연속된 레이더 영상을 이용한 해수면 복원 연구

박준수*

*경남대학교 조선해양IT공학과

Study on Sea Surface Reconstruction Using Sequent Radar Images

Jun-Soo Park*

*Department of Naval Architecture, Ocean and IT Engineering, Kyungnam University, Changwon, Korea

KEY WORDS: Sequent radar images 연속된 레이더 영상, 3-D FFT 3차원 푸리에 변환 Dispersion relation 분산성 관계, 3-D IFFT 3차원 역 푸리에 변환, Sea surface reconstruction 해수면 복원

ABSTRACT: This paper presents a sea surface reconstruction method that uses measured radar images by applying filtering techniques and identifying wave characteristics of the surrounding the Ieodo ocean research station using WaveFinder (X-band wave measurement radar), which is installed in the station. In addition, the results obtained from real radar images are used to verify the reconstructed sea surface. WaveFinder is a marine system that was developed to measure wave information in real time. The WaveFinder installed in the station could acquire sequent images for the sea surface at constant time intervals to obtain real time information (Wave height, mean wave period, wave directionality, etc.) for the wave by getting a three-dimensional spectrum by applying an FFT algorithm to the acquired sequent images and wave dispersion relation. In particular, we found the wave height using the SNR (Signal to noise ratio) of the acquired images. The wave information measured by WaveFinder could be verified by comparing and analyzing the results measured using the wave measurement instrument (Sea level monitor) in the station. Additionally, the wave field around the station could be reconstructed through the three-dimensional spectrum and the inverse FFT filtering from the analyzed results for the measured radar images. We verified the applicability of the sea surface reconstruction method by comparing the measured and simulated sea surfaces.

1. 서 론

최근 에너지 자원과 관련하여 심해에 대한 관심이 고조되고 있으며 이와 관련하여 해양플랜트의 발주가 활발하다. 아울러 어자원의 고갈 등으로 양식업에 대한 관심 증대로 적조 및 녹조를 회피하고 해양환경 보존 등을 고려하여 근해 이상의 바다에 양식장을 만들고 있는 실정이다. 이러한 일련의 상황 등을 고려하면 향후 해양 공간이 육상과 같은 역할을 할 것으로 기대되며 해상에서 인간의 눈의 역할을 하는 레이더를 활용하는 기술들이 매우 발전될 것으로 예견된다. 그 중 현재 지속적인 기술 향상을 보이고 있는 레이더를 이용한 파랑 계측 기술이 이중 하나일 것이며 이 기술은 실시간으로 신속하고 정확하게 파랑의 정보를 계측할 수 있어 그 활용성이 매우 유용하다. 파랑을 계측하는 방법에는 목측, 부이, 레이더, 인공위성 등이 있으며 현재에도 계측 방법에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있다. 언급한 원격 계측이 가능한 레이더는 현재 모든 선박에

설치되어 있으며 다양한 해양구조물에서 활용되고 있다. 레이더는 넓은 영역에 대한 파랑정보 수집이 가능하며 실시간으로 정보 취득이 가능하다는 장점이 있다. 하지만 레이더는 부이와 달리 해수면에 직접 접촉하여 관측하지 않고 전자기파의 반사에 의한 원격 계측을 수행하기 때문에 정량적 파고 추정을 위해서는 보정(Calibration)이 추가적으로 필요하다. 따라서 이러한 보정을 통하여 변조전달함수(Modulation transfer function)를 얻게 되며 이 보정을 위하여서는 일련의 작업이 요구된다(Nieto Borge et al., 2004; Park et al., 2006a). 특히 레이더 전자기파 특성에 기인하는 파랑에 대한 레이더 영상의 잡음성분은 일반적으로 음영 효과(Shadowing effect), 경사 변조(Tilt modulation), 유체역학적 변조(Hydrodynamic modulation)로 나눌 수 있다. 음영 효과와 경사변조에 대한 설명은 Park et al., 2010에서 확인할 수 있다. 그리고 유체동역학적 변조라는 것은 유체 입자의 운동에 기인되는 것으로 잔물결(Ripple)보다 더 긴 파도와 상호 작용에 의하여 잔물결의 에너지 변조가 발생하는

Received 1 November 2013, revised 4 November 2013, accepted 5 November 2013

Corresponding author Jun-Soo Park: +82-55-249-2655, junsoopark@kyungnam.ac.kr

© 2013, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of SNAK 2009 in Mungyeong.

것을 말하며 이들 잡음 성분 중 가장 영향이 작다.

