creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사 학위논문

X-band 레이더 계측 데이터를 활용한 실시간 해양파 해석

Study on Real-Time Ocean Wave Analysis Based on X-Band Radar Measurement Data

2023 년 2 월

서울대학교 대학원

조선해양공학과

남 윤 서

X-band 레이더 계측 데이터를 활용한 실시간 해양파 해석

Study on Real-Time Ocean Wave Analysis Based on X-Band Radar Measurement Data

지도 교수 김 용 환

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함
2023 년 1 월

서울대학교 대학원
조선해양공학과
남 윤 서

남윤서의 공학석사 학위논문을 인준함
2023 년 1 월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

초 록

해양 활동의 안전성 및 효율을 향상하기 위해 신뢰도 높은 파랑 정보의 획득이 요구됨에 따라 전 세계적으로 다양한 방식의 파랑 계측이 수행되고 있다. 이 중 해양 X-band 레이더는 넓은 영역의 파랑 정보를 동시에 계측할 수 있으므로 단시간의 계측을 통해 통계적으로 수렴도 높은 해양파 정보를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 때문에, 다양한 선박 및 해양 구조물에서 해양 X-band 레이더를 활용하여 파랑 계측을 수행하고 있으며, 계측 기법의 고도화에 대한 다양한 논의가 진행되고 있다.

해양 레이더는 안테나에서 송신된 X-band 마이크로파와 해면상 잔물결 간의 Bragg 공진 현상에 의해 후방 산란되는 전자기파의 세기를 계측한다. 이러한 원격 계측 과정은 그림자, 기울임, 유체동역학적 효과 등 수많은 비물리적 변조 효과를 수반한다. 따라서, 레이더 이미지로부터 파랑 정보를 도출하기 위해서는 이미지 강도에 포함된 비물리적 성분을 제거하고 스펙트럼의 에너지를 유의파고에 따라 조정하는 파랑장 재구성 과정이 요구된다.

본 논문은 고도화된 파랑장 재구성 기법에 대한 연구를 다루고 있다. 제시된 전체 재구성 절차는 그림자 기반 유의파고 추정과 3D-FFT 기반 파랑장 재구성으로 구성되며, 각 해석 과정이 높은 연산 효율을 지니고 있다. 또한, 본 연구에서는 파랑장 재구성 기법의

정확도 향상을 위해 그림자 발생의 공간 통계적 특성을 엄밀하게 고려하였다. 이를 위해, 유의파고 추정 시 해면의 공간상 자기상관함수 및 평균표면경사의 직교성을 고려하였고, 파랑장 재구성 시 그림자 발생의 공간적 특성에 기인하는 불균일한 분산 분포에 대한 보정을 수행하였다.

본 논문에서 제시된 기법의 검증을 위해 합성 레이더 이미지와 실해역 레이더 이미지에 대해 파랑장 재구성을 수행하였다. 먼저, 다양한 해상 상태의 합성 레이더 이미지를 생성하여 해석에 활용하였고, 해상 상태에 따른 재구성 정확도의 의존성을 살펴보았다. 이를 통해, 다양한 해상 상태에서 그림자 효과에 대한 엄밀한 고려를 통해 파랑장 재구성 정확도를 향상할 수 있음을 확인하였다. 다음으로, 이어도 해양과학기지 및 기상 1호에서 계측된 실해역 레이더 이미지에 대한 유의파고 추정을 수행하였다. 그 결과, 실해역 데이터에 대하여 정확도 높은 유의파고 추정이 가능함을 확인하였다.

주요어 : X-band 레이더, 해양파, 유의파고, 파랑장 재구성, 그림자 효과

학　번 : 2020-25483

목 차

1. 서론 1

1.1 연구 배경 1

1.2 기존 연구 3

1.2.1 3D-FFT 기반 파랑장 재구성 3

1.2.2 유의파고 추정 5

1.3 연구 목표 및 주요 연구 내용 7

2. 파랑장 재구성 9

2.1 위상 분해 파랑장 재구성 문제 9

2.1.1 문제 정의 9

2.1.2 전체 해석 절차 11

2.2 유의파고 추정 13

2.2.1 그림자 영역 구분 13

2.2.2 Smith 함수 기반 표면 경사 추정 14

2.2.3 총표면경사 추정 18

2.2.4 유의파고 계산 19

2.3 3D-FFT 기반 파랑장 재구성 21

2.3.1 Mean-shift 변형 21

2.3.2 에너지 분포 보정 21

2.3.3 3차원 고속 푸리에 변환(3D−FFT) 23

2.3.4 필터링 23

2.3.5 변조 전달 함수(MTF) 24

3. 합성 레이더 이미지 해석 26

3.1 합성 레이더 이미지 생성 26

3.2 유의파고 추정 30

3.2.1 평균표면경사 추정 30

3.2.2 스펙트럼 해석 34

3.2.3 유의파고 추정 결과 36

3.3 파랑장 재구성 38

3.3.1 에너지 분포 보정 38

3.3.2 재구성 결과 40

4. 실해역 레이더 이미지 해석 45

4.1 데이터셋 정의 45

4.1.1 이어도 데이터셋 45

4.1.2 NIMS 데이터셋 46

4.2 유의파고 추정 결과 48

4.2.1 이어도 데이터셋 해석 결과 48

4.2.2 NIMS 데이터셋 해석 결과 53

5. 결론 57

6. 공학적 기여 및 향후 연구 59

참고문헌 61

부록 66

A.1 Smith 함수 유도 66

A.2 해면 평균표면경사의 물리적 특성 71

표 목 차

Table 2.1 Comparison between the existing method (Gangeskar, 2014) and the present study for shadowing-based H_S estimation.....20
Table 2.2 Empirical parameters related to the wave-field reconstruction.....25
Table 3.1 Parameters used in the generation of synthetic radar images.....28
Table 3.2 List of sea states utilized for the numerical tests.....28

그 림 목 차

Fig. 2.1 Coordinate system for wave-field reconstruction problem 10
Fig. 2.2 Consecutive radar images utilized for wave-field analysis 10
Fig. 2.3 Overall wave-field reconstruction procedure 12
Fig. 2.4 Comparison of the numerically evaluated spatial autocorrelation functions with the estimation by Eq. (2.6) 17
Fig. 2.5 Comparison of uncorrelated and correlated Smith functions 18
Fig. 3.1 Synthetic wave elevation and the corresponding synthetic radar image ($H_{S,exact}$=4.0m, T_{mean}=9.0s, χ_s=60.0deg) 29
Fig. 3.2 Estimated illumination ratio ($H_{S,exact}$=4.0m, T_{mean}=9.0s, χ_s=60.0deg) 31
Fig. 3.3 Fitting with Smith function ($H_{S,exact}$=4.0m, T_{mean}=9.0s, χ_s=60.0deg) 31
Fig. 3.4 Estimated mean surface slope (T_{mean}=9.0s and χ_s=60.0deg) 33
Fig. 3.5 Estimated total mean surface slope (T_{mean}=9.0s and χ_s=60.0deg) 33
Fig. 3.6 2D wave spectrum $S_{2D}(k,\omega)$ obtained by 3D-FFT-based spectral analysis ($H_{S,exact}$=4.0m, T_{mean}=9.0s and χ_s=60.0deg) 35
Fig. 3.7 Normalized 1D wave spectrum $S_{1D}(\omega)$ obtained by 3D-FFT-based spectral analysis (T_{mean}=9.0s and χ_s=60.0deg) 35
Fig. 3.8 H_S estimation result for various sea states 37
Fig. 3.9 Variance distribution along the radial direction ($H_{S,exact}$=4.0m T_{mean}=9.0s and χ_s=60.0deg) 39
Fig. 3.10 Modified radar image intensity at $t=T/2$ ($H_{S,exact}$=4.0m, T_{mean}=9.0s and χ_s=60.0deg) 39
Fig. 3.11 Observed variance distribution ($H_{S,exact}$=4.0m, T_{mean}=9.0s and χ_s=60.0deg) 40
Fig. 3.12 Reconstructed wave elevation at t=$T/2$ ($H_{S,exact}$=4.0m, T_{mean}=9.0s and χ_s=60.0deg) 41

Fig. 3.13 Error distribution at $t=T/2$ ($H_{S,exact}$=4.0m, T_{mean}=9.0s and χ_s=60.0deg) 42
Fig. 3.14 Accuracy of wave-field reconstruction ($H_{S,exact}$=4.0 m, T_{mean}=9.0 s and χ_s=60.0 deg) 43
Fig. 3.15 Accuracy of wave-field reconstruction for the various sea states .. 44
Fig. 4.1 Ieodo ocean research station 46
Fig. 4.2 Research vessel Gisang 1 (from www.climate.go.kr/) 47
Fig. 4.3 GPS record of RV Gisang 1 and Nokdo wave buoy..... 47
Fig. 4.4 Real radar image of Ieodo dataset and the corresponding shadowing mask (collected at 14:00 on 06/15/2008) 49
Fig. 4.5 Fitting with Smith function for Ieodo dataset (collected at 14:00 on 06/15 2008) 50
Fig. 4.6 2D wave spectrum $S_{2D}(k,\omega)$ obtained from Ieodo datset (collected at 04:00 on 06/15 2008). 51
Fig. 4.7 Comparison of significant wave height estimation result and independent reference measurement (Ieodo dataset). 52
Fig. 4.8 Sample real radar image of NIMS dataset and corresponding shadowing mask (collected at 07:00 on 10/17/2022) 54
Fig. 4.9 Fitting with Smith function for NIMS dataset (collected at 07:00 on 10/17 2022) 54
Fig. 4.10 2D wave spectrum $S_{2D}(k,\omega)$ obtained from NIMS dataset (collected at 07:00 on 10/17 2022). 55
Fig. 4.11 Significant wave height estimation results compared with the independent reference measurements (NIMS dataset). 56
Fig. A.1 Coordinate system and definitions for the derivation of Smith function 67

1. 서론

1.1 연구 배경

해양 파랑 관측 데이터는 부유체 및 연안 시설물의 설계, 장단기 운영 계획 수립, 안전관리 등 다목적으로 활용되고 있다. 이에 따라 신뢰도 높은 파랑 정보의 획득이 요구되며, 1950년대 이래로 다양한 방식의 파랑 계측이 수행되고 있다. 가장 고전적인 해양파 계측 장치는 파고 부이(buoy) 등 제자리(in-situ) 계측 장비이다. 제자리 계측 장치는 해면에 직접 접촉하여 계측을 수행하므로 정확한 파랑 계측이 가능하지만, 이와 동시에 해상 상태에 대한 의존성이 높고 유지·보수에 많은 비용이 요구된다는 한계가 있다. 이에 따라, 1980년대부터 해양 X-band 레이더를 활용하는 해양파 원격 계측 기법이 주목받게 되었다. 레이더는 유지·보수 비용이 상대적으로 저렴하고, 넓은 영역의 파랑 정보를 동시에 계측하므로 실시간 파랑장 해석에 적합하기 때문이다(Huang et al., 2017).

상술한 장점에 기반을 두어, 해양 X-band 레이더는 파랑 계측 시 다목적으로 활용되고 있다. 전통적으로 레이더 기반 파랑 계측은 해상 요소(sea state parameter) 등 통계적 파랑 정보의 획득을 위해 수행되었다(Nieto-Borge et al., 1999a). 오늘날 X-band 레이더 기반 해상 요소 분석 기술은 높은 성숙도를 지니게 되었으며, 이를 활용하는 Wamos II (Hessner et al., 2008), WaveX (Gangeskar, 2018), WaveFinder (Park, 2013) 등의 다양한 상용 시스템들 역시 개발되었다.

더 나아가, 선박 및 해양 구조물의 안전성 향상 문제가 대두됨에 따라 위상 분해(phase-resolved) 파랑 정보 해석에 대한 관심 역시 높아지고 있다.

레이더를 활용한 원격 계측은 수많은 비물리적 현상을 수반하므로 물리적으로 유효한 파랑 정보를 도출하기 위해 해양파의 물리적 특성을 고려한 추가적인 해석 과정이 요구된다. 해양 레이더는 안테나가 송신한 X-band 마이크로파(파장 2.5~3.75cm)가 해면에서 후방 산란하는 강도를 계측한다. 레이더를 활용한 원격 계측을 통해 높은 공간상 해상도(5~10m)로 넓은 범위(2~5km)의 해면 관측이 가능하지만, 계측되는 이미지 강도가 파고와 비례하지 않는 특성이 있다. 이는 원격 계측 과정에서 그림자(shadowing), 기울임(tilting), 유체동역학적 효과(hydrodynamic modulation) 등 여러 변조 효과가 발생하며, 레이더 이미지 강도 역시 [0, 256] 구간의 비물리적인 값을 갖기 때문이다(Dankert and Rosenthal, 2004; Nieto-Borge et al., 2004). 이에 따라, 연속적인 레이더 계측 이미지에 파랑장 재구성(wave-field reconstruction)을 적용하여 물리적으로 유효한 파랑 정보를 도출하는 과정이 요구된다. 이때 연속 이미지가 3차원의 데이터 구조를 지님에 따라 많은 연산이 요구되므로, 높은 연산 효율을 지닌 3차원 고속 푸리에 변환(3D-FFT)을 해석에 활용하는 것이 일반적이다.

전통적으로 파랑장 재구성은 해상 요소 모니터링을 목적으로 수행되어 왔으며(Nieto-Borge et al., 1999a), 이 경우 분석 시간 단축을

위해 이미지 내에 직사각형 형태의 해석 영역을 설정하는 것이 일반적이었다. 하지만 최근 위상 분해 파랑장 해석이 시도됨에 따라 이미지 전체를 해석 영역으로 설정하는 경우 역시 늘고 있다(Clauss et al. 2012; Lee et al., 2022). 이미지 전체를 활용하는 파랑장 재구성 시 그림자 발생의 공간적 특성에 기인하는 비물리적 효과가 증가한다(Lee et al., 2022; Nam et al., 2022). 따라서, 파랑장 재구성 시 그림자 발생의 공간 통계적 특성을 엄밀히 반영하는 방법에 대한 연구를 수행할 필요가 있다.

1.2 기존 연구

1.2.1 3D-FFT 기반 파랑장 재구성

해양 X-band 레이더는 X-band 마이크로파를 해면에 송신 후, 전자기파와 해면상 잔물결(ripple) 간의 Bragg 공명에 의한 후방 산란 강도를 계측한다(Huang et al. 2017). 이러한 원격 계측은 넓은 영역의 데이터를 동시에 획득할 수 있다는 장점이 있으나, 계측 과정에서 기울임, 그림자, 유체동역학적 효과 등을 포함하는 복잡한 메커니즘이 관여함에 따라(Vesecky, 1981; Dankert and Rosenthal, 2004; Nieto-Borge et al., 2004), 해면의 형태와 이미지 강도는 비례하지 않게 된다는 한계점 역시 존재한다. 이에 따라, 레이더 이미지로부터 비물리적인 성분들을 제거하고 물리적으로 유효한 파랑 성분을

도출하는 파랑장 재구성 과정이 요구된다.

파랑장 재구성 시 해양 파랑의 시·공간적 변화 특성을 고려하기 위하여 연속적인 레이더 이미지에 대해 3차원 고속 푸리에 변환(3D fast Fourier transform; 3D-FFT) 기반 해석을 수행하는 것이 일반적이다. 이를 위하여, 연속 레이더 이미지를 3D-FFT 통해 주파수 영역으로 변환 후, 분산관계식에 기반한 필터링을 적용한다(Young and Rosenthal, 1985). 이때, 표층 유속(surface current)이나 선박의 전진속도에 의해 발생하는 Doppler 효과를 고려하기 위하여 유속 추정 역시 수행된다(Young and Rosenthal, 1985; Senet et al., 2001; Serafino et al., 2010). 필터링된 스펙트럼에 남아 있는 고주파 성분의 과대평가는 변조 전달 함수(modulation transfer function; MTF)를 활용하여 완화하며(Ziemer and Gunther, 1994; Nieto-Borge et al., 2004; Chen et al., 2015), 이 과정에서 Nieto-Borge et al. (2004)이 제안한 파수(wave number)의 멱함수 형태의 MTF가 가장 널리 활용되고 있다.

파랑장 재구성의 고도화를 위한 연구 역시 다각적으로 수행되었다. 먼저, 경험적으로 결정되는 파랑장 재구성과 관련된 매개변수들의 최적화가 시도되었다. Lund et al. (2014)은 실해역 레이더 이미지에 대한 분석을 통해 해석 영역의 방위각 및 거리에 따른 최적 MTF 지수를 조사하였다. 해상 상태 및 해석 영역의 위치에 따른 최적의 파랑장 재구성 매개변수를 찾기 위하여 HOS(high order spectral method)를 활용한 분석 역시 수행되었다(Qi et

al., 2016). 다음으로, 레이더 이미지 자체에 대한 보정을 통한 파랑장 재구성 고도화가 시도되었다. 대표적으로 Zinchenko et al. (2021)은 레이더 계측 메커니즘에 기인하는 이미지 세기와 해양 파랑장의 형태적 차이를 최소화하기 위하여 mean-shift 변형 기법을 제안하였다. 더 나아가, Lee et al. (2022)은 위상 분해 파랑장 재구성 과정에서 경험적인 추정식을 활용하여 레이더 이미지 내 불균일한 에너지 분포에 대한 보정을 수행한 바 있다.

1.2.2 유의파고 추정

X-band 레이더 이미지를 활용한 파랑장 재구성 시 이미지 강도와 해면의 scale 차이가 발생하므로, 스펙트럼의 총 에너지를 유의파고(Significant wave height; H_S)에 따라 조정하는 과정이 요구된다. 해양의 유의파고 추정을 위한 가장 전통적인 방법은 신호대 잡음비(Signal-to-noise ratio; SNR)를 활용한 경험적인 추정 기법으로, SNR의 제곱근과 유의파고가 비례 관계에 있다고 가정하고 선형 회귀를 적용하는 방법이다(Nieto-Borge et al., 1999b). SNR 기반 추정 기법은 레이더 이미지의 스펙트럼의 고조파 성분(high harmonics)의 특성을 더욱 엄밀하게 반영할 수 있도록 고도화 되었으며(Nieto-Borge et al., 2008), 다층 인공신경망(artificial neural network; ANN)과 서포트 벡터 머신(support vector machine; SVM) 등 기계학습 기법을 SNR 기반 추정에 접목시키기도 하였다(Vincen-Bueno et al., 2012; Cornejo-Bueno et al., 2016).

