

Article

<https://doi.org/10.7850/jkso.2018.23.1.001>
pISSN : 1226-2978

이어도 해양과학기지 관측 파고와 인공위성 관측 유의파고 차이의 특성 연구 (2004~2016)

우혜진¹ · 박경애^{2,3*} · 변도성⁴ · 이주영⁴ · 이은일⁴¹서울대학교 과학교육과, ²서울대학교 지구과학교육과, ³서울대학교 해양연구소, ⁴국립해양조사원 해양과학조사연구실

Characteristics of the Differences between Significant Wave Height at Ieodo Ocean Research Station and Satellite Altimeter-measured Data over a Decade (2004~2016)

HYE-JIN WOO¹, KYUNG-AE PARK^{2,3*}, DO-SEONG BYUN⁴, JOOYOUNG LEE⁴ AND EUNIL LEE⁴¹Department of Science Education, Seoul National University, Seoul 08226, Korea²Department of Earth Science Education, Seoul National University, Seoul 08226, Korea³Research Institute of Oceanography, Seoul National University, Seoul 08226, Korea⁴Ocean Research Division, Korea Hydrographic and Oceanographic Agency, Busan 49111, Korea*Corresponding author: kapark@snu.ac.kr

Editor Park Jong-Jin

Received 24 October 2017; Revised 28 December 2017; Accepted 28 December 2017

ABSTRACT

이어도 해양과학기지 유의파고 자료와 인공위성(GFO, Jason-1, Envisat, Jason-2, Cryosat-2, SARAL) 고도계 유의파고 자료를 비교하기 위하여 2004년 12월부터 2016년 5월까지 약 12년 동안의 위성-이어도 관측 유의파고 사이의 일치점 데이터베이스를 생산하였다. 위성 유의파고는 이어도 해양과학기지 유의파고에 대하여 약 0.34 m의 평균 제곱근 오차와 0.17 m의 양의 편차를 나타내었다. 위성과 이어도 관측 유의파고 차는 특이한 계절변동이나 경년변동을 보이지 않고 위성이 중복 관측하는 기간에 대해서 유사한 변동 특성을 보여 위성 자료의 일관성을 확인할 수 있었다. 위성-이어도 유의파고 차이에 대한 바람장의 영향을 조사한 결과 모든 위성에 대해 평균적으로 0.17 m 정도의 양의 편차가 나타났다. 지형 및 해양과학기지 구조물의 영향을 파악하기 위하여 파향에 대한 파고 오차의 특이성을 분석하였으나 통계적으로 유의미한 특성이 나타나지 않았다. 위성-이어도 일치점의 거리에 따른 영향을 조사하기 위하여 위성-이어도 간의 거리에 대한 함수로 오차의 특성을 분석한 결과 평균은 거리와 무관하게 0.14 m로 거의 일정하게 유지되는 반면에 오차의 최댓값과 최솟값 사이의 진폭은 이어도로부터 멀어질수록 선형적으로 증가하는 특성이 발견되었다. 반면에 동해 해양기상위성부이를 활용한 위성 유의파고 자료의 정확도 평가 결과, 위성-실측 자료 사이의 평균 제곱근 오차는 0.27 m로 상대적으로 작은 오차가 발생하였으며, 이어도 파고 자료와 같이 특이한 오차 특성은 발견되지 않았다. 이어도 파고 관측 기기의 상이성을 고려하여 이 연구에서는 위성 유의파고 자료를 기반으로 이어도 유의파고 자료를 보정하는 식을 제안하였다. 또한 이어도 해양과학기지가 국제적인 해양관측 기지로 격상되기 위해서는 자료의 신뢰도 확보가 우선되어야 함을 강조하고 방법과 전략을 제시하였다.

In order to compare significant wave height (SWH) data from multi-satellites (GFO, Jason-1, Envisat, Jason-2, Cryosat-2, SARAL) and SWH measurements from Ieodo Ocean Research Station (IORS), we constructed a 12 year matchup database between satellite and IORS measurements from December 2004 to May 2016. The satellite SWH showed a root mean square error (RMSE) of about 0.34 m and a positive bias of 0.17 m with respect to the IORS wave height. The satellite data and IORS wave height data did not show any specific seasonal variations or interannual variability, which confirmed the consistency of satellite data. The effect of the wind field on the difference of the SWH data between satellite and IORS was investigated. As a result, a similar result was observed in which a positive biases of about 0.17 m occurred on all satellites. In order to understand the effects of topography and the influence of the construction structures of IORS on the SWH differences, we investigated the directional dependency of differences of wave height, however, no statistically significant characteristics of the differences were revealed. As a result of analyzing the characteristics of the error as a function of the distance between the satellite and the IORS, the biases are almost constant about 0.14 m regardless of the

distance. By contrast, the amplitude of the SWH differences, the maximum value minus the minimum value at a given distance range, was found to increase linearly as the distance was increased. On the other hand, as a result of the accuracy evaluation of the satellite SWH from the Donghae marine meteorological buoy of Korea Meteorological Administration, the satellite SWH presented a relatively small RMSE of about 0.27 m and no specific characteristics of bias such as the validation results at IORS. In this paper, we propose a conversion formula to correct the significant wave data of IORS with the satellite SWH data. In addition, this study emphasizes that the reliability of data should be prioritized to be extensively utilized and presents specific methods and strategies in order to upgrade the IORS as an international world-wide marine observation site.

Keywords: Significant wave height, Jeodo Ocean Research Station, Satellite altimeter, Characteristics of difference

1. 서론

해양의 파랑(wave)은 해수면 상의 거의 모든 곳에 존재하며 해양과 대기 사이의 에너지, 열, 물질 교환에 중대한 영향을 미치고 있는 매우 중요한 해양 변수이다(Melville, 1996). 파랑은 국지적인 바람에 의해 발생하는 풍랑(wind sea)과 원거리에서 전파되어 오는 너울(swell)로 구분되며 너울 성분이 주를 이룬다(Chen *et al.*, 2002). 최근 들어 기후 변화로 인한 이상 파랑의 발생 및 연안에서의 피해가 시간이 지날수록 극심해지고 있다(Oh *et al.*, 2010; Tanaka, 2010).

지난 수십 년 동안 파랑에 대한 연구는 주로 해상 부이와 같은 실측 자료를 활용해 왔으나 최근에 들어서는 수치 모델을 활용하여 파랑을 실시간으로 예보하는 단계에 이르렀다(You and Park, 2010). 1978년 Seasat에서 유의파고를 관측한 이래로 인공위성 고도계 유의파고 자료를 활용한 시공간 변동 특성 연구가 시간이 지남에 따라 점점 활발해지는 추세이다(Young *et al.*, 2011). 장기간의 위성 고도계 유의파고 자료를 활용하여 전 지구 유의파고의 장기변동 특성을 분석한 결과 평균 파고에 비해 극한의 파고가 시간이 지남에 따라 더 높아지는 특성이 나타났다(Izaguirre *et al.*, 2011; Young *et al.*, 2011, 2012). Woo and Park (2017)은 동해 또한 극한의 유의파고가 급격하게 증가하는 경향이 나타났으며 파고의 장기 변동 특성이 동해 해양 생태계 변동에 잠재적인 영향을 줄 수 있음을 제시하였다.

여러 위성 고도계 자료를 활용한 파고의 장기변동 특성 연구를 위해서는 정확하고 일관된 자료가 지속적으로 관측되어야 하므로 위성 고도계 유의파고 자료의 정확도는 전 대양에서 꾸준히 검증되어 왔다 (Ebuchi and Kawamura, 1994; Gower, 1996; Hwang *et al.*, 1998; Queffeuou, 2004; Durrant *et al.*, 2009). 위성 유의파고 검증에 활용된 실측 자료는 대부분 부이에서 관측된 유의파고 자료이며 부이 관측 자료를 기준으로 위성 유의파고가 보정되었다(Queffeuou, 2004; Zieger *et al.*, 2009). 한반도 연안에서는 Kim (2012)과 Park *et al.* (2013)이 위성 유의파고 정확도를 평가하였으며, 한반도 주변해에서 해양기상부이 파고에 대한 위성 유의파고는 약 1.12 m의 평균 제곱근 오차(RMSE; Root mean square error)를 보였다(Park *et al.*, 2013). 최근에 SARAL와 같이 새로운 주파수를 활용한 인공위성 고도계가 발사됨에 따라 위성 유의파고의 정확도가 재검토되어야 하는 시점이 되었다. 또한 이상 파랑과 너울에 대한 한반도 연안 재해가 증대되어 파랑 관측 부이의 개수가 증가함에 따라 새로운 실측 자료를 이용한 위성과의 추가 비교 연구도 수행되어야 한다. 특히 국외 대부분의 위성 파고 검보정 작업은 대양의 부이를 대상으로 수행되었으므로(Queffeuou, 2004; Zieger *et al.*, 2009) 한반도 주변해와 같이 해양 환경이 복잡한 국지적인 해역에서의 특성은 반영되어 있지 않다는 한계점이 있다. 따라서 향후 한반도 주변해역에서 위성 파고 자료 활용 연구를 위하여 한반도 주변해역의 실측 자료를 이용한 위성 관측 파고 비교 연구가 선행되어야 한다.

이어도 해양과학기지(32°07'22.63"N, 125°10'56.81"E)는 마라도로부터 남서쪽으로 149 km, 일본 도리시마로부터 서쪽으로 276 km, 중국 서산다오로부터 북동쪽 287 km 떨어진 해상의 수중 암초에 2003년 건설되었다(Fig. 1). 현재 유의파고, 최대파고, 파향, 파주기, 조위, 수온, 염분 등의 해양 관측 자료, 풍속, 풍향, 기온, 상대습도, 기압, 일사량, 일조시간, 강우량 등의 기상 관측 자료와 환경 및 기타 관측 자료들이 실시간 또는 일부 자료는 준실시간으로 국립해양조사연구원에 전송되어 배

포되고 있다. 이어도 해양과학기지가 건설된 해역은 해수 순환의 관점에서 양자강 저염수의 영향과 대마난류 등의 영향을 받는 해역으로 한반도 주변해역 순환 연구를 위한 중요한 위치이며 또한 한반도로 접근하는 주요 태풍의 진로 상에 위치하고 있어 이어도 해양과학기지 관측 자료를 활용한 태풍의 이동 경로 예측 및 한반도 주변 태풍의 장기 변동 분석이 용이하다(Oh *et al.*, 2006; Moon *et al.*, 2010). 대부분 연안에 위치한 조위관측소, 해양관측소, 해양관측부이와 달리 육지의 영향을 받지 않는 외해에 위치한 이어도 해양과학기지는 인공위성 유의파고 관측자료 검보정을 위한 실측 자료를 제공하는 기지로서도 활용 가치가 지대하다. 그러나 이어도 해양과학기지에서 관측된 유의파고 자료를 활용한 위성 자료 비교 연구는 Envisat 고도계 유의파고 자료를 비교 분석한 Kim (2012)의 연구가 유일하며 이후 여러 위성이 발사되었음에도 불구하고 인공위성 유의파고 자료 검보정 연구는 이루어지지 않았다.