이와 같은 보정 작업은 다양한 해상 상태에서 수행해야 하지만 복잡하고 불규칙적인 해양파에 있어서 어려움이 따른다. 이러한 문제점을 해결하고자 레이더 이미지 시뮬레이션을 통하여 실제 파랑의 관측 없이, 시뮬레이션을 통하여 얻어진 레이더 이미지를 활용하여 보정 작업의 편의성을 더 할 수 있다. 이러한 편의성에 관한 선행 연구로 파랑 레이더 이미지 시뮬레이션 기법에 대한 내용이 있다(Nieto Borge and Alfonso, 1994; Yang et al., 2008; Park et al., 2009; Park et al., 2010). 이러한 연구를 통하여 파방향, 파주기 등과 같은 통계적 결과를 얻을 수 있다. 이러한 통계적 결과는 실시간으로 제공될 수 있지만 이를 이용하여 동일한 해수면의 형상을 복원하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 계측된 해상에 대한 결과를 이용하여 계측된 해상과 동일한 해수면 복원이 이루어진다면, 실시간으로 선박이나 구조물에 외력을 가하는 파랑에 대한 예측과 이에 대한 대비가 가능할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 레이더 영상을 푸리에 변환(FFT, Fast Fourier transform) 알고리즘을 사용하여 파 스펙트럼(Wave spectrum)을 얻고, 이후 필터링 기법을 적용하여 해수면을 복원한다는 점에 초점을 두고 있다. 또한 레이더를 이용한 파랑계측 시스템과 필드 관측에 대한 소개, 공간 및 시간에 따른 3차원 FFT 알고리즘을 이용한 스펙트럼 계산에 대한 내용, 선형파 이론(Linear wave theory)에 기초한 해양파의 분산성 관계(Dispersion relation)를 이용한 필터링 방법에 대한 내용으로 이어진다. 아울러 계측 및 복원된 해수면의 파 변위 및 방향과 스펙트럼 비교를 통하여 본 연구의 결과를 검증하였으며 끝으로 결론을 기술하였다.

2. 파랑 시뮬레이션

2.1 파랑 계측 시스템

본 논문에 사용된 데이터는 X-band 레이더를 이용하여 파랑을 계측 하였으며, 파랑 계측 시스템인 WaveFinder를 이용하였다(Park et al., 2006a). 파랑 계측 시스템의 구성은 Fig.1 과 같고 그 구성으로는 X-band 레이더 안테나와 디스플레이 장치가 있으며, 파랑에 대한 정보를 획득하기 위하여 PCI 타입의 RSC(Radar scan converter)와 레이더 안테나 운용과 함께 데이

Fig. 1 Configuration of WaveFinder

Table 1 Specification of WaveFinder

Items	Spec	
Radar	Frequency	9.4 GHz (X-band)
	Pulse repetition freq. (PRF)	3000 Hz
	Pulse length	0.15 μ s
	Beam width (H)	1.23°
	Beam width (V)	23°
RSC	Rotation speed	42 rpm
	A/D Converter	14 bit
PC	CPU / Memory / HDD	Intel 2.4 GHz / 2 GB / 250 GB

터 저장 및 해석을 할 수 있는 컴퓨터로 구성되어 있다. 파랑 계측 시스템에 대한 개략적인 사양은 Table 1에 나타내었다. 계산된 파랑에 대한 정보에는 유의파고, 평균 파주기, 평균 파장, 평균 파방향과 조류(Surface current) 등에 대한 정보가 있으며 방향 파 스펙트럼을 계산할 수 있다. 본 시스템에 대한 검증 및 활용은 Park(2005), Park et al.(2006a), Park et al.(2006b)이 있으며 2007년부터 이어도 종합 해양과학기지에 설치되어 시스템의 활용성과 그 성능을 입증하였다.

2.2. 현장 계측

본 연구는 제주도에서 남서쪽으로 약 150km에 위치한 이어도 종합해양과학기지(Fig. 2)에서 수행된 파랑 계측 자료를 토대로 하였으며, 그 중 2008년 11월 13일부터 11월 30일까지 18일 간의 계측 자료(Fig. 3)이며, Sea level monitor의 경우 10분 단위로, WaveFinder의 경우 20분 단위로 계측하여 한 시간 평균으로 재계산한 파랑 분석 자료이며 이 계측 자료를 이용하여 본 논문을 구성하였다. 일반적인 레이더와 같이 전자기파를 송수신

