

# X-band 레이더 기반 파고 추정 방법 비교 연구

양영준\* · 박준수\*\*† · 박승근\*\*\* · 권순홍\*\*\*\*

\*, \*\*\*, 부산대학교 조선해양플랜트글로벌핵심연구센터, \*\* 경남대학교 조선해양IT공학과, \*\*\*\* 부산대학교 조선해양공학과

## A Comparative Study of Wave Height Estimation base on X-band Radar

Young-Jun Yang\* · Jun-Soo Park\*\*† · Seung-Geun Park\*\*\* · Sun-Hong Kwon\*\*\*\*

\*, \*\*\*, Global Core Research Center for Ships and Offshore Plants, Pusan National University, Busan, 46241, Republic of Korea

\*\* Department of Naval Architecture, Ocean and IT Engineering, Kyungnam University, Changwon, 51767, Republic of Korea

\*\*\*\* Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, 46246, Republic of Korea

**요 약** : 본 논문은 X-band 레이더 기반 파고추정 방법의 비교연구에 대한 내용으로, 신호 대 잡음비 및 음영비를 이용하였다. 신호 대 잡음비의 경우 기존 파고 추정을 위한 방법으로 널리 사용되고 있으며, 음영비의 경우 새로이 제시되는 방법이다. 본 연구에 사용된 레이더 영상의 경우 울산 주전해안에서 측정된 자료이며, 기상청 등표에서 측정된 해양기상정보와 비교하였다. 자료는 약 34일동안 측정된 자료를 비교하였으며, 동해안 태풍 진출 기간 자료를 확보하여 다양한 파고분포에 대한 결과를 검증하였다. 분석 결과 음영비를 이용한 파고추정의 경우, 부이와의 보정이 필요 없는 장점과 실시간 파고 측정의 가능성을 확인하였으며, 일부 풍속, 타 물체 탐지 등 레이더 영상의 외적 요소에 의한 오차 발생의 요인을 파악하였다.

**핵심용어** : 파고추정, X-밴드 레이더, 음영비, 신호 대 잡음비, 보정

**Abstract** : This paper presents a comparative study of wave height estimation method that was used for signal to noise ratio and shadowing ratio based on X-band marine radar. If the signal to noise ratio, and is widely used as a method for estimating an wave height, a new method is presented for shadowing ratio. In the case of radar images used in this study it is measuring the data from the coast of Ulsan Jujeon, compared with marine meteorological information from the Meteorological Agency measured a light beacon. We compared the measured data for about 34 days, the typhoon was measured, including a period in the East Sea, and verify the results for various distribution of wave height. For estimate wave height using a shadowing ratio analysis, it does not require calibration and real-time advantages of this part, coming confirmed the possibility of the measurement, the cause detection error for radar image was caused due to determine.

**Key Words** : Wave height estimation, X-band radar, Shadowing ratio, Signal to noise ratio, Calibration

### 1. 서 론

파랑은 해양에서의 부유체와 해양구조물의 외력으로 작용하며 구조적 손상과 동역학적 안정성을 좌우하고, 해안에 있어서는 해안선의 침식 및 이상 고파 등 다양한 현상을 유발하는 요소이다. 따라서 파랑 요소에 대한 정확한 파악은 중요하며 과거부터 지속적인 연구가 수행되어 왔다. 가장 오래된 대표적인 방법으로는 부이(buoy)를 이용하며, 일정시간동안 측정된 자료의 통계처리를 통해 파랑의 특성을 분석

한다. 또한 부이는 망실의 위험성과 설치, 유지, 및 보수비용이 높은 단점이 있으나, 제자리(in-situ) 측정방식의 특징인 정확성의 장점을 가지고 있다. 전자기파를 이용하는 원격측정(remote sensing) 방법은 in-situ 방법에 비해 정확성은 다소 떨어질 수 있으나, 광범위한 영역의 실시간 측정과 높은 경제성의 장점이 있어 현재 빈번히 활용되고 있다.

