

## 태풍 기상장의 신뢰도 분석: 태풍 매미(0314) Analysis of Reliability of Weather Fields for Typhoon Maemi (0314)

윤성범\* · 정원무\*\* · 조명환\*\*\* · 류경호\*\*\*\*

Sung Bum Yoon\*, Weon Mu Jeong\*\*, Myeong Hwan Jho\*\*\* and Kyong Ho Ryu\*\*\*\*

**요지** : 2003년 남해안에 내습한 태풍 매미에 의해 발생한 폭풍해일과 파랑을 JMA-MSM 예보기상자료, NCEP-CFSR 재분석 기상자료, ECMWF-ERA5 재분석 기상자료, JTWC의 최적경로를 이용한 기상자료를 이용하여 수치모의하고, 계산된 해일고를 전국 해안의 항만에서 관측된 폭풍해일 시계열 자료와 비교하였다. 폭풍해일과 동시에 발생하는 파랑에 대해서는 계산된 유의파고를 관측 자료와 비교하였다. 이 비교를 통해 태풍 매미에 대한 각종 기상장의 신뢰도를 평가하였다. 그 결과 JMA-MSM 기상자료가 가장 신뢰도가 높았고, JTWC의 최적경로를 이용한 기상자료도 상당히 우수하게 나타났다. ECMWF-ERA5 기상자료는 전반적으로 해일고나 파고의 크기가 작게 나타났으며, NCEP-CFSR 기상자료는 태풍 매미의 특정 경우에 대해 신뢰도가 가장 낮게 나타났다. 이 연구를 통하여 폭풍해일과 파랑을 추산하기 위해 신뢰도 높은 기상장이 필수적임을 알 수 있었다.

**핵심용어** : 태풍 매미, JMA-MSM, ECMWF-ERA5, NCEP-CFSR, JTWC 최적경로, 폭풍해일, 파랑, 수치모의

**Abstract** : Numerical simulations of the storm surge and waves induced by the Typhoon Maemi incident on the south sea of Korea in 2003 are performed using the JMA-MSM forecast weather field, NCEP-CFSR reanalysis weather field, ECMWF-ERA5 reanalysis weather field, and the pressure and wind fields obtained using the best track information provided by JTWC. The calculated surge heights are compared with the time history observed at harbours along the coasts of Korea. For the waves occurring coincidentally with the storm surges the calculated significant wave heights are compared with the measured data. Based on the comparison of surge and wave heights the assessment of the reliability of various weather fields is performed. As a result the JMA-MSM weather fields gives the highest reliability, and the weather field obtained using JTWC best track information gives also relatively good agreement. The ECMWF-ERA5 gives in general surge and wave heights weaker than the measured. The reliability of NCEP-CFSR turns out to be the worst for this special case of Typhoon Maemi. Based on the results of this study it is found that the reliable weather fields are essential for the accurate simulation of storm surges and waves.

**Keywords** : Typhoon Maemi, JMA-MSM, ECMWF-ERA5, NCEP-CFSR, JTWC best track, storm surge, wave, numerical simulation

### 1. 서론

태풍은 우리나라 해안 재해에 가장 큰 영향을 미치는 자연현상이다. 태풍에 동반되는 폭풍해일과 고파랑 및 집중호우로 남해안 지역은 거의 매년 큰 피해를 입어 왔다. 특히 태풍 시 거센 파랑에 의한 빈번한 방파제 파괴는 설계파고에 대한 재검토 필요성을 일깨워준다. 또한 조석에 의한 만조와 폭풍해일이 중첩되어 해안지역에서 범람 피해도 자주 발생하고 있다. 이러한 태풍에 의한 해안재해를 경감시키기 위해서는

관심지역에서 발생한 폭풍해일과 파랑의 발생 이력을 정확히 파악하고, 이를 토대로 방재시설물을 구축하는 구조적 대책과 함께 재난 발생 시 대피하는 비구조적 대책이 병행되어야 한다. 구조적 대책의 대표적인 방재시설물인 방파제를 건설하기 위해서는 설계파를 결정해야 하며, 이 설계파는 방파제 건설 위치에서 30년 이상의 파랑 관측치를 통계분석하여 결정하는 것이 이상적이다. 그러나 전 세계적으로도 방파제 건설 위치에서 장기간의 파랑 관측치를 확보할 수 있는 곳은 드물고, 그렇다고 파랑관측을 새로 시작할 수도 없는 실정이다.

\*한양대학교 건설환경공학과 교수(Corresponding author: Sung Bum Yoon, Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, 55 Hanyangdaehak-ro, Sangnok-gu, Ansan, Gyeonggi-do 15588, Korea, Tel: +82-31-400-5144, [sbyoon@hanyang.ac.kr](mailto:sbyoon@hanyang.ac.kr))

\*\*한국해양과학기술원 해양ICT융합연구센터 책임연구원(Principal Research Scientist, Maritime ICT R&D Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology)

\*\*\*한양대학교 대학원 건설환경공학과 대학원생(Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University)

\*\*\*\*한양대학교 대학원 건설환경공학과 대학원생(Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University)

이러한 현실적인 제약조건을 극복하기 위한 방법의 일환으로 풍파추산법이 개발되었다.

풍파추산은 초기에는 비교적 장기간의 관측자료를 입수할 수 있는 바람자료를 이용하여 파를 추정하는 방법으로 정상상태(steady state)의 바람에 대한 SMB(Sverdup-Munk-Bretschneider) 법과 태풍과 같이 이동하는 바람에 대한 Wilson 법 등의 유의파법이 개발되었다. 이러한 초창기 풍파추정법은 매우 단순한 형태의 바람장(일정 풍향과 풍속 및 단순한 취송영역과 지속시간)을 대상으로 간단한 경험공식에 의존하므로 풍파의 발생과 전파에서 바람의 시공간적 변화를 정도 높게 추정할 수 없는 한계가 있었다. 후에 파의 불규칙성을 고려하기 위한 에너지 평형 방정식에 기초한 스펙트럼 모형인 WAM모형(Hasselmann, 1968; WAMDI group, 1988)이 개발되었다. 이러한 초창기 풍파추산법은 파의 천수변형을 고려할 수 없어 파랑 발생역인 심해에서 파를 추정하는 데 이용되었고, 이렇게 얻어진 파를 심해파라 통상적으로 부르게 되었다. 이 심해파 정보로부터 파의 굴절, 회절, 바닥마찰 등의 천수변형을 고려하여 방파제 건설 위치에서의 설계파를 구하게 되는 바, 이를 천해설계파 또는 구조물설계파라 부른다. 근래에는 바람에 의한 파의 발생으로부터 천수변형까지를 일괄적으로 해석할 수 있는 스펙트럼 모형인 SWAN(Booij et al., 1999, SWAN team, 2016)이나 WaveWatchIII(Tolman 1997; WAVEWATCHIII development group, 2016)가 개발되어 널리 사용되고 있다.

우리나라에서 방파제 설계를 위한 심해파 추산은 정부 기관이나 공공 연구소에 의해 이루어졌다. 1971년 건설부, 1976년 해운항만청, 1987년 농업진흥공사, 1988년 해운항만청과 1988년 수산청 등은 해안 관측소로부터의 관측자료 또는 일기도로부터 바람을 얻고 주로 유의파법을 적용하여 해역별 심해파를 구하였다. 근래 한국해양연구원(Korea Ocean Research and Development Institution, 2005)에서는 비태풍에 대해서는 유럽중규모기상예보센터(ECMWF, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)의 바람장을 기반으로 하고 스펙트럼 모형으로는 HYPA 모델을 사용하였으며, 태풍에 대해서는 세계기상기구(WMO)의 RSMC(Regional Specialized Meteorological Center) 최적경로를 기반으로 구한 태풍 바람장을 ECMWF 배경 기상장에 보거싱(bogusing)한 다음, 스펙트럼 모델로 WAM4.0을 사용하여 심해파를 추산한 바 있으며, 2020년 현재까지 실무에서 사용되어 오고 있다. 이로써 본격적인 스펙트럼 모형을 이용한 심해파 추산 시대가 열리게 되었다. 2005년 해양연구원의 전해역 심해파 추정 보고서 발표 이후 3가지의 큰 과학적 발전이 있었다. 첫 번째는 2011년을 전후하여 우리나라 해역에 파랑관측 부이들이 수적으로 크게 증가하여 양질의 파랑관측 자료들이 축적되기 시작하였다. 둘째로는 스펙트럼에 의한 파랑 수치모형의 적용범위가 심해역으로부터 천해역으로까지 확장되고, 모형에 내재된 경험식의 파라미터들에 대한 개선이 이루어졌다. 특히 바람으로부터 파랑으로의 에너지 전달을 결정해주는 항력계수의 최

적화로 스펙트럼 파랑 수치모형의 신뢰도가 크게 개선되었다(Akbar et al., 2017; Qiao et al., 2019; Wang et al., 2019). 세 번째로는 바람장과 기압장을 제공하는 재분석 기상장의 질적 향상을 들 수 있다. 이를 가능케 해주는 요인으로 기상장 재분석의 필수 요소인 인공위성에 의한 기상관측 자료의 축적과 이를 기상장 재분석에 반영시키는 자료동화 기법의 발전과 함께 격자분해능을 향상시키기 위한 대용량 초고속 전산 능력의 발전이다.