Fig. 2 Ieodo ocean research station

Fig. 3 Comparison of significant wave height

(a) Sea level monitor

(b) Radar antenna

Fig. 4 Photo of sea level monitor and radar antenna

하는 Sea level monitor (Fig. 4(a))는 W.S. ocean system사가 제작하였고, 파고 측정을 위해 기지에 설치된 장비로서 해수면에

수직으로 전자기파를 방출하여 반사 되는 거리를 계산하여 파고를 측정한다. 이에도 주변 해역에서는 부이의 설치 및 사용이 어렵기 때문에 본 장비를 활용하여 파고에 대한 자료를 검증하였다. Fig. 4(b)는 기지에 설치되어 있는 WaveFinder(항해용 상용 X-band 레이더를 이용한 파랑 계측 시스템으로 삼성중공업(주), 부산대학교의 산학연구로 개발되어 상용화된 제품)의 안테나의 모습이다.

3. 3차원 고속 푸리에 변환

해면반사(Sea clutter)의 특징을 가지는 연속적인 레이더 영상 $I(x, y, t)$ 에서 파수(Wave number) 스펙트럼을 얻기 위해서 3차원 FFT를 이용한다.

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

여기서 k_x , k_y 는 파수이고 ω 는 각주파수(Angular frequency)이다. 이 스펙트럼에는 파 에너지와 관련된 성분만 존재하는 것이 아니라 음영효과(Shadow effect) 등에 의해 발생하는 잡음 성분도 포함되어 있기 때문에 분산성 관계식을 이용하여 잡음 성분을 제거해야 한다.

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

여기서 $\vec{k}$ 는 k_x 와 k_y 와 구성되는 파수 벡터이고, g 는 중력가속도, h 는 관측 영역의 수심, $\vec{U}$ 는 관측자인 레이더 안테나의 속도와 조류 등에 의한 해수면의 속도 등 파도 자체의 이동 속도 외에 발생하는 속도 성분의 총합이다. Fig. 5에 분산성 관계식에 대한 예를 나타내었다.

(a) W/O doppler effect

(b) W/ doppler effect

Fig. 5 Two examples of dispersion shell

3차원 FFT를 통해 얻은 스펙트럼 $F(k_x, k_y, \omega)$ 는 식(3)과 같이 원점 대칭을 갖는다.

$$F(k_x, k_y, \omega) = F(-k_x, -k_y, -\omega) \quad (3)$$

식 (1)의 $F(k_x, k_y, \omega)$ 는 레이더 영상으로 구한 스펙트럼이기 때문에 이것을 그대로 파 스펙트럼으로 활용할 수 없다. 따라서 이를 파(Wave)에 대한 스펙트럼으로 변환하기 위해 식(4)를 이용한다.

$$S(k_x, k_y, \omega) = \alpha k^\beta F(k_x, k_y, \omega) \quad (4)$$

여기서 α, β 는 실험(계측 해상 영역에 부이와 동시에 계측하여 비교함으로써 추정함)과 수치 시뮬레이션을 통해 얻을 수 있는 상수이며 αk^β 을 변조전달함수라고 한다. 이 스펙트럼에서 양의 주파수 영역만을 적분하면 방향의 모호성이 제거된 파에 대한 파수 스펙트럼이 구해진다.

$$S(k_x, k_y) = 2 \int_{\omega > 0} S(k_x, k_y, \omega) d\omega \quad (5)$$

이 스펙트럼을 방향과 스펙트럼으로 변환하기 위해서는 식(6)을 이용한다.

$$S(\theta, \omega) = \frac{d(\vec{k})}{d(\theta, \omega)} S(k_x, k_y) = \frac{4\pi}{g^2} \omega^3 S(k_x, k_y) \quad (6)$$

여기서 θ 는 파방향을 나타낸다.

Fig. 6은 식 (5)와 (6)에서 계산된 파수 스펙트럼과 방향과 스펙트럼의 예이다.

(a) Wave number spectrum (b) Directional wave spectrum

Fig. 6 Two examples of typical spectra

4. 해수면 복원 기법

4.1 파 스펙트럼을 이용한 생성 기법

$E(\theta, \omega)$ 는 방향과 스펙트럼으로 해상상태의 통계적인 특성을 주파수와 방향의 함수로 나타내고 있다. 방향과 스펙트럼은 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$E(\theta, \omega) = S(\omega) D(\theta, \omega) \quad (7)$$

여기서 $S(\omega)$ 는 파 스펙트럼 또는 주파수 스펙트럼(Frequency spectrum)이며, $D(\theta, \omega)$ 는 방향별 분포 특성을 나타낸다. $D(\theta, \omega)$ 는 아래와 같은 특징을 가지고 있다.

$$\int_0^{2\pi} D(\theta, \omega) d\theta = 1 \quad (8)$$

앞서 언급된 파 스펙트럼은 흔히 사용되는 JONSWAP, Pierson-Moskowitz 스펙트럼과 같은 장기간 계측기간을 통해 얻어진 경험식(Empirical formulation)을 사용할 수도 있으며, 또는 부이, X-band 레이더, SAR(Synthetic aperture radar, 합성개구면레이더)와 같은 계측 장비를 통해 스펙트럼을 획득할 수도 있다.

