^{-12} 로 매우 잘 일치한다고 볼 수 있다.

다방향 불규칙파에 대해서는 다양한 유속 및 유

향에 대해서 수면변위 자료를 만든 후, 본 연구의 알고리즘을 적용하여 실제의 유속, 유향과 계산된 유속, 유향들을 비교하였다. 다방향 불규칙파에 의한 수면 변위 생성식은 다음의 식 (8)에 나타내었다.

$$\eta = \cos(k_x x + k_y y - \omega_1 t) + 2\cos(k_x x + k_y y - \omega_2 t + \phi) \quad (8)$$

여기서, ω_1, ω_2 : 절대 각진동수 (absolute angular frequency)이며 다음과 같다.

$$\omega_1 = \sigma + (k_x U_x + k_y U_y),$$

$$\omega_2 = \sigma - (k_x U_x + k_y U_y)$$

x, y 방향의 유속이 각각 4m/s, -5m/s 일 경우에 대한 수면변위를 다음의 Fig. 4 에 나타내었다.

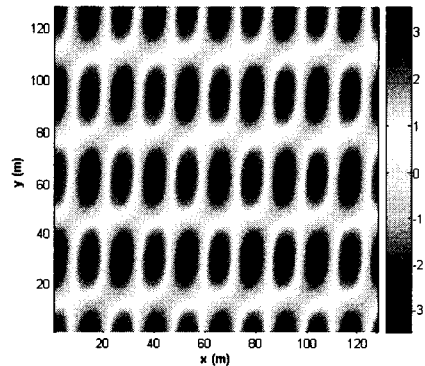


Fig. 4. Instantaneous surface elevation generated by Eq.(8) for $U_x=4\text{m/s}$ and $U_y=-5\text{m/s}$

실제의 유속 및 유향과 계산된 유속 및 유향을 비교하여 다음의 Fig.5 와 Fig. 6에 나타내었다.

앞의 경우와 마찬가지로, 추정된 유속 및 유향 자료에 대해서 잔여오차분석을 실시한 결과, 유속과 유향의 잔여오차는 2.924×10^{-7} , 1.1958×10^{-9} 로 매우 잘 일치함을 알 수 있다

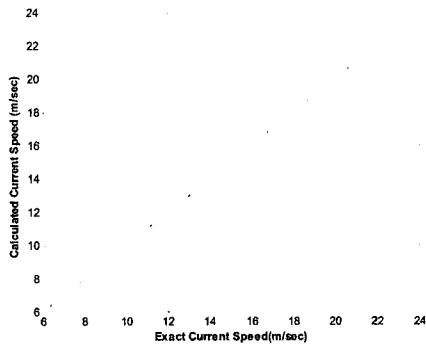


Fig. 5. Comparison between the estimated current speed and the exact current speed.

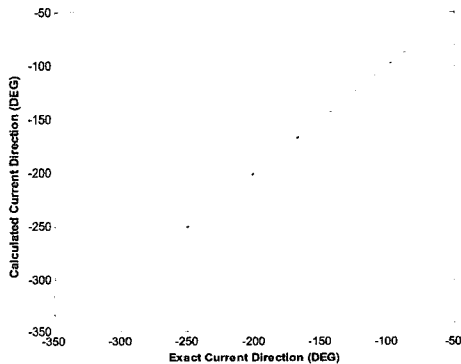


Fig. 6. Comparison between the estimated current direction and the exact current direction.

4. 결 론

X-band 레이더로 측정된 해수면 이미지로부터 정확한 파랑정보를 추출하기 위해서는 분산관계식 등을 이용하여 잡음 성분을 걸러내는데, 분산 관계식을 적용하기 위해서는 정확한 흐름 벡터가 먼저 산정되어야 한다. 파랑에 흐름이 공존할 때 정확한 파랑정보와 흐름정보를 추출할 수 있으면 X-band 레이더형 파고계를 선박에 장착하여 항해 중에도 파랑을 안정적으로 측정할 수 있다. 그 이유는 선박에 장착된 레이더형 파고계에서 추출된 해수면 이미지는 선박의 운항속도와 해류속도의 상대속도이기 때문이다.

본 연구에서는 최소자승법 등을 이용하여 흐름 벡터를 산정하는 기법을 수치모의를 통해 검증하여 본 연구에서 제시하는 알고리즘의 정확도를 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업지원으로 수행된 연구로서 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 천세현, 천제호, 이재용, 안경모. (2007) 레이더형 파고계의 파고 보정기법 개발, 한국해양해양공학회 학술발표회 논문수록 CD.
- Bell, P., 1999, Shallow water bathymetry derived from an analysis of X-band marine images of waves, Coastal Engineering Vol. 37, pp 513-527.
- Gangeskar, R., 2002. Ocean current estimated from X-band radar sea surface images, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 40, No.4, April 2002.
- Izquierdo, P., Nieto Borge, J.C., Guedse Soares, C., Sanz Gonzalez, R., and Rodriguez, G.R., 2005, Comparison of wave spectra from nautical radar images and scalar bouy data, Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering, 131(3), 123-131
- Nieto Borge, J.C., Hessner, K., and Reichert, K., 1999, Estimation of the significant wave height with X-band nautical radars, Proc. offshore mechanics and arctic engineering, ASME.
- Senet, C.M., Seemann, J., and Ziemer, F., 2001, The near-surface current velocity determined from images sequences of the sea surface, IEEE Trans. on Geoscience and remote sensing, Vol. 39. No.3, March 2001.
- Young, I.R. and Rosenthal, W., 1985. A three-dimensional analysis of marine radar images for the determination of ocean wave directionality and surface currents. J. of Geophysical Research, Vol.90, No. C1, pp 1049-1059, Jan. 20, 1985.