이러한 과학적 발전을 반영하여 해양수산부(Ministry of Oceans and Fisheries, 2019)에서는 전국 심해 설계파를 재산출하였다. 새로운 심해 설계파 산출 과정이 2005년과 다른 점은 비태풍의 경우 ECMWF-ERA interim 기상장을 배경장으로 하고 격자분해능 향상과 관측자료의 자료동화 기법을 개선한 재분석 기상장을 사용하였으며, 파랑 수치모형도 천수변형까지 고려된 WaveWatchIII를 사용하였다는 점이다. 또한 태풍의 경우 일본 기상청의 JMA-MSM(Japan Meteorological Agency - Meso Scale Model) 예보 기상장을 사용하고, 역시 격자분해능을 향상시킨 SWAN 파랑 모형을 사용하였다. 이로써 심해 설계파를 해안 가까이 까지 산출할 수 있어 파의 천수변형 계산 시 영역 내의 바람장을 무시하여도 큰 오차를 수반하지 않고 구조물 설계파를 구할 수 있도록 하였다. 이렇게 산출된 심해 설계파의 신뢰도는 파랑 수치모형의 정밀도가 어느 정도 확보된 현 시점에서는 사용된 기상장 특히 바람장의 신뢰도와 직결된다. 따라서 기상장의 신뢰도를 높이기 위한 노력이 미국, 유럽 및 일본 등의 기상 선진국을 중심으로 경주되어 왔다. 우리나라 기상청에서도 최근 초고속 대용량의 전산 능력 확보와 함께 한국형 기상수치예보모형을 개발하는 등 기상 주권을 확립하기 위한 노력을 계속하고 있다. 최근 신뢰도 높은 재분석 기상장과의 접근성이 개선됨에 따라 2019년 해양수산부에서는 기상장을 이용하여 구조물 설계파를 직접 구하는 방식을 우선으로 하고, 종래에 사용되어 오던 심해파 이용 구조물 설계파 산출 방식을 보조로 사용하도록 항만 및 어항 설계기준을 개정 중에 있으며, 2021년부터 실무에 적용될 예정이다. 본 연구에서는 개정되는 항만 및 어항 설계기준에서 권장하는 바람장을 이용하여 구조물 설계파를 직접 구하는 방법의 필수 입력자료인 바람장의 신뢰도를 과거 우리나라에 큰 영향을 미쳤던 몇 개의 태풍에 대해 검토해보고자 한다. 또한 태풍 시 고파랑에 동반되는 폭풍해일은 연안 침수 재해 방지 및 대피 계획 수립을 위해 필수적이므로 폭풍해일에 대해서도 수치모의를 통해 각종 기상장의 신뢰도를 평가하고자 한다. 과거 태풍에 대한 기상장의 신뢰도 평가는 한 두 개의 사상에 대해 만족할 만한 성과를 얻었다고 해서 특정 재분석 기상장이 모든 태풍에 대해 동등한 신뢰도를 가진다고 단정할 수 없으며, 과거의 모든 태풍 각각에 대해 신뢰성 있는 기상장을 확보하는 것이 새로운 항만 및 어항 설계기준에서 권장하는 구조물 설계파 산정의 핵심 요건이다. 본 연구에서는 우리나라 역사상 가장 강력했던

2003년의 태풍 매미에 대한 파랑 및 폭풍해일 수치모의를 통해 기상장의 신뢰도를 평가하고, 후속 논문에서 2012년의 태풍 산바 및 2016년의 태풍 차바에 대한 기상장의 신뢰도를 평가하고자 한다.

## 2. 기상장

2003년 9월 남해안을 강타한 태풍 매미(0314)는 남해안 상륙 당시 중심부 기압이 955 hPa, 10분지속 최대풍속이 38.6 m/s에 이르는 등 관측 사상 가장 강력하였고 우리나라 해안에 막대한 피해를 입힌 태풍이다. 특히 경상남도 마산에서는 순수 폭풍해일고가 2.45 m에 달하고 만조가 겹쳐 마산 신시가지 일대가 범람되었으며, 지하상가 침수로 인한 사망자를 포함하여 마산에서만 사망자가 12명에 이르렀다. 전국적으로는 인명(사망·실종)피해가 132명, 재산피해가 당시 화폐가치로 4조2천여억원에 달하는 막대한 피해를 발생시킨 바 있다(Korea Meteorological Administration, 2011). 태풍 매미는 폭풍해일 피해뿐만 아니라 강풍에 의한 고파랑을 동반하여 남해안과 울릉도 일대에서 해안 지역에 막대한 피해를 입혔다. 당시 태풍의 위력은 북서 태평양에서 발생하는 태풍의 명단에서 ‘매미(Maemi)’란 명칭이 영구 퇴출될 정도로 막강하였다. 따라서 태풍 매미는 우리나라 해역의 연안시설물과 항만 구조물 설계 그리고 재해 방재 계획 수립에 있어서 필수적으로 고려해야 할 가장 중요한 자연재해 중의 하나이다.

본 연구에서는 미국, 유럽 및 일본의 각 기관에서 제공하는 기상장을 이용하여 태풍 매미 시의 폭풍해일과 파랑을 수치모의하고 관측치와 비교하여 각종 기상장의 신뢰도를 평가한다. 미국 국립환경예측센터(NCEP, National Centers for Environmental Prediction)에서는 과거 1979년부터의 최근까지의 기간에 대한 재분석을 실시하여 NCEP-FNL 기상장을 제공한 바 있다. 이 기상장은 공간해상도가 1°(약 100 km), 시간간격이 6시간으로 태풍과 같이 시공간적인 변화가 심한 기상장을 상세히 표현하기에는 한계가 있어 3차원 기상 수치모형을 이용한 상세 영역 재분석의 배경 기상장으로 주로 사용되었다(Mun et al., 2017). 최근에는 공간해상도를 1979년부터 2010년까지의 기간(ver.1)에 대해 0.312°, 2011년부터 현재까지의 기간(ver.2)에 대해 0.205°로 향상시키고, 시간간

격도 1시간으로 격상시킨 좀 더 상세한 재분석을 실시하여 NCEP-CFSR 기상장으로 제공하고 있다(Saha et al., 2010, 2014). 유럽중규모기상예보센터(ECMWF)는 공간해상도 0.75°, 시간간격 6시간의 기상 재분석 자료를 ECMWF-ERA interim으로 제공(Mun et al., 2017)하다가, 최근에 다시 공간해상도를 0.25°, 시간간격 1시간으로 향상시킨 재분석 기상장을 1979년부터 현재까지의 기간에 대해 ECMWF-ERA5로 제공(Hersbach et al., 2020)하고 있다. 일본 기상청에서는 2002년부터 2006년까지는 공간해상도 0.125° × 0.1°, 시간간격 1시간으로 재분석 기상자료를 JMA-MSM으로 제공하다가, 2006년부터 공간해상도를 2배인 0.0625° × 0.05°로 격상시켜 현재에 이르고 있다(Saito et al., 2006). 일본 기상청의 JMA-MSM 기상장은 예보 기상장과 재분석 기상장의 2가지가 있는데, 예보 기상장은 매 3시간마다 향후 3일간의 예보 기상장을 1시간 간격으로 제공하는 바, 지난 3시간 동안의 실제 관측자료를 반영하여 초기 기상장을 개선하고, 이를 이용하여 3일간의 예보 기상장을 3차원 기상모형으로 모의하여 1시간 간격으로 제공한다. JMA-MSM의 예보 기상장은 매 3시간마다 현재까지의 관측자료를 예보에 계속적으로 반영하므로 3일 예보치의 첫 3시간의 기상은 실질적으로 재분석 자료와 신뢰성에 있어서 거의 동등하다. JMA-MSM 예보 기상장은 무료로 제공되는 반면, 재분석 자료는 유료이다. 다만 예보 기상장은 매 3시간마다 1시간 간격으로 향후 3일간의 3차원 기상장(풍속, 기압, 습도, 기온 등등)을 모두 포함하고 있으므로 자료량이 방대한 반면, 재분석 기상장은 원하는 기상자료(예를 들면 해수면 상 10 m의 풍속인 U10 자료)만 선별하여 구매할 수 있어 취급이 용이하다. Table 1은 각종 기상장의 정보를 요약하여 제공한다.

한편 미국 합동태풍경보센터(JTWC, Joint Typhoon Warning Center)에서 제공하는 최적경로(best track, 이후부터 JTWC-BT로 간단히 표기) 정보를 이용한 기압장과 바람장도 실무에서 많이 사용된다. JTWC-BT 정보는 태풍 이동경로를 축으로 하여 해역을 4개 구역으로 나누고 각 구역마다 풍속이 34 knot, 50 knot, 64 knot가 되는 반경 및 최대풍속과 중심기압 및 태풍의 영향반경 그리고 배경기압 등을 제공하여 좀 더 현실적인 바람장을 구할 수 있도록 개선되었다. 본 연구에서는 폭풍해일 수치모형인 ADCIRC에서 제공하는 보조 프로

**Table 1.** List of forecast/reanalysis weather field data

Data	Region	Period	Spatial resolution	Time interval	Reference	
JMA-MSM	Regional (120.0°E~150.0°E, 22.5°N~47.5°N)	2002.07~2006.02	$0.125^{\circ} \times 0.1^{\circ}$	1 hr	Saito et al. (2006)	
		2006.03~present	$0.0625^{\circ} \times 0.05^{\circ}$	1 hr		
NCEP-CFSR	ver. 1	Global	1979.01~2010.12	$0.312^{\circ} \times 0.312^{\circ}$	1 hr	Saha et al. (2010)
	ver. 2	Global	2011.01~present	$0.205^{\circ} \times 0.204^{\circ}$	1 hr	Saha et al. (2014)
ECMWF-ERA5	Global	1979.01~present	$0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$	1 hr	Hersbach et al. (2020)	

그램인 ASWIP.F에 JTWC-BT의 정보를 넣어 추가적인 정보를 얻고, 이 추가 정보를 ADCIRC에 option NWS=19(Dynamic asymmetric model)를 선택하여 Suh and Kim(2012)에서 사용한 바와 같은 동적 비대칭 바람장을 구하였다.