따라서 본 연구는 이어도 해양과학기지에서 유의파고 관측이 시작된 2004년 12월부터 2016년 5월까지 운용된 모든 인공 위성 유의파고 자료를 활용하여 1) 약 12년간의 이어도 관측 파고와 모든 종류의 위성 고도계 관측 유의파고의 일치점 자료를 생성하고, 2) 일치점 자료를 토대로 이어도 해양과학기지와 인공위성 관측 유의파고를 비교 분석하여, 3) 이어도 유의파고와 위성 유의파고의 차이에 대한 특성을 이해하고자 하며, 4) 이어도 유의파고 자료의 질 향상을 위한 제언을 하는 데 목적이 있다.

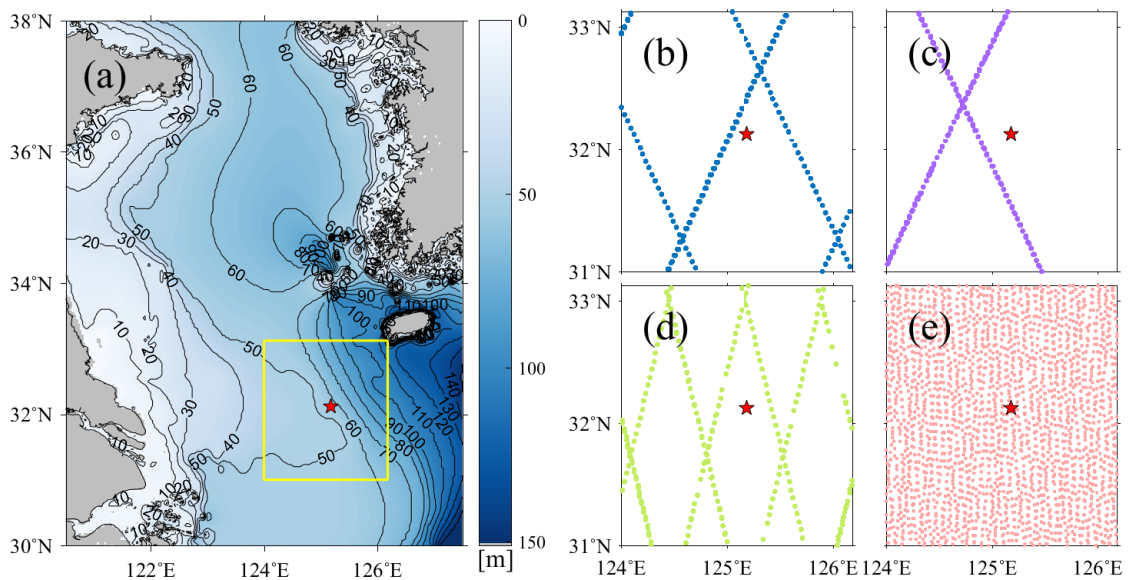


Fig. 1. (a) Bathymetry (m) and tracks of satellite altimeters of (b) GFO, (c) Jason-1 and Jason-2, (d) Envisat and SARAL, and (e) Cryosat-2 in the study area (a yellow box) around leodo Ocean Research Station (IORS). The red star denotes the location of the IORS.

2. 자료 및 방법

2.1 이어도 해양과학기지 유의파고 자료

위성 유의파고와 비교하기 위한 해양 관측 자료로 2004년 12월부터 2016년 5월까지 이어도 해양과학기지 유의파고 자료를 활용하였다(Fig. 2). 관측된 유의파고는 여러 가지 대기과 해양환경의 및 기계적인 요인으로 인하여 비정상적인 파고값이 포함될 수 있다. 이러한 자료는 여러 단계의 품질 관리(quality control)를 거쳐서 제거되어야 한다. 국립해양조사원에서는 Intergovernmental Oceanographic Commission (1990, 1993)과 National Data Buoy Center (2003)에서 제시한 기법을 참

고하여 해양 관측 자료의 품질 관리 프로그램을 개발하였으며, 품질 관리된 자료를 배포하거나 원시 관측 자료를 품질 관리 정보와 함께 제공하고 있다. 우선 1차 품질 관리는 Fig. 3과 같이 8단계의 검사를 수행하도록 구성된다. 첫 번째는 오류값 검사로 관측값이 -9999 또는 공백값(null value)이면 제거된다. 두 번째는 전 지구적 한계 검사로 해양에서 관측될 수 없는 값 또는 장비의 관측 한계 이상의 값이 관측되었을 경우 제거된다. 세 번째는 고정값 검사로서 2시간 동안 동일한 값이 관측될 경우 관측 오류로 간주되어 제거된다. 네 번째는 내적일치 검사로 유의파고와 관련된 변수인 파주기와 서로 비교하여 자료의 품질을 평가한다. 다섯 번째는 뿔값 검사로 연속적으로 관측된 유의파고 자료를 비교하였을 때 1분 동안 3 m 이상 변동하였을 경우 자료의 변화율이 비정상적으로 큰 자료로 간주되어 관측 자료에서 제거된다. 여섯 번째는 지역적 한계 검사로서 관

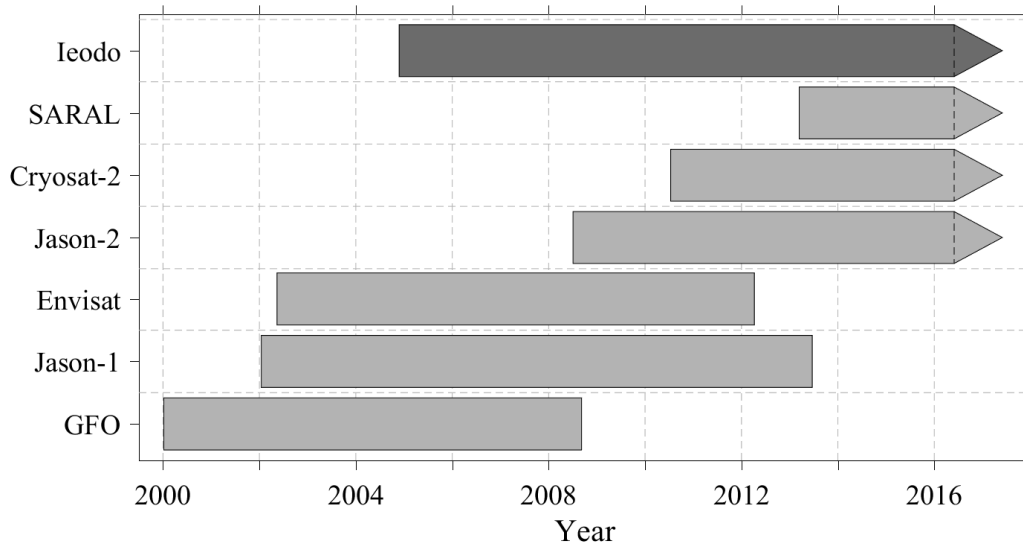


Fig. 2. Temporal coverage of significant wave height data from satellite altimeters (gray) and from Ieodo Ocean Research Station(dark gray).

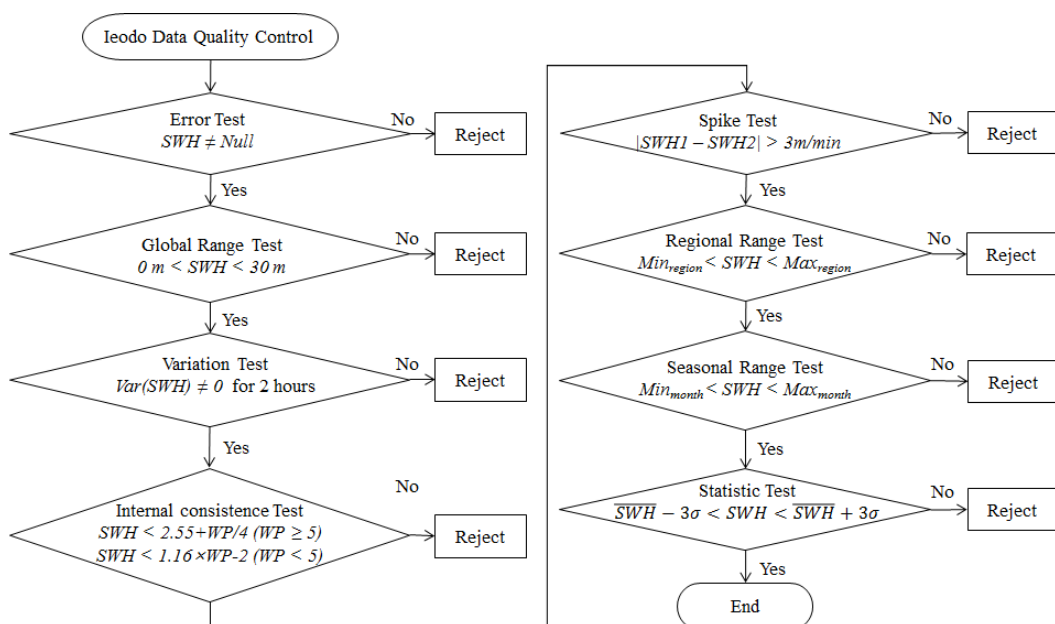


Fig. 3. Flowchart of quality control procedure of significant wave height measurements from Ieodo Ocean Research Station.

측값이 이어도 해양과학기지에서 관측된 과거 자료를 기반으로 최솟값과 최댓값 범위 밖일 경우 제거된다. 계절적 한계 검사는 과거 동일 월의 자료를 기반으로 최솟값과 최댓값 범위 밖일 경우 제거된다. 마지막 단계인 통계검사는 월평균과 월별 표준편차를 활용하여 검사를 수행한다. 2차 품질 관리 단계에서는 과거 이어도에서 관측된 자료, 인접 관측소 자료, 외부 자료를 활용하여 최대파고, 풍속, 기압과 같은 타 변수와의 상관관계 등과 같은 통계 분석을 토대로 품질 검사를 수행한다. 본 연구에서는 1, 2차 품질 검사를 모두 통과한 자료를 활용하였으며 Fig. 4에 2009년 10월 자료를 활용하여 품질 관리 전후의 유의파고 값을 도시하였다. 품질 관리 결과 비정상적으로 높은값과 공백값이 제거되었다.