X-밴드 레이더는 경제성과 정확도의 장단점을 보완하며, 여러 가지 장점가지고 있어 파랑계측의 도구로 활용되고 있다. 파랑의 여러 요소 중 특히 파고 측정의 경우 다양한 알고리즘을 통해 연구가 수행되었으며, 대표적인 방법으로는 신호 대 잡음비(signal to noise ratio, SNR) 이 있다. 신호 대 잡음비를 통한 파고추정은 부이 등을 이용하여 실제 측정된

\* First Author : ybihong@pusan.ac.kr, 051-510-2385

† Corresponding Author : junsoopark@kyungnam.ac.kr, 055-249-2655

파고와의 상관관계를 통해 필요한 변수를 추정하는 방법이며, 이에 따라 보정(calibration)이 필수적이다. 보정 작업은 레이더로 계측되는 해당해역에 부이와 같은 정확한 파고 계측 수단이 필요하며, 장기간 계측을 통해 비교검증작업이 필요하여 경제성이 떨어지는 단점을 지닌다. 특히 신호 대 잡음비와 부이로 계측된 파고 값의 상관도 분석 및 선형 1차 곡선맞춤(curve fitting)을 통해 신호 대 잡음비가 파고 값으로 유의미한 값을 가진다.

음영비(shadowing ratio)를 이용한 파고 추정의 경우 해수면의 통계적 특성을 해수면모델과의 최소오차추정을 통해 (Smith, 1967) 부이등과의 파고 값과 보정 없이 직접적인 파고추정이 가능하다. 특히 음영비를 이용한 방법은 선박 및 해안의 X-band 레이더와 같은 낮은 지표각(low grazing angle)에 적합한 알고리즘으로 높은 지표각(high grazing angle)에 해당되는 인공위성 등에는 활용하기 어렵다. 이는 계측중심점으로부터 먼 거리에서는 레이더로부터 방사된 전자기파가 해수면의 물리적인 형태의 간섭으로 인해 돌아오지 못하여 발생하는 영역의 음영을 이용하기 때문이다. 음영비와 직결되는 해수면 모델의 경우 Beckmann 모델, Wagner 모델, 및 Smith 모델이 있다(Sadiku and Nelatury, 2006).

본 논문에서는 가장 개량된 형태인 Smith 모델을 이용하여 파고를 추정한다(Gangeskar, 2014). 첫 번째 서론에 이어, 레이더 영상 획득 및 3차원 FFT를 통해 파주기 성분 추출방법을 설명한다. 또한 음영비의 추출 방법을 소개하고, Smith model을 이용한 파고 추정방법을 제안하며, 울산 수전해안에서 계측된 자료의 해석 및 비교검증을 서술한다. 끝으로 결과 및 결론으로 이어진다.

### X-Band Incoherent Radar

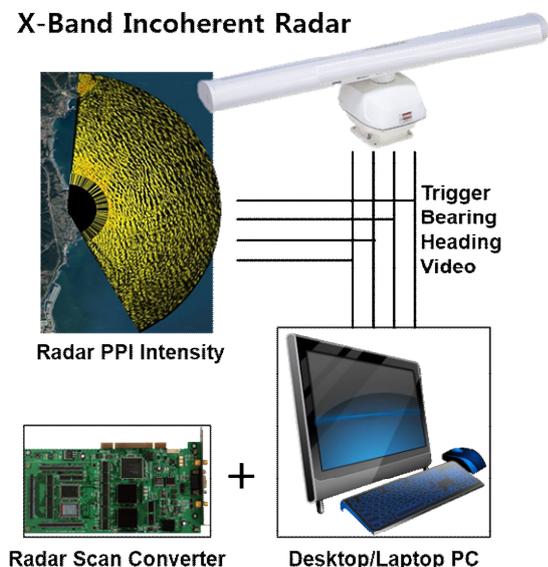


Fig. 1. Configuration of radar measurement system.

