

가상시나리오에 따른 남해안 지진해일 특성 연구 Analysis of Tsunami Characteristics of Korea Southern Coast Using a Hypothetical Scenario

신범식* · 김동석** · 김동환*** · 이상엽**** · 조시범*****

Bumshick Shin*, Dong-Seog Kim**, Dong-Hwan Kim***, Sang-Yeop Lee****
and Si-Bum Jo*****

요지 : 전 세계적으로 대규모 지진이 다발적으로 발생하고 있다. 특히, 2011년 동일본 대지진으로 인해 동아시아 일대의 지각이 긴장상태에 있으며, 향후 발생할 수 있는 지진 활동에 대한 우려와 불확실성이 더욱 가중되고 있다. 동해안 지진해일에 대한 대책으로 국립재난안전연구원에서는 동해안을 대상으로 지진해일 수치모의를 통해 지진해일의 범람 특성 분석 및 침수예상도 작성에 관한 연구를 수행한 바 있다. 그러나 남해안의 경우 동해안에 비해 지진해일에 관한 연구가 매우 부족한 실정이다. 남해안의 경우 조차가 1~4 m로 조석의 영향을 무시할 수 없을 정도이기 때문에 조석의 영향이 지진해일 전파특성에 미치는 영향을 분석할 필요성이 있다. 남해안에 영향을 미칠 수 있는 지진해일 발생지는 해저의 단층운동이 활발한 유구열도(Ryukyu Island)와 난카이트러프 단층대이다. 과거 남해안은 지진해일의 직접적인 피해가 없었으나, 지진해일 발생 가능성은 항상 존재하기 때문에 사전에 대비할 수 있는 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 남해안에 영향을 미칠 수 있는 지진해일 가상시나리오에 대한 지진해일 수치모의를 하였다. 아울러 조석과 지진해일의 상호작용으로 연안에서 나타나는 해일 전파특성을 분석하고자 한다. 이는 남해안 지진해일 위험성 평가를 통해 남해안에서 발생할 수 있는 지진해일 대비에 활용될 것으로 판단된다.

핵심용어 : 지진해일, 가상시나리오

Abstract : Large-scale earthquakes are occurring globally, especially in the South Asian crust, which is experiencing a state of tension in the aftermath of the 2011 East Japan Earthquake. Uncertainty and fear regarding the possibility of further seismic activity in the near future have been on the rise in the region. The National Disaster Management Research Institute has previously studied and analyzed the overflow characteristics of a tsunami and the rate of flood forecasting through tsunami numerical simulations of the East Sea of South Korea. However, there is currently a significant lack of research on the Southern Coast tsunamis compared to the East Coast. On the Southern Coast, the tidal difference is between 1~4 m, and the impact of the tides is hard to ignore. Therefore, it is necessary to analyze the impact of the tide propagation characteristics on the tsunami. Occurrence regions that may cradle tsunamis that affect the southern coast region are the Ryukyu Island and Nankai Trough, which are active seafloor fault zones. The Southern Coast has not experienced direct damage from tsunamis before, but since the possibility is always present, further research is required to prepare precautionary measures in the face of a potential event. Therefore, this study numerically simulated a hypothetical tsunami scenario that could impact the southern coast of South Korea. In addition, the tidal wave propagation characteristics that emerge at the shore due to tide and tsunami interactions will be analyzed. This study will be used to prepare for tsunamis that might occur on the southern coast through tsunami hazard and risk analysis.

Keywords : tsunami, hypothetical tsunami scenario

*가톨릭관동대학교 조교수(Assistant Professor, Catholic Kwandong University)

**국립재난안전연구원 책임연구원(Corresponding author: Dong-Seog Kim, Principal Researcher, National Disaster Management Research Institute, 365, Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan 44538, Korea, Tel: +82-52-928-8242, Fax: +82-52-928-8299, kds84@korea.kr)

***국립재난안전연구원 책임연구원(Principal Researcher, National Disaster Management Research Institute)

****국립재난안전연구원 선임연구원(Senior Researcher, National Disaster Management Research Institute)

*****국립재난안전연구원 시설연구사(Researcher Officer, National Disaster Management Research Institute)

1. 서론

미국 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)의 NCEI(National Centers for Environmental Information)(NOAA, 2023)에 따르면, 1,200개 이상의 확인된 지진해일에 대한 정보 중 가장 위험한 지진해일로 평가되고 있는 지진은 2004년 12월에 발생한 수마트라-안다만 지진해일과 재산 피해가 가장 많은 2001년 동일본 대지진이다. 이처럼 지진해일에 영향을 받을 수 있는 해안에 인접하고 있는 국가들은 지진해일 위험성 평가를 통해 지진해일 위험에 대비하여야 한다.