회귀 분석을 활용하는 SNR 기반 유의파고 추정의 특성에 의하여 다양한 해상 상태에서 레이더와 독립적인 유의파고 계측 결과가 요구된다. 이에 따라 SNR 기반 추정은 일반적으로 큰 비용이 소요되며, 이를 대체할 수 있는 유의파고 추정 기법에 관한 연구가 진행되었다. 그림자 효과의 통계적 특성 활용(Gangeskar, 2014), 서포트 벡터 회귀(Salcedo-Sanz et al., 2015), 간섭성(coherent) 레이더 활용(Carrasco et al., 2017), 레이더 이미지에 대한 합성곱 신경망(convolutional neural network) 적용(Duan et al., 2020; Chen and Huang, 2022), 광학 이미지 활용(Choi et al., 2021) 등이 이에 해당한다.

이 중 그림자 기반 유의파고 추정 기법은 단순한 연산을 통해 유의파고를 추정할 수 있으므로 실시간 파랑 해석에 적합하다. 그림자 기반 유의파고 추정 기법에서는 그림자 발생의 통계적 특성인 Smith 함수를 활용한다(Gangeskar, 2014). Smith 함수란 기하학적 그림자 효과가 발생한 가우시안 임의 표면(Gaussian random surface)에서 계측이 가능할 확률에 대한 이론적 추정치를 의미한다(Smith, 1967; Bourlier et al., 2002). Smith 함수는 표면의 경사와 관계되므로, 이를 활용하여 해면의 평균표면경사를 추정할 수 있다. 최종적으로 유의파고는 평균표면경사를 포함한 여러 해상 요소가 분산 관계식을 만족한다는 가정하에 계산된다(Gangeskar, 2014). 더 나아가, 그림자 기반 추정 기법의 정확도 및 수치적 안정성을 향상하기 위한 연구 역시 수행되었다(Liu and Huang, 2016; Wei et al., 2017). 그러나 기존 연구에서 제시된 그림자 기반 유의파고

추정 기법은 일부 비물리적인 가정에 기반을 두고 있으므로, 해양파의 물리적 특성을 엄밀하게 반영하지 못한다는 한계점이 존재하였다.

1.3 연구 목표 및 주요 연구 내용

본 연구는 해양 레이더 계측 이미지를 활용한 위상 분해 파랑장 재구성 기법을 다루고 있다. 제시된 재구성 기법은 그림자 기반 유의파고 추정과 3D-FFT 기반 해석으로 구성되며, 각 해석 과정에서 레이더 이미지 내 그림자 발생의 특성을 엄밀히 반영할 수 있도록 고도화 되었다. 먼저, 유의파고 추정 시 해양 파랑장의 물리적 특성과 그림자 발생의 통계적 특성의 관계를 엄밀하게 고려하였다. 이를 위하여, 해양파의 물리적·통계적 특성을 평균표면경사 추정에 반영하였으며, 여러 해상 요소의 물리학적 특성을 활용한 유의파고 추정식을 제안하였다. 다음으로, 3D-FFT 기반 해석 시 그림자 발생의 공간적 특성에 기인하는 이미지 강도의 불균일한 에너지 분포에 대한 보정을 수행하였다. 이 과정에서 그림자 발생의 통계적 특성에 따라 이론적으로 유도되는 이미지 강도의 분산에 대한 추정식을 활용하였다.

제시된 기법의 검증을 위하여 합성 레이더 및 실제 레이더 이미지에 대해 파랑장 재구성을 적용하였다. 합성 레이더 이미지는 단파봉 불규칙 파랑을 레이더로 계측하는 상황을 가정하여

생성되었다. 다양한 해상 상태에 대한 해석을 통해 여러 환경 변수들이 유의파고 추정 및 파랑장 재구성에 끼치는 영향을 분석하였다. 또한, 실해역에서 계측된 레이더 이미지에 대해 그림자 기반 유의파고 추정 기법을 적용하였다. 해석 결과를 레이더와 독립적으로 계측된 유의파고와 비교함으로써 실해역 데이터에 대해 제시된 기법의 유효성을 검증하였다.

2. 파랑장 재구성

2.1 위상 분해 파랑장 재구성 문제

2.1.1 문제 정의

불규칙 해양 파랑장(ζ_{exact})을 레이더로 계측하는 상황에 대하여, Fig. 2.1에 나타난 바와 같이 좌표계를 정의할 수 있다. 좌표계의 원점 및 x축, y축은 평균 해수면 상에서 위치하며, 원점에서 해면의 한 지점까지의 거리를 r, 방위각을 θ로 정의하였다. 파랑 레이더는 (0, 0, h_r)에 위치하고 있으며, 계측 반경 [R_{min}, R_{max}] 내의 파고 분포를 동시에 계측한다고 가정하였다. 최종적으로, 레이더 계측을 통해 얻어진 레이더 이미지 강도는 $\rho_s(x, y, t)$로 정의된다.

X-band 레이더를 활용한 파랑 계측 시 수많은 비물리적 효과들이 레이더 이미지에 반영되므로, 이들을 제거하여 재구성된 파고 분포(ζ_{re})를 얻는 파랑장 재구성 과정이 요구된다. 파랑 해석 시 해면의 시공간적 변화 특성을 고려하기 위하여 연속 레이더 이미지에 대한 해석을 수행하는 것이 일반적이며, 본 연구에서 활용한 연속 레이더 이미지의 자료 구조가 Fig. 2.2에 나타나 있다. 레이더 이미지의 x축과 y축 방향 계측 영역 크기를 L_x 와 L_y로 정의하였고 전체 계측 시간을 T로 나타내었다. 계측 데이터는 x, y, t에 대해 등간격으로 이산화되어 있으며, 데이터의 총 개수는 $M \times N \times J$이다.

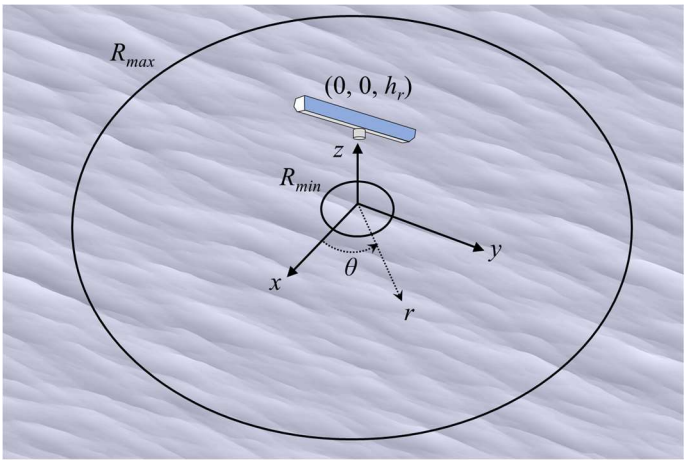


Fig. 2.1 Coordinate system for wave-field reconstruction problem

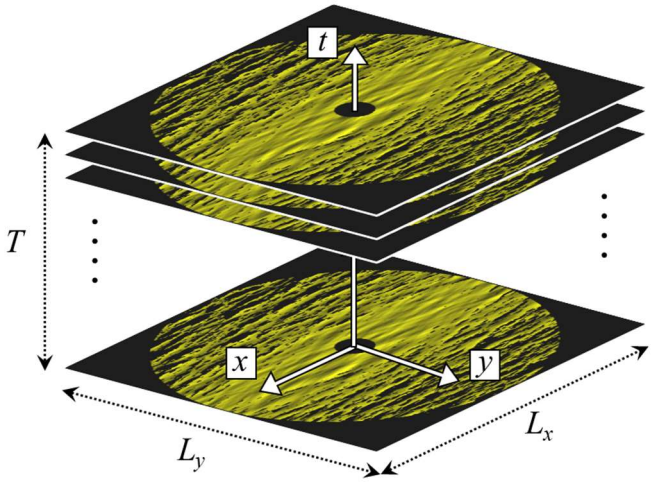


Fig. 2.2 Consecutive radar images utilized for wave-field analysis

2.1.2 전체 해석 절차

Fig. 2.3은 본 연구에서 활용한 위상 분해 파랑장 재구성의 절차도(flowchart)를 나타낸다. 전체 해석 절차는 그림자 기반 유의파고 추정과 3D-FFT 기반 파랑장 재구성으로 구성되며, 각 해석 과정은 레이더 이미지에 발생한 그림자 효과의 통계적 특성을 반영할 수 있도록 고도화되었다.

유의파고 추정의 경우, 기존 연구에서(Gangeskar, 2014) 제안한 그림자 기반 추정 기법의 큰 틀은 유지하되, 그림자의 통계적 특성과 해양 파랑의 물리적 특성을 엄밀히 반영할 수 있도록 각 해석 과정을 수정하였다. 이를 위하여, 평균 표면 경사 추정 시 Smith 함수 계산 시 그림자 효과의 통계적 특성과 해양파의 공간상 자기상관함수(Spatial autocorrelation function; SACF)의 관계를 반영하였다. 또한, 평균 표면 경사의 직교성 및 해상 요소 간의 물리적 관계를 엄밀하게 반영할 수 있는 유의파고 추정식을 제시하였다.

3D-FFT 기반 해석 시 레이더 이미지의 불균일한 분산 분포를 완화하는 보정을 수행하였다. 이 과정에서 그림자 발생의 통계적 특성에 따라 유도되는 이미지 강도 분산의 추정식인 Smith 분산을 활용하였다. 레이더 이미지의 스펙트럼 해석을 위해 3D-FFT를 활용한 전통적인 파랑장 재구성 기법을 적용하였다(Young et al., 1985; Nieto-Borge et al., 2004). 이를 위하여, 연속 레이더 계측 이미지를 3D-FFT 를 통해 주파수 영역으로 변환 후, 필터링 및 MTF를

적용하여 비물리적인 효과를 제거하였다. 최종적으로, 재구성된 파고 분포는 재구성된 파랑 성분에 3차원 역 푸리에 변환(3D-IFFT)을 적용하여 얻을 수 있다.

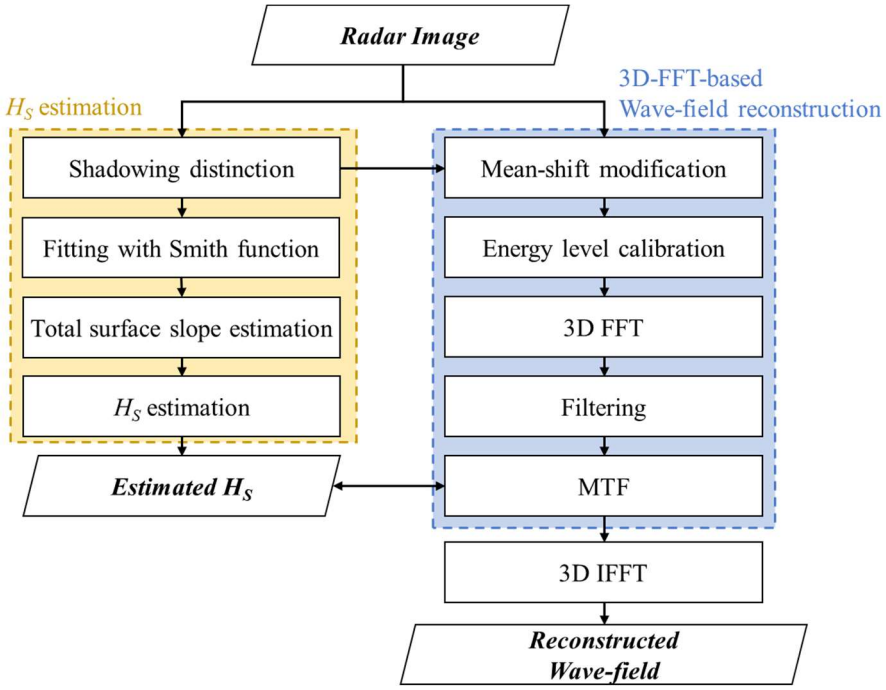


Fig. 2.3 Overall wave-field reconstruction procedure

2.2 유의파고 추정

2.2.1 그림자 영역 구분

유의파고 추정을 위해 레이더 이미지로부터 그림자가 발생한 영역을 구분하는 과정이 요구된다. 본 연구에서는 특정 임계값(threshold) 미만의 세기를 갖는 픽셀에 그림자가 발생했다고 간주하는 임계값 기반 그림자 영역 구분을 수행한다(Gangeskar, 2014). 임계값은 그림자 영역의 가장자리에 위치한 경계 픽셀(edge pixel)의 세기 특성을 기반으로 하여 결정된다. 경계 픽셀을 추출하기 위하여 레이더 이미지 내 특정 지점에서 불연속성의 정도를 나타내는 불연속 지표를(discontinuity index; I_{Dn}) 다음과 같이 계산한다.

$$I_{Dn}(x,y)=\begin{cases}1, & \rho_s(x,y)\otimes D_n(x,y) > upper\ N-percentile \\ 0, & otherwise\end{cases}. \tag{2.1}$$

이때, D_n은 n번째 방향에 대한 픽셀 미분 커널(differentiation kernel)을, 연산 ⊗는 합성곱 연산(convolution)을 의미한다. 또한, *N-percentile*은 상위 N 퍼센트에 해당하는 픽셀 미분 값을 나타내며, $N=10$이 해석에 활용되었다. 평가된 불연속 지표에 기반하여 다음과 같이 경계 픽셀을(I_F) 구분한다.

$$I_T(x,y) = \sum_{n=1}^{8} I_{Dn}(x,y)$$
$$I_F(x,y) = \begin{cases} 1 & I_T(x,y) \le \tau_F \\ 0 & otherwise \end{cases}. \tag{2.2}$$

여기서, τ_F는 고립된 소음 효과(isolated noise)를 배제하기 위해 τ_F=5로 설정했다. 그림자 임계값 (shadowing threshold; τ_s)는 경계 픽셀의 세기 히스토그램(edge intensity histogram)의 최빈값(mode)으로 결정된다.

$$\Omega(x,y,t) = \begin{cases} 1, & \rho_s(x,y,t) \ge \tau_s \\ 0, & otherwise \end{cases} \tag{2.3}$$
$$\text{where } \tau_s = \text{mode}\{H_e(\rho)\}.$$

이때, $\Omega(x,y,t)$는 visibility 함수, 즉, (x,y,t)가 그림자 영역에 포함되면 0이고 그렇지 않으면 1인 함수를 나타낸다.

2.2.2 Smith 함수 기반 표면 경사 추정

레이더 이미지로부터 추정된 visibility 함수를 활용하여 특정 지점에서 그림자 효과가 발생하지 않을 확률인 조영비(illumination ratio, $L(r,\theta)$)를 계산한다. 연속 레이더 이미지에 대해 조영비는 다음과 같이 계산된다.

$$L(r,\theta)=\frac{1}{T}\sum_{t}\Omega(r,\theta,t)\Delta t. \tag{2.4}$$

파고 발생의 통계적 특성이 정규 분포(Gaussian distribution)를 따르는 해양 파랑장에 대해, 조영비의 이론적 추정치는 Smith 함수이다(Smith, 1967; Bourlier, et al., 2000; Bourlier, et al., 2002). Smith 함수는 레이더 광선의 입사각 및 평균 표면 경사의 함수이며, 그림자 발생 확률밀도함수(shadowing probability density function, $\hat{S}$)를 확률변수 ζ_0, q_0에 대해 적분하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$S(\mu(r);w(\theta))=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\hat{S}(\zeta_0,q_0,\mu(r);\sigma,w(\theta))\frac{e^{\left(-\frac{\zeta_0^2}{2\sigma^2}-\frac{q_0^2}{2w(\theta)^2}\right)}}{2\pi\sigma w(\theta)}d\zeta_0 dq_0 \tag{2.5}$$

where $\mu(r)=h_r/r$.

여기서, ζ_0와 q_0는 각각 파고와 표면 경사를 나타내며, σ와 $w(\theta)$는 각각 파고와 표면 경사의 표준 편차를 의미한다.

Smith 함수는 계산 과정에서 공간상 자기상관함수(Spatial autocorrelation function; SACF)의 고려 여부에 따라 그 형태를 달리한다. SACF를 고려하지 않는 uncorrelated Smith 함수의 경우 단순한 해석적 계산을 통해 구할 수 있지만(Smith, 1967), 그림자 발생을 과소 추정하는 한계가 있다. 반면 correlated Smith 함수는 계산 과정에 SACF를 고려하므로 그림자 효과의 발생을 더욱 정확히 추정할 수 있으나, 수치 적분을 포함하는 복잡한 계산이

요구된다(Bourlier et al., 2002). Smith 함수의 상세한 계산 과정은 부록 A.1에서 확인할 수 있다.

Correlated Smith 함수를 평가하기 위해서는 SACF의 닫힌 형태(closed-form)가 주어져야 한다. 본 연구에서는 SACF를 결정하기 위하여 장파봉 불규칙파에 대한 수치적 분석을 수행했고, 이에 기반하여 다음의 같은 SACF 추정식을 제안한다.

$$\begin{aligned} &\mathrm{SACF}(l) = \sigma^2\left(1 + c_1 l + c_4 l^4\right)\exp\left(-c_1 l\right)\cos\left(c_2 l\right) \\ &\text{where } l = \frac{wr}{\sigma},\ c_1 = \sqrt{\frac{l_0^2 - \pi^2}{l_0^2}},\ c_2 = \frac{\pi}{l_0},\ c_4 = \frac{1}{l_0^4}\left(p_0 e^{\sqrt{l_0^2-\pi^2}} - 1 - \sqrt{l_0^2 - \pi^2}\right). \end{aligned} \tag{2.6}$$

위의 식에서 매개변수 l_0와 p_0가 SACF의 거동을 묘사하기 위해 도입되었으며, l_0는 코사인 함수의 위상이 π가 되는 지점을 의미하고, p_0는 l_0 지점에서 SACF의 값을 나타낸다. 본 연구에서는 SACF의 첫 번째 오버슈팅(overshooting) 현상을 정확히 묘사하기 위해 각 매개변수를 l_0=7.0, p_0=0.3으로 지정했다. Fig. 2.4는 다양한 해상 상태 조건에서 생성된 장파봉파(long-crested wave)로부터 수치적으로 평가한 SACF와, 추정식 (2.6)을 활용하여 계산한 SACF를 비교한 결과를 보여준다. 합성 파고 데이터의 생성을 위해 ITTC 스펙트럼을 활용했으며, 해상 상태는 보퍼트 풍력 계급(Beaufort scale) 6, 7, 8로 가정했다. 통계적으로 수렴된 SACF를 얻기 위해, 각 해상 상태에서 30개의 파랑 성분 random phase 조합에 대해 SACF를 평가하여 평균을 취했다. 결과적으로, 해상 상태와 관계없이

수치적으로 평가한 SACF와 추정식을 활용해 계산한 SACF가 잘 일치함을 확인할 수 있다.