## 2. 레이더 영상획득 및 3차원 고속 푸리에 변환

### 2.1 X-밴드 레이더 시스템

X-band 레이더 시스템의 최종적인 목적은 해수면의 영상을 계측하는 것으로 Fig. 1과 같이 구성되어 있다. 레이더의 경우 일반 항해용 레이더 시스템으로 구성되어 있으며, 영상 계측을 위해 RSC보드(Radar Scan Converter)와 PC가 사용된다. 특히 레이더의 4가지 신호, 즉 trigger, bearing, heading, 그리고 video 신호의 조합을 통해 최종적인 해수면 영상 계측 및 저장이 완료된다.

본 연구에서는 14bit 의 신호 해상도를 가진 RSC보드와 MS社의 Windows 7(64bit) OS가 설치된 PC 및 Consillium社의 25kw급 X-밴드 레이더를 사용하였다.

### 2.2 3차원 고속 푸리에 변환

X-band 레이더기반 파랑계측은 연속회전에 의해 계측되는 레이더 영상의 Fourier 방법을 통해 통계적으로 해석될 수 있다. 이를 통해 파랑의 방향과 주기를 측정한다. 특히 파주기의 경우 음영비를 이용한 파고계측의 매개변수로 사용(식4) 됨으로 반드시 계산되어야하는 요소이다.

시간에 따른 연속적 레이더 영상은 시공간영역(spatio-temporal domain)으로 대변되며, FFT를 통해 주파수영역( $K_x$ ,  $K_y$ ,  $\omega$ )으로 변환가능하다. 특히 3차원 FFT의 경우 입사파의 방향 모호성 제거가 가능하므로 필수적이다(Atanassov et al., 1985; Young et al., 1985).

연속된 레이더 영상의 3차원 FFT는 Fig. 2와 같고, FFT해석을 위해 2개의 영상수를 나타냈다. 이러한 스펙트럼 해석에 의하여, 해당 해역에 대한 파향 및 파주기 성분을 얻을 수 있으며 해당방법은 Fig. 3에 나타냈다. 공간상 파수(wave number)에 해당되는 값을 통해 파향(wave direction)이 계산되고, 해양파의 분산성관계(dispersion relation)에 근거한 곡선 맞춤(curve fitting)을 통해 파주기(wave period)가 계산된다. 특히 분산성관계의 경우 기존 신호 대 잡음비를 이용한 파고 추정 시 파랑에 의한 성분과 나머지 잡음성분을 구분하는 기준이며, 성분 값의 비를 이용하여 신호 대 잡음비를 산출한다.

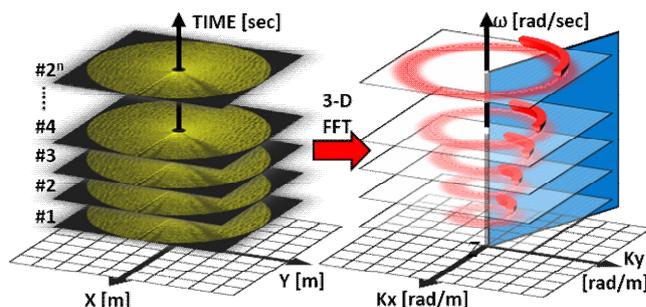


Fig. 2. Transform spatio-temporal domain to spectral domain.

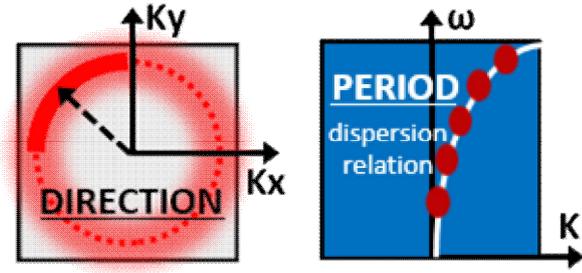


Fig. 3. Wave direction and period analysis using radar image.

### 3. 음영비를 이용한 파고 추정

#### 3.1 음영비

음영비를 이용한 파고 추정은 다음과 같이 정리된다.