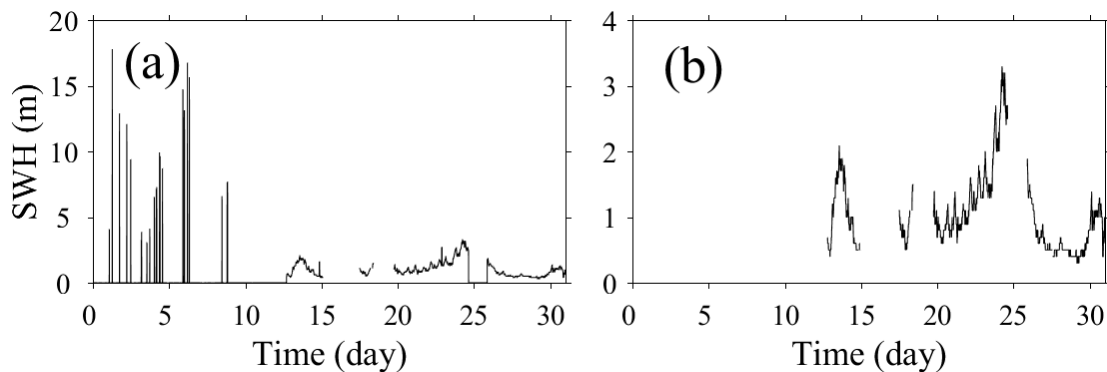


Fig. 4. Time series of significant wave height measurements from leodo Ocean Research Station (a) before and (b) after a quality control procedure in October 2009.

2.2 인공위성 고도계 유의파고 자료

이어도 해양과학기지서 유의파고를 관측하기 시작한 2004년 12월부터 2016년 5월까지 6개의 인공위성 [GFO (Geosat Follow-On), Jason-1 (Joint altimetry satellite oceanography network-1), Envisat (Environmental satellite), Jason-2, Cryosat-2, and SARAL (Satellite for ARGos and ALtiKa)] 고도계 자료를 사용하였으며 IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer)로부터 자료를 수집하였다. Fig. 2는 연구에 활용된 인공위성 각각의 운영 기간을 나타낸다. GFO와 Jason-1, Envisat은 2004년 이전부터 유의파고를 관측하였다. 이후 2008년 6월에 Jason-2가 발사되었으며 2010년과 2013년에 Cryosat-2와 SARAL가 발사되어 현재까지 유의파고를 관측하고 있어 2008년, 2012년, 2013년에 GFO, Envisat, Jason-1의 운용이 종료되었음에도 인공위성을 활용한 유의파고 관측은 지속적으로 수행되었다.

본 연구에서 활용된 모든 위성은 극궤도 위성이며 그 중 일부는 태양 동기 궤도 위성이다. 관측 주기는 위성마다 다양하다. Envisat과 SARAL는 35일이며, Jason-1/2는 약 10일, GFO는 17일이다. Cryosat-2의 경우 369일의 긴 관측 주기를 가진다. SARAL 이전까지 모든 위성은 Ku 밴드 (13.5 - 13.8 GHz)만으로 유의파고를 관측하거나 C 밴드 (5.3 GHz) 혹은 S 밴드 (3.2 GHz)를 활용하여 유의파고를 관측하였다. 그러나 2013년에 발사된 SARAL는 이와 달리 Ka 밴드 (35.7 GHz)를 이용하여 유의파고를 관측하고 있다. 본 연구에서는 SARAL를 제외하고는 모두 Ku 밴드를 활용하여 관측한 유의파고 자료를 활용하였다. 위성 고도계 유의파고 관측 자료는 위성 운용 기관에서 배포되는 원시 자료에 함께 포함된 품질 관리 정보(quality flag)를 활용하여 오류값이 제거되었으며 일부 자료에 대해서는 유의파고의 표준편차 비를 통한 추가적인 품질관리가 수행되었다(Queffeuilou and Croizé-Fillon, 2016).

2.3 일치점 데이터베이스 생산 과정

IFREMER를 통해 수집한 위성 고도계 유의파고 자료와 이어도 해양과학기지 유의파고 자료를 비교 분석하기 위하여 기존의 연구와 동일하게 공간적으로 50 km 이내, 시간적으로 30분 이내의 한계치를 두어(Gower, 1996; Queffeuilou, 2004; Zieger et al., 2009) 일치점 자료 데이터베이스를 생산하였다. 본 연구에서는 10분 간격의 이어도 해양과학기지 유의파고 자료를 활용함에 따라 일치점 생성 시간 기준을 5분으로 재설정하였다. 일치점 자료에는 관측 시간, 위도, 경도 등의 위치 정보, 유의파고 뿐만 아니라 위성파고 이어도 유의파고의 특성차를 분석하기 위하여 이어도 해양과학기지에서 관측되는 파향, 풍속, 기온, 수온, 습도 등도 함께 기록하였다. 고도계의 공간해상도는 관측 궤도를 따라 약 7 km이므로 특정 시간의 일치점 자료 생성 시 이어도 해양과학기지 한 지점에 대해 여러 지점의 고도계 자료가 수집된다. 안정적인 일치점 자료 생성을 위하여 기지 주변 50 km 이내의 고도계 유의파고 자료를 공간적으로 평균한 자료 또한 일치점 데이터베이스에 포함하였다.

2.4 통계 분석

위성 고도계 유의파고와 이어도 해양과학기지 유의파고를 정량적으로 비교하기 위하여 아래와 같이 평균 제곱근 오차(RMSE), 편차(Bias), 산란지수(Scatter Index; *SI*), 상관계수(*R*)를 계산하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}$$

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)$$

$$SI = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}}{\bar{y}}$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

여기서 x_i 는 위성 고도계 유의파고(m), y_i 는 이어도 해양과학기지 유의파고(m)이다. \bar{x} 와 \bar{y} 는 각각 위성 고도계와 이어도 해양과학기지 유의파고의 평균값(m)이다. N 은 일치점 자료 수이다. 산란지수(*SI*)는 실측 자료의 평균에 대한 평균제곱근 오차로 정의하며(Janssen et al., 1984; Clancy et al., 1986) 값이 작을수록 자료가 서로 일치함을 의미한다.

3. 결 과

3.1 이어도 해양과학기지와 위성 자료간의 일치점 생성

2004년 12월부터 2016년 5월까지 인공위성 고도계와 이어도 해양과학기지 유의파고 관측 자료를 비교한 결과 9501개의 일치점 자료가 생성되었다. 동일한 이어도 해양과학기지 유의파고 자료에 대해 선별된 인공위성 유의파고 자료를 공간 평균한 경우에는 908개의 일치점 자료를 얻었다. Table 1에 월별 인공위성 고도계와 이어도 해양과학기지 유의파고 일치점 자료들의 수를 연도별로 나타내었다. 일치점 자료의 개수는 계절별 특성보다 연도별 특성이 뚜렷하게 나타났다. 편의를 위하여 이후 서술된 일치점 자료 수는 공간 평균된 일치점 개수를 나타내며 괄호 안의 수는 공간 평균되지 않은 원시 자료의 일치점 개수를 나타낸다. 일치점 자료 개수는 1월에 92 (996)개로 최대치를 보이고 6월에 51 (541)개로 최소를 나타내었다. 반면 일치점 자료 개수가 최대인 연도는 2015년으로 108 (1176)개이고 최소인 연도는 2007년으로 31 (328)개의 일치점 자료가 생성되어 큰 차이를 나타내었다.

Table 1. Year-month distributions of the number of collocated data between satellite altimeter significant wave height data (spatially averaged) and leodo Ocean Research Station measurements from December 2004 to May 2016. Bold texts denote the number of original matchup data.

	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	Total
2004	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	9
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	87	87
2005	9	5	7	6	7	9	10	10	11	10	8	11	103
	94	49	72	61	60	99	108	97	123	104	102	119	1088
2006	10	10	8	10	9	12	11	6	6	8	6	9	105
	114	112	83	116	100	111	106	64	60	79	65	115	1125
2007	9	0	0	0	0	0	0	0	0	8	6	8	31
	82	0	0	0	0	0	0	0	0	103	72	71	328
2008	7	7	6	9	0	0	13	11	12	6	10	12	93
	76	75	58	83	0	0	143	121	94	63	111	76	900
2009	7	4	6	2	3	3	4	4	5	2	5	7	52
	76	49	65	25	21	21	46	33	68	20	43	70	537
2010	7	5	4	4	3	5	13	12	7	7	8	8	83
	79	55	47	46	37	49	122	94	67	84	69	99	848
2011	5	6	1	10	8	0	6	5	0	6	6	8	61
	57	61	8	81	66	0	63	32	0	49	60	98	575
2012	8	9	9	6	5	0	12	4	8	10	8	4	83
	97	104	95	54	54	0	113	53	65	127	96	58	916
2013	10	2	0	0	8	10	6	10	4	4	5	1	60
	123	25	0	0	80	127	53	87	37	38	56	14	640
2014	5	6	4	5	10	6	9	8	7	10	6	9	85
	55	53	58	35	110	69	91	83	80	103	73	109	919
2015	9	10	8	9	12	6	9	10	11	9	9	6	108
	103	94	103	101	109	65	96	108	111	101	109	76	1176
2016	6	2	6	11	10	0	0	0	0	0	0	0	35
	40	22	78	106	116	0	0	0	0	0	0	0	362
Total	92	66	59	72	75	51	93	80	71	80	77	92	908
	996	699	667	708	753	541	941	772	705	871	856	992	9501

이어도 해양과학기지 관측 유의파고의 자료 수와 관측 위성의 개수, 위성의 궤도 특성차에 따라 시기별로 일치점 개수의 분포가 상이하였다. 본문에 제시하지 않았으나 일치점 자료의 수는 주로 이어도 유의파고의 자료 수와 높은 상관성을 보였다. 2005년 6월부터 2006년 7월, 2014년 12월부터 2015년 11월은 평균 약 10 (100)여 개의 일치점 개수가 생성되었다. 다른 시기보다 일치점 수가 많은 것은 이 시기에 이어도 유의파고 관측 자료 수가 다른 시기에 비해 많았기 때문이다. 또한 2007년 이 다른 연도에 비해 일치점 자료가 현저하게 낮은 것은 2월부터 9월까지 이어도 해양과학기지의 유의파고 자료가 품질관리 과정에서 대부분 제거되었기 때문이다. 반면 2008년 6월 Jason-2의 발사로 Jason-1의 궤도가 이동됨에 따라 이어도 주변에서 관측이 이루어지지 않아 2009년 2월부터 2010년 6월까지 적은 수의 일치점 자료가 생성되었다.