실제로 우리나라에서도 1940년의 Shankotan 지진해일, 1964년 니가타 지진해일, 1983년 동해 중부 지진해일, 1993년 북해도 남서 외해 지진해일 등 총 4회의 지진해일이 관측되었으며 특히 1983년과 1993년 동해에서 발생한 지진해일로 인하여 강원도를 비롯한 동해안 지역에서 인명 및 재산 피해가 발생하였다. 이를 통해 우리나라 해안지역에서의 지진해일 위험성 평가에 대한 필요성이 재조명되기도 하였다.

동해안 지진해일에 대한 대책으로 일본 지진 공백역을 대상으로 가상시나리오 기반 동해안 지진해일 대피장소(205개소)에 대한 지진해일 침수예상도가 구축되어 있다(NDMI, 2021)지만, 남해안은 동해안과 비교하여 지진해일에 의한 위험성이 상대적으로 낮기 때문에 남해안에 관한 지진해일 연구가 다소 부족한 실정이다. 우리나라 서·남해안에 영향을 끼칠 수 있는 남해에서의 해저지진은 일본 서·남해에 위치한 유구열도에서의 지진 단층대 지역임을 확인할 수 있다. 또한 역사지진 활동기록을 분석하여 보면 일본 서·남해지역에서 발생할 수 있는 지진규모는 유구열도에서 최대 M_w 8.0, 난카이트러프에서 M_w 8.7로 분석되었다(NDMI, 2019). 우리나라 서남해안은 동해안과 다르게 대조차 환경으로 조석이 지배적인 해역이며, 조석과 지진해일의 상호작용으로 나타나는 지진해일이 실제 자연에서 발생할 수 있는 현실적인 해일이다. 지진해일-조석의 상호작용에 의한 해수면 높이는 지진해일과 조석을 별도로 시뮬레이션하여 얻은 해수면 높이를 선형적으로 합산한 것과 다르다는 연구(Kowalik et al., 2010)와 조석에 의한 해수면 변화는 낙조 시보다 창조시에 크게 상승

하고, 더 빠르게 전파된다는 연구(Lee et al., 2015) 및 해저지형, 역사적인 지진해일과 예상되는 지진해일에 대한 시뮬레이션을 통해 조석 및 조류상황에 따라 지진해일로 인한 해수면의 높이와 도달 시간의 변화가 발생하는 것을 제시한 바 있다(Kim et al., 2021). 따라서 본 연구에서는 조석이 고려된 지진해일을 수치모형실험을 통해 유구열도 및 난카이트러프를 포함하는 가상시나리오를 설정하여 이를 바탕으로 지진해일 시뮬레이션을 통해 남해안에서의 지진해일 위험성에 대해 분석하고자 한다.

2. 남해안 지진해일 가상시나리오 선정

본 연구에서 남해안 지진해일 위험성에 대해 분석하였다. 선행연구(NDMI, 2019)를 통해 검토한 결과, 남해안에 영향을 미칠 것으로 예상되는 지진해일 발생역은 유구열도 및 난카이트러프 단층이다. 과거 발생한 지진의 최대 규모는 유구열도 M_w 8.0, 난카이트러프 M_w 8.7 지진으로 파악되었다. 이를 바탕으로 일본 지진조사추진본부에서 관측조사를 통해 장기적인 관점에서 각 영역에 지진이 발생할 것으로 예상되는 규모와 발생확률 정보를 토대로 제시하였다(Fig. 1).