- a. Get radar image
- b. Edge detection for threshold value
- c. Shadowing image calculation using threshold value
- d. Smith function for  $\sigma_S$
- e. Calculation wave height

#### 3.2 레이더 영상 획득

레이더 영상의 경우 Chapter.2에서 서술된 방법을 이용하여 계측된다. 특히 직교좌표계로 나타나는 레이더영상의 경우 직교좌표계로 나타내며, 일반적인 좌표변환이 아닌 해당 값만 직교좌표계로 나타낸다. Fig. 4는 직교좌표계로 나타낸 레이더 영상의 예이며, 실제 울산 주전해안에서 2015년 7월 16일 22시경 계측된 영상이다. 가로축의 경우 거리를, 세로축의 경우 레이더 각도성분을 나타낸다.

특히 직교좌표계로 표현하는 이유는 이후 단계인 경계선 추출(edge detection)을 위함으로, 경계선 추출 시 일정크기의 행렬을 사용하기 때문에 이와 같은 과정이 필수적이다.

레이더 영상의 경우 실제 신호의 강도(intensity)를 나타내며, 하드웨어의 제원에 따라 감도가 좌우된다. 영상에서 파랑의 패턴이 명확하게 확인할 수 있다.

#### 3.3 임계값에 의한 경계선 추출

음영비를 계산하려면 음영(shadowing)이 발생된 영역의 구분이 필수적이다. 정량적으로 음영영역의 구분을 위해서 임계값(threshold value)의 계산이 필요하며, 이를 위해 경계선 추출을 통해 수행된다.

본 논문에서는 Canny 방법을 사용하였으며, 해당 경계선 추출 방법은 낮은 에러율, 경계선위치의 정확성, 단일 경계점에 대한 응답을 표현할 수 있어 레이더 영상과 같은 불규칙적 파랑 패턴의 경계선 검출 가능성을 높일 수 있다. 단,

복잡하고 실행시간이 타 방법에 비해 길다는 단점이 있으나, 해당연구에서는 검출 가능성에 초점을 맞추고 있어 이를 무시한다. 따라서 경계선이 검출되는 해당 색인(index)을 계산하고, 해당 색인의 화소(pixel)의 강도(intensity)를 히스토그램으로 나타낸다. 여기서 최빈값(mode value)을 임계값으로 간주한다(Gangeskar, 2014). Fig. 5는 Fig. 4에 대한 경계선 추출 결과이다.

#### 3.4 임계값을 이용한 음영영상 계산

음영영상(shadowed image)을 계산하기위해서 3.2에서 계산된 임계값을 이용하여 음영유무를 판단하며, 임계값을 초과할 경우 '1', 그 이하인 경우 '0'으로 간주한다. 이를 통해 최종적인 음영영상을 획득한다.

Fig. 6(a)의 경우 그레이스케일의 레이더 영상, Fig. 6(b)는 해당 영상의 경계선추출 결과, 그리고 Fig. 6(c)는 임계값이 적용된 음영영상을 순서대로 보여준다.

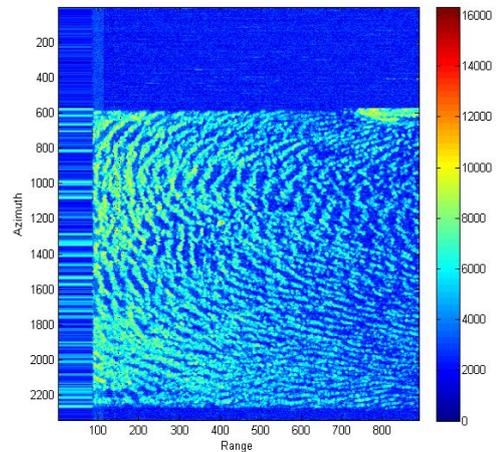


Fig. 4. Radar image in Rectangular coordinate.