3.2 이어도 관측 파고와 위성 파고 비교

Fig. 5는 이어도 해양과학기지 관측 유의파고와 인공위성 고도계 관측 유의파고를 위성별로 비교한 그림이다. 이어도 주변 50 km 이내에서 생성된 원시 일치점 자료는 회색 점으로 도시하였으며 특정 이어도 해양과학기지 관측 자료에 대해 생성된 여러 개의 고도계 관측 자료를 공간 평균한 값은 검정색 점으로 나타내었다. 위성별 일치점 수는 Jason-2가 258 (2786)개로 가장 많았으며 GFO가 88 (1053)개로 가장 적었다(Table 2). 각 위성별 이어도 해양과학기지 유의파고와 위성 유의파고 사이의 평균 제공근 오차, 편차, 산란지수, 상관 계수를 Table 2에 나타내었다. 평균 제공근 오차는 0.28 - 0.41 m이었으며 모든 위성에서 0.14 m 이상의 양의 편차가 나타났다. 한반도 주변해역뿐만 아니라 전 지구 부이 자료를 활용한 위성 유의파고 정확도 평가에서도 위성에 따라 혹은 실측 자료로 활용된 부이의 위치에 따라 0.1 m 이상의 편차를 보이기는 하였으나 모든 위성에서 양의 편차가 나타나지는 않았다(Queffeuilou, 2004; Park *et al.*, 2013). 또한 SARAL 유의파고는 실측 자료 또는 다

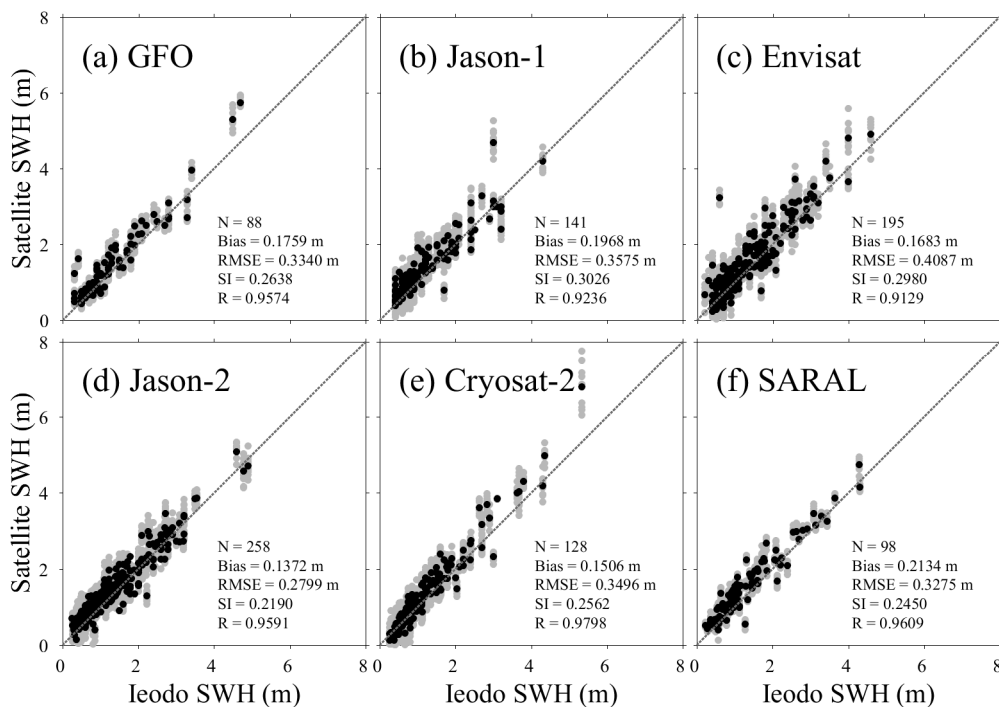


Fig. 5. Comparison of satellite significant wave heights (SWHs) from Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER) with leodo Ocean Research Station ((a) GFO, (b) Jason-1, (c) Envisat, (d) Jason-2, (e) Cryosat-2, and (f) SARAL). Number of matchups (N), bias, root mean square error (RMSE), scatter index (SI), and correlation coefficient (R) are given in each plot. Gray and black dots represent original and spatially averaged SWH data, respectively.

른 보정된 인공위성 고도계 자료와 정확도 평가가 이루어진 결과 비교적 정확하게 일치함에 따라 다른 고도계 유의파고와 달리 실측 자료를 활용한 추가적인 보정 과정을 거치지 않은 이전의 연구결과(Sepulveda *et al.*, 2015; Queffeuilou and Croizé-Fillon, 2016)에도 부합하지 않는 편차 특성을 나타내었다.

Table 2. Statistical parameters (RMSE, bias, scatter index (SI), correlation coefficient (R)) of significant wave height between satellite altimeters (GFO, Jason-1, Envisat, Jason-2, Cryosat-2, and SARAL) and Ieodo Ocean Research Station data

Satellite	Period	Minimum Distance (km)	Number of matchups (averaged) (original)	RMSE (m)	Bias (m)	SI	R
GFO	11 Dec 2004 - 29 Aug 2008	11.68	88	0.3340	0.1759	0.2638	0.9574
			1053	0.3528	0.1715	0.2742	0.9474
Jason-1	16 Dec 2004 - 03 Jun 2013	26.38	141	0.3575	0.1968	0.3026	0.9236
			1569	0.4004	0.2077	0.3346	0.8998
Envisat	14 Dec 2004 - 21 Mar 2012	19.40	195	0.4087	0.1683	0.2980	0.9129
			1702	0.4339	0.1797	0.3034	0.9119
Jason-2	07 Jul 2008 - 31 May 2016	26.61	258	0.2799	0.1372	0.2190	0.9591
			2786	0.3202	0.1455	0.2353	0.9485
Cryosat-2	21 Jul 2010 - 17 May 2016	1.06	128	0.3496	0.1506	0.2562	0.9798
			1487	0.4093	0.1499	0.2980	0.9701
SARAL	23 May 2013 - 31 May 2016	13.54	98	0.3275	0.2134	0.2450	0.9609
			904	0.3491	0.2221	0.2598	0.9553

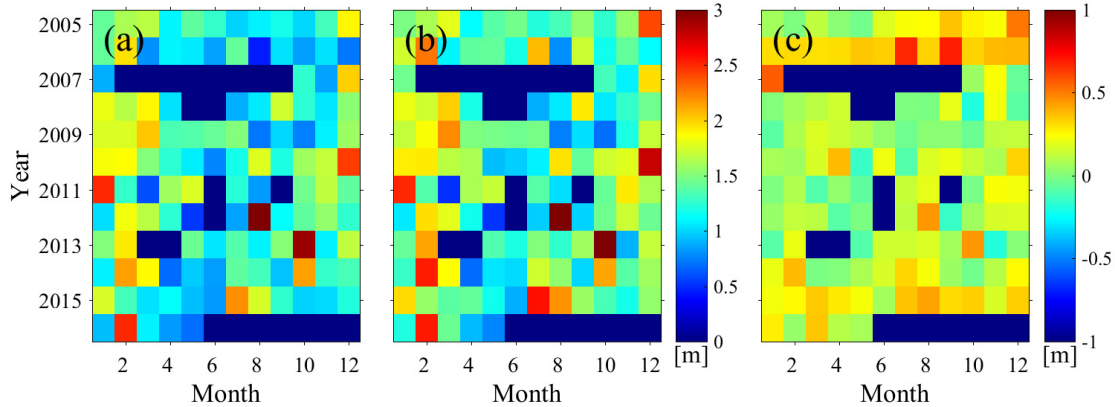


Fig. 6. Year-month plot of monthly mean of collocated significant wave height (SWH) data from (a) Ieodo Ocean Research Station (IORS) and (b) satellite altimeters and (c) SWH difference between satellite altimeters and IORS (satellite SWH - IORS SWH).

이어도 해양과학기지 관측 유의파고와 위성 유의파고 자료의 시간에 따른 변동 특성과 위성과 이어도 유의파고 차의 시간 변동을 파악하기 위하여 일치점 자료를 월별 평균하여 Fig. 6에 나타내었다. 유의파고의 시간 변동 특성은 무작위적인 특성이 나타났으나 전반적으로 겨울철에 높고 여름철에 낮은 경향을 보였다. 태풍 볼라벤과 덴빈(2012년 8월), 다나스(2013년 10월)가 이어도 주변을 통과하면서 높은 유의파고가 관측되어 다른 시기보다 높은 유의파고 특성을 보였다(Fig. 6(a) and

(b). 이어도와 위성 관측 유의파고의 시간 변동성이 유사한 특성을 나타내는 것으로 보이거나 전반적인 기간에 걸쳐 위성 유의파고가 이어도 유의파고에 비해 높게 관측되었다(Fig. 6(c)). 위성 유의파고의 양의 편차 특성은 2006년과 2015년에 뚜렷하게 나타났다. 이러한 양의 편차 특성이 이어도 주변 해역에서의 위성 관측 유의파고의 오차에 기인한 것인지 이어도 관측 유의파고의 오차에 기인한 것인지에 대한 고찰이 필요하다.

3.3 동해 위성 파고 검증

이어도 해양과학기지 관측 유의파고에 대한 위성 유의파고의 양의 편차 특성의 요인을 파악하기 위하여 동해에 위치한 기상청 동해 해양기상부이 관측 파고를 활용하여 위성 파고를 검증하였다. 동해 해양과학기상부이는 비교적 외해에 위치하여 (37°28'50"N, 129°57'00"E) 일지점 자료로 선별된 위성 유의파고 자료가 육지의 영향을 받지 않으므로 이어도 해양과학기지의 지리적 관측 특성과 유사하다고 판단하였다. 동해 해양기상부이의 유의파고 시계열 자료를 확인한 결과 2010년 10월을 기준으로 관측 자료의 특성차가 나타나 이후 자료인 2013년부터 2016년 5월까지의 자료를 활용하였다.