이를 토대로 대만과 일본 사이의 해역으로 길게 발달한 유구열도 및 난카이트러프 단층대를 가상 지진해일 발생지역으로 선정하였다. 가상 지진해일의 규모는 일본지진조사연구추진본부에서 추산한 지진의 규모와 확률 및 과거 연구사례(Lee et al., 2016)를 통하여 선정하였다. 또한, 해역에 각 지진단층의 적용 용이성을 확보하기 위해 Fuji and Satake(2007)에서 제안한 단위단층(100 km × 100 km)개념을 도입하였다(NDMI, 2019). 본 연구에서는 지진규모는 M_w 9.0을 대상으로 수치모의 하였으며, 주향각 $\theta(^{\circ})$ 은 지진해일 전파특성에 높은 영향을 주는 파라미터(Table 1)로써 남해안 지진해일 영향분석이 목적이므로 남해안에 지진해일 에너지가 가장 많이 전파될 수 있게 보수적으로 설정하였다(Fig. 2).

지진깊이(H), 단층면 경사각($\delta, ^{\circ}$), 슬립 방향각($\lambda, ^{\circ}$)은 Fujii and Satake(2007)에서 제시한 단층 파라미터를 유구열도 및 난카이트러프에 적용하였다.

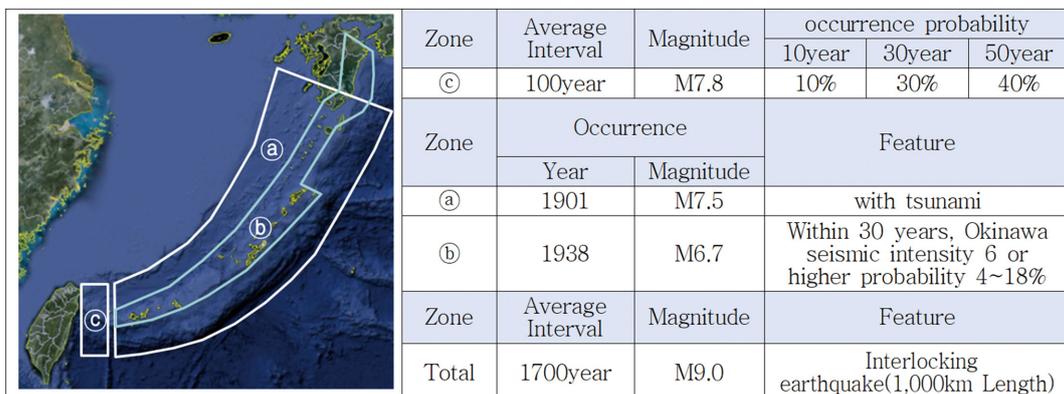


Fig. 1. Estimated earthquake epicenter, range, magnitude, type, and 30-year occurrence probability.

Table 1. The seismic fault parameters

Parameter	Depth (H, km)	Strike Angle (δ , °)	Slip angle (λ , °)
Ryukyu islands	3	10.0	90.0
Nankai Trough	3	45	135

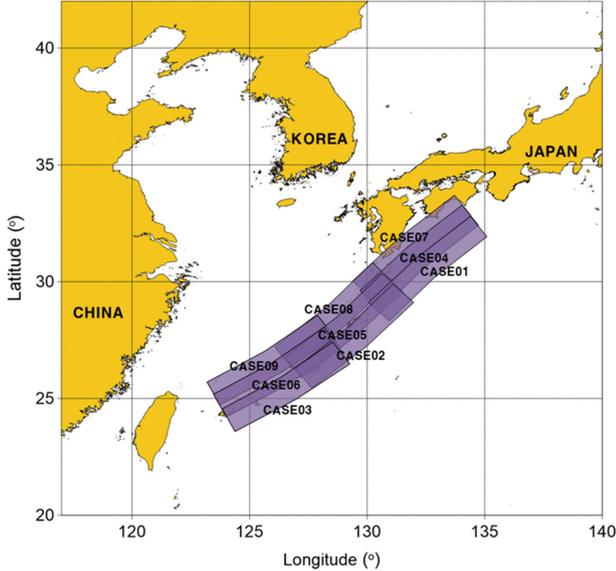


Fig. 2. Tsunami M_w 9.0 hypothetical scenario.

3. 수치모의 체계 및 방법

남해안 지진해일 시뮬레이션을 위해 ADCIRC 모형을 사용하였으며, 이를 위해 상세 수심정보를 포함하여 최소 격자간격 1.0 km로 된 유한요소(FEM, Finite Element Method) 격자체계를 구축하였다. 또한, 유구열도 및 난카이트러프 단층의 과거 발생한 지진을 대상으로 남해안 지진해일 발생 단층 파라미터를 산정하였다.