Fig. 1은 태풍연구센터(Typhoon Research Center, [www.typhoon.or.kr](http://www.typhoon.or.kr))에서 제공하는 태풍 매미의 이동경로와 풍속 25 m/s 및 15 m/s의 영향범위이다. Fig. 1에 제시된 시간은 UTC(Coordinated Universal Time)이다. 태풍 매미는 2003년 9월 4일 (UTC) 필리핀 동쪽 해상에서 발생하여 대만 동쪽 해상까지 북서진하면서 9월 10일 중심기압 910 hPa, 1분 지속 평균 풍속 75 m/s(150 kt)의 슈퍼태풍으로 최성기에 이른 다음, 북동진 하면서 제주도 동쪽을 지나 남해안에 상륙하였다. 태풍 매미는 남해안 상륙 시까지도 강한 태풍을 유지하여 경상남도 해안에 큰 피해를 입힌 다음, 후포를 지나 울릉도 북쪽 해안을 통과하여 동해상으로 빠져나갔다.

Fig. 2는 태풍 매미가 남해안에 상륙하기 직전인 2003년 9월 12일 11:00시(UTC)의 기압분포를 각 기상장에서 추출하여 보인 것이다. JMA-MSM, ECMWF-ERA5 및 JTWC-BT에 의한 기압장은 유사한 분포를 보이나, NCEP-CFSR의 기압장은 태풍에 의한 중심부 기압 강하가 매우 약하게 나타났다. 이는 태풍 매미가 발생했던 2003년의 NCEP-CFSR 기상장은 ver. 1이어서 공간해상도가  $0.312^\circ \times 0.312^\circ$ 로 다른 기상장에 비해 매우 낮고 관측자료의 자료동화가 제대로 이루어지지 않아 배경 기상장 수준에 머무른 것으로 판단된다. 유사한 기압장 분포를 주는 나머지 3개 기상장 중 ECMWF-

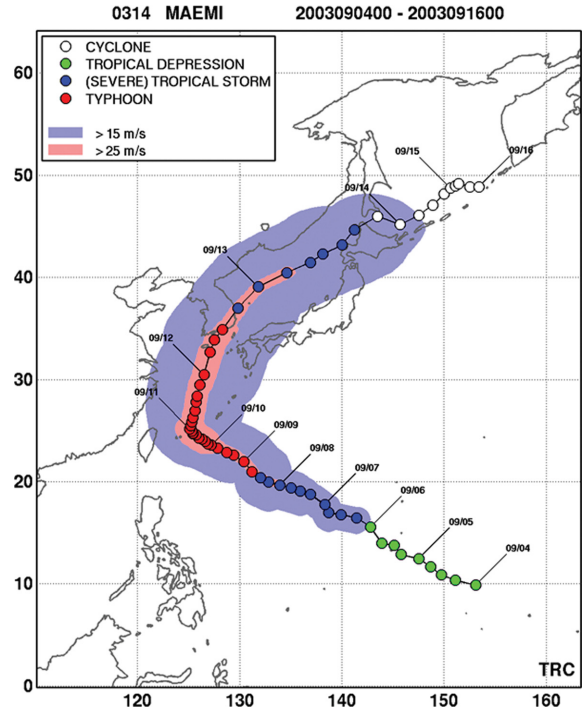


Fig. 1. Track of Typhoon Maemi of 2003 (Captured from Typhoon Research Center).

어지지 않아 배경 기상장 수준에 머무른 것으로 판단된다. 유사한 기압장 분포를 주는 나머지 3개 기상장 중 ECMWF-

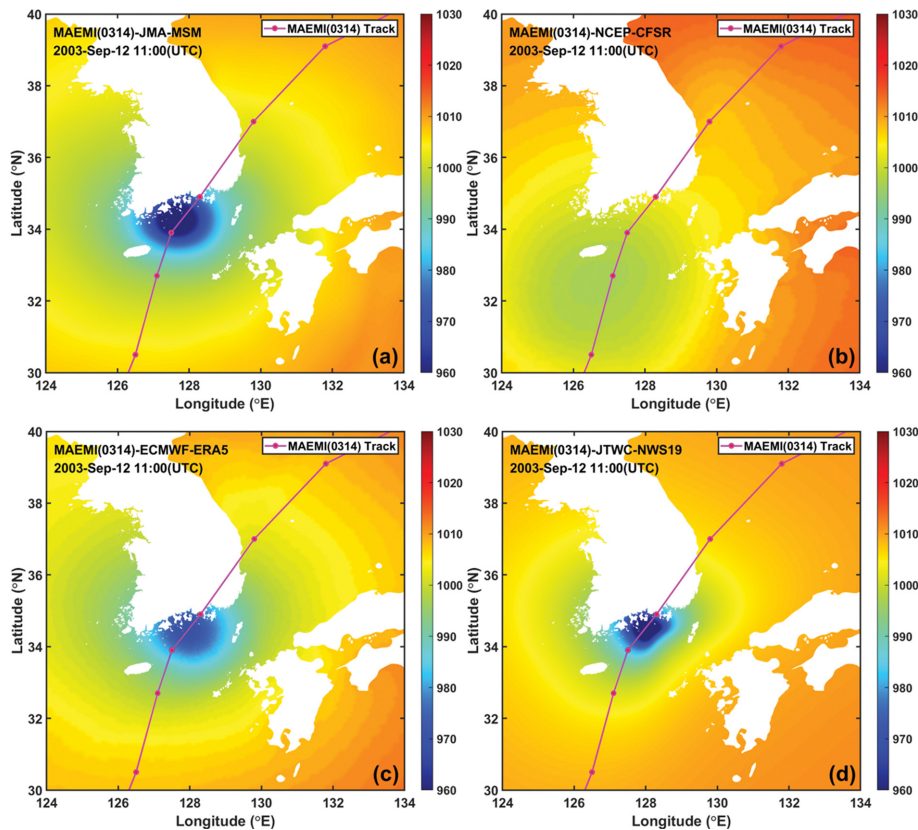


Fig. 2. Comparison of pressure fields for Typhoon Maemi at 11:00 (UTC) on 12 Sept. 2003: (a) JMA-MSM, (b) NCEP-CFSR, (c) ECMWF-ERA5, (d) JTWC best track (NWS=19).

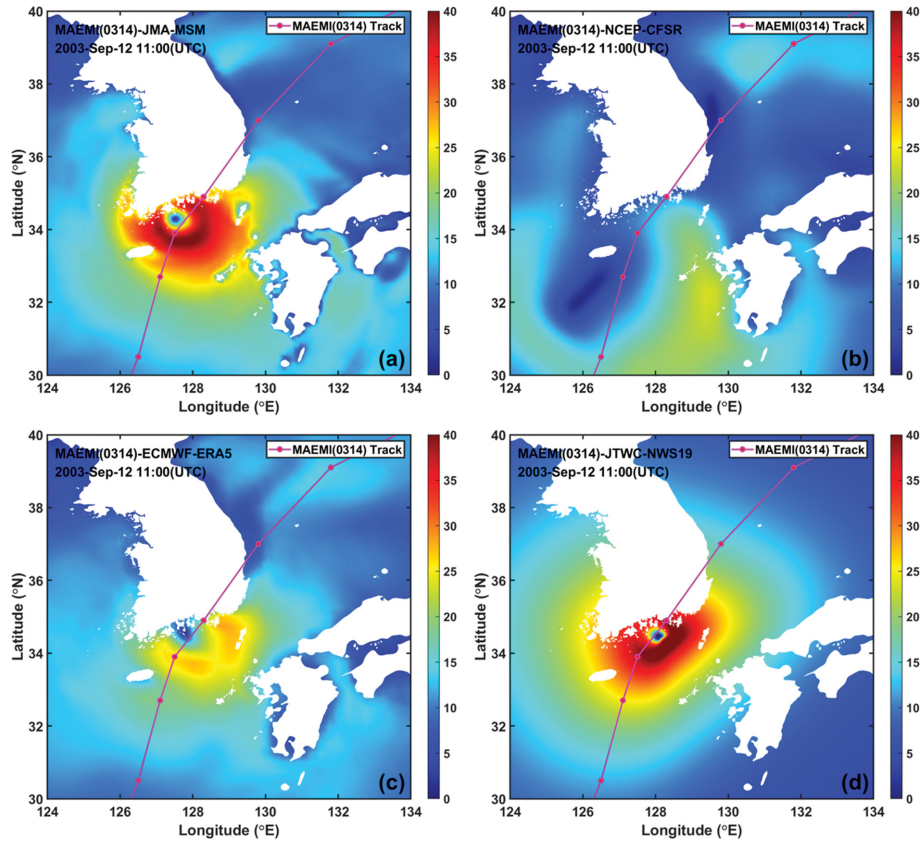


Fig. 3. Comparison of wind fields for Typhoon Maemi at 11:00 (UTC) on 12 Sept. 2003: (a) JMA-MSM, (b) NCEP-CFSR, (c) ECMWF-ERA5, (d) JTWC best track (NWS=19).