모든 위성 유의파고 자료와 이어도 해양과학기지 파고 자료를 비교한 결과 위성 유의파고는 이어도 파고에 대해 0.34 m의 평균 제공근 오차와 0.17 m의 편차 특성을 나타내었다(Fig. 7(a)). 반면 Fig. 7(b)와 같이 동해 해양기상부이에 대한 위성 유의

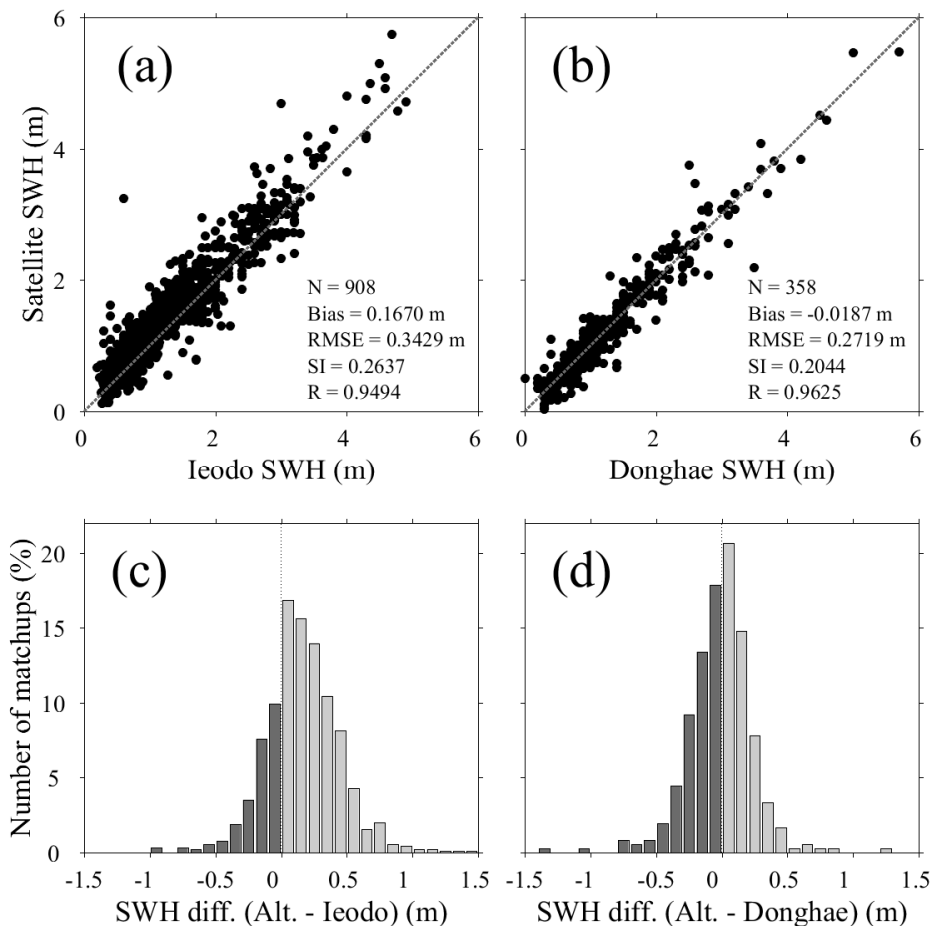


Fig. 7. Comparison of satellite significant wave heights (SWHs) from satellite altimeters with (a) leodo Ocean Research Station and (b) Donghae marine meteorological buoy station of KMA and histogram of SWH differences between (c) satellite and IORS and (d) satellite and Donghae buoy station.

파고는 평균 제공근 오차가 0.27 m이고 편차가 -0.02 m로 편차 특성이 거의 나타나지 않았다. 동해 해양기상부이와의 일치점 자료 분석 결과는 인공위성 고도계 유의파고가 0.2 - 0.4 m의 평균 제공근 오차를 보여 편차 특성이 나타나지 않는 기존의 연구결과와 일치하였다(Durrant *et al.*, 2009; Abdalla *et al.*, 2010). 이어도 해양과학기지와 동해 해양기상부이 자료를 활용하여 생성된 일치점 자료에서 인공위성 유의파고의 편차의 특성 비교를 위하여 유의파고 차(위성 - 이어도)를 0.1 m 간격의 히스토그램으로 나타내었다(Fig. 7(c) and (d)). 동해는 위성 유의파고가 부이 파고에 비해 작게 관측된 경우가 크게 관측된 경우가 비슷한 반면 이어도에서는 74.89% 이상의 일치점에서 위성 유의파고가 이어도 해양과학기지 파고에 비해 높게 나타났다. 위성 고도계 유의파고가 동해 해양기상부이 유의파고에 대해서는 일치하고 이어도 해양과학기지 유의파고에 대해서는 양의 편차가 나타나는 것은 이어도 해양과학기지 자료에 오차가 포함되어 있으며, 위성 자료가 이어도 해양과학기지 자료보다 높은 정확도의 자료임을 시사한다.

3.4 이어도 - 위성 파고 오차 특성

3.4.1 파고에 대한 특성

위성과 이어도 유의파고 자료 특성이 다른 요인을 분석하기 위해 파고에 대한 이어도와 위성 파고의 차를 Fig. 8에 도시하였다. 위성 관측 자료와 해양 관측 자료 비교 연구에서 오차는 대부분 위성 관측치에 대한 실측치의 차로 정의하므로 본 연구에서도 기존 연구의 정의를 기반으로 하였다. 일치점 자료 수가 많은 2 m 내에서는 Cryosat-2를 제외한 모든 위성에서 위성 유의파고가 이어도 파고에 비해 평균 0.18 m 높게 관측되었다. 2 m 이상의 파고에서는 위성별로 상이한 오차 특성을 보였다. GFO와 Envisat은 여전히 양의 편차를 보였으나 Jason-1/2와 SARAL 유의파고는 편차의 평균이 약 0.07 m로 이어도 유의파고와 일치하는 특성이 나타났다. 이러한 결과는 위성 고도계 유의파고가 실측 자료에 비하여 낮은 유의파고에서는 과대추정되고 높은 유의파고에서는 과소추정되는 특성이 나타나는 기존의 연구결과와 부합하지 않는다(Queffeuilou, 2004; Park *et al.*, 2013).

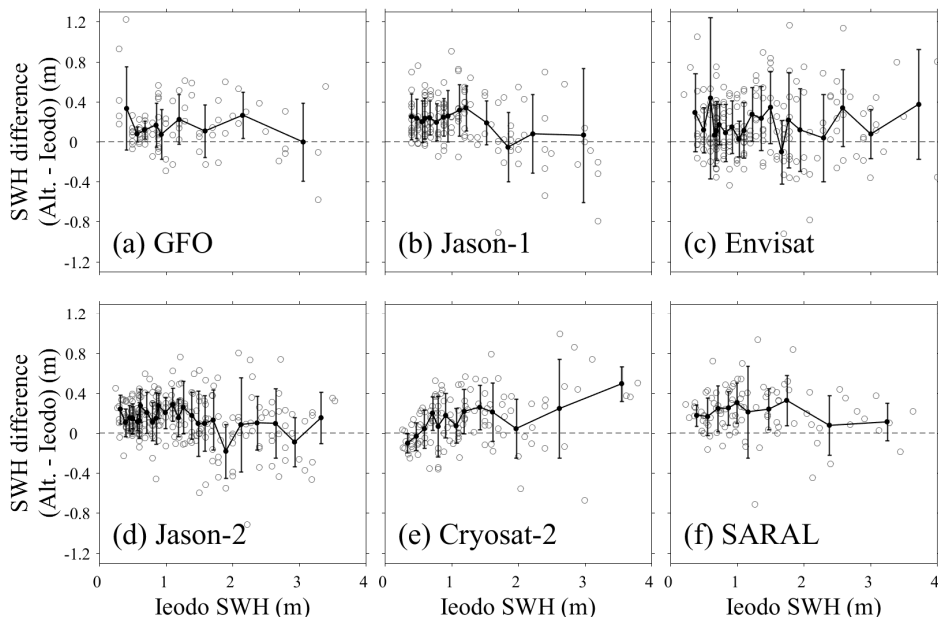


Fig. 8. Significant wave heights (SWHs) differences (satellite - leodo Ocean Research Station (IORS)) as function of SWH measurement from IORS ((a) GFO, (b) Jason-1, (c) Envisat, (d) Jason-2, (e) Cryosat-2, and (f) SARAL). Black dots and bars represent the mean and standard deviation of SWH differences for each interval.

Cyrosat-2의 경우 이어도 해양과학기지 관측 유의파고가 1 m 이하일 때 0.05 m의 편차를 나타내었으나 1.0 - 2.5 m에서는 0.16 m로 다른 위성들과 유사하였다. 전반적인 이어도 해양과학기지과 위성 고도계의 유의파고 편차를 고려한다면 Cryosat-2 관측 유의파고는 1 m 이하의 낮은 상태에서는 음의 편차가 나타나며 1 m 이상에서는 편차가 뚜렷하게 나타나지 않음을 유추할 수 있다. 이는 Queffeuilou (2013)이 제시한 전구 부이 자료를 활용하여 보정된 위성(Jason-1/2, Envisat) 유의파고에 대한 Cryosat-2 유의파고의 오차 특성과 유사한 결과이다. 이러한 결과는 인공위성 관측 유의파고뿐만 아니라 이어도 해양과학기지 자료에도 관측 오차가 포함되어 있음을 시사한다.

3.4.2 바람에 대한 특성

바람은 파랑에 영향을 미치는 주요한 요인이므로 이어도 해양과학기지 풍속에 대한 위성과 이어도 유의파고 차의 오차특성을 분석하였다(Fig. 9). 위성별 오차는 유의파고에 대한 오차와 유사한 형태를 보였다. GFO, Envisat, Jason-1/2는 일부 구간을 제외하고 풍속에 상관없이 양의 편차를 보였다. 다른 특징을 보인 위성은 Cyrosat-2와 SARAL로 Cryosat-2 유의파고의 경우 6 ms^{-1} 이하의 풍속에서는 위성과 이어도 유의파고가 일치하였으나($\text{bias} = 0.02 \text{ m}$), 6 ms^{-1} 이상에서는 풍속이 1 ms^{-1} 강해질수록 유의파고의 오차가 평균 0.03 m 증가하는 경향이 나타났다. SARAL는 12 ms^{-1} 이하의 풍속에서는 바람이 강해질수록 오차가 증가하였으나 풍속이 12 ms^{-1} 이상인 경우에서 다시 감소하였다. SARAL는 다른 위성에 비해 높은 정확도로 유의파고를 관측하나(Sepulveda *et al.*, 2015), 35 GHz (Ka 밴드)의 높은 주파수를 사용함에 따라 풍속의 영향을 받을 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 이후 정확한 실측 유의파고 자료를 활용하여 풍속에 따른 SARAL 유의파고 오차에 대한 추가 분석이 필요하다.