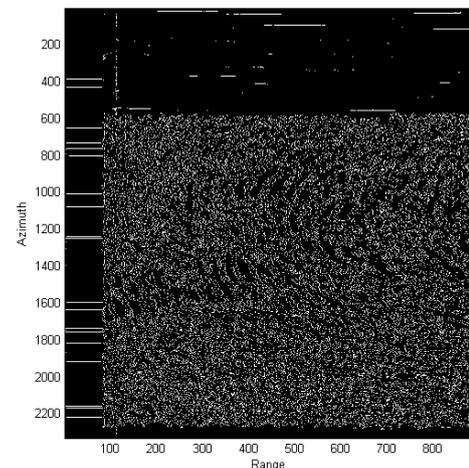


Fig. 5. Edge detected radar image.

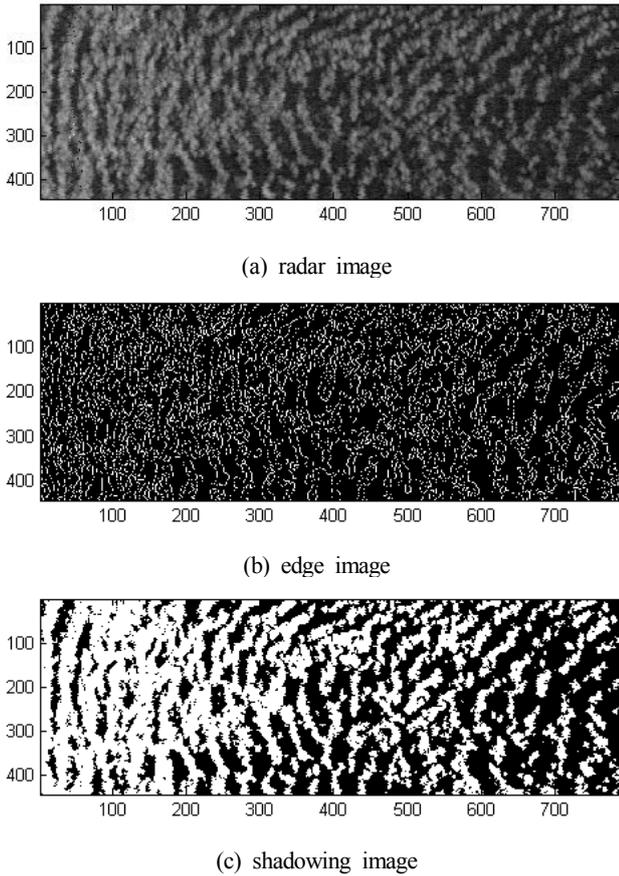


Fig. 6. Radar image and post-processed image.

기존 방법(Gangeskar, 2014)의 경우 레이더 획득 시 전체 각도 영역을 모두 해석에 사용하지만, 이는 계산과정 시 다수의 오차를 포함할 수 있는 단점이 있다. 따라서 기존 단점을 보완하기 위해 본 연구에서는 Fig. 6과 같이 입사파의 방향에서 신호를  $\pm 15^\circ$ 에 해당하는 레이더 영상만을 이용하였다.

### 3.5 유효경사( $\sigma_S$ )에 대한 Smith 함수

Smith 함수는 가우시안 통계(Gaussian statistics)를 보여주는 해수면의 특징을 음영비와의 유의성을 연결하는 가지고 있다. 즉, 해양과의 에너지 성분으로 대변되는 파고와 음영비 간의 연관성을 보여주는 함수로 지표각(grazing angle)  $\theta_n$  과 조명비(illumination ratio)를 정의하는 식으로 다음과 같다(Gangeskar, 2014).

$$L(\gamma) = \frac{1 - 1/2 \operatorname{erfc}(\mu / \sqrt{2} \sigma_S)}{A(\mu) + 1} \quad (1)$$

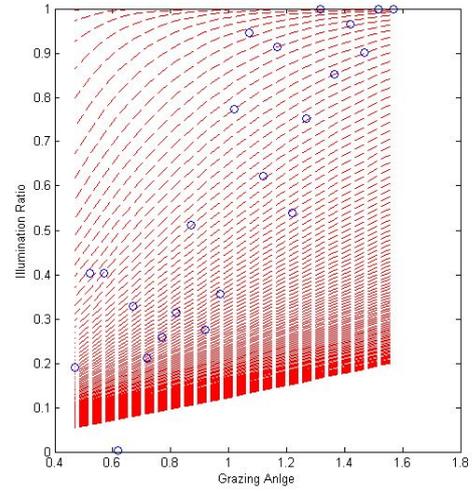


Fig. 7. Calculation  $\sigma_S$  using least square method.