식 (2.6)에 따라 추정된 SACF를 이용하여 correlated Smith 함수를 계산하였다. Fig. 2.5는 수치적으로 계산된 correlated Smith 함수와 해석적으로 얻어진 uncorrelated Smith 함수 간의 비교를 나타내며, 이를 통해 uncorrelated Smith 함수는 그림자 발생을 과소추정함을 알 수 있다. 결과적으로, 조영비의 이론적 추정치가 Smith 함수이므로, 조영비와 Smith 함수의 곡선 적합(curve fitting)을 통해 각 방위각 방향에 대한 평균표면경사(mean surface slope) $w_{est}(\theta)$가 추정된다.

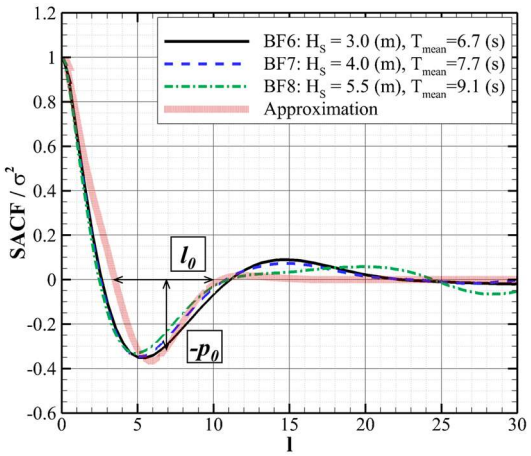


Fig. 2.4 Comparison of the numerically evaluated spatial autocorrelation functions with the estimation by Eq. (2.6)

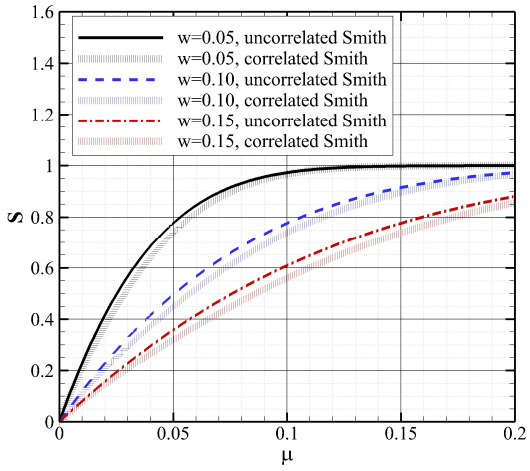


Fig. 2.5 Comparison of uncorrelated and correlated Smith functions

2.2.3 총표면경사 추정

조영비와 Smith 함수의 최적화를 통해 추정된 각 방위각 방향에 대한 평균표면경사 $w_{est}(\theta)$로부터 해면의 총표면경사(total mean surface slope, w_{total})를 계산한다. Gangeskar (2014)는 총표면경사를 추정하는 단순한 방법으로 모든 방향에 대해 얻어진 평균표면경사에 RMS 평균을 취하는 다음의 추정식을 제안하였다.

$$w_{total} = \mathrm{RMS}\left\{ w_{est}\left(\theta\right) \right\} \tag{2.7}$$

반면 본 연구에서는 평균표면경사의 직교성을 반영할 수 있는 추정식을 활용한다. 이때 직교성이란, 임의의 수직한 두 방향의

평균표면경사의 제곱합과 총표면경사의 제곱이 일치함을 의미한다 (부록 B 참조). 이에 기반하여 본 논문에서 제시하는 총표면경사 추정식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} &w_{total} = \mathrm{RMS}\left\{\hat{w}_{total}\left(\theta\right)\right\} \\ &\text{where } \hat{w}_{total}\left(\theta\right) = \sqrt{w_{est}\left(\theta\right)^2 + w_{est}\left(\theta + \pi/2\right)^2}. \end{aligned} \tag{2.8}$$

2.2.4 유의파고 계산

평균표면경사를 포함한 여러 해상 요소들 간의 물리적 관계에 따라 유의파고가 추정되었다. 본 연구에서는 해양 스펙트럼의 전체적인 특성을 반영할 수 있는 추정식을 제시한다. 우선 여러 해상 요소의 스펙트럼 모멘트(spectral moment)를 활용한 표현식으로부터, 다음의 관계가 성립함을 보일 수 있다.

$$\begin{aligned} &w_{total} = \frac{\pi^2 H_S}{g T_4^2} \\ &\text{where } H_S = 4\sqrt{m_0},\ w_{total} = \sqrt{\frac{m_4}{g^2}},\ and\ T_4 = 2\pi\left(\frac{m_0}{m_4}\right)^{1/4}. \end{aligned} \tag{2.9}$$

이때, m_0와 m_4는 각각 해양 스펙트럼의 0차 및 4차 스펙트럼 모멘트를 의미한다. 식 (2.9)에 따라 유의파고 추정식은 다음과 같이

정의된다.

$$H_S = \frac{g w_{total} T_4^2}{\pi^2}. \tag{2.10}$$

여기서, T_4는 해양 레이더 이미지의 FFT 분석을 통해 얻을 수 있다.

마지막으로, 기존 연구에서(Gangeskar, 2014) 제시한 그림자 기반 유의파고 추정 기법과 본 연구에서 제시한 기법의 차이점이 Table 2.1에 요약되어 있다.

Table 2.1 Comparison between the existing method (Gangeskar, 2014) and the present study for shadowing-based H_S estimation

Designation	**Gangeskar (2014)**	**Present study**
Fitting function	Uncorrelated Smith function	Correlated Smith function
Total mean surface slope estimation	Direct RMS average of the mean surface slope for each direction	Based on the orthogonal property of the mean surface slopes
H_S estimation	Based on the dispersion relation between the sea state parameters $H_S = \frac{g w_{total} T_{mean}^2}{\sqrt{2}\pi}.$	Based on the definitions of the sea state parameters in terms of the spectral moments $H_S = \frac{g w_{total} T_4^2}{\pi^2}.$

2.3 3D-FFT 기반 파랑장 재구성

2.3.1 Mean-shift 변형

Mean-shift 변형 기법은 해양 파랑장과 레이더 이미지 세기의 형태적 차이에 의해 발생하는 소음 효과를 감소시킨다(Zinchenko et al. 2021). 이를 위하여, 주어진 레이더 이미지 세기 ρ_s를 파랑과 유사한 형태를 갖는 ρ_m으로 변형한다.

$$\rho_m(x,y,t) = \begin{cases} \rho_s - \beta_{mean}\rho_{mean} & \text{when } \Omega(x,y,t)=1 \\ 0 & \text{when } \Omega(x,y,t)=0 \end{cases} \quad (2.11)$$
$$\text{where } \rho_{mean} = mean\left[\rho_s(x,y,t)\right] \text{ for } \Omega(x,y,t)=1.$$

여기서, β_{mean}은 경험적으로 결정되는 mean-shift 매개변수를 의미한다. 일반적으로 파고(crest)에 비해 파저(trough)에서 더욱 빈번하게 그림자 효과가 발생하므로, 파랑장 재구성의 정확도를 최대화하는 최적 β_{mean}은 0.85와 0.95 사이의 값을 갖게 됨이 Zinchenko et al. (2021)에 의해 밝혀진 바 있다. 이에 따라, 본 연구에서는 β_{mean}을 0.9로 지정하여 분석에 활용하였다.

2.3.2 에너지 분포 보정

균일한 에너지(분산) 분포를 갖는 해양 파랑장과는 달리, 레이더 이미지 강도에는 그림자 발생의 공간적 특성에 기인하는 불균일한

에너지 분포가 발생한다. 이러한 불균일한 에너지 분포는 재구성된 파랑장에 비물리적인 공간 의존성을 유발하므로, 적절한 보정을 통해 에너지 분포를 균일화 해주는 과정이 요구된다. 본 연구에서는 그림자 발생의 통계적 특성을 활용하여 에너지 분포 보정을 수행하였다.

Mean-shift 변형을 통해 레이더 이미지 세기(ρ_m)가 그림자 효과만이 반영된 파고 분포(ζ_s)와 비례하도록 변형되기 때문에, 이미지 세기 분산의 기댓값을 이론적으로 추정할 수 있다. 추정된 분산을 Smith 분산이라고 부르며, 다음의 수치 적분을 통해 계산할 수 있다(Nam et al., 2022).

$$V\left(\mu(r);w(\theta)\right)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\zeta_0^2\hat{S}\left(\zeta_0,q_0,\mu(r);\sigma,w(\theta)\right)\frac{e^{\left(-\frac{\zeta_0^2}{2\sigma^2}-\frac{q_0^2}{2w^2}\right)}}{2\pi\sigma^3 w}d\zeta_0 dq_0 \tag{2.12}$$

$$\text{where } \zeta_s\left(r,\theta,t\right)=\begin{cases}\zeta\left(r,\theta,t\right) & \text{no shadowing}\\ 0 & \text{shadowing}\end{cases}..$$

결과적으로, 레이더 이미지의 에너지 분포 보정은 레이더 광선의 기울기($\mu(r)$)와 유의파고 추정 과정에서 얻어진 평균표면경사 ($w_{est}(\theta)$)를 활용하여 다음과 같이 수행된다.

$$\rho_c\left(r,\theta,t\right)=\frac{\rho_m\left(r,\theta,t\right)}{\sqrt{V\left(\mu(r);w_{est}(\theta)\right)}}. \tag{2.13}$$

2.3.3 3 차원 고속 푸리에 변환(3D−FFT)

레이더 이미지에 기반한 파랑장 해석을 위하여 동일한 시간 간격으로 계측된 연속 이미지를 분석에 활용한다. 이에 따라, 해양 파랑 스펙트럼 해석을 위해 3차원 고속 푸리에 변환(3D-FFT)을 적용한다. 결과적으로, 3D-FFT를 통해 얻어진 복소수 진폭 및 파워 스펙트럼은 아래와 같다.

$$\rho_c(x,y,t) = \sum_{m=-\frac{M}{2}+1}^{\frac{M}{2}} \sum_{n=-\frac{N}{2}+1}^{\frac{N}{2}} \sum_{j=-\frac{J}{2}+1}^{\frac{J}{2}} A_{mnj} \exp\left[i\left(k_{x,m}x + k_{y,n}y - \omega_j t + \varepsilon_{mnj} \right) \right]$$
$$\text{for } dk_x = \frac{2\pi}{L_x},\ dk_y = \frac{2\pi}{L_y},\ d\omega = \frac{2\pi}{T},\ k_{x,m} = mdk_x,\ k_{y,n} = ndk_y,\ \omega_j = jd\omega \tag{2.14}$$

$$S_{3D}(k_x, k_y, \omega) = \frac{1}{2dk_x dk_y d\omega} \left| A(k_x, k_y, \omega) \right|^2 . \tag{2.15}$$

2.3.4 필터링

레이더 이미지 강도로부터 물리적인 파랑 성분들을 추출하기 위해 계측된 스펙트럼을 필터링하는 과정이 요구된다(Young et al., 1985). 전체 필터링 과정은 고주파 통과 필터(high-pass filter)와 분산관계 기반 필터(dispersion relation-based filter)로 구성되며, 고주파 통과 필터는 다음과 같이 적용된다.

$$S_f\left(k_x,k_y,\omega\right)=\begin{cases}0 & \omega<\kappa_1 d\omega\\ S_{3D}\left(k_x,k_y,\omega\right) & otherwise\end{cases}. \tag{2.16}$$

여기서, κ_1은 경험적으로 결정하는 고주파 통과 필터의 threshold를 의미한다. 다음으로, 분산관계 기반 필터를 통해 해양파의 분산관계식을 만족하는 파랑 성분들을 추출한다.

$$S_f\left(k_x,k_y,\omega\right)=\begin{cases}S_{3D}\left(k_x,k_y,\omega\right) & \omega\in\left[\omega\left(k_x,k_y\right)\pm\kappa_2 d\omega\right]\\ 0 & otherwise\end{cases} \tag{2.17}$$

where $\omega\left(k_x,k_y\right)=\sqrt{gk\tanh\left(kh\right)}+k_x u_c+k_y v_c$, $k=\sqrt{k_x^2+k_y^2}$.

여기서, κ_2는 필터링의 범위를 결정하는 매개변수이며, $\vec{U}=\left(u_c,v_c\right)$는 표층 유속, h는 수심, g는 중력 가속도를 의미한다. 결과적으로, 분산관계 기반 필터링을 통하여 분산 관계식을 거의 만족하는(즉, $\omega\in\left[\omega\left(k_x,k_y\right)\pm\kappa_2 d\omega\right]$) 파랑 성분들을 추출할 수 있다.

2.3.5 변조 전달 함수(MTF)

해양 레이더 이미지에 반영된 여러 변조 효과들이 필터링된 스펙트럼의 고주파 성분의 과대 추정을 야기함에 따라, 필터링 이후에 추가적인 후처리 과정이 요구된다. 이를 위하여, 파수의 멱함수 형태를 갖는 MTF를 활용하여 고주파 성분의 과대 추정을 완화한다(Nieto-Borge et al., 2004).

$$S_f^{(MTF)}\left(k_x,k_y,\omega\right)=S_f\left(k_x,k_y,\omega\right)M\left(k\right)^2$$
$$\text{where } M\left(k\right)^2=\alpha_{MTF}k^{-\beta_{MTF}}. \tag{2.18}$$

이때, α_{MTF}는 스펙트럼 에너지가 해양파의 에너지와 동일하도록 조정하는 비례상수로 유의파고에 따라 결정되는 값이며, β_{MTF}는 고주파 성분의 조정 강도를 의미하는 MTF 지수이다. 최종적으로, 본 연구에서 사용된 파랑장 재구성 관련 매개 변수들이 Table 2.2에 요약되어 있다.

Table 2.2 Empirical parameters related to the wave-field reconstruction

Designation	**Value**
Mean-shift parameter (β_{mean})	0.9
High-pass filtering range (κ_1)	1.0
Dispersion filtering range (κ_2)	2.0
Exponent of MTF (β_{MTF})	0.3

3. 합성 레이더 이미지 해석

3.1 합성 레이더 이미지 생성

본 연구에서는 그림자 기반 유의파고 추정 및 파랑장 재구성 기법의 검증을 위해 합성 레이더 이미지를 활용하였다. 합성 레이더 이미지는 선형파(linear wave) 이론을 통해 생성한 해양 파랑장에 기하학적인 그림자 현상(geometric shadowing effect)을 반영하여 생성되었다(Nieto-Borge et al., 2004; Wijaya et al., 2016). 이 과정에서 표층 유속이 없는 무한 수심 조건을 활용하여 단파봉 불규칙파 $\zeta_{exact}(x,y,t)$를 생성하였다. 파랑 스펙트럼의 묘사를 위해 ITTC 스펙트럼과 $\cos^2$ 방향 분산 함수를 이용하였으며, 전체 에너지의 98.0%에 해당하는 주파수 구간 [ω_{min}, ω_{max}]에 내에서 총 650개의 파랑 성분으로 스펙트럼을 이산화하였다.

합성된 파랑 데이터에 그림자 효과를 반영하여 합성 레이더 미지를 생성하였다. 레이더로부터 r만큼 떨어진 해양 표면에서 그림자의 발생 여부는 [0, r] 구간의 파고와 레이더 안테나 간의 기하학적인 관계에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$\begin{aligned} &\Omega(r,\theta)=\frac{1}{2}\left[1+\operatorname{sgn}\left[\min_{r_i}\left(l_\Omega(r_i,r,\theta)-\zeta_{exact}(r_i,\theta)\right)\right]\right] \qquad \text{for } r_i<r \\ &\text{where } l_\Omega(r_i,r,\theta)=\zeta_{exact}(r,\theta)+(r-r_i)\frac{h_r-\zeta_{exact}(r,\theta)}{r}. \end{aligned} \tag{3.1}$$

여기서 sgn은 부호 함수를 의미하며, $\Omega(r,\theta)=0$은 (r,θ)지점에서 그림자가 발생했음을 나타낸다. 최종적으로, 그림자가 발생한 영역의 이미지 강도를 0으로 두고, 나머지 영역은 [0, 255] 사이의 강도를 갖도록 조정하여 합성 레이더 이미지를 생성한다.

$$\rho_s(r,\theta,t)=\begin{cases}\left[\left(\zeta_{exact}(r,\theta,t)+H_S\right)\times\dfrac{235}{2H_S}\right]+10 & \text{when } \Omega(r,\theta)=1 \\ 0 & \text{when } \Omega(r,\theta)=0\end{cases}. \tag{3.2}$$

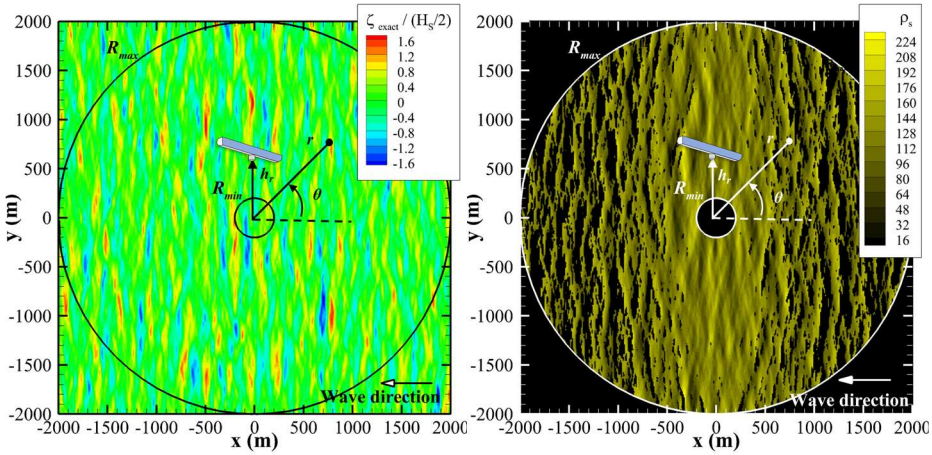
합성 레이더 이미지의 생성과 관련된 여러 매개변수는 Table 3.1에 요약되어 있다. 본 연구에서는 제시된 파랑장 재구성 기법의 검증을 위하여 다양한 해상 상태의 합성 레이더 이미지에 대한 수치적 분석을 수행하였다. 각 해상 상태는 평균주기(T_{mean}), 분산각도(χ_s) 및 유의파고(H_S)에 따라 정의되며, 분석에 활용된 해상 상태는 Table 3.2에 정리되어 있다. Fig. 3.1은 해상상태 조건 H_S=6.0m, T_{mean}=9.0s, χ_s=60.0deg에 대해 생성된 합성 파랑장 및 합성 레이더 이미지를 나타낸다.