방향과 스펙트럼을 이용하여 실제 해수면과 유사한 특징을 구현하기 위해서는 랜덤 위상(Random phase) 및 선형 중첩법을 이용하여 계산되며, 그 식은 아래와 같다.

$$\eta(x, y, t) = \sum_{p=0}^m \sum_{q=0}^n A_{mn} \cos(k_{xm} \cos(\theta_n)x + k_{ym} \sin(\theta_n)y - \omega_m t + \varphi_{mn}) \quad (9)$$

$$A_{mn} = \sqrt{2E_{mn}d\omega d\theta} \quad (10)$$

여기서 φ_{mn} 는 랜덤 위상으로, 가우시안 분포에 의한 $0 \sim 2\pi$ 범위의 값을 가진다.

이 기법을 활용하게 되면 통계적 성질이 동일한 임의의 해수면을 생성하게 된다. 4.2절에서는 계측된 레이더 영상을 활용하여 해수면을 생성한다, 앞서 기술한 선형 중첩법과 달리 계측시의 실제 해수면을 생성할 수 있다. 따라서 이후 레이더 영상을 활용한 특정 해수면의 생성을 복원이라고 정의한다.

4.2 레이더 영상을 이용한 복원 기법

선형 중첩법을 이용하는 경우는 계산 시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 그러나 레이더 영상을 확보한 경우에는 3차원 역 푸리에 변환(IFFT, Inverse Fourier transformation)을 통해 빠른 시간에 해수면을 복원할 수 있다.

연속된 레이더 영상에 3차원 푸리에 변환을 적용하고 잡음 성분을 제거하여 파 스펙트럼으로 변환한 식(4)의 $S(k_x, k_y, \omega)$ 에는 각각의 k_x, k_y 그리고 ω 성분들에 대한 실수부와 허수부의 정보가 담겨 있다. 이 성분들을 통해 3차원 역 푸리에 변환을 적용하게 되면 해수면의 정보를 얻을 수 있다.

$$\tilde{\eta}(x, y, t) = \iiint S(k_x, k_y, \omega) e^{i(k_x x + k_y y - \omega t)} dk_x dk_y d\omega \quad (11)$$

여기서 $\tilde{\eta}$ 은 정규화된(Normalized) 스펙트럼에서 계산된 것이기 때문에 실제 파고 값으로 변환하기 위하여, 유의파고와 표준편차의 값이 필요하다(Nieto Borge et al., 2004).

$$\eta(x, y, t) = \frac{H_s}{4\sigma_{\tilde{\eta}}} \tilde{\eta}(x, y, t) \quad (12)$$

여기서 유의파고 H_s 및 표준편차 $\sigma_{\tilde{\eta}}$ 는 레이더 계측 신호의 SNR(Signal to noise ratio, 신호대잡음비)을 이용하여 계산된다(Nieto Borge et al., 2008).

5. 해석 결과

Fig. 7에서는 실제 레이더 영상의 강도(Intensity)를 나타내는 그레이 레벨(Gray level) 해수면과 복원된 해수면을 비교하였다. Fig. 7(a)에서는 전자기파의 잡음성분이 포함되어 거친 해수면을 보이지만 Fig. 7(b)에서는 잡음성분이 완화되어 부드러운 해수면을 보인다. 전체적인 파형은 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8에서 점선은 실제 레이더 영상의 그레이 레벨이며, 실선은 레이더 영상을 복원한 해수면의 결과이다. 복원된 해수면의 특징은 레이더에서 가장 큰 잡음성분인 음영변조가 제거된 것으로 보이며 파고의 정성적인 성분과 파주기 정량적인 성분만이 존재하여 구성됨을 알 수 있다. 여기서 음영변조는 레이더 안테나에서 송출된 빔이 전방에 존재하는 높은 파에 의해 후방의 낮은 파에 미치지 못하여 레이더 빔에 대한 응답을 수신할 수 없을 때 발생되어지는 현상이다.