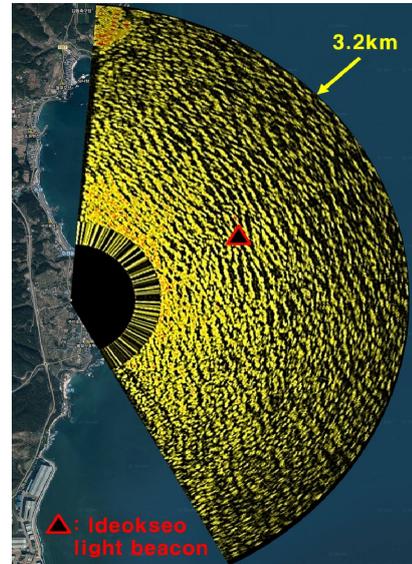


Fig. 8. Radar image with satellite image(Daum) and light beacon.

$$A(\mu) = \frac{\sqrt{2/\pi} \sigma_S / \mu e^{-\mu^2/2\sigma_S^2} - \operatorname{erfc}(\mu / \sqrt{2} \sigma_S)}{2} \quad (2)$$

$$\mu = \tan(\theta) \quad (3)$$

특히 조명비는  $L(\gamma) = 1 - S(\gamma)$ 로 간주되며, 앞서 계산된 음영효과의 결과를 이용한다. 조명비계산을 위해서는 레이더 방위각(azimuth angle)은 1도로 계산되었으며, 지표각의 경우 0.05도로 계산되어 해당 범위내의 음영 유무를 판단하여 비율을 계산하였다.  $\mu$ 는 지표각이며,  $\operatorname{erfc}$ 는 여오차함수(complementary error function)이다.

본 Smith 함수의 핵심은  $\sigma_S$ 를 계산하는 것이다. 식(1)에서 우변의 미지수는  $\sigma_S$ 를 계산하기 위해 최소 오차를 가지는 곡선맞춤을 수행하였으며, 해당결과는 Fig. 7과 같다. 파란색 원은 레이더 영상으로부터 계측된 조명비이며, 최소 오차를 가지는 Smith 함수로의 곡선 맞춤을 위해 붉은색 점선과 같은 반복 계산을 수행하였다.

### 3.6 파고 계산

Smith 함수를 통해 계산된  $\sigma_S$ 는 파고계산에 필요한 값으로 다음의 식에 의해 최종적인 파고가 계산된다.

$$H_{m0} = \frac{\sigma_S g T_{m0}^2}{2\pi} \quad (4)$$

$T_{m0}^2$ 의 경우 2.2의 3차원 FFT 방법을 통해 얻어지며(Atanassov et al., 1985; Young et al., 1985),  $g$ 는 중력 가속도이다.

음영비를 이용한 파고 추정의 경우 낮은 지표각에서 기인하는 음영영역에 의해 계산되며 이는 파주기와 직결되어 있어 위와 같은 식을 이용하는 것으로 판단된다.

## 4. 결 과

해석된 결과는 울산 주전해안에서 2015년 4월 19일부터 2015년 9월 9일까지 계측된 레이더 영상을 이용하였으며, 기존 파고 추정 방법인 신호 대 잡음비와 본 논문에서 제시하는 음영비를 계산하여, 기상청 등표(이덕서)에서 계측된 파고와 비교 검증하였다. 기상청 등표의 경우 레이더 계측 영역 이내에 있어 직접적인 비교가 가능하고, 기상청의 검증된 자료를 사용하기 때문에 오차가 낮은 장점이 있다. 실제 계측된 영상은 Fig. 8과 같다.