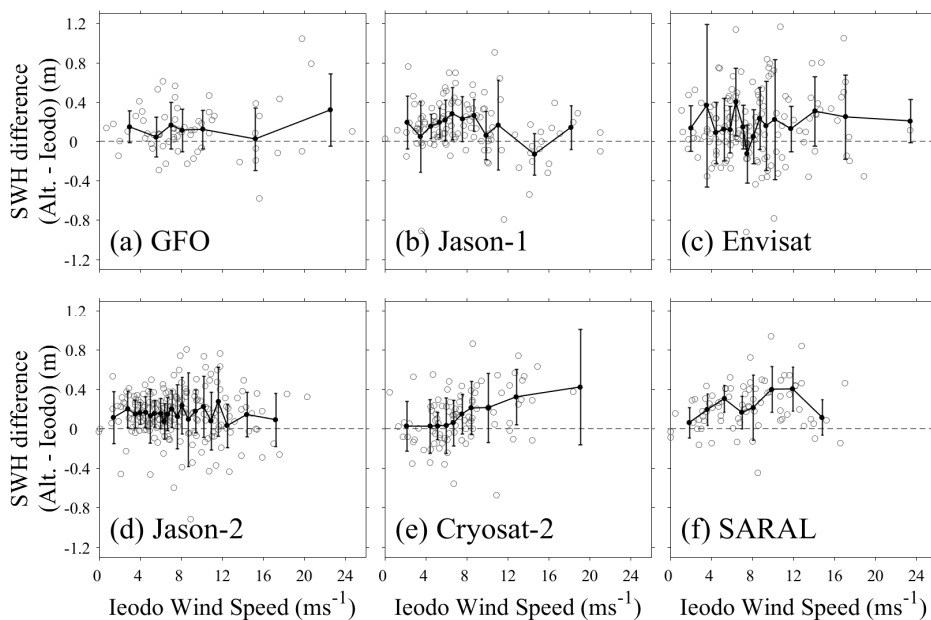


Fig. 9. Significant wave heights (SWHs) differences (satellite - Ieodo Ocean Research Station (IORS)) as function of wind speed measurement from IORS ((a) GFO, (b) Jason-1, (c) Envisat, (d) Jason-2, (e) Cryosat-2, and (f) SARAL). Black dots and bars represent the mean and standard deviation of SWH differences for each interval.

3.4.3. 위성별 오차의 시간 변화

위성별 오차의 시간 변동을 파악하기 위하여 연구 기간인 2004년 12월부터 2016년 5월까지 위성과 이어도 해양과학기지 유의파고의 차를 Fig. 10에 도시하였다. 오차의 시간변동 특성은 크게 세 가지 기간으로 나눌 수 있다. 2005년부터 2009년에 관측을 수행한 GFO와 Jason-1, Envisat의 오차는 위성별 분산 정도는 다르지만 2005년부터 증가하기 시작하여 2006년 중순에 최대가 된 후 2009년까지 감소하는 경향이 공통적으로 나타나는 것을 볼 수 있었다. 2009년부터 2013년도에는 Envisat, Jason-2, Cryosat-2가 관측을 수행하였으며 비교적 이어도 해양과학기지 유의파고와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 2009년부터 2013년도까지 Jason-1은 Jason-2가 발사됨에 따라 관측 궤도를 이동하여 일치점 자료가 생성되지 않았다. 2013년 이후로는 Jason-2, Cryosat-2, SARAL 관측 유의파고에 대하여 일치점이 생성되었으며 편차가 점차 증가하는 경향을 나타내었다. 위성별로 분석을 하였음에도 불구하고 시간에 대하여 동일한 오차 특성을 보인 것은 오차의 시간 변화가 위성 관측 오차에 기인하였다기보다는 이어도 해양과학기지 센서의 관측 오차에서 기인하였음을 암시한다.

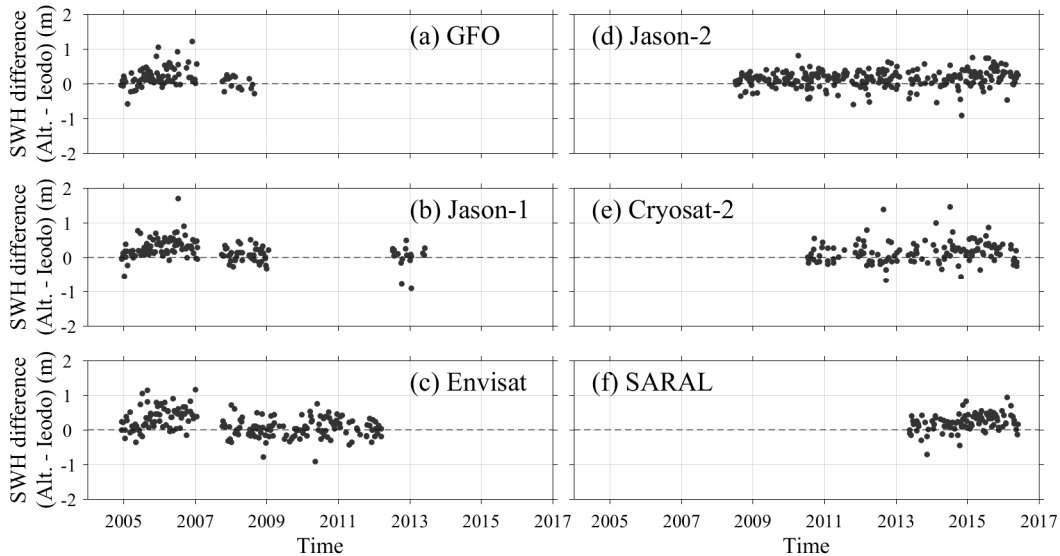


Fig. 10. Time series of significant wave heights (SWHs) differences (satellite - leodo Ocean Research Station) ((a) GFO, (b) Jason-1, (c) Envisat, (d) Jason-2, (e) Cryosat-2, and (f) SARAL).

3.4.4. 거리에 대한 오차의 특성

이어도 해양과학기지와 위성 유의파고의 일치점 자료 생성 시 공간 기준을 50 km 이내로 설정함에 따라 50 km 이내의 다양한 거리에서 일치점 자료가 생성되었다. 일치점 거리에 따른 오차 특성을 파악하기 위하여 동일한 이어도 자료에 대해 선별된 위성 자료이더라도 공간 평균하지 않고 Fig. 11(a)에 도시하였다. 이어도 해양과학기지와 위성 사이의 최소 거리는 각 위성별 궤도 특성에 따라 다르다(Table 2). 위성 궤도가 서로 상이함에 따라 거리가 멀어질수록 일치점 수가 증가하였다.

구간별 이어도 파고에 대한 위성 파고 차의 평균은 거리에 대해서도 전반적으로 유사한 양의 편차를 보였다. 표준편차 또한 일정하게 유지되었지만 일치점 생성 거리가 커질수록 오차의 최댓값과 최솟값의 차이가 증가하는 특성을 볼 수 있었다. 5 km의 구간별로 이어도와 위성 유의파고 차의 최댓값과 최솟값을 Fig. 11(b)에 도시한 결과 거리에 따라서 최댓값과 최솟값의 차가 선형적으로 증가하는 경향이 뚜렷하게 나타났다.

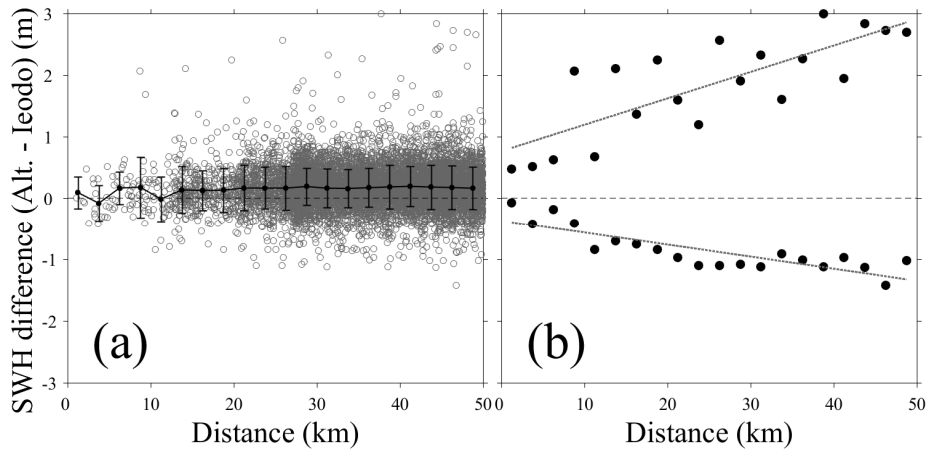


Fig. 11. (a) Significant wave heights (SWHs) differences (satellite - Ieodo Ocean Research Station (IORS)) and (b) maximum and minimum of SWH differences as function of distance between IORS and satellites, where dashed lines represent a linear least square fit.

3.4.5 파향에 따른 특성

이어도 해양과학기지는 수심이 4.6 m인 이어도 정상부에서 남쪽으로 약 700 m 떨어진 수심 41 m인 위치에 건설되었으며 파랑 관측 센서는 남동쪽에 설치되어 있기 때문에 파고 관측 시 해저 지형과 구조물의 영향을 받을 수 있다(Kim, 2012). 해저 지형의 영향을 받는다면 이어도 해양과학기지 북쪽에서 정상부를 통과하여 남쪽으로 향하는 파랑이 수심 변화에 의한 영향으로 오차가 커질 것이며, 구조물의 영향을 받는다면 구조물을 통과하여 관측되는 남동쪽으로 향하는 파랑의 오차가 커질 것이다. Fig. 12(a)에 이어도 관측 파향에 대한 유의파고 차를 도시하였으며, 파향의 구간별 평균 제공근 오차를 Fig. 12(b)에 나타내었다. 남동쪽(315°)에서 평균 제공근 오차의 값이 모든 방향에 대한 평균(0.27 m)에 비해 23.49% 크게 나타났으나 서쪽(180°)에서 또한 평균에 비해 19.91% 크게 나타나 지형 또는 구조물에 의한 유의미한 오차 특성을 보이지 않았다.