Fig. 9(a)는 레이더 영상으로부터 획득된 방향과 스펙트럼이며, Fig. 9(b)는 복원된 해수면의 방향과 스펙트럼이다. 복원된 해수면의 방향과 스펙트럼은 노이즈 성분을 제거하였기 때문에 파주기와 파방향에 Fig. 9(a)에 비하여 좁은 영역에 집중되어 뚜렷한 파주기와 파방향을 보여 준다.

따라서 본 연구에서 사용된 분산성 관계를 이용한 필터링 기법은 비교적 타당성이 있다고 추정할 수 있다.

(a) Measured sea surface (b) Reconstructed sea surface

Fig. 7 Comparison of gray level and surface elevation

Fig. 8 Comparison of gray level and surface elevation

(a) Measured

(b) Reconstruction

Fig. 9 Contour of directional wave spectrum

6. 결론

본 논문에서는 레이더를 이용한 파고 계측 시스템으로부터 획득한 레이더 영상을 활용하여 해수면 복원에 대한 연구를 기술하였으며, 계측 및 복원된 방향파 스펙트럼 비교, 계측된 레이더 영상 그레이 레벨과 복원된 해수면 변위(Elevation) 비교를 통하여 그 적용 가능성에 대하여 살펴보았다. 따라서 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 일반적으로 파 스펙트럼을 가지고 랜덤 위상을 이용하여 선형 중첩법으로 해수면을 생성하면 통계적 성질이 동일한 임의의 해수면을 생성하게 되나, 계측된 레이더 영상을 활용하여 해수면 복원을 하게 되면 계측시의 실제 해수면을 복원할 수 있다. 또한 해수면 생성시의 연산속도에서 3차원 역 푸리에 변환이 선형 중첩법보다 매우 우수하다.

둘째, 레이더 전자기파 특성에 기인하는 파랑에 대한 레이더 영상의 잡음성분은 일반적으로 음영 변조(Shadowing modulation), 경사 변조(Tilt modulation), 유체역학적 변조(Hydrodynamic modulation)로 나눌 수 있으며, 이 중 가장 큰 잡음성분인 음영 변조를 제거하여 해수면을 복원하였다. 따라서 본 연구에서는 파랑에 대한 레이더 영상을 이용하여 해수면 복원에 활용할 수 있는 가능성을 확인하였다.

References

- Nieto Borge, J.C., Alfonso, M., 1994. Methods of Sea State Simulation. CLIMAMARITIMO, 56.
- Nieto Borge, J.C., Rodriguez, G.R., Hessner, K., Gonzalez, P.I., 2004. Inversion of Marine Radar Images for Surface Wave Analysis. J. Atmos. Oceanic Technol., 21(8), 1291-1300.
- Nieto Borge, J.C., Hessner, K., Jarabo-Amores, P., de la Mata-Moya, D., 2008. Signal-to-noise ratio analysis to estimate ocean wave heights from X-band marine radar image time series. IET Radar Sonar Navig., 2(1), 35-41.
- Park, G.I., Choi, J.W., Kang, Y.T., Ha, M.K., Jang, H.S., Park, J.S., Park, S.G., Kwon, S.H., 2006a. The Application of Marine X-band Radar to Measure Wave Condition during Sea Trial. J. SOTEC, 10, 34-48.
- Park, J.S., 2005. Development of Sea Surface Wave and Current Monitoring System by Using X-band Nautical Radar. Ph.D. dissertation, Naval Architecture and Ocean Engineering in Pusan National University.
- Park, J.S., Park, S.G., Kwon, S.H., Park, G.I., Choi, J.W., Kang, Y.T., Ha, M.G., 2006b. Development of a Wave Monitoring System Using a Marine Radar. Journal of Ocean Engineering and Technology, 20(1), 37-42.
- Park, J.S., Yang, Y.J., Park, S.G., Kwon, S.H., 2009. A Study on the Radar Image Simulation for Ocean Waves. Proceedings of the Korean Association of Ocean Science and Technology Societies Conference, Changwon, Korea, 1842-1847.
- Park, J.S., Yang, Y.J., Park, S.G., Kwon, S.H., 2010. A Study on Radar Image Simulation for Ocean Waves Using Radar Received Power. Journal of Ocean Engineering and Technology, 24(1), 47-52.
- Yang, Y.J., Park, S.J., Lee, S.B., Park, J.S., Park, S.G., Kwon, S.H., 2008. A Study on the Simulation of Radar Images. The 6th OSAKA Colloquium on Seakeeping and Stability of Ships, 221-226.