Fig. 9와 10은 기존 방법인 신호 대 잡음비를 이용하여 계측된 방법으로, Fig. 9에서는 신호 대 잡음비와 등표에서 계측된 파고와의 1차 선형 곡선 맞춤을 통해 해당 계수를 추출한다. 해당 작업은 ‘보정(calibration)’으로 간주된다. Fig. 10에서는 신호 대 잡음비로 계측된 유의파고와 실제 등표에서 계측된 유의파고의 상관도를 계산하였으며, 약 0.84의 상관 계수를 도출하였다.

음영비의 경우 파랑모델을 통해 직접적으로 파고를 도출하므로 보정이 필요 없으며, 직접적인 파고 값의 계산을 통해 상관계수의 추정이 가능하다. 즉 음영비를 이용한 파고 추정의 경우 Fig. 9와 같은 곡선 맞춤과정이 필요하지 않다. Fig. 11의 경우 음영비를 이용해 추정된 유의파고와 등표의 유의파고의 상관도를 계산하였으며, 약 0.71의 상관계수를 도출하였다.

Fig. 12는 각각의 결과를 통해 얻어진 파고의 시계열 비교 자료이다. Fig. 12(a)는 기존 방법인 신호 대 잡음비를 통해 얻어진 유의파고(붉은색)와 등표에서 얻어진 유의파고(파란색)의 시계열 자료이며, Fig. 12(b)는 음영비를 이용해 추정된 유의파고(붉은색)와 등표에서 계측된 유의파고의 시계열 비교 결과이다. 매 정시 계측된 파고 결과를 기상청 계측 파고와 비교하였으며, 모두 820시간(약 34일)을 분석한 결과이다.

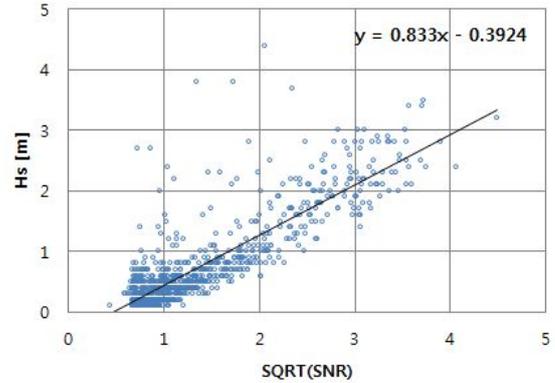


Fig. 9. Curve fitting result between SNR and HS.

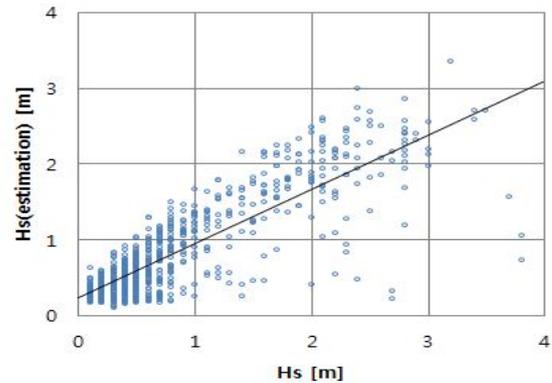


Fig. 10. SNR-Hs correlation estimation, 0.8465.

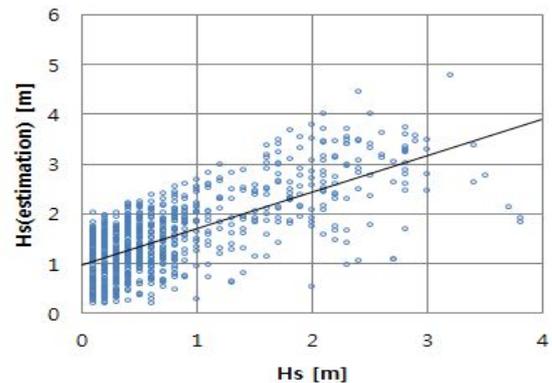


Fig. 11. SR-Hs correlation estimation, 0.7069.