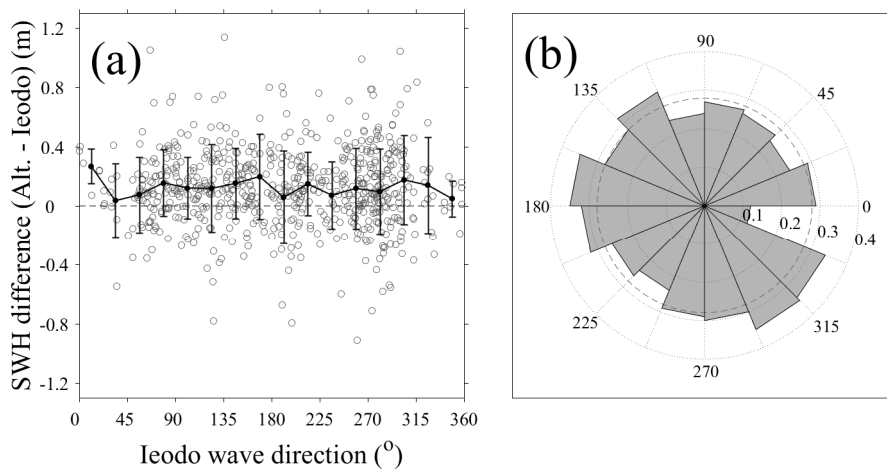




Fig. 12. (a) Significant wave heights (SWHs) differences (satellite - Ieodo Ocean Research Station (IORS)) as function of wave direction from IORS, where black dots and bars represent the mean and standard deviation of SWH differences for each interval. (b) Root mean square error (RMSE) of SWH between satellite altimeters and IOSC according to each wave direction range, where dashed circle denotes the RMSE in the all direction.

4. 토 의

4.1 유의파고 관측 방법의 차이

이어도 해양과학기지에 파랑을 관측하기 위해 설치된 센서는 위성 고도계 유의파고의 정확도 평가 및 보정을 위해 실측자료로 주로 활용되는 부이 파고 센서 특성과 관측 방법 면에서 상이하다(Table 3). 이어도 해양과학기지의 파랑 관측 센서는 플랫폼 기반의 원격 탐사 시스템인 MIROS사의 SM-001 wave radar로 C-band (5.8 GHz) 영역의 마이크로파를 해수면을 향하여 송출한 후 해수면에서 반사되어 수신된 신호의 도플러 효과를 활용하여 파고, 파향, 파주기를 산출한다. 플랫폼 기반의 원격 탐사 시스템은 운영의 용이성과 유지 보수 비용의 감소로 인하여 연안뿐만 아니라 외해의 파랑 관측에 있어서 유용하다 (Magnusson and Grønlie, 2005). 이어도 해양과학기지 파고 센서는 Table 3에 제시한 바와 같이 해수면으로부터 약 35 m 높이에 설치되어 레이더 방식을 이용하여 파고를 측정하기 때문에 해수면과 센서가 위치한 35 m 사이의 다양한 대기과 해상 조건의 영향을 받을 가능성을 내포하고 있다. 마이크로파를 사용하기 때문에 전천후 활용이 가능하나 악기상이나 강한 강수가 있을 경우에는 측정 오차를 유발할 수 있으며, 또한 풍속이 2 m/s 이하인 경우에는 오차가 증폭되는 기기 특성이 있다(MIROS, 2011).

Table 3. Information of platform, sensor and method to measure significant wave height from leodo Ocean Research Station and Donghae marine meteorological buoy station of KMA

Station	IROS	Donghae Buoy
Platform		
Website	http://www.khoa.go.kr/	http://www.kma.go.kr/
Inc. / Sensor	MIROS / SM-001	Datawell / Hippy 40
Sensor Height	about 35 m above the sea surface	near the sea surface
Measurement Principle	- Operational principle is based on the Doppler shift in the backscattered radar signal due to the orbital wave velocity.	- Sensor measures heave, pitch and roll using accelerometer. - Double integration by the internal electronics yields the heave signal.

이에 반해 동해 해양기상부이에는 가속도 센서(Hippy-40)가 부이 내부에 설치되어 부이의 선체가 해상 상태에 따라 움직이는 연직 가속도를 측정하여 파고를 산출한다. Hippy-40 센서는 전 세계 많은 부이에 부착되어 파랑 관측을 위해 사용되고 있으며 다른 파랑 관측 장비에 비하여 높은 정확도로 유의파고, 파향, 파주기 등과 같은 파랑 변수를 산출한다. 관측 수심과 악기상 등 환경의 영향을 받지 않고 관측을 수행할 수 있는 장점 또한 있으나 선박에 의한 사고가 빈번하게 발생하고 계류선을 사용

할 때 부식 등에 의해 계류선이 마모되어 기기가 유실된 우려가 많아 유지 관리에 많은 기술이 필요하다(KMA, 2005).

상기한 바와 같이 이어도 해양과학기지 파고 센서와 일반적인 해양기상부이의 파고 센서는 측정원리에서 근본적인 차이가 있고, 또한 측정 위치에서도 상이한 점이 있다. 해수면으로부터 35 m 고도에 설치되어 레이더 방식으로 파고를 관측하는 이어도 해양과학기지 관측기기에 대한 알고리즘 정확도 연구가 국내에서 전무한 상태이므로 기기 관측 오차와 그에 대한 문제점에 대해 우선적으로 연구되어야 한다. 그동안 국외에서 인공위성 유의파고의 정확도는 대부분 해양기상부이 자료를 활용하여 진행되었고 이어도 해양과학기지에 설치된 기기와 같은 레이더 방식의 파고 자료는 직접적인 검보정 과정에 활용되지 않았다. 따라서 이어도 해양과학기지 파고 센서의 관측 원리 및 측정 위치에 따른 관측 오차에 대한 연구들이 순차적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

4.2 이어도 해양과학기지 관측 파고 검보정

이어도 해양과학기지 자료와 위성 유의파고 자료를 비교 분석한 결과 유의파고 자료 사이의 오차는 이어도 해양과학기지 관측 오차에서 기인했을 가능성이 높음을 확인하였다. 이어도 파고 자료를 다양한 활용 연구에 사용하기 위해서는 보정 과정을 거쳐야 할 것으로 판단된다. Fig. 7(b)에 도시한 바와 같이 위성 유의파고의 안정성을 감안하여 이어도 파고 자료를 보정할 필요가 있다. 관측 이상치(outlier)에 의한 보정식 오차를 최소화하기 위하여 로버스트 회귀(robust regression) 분석법을 활용하여 이상치를 우선 제거하였으며(Holland and Welsch, 1977; O'Leary, 1990), 주축 축소 회귀(reduced major axis regression) 분석 방법을 사용하여(Zieger *et al.*, 2009) 식 (2)와 같은 일차 보정식을 유도하였다.

$$SWH_{cor} = 1.0331 SWH_i + 0.1190 \quad (2)$$

여기서 SWH_{cor} 는 보정된 이어도 해양과학기지 유의파고(m)이며 SWH_i 는 이어도 해양과학기지 관측 유의파고(m)이다. 보정식을 적용하여 이어도 해양과학기지 유의파고를 보정한 후 위성 유의파고 자료와 비교한 결과 보정 전과 후 평균 제공근 오차가 각각 0.34 m, 0.30 m로 정확도가 11.76% 향상되었고 0.17 m의 뚜렷한 양의 편차 또한 0.01 m로 감소하였다.

위성 유의파고 자료 검보정 과정에 이어도 유의파고 자료가 활용되기 위해서는 인공위성 자료를 활용하여 관측 오차가 제거된 자료가 아니라 국제적으로 정확도가 인증된 센서에서 관측된 유의파고 자료와 비교하여 정확도가 검증된 자료가 필요하다. 실측치로 대변되는 자료에 오차가 포함되어 있다면 위성 자료의 검보정 과정은 의미를 상실한다. 마이크로파를 활용한 파고 관측은 파고를 직접 관측하는 것이 아님에 따라 엄밀히 말하면 실측 자료가 아니며, 국제적으로 인공위성 파고 자료의 정확도 분석 및 오차 보정에 주로 활용되는 자료도 아니므로 이어도 해양과학기지 관측 유의파고의 국제적 활용 증진을 위해서는 실측치로 공인된 센서를 통하여 관측된 자료와 비교하여 정확도 검증이 우선되어야 한다. 검증을 통하여 문제점이 탐지된다면 일련의 보정과정도 필요할 것이다. Taylor *et al.* (2002)는 Hibernia 기지에서 부이 관측 유의파고와 마이크로파 센서 관측 유의파고를 비교하였으며 마이크로파 센서에서 관측된 자료가 유의파고가 낮을 때 과소추정되는 문제가 있음을 보였다. Magnusson (1987)와 Dobson and Dunlap (1999) 또한 부이 관측 자료를 활용하여 마이크로파 관측 자료의 정확도를 검증한 후 연구에 활용하였다. 이어도 해양과학기지에 부착된 유의파고 관측 센서 또한 정확한 파고 관측이 가능한 부이를 이어도 주변에 설치하여 상호 비교를 바탕으로 한 센서 보정, 파고 산출 알고리즘 수정 및 관측 자료 검보정이 선행되어야만 위성 유의파고 관측 자료의 검보정을 위한 해양 관측 자료를 제공하는 국제적 기지로서의 역할을 수행할 수 있을 것으로 보인다.

5. 결 론

해양 환경에서 파랑은 중요한 변수임에도 불구하고 한반도 주변해역에서 해수면온도, 해상풍, 해색 변수에 비하여 연구가 활발하게 수행되지 않았다. 전 지구적으로 극한의 유의파고가 높아지는 경향을 보이며 이러한 상승 경향은 외해보다 연안에서 뚜렷하다는 연구결과가 발표되었다. 따라서 유의파고의 시공간 변동성 분석을 위한 관측 자료로서 위성 고도계 자료의 필요성이 증가하였다. 유의파고의 장기변동 추세를 연구하기 위해서는 위성 자료의 정확도가 우선 확보되어야 한다. 위성 유의파고 자료 검증에 활용되는 부이는 대부분 연안에 위치하여 외해에서의 오차 특성 반영에 한계가 있다. 반면 이어도 해양과학기지는 외해에 위치하고 있어 위성 유의파고 자료의 검증 자료로서 국제적인 활용 가치가 크다.

본 연구에서는 이어도 해양과학기지 유의파고 관측 자료와 위성 고도계 유의파고 자료(GFO, Jason-1, Envisat, Jason-2, Cryosat-2, SARAL)를 비교분석하였다. 2004년 12월부터 2016년 5월까지 908 (9501)개의 일치점 자료가 생성되었다. 이어도 해양과학기지 유의파고에 대한 위성 유의파고는 0.34 m의 평균 제곱근 오차를 보였으며, 0.17 m의 양의 편차를 나타내었다. 연구 기간 전반에서 위성 유의파고가 이어도 해양과학기지 파고보다 높았으며 이러한 특성은 2006년과 2015년에 뚜렷하게 나타났다.