Table 3.1 Parameters used in the generation of synthetic radar images

Designation	**Value**
Radar height (h_r)	40.0 m
Minimum sensing radius ($R_{\min}$)	200.0 m
Maximum sensing radius ($R_{\max}$)	2000.0 m
Spatial resolution (dx=dy)	10.0 m
Length of the time window (T)	100.0 s
Time interval (dt)	1.0 s

Table 3.2 List of sea states utilized for the numerical tests

Mean wave period (T_{mean})	Spreading angle (χ_s)	Significant wave height ($H_{S,exact}$)
9.0 s	60.0 deg	2.0 m, 3.0 m, 4.0 m, 5.0 m, 6.0 m
	90.0 deg	2.0 m, 3.0 m, 4.0 m, 5.0 m, 6.0 m
12.0 s	60.0 deg	2.0 m, 3.0 m, 4.0 m, 5.0 m, 6.0 m
	90.0 deg	2.0 m, 3.0 m, 4.0 m, 5.0 m, 6.0 m
15.0 s	60.0 deg	2.0 m, 3.0 m, 4.0 m, 5.0 m, 6.0 m
	90.0 deg	2.0 m, 3.0 m, 4.0 m, 5.0 m, 6.0 m



(a) Synthetic wave data (b) Synthetic radar image

Fig. 3.1 Synthetic wave elevation and the corresponding synthetic radar image ($H_{S,exact}$=4.0m, T_{mean}=9.0s, χ_s=60.0deg)

3.2 유의파고 추정

3.2.1 평균표면경사 추정

Fig. 3.2는 합성 레이더 이미지로부터 추정된 조영비의 분포를 나타낸다. 이때, 합성 레이더 이미지에 대한 해석 시 그림자 발생 영역과 나머지 영역이 명확히 구분되므로, 별도의 그림자 영역 구분 과정을 수행하지 않았다. Fig. 3.2에 나타난 바와 같이, up-wave 방향의 조영비가 cross-wave 방향에서보다 작게 나타나는 경향을 확인할 수 있다. 각 방위각 방향의 평균표면경사는 관측된 조영비와 Smith 함수의 곡선 적합을 통해 추정되며, 본 연구에서는 비선형 최적화를 위해 golden section search 기법을 활용하였다. Fig. 3.3은 합성 레이더 이미지로부터 추정된 조영비와 최적화를 통해 얻어진 Smith 함수를 레이더 광선의 기울기 μ를 x축으로 하여 나타낸 그림이다. 여기서, “w/o SACF”는 uncorrelated Smith 함수를 나타내며(Smith, 1967), “w/ SACF”는 correlated Smith 함수를 나타낸다(Bourlier et al. 2002). 결과적으로, 두 Smith 함수 모두 합성 레이더 이미지로부터 추정된 조영비와 정확도 높은 곡선 적합이 가능함을 확인할 수 있다.

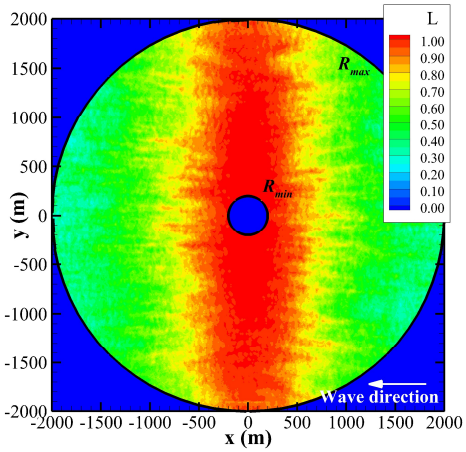


Fig. 3.2 Estimated illumination ratio ($H_{S,exact}$=4.0m, T_{mean}=9.0s, χ_s=60.0deg)

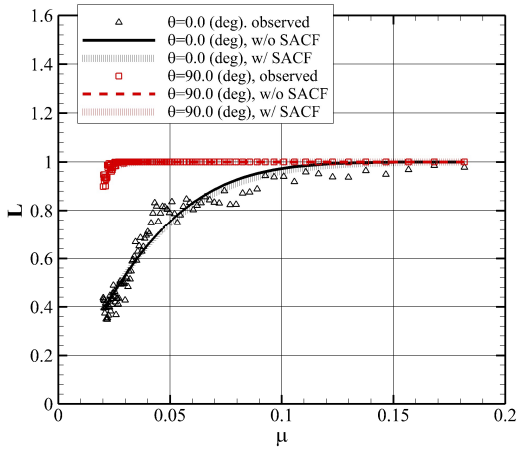
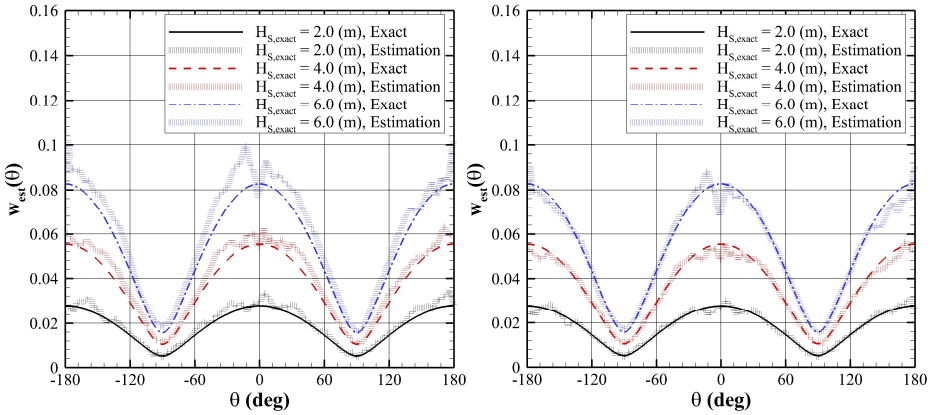


Fig. 3.3 Fitting with Smith function ($H_{S,exact}$=4.0m, T_{mean}=9.0s, χ_s=60.0deg)

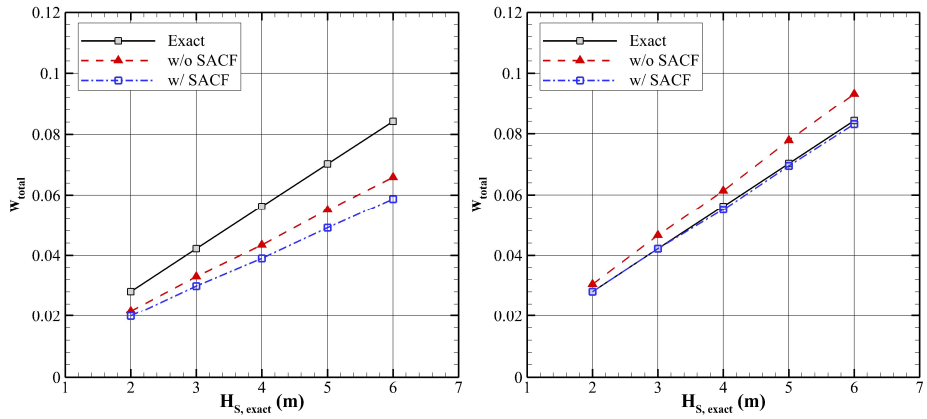
Fig. 3.4는 uncorrelated Smith 함수와 correlated Smith 함수를 활용해 추정된 평균표면경사(w_{est})를 나타낸다. 함께 도시된 실제 평균표면경사는 합성 레이더 이미지 생성에 활용된 파랑 스펙트럼의 해석 적분을 통해 결정되었다(부록 B 참조). Fig. 3.4(a)에서 uncorrelated Smith 함수를 활용하여 추정 시 평균표면경사가 과대평가됨을 확인할 수 있다. 이는 uncorrelated Smith 함수가 그림자 발생을 과소 추정함에 따라, 조영비 곡선 적합 시 실제 평균표면경사보다 더 큰 추정치를 얻게 되기 때문이다. 반면, correlated Smith 함수는 해양 파랑장의 공간상 자기 상관 효과를 보다 엄밀하게 반영할 수 있으므로, 평균표면경사의 정확한 추정이 가능하다. 결과적으로, 평균표면경사 추정 시 correlated Smith 함수를 활용하면 추정 정확도가 유의미하게 향상됨을 Fig. 3.4(b)에서 확인할 수 있다.

다음으로, 각 방향에 대해 추정된 $w_{est}(\theta)$을 활용하여 총표면경사 w_{total}를 계산하였다. Fig. 3.5a는 총표면경사 계산 시 직교성을 고려하지 않는 경우(식 2.7)를, Fig. 3.5b는 직교성을 고려하는 경우(식 2.8)의 추정 결과를 나타낸다. 결과적으로, 정확한 총표면경사 추정을 위해 해면의 SACF 효과 및 평균표면경사의 직교성을 고려해야 함을 알 수 있다.



(a) w/o SACF (b) w/ SACF

Fig. 3.4 Estimated mean surface slope (T_{mean}=9.0s and χ_s=60.0deg)



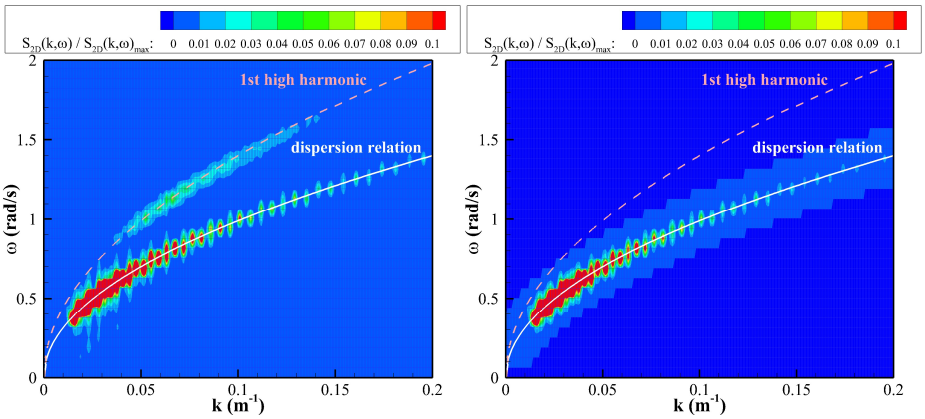
(a) w/o orthogonality (b) w/ orthogonality

Fig. 3.5 Estimated total mean surface slope (T_{mean}=9.0s and χ_s=60.0deg)

3.2.2 스펙트럼 해석

재구성된 3차원 파랑 스펙트럼 $S_{3D}(k_x,k_y,\omega)$은 연속 레이더 이미지를 3D-FFT를 활용해 주파수 영역으로 변환 후 필터링과 MTF로 구성된 후처리 과정을 적용하여 얻어진다. 이후 스펙트럼에 대한 적분을 통해 파랑의 특성에 대한 직관적인 분석이 가능한 1D 및 2D 스펙트럼을 계산하였다. Fig. 3.6은 3차원 스펙트럼 $S_{3D}(k_x,k_y,\omega)$를 파랑 성분들의 진행 방향에 대해 적분하여 구한 2차원 파랑 스펙트럼 $S_{2D}(k,\omega)$을 나타낸다. Fig. 3.6(a)로부터 레이더 이미지에 반영된 여러 비물리적 효과들로 인하여, 계측된 스펙트럼에는 분산관계식을 따르지 않는 비물리적인 성분들이 포함되어 있으며 고주파 성분 역시 과대추정됨을 알 수 있다. 반면 Fig. 3.6(b)는 재구성된 2D 파랑 스펙트럼을 나타내며, 비물리적 효과들이 제거되었음을 확인할 수 있다.

다음으로, 여러 해상 상태에서 1D 파랑 스펙트럼의 고주파 성분 발생 경향을 분석하였다. 본 연구에서는 모든 해상 상태에 동일한 MTF를 적용하였기 때문에, 파랑 스펙트럼 분석의 정확도는 해상 상태에 대한 의존성을 갖게 됨을 Fig 3.7로부터 확인할 수 있다. 이는 $H_{S,exact}$가 증가함에 따라 더욱 강한 그림자 효과가 발생하고, 그 결과 고주파 성분의 과대평가 역시 증가하기 때문이다. 하지만 이러한 해상 상태의 영향은 제한적이었으며, 결론적으로 본 연구에서 활용한 모든 해석 조건에서 신뢰도 높은 스펙트럼 해석이 가능함을 확인할 수 있다.



(a) w/o filtering, w/o MTF (b) w/ filtering, w/ MTF

Fig. 3.6 2D wave spectrum $S_{2D}(k,\omega)$ obtained by 3D-FFT-based spectral analysis ($H_{S,exact}$=4.0m, T_{mean}=9.0s and χ_s=60.0deg)

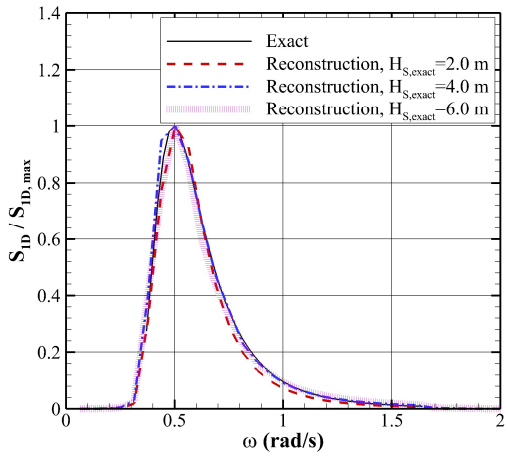
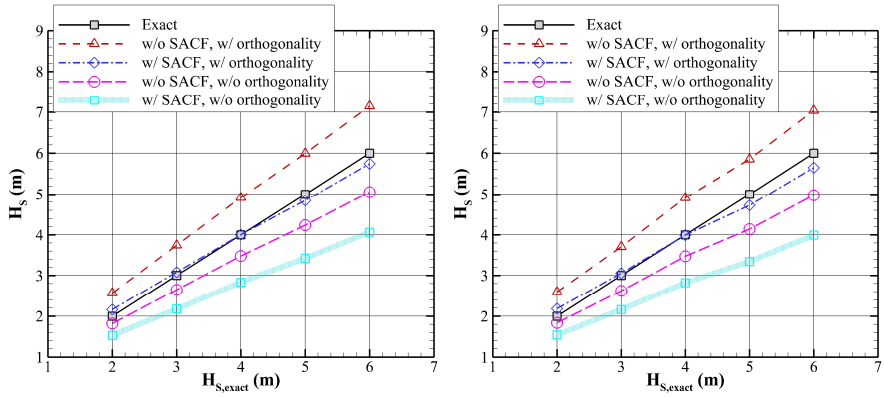


Fig. 3.7 Normalized 1D wave spectrum $S_{1D}(\omega)$ obtained by 3D-FFT-based spectral analysis (T_{mean}=9.0s and χ_s=60.0deg)

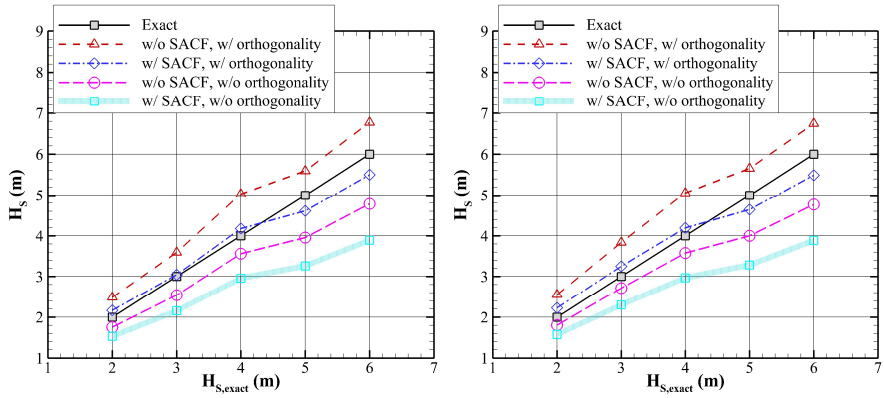
3.2.3 유의파고 추정 결과

최종적으로, 다양한 해상 상태 조건에서 추정된 w_{total} 및 T_4를 활용하여 계산한 유의파고가 Fig. 3.8에 도시되어 있다. 이 결과로부터, 해양 파랑장의 물리적 특성에 대한 엄밀한 고려를 통해 유의파고 추정 정확도가 유의미하게 향상됨을 확인할 수 있다(w/ SACF, w/ orthogonality). 스펙트럼 해석이 해상 상태에 약하게 의존함에 따라, 유의파고 추정 정확도 역시 $H_{S,exact}$에 따라 변화하였다. 그러나 T_{mean}이 큰 경우, 스펙트럼 해석의 수치적 수렴성이 감소하므로 $H_{S,exact}$에 따른 유의파고 추정 정확도의 의존성이 명확하지 않았다. 전체적으로, 본 연구에서 제시하는 SACF 및 평균표면경사의 직교성을 고려한 추정(w/ SACF, w/ orthogonality)의 정확도는 해석에 활용된 해상 상태 전체에서 약 ±8%로 나타났다.