본 연구에 사용된 ADCIRC(Luetlich et al., 1992)는 미국 기상대기청(NOAA)에서 폭풍해일을 예측하는 공인모델로 사용되고 있으며, 다수의 선행연구(Yoon et al., 2003; NDMI, 2020; Lee et al., 2023)에서 조석, 폭풍해일, 파랑 등을 재현하고 예측 결과를 평가하는 등 신뢰성이 검증된 모델이다. 또한, 절점 밀도에 따라 국부적으로 상세화할 수 있으며, 지진해일과 같이 급변하는 지역과 수심이 급변하는 지역의 절점 밀도를 증가시켜 수치모의 결과의 신뢰성을 제고할 수 있는 장점이 있다. 지진해일과 조석을 고려하기 위해 지진에 의한 초기파형을 산정하고 급변하는 해수면 변화를 반영하기 위해서는 격자 상세화가 필요하다. 본 연구에 사용된 격자는 선행연구(NDMI, 2019)에서 사용된 격자로 절점 밀도에 따른 지진해일 수치실험을 통해 신뢰성을 제고한 바 있으며, 한반도 인근 대표수심(NDMI, 2019)자료와 공간해상도가 15초 간격으로 구성된 전지구 수심자료 GEBCO_15s(NDMI, 2019)를 본 격자체계에 적용하였다. Fig. 3과 같이 격자체계의 수심에 상세 수심이 잘 반영된 것으로 판단된다.

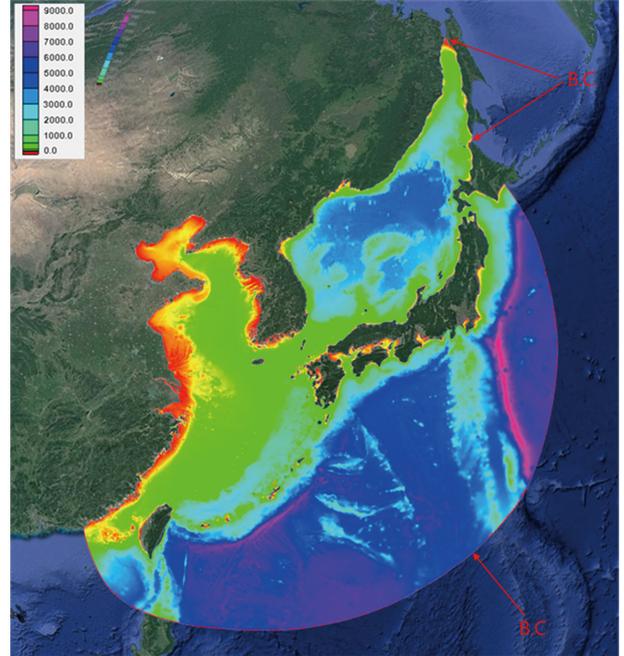


Fig. 3. Water depth distribution and open boundary location.

또한 조석에 관해서 선행연구(Suh and Kim, 2011; Suh et al., 2014)에서는 ADCIRC 모형을 이용해 개방경계 조건으로 FES2004(Lyard et al., 2006)로부터 추출한 M2, S2, K1, O1, N2, K2, P1, Q1 등 총 8개 분조를 고려하고 조석모의를 통해 검증하고 신뢰성을 제시한 바 있다. 따라서 본 연구에서도 Fig. 3과 같은 해역의 개방경계 위치에서 전지구 조석모델 결과인 FES2004의 총 8개 조석분조를 고려하였다.

본 연구에서는 실 해역의 조석 상황 및 지진해일을 고려하기 위해 해수순환모델인 ADCIRC와 Manshinha and Smylie(1971)가 제안한 지진해일 단층파형 설정모델을 결합하였다. 유한요소모형을 이용한 조석+지진해일 모형결합의 수치모의 계산 흐름도를 Fig. 4에 제시하였다.