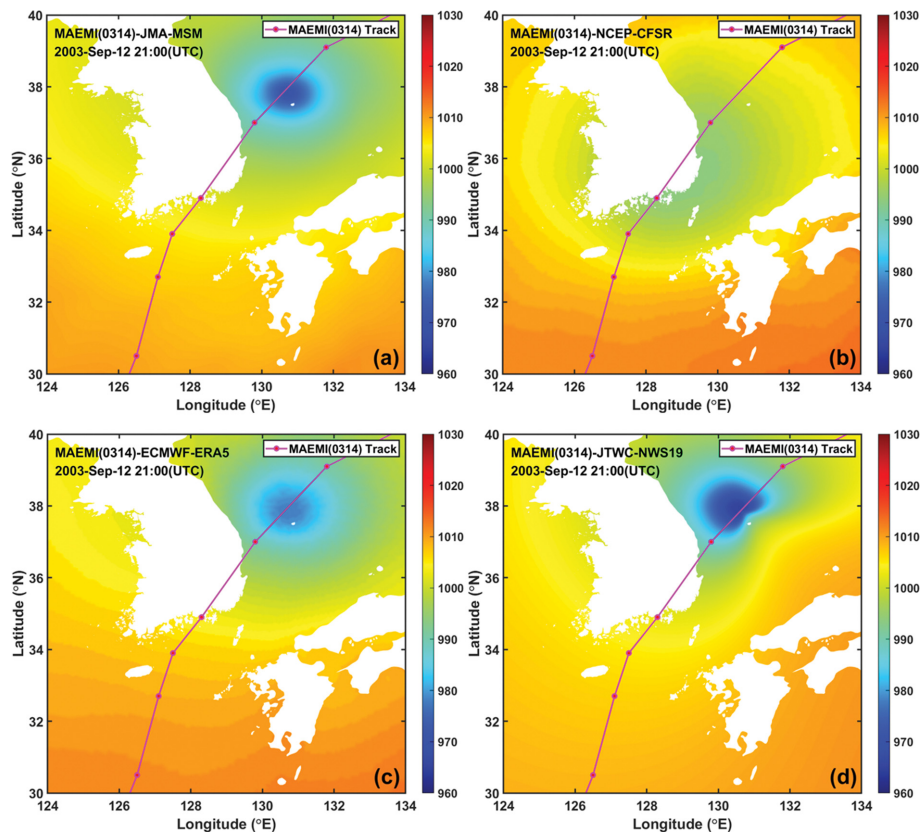


Fig. 4. Comparison of pressure fields for Typhoon Maemi at 21:00 (UTC) on 12 Sept. 2003: (a) JMA-MSM, (b) NCEP-CFSR, (c) ECMWF-ERA5, (d) JTWC-BT (NWS=19).



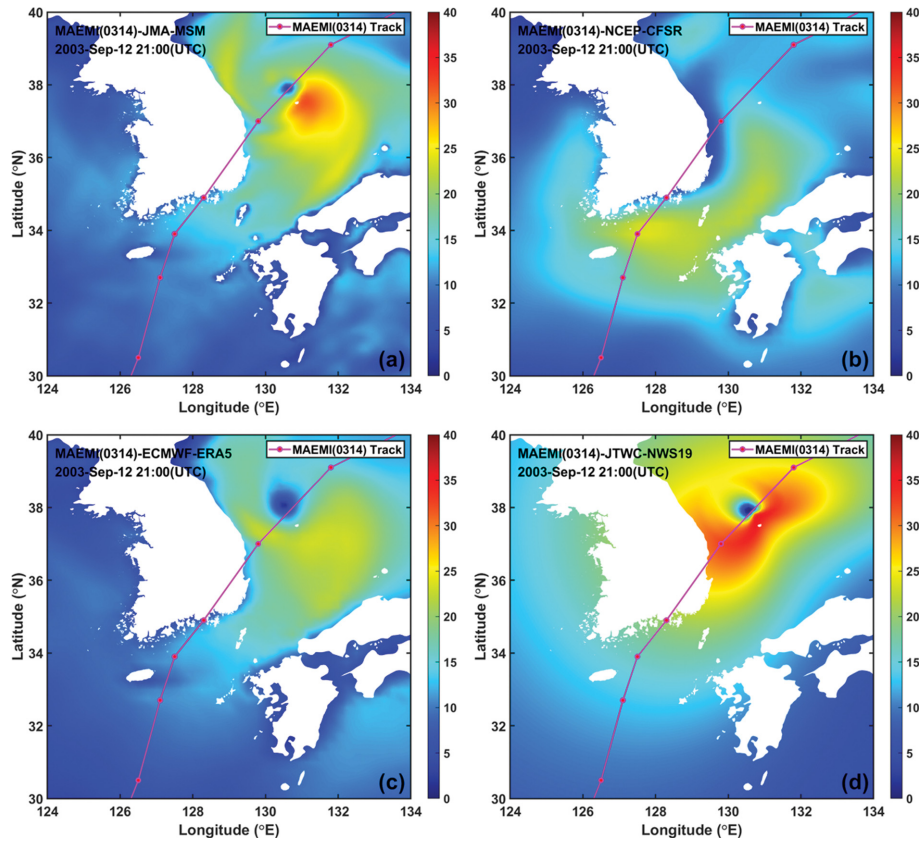


Fig. 5. Comparison of wind fields for Typhoon Maemi at 21:00 (UTC) on 12 Sept. 2003: (a) JMA-MSM, (b) NCEP-CFSR, (c) ECMWF-ERA5, (d) JTWC-BT (NWS=19).

ERA5의 기압은 중심부 기압강하가 상대적으로 약하게 나타났다.

Fig. 3은 Fig. 2와 동일한 시간에 대해 각 기상장에서 제공하는 바람장을 보여주는 바, JMA-MSM과 JTWC-BT는 소용돌이(vortex) 바람이 강하게 나타났고, ECMWF-ERA5 바람은 상대적으로 약하게 나타났으며, NCEP-CFSR 바람은 태풍의 대략적인 위치만 알 수 있을 정도로 매우 약하다. 이로 부터 태풍에 의한 기압과 바람은 서로 직접적인 영향을 미치는 것을 알 수 있으며, 3차원 기상모형의 지배방정식의 연속 방정식과 운동방정식이 잘 작동되고 있음을 보인다.

Fig. 4는 태풍 매미가 동해로 진출하여 울릉도 부근을 통과하는 2003년 9월 12일 21:00시(UTC)의 기압분포를 각 기상장에서 추출하여 보인 것이다. JMA-MSM, ECMWF-ERA5 및 JTWC-BT에 의한 기압장은 유사한 분포를 보이나, NCEP-CFSR의 기압장은 태풍에 의한 중심부 기압 강하가 매우 약하게 나타났다. Fig. 5는 Fig. 4와 동일한 시간에 대해 각 기상장에서 제공하는 바람장을 보여주는 바, JMA-MSM과 ECMWF-ERA5는 풍속의 분포 형상이 유사하나 JMA-MSM의 풍속이 더 강하게 나타났다. JTWC-BT의 바람은 강하기는 하나 전반적인 형상이 앞의 2가지 바람장과 크게 다르게 나타났다. JTWC-BT에 의한 바람장은 다른 기상장과 달리 몇 가지 태풍 파라미터만으로 바람장을 경험공식으로 도출하므로 주변 지형이나 배경 기상장의 영향이 고려되지 못하기 때문인 것

으로 판단된다. NCEP-CFSR 바람은 태풍의 대략적인 위치만 알 수 있을 정도로 매우 약하고, 태풍의 위치도 아직 경상남도 내륙을 통과하지 못하여 이동속도가 비현실적으로 느리게 나타났다.

### 3. 파랑 및 폭풍해일 수치모의

이상에서 살펴본 바와 같이 각종 기상장은 사용된 수치기법과 공간해상도 및 자료동화 기법 등의 차이로 서로 다른 결과를 준다. 어느 기상장이 더 우수한지는 관측 자료와의 비교를 통해 판단할 수 있다. 본 연구에서는 태풍 매미에 의한 파랑과 폭풍해일을 수치모의하고 관측치와의 비교를 통해 각종 기상장의 타당성을 평가하고자 한다.

폭풍해일을 수치모의하기 위한 수치모형으로 Luetich et al. (1992, 1994)에 의해 개발되어 전 세계적으로 널리 보급된 ADCIRC ver.53.04를 선정하였다. 한편 파랑 재현을 위한 수치모형으로는 Delft University에서 개발한 유한요소모형인 unSWAN ver.41.10을 이용하였다. 이 수치모형들의 자세한 지배방정식과 수치기법에 대해서는 다양한 연구논문 등을 통해 잘 정립되어 있으므로 생략한다. 폭풍해일과 파랑 수치모의 시 바닥마찰과 기타 모든 상수는 원래 ADCIRC와 unSWAN에서 제공하는 기본 값을 조정하지 않고 그대로 사용하였다. 또한 unSWAN을 이용한 파랑 수치모의 시 Komen et al.(1984)

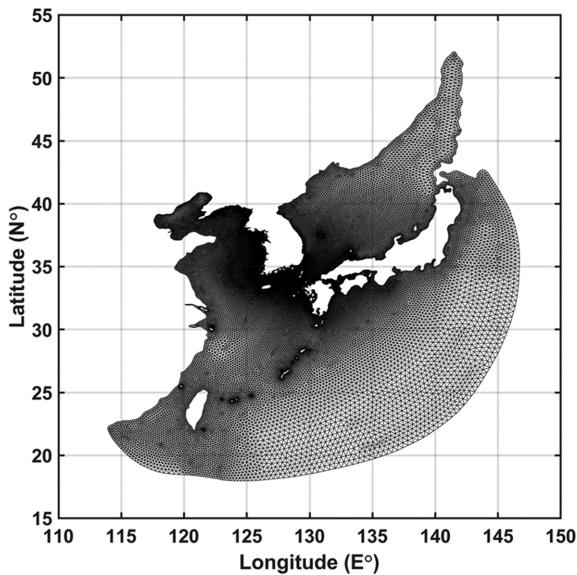


Fig. 6. Finite element mesh for simulation of Typhoon Maemi of 2003.