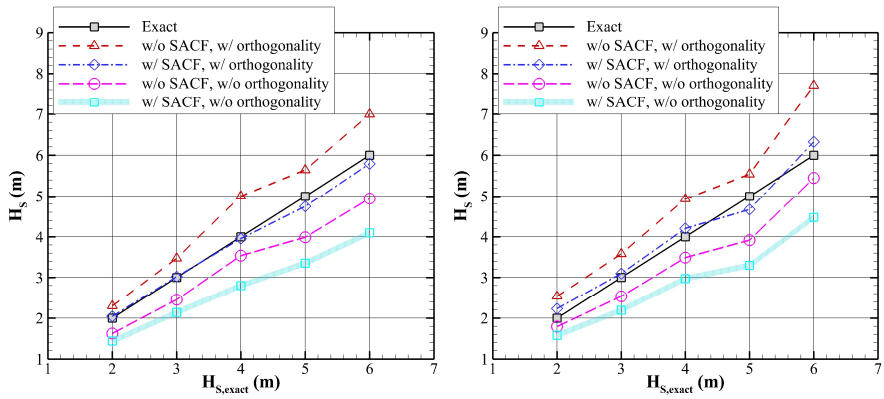
(a) T_{mean} = 9.0s, χ_s = 60.0deg

(b) T_{mean} = 9.0s, χ_s = 90.0deg



(c) T_{mean} = 12.0s, χ_s = 60.0deg

(d) T_{mean} = 12.0s, χ_s = 90.0deg



(e) T_{mean} = 15.0s, χ_s = 60.0deg

(f) T_{mean} = 15.0s, χ_s = 90.0deg

Fig. 3.8 H_S estimation result for various sea states

3.3 파랑장 재구성

3.3.1 에너지 분포 보정

그림자의 효과에 의해 발생하는 이미지 강도와 해양 파랑장 간에 특징적인 차이가 발생함에 따라 레이더 이미지 자체에 대한 보정이 요구된다. 먼저, 레이더 이미지와 해양 파랑장 간의 형태적인 차이를 완화하기 위해 mean-shift 보정을 수행된다($\rho_s \rightarrow \rho_m$). 그러나, mean-shift 보정 이후에도 그림자 발생의 공간적 특성에 기인하는 불균일한 분산 분포가 관측되며, 이러한 분산 분포의 이론적 추정치는 Smith 분산임이 밝혀져 있다(Nam et al., 2022). Fig. 3.9는 Fig. 3.1(b)에 주어진 합성 레이더 이미지로부터 추정된 분산 분포와 Smith 분산의 비교를 나타낸다. 유한한 계측 시간에 기인하는 수치적 불확실성에 의하여 관측된 분산 분포는 진동하는 특성이 나타났으나, 분산의 전체적인 변화 경향과 Smith 분산은 일치하였다. 이로부터 Smith 분산을 활용하여 이미지 강도 분산에 대한 이론적 추정이 가능함을 알 수 있다.

본 연구에서는 3D FFT 기반 파랑장 재구성을 적용하기에 앞서 에너지 분포에 대한 추가적인 보정을 통해 이미지 강도의 불균일한 에너지 분포를 완화하였다($\rho_m \rightarrow \rho_c$). Fig. 3.10은 에너지 분포 보정 전·후의 이미지 강도 분포를 나타낸다. 각 이미지 강도의 분산 분포는 Fig. 3.11에 주어진 바와 같으며, 에너지 분포 보정을 통해 균일한 분산 분포를 갖는 보정된 이미지 강도를 얻게 됨을 확인할

수 있다.

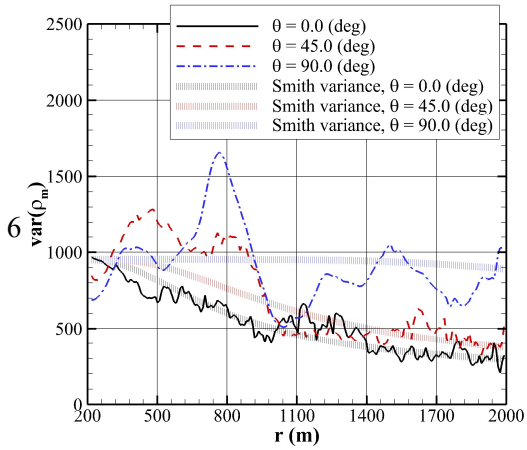
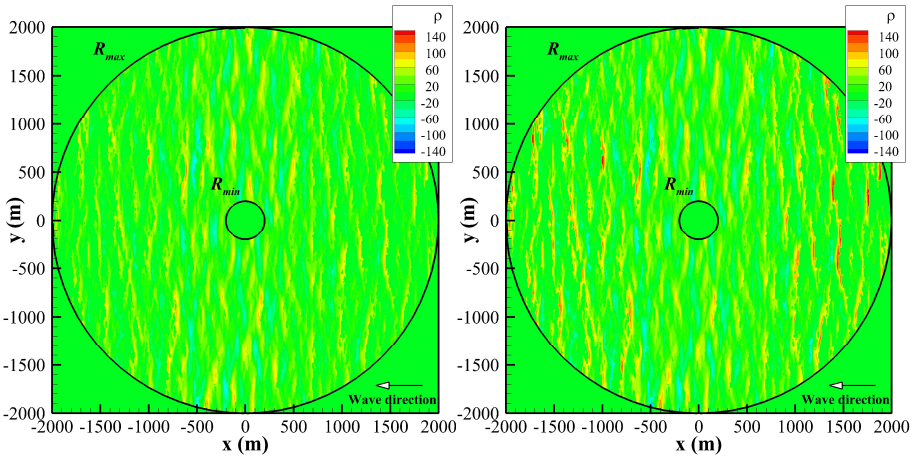
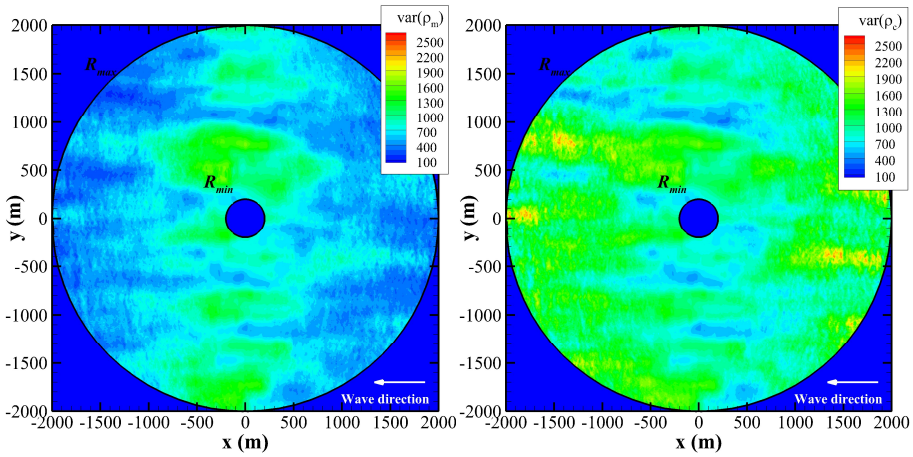


Fig. 3.9 Variance distribution along the radial direction ($H_{S,exact}$=4.0m T_{mean}=9.0s and χ_s=60.0deg)



(a) w/o calibration (ρ_m) (b) w/ calibration (ρ_c)

Fig. 3.10 Modified radar image intensity at t=T/2 ($H_{S,exact}$=4.0m, T_{mean}=9.0s and χ_s=60.0deg)



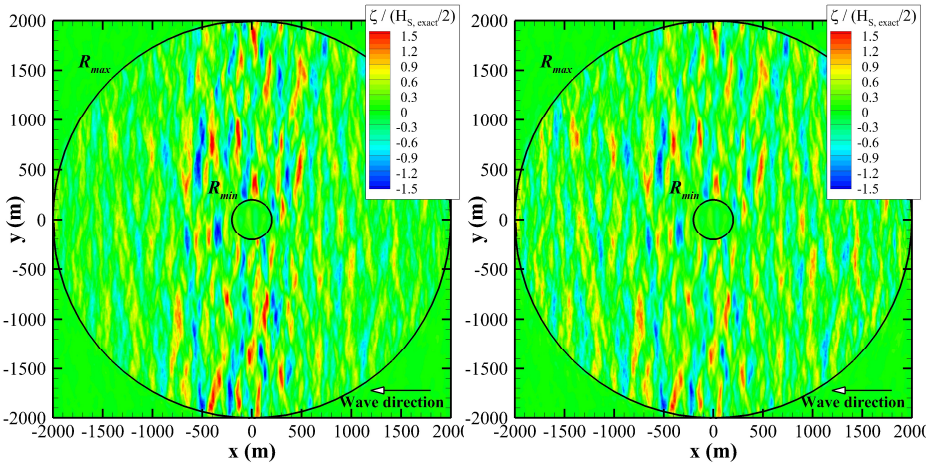
(a) w/o calibration (ρ_m) (b) w/ calibration (ρ_c)

Fig. 3.11 Observed variance distribution ($H_{S,exact}$=4.0m, T_{mean}=9.0s and χ_s=60.0deg)

3.3.2 재구성 결과

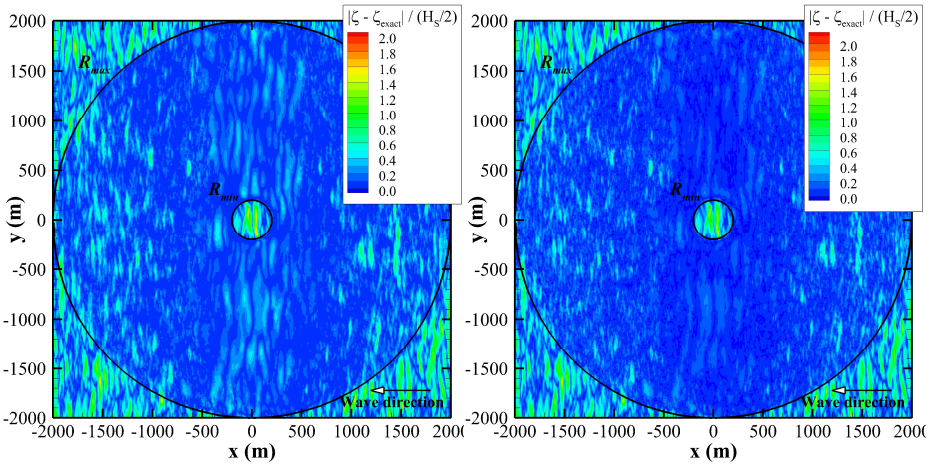
Fig. 3.12는 3D-FFT 기반 해석을 통해 얻어진 재구성된 파랑장을 나타낸다. 본 연구에서는 에너지 분포 보정의 효과만을 살펴보기 위하여 실제 H_S를 스펙트럼 에너지 조정에 활용하였다. 합성 파랑장과 비교했을 때, 에너지 분포 보정 없이 재구성된 파랑장(Fig. 3.12(a))의 경우, cross-wave 방향의 파고가 과대 추정되는 반면 up-wave 방향의 파고는 과소 추정되는 경향을 확인할 수 있다. 이러한 재구성된 파랑의 비물리적인 공간 의존성을 통해, 기존 연구에서 활용된 파랑장 재구성 기법(Nieto-Borge et al. 2004)은 불균일한 에너지 분포를 효과적으로 제거할 수 없음을 추론할 수 있다. Fig.

3.12(b)에 나타난 바와 같이 재구성된 파랑장의 공간 의존성은 에너지 분포 보정을 통해 크게 완화되었다. 하지만, 에너지 분포 보정 후에도 재구성된 파랑장에 약한 공간 의존성이 남아 있음이 함께 확인되었다. 이는 보정의 대상이 되는 이미지 강도가 파랑장 재구성을 통해 제거될 여러 비물리적인 성분을 포함하고 있기 때문이다. Fig. 3.13은 *t=T/2* 시점의 재구성된 파랑장과 실제 파랑장의 차이를 나타내며, 에너지 분포 보정을 통해 계측 영역 내의 파랑장 재구성의 정확도가 전반적으로 향상됨을 확인할 수 있다.



(a) w/o calibration (b) w/ calibration

Fig. 3.12 Reconstructed wave elevation at t=*T/2* ($H_{S,exact}$=4.0m, T_{mean}=9.0s and χ_s=60.0deg)



(a) w/o calibration (b) w/ calibration

Fig. 3.13 Error distribution at $t=T/2$ ($H_{S,exact}$=4.0m, T_{mean}=9.0s and χ_s=60.0deg)

본 연구에서는 파랑장 재구성 정확도를 정량적으로 평가하기 위해, 계측 범위 내에서 재구성된 파고(ζ_{re})와 실제 파고(ζ_{wave}) 간의 RMS 오차(RMS) 및 상관계수(Cor)를 아래와 같이 계산하였다.

$$\mathrm{RMS}(t)=\sqrt{\frac{1}{MN}\sum_{m=0}^{M-1}\sum_{n=0}^{N-1}\left(\zeta_{re}\left(x_m,y_n,t\right)-\zeta_{exact}\left(x_m,y_n,t\right)\right)^2}. \tag{3.3}$$

$$\mathrm{Cor}(t)=\frac{\sum_{m=0}^{M-1}\sum_{n=0}^{N-1}\left(\zeta_{re}\left(x_m,y_n,t\right)-\mu_{re}\right)\left(\zeta_{exact}\left(x_m,y_n,t\right)-\mu_{exact}\right)}{\sqrt{\left(MN\sigma_{re}\right)^2\left(MN\sigma_{exact}\right)^2}}. \tag{3.4}$$

이때, μ_{re}와 μ_{exact}는 각각 재구성된 파고와 실제 파고의 평균을 나타내며, σ_{re}와 σ_{exact}는 파고의 표준편차를 의미한다. Fig. 3.14는 파랑장 재구성 정확도의 정량적인 분석 결과를 나타내며, 이를 통해

에너지 분포 보정을 적용 시 파랑장 재구성 정확도가 향상됨을(즉, RMS 증가, Cor 감소) 확인할 수 있다.

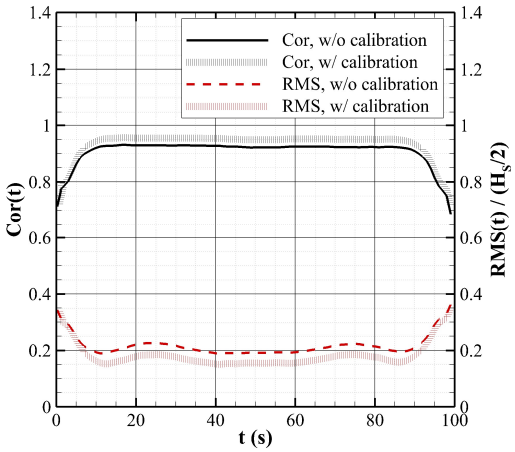
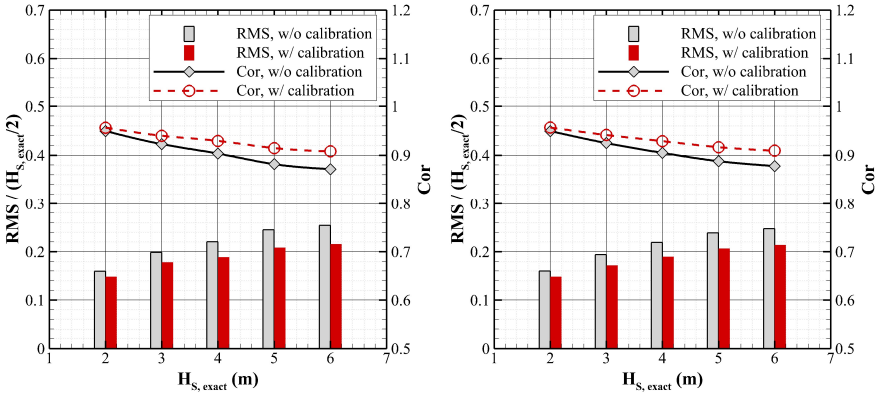
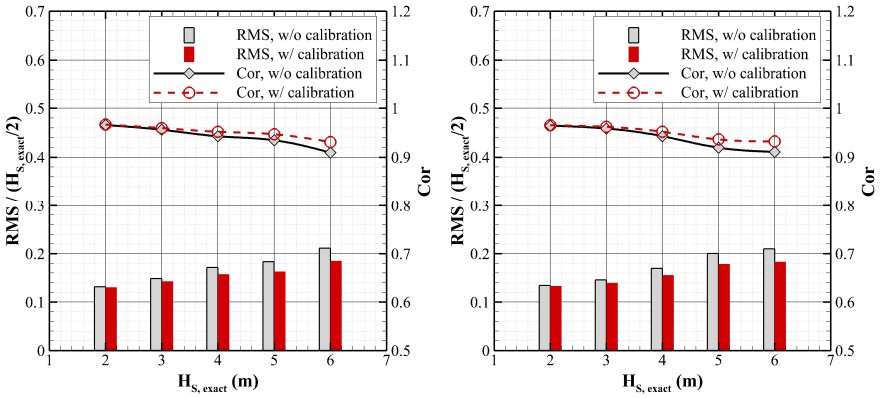


Fig. 3.14 Accuracy of wave-field reconstruction ($H_{S,exact}$=4.0 m, T_{mean}=9.0 s and χ_s=60.0 deg)

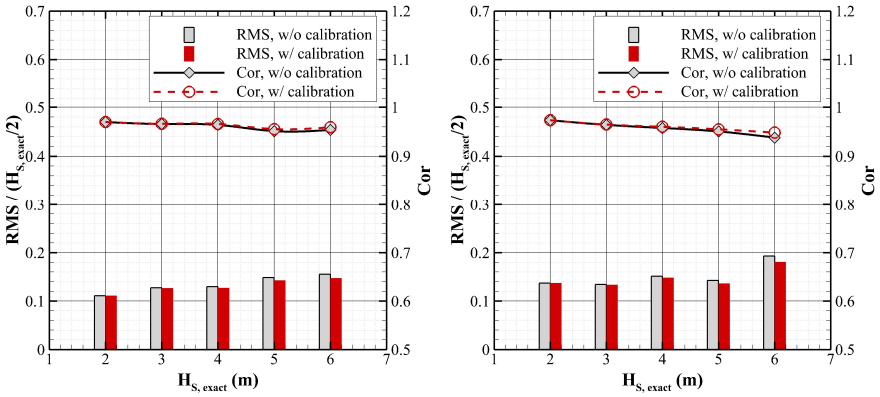
제시된 기법의 검증을 위해 다양한 해상상태에 대한 추가적인 분석이 수행되었으며, Fig. 3.15는 다양한 해상 상태에서 평가된 RMS와 Cor의 전체 계측 시간에 대한 평균을 나타낸다. $H_{S,exact}$가 증가함에 따라 레이더 이미지에 반영된 그림자 효과가 강해지면서 재구성 정확도에 두 가지의 상반된 효과를 야기한다. 우선, $H_{S,exact}$가 증가하면 파랑 계측이 이뤄지지 않는 영역이 늘어나기 때문에 파랑장 재구성의 정확도가 악화된다. 이와 동시에, 이미지 강도의 분산 분포 불균형이 심화하므로 에너지 보정의 효과가 향상된다. 결론적으로, 제시된 에너지 분포 보정 기법을 통해 다양한 해상 상태에서 파랑장 재구성 정확도가 향상됨을 확인하였다.