조석-지진해일 상호작용을 고려하기 위해서는 조석이 재현되고 있는 상태에서 지진 발생시 나타나는 초기파형이 외력으로 고려되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 ADCIRC 모형을 이용해 정지 해수면으로부터 조석에 의한 외력조건을 고려해 조석이 우리나라 서남해안으로 전파되도록 하였다. 조석재현은 우리나라 서남해안 검조소(인천, 군산, 목포, 완도, 여수, 마산, 서귀포) 위치에서 안정화되도록 10일간 수치모의 하였다. 검조소마다 위치가 다르므로 고조, 저조, 창조, 낙조 상황에서 지진해일이 전파될 수 있도록 하였다. 지진해일의 초기 해수면형상은 파형의 형성이 장파의 유속보다 빠른 플레이트의 수직변위 속도에 의한 수직변위의 움직임과

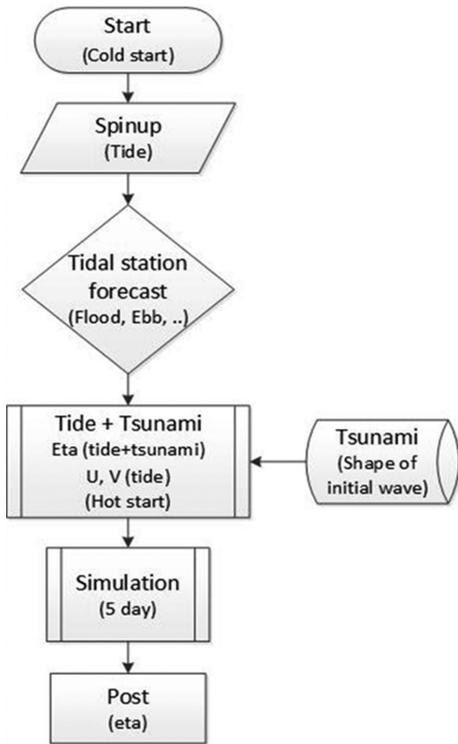


Fig. 4. Flowchart of tide and tsunami numerical simulation.

같다고 가정하여 지진동에 의한 해저면 파괴를 3차원 공간 상에 재현하는 방법(Manshinha and Smylie(1971))으로 산정된 초기파형은 유구열도에서 재현된 조위에 초기파형을 합산하였다. 그러나 이와 같은 방법은 초기파형이 발생하였을 때 나타나는 유속을 추정하기가 곤란하기 때문에 조석에 의해 산정된 유속이 고려되는 것으로 가정하였다. 이후, 지진해일 파 조석에 의한 상호작용이 고려된 해일이 연안에 도달되도

록 5일간 수치모의 된다. 이와 같은 일련의 모델결합 과정을 Perl 스크립트를 이용해 자동화하였다.

4. 남해안 가상시나리오 기반 지진해일 전파 특성

남해안 위험성 평가를 위해 설정된 가상시나리오 규모 Mw 9.0 발생원 CASE01 ~ CASE09까지의 지진해일의 전파특성을 분석한 결과 발생원별로 전파 양상을 두 가지로 나누어 설명할 수 있다(Fig. 5). 발생원 CASE01, CASE04, CASE07 위치에서의 전파는 일본 열도를 따라 이어진 유구열도를 따라서 북동과 남·서방향으로 나타났으며, 나머지 발생원 CASE02, CASE03, CASE05, CASE06, CASE08, CASE09 위치에서는 유구열도를 기준으로 직각 방향으로 전파하여 중국 동해안과 남해안을 거쳐 서해안으로 향하는 전파양상을 나타낸다.

발생원 CASE01, CASE04, CASE07의 경우 주된 방향의 지진해일 파는 북서진하여 한반도 제주도 남단 도달하여 굴절과 회절 때문에 전파 방향이 북으로 바뀌면서 지진해일 파는 서해로 전파하는 양상을 보인다.

발생원 CASE02, CASE05, CASE08의 지진해일 파는 유구열도와 평행하게 발생하여 전파되며, 북동 및 남서 방향으로 전파된다. 또한, 지형적 특성, 수심 등으로 인해 복잡한 굴절이 발생하는 양상을 보였다. 지진해일 일부는 대한해협으로 전파하였으며, 지진해일 전파는 주로 중국 동해안 및 우리나라 서해안을 따라 이동하는 양상을 보였다. 발생원 CASE03, CASE06, CASE09는 유구열도 남서쪽에 있으며, 지진해일은 중국 동해안을 따라 북서로 전파되는 양상을 보인다.