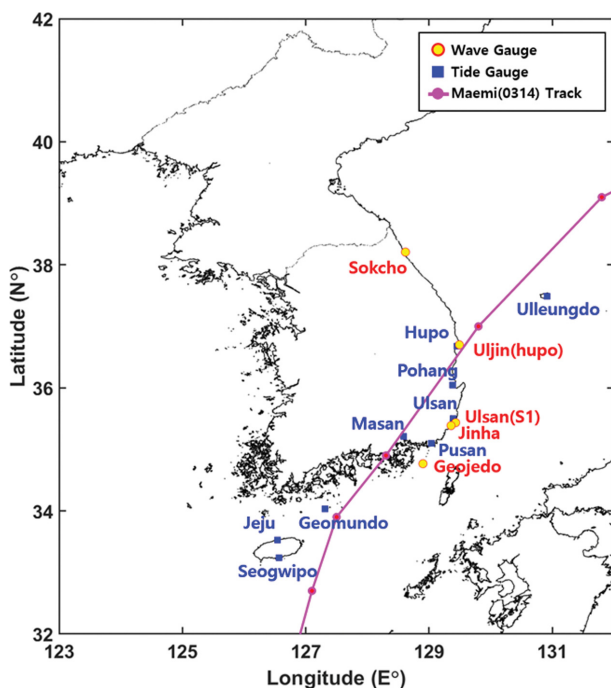


Fig. 7. Location of comparison between measured and calculated storm surge and significant wave.

의 바람 에너지 전달 관계식을 선택하였다.

Fig. 6은 폭풍해일과 파랑을 수치모의하기 위한 유한요소 망을 보여준다. 총 173,202개의 요소와 총 93,486개의 절점을 사용하였다. Fig. 7은 수치모의 결과와 관측치를 비교하는 정점의 위치를 보여주는 바, 폭풍해일에 대해서는 태풍의 강풍 영역인 제주도 해역에 위치하는 주요 항을 포함하여 남해안과 동해안의 항만 등 총 9개 정점에서 관측된 조위 관측 기록으로부터 예상조위를 제거한 순수 폭풍해일 시계열(Korea Hydrographic and Oceanographic Agency, 2012)과 수치모

의 결과를 비교하였으며, 파랑에 대해서는 기상청에서 운영하는 거제도 파고부이 관측점 및 Jeong(2017)의 독자적인 파고 관측점 등 총 5개 정점에서 관측된 유의파고를 수치모의 결과와 비교하였다. 2003년도에는 파고관측이 거의 수행되지 않아 관측자료가 많지 않으므로 당시 입수 가능한 파고 관측 자료는 모두 비교에 사용되었다.

#### 4. 결과 및 분석

폭풍해일은 기압과 바람의 복합 작용으로 발생하는 반면, 파랑은 바람에 의해서만 발생한다. 따라서 파랑장에 대한 관측치와의 비교를 통해 바람장의 신뢰성을 먼저 파악하고 나면, 후속되는 폭풍해일 수치모의에서 기상장과 수치모의의 정밀도 검증 시 기압장의 기여도를 따로 평가할 수 있어 편리하다. 그러므로 파랑 수치모의를 먼저 수행하고 관측치와 비교하여 평가하였다.

Fig. 8은 태풍 매미가 통과하면서 영향을 미치는 제주도, 남해안 및 동해안 해역에 위치하는 기상청의 거제도 해양기상부이 관측점과 Jeong et al.(2016)의 진하, 울진(후포) 및 속초의 수압식 파고계 관측점 3개소, Jeong(2017)과 Kim et al.(2007)의 울산 파고부이 관측점 1개소 등 총 9개소에서 관측된 파랑의 유의파고와 수치모의에 의한 파고를 비교한 것이다. 기상청 해양기상부이의 관측치는 대략 2010년을 전후로 하여 파고의 관측치가 크게 변하는 바, 2010년 이전의 파고 관측치는 전반적으로 작은 반면, 2011년 이후부터는 파고가 이전보다 1.8배 정도 크게 증가하는 경향을 보인다. 따라서 거제도 관측치는 원 자료를 1.8배하여 보정한 값이다. 그림에 보인 바와 같이 JMA-MSM 바람장을 이용한 경우 남해안과 동해안 모든 관측점에서 파고의 침투치는 물론 파고 증가와 감소 형상이 모든 비교 기간에서 전반적으로 잘 재현되었음을 알 수 있다. JTWC-BT 바람장을 이용한 경우에는 남해안의 3개 관측점에서 파고의 침투치가 관측치와 잘 일치하였으나, 동해안에 있는 2개 관측점에서는 파고가 약간 과대평가되었다. 이는 Fig. 5(d)에 보인 바와 같이 JTWC-BT 바람장이 동해안에서 과대평가되었기 때문으로 판단된다. 또한 파고의 증가 및 감소 형상은 실제보다 일찍 증가하고, 침투에 이르는 다음에는 실제보다 천천히 감소하는 경향을 보인다. ECMWF-ERA5 바람장을 사용한 경우 파고의 성장과 감쇄 형상은 JMA-MSM의 경우와 유사하게 관측치와 잘 일치하나 최대파고는 실제 관측치보다 상당히 작게 계산되었다. 이는 Fig. 3과 Fig. 5에 보인 바와 같이 ECMWF-ERA5 바람장이 JMA-MSM의 경우보다 전반적으로 약하기 때문이다. 한편 NCEP-CFSR 바람장을 이용하여 계산한 파고는 예상한 바와 같이 크게 과소평가되었다. 이로부터 JMA-MSM 바람장의 신뢰도가 다른 기상장들에 비해 높다는 것을 확인할 수 있으며, 향후 남해안과 동해안의 파고 관측 자료가 없는 특정 정점에서 태풍 매미에 의한 파고를 필요로 하는 경우 JMA-

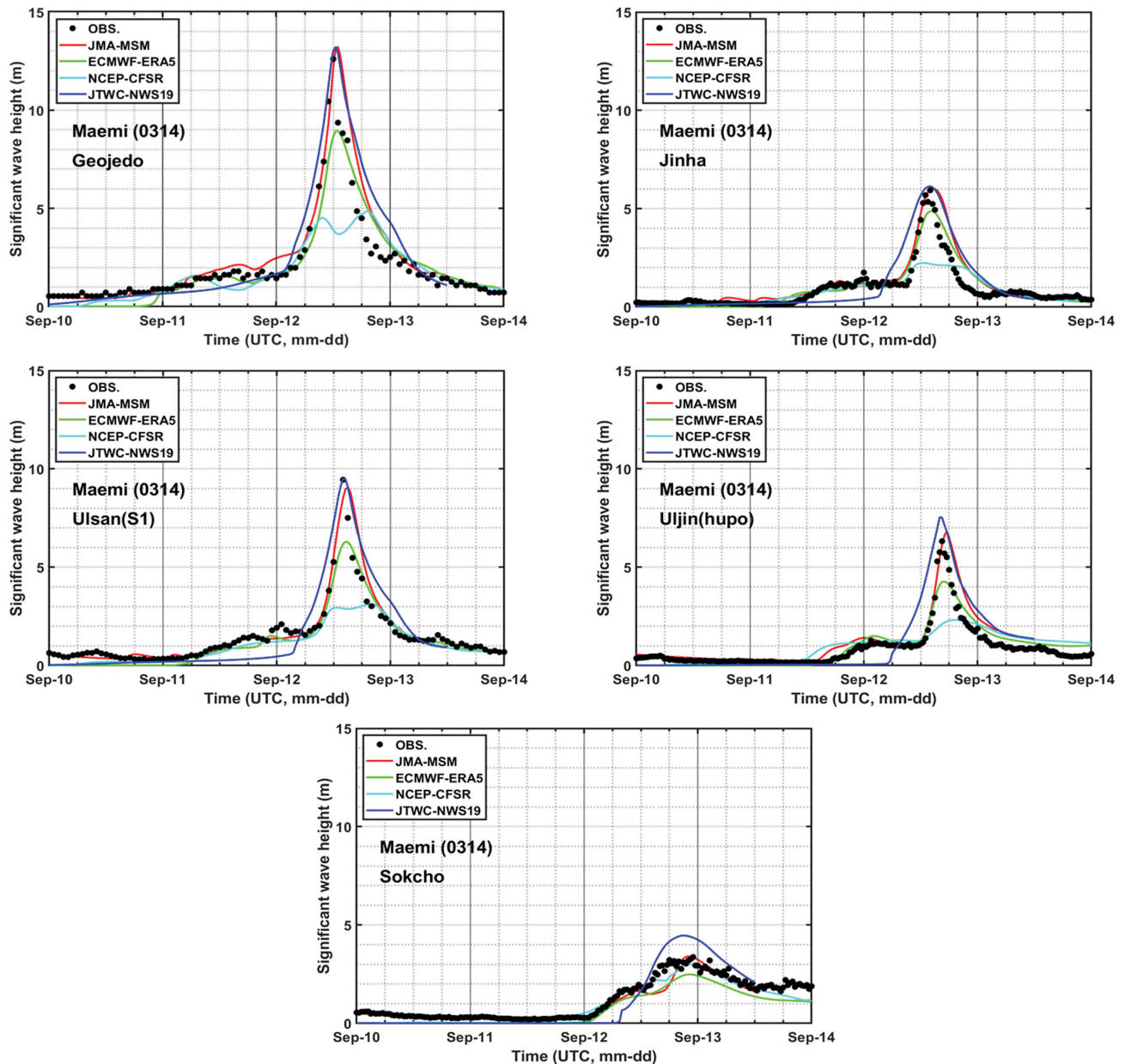


Fig. 8. Comparison of significant wave heights calculated using various wind fields against observed data for Typhoon Maemi.