(a) T_{mean} = 9.0s, χ_s = 60.0deg (b) T_{mean} = 9.0s, χ_s = 90.0deg



(c) T_{mean} = 12.0s, χ_s = 60.0deg (d) T_{mean} = 12.0s, χ_s = 90.0deg



(c) T_{mean} = 15.0s, χ_s = 60.0deg (d) T_{mean} = 15.0s, χ_s = 90.0deg

Fig. 3.15 Accuracy of wave-field reconstruction for the various sea states

4. 실해역 레이더 이미지 해석

4.1 데이터셋 정의

그림자 효과만을 고려하여 생성한 합성 레이더 이미지와 달리, 실제 레이더 이미지에는 계측 과정에서 발생하는 소음, 이미지 강도의 거리 의존성 등 추가적인 비물리적 현상이 반영되어 있다. 따라서, 실해역 레이더 이미지에 대하여 본 연구에서 제시된 파랑장 재구성 기법의 추가적인 검증을 수행하였다. 해석에 활용된 실제 레이더 이미지는 계측 시점 및 장소에 따라 이어도 데이터셋과 NIMS 데이터셋으로 구분된다.

4.1.1 이어도 데이터셋

이어도 데이터셋은 이어도 해양과학기지에서 2008년 6월 15일에 20분 간격으로 계측된 72개의 이미지 세트로 구성되어 있다. 파랑 레이더의 설치 높이는 해수면으로부터 35m였다. 각 이미지 세트는 64장의 이미지로 이루어져 있으며, 레이더의 회전 주기는 1.277s였다. 레이더의 최대 계측 반경은 2050.0m 이며 공간상의 계측 해상도는 6.0m였다. 본 연구에서는 해양과학기지에 설치된 조위계에서 독립적으로 계측된 유의파고 값을 검증에 활용하였다. Fig. 4.1은 이어도 해양과학기지의 모습을 나타내며, 구조물 상단부에 설치된 해양 레이더의 모습을 확인할 수 있다.

Fig. 4.1 Ieodo ocean research station

4.1.2 NIMS 데이터셋

NIMS 데이터셋은 연구용 선박인 기상 1호(IMO 9588550)가 우리나라 서해에서 2022년 10월 16일 18:00부터 17일 12:30까지 계측한 레이더 이미지로 구성된다(제공: 국립기상과학원). 전체 데이터셋은 총 232개의 이미지 세트로 구성되어 있으며, 각 이미지 세트는 시간 간격이 2.5s인 32장의 이미지로 이루어져 있다. 해양 레이더는 선박의 흘수선에서 11.5m 높이에 설치되어 있으며 계측 반경은 약 1.26km였다. 해석 결과의 검증을 위하여 기상 1호에 설치된 상용 파랑 레이더 시스템(WaveX)의 유의파고 추정치와, 계측 지점에서 약 1.5km 떨어진 지점에 위치한 녹도 파고 부이의 유의파고 계측값을 활용하였다. Fig. 4.2는 기상 1호의 모습과 선박에

설치된 해양 레이더를 나타내며, 계측이 이뤄진 해역의 위치를 Fig. 4.3에서 확인할 수 있다.

Fig. 4.2 Research vessel Gisang 1 (from www.climate.go.kr/)

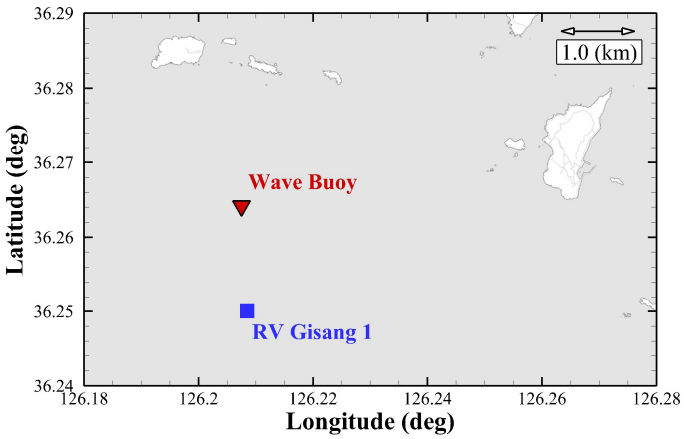


Fig. 4.3 GPS record of RV Gisang 1 and Nokdo wave buoy.

4.2 유의파고 추정 결과

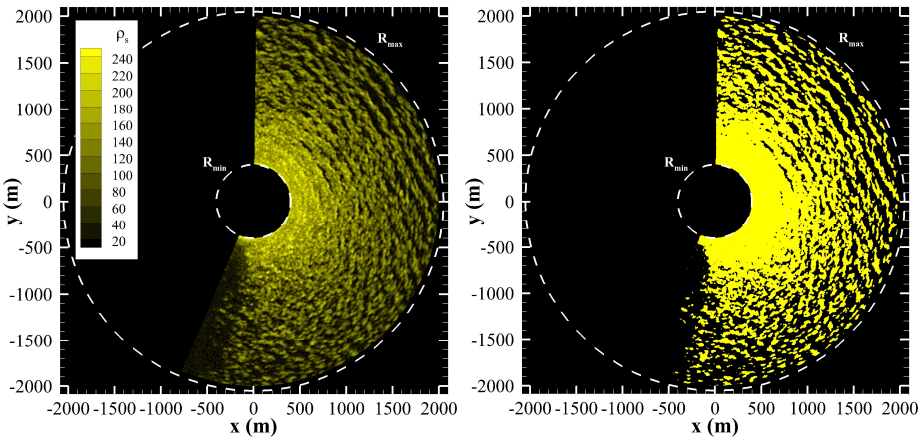
본 연구에서는 실해역 레이더 이미지에 대하여 유의파고 추정 기법의 검증만을 수행하였으며, 그 이유는 다음과 같다. 첫째, 위상 분해 파랑장 재구성의 검증을 위해 요구되는 실해역 파고 데이터 획득이 제한적이다. 레이더 계측 영역 전체의 파고 분포를 동시에 계측하기 위해서는 수많은 파고 부이를 동원해야 하므로, 계측을 위해 큰 비용이 발생하기 때문이다. 둘째, 실제 레이더 이미지에 반영된 비물리적 현상들로 인하여 이미지 강도의 분산이 Smith 분산과 큰 차이가 있다. 이러한 한계점들에 의하여 실제 레이더 이미지에 대한 에너지 분포 보정은 향후 연구에서 다뤄질 예정이다.

4.2.1 이어도 데이터셋 해석 결과

본 연구에서는 임계값 기반 구분 기법을 활용하여 레이더 이미지 내 그림자 영역을 구분하였다. Fig. 4.4는 이어도 데이터셋의 레이더 이미지(Fig. 4.4a)와, 해당 이미지로부터 구분된 그림자 영역의 분포(Fig. 4.4b)를 나타낸다. 이를 통해, 레이더 주위의 이미지 강도가 상대적으로 과대평가됨에 따라 레이더 주위(r < ~800.0m)에서는 그림자 발생이 보수적으로 추정됨을 확인할 수 있다.

Fig 4.5는 두 개의 직교 방위각에 대해 실제 레이더 이미지로부터 추정된 조영비와 Smith 함수의 곡선 적합 결과를 나타낸다. 본 연구에서는 이미지 강도의 거리 의존성에 의해 발생하는 효과를

배제하기 위하여 레이더 광선의 입사각이 작은 영역(μ < 0.03)에 대해 곡선 적합을 수행하였다. 결과적으로, 조영비와 Smith 함수가 잘 일치함을 확인할 수 있다.



(a) Input radar image (b) Shadowing mask

Fig. 4.4 Real radar image of Ieodo dataset and the corresponding shadowing mask (collected at 14:00 on 06/15/2008)

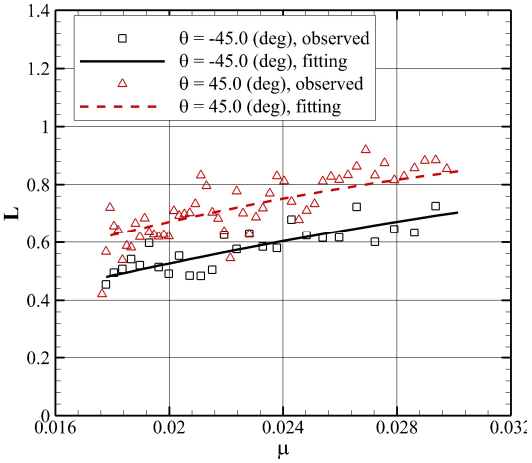


Fig. 4.5 Fitting with Smith function for Ieodo dataset (collected at 14:00 on 06/15 2008)

다음으로, 3D-FFT 기반 스펙트럼 영역 해석을 수행하였다. 이때, 실해역에서 레이더 계측 시 발생하는 추가적인 비물리적인 효과에 의하여 파랑 스펙트럼의 고주파 성분이 더욱 과대 추정되므로, 합성 레이더 이미지 해석 시보다 큰 MTF 지수(β_{MTF} = 1.0)를 해석에 활용하였다. Fig. 4.6은 실해역 레이더 이미지의 스펙트럼 해석을 통해 얻은 2차원 파랑 스펙트럼 $S_{2D}(k,\omega)$을 나타내며, 대부분의 스펙트럼 에너지가 분산관계식 주변 영역에 집중되어 있음을 확인할 수 있다. 최종적으로, 유의파고 추정에 활용되는 T_4는 재구성된 파랑 스펙트럼의 수치 적분을 통해 계산되었다.

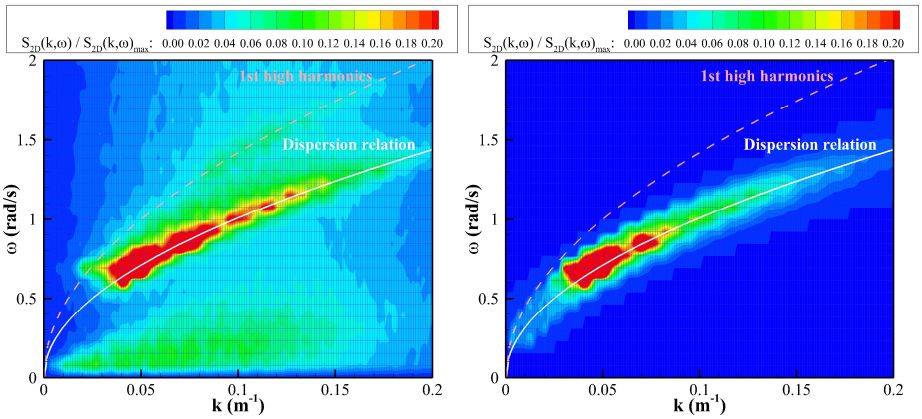


Fig. 4.6 2D wave spectrum $S_{2D}(k,\omega)$ obtained from Ieodo datset (collected at 04:00 on 06/15 2008).

마지막으로, 조영비로부터 추정된 총표면경사와 3D-FFT를 활용해 추정한 T_4를 활용하여 실해역 유의파고를 계산하였다. Fig. 4.5는 레이더 이미지로부터 추정된 유의파고와 해양과학기지에 설치된 조위계의 계측치 간의 비교를 나타낸다. 이때, 유의파고 추정 시 해면의 SACF 효과와 평균표면경사의 직교성을 모두 고려하였다. 결론적으로, 그림자 기반 유의파고 추정 기법을 활용하여 정확도 높은 실해역 유의파고 추정이 가능함을 확인할 수 있다.

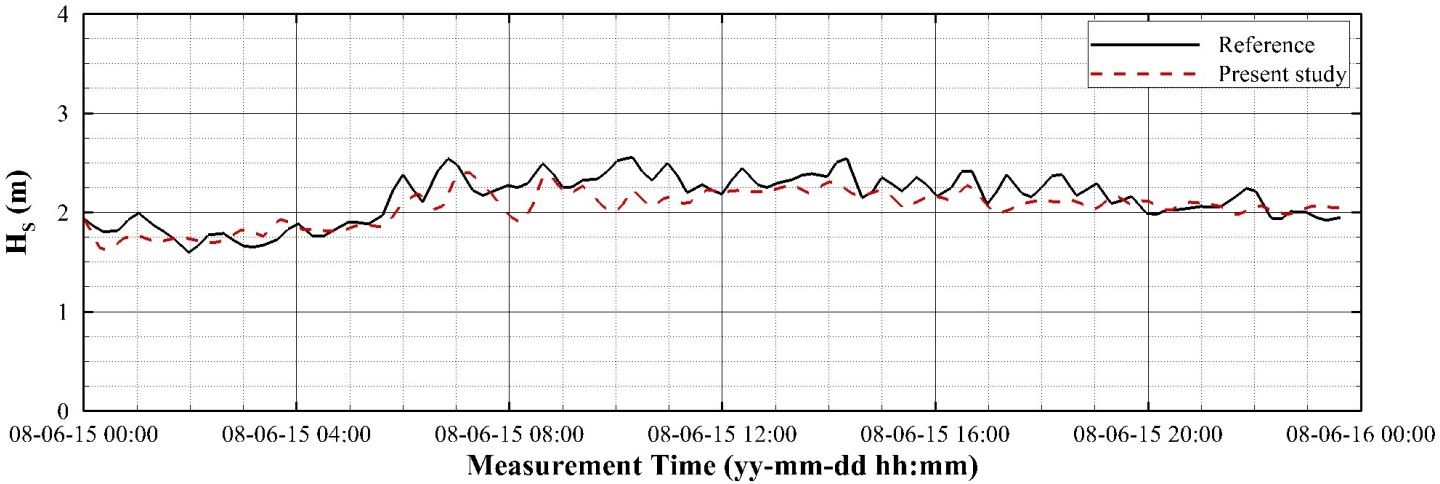
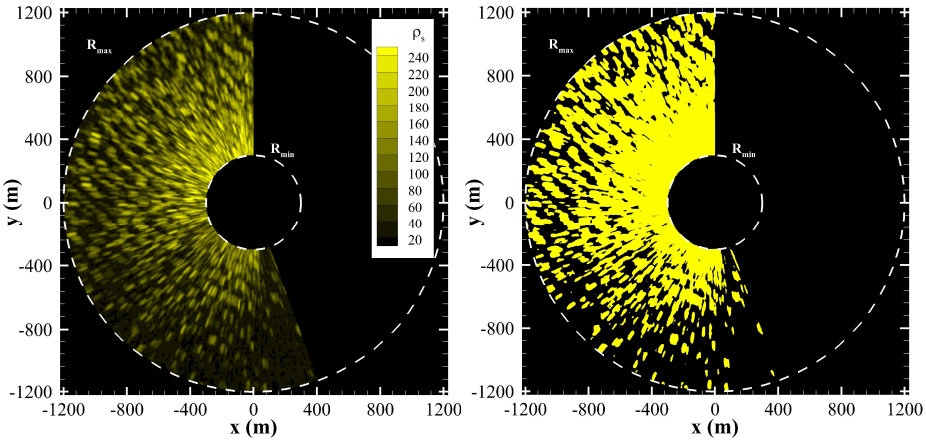


Fig. 4.7 Comparison of significant wave height estimation result and independent reference measurement (Ieodo dataset).

4.2.2 NIMS 데이터셋 해석 결과

NIMS 데이터셋 역시 해석 과정에서 임계값 기반 그림자 영역 구분 기법을 적용하였다. Fig. 4.8은 NIMS 데이터셋의 레이더 이미지와, 해당 이미지로부터 구분된 그림자 영역을 나타낸다. NIMS 데이셋의 레이더의 높이(11.5m)가 이어도 데이터셋(35.0m)보다 낮기 때문에, 최대 계측 반경이 상대적으로 작게 나타났다. 그러나 전반적인 이미지 강도의 발생 경향은 유사하였고, 이에 따라 이어도 데이터셋과 동일한 그림자 영역 구분 과정을 적용하였다. 그 결과, 구분된 그림자 영역으로부터 NIMS 데이터셋 역시 이미지 강도의 거리 의존성에 의하여 레이더 주위(r < ~500.0m)의 그림자 발생이 보수적으로 추정됨을 확인할 수 있다.

다음으로, 레이더 이미지를 활용하여 평균표면경사 추정 및 3D-FFT 기반 스펙트럼 영역 해석을 수행하였다. 먼저, 그림자 영역으로부터 조영비를 평가하고, 조영비와 Smith 함수의 곡선 적합을 통해 해면의 평균 표면 경사를 추정하였다. Fig 4.9는 조영비와 Smith 함수의 곡선 적합 결과를 나타낸다. 이미지 강도의 거리 의존성에 기인하는 그림자 과소 추정의 효과를 배제하기 위하여, 레이더 광선의 입사각이 작은 영역(μ < 0.03)에 대해 곡선 적합을 수행하였다. 아울러, 3D-FFT 기반 스펙트럼 해석을 수행하였고, 이를 통해 얻어진 2D 스펙트럼 $S_{2D}(k,\omega)$를 Fig 4.10에서 확인할 수 있다.