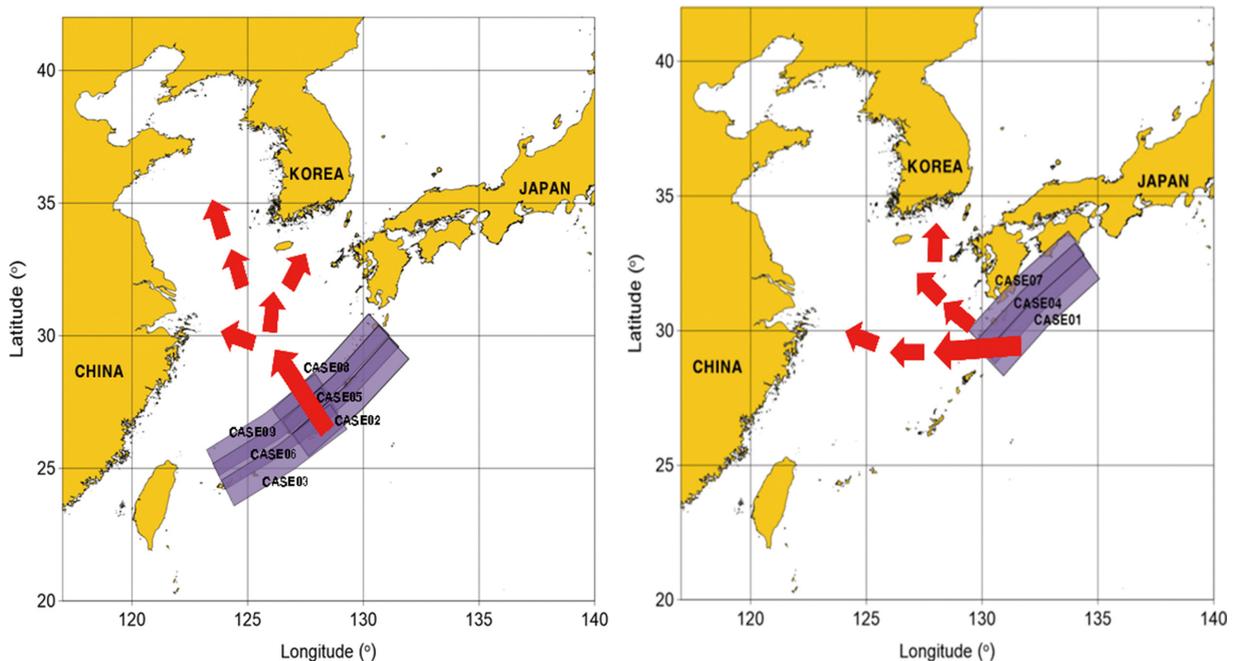


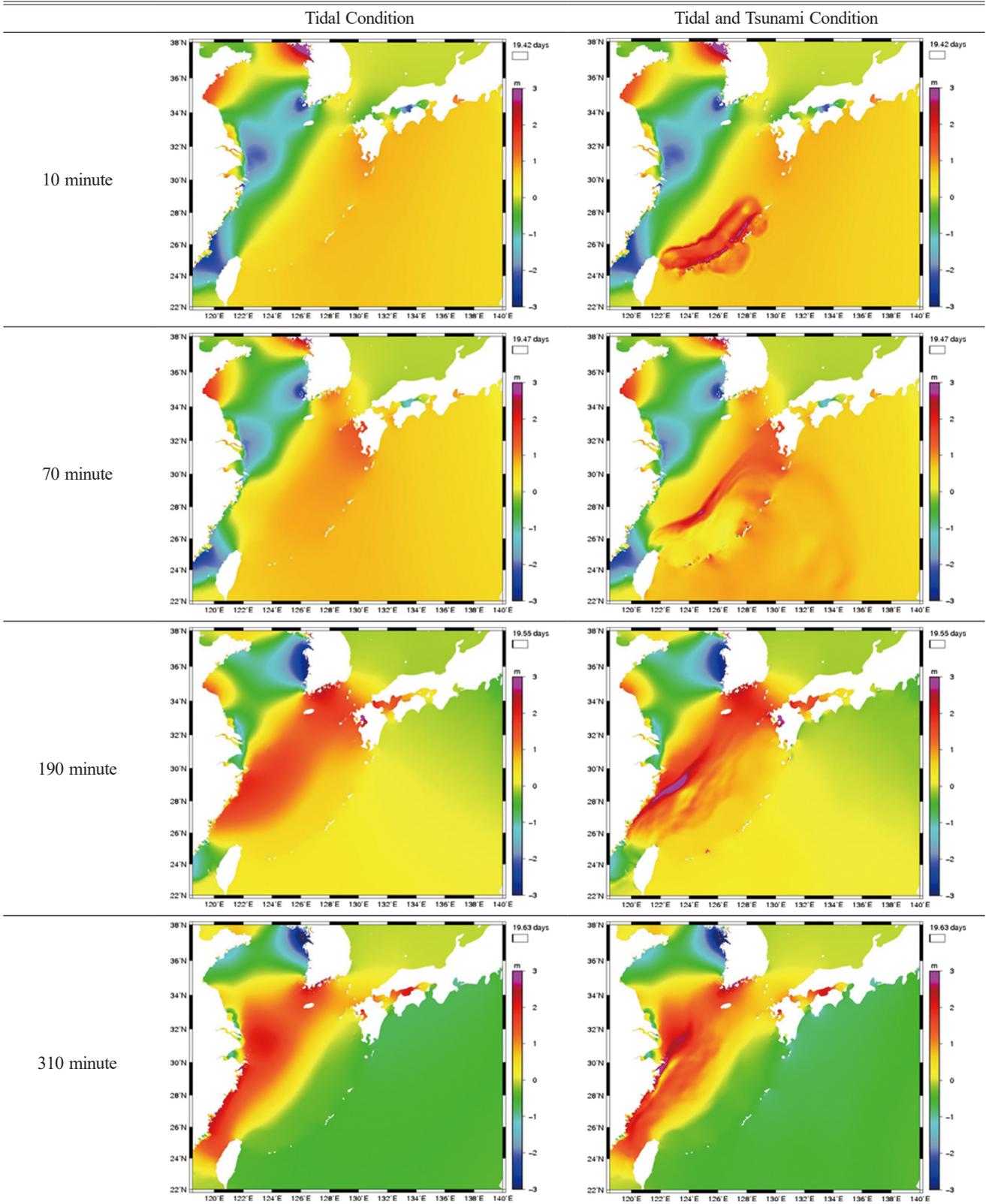
Fig. 5. Propagation characteristics of case.

5. 조석이 고려된 지진해일 전파 특성

남해안의 경우 조석영향이 극히 작은 동해안 보다 조수간만의 차가 매우 커서 조석이 해양환경을 지배하는 남해안에

서는 조석과 지진해일의 상호영향을 고려할 필요가 있다. 따라서 남해안에 조석 상황(창조, 고조, 낙조, 저조)에 따른 지진해일 전파 경향을 분석하고자 한다. Table 2의 수치모의 결과는 지면 관계상 가상시나리오 CASE09, 서귀포항을 대상으로

Table 2. Propagation characteristics of tide and Tsunami in tidal condition (CASE09)



로 고조시 지진해일 내습상황에 대한 수치모의한 결과만 제시하였다. 조석 상황에 따라 변화된 해수위에 유구열도에서 발생시킨 지진해일고가 더해져 서·남해안으로 전파되는 경향이 잘 나타난다.

6. 조석이 고려된 지진해일고 분석

조석상황에 따라 고려된 지진해일고와 최대 해수위 변화를 살펴보기 위해 남해안 조위관측소(완도, 마산, 여수, 부산, 서귀포)에서 나타나는 조위와 지진해일고를 분석하였다. 완도에서는 창조때 나타나는 해일고가 0.19 m, 고조와 낙조 때는 0.20 m, 저조때는 0.22 m이며, 지진해일만 고려할 경우