MSM 바람장을 사용하여 파랑 수치모의를 통해 정도 높은 설계파를 구할 수 있음을 뜻한다. JMA-MSM 바람장의 우수성은 다른 기관의 기상장이 전지구를 대상으로 하여 공간해상도가 낮고 특히 지구 어느 특정 지역의 관측자료를 세심히 반영하지 못하며, 6시간 또는 12시간 마다 자료동화를 수행하는 한계가 있는 반면, JMA-MSM 기상장은 동아시아 해역만을 대상으로 하는 지역 기상장으로 공간해상도가 높고 매 3시간 마다 상세한 관측자료를 반영하므로 다른 전지구 대상 기상장에 비해 월등한 신뢰도를 가진다고 할 수 있다.

바람장에 대한 평가가 이루어진 상태에서 기압장의 신뢰도를 평가하기 위해 폭풍해일 수치모의를 수행하고 관측치와 비교하였다. Fig. 9는 제주도 해안에 위치하는 서귀포항과 제주항에서 태풍 매미 내습 시 관측된 폭풍해일고의 시계열과 각

종 기상장을 사용하여 ADCIRC 수치모형에 의해 계산된 폭풍해일고 시계열을 비교한 것이다. 태풍 매미는 제주도의 동쪽 해역을 통과하여 비교 대상인 두 항구는 태풍의 가항반원에 위치하므로 해일고는 최대 0.4 m 정도로 전반적으로 작은 편이다. 그림에 보인 바와 같이 JTWC-BT 기상장은 해일고의 침투치와 전반적인 시계열 형상을 잘 재현하고 있는 반면, JMA-MSM 기상장은 해일고 침투치를 약간 크게 평가하고 있다. ECMWF-ERA5는 해일고가 증가하는 기간 동안은 침투치를 포함하여 관측치를 잘 재현하나, 태풍 중심 통과 직후 해수위가 저하되어 음의 값을 가지는 구간에 대해서는 해수위 저하가 과소평가되었다. JMA-MSM 기상장이 ECMWF-ERA5 기상장과 매우 유사하면서 기압 및 풍속이 약간 강한 점을 고려하면 해일고 관측치를 전기간에 걸쳐 잘 재현할 수



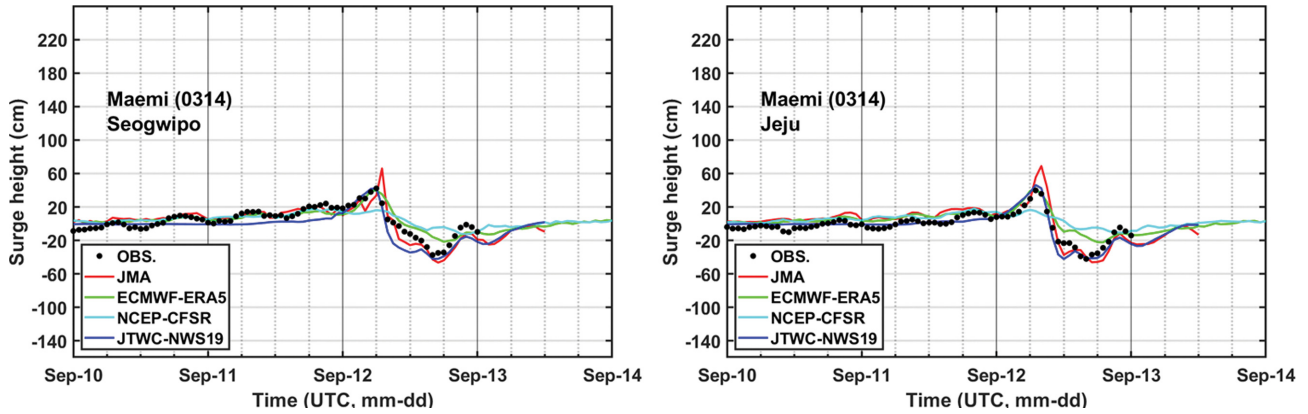


Fig. 9. Comparison of storm surge heights calculated using various weather fields against observed data at harbours along Jeju coast for Typhoon Maemi.

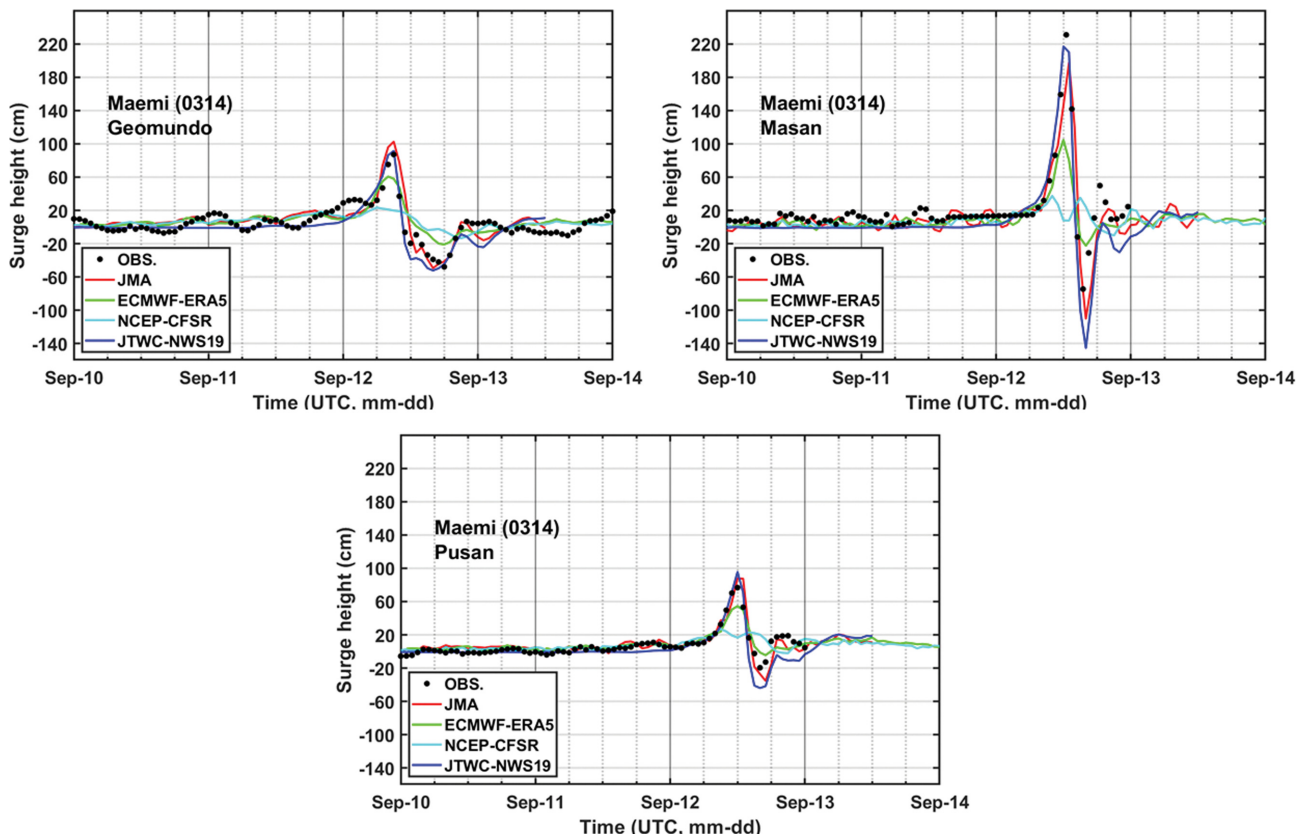


Fig. 10. Comparison of storm surge heights calculated using various weather fields against observed data at harbours along south coast for Typhoon Maemi.

있는 기압장을 재분석하는 데 참고로 할 수 있다. NCEP-CFSR 기상장은 해일고를 과소평가하였다.