(a) Input radar image (b) Shadowing mask

Fig. 4.8 Sample real radar image of NIMS dataset and corresponding shadowing mask (collected at 07:00 on 10/17/2022)

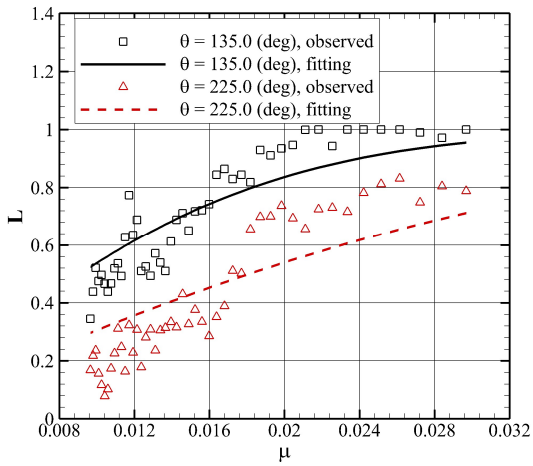


Fig. 4.9 Fitting with Smith function for NIMS dataset (collected at 07:00 on 10/17 2022)

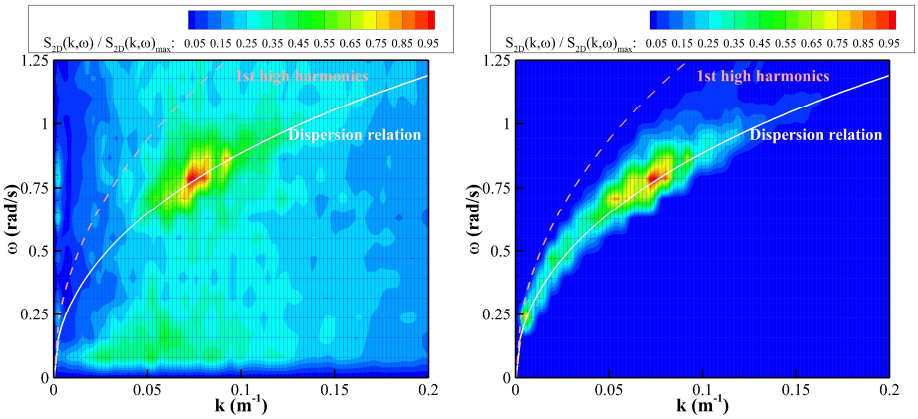


Fig. 4.10 2D wave spectrum $S_{2D}(k,\omega)$ obtained from NIMS dataset (collected at 07:00 on 10/17 2022).

Fig. 4.11은 NIMS 데이터셋 전체에 대한 유의파고 추정 결과를 나타낸다. 추정 결과의 검증을 위하여 선박에 설치된 상용 파랑 레이더 시스템(Commercial radar system) 및 계측 지점 주위의 파고 부이(Nokdo buoy)의 계측값을 함께 도시하였다. 먼저, 상용 레이더 시스템의 유의파고 해석 결과는 선박 주위의 파고 부이 계측 결과와 상당한 차이가 있었으며 이로부터 상용 시스템의 해석 세팅에 추가적인 최적화가 필요할 것으로 판단하였다. 반면 본 연구의 해석 결과는 파고 부이 계측 결과와 상당한 유사성을 보였다. 이렇듯 동일한 추정 기법을 통해 두 개의 독립적인 실해역 레이더 이미지 데이터셋에 대하여 정확도 높은 유의파고 추정이 가능하였기 때문에, 이로부터 본 연구에서 제시된 기법을 통하여 신뢰도 높은 유의파고 추정이 가능함을 결론 내릴 수 있다.

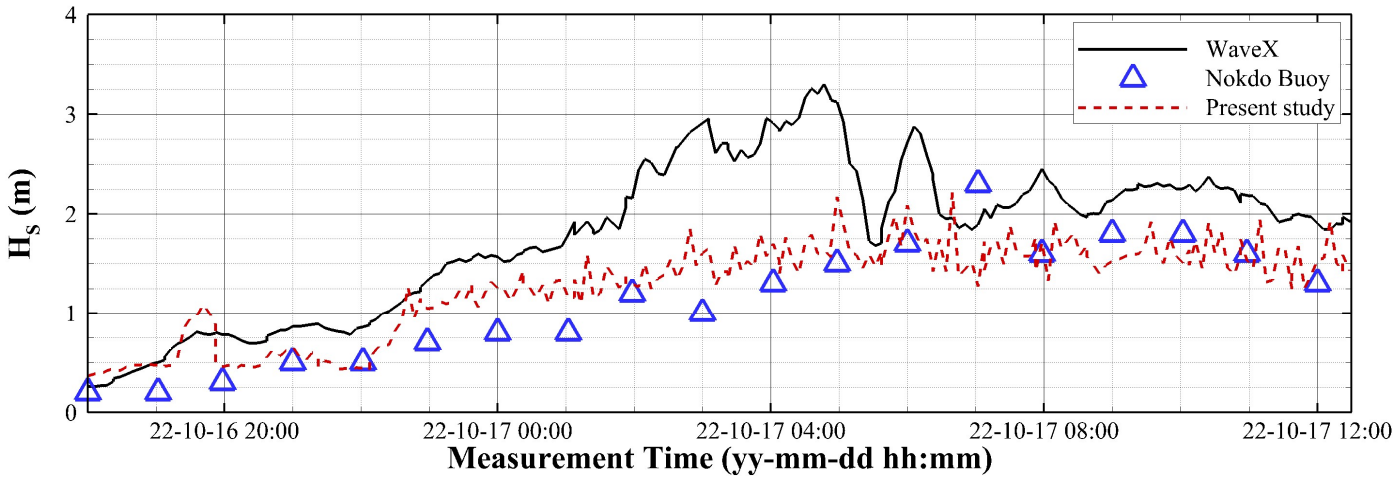


Fig. 4.11 Significant wave height estimation results compared with the independent reference measurements (NIMS dataset).

5. 결론

본 연구에서는 레이더 이미지 내 그림자 발생의 통계적 특성을 고려한 실시간 파랑장 재구성 기법을 제시하였다. 파랑장 재구성은 유의파고 추정과 3D-FFT 기반 스펙트럼 영역 해석으로 구성되며, 각 해석 과정은 해양파의 물리적 특성과 그림자의 통계적 특성을 엄밀하게 반영할 수 있도록 고도화 되었다. 제시된 기법의 검증을 위하여 합성 레이더 이미지 및 실해역 레이더 이미지에 대한 해석을 수행하였다. 먼저, 선형파 중첩을 통해 파면을 생성 후 그림자 효과를 반영하여 합성 레이더 이미지를 생성하였다. 다양한 해상 상태에 대해 합성 레이더 이미지를 생성 후 분석을 수행하였으며, 해상 상태에 따른 유의파고 추정 및 파랑장 재구성의 정확도를 분석하였다. 다음으로, 그림자 효과 외에 여러 추가적인 비물리적 효과들이 포함된 실제 레이더 이미지에 대하여 유의파고 추정을 수행하였고, 추정 결과를 레이더와 독립적으로 얻어진 유의파고 계측 결과와 비교하였다. 이상의 연구를 통하여 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 해양파의 물리적 특성의 반영을 통해 그림자 기반 유의파고 추정 기법을 고도화할 수 있음을 합성 레이더 이미지에 대한 분석을 통해 검증하였다. 특히, SACF의 효과 및 평균표면경사의 직교성에 대한 고려를 통해 평균표면경사 및 유의파고 추정 정확도를 향상할 수 있음을 확인하였다.

- 유의파고 추정 정확도가 해상 상태에 약하게 의존하는 경향이 확인되었다. 이는 해상 상태에 따라 고주파 성분이 과대평가되는 정도가 변화하나, 항상 동일한 MTF 지수를 사용하기 때문으로 보여졌다. 그러나 해상 상태에 따른 유의파고 추정 정확도의 의존성은 제한적이었고, 다양한 해상 상태 조건에서 정확도 높은 유의파고 추정이 가능하였다.
- 그림자 발생의 통계적 특성에 기반하여 이미지 강도 분산의 추정치인 Smith 분산을 계산하였고, 이를 레이더 이미지 내 불균일한 분산 분포의 보정에 활용하였다. 다양한 해상 상태에서 에너지 분포 보정를 통해 파랑장 재구성 정확도가 향상되었으며, 유의파고가 증가하면 보정의 효과 역시 증가하는 경향을 확인하였다. 하지만 에너지 분포 보정은 여러 비물리적 효과를 포함하는 이미지 강도에 대해 수행되므로, 보정 후에도 재구성된 파랑장에 약한 공간 의존도가 남아 있게 되는 한계점 역시 존재하였다.
- 실해역 레이더 이미지에는 그림자 효과 이외에도 소음을 포함한 추가적인 비물리적인 효과가 반영되어 있었다. 이러한 이유로, 유의파고 추정에 앞서 임계값 기반 그림자 영역 구분을 적용하였다. 추정 결과를 조위계와 파고 부이 등 레이더와 독립적인 계측값과 비교하였다. 결론적으로, 본 연구에서 제안한 기법을 활용하여 실해역 유의파고에 대한 정확도 높은 추정이 가능함을 확인하였다.

6. 공학적 기여 및 향후 연구

본 연구에서는 그림자 발생의 통계적 특성을 고려할 수 있는 파랑장 재구성 기법을 제시하였다. 그 과정에서 기존 연구에서 제시한 그림자 기반 유의파고 추정 기법의 물리적 근거를 보완하여 추정 정확도를 향상하였으며, 이론에 기반한 에너지 분포 보정을 통해 위상 분해 파랑장 재구성 기법을 고도화 하였다. 본 연구에서 제시된 기법은 높은 연산 효율을 지니고 있으므로 실시간 해양파 해석에 적합하다는 장점이 있다. 따라서, 해양 활동의 안정성 및 효율 증대를 위해 파랑 정보를 요구하는 다양한 분야에서 본 논문에서 제시한 기법을 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

더 나아가, 제시된 파랑장 재구성 기법을 고도화하기 위하여 다음의 향후 연구가 필요하다고 판단된다.

- 본 연구에서 제시된 파랑장 재구성 기법은 선형파 이론에 기반을 두고 있다. 선형파 이론을 활용하면 정식화가 용이하고 빠른 계산이 가능하다는 장점이 있으나, 이와 동시에 파랑의 비선형 효과를 무시하므로 극한 해상 상태에서 해석의 신뢰도가 낮다는 한계가 있다. 그러므로, 높은 파 조건에서 해석 신뢰도 확보를 위해 빠른 연산 속도로 파랑의 비선형 효과를 반영할 수 있는 재구성 기법에 관한 연구가 필요하다.
- 제시된 기법의 검증에 활용한 실해역 데이터의 유의파고 범위는 약 0~3m로 좁았기 때문에, 극한 해상 상태에 대한

검증이 제한적이었다. 따라서, 추후 더욱 다양한 실해역 레이더 이미지에 대한 해석을 통한 제시된 기법의 검증이 요구된다. 이를 위해 해양 X-band 레이더를 운용 중인 연구기관, 해운사, 조선소 등 다양한 관계기관들과의 협업에 노력을 기울여야 할 것으로 예상된다.

- 소음과 이미지 강도의 거리 의존성 등 다양한 비물리적 현상들로 인하여 실해역 데이터의 이미지 강도 분산은 Smith 분산과 상이하였다. 때문에, 에너지 분포 보정의 효과 역시 제한적이었다. 향후 실해역 레이더 이미지에 반영된 비물리적 현상들을 반영할 수 있는 이미지 강도 분산 추정식 및 이를 활용한 에너지 분포 보정에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] Bourlier, C., Saillard, J. and Berginc, G. (2000), "Effect of Correlation Between Shadowing and Shadowed Points on the Wagner and Smith Monostatic One-Dimensional Shadowing Functions," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 48(3), 437-446.

[2] Bourlier, C., Berginc, G. and Saillard, J. (2002), "Monostatic and Bistatic Statistical Shadowing Functions from a One-Dimensional Stationary Randomly Rough Surface According to the Observation Length: I. Single Scattering," *Waves Random Complex Media*, 12(2), 145-173.

[3] Carrasco, R., Horstmann J. and Seemann J. (2017), "Significant Wave Height Measured by Coherent X-Band Radar," *IEEE Trans. Geosci Remote Sens.*, 55(9), 5355-5365.

[4] Chen, X. and Huang, W. (2022), "Spatial–Temporal Convolutional Gated Recurrent Unit Network for Significant Wave Height Estimation from Shipborne Marine Radar Data," *IEEE Trans. Geosci Remote Sens.*, 60, 4201711.

[5] Chen, Z., Zhang, B., He, Y., Qiu, Z. and Perrie, W. (2015), "A new modulation transfer function for ocean wave spectra retrieval from X-band marine radar imagery," *Chin. J. Oceanol. Limnol.*, 33(5), 1132-1141.

[6] Choi, H., Park, M., Son, G., Jeong, J., Park, J., Mo, K. and Kang, P., (2021), "Real-time significant wave height estimation from raw ocean images based on 2D and 3D deep neural networks," *Ocean Eng.*, 201, 107129.

[7] Clauss, G. F., Kosleck, S., and Testa, D. (2012), "Critical Situations of Vessel Operations in Short Crested Seas—Forecast and Decision Support System," *ASME. J. Offshore Mech. Arct. Eng.*, 134(3), 031601.

[8] Cornejo-Bueno, L., Nieto-Borge, J.C., Garcia-Diaz, P., Rodriguez, G. and Salcedo-Sanz, S. (2016), "Significant wave height and energy flux prediction for marine energy applications: A grouping genetic algorithm−Extreme Learning Machine approach," *Renewable Energy*, 97, 380-389.

[9] Dankert, H. and Ronsenthal, W. (2004), "Ocean Surface Determination from X-band Radar-Image Sequences," *J. Geophys. Res.*, 109, C04016.

[10] Duan, W., Yang, K., Huang, L. and Ma, X. (2020), "Numerical Investigations on Wave Remote Sensing from Synthetic X-Band Radar Sea Clutter Images by Using Deep Convolutional Neural Networks," *Remote Sens.*, 12(7), 1117.

[11] Gangeskar, R. (2014), "An Algorithm for Estimation of Wave Height from Shadowing in X-Band Radar Sea Surface Images," *IEEE Trans. Geosci Remote Sens.*, 52(6), 3373-3381.

[12] Gangeskar, R. (2018), "Verifying High-Accuracy Ocean Surface Current Measurements by X-Band Radar for Fixed and Moving Installations," *IEEE Trans. Geosci Remote Sens.*, 56(8), 4845-4854.

[13] Hessner, K.G., Nieto-Borge, J.C. and Bell, P.S. (2008), "Nautical radar measurements in Europe: Applications of WaMoS II as a sensor for sea state, current and bathymetry." in *Remote Sensing of the European Seas*, Springer, 435–446.

[14] Huang, W., Liu, X. and Gill E.W. (2017), "Ocean Wind and Wave Measurements Using X-Band Marine Radar: A Comprehensive Review," *Remote Sens.*, 9, 1261.

[15] ITTC (2002), "The Specialist Committee on Waves", *Proc. 23rd ITTC – Vol. II*, 505-551.

[16] Lee, J.H., Nam, Y.S., Kim, Y., Liu, Y., Lee, J. and Yang, H. (2022), "Real-time digital twin for ship operation in waves," *Ocean Eng.*, 266, 112867.

[17] Longuet-Higgins, M.S. (1957), "The Statistical Analysis of a Random, Moving Surface," *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, 249, 321-387.

[18] Lund, B., Collins, C.O., Graber, H.C., Terrill, E. and Herbers T.H.C. (2014), "Marine radar ocean wave retrieval's dependency on range and azimuth," *Ocean Dyn.*, 64, 999-1018.

[19] Liu, X., Huang, W. and Gill, E.W. (2016), "Comparison of Wave Height Measurement Algorithms for Ship-Borne X-Band Nautical Radar," *Can. J. Remote Sens.*, 42(4), 343-353.

[20] Massel, S.R. (2011), "On The Geometry of Ocean Surface Waves," *Oceanologia*, 53(2), 521-548.

[21] Nam, Y.S., Lee, J.H., Liu, Y. and Kim, Y. (2022) "Enhanced Wave-Field Reconstruction Based on Stochastic Characteristics of Shadowing Effects," *Proc. 37th Int. Workshop Water Waves Floating Bodies*, 10-13 April, 2022, Giardini Naxos, Italy.

[22] Nieto-Borge, J.C., Reichert, K. and Dittmer, J. (1999a), "Use of nautical radar as a wave monitoring instrument," *Coastal Eng.*, 37, 331-342.

[23] Nieto-Borge, J.C., Hessner, K. and Reichert, K. (1999b), "Estimation of the Significant Wave Height with X-Band Nautical Radars," *Proc. 18th Int Conf. Ocean, Offshore Arct. Eng.*, 11-16 Jul. 1999, St. Johns, Newfoundland. Canada.

[24] Nieto-Borge, J.C., Rodriguez, G.R., Hessner, K. and Gonzalez, P.I. (2004), "Inversion of Marine Radar Images for Surface Wave Analysis," *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 21(8), 1291-1300.

[25] Nieto-Borge, J.C., Hessner, K., Jarabo-Amores, P. and 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.

[26] Park, J. (2013), "Study on Sea Surface Reconstruction Using Sequent Radar Images," *J. Ocean Eng. Technol.*, 27(6), 100-105.

[27] Pandian, P.K., Emmanuel, O., Ruscoe, J.P., Side, J.C., Harris, R.E., Kerr, S.A., and Bullen, C.R. (2010), "An overview of recent technologies on wave and current measurement in coastal and marine applications," *J. Oceanogr. Mar. Sci.*, 1(1), 1-10.

[28] Qi, Y., Xiao, W. and Yue, D.K.P. (2016), "Phase-Resolved Wave Field Simulation Calibration of Sea Surface Reconstruction Using Noncoherent Marine Radar," *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 33(6), 1135-1149.

[29] Salcedo-Sanz, S., Nieto-Borge, J.C., Carro-Calvo, L., Cuadra, L., Hessner, K. and Alexandre, E. (2015), "Significant Wave Height Estimation Using SVR Algorithms and Shadowing Information from Simulated Real and Measured X-Band Radar Images of the Sea Surface," *Ocean Eng.*, 101, 244-253.

[30] Senet, C.M., Seeman, J. and Ziemer, F. (2001), "The Near-Surface Current Velocity Determined from Image Sequences of the Sea Surface," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 39(3), 492-505.

[31] Sernafino, F., Lugni, C. and Soldovieri, F. (2010), "A Novel Strategy for the Surface Current Determination from Marine X-Band Radar Data," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 7(2), 231-235.

[32] Smith, B. (1967), "Geometric Shadowing of a Random Rough Surface," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 15(5), 668-671.

[33] Vesecky, J.F., Assal, H.M. and Stewart, R.H. (1981), "Remote Sensing of the Ocean Waveheight Spectrum Using Synthetic-Aperture-Radar Images," *Gower, J.F.R. (eds) Oceanogr. Space*, 13, 449-457.

[34] Vicen-Bueno, R., Lido-Muela, C. and Nieto-Borge, J.C. (2012), "Estimate of Significant Wave Height from Non-Coherent Marine Radar Images by Multilayer Perceptrons," *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, 2012, 84.