이어도 해양과학기지 관측 유의파고, 풍속, 파향에 대하여 인공위성 고도계와 이어도 유의파고 차의 특성을 분석하여 오차 요인을 파악하고자 하였다. 유의파고와 풍속에 대한 오차 특성은 위성별로 유사하게 나타났으며 GFO, Envisat, Jason-1/2는 유의파고와 풍속의 크기에 따라 통계적으로 유의미한 변동없이 일정한 양의 편차를 보였다. Cryosat-2는 유의파고와 풍속이 증가함에 따라 오차 또한 증폭되었다. SARAL은 이어도 파고에 대해서는 일정한 오차를 보였으나 풍속에 대해서는 10 ms^{-1} 까지 0.38 m로 증가한 후 다시 감소하였다. 파향에 대한 오차를 분석함으로써 지형 및 이어도 해양과학기지 구조물의 영향을 파악하고자 하였으나 통계적으로 유의미한 특성이 나타나지 않았다. 연구 기간 동안 위성별 오차는 위성에 관계없이 유사한 시간 변동을 보였다. 이는 위성 자료가 아닌 이어도 해양과학기지 유의파고 관측 오차에 의해 위성에 관계없이 특정 기간에 동일한 오차 특성이 나타났음을 시사한다. 마지막으로 거리에 따른 이어도 해양과학기지와 위성의 유의파고 차는 거리가 멀어질수록 오차의 최댓값과 최솟값 사이의 범위가 선형적으로 증가하였다.

해양기상부이 중 상대적으로 외해에 위치한 동해 부이 유의파고 자료를 활용하여 비교하였을 때는 편차가 없었으며(-0.02 m) 평균 제곱근 오차도 0.27 m로 작은 값을 보였다. 기존의 위성과 실측 유의파고 자료 비교 연구와 달리 이어도 해양과학기지 유의파고에 비해 위성 고도계 유의파고 자료가 상대적으로 높은 정확도를 보인다고 판단되어 위성 자료를 활용하여 이어도 관측 유의파고 보정식을 제안하였다.

이와 더불어 앞으로 위성 고도계 유의파고 검보정을 위한 실측 자료로서 이어도 해양과학기지 유의파고 자료가 국제적으로 활용되기 위해서는 자료의 정확도 확보가 우선적으로 필요하며, 정확한 자료 산출을 위해서는 이어도 주변에 부이를 설치하여 이어도 관측 자료와 비교를 통하여 관측 문제점을 파악하고 오차를 제거하는 노력이 필요할 것으로 사료된다. 이어도 해양과학기지 관측 유의파고의 정확도가 확보된다면 지리적 이점까지 부각되어 향후 위성 고도계 유의파고 검보정을 위한 국제적인 관측기지로 격상될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

이 연구는 해양수산부 국립해양조사원 이어도 해양과학기지 활용 학술연구사업(다중 인공위성 연계 이어도 종합해양과학기지 해양관측자료 활용 연구(II))의 지원을 받았습니다. 또한 인공위성 자료 처리 부분은 2017년 해양수산부 재원으로 해

양수산과학기술진흥원의 일부 지원을 받아 수행되었고(동해 심층해수 및 물질 순환 기작 규명, 20160400), 2017년 정부재원(교육부 BK21플러스 사업비)으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었습니다(21B20151713505).

참고문헌(References)

- Abdalla, S., P.A. Janssen and J.R. Bidlot, 2010. Jason-2 OGDR wind and wave products: Monitoring, validation and assimilation. *Mar. Geod.*, **33**: 239-255.
- Chen, G., B. Chapron, R. Ezraty and D. Vandemark, 2002. A global view of swell and wind sea climate in the ocean by satellite altimeter and scatterometer. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **19**: 1849-1859.
- Clancy, R.M., J.E. Kaitala and L.F. Zambresky, 1986. The Fleet numerical oceanography center global spectral ocean wave model, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **67**: 498-512.
- Dobson, F. and E. Dunlap, 1999. Miros system evaluation during storm wind study II. In: Proceedings of CLIMAR 99 WMO Workshop on Advances in Marine Climatology, Vancouver, pp. 98-109.
- Durrant, T.H., D.J.M. Greenslade and I. Simmonds, 2009. Validation of Jason-1 and Envisat remotely sensed wave heights. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **26**: 123-134.
- Ebuchi, N. and H. Kawamura, 1994. Validation of wind speeds and significant wave heights observed by the TOPEX altimeter around Japan. *J. Oceanogr.*, **50**: 479-487.
- Gower, J.F.R., 1996. Intercalibration of wave and wind data from TOPEX/POSEIDON and moored buoys off the west coast of Canada. *J. Geophys. Res.*, **101**: 3817-3829.
- Holland, P.W. and R.E. Welsch, 1977. Robust regression using iteratively reweighted least-squares. *Commun. Stat. Theory Methods*, **6**: 813-827.
- Hwang, P.A., W.J. Teague, G.A. Jacobs and D.W. Wang, 1998. A statistical comparison of wind speed, wave height and wave period derived from satellite altimeters and ocean buoys in the Gulf of Mexico region. *J. Geophys. Res.*, **103**: 10451-10468.
- Intergovernmental Oceanographic Commission, 1990. GTSP real-time quality control manual. IOC Manual and Guides 22, 128 pp.
- Intergovernmental Oceanographic Commission, 1993. Manual of quality control procedures for validation of oceanographic data. IOC Manual and Guides 26, 437 pp.
- Izaguirre, C., F.J. Méndez, M. Menéndez and I.J. Losada, 2011. Global extreme wave height variability based on satellite data. *Geophys. Res. Lett.*, **38**: L10607. doi:10.1029/2011GL047302.
- Janssen, P.A.E.M., G.J. Komen and W.J.P. de Voogt, 1984. An operational coupled hybrid wave prediction model, *J. Geophys. Res.*, **89**: 3635-3654.
- Kim, T., 2012. Examination of altimeter wave data in the sea around Jeodo ocean research station. *Korean J. Remote Sens.*, **28**: 95-100.
- KMA, 2005. Analysis of wind and wave height using data observed at the complex of oceanic meteorological observation in the Yellow Sea. KMA research report, 89 pp (in Korean with English abstract).
- Magnusson, A.K. and Ø. Grønlie, 2005. Measuring and analysing the directional spectrum of ocean waves. edited by Hauser, D., K. Kahma and H.E. Korgstad, COST Action 714, Office for Official Publications of the European Communities, pp. 138-141.
- Magnusson, A.K., 1987. Wave model results with wind input from a coarse- and a fine-meshed atmospheric model, compared with wave measurements. In: Proceedings of an International Conference, Society of Underwater Technology, London, pp. 165-180.
- Melville, W.K., 1996. The role of surface-wave breaking in air-sea interaction. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **28**: 279-321.

- MIROS, 2011, Waveradar system user manual.
- Moon, I.J., J.S. Shim, D.Y. Lee, J.H. Lee, I.K. Min and K.C. Lim, 2010. Typhoon researches using the Jeodo Ocean Research Station: Part I. importance and present status of typhoon observation. *Atmos.*, **20**: 247-260 (in Korean with English abstract).
- National Data Buoy Center, 2003. Handbook of automated data quality control checks and procedures of the National Data Buoy Center. NOAA National Data Buoy Center Technical Document 03-02, 46 pp.
- O'Leary, D.P., 1990. Robust regression computation using iteratively reweighted least squares. *SIAM J. Matrix Anal. Appl.*, **11**: 466-480.
- Oh, K.H., Y.G. Park, D.I. Lim, H.S. Jung and J.S. Shim, 2006. Characteristics of temperature and salinity observed at the Jeodo Ocean Research Station. *J. Korea Soc. Mar. Environ. Eng.*, **9**: 225-234 (in Korean with English abstract).
- Oh, S.H., W.M. Jeong, D.Y. Lee and S.I. Kim, 2010. Analysis of the reason for occurrence of large-height swell-like waves in the east coast of Korea. *J. of Korean Soc. of Coast. Ocean Eng.*, **22**: 101-111 (in Korean with English abstract).
- Park, K.A., H.J. Woo, E.Y. Lee, S. Hong and K.L. Kim, 2013. Validation of significant wave height from satellite altimeter in the seas around Korea and error characteristics. *Korean J. Remote Sens.* **29**: 631-644.
- Queffeuou, P. and D. Croizé-Fillon, 2016. Global altimeter SWH data set - September 2016, IFREMER, Plouzané, Technical Report, 10 pp.
- Queffeuou, P., 2004. Long-term validation of wave height measurements from altimeters. *Mar. Geod.*, **27**: 495-510.
- Queffeuou, P., 2013. Cryosat-2 IGDR SWH assessment update. IFREMER, Technical Report, 12 pp.
- Sepulveda, H.H., P. Queffeuou and F. Ardhuin, 2015. Assessment of SARAL/AltiKa wave height measurements relative to buoy, Jason-2, and Cryosat-2 data. *Mar. Geod.*, **38**: 449-465.
- Tanaka, K., 2010. Atmospheric pressure-wave bands around a cold front resulted in a meteotsunami in the East China Sea in February 2009. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **10**: 2599-2610.
- Taylor, P.K., E. Dunlap, F.W. Dobson, R.J. Anderson and V.R. Swail, 2002. On the accuracy of wind and wave measurements from buoys. DBCP Technical Document No. 21, 15 pp.
- Woo, H.J. and K.A. Park, 2017. Long-term trend of satellite-observed significant wave height and impact on ecosystem in the East/Japan Sea. *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.*, **143**: 1-14.
- You, S.H. and J.S. Park, 2010. Research on wind waves characteristics by comparison of regional wind wave prediction system and ocean buoy data. *J. Ocean Eng. Tech.*, **24**: 7-15 (in Korean with English abstract).
- Young, I.R., J. Vinoth, S. Zieger and A.V. Babanin, 2012. Investigation of trends in extreme value wave height and wind speed. *J. Geophys. Res.*, **117**: C00J06, doi:10.1029/2011JC007753.
- Young, I.R., S. Zieger and A.V. Babanin, 2011. Global trends in wind speed and wave height. *Science*, **332**: 451-455.
- Zieger, S., J. Vinoth and I.R. Young, 2009. Joint calibration of multiplatform altimeter measurements of wind speed and wave height over the past 20 years. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **26**: 2549-2564.