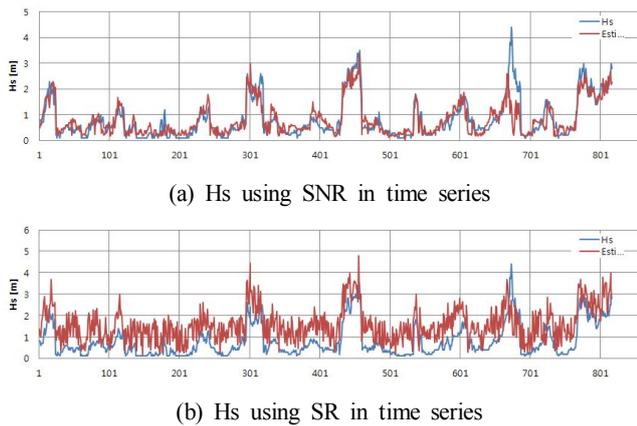


Fig. 12. Comparison result in time series.

### 5. 결론

본 논문에서는 레이더 영상 기반, 파고계측의 새로운 방법을 제시하였으며, 해당 음영비를 이용한 파고 추정법과 기존 방법들과의 비교해석 결과를 도출하였다. 파고 추정 시 대표적으로 사용되는 신호 대 잡음비 방법과 실제 기상청 등표에서 계측된 파고와 상호 비교한 결과 유사한 경향성을 확인할 수 있었으며, 파고추정의 가능성을 검증했다고 판단된다.

음영비를 이용한 파고 추정의 경우 부이와의 보정이 필요 없는 점으로 인해 경제성의 장점을 지니고 있다. 실제 기존 방법인 신호 대 잡음비의 경우 보정의 비중이 대단히 높고, 파고 추정 시 필연적으로 수행되어야 하며, 정기적인 보정 작업이 필요하다. 하지만, 음영비를 이용한 파고추정의 경우 기존방법의 일부 단점을 극복할 수 있다고 판단된다.

특히 분석결과는 약 34일동안 계측된 자료를 활용하였으며, 2015년 15호 태풍 고니의 동해안 진출시기의 자료가 포함되어 있어 파고 범위의 다양성을 확보할 수 있었다. 이에 따라 다양한 파고에 대한 유효범위를 증명하였다.

하지만 레이더 영상 획득 시, 낮은 풍속, 선박 및 기타 물체에 의한 레이더신호의 이상과 해상도를 저감하는 문제가 발생할 경우 파고 추정의 정확도가 다소 떨어질 수 있다는 단점을 가진다. 향후 다양한 실험적 고찰과 이론적 검증을 통해 이러한 단점이 보완될 것으로 사료된다.

### 후 기

이 연구는 기상청 기상산업지원 및 활용기술 개발사업(KMIPA 2014-22010관리번호)의 지원으로 수행되었습니다.

### References

- [1] Atanassov, V., W. Rosenthal and F. Ziemer(1985), "Removal of ambiguity of two-dimensional power spectra obtained by processing ship radar images of ocean waves," J. Geophys. Res., Vol. 90, No. C1, pp. 1061-1067.
- [2] Gangeskar, R.(2014), "An Algorithm for Estimation of Wave Height From Shadowing in X-band Radar Sea Surface Images", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 52, No. 6, pp. 3373-3381.
- [3] Sadiku, M. N. O. and S. R. Nelatury(2006). "A Comparison of Models for Shadowing Functions for Random Rough Surfaces, SoutheastCon, Proceedings of the IEEE, Memphis, pp. 11-15.
- [4] Smith, B. G.(1967), "Geometric shadowing of a random rough surface," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol AP-15, No. 5, pp. 668-671.
- [5] Young, I. R., W. Rosenthal and F. Ziemer(1985), "A three-dimensional analysis of marine radar images for the determination of ocean wave directionality and surface currents," J. Geophys. Res., Vol. 90, No. C1, pp 1049-1059.

Received : 2015. 09. 10.

Revised : 2015. 10. 12. (1st)

: 2015. 10. 23. (2nd)

Accepted : 2015. 10. 27.