Fig. 10은 태풍이 상륙한 남해안에 위치하는 거문도항, 마산항과 부산항에서 관측된 폭풍해일고의 시계열과 각종 기상장을 사용하여 ADCIRC 수치모형에 의해 계산된 폭풍해일고 시계열을 비교한 것이다. 당시 12명의 사망 및 실종자가 발생한 마산항에서는 순수 해일고가 2.45 m에 달해 우리나라 관측 역사상 가장 큰 폭풍해일고를 기록하였다. 당시 마산항은 역V자 형태의 좁고 긴 마산만 끝에 위치하고, 또한 태풍

이동 경로 오른편 최대풍 근처에 위치하여 저기압에 의한 수위 상승, 바람의 취송에 의한 수위 상승 및 수로폭과 수심 감소에 의한 해일의 증폭 등 3가지 요소가 모두 갖추어져 이와 같은 기록적인 해일이 발생하였다. 여기에 만조 시간에 가까운 조석의 영향까지 중첩되고 호우로 인한 하천의 대량 유입이 겹쳐 신시가지가 심하게 범람되는 사태가 발생하였다. 그림에 보인 바와 같이 JMA-MSM 기상장과 JTWC-BT 기상장은 3개 항 모두에서 폭풍 해일고를 잘 재현하고 있다. 다만 마산항에서 JMA-MSM 기상장에 의한 해일고 침투치가

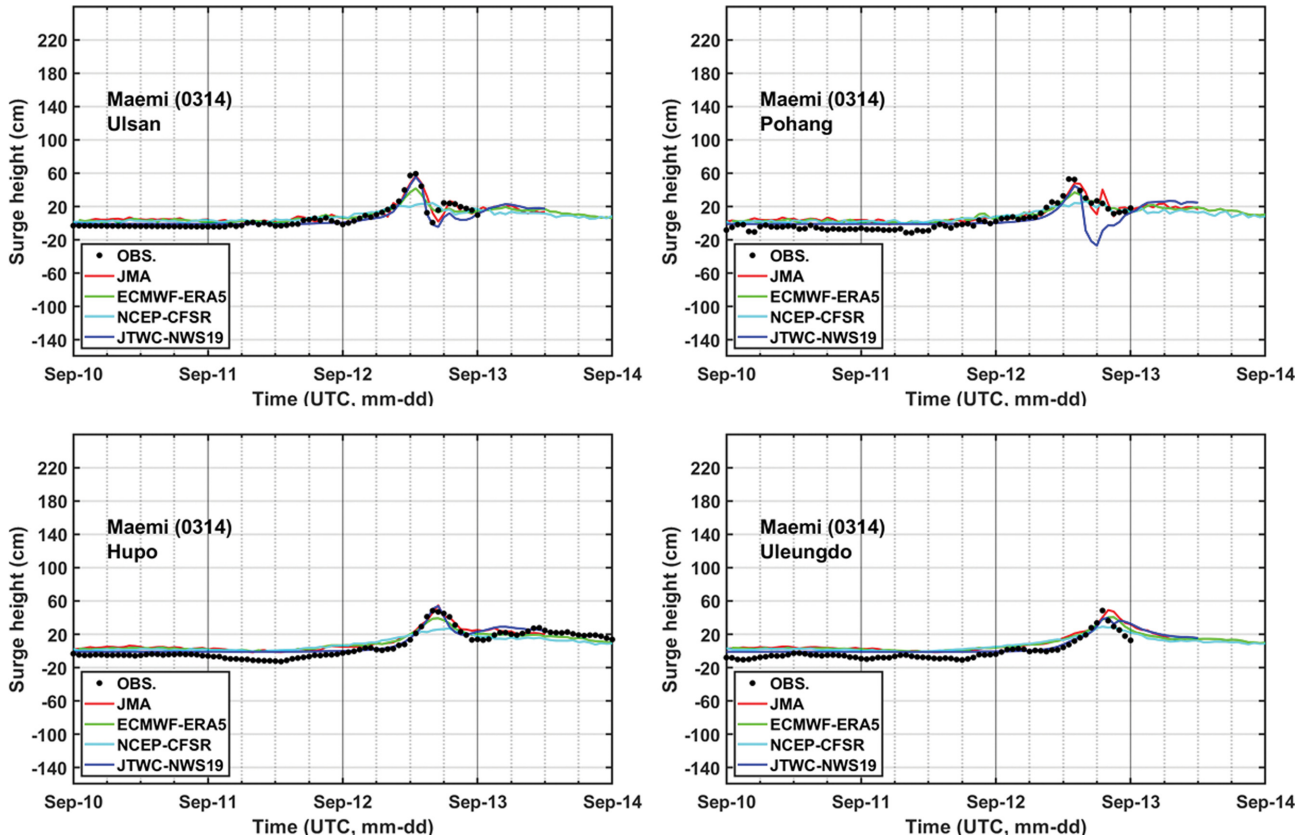


Fig. 11. Comparison of storm surge heights calculated using various weather fields against observed data at harbours along east coast for Typhoon Maemi.

관측치나 JTWC-BT 기상장에 의해 계산된 것보다 약간 작게 산출되었다. 이는 JMA-MSM 기상장에 의한 바람은 Table 1에 제시한 바와 같이 3차원 기상 수치모의 시  $0.125^\circ \times 0.1^\circ$  (약 10 km)의 수평 공간해상도로 계산되어 마산만과 같이 내륙으로 좁고 길게 발달(진해만 폭 6 km, 마산만 폭 1.5 km)된 내륙 해수면은 육지로 간주되어 지면 마찰이 강하게 작용하므로 해수면 상 10 m 풍속이 과소평가된 반면, JTWC-BT 기상장은 지형을 고려하지 않고 모두 바다로 간주하므로 풍속이 진해만에서 마산만으로 이어지는 해역에서 강하게 나타났기 때문으로 판단된다. 향후 태풍 매미에 대한 완성도 높은 기상장을 다시 재분석할 때 마산만과 같은 복잡한 지형은 더욱 상세한 공간 해상도를 적용하여야 함을 알 수 있다. ECMWF-ERA5 기상장은 전반적으로 JMA-MSM 기상장의 결과와 해일 발달 형상이 유사하나 그 강도는 약하다. NCEP-CFSR 기상장은 태풍 기상장을 제대로 표현하지 못해 폭풍해일 발달과정도 실제와 전혀 다르게 나타났다.

마지막으로 Fig. 11은 동해안에 위치하는 울산항, 포항항, 후포항과 울릉도에서 관측된 폭풍해일고의 시계열과 각종 기상장을 사용하여 계산된 해일고 시계열을 비교한 것이다. 그림에 보인 바와 같이 JMA-MSM 기상장은 4개 항 모두에서 폭풍 해일고를 잘 재현하고 있다. ECMWF-ERA5 기상장은 전반적으로 JMA-MSM 기상장의 결과와 해일고 시계열 형상이 유사하나 그 강도는 약하다. JTWC-BT 기상장은 울산

항과 후포항에서는 폭풍 해일고를 잘 재현하고 있으나, 포항항에서의 침두 이후 해수위 하강이 과대평가되었으며, 울릉도에서는 해일고가 과소평가되었다. 이는 JTWC-BT 기상장이 육지 지형을 반영하지 못하고, 태풍이 동해상으로 진출할 때 이동속도가 빨라지는 경우 바람장이 왜곡되는 일반적인 경향 때문인 것으로 판단된다. NCEP-CFSR 기상장은 태풍 기상장을 제대로 표현하지 못해 폭풍해일 발달과정도 실제와 다르게 나타났다.

이상에서 각종 기상장의 파랑 및 폭풍해일 재현 능력을 계산치와 관측치의 시계열을 비교하여 정성적으로 검토하였다. 바람장을 이용한 파랑의 재현은 궁극적으로 방파제 등 외곽 시설물의 설계파를 구하기 위한 목적으로 시행되며, 구조물 설계파는 태풍 사상에 의한 파고 시계열 중 침두치만을 사용한다. 또한 파의 월파량 산정에 적용되는 해일고는 침두와 발생 시의 해일고가 중요하다. 따라서 본 연구에서는 각 파고 관측점에서의 침두 유의파고와 해일고만을 추출하여 계산치와 관측치를 비교하여 각 기상장의 종합적인 신뢰도를 평가한다. Fig. 12(a)는 5개 관측점에서의 관측 침두파고와 계산 침두파고를 비교한 것이며, Fig. 12(b)는 9개 항만에서의 침두 해일고(상승 및 하강)의 침두치를 비교한 것이다. 또한 Table 2는 유의파고와 해일고 침두치의 평균제곱근오차(RMSE, Root Mean Square Error)를 구한 결과이다.

이상에서 살펴본 바와 같이 JMA-MSM 기상자료가 가장

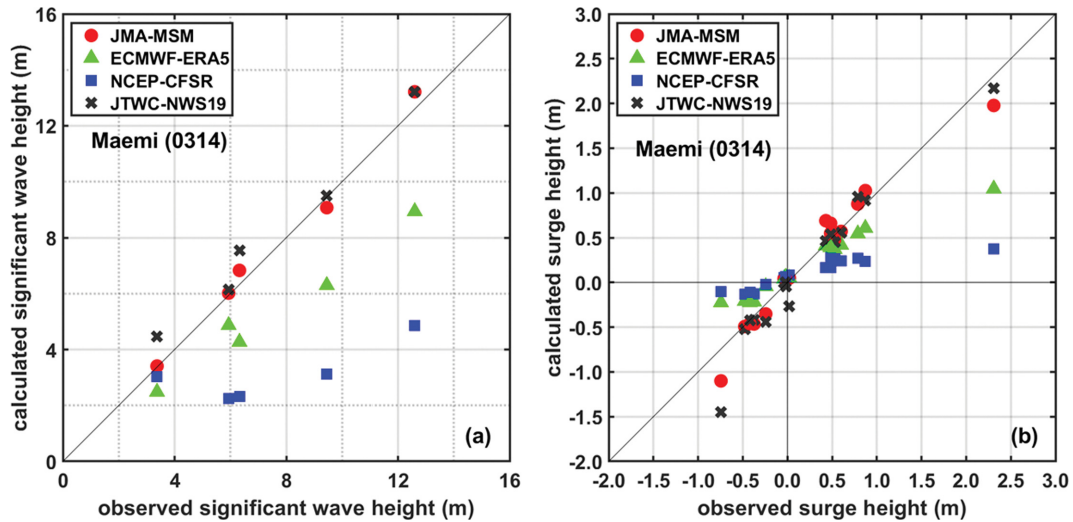


Fig. 12. Comparison of measured and calculated peak values associated with various weather fields: (a) peak significant wave height, (b) peak surge height.