[35] Wei, Y., Zhizhong L., Gen P., and Hong L. (2017), "Wave Height Estimation from Shadowing Based on the Acquired X-Band Marine Radar Images in Coastal Area," *Info.*, 9(8), 859.

[36] Wijaya, A.P., van Groesen, E. (2016), "Determination of the significant wave height from shadowing in synthetic radar images," *Ocean Eng.*, 114, 204-215.

[37] Young, I. R., Rosenthal, W. and Ziemer, F. (1985), "A Three-Dimensional Analysis of Marine Radar Images for the Determination of Ocean Wave Directionality and Surface Currents," *J. Geophys. Res. Oceans*, 90(C1), 1049-1059.

[38] Ziemer, F. and Dittmer, J. (1994), "A system to monitor ocean wave fields," *Proc. 2nd Int. Conf. Air-Sea Interact. Meteorol. Oceanogr. Coastal Zone*, Sept. 1994, 28-31.

[39] Zinchenko, V., Vasilyev, L., Halstensen, S.O. and Liu, Y. (2021), "An improved algorithm for phase-resolved sea surface reconstruction from X-band marine radar images," *J. Ocean Eng. Mar. Energy*, 7, 97-114.

부록

A.1 Smith 함수 유도

본 연구에서는 유의파고 추정을 위해 그림자 효과 발생에 대한 이론적 추정치인 Smith 함수를 활용하였다. Smith 함수란 표면의 변형이 정규 분포를 따르는 임의 표면(random surface)에 그림자가 발생할 때 계측이 가능할 확률의 추정치를 의미한다. Smith 함수는 공간상 자기상관함수(SACF)의 고려 여부에 따라 두 가지의 형태를 갖는다. 자기상관함수의 효과를 무시하는 경우, 해석적 적분을 통해 계산이 가능한 uncorrelated Smith 함수(Smith, 1967)를 얻을 수 있다. 한편, 자기상관함수의 효과를 고려하면 수치 적분이 요구되지만, 그림자 발생을 더욱 엄밀하게 평가할 수 있는 correlated Smith 함수(Bourlier et al., 2002)를 얻게 된다.

Fig. A.1은 Smith 함수의 유도를 위해 도입한 좌표계 및 주요 변수를 나타내고 있다. 계측이 이뤄지는 해면의 한 지점을 좌표계의 원점으로 설정 후 r축은 레이더 광선과 나란하게 두었으며, 평균해수면을 z=0로 지정하였다. 또한, 레이더 광선의 기울기는 μ이며, 레이더의 위치는 원점으로부터 아주 멀리 떨어져 있다고 가정하였다. 파고 ζ 및 파도 경사 q의 발생을 서로 독립적인 가우스 확률 과정(Gaussian random process)으로 가정하며, 각각 표준편차를 σ 및 w로 정의한다. (ζ_0, q_0)는 원점의 확률변수를, (ζ_1, q_1)은 원점에서 r 만큼 떨어진 지점의 확률변수를 의미한다.

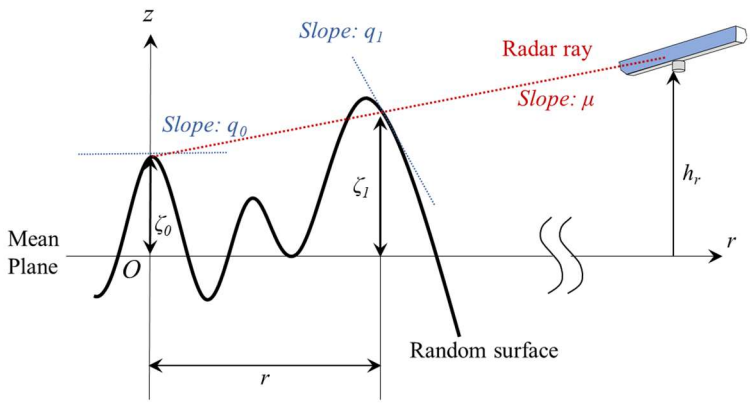


Fig. A.1 Coordinate system and definitions for the derivation of Smith function

Fig. A.1에 나타난 확률 변수를 활용하여, 음영 확률밀도함수(shadowing probability density function) $\hat{S}(\zeta_0,q_0,\mu;\sigma,w)$를 정의할 수 있다. $\hat{S}$은 고정된 ζ_0와 q_0에 대하여, 원점에서 그림자가 발생하지 않을 확률을 의미하며, 다음과 같은 형태를 갖는다.

$$\hat{S}\left(\zeta_0,q_0,\mu;\sigma,w\right)=\begin{cases}\exp\left[-\int_0^{\infty}g\left(r\right)dr\right] & \mu\geq q_0\\ 0 & \mu<q_0\end{cases}. \tag{A.1}$$

이때, $g(r)dr$은 영역 [0, r]에 위치한 파고는 원점에 그림자를 발생시키지 않지만, [r, $r+dr$]의 파고가 그림자를 유발할 확률을 의미한다. Bourlier et al. (2002)은 $g(r)$을 확률변수 ζ_0, ζ_1, q_0, q_1의 결합확률밀도함수(joint probability density function) P_4를 활용하여

아래와 같이 표현하였다.

$$g(r)=\frac{\int_{\mu}^{\infty}(q_1-\mu)P_4(\zeta_0,\zeta_0+\mu r,q_0,q_1)dq_1}{\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\zeta_0+\mu\tau}P_4(\zeta_0,\zeta_1,q_0,q_1)d\zeta_1 dq_1}. \tag{A.2}$$

$$P_4(\zeta_0,\zeta_1,q_0,q_1)=\frac{\sigma w}{2\pi\sqrt{\det(\mathbf{C})}}\exp\left(-\frac{1}{2}\vec{X}^T\mathbf{C}^{-1}\vec{X}+\frac{q_0^2}{2w^2}+\frac{\zeta_0^2}{2\sigma^2}\right)$$
$$\text{for}\quad \mathbf{C}=\begin{bmatrix}\sigma^2 & \mathrm{SACF}(r) & 0 & \mathrm{SACF}'(r)\\ \mathrm{SACF}(r) & \sigma^2 & -\mathrm{SACF}'(r) & 0\\ 0 & -\mathrm{SACF}'(r) & -w^2 & -\mathrm{SACF}''(r)\\ \mathrm{SACF}'(r) & 0 & -\mathrm{SACF}''(r) & -w^2\end{bmatrix},\ \vec{X}=\begin{bmatrix}\zeta_0\\ \zeta_1\\ q_0\\ q_1\end{bmatrix}. \tag{A.3}$$

$g(r)$은 해면의 공간상 자기상관함수(SACF)의 고려 여부에 따라 형태를 달리한다. SACF의 효과를 무시하는 경우, 식 (A.3)의 공분산행렬 C의 비대각성분이 모두 사라지므로 P_4는 단순한 형태로 표현된다. 결과적으로, 해석 적분을 통해 $g(r)$은 다음과 같은 닫힌 형태를 갖게 됨을 보일 수 있다(Smith, 1967).

$$g(r)=\sqrt{\frac{2}{\pi}}\frac{\mu}{w}\frac{\Lambda(\mu)e^{-\frac{(\zeta_0+\mu r)^2}{2w^2}}}{2-\mathrm{erfc}\left(\frac{\zeta_0+\mu r}{w\sqrt{2}}\right)}$$
$$\text{where}\ \Lambda(\mu)=\frac{1}{2}\left[\sqrt{\frac{2}{\pi}}\frac{\sigma}{\mu}e^{-\frac{\mu^2}{2w^2}}-\mathrm{erfc}\left(\frac{\mu}{\sqrt{2}w}\right)\right]. \tag{A.4}$$

여기서, erfc는 상보 오차 함수(complementary error function)를

의미한다. Bourlier et al. (2002)은 더욱 엄밀하게 그림자 발생을 평가하기 위하여 SACF 관련 항을 포함하여 $g(r)$을 계산하였으며, 결과적으로 아래와 같은 닫힌 형식을 유도해 내었다.

$$g(r)=\frac{\eta}{\pi}\frac{\sqrt{f_{11}f_{33}-f_{13}^2}}{f_{33}}\frac{e^{\left\{-D-\mu'(\mu'A+2B)-\zeta'^2-q'^2\right\}}\left[1-e^{\kappa^2}\kappa\sqrt{\pi}\operatorname{erfc}(\kappa)\right]}{e^{\frac{B_1^2}{A_1}-D_1}\left[1+\operatorname{erf}\left(\sqrt{A_1}h_1'+\frac{B_1}{\sqrt{A_1}}\right)\right]} \tag{A.5}$$

where $\zeta'=\frac{\zeta_0}{\sqrt{2}\sigma}$, $q'=\frac{q_0}{\sqrt{2}w}$, $\mu'=\frac{\mu}{\sqrt{2}w}$, $\eta=1$, $h_1'=\zeta_0'+\frac{\mu' wr}{\sigma}$.

이때, f_{ij}는 SACF와 관련된 항들이며, A, A_1, B, B_1, κ, v, D, and D_1는 f_{ij}의 함수로 나타나는 항들이다. 아울러, 본 연구에서 활용한 SACF 추정식 (2.6)에 대해 η=1임을 보일 수 있다. 식 (A.5)의 더욱 자세한 유도 과정은 Bourlier et al. (2002)에서 확인할 수 있다. 식 (A.4) 및 (A.5)에 명시된 $g(r)$을 식 (A.1)에 대입하면, 음영 확률밀도함수 $\hat{S}(\zeta_0,q_0,\mu;\sigma,w)$를 평가할 수 있다.

Smith 함수는 $\hat{S}(\zeta_0,q_0,\mu;\sigma,w)$의 확률변수 ζ_0, q_0에 대한 평균이다. 적분 과정에서 파고의 표준편차 σ는 소거되므로, 결과적으로 Smith 함수는 다음과 같이 레이더 광선의 기울기 μ와 평균표면경사 w에 의존하는 형태를 갖는다.

$$S(\mu;w)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\hat{S}(\zeta_0,q_0,\mu;\sigma,w)\frac{1}{2\pi\sigma w}\exp\left(-\frac{\zeta_0^2}{2\sigma^2}-\frac{q_0^2}{2w^2}\right)d\zeta_0 dq_0. \tag{A.6}$$

SACF를 고려하지 않는 경우, 식 (A.6)의 해석 적분을 통해 uncorrelated Smith 함수 $S_u(\mu;w)$를 얻을 수 있다. 결과적으로, uncorrelated Smith 함수는 다음과 같은 닫힌 형태를 갖는다.

$$S_u\left(\mu;w\right)=\frac{1-1/2\,\mathrm{erfc}\left(\mu/\sqrt{2}w\right)}{\Lambda\left(\mu\right)+1}. \tag{A.7}$$

SACF를 고려하는 경우 얻어지는 correlated Smith 함수 $S_c(\mu;w)$의 추정을 위해서는 식 (A.6)의 수치 적분이 요구된다. (Bourlier et al., 2002)

A.2 해면 평균표면경사의 물리적 특성

선형 중력파에 대한 통계학적 분석을 적용하여 해면의 평균표면경사는 파랑 스펙트럼으로 기술이 가능하다 (Longuet-Higgins, 1957; Massel, 2011). 좌표계의 x축이 주파향(main wave direction)과 나란하다고 가정하였을 때, 표면 경사의 결합확률밀도함수는 다음과 같은 형태로 정의된다.

$$P_2\left(q_x, q_y\right) = \frac{1}{2\pi w_c w_u} \exp\left(-\frac{q_x^2}{2w_u^2} - \frac{q_y^2}{2w_c^2}\right)$$
$$\text{where } q_x = \frac{\partial \zeta}{\partial x},\ q_y = \frac{\partial \zeta}{\partial y}. \tag{A.8}$$

이때, q_x와 q_y는 각각 x 및 y방향에 대한 국부표면경사를 의미하며, w_u와 w_c는 각 방향에 대한 평균표면경사를 의미한다. Massel (2011)은 q_x와 q_y를 좌표계 전체에 대해 적분하여 w_u와 w_c에 대한 다음의 표현식을 유도하였다.

$$w_u^2 = \frac{m_4}{g^2} \int_{-\pi}^{\pi} D(\chi) \cos^2(\chi)\, d\chi$$
$$w_c^2 = \frac{m_4}{g^2} \int_{-\pi}^{\pi} D(\chi) \sin^2(\chi)\, d\chi \tag{A.9}$$
$$\text{where } m_4 = \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} \omega^4 S(\omega)\, d\omega.$$

이때, m_4는 파랑 스펙트럼의 4차 모멘트를 의미한다. 식 (A.8)의

좌표계 변환을 통해, 특정 방위각(θ)에 대한 국부표면경사의 확률밀도함수를 추정할 수 있다.

$$P_1(q_r) = \int_{-\infty}^{\infty} P_2(q_r, q_\theta)\, dq_\theta = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\, w(\theta)} \exp\left[-\frac{q_r^2}{2w(\theta)^2} \right] \tag{A.10}$$

where $q_x = q_r \cos\theta - q_\theta \sin\theta,\ q_y = q_r \sin\theta + q_\theta \cos\theta.$

$$w(\theta) = \sqrt{w_u^2 \cos^2\theta + w_c^2 \sin^2\theta}. \tag{A.11}$$

$w(\theta)$는 θ 방향에 대한 평균표면경사를 의미하며, 식 (A.11)에 의하여 아래와 같은 직교성을 만족한다.

$$w_{total}^2 = w(\theta)^2 + w\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right)^2 = \frac{m_4}{g^2}. \tag{A.12}$$

여기서, w_{total}은 스펙트럼 4차 모멘트와 관계되는 해면의 총표면경사를 의미한다. 본 연구에서 합성 레이더 이미지 생성에 활용한 ITTC 스펙트럼 및 $\cos^2$ 방향분산함수의 경우 단순한 해석 적분을 적용하여 평균표면경사를 추정할 수 있다. ITTC 스펙트럼과 $\cos^2$ 방향분산함수는 다음과 같은 형태를 갖는다.

$$S(\omega) = \frac{A}{\omega^5} \exp\left(-\frac{B}{\omega^4} \right). \tag{A.13}$$

$$D(\chi)=\begin{cases}\dfrac{2}{\chi_s}\cos^2\left[\dfrac{\pi(\chi-\chi_M)}{\chi_s}\right] & \chi\in\left[\chi_M\pm\dfrac{\chi_s}{2}\right]\\ 0 & otherwise\end{cases}. \tag{A.14}$$

이때, 파랑 스펙트럼의 매개변수 A와 B는 파랑의 유의파고(H_S) 및 평균주기(T_{mean})에 따라 변화하며, 해당 매개변수에 대한 자세한 설명은 ITTC (2002)에서 확인할 수 있다. 결과적으로, 식 (A.13)과 (A.14)를 식 (A.9)에 대입하면, w_u와 w_c는 아래와 같이 나타남을 보일 수 있다.

$$\begin{aligned}
w_u^2 &= \frac{m_4}{g^2}\left[\frac{1}{2}+\frac{(2\pi/\chi_s)^2}{(2\pi/\chi_s)^2-4}\frac{\sin\chi_s}{2\chi_s}\right]\\
w_c^2 &= \frac{m_4}{g^2}\left[\frac{1}{2}-\frac{(2\pi/\chi_s)^2}{(2\pi/\chi_s)^2-4}\frac{\sin\chi_s}{2\chi_s}\right]\\
&\text{where } m_4=\int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}}\omega^4 S(\omega)\,d\omega=-\frac{A}{4}\left\{Ei\left(-\frac{B}{\omega_{\min}^4}\right)-Ei\left(-\frac{B}{\omega_{\max}^4}\right)\right\}.
\end{aligned} \tag{A.15}$$

이때, Ei는 지수 적분 함수(exponential integral function)을 의미하며, $[\omega_{\min}, \omega_{\max}]$는 파랑 요소들의 주파수 범위를 의미한다.

Abstract

Study on Real-Time Ocean Wave Analysis Based on X-Band Radar Measurement Data

Yoon-Seo Nam

Department of Naval Architecture & Ocean Engineering

College of Engineering

Seoul National University

It is required to obtain reliable wave information to improve the safety and efficiency of marine activities. Various methods for wave measurements are being carried out around the world. Among them, the marine X-band radar has the advantage that it can obtain statistically converged wave information based on short-time measurement. This is because the wave radar can simultaneously measure wave elevation data in a large area. Accordingly, marine X-band radars are installed on various ships and marine platforms to perform wave measurements. Diverse discussions on X-band radar-based wave field analysis techniques are also steadily underway.

In general, incoherent marine radar measures the backscattered intensity due to Bragg scattering between X-band microwaves transmitted from the antenna and ripples on the sea surface. This remote sensing process entails numerous non-physical modulation effects, such as shadowing, tilting, and hydrodynamic effects. Therefore, a series of post-processing called wave-field reconstruction is required to

retrieve wave information from marine radar images. The wave-field reconstruction procedure consists of removing the non-physical components from the measured spectrum, and adjusting the total spectral energy according to the significant wave height (H_S).

In this study, the advanced wave-field reconstruction technique is presented. The overall reconstruction procedure is comprised of the shadowing-based H_S estimation and 3D-FFT-based wave-field reconstruction, and both of each analysis process have high computational efficiency. That's why it is suitable for real-time wave-field analysis. To enhance the wave analysis, the statistical characteristics of the shadowing effect were rigorously considered. For this purpose, the spatial autocorrelation function of the ocean surface and the orthogonality of the mean surface slope were considered for H_S estimation. Moreover, the uneven variance distribution owing to the spatial dependency of the shadowing effect was mitigated during the wave-field reconstruction.

Wave-field reconstruction was applied to the synthetic and real radar images to verify the presented technique. The H_S estimation and 3D-FFT-based wave-field reconstruction were performed for synthetic radar images corresponding to various states, and the dependence of this technique on the sea state was examined. As a result, it was confirmed that the reconstruction accuracy could be improved through the rigorous consideration of stochastic characteristics of the shadowing effect for all cases. Moreover, H_S estimation was performed for real radar images collected from the Ieodo ocean research station and RV Gisang 1. In conclusion, a satisfactorily accurate H_S estimation was also achieved.

Keywords : X-band radar, Ocean waves, Wave-field reconstruction, Significant wave height, Shadowing effect
Student Number : 2020-25483