Table 2. Comparison of RMSE of peak significant wave height and peak surge height associated with various weather fields (Unit : m)

Data	JMA-MSM	ECMWF-ERA5	NCEP-CFSR	JTWC-BT
Calculated				
Peak wave height	0.40	2.43	5.09	0.79
Peak storm surge	0.15	0.35	0.56	0.20

신뢰도가 높았고, JTWC의 최적경로를 이용한 기상자료도 상당히 우수하게 나타났다. ECMWF-ERA5 기상자료는 전반적으로 해일이나 파고의 크기가 작게 나타났으며, NCEP-CFSR 기상자료는 신뢰도가 가장 낮게 나타났다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 2003년 9월 남해안에 상륙하여 남해 동부 해안에 큰 피해를 입힌 태풍 매미에 의한 폭풍해일과 파랑을 수치모의하고, 관측치와의 비교를 통해 기상장의 신뢰도를 평가하였다. 기상장으로는 3차원 기상 수치모의에 의해 산출된 JMA-MSM 예보 기상장, NCEP-CFSR 기상장, ECMWF-ERA5 기상장과 JTWC 최적경로 기반 기상장을 사용하였다. 폭풍해일 수치모형으로는 유한요소모형인 ADCIRC를, 파랑 수치모형으로는 역시 유한요소모형인 unSWAN의 최신 버전을 이용하였다. 폭풍해일과 파랑 수치모의 시 바닥마찰과 기타 모든 경험 상수는 원래 ADCIRC와 unSWAN에서 제공하는 기본 값을 조정하지 않고 그대로 사용하였다. 본 연구에서는 태풍 경로 상 해역에 위치하는 파고 관측자료와 조위 관측자료를 입수하고 수치모의 계산치와의 비교를 통해 각종 기상장의 전반적인 시공간적 신뢰도를 평가하였다.

먼저 바람 만에 의해 결정되는 파랑에 대해 관측치와 계산치를 5개 정점에서 비교한 결과, JMA-MSM 기상장은 남해안과 동해안의 넓은 해역에 걸쳐 파고 관측 자료를 잘 재현하였다. 반면 JTWC 최적경로 기반 기상장은 전반적으로 우

수한 신뢰도를 보이나, 동해안에 있는 관측점에서는 파고가 약간 과대평가되었다. 또한 파고가 실제보다 일찍 증가하고, 첨두에 이른 다음에는 실제보다 천천히 감소하는 경향을 보였다. ECMWF-ERA5 바람장을 사용한 경우 파고의 성장과 감쇄 양상은 관측치와 잘 일치하나 최대파고는 관측치보다 상당히 작게 계산되었다. 한편 NCEP-CFSR 바람장을 이용하여 계산한 파고는 크게 과소평가되었다. 이로부터 JMA-MSM 바람장의 신뢰도가 다른 기상장들에 비해 높다는 것을 확인할 수 있었다.

한편 9개 항만에서 관측된 폭풍해일과 수치모의 결과를 비교한 결과, JMA-MSM 기상장은 태풍 경로 상의 육지와 바다 등의 지형과 선행 배경 기상장이 잘 반영되어 태풍 통과 전후의 전 기간에 걸쳐 폭풍해일 시계열을 잘 재현하였다. JTWC 최적경로 기반 기상장은 전반적으로 우수한 결과를 보이나, 태풍이 동해상으로 진출할 때 이동속도가 빨라지는 경우 바람장이 왜곡되어 신뢰성이 저하되었다. ECMWF-ERA5 기상장은 전반적으로 JMA-MSM 기상장의 결과와 해일 발달 양상이 유사하나 그 강도는 약하다. NCEP-CFSR 기상장은 태풍 기상장을 제대로 표현하지 못해 폭풍해일 발달과정도 실제와 전혀 다르게 나타났다.

본 연구의 각종 기상장 신뢰도 평가 결과 JMA-MSM 기상자료가 가장 신뢰도가 높았고, JTWC의 최적경로를 이용한 기상자료도 상당히 우수하게 나타났다. ECMWF-ERA5 기상자료는 전반적으로 해일이나 파고의 크기가 작게 나타났으며, NCEP-CFSR 기상자료는 태풍 매미의 특정 경우에 대

해 신뢰도가 가장 낮게 나타났다.

## References

- Akbar, M., Kanjanda, S. and Musinguzi, A. (2017). Effect of bottom friction, wind drag coefficient, and meteorological forcing in hindcast of Hurricane Rita storm surge using SWAN + ADCIRC model. *J. Mar. Sci. Eng.*, 5(38), doi:10.3390/jmse5030038.
- Booij, N., Ris, R.C. and Holthuijsen, L.H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation. *J. Geophys. Res.*, 104(C4) 7649-7666.
- Hasselmann, K. (1968). Weak-interaction theory of ocean waves. *Basic Developments in Fluid Dynamics*, ed. Holt, M., New York, Academic Press, 2, 117-182.
- Hersbach, H. and Coauthors (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 1999-2049.
- Jeong, W.M. (2017). Private communication.
- Jeong, W.M., Ryu, K.H., Oh, S.H. and Baek, W.D. (2016). Trends of the storm wave appearance on the east coast analyzed by using long-term wave observation data. *J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 28(2), 109-115 (in Korean).
- Kim, K.-M., Kim, J.-H., Ryu, H.-S. and Jeong, W.-M. (2007). Calculation of the wave height distribution in the vicinity of Ulsan waters using the observed data of Typhoon Maemi. *J. of Korean Navigation and Port Research*, 31(6), 479-484 (in Korean).
- Komen, G.J., Hasselmann, S. and Hasselmann, K. (1984). On the existence of a fully developed wind sea spectrum. *J. Phys. Oceanogr.*, 14, 1271-1285.
- Korea Hydrographic and Oceanographic Agency (2012). *Oceanic abnormal phenomena report*, Vol.2 (in Korean).
- Korea Meteorological Administration (2011). *Typhoon white book* (in Korean).
- Korea Ocean Research and Development Institution (2005). *Report on the estimation of deep-water design wave in Korea II* (in Korean).
- Luetich, R., Westerink, J. and Scheffner, N. (1992). ADCIRC: An advanced three-dimensional circulation model for shelves, coasts, and estuaries. Report 1. Theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL. Vicksburg MS: Coastal Engineering Research Center.
- Luetich, R., Westerink, J. and Scheffner, N. (1994). ADCIRC: An advanced three-dimensional circulation model for shelves, coasts, and estuaries. Report 2. User's manual for ADCIRC-2DDI. Vicksburg MS: Coastal Engineering Research Center.
- Ministry of Oceans and Fisheries (2019). *Report on the estimation of deep water design waves of Korea*. 117-149 (in Korean).
- Mun, J., Lee, H.W., Jeon, W. and Lee, S.-H. (2017). Impact of meteorological initial input data on WRF simulation - Comparison of ERA-interim and FNL data. *J. of Environmental Science International*. 26(12), 1307-1319 (in Korean).
- Qiao, W., Song, J., He, H. and Li, F. (2019) Application of different wind field models and wave boundary layer model to typhoon waves numerical simulation in WAVEWATCH III model. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 71(1), 1657552, DOI:10.1080/16000870.2019.1657552.
- Saha, S. and Coauthors (2010). The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91, 1015-1057. doi: 10.1175/2010BAMS3001.1
- Saha, S. and Coauthors (2014). The NCEP Climate Forecast System Version 2. *J. of Climate*, 27(6), 2185-2208.
- Saito, K. and Coauthors (2006). The operational JMA nonhydrostatic meso-scale model. *Monthly Weather Review*, 134, 1266-1298.
- Suh, S.W. and Kim, H.J. (2012). Typhoon surge simulation on the west coast incorporating asymmetric vortex and wave model on a fine finite element grid. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 24(3), 166-178 (in Korean).
- SWAN team (2016). *SWAN User manual (SWAN Cycle III version 41.10A)*. Delft University of Technology, 12-20.
- Tolman, H.L. (1997). A new global wave forecast system at NCEP. *Ocean Wave Measurements and Analysis*, Vol. 2, Edge, B.L. and Helmsley, J.M., Eds., ASCE, 777-786.
- WAMDI group (1988). The WAM model - a third generation ocean wave prediction model. *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 1775-1810.
- Wang, Z., Gong, Y., Cui, J., Dong, S. and Wu, K. (2019). Effect of the drag coefficient on a typhoon wave model. *Journal of Oceanology and Limnology*, 37(6), 1795-1804.
- WAVEWATCH III development group (2016). *User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 4.18*. MMAB Technical Note 316.

---

Received 15 September, 2020

1<sup>st</sup> Revised 12 October, 2020

2<sup>nd</sup> Revised 13 October, 2020

Accepted 14 October, 2020