0.22 m로 나타난다. 조위 변화에 따른 지진해일고 변화가 크지 않은 것으로 판단된다. 마산은 창조때 0.23 m의 해일고가 나타나며, 고조시 0.33 m, 낙조시 0.20 m, 저조시 0.25 m로 나타난다. 고조시 지진해일고가 크게 나타나는데, 지형적으로 켜기 형태로된 만에서 조석에 의해 상승된 해수가 지진해일에 의해 증척되어 지진해일고가 크게 나타나는 것으로 판단된다. 여수에서는 조시와 관계없이 0.27 m의 지진해일고가 나타났으며, 지진해일만 고려하였을 때는 0.30 m로 나타난다. 부산에서는 조차에 따라 0.15~0.17 m로 나타났으며, 서귀포에서는 0.35~0.37 m로 나타난다. 부산과 서귀포에서는 조석이 고려된 지진해일고와 지진해일만 고려된 해일고의 차이가 크지 않은 것으로 나타난다.

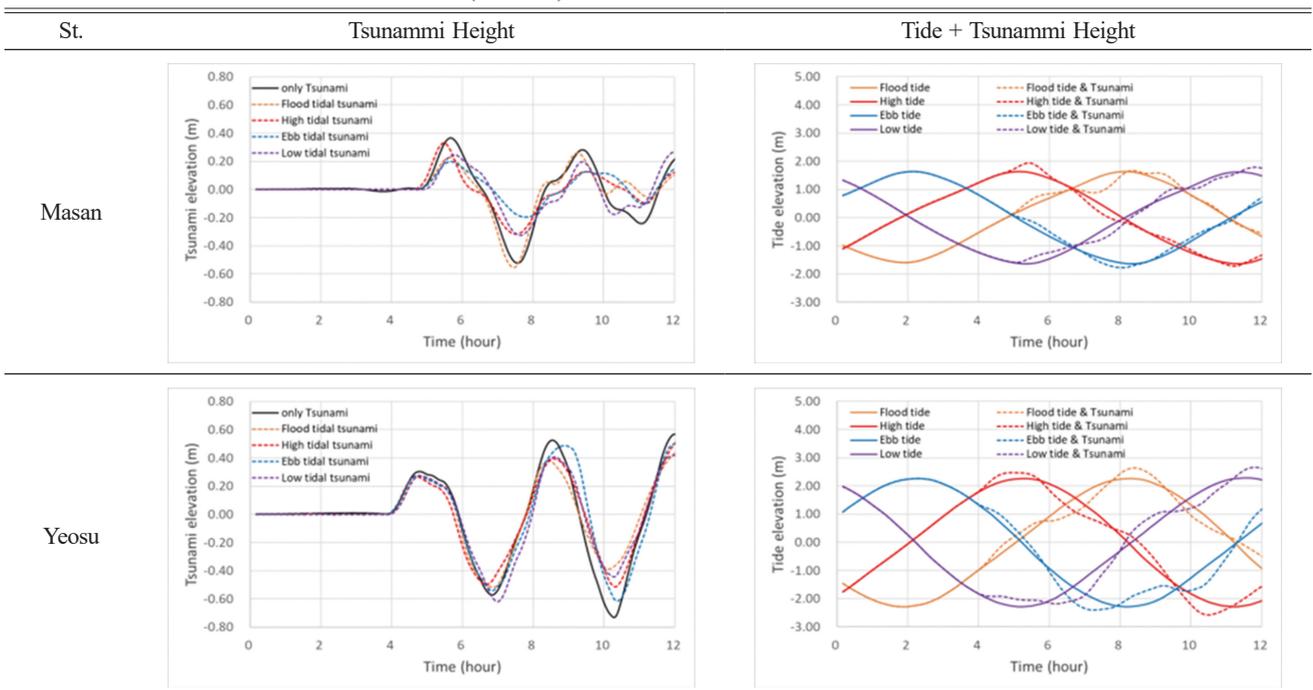
Table 3. Tsunami height in tidal condition (CASE09)

(unit: m)

Obs. Sta.	Flood Tide	Flood Tide + Tsunami	High Tide	High Tide + Tsunami	Ebb. Tide	Ebb. Tide + Tsunami	Low Tide	Low Tide + Tsunami	Tsunami
Wando	0.48	0.68 (0.19)	2.36	2.56 (0.20)	-0.29	-0.09 (0.20)	-2.51	-2.29 (0.22)	(0.22)
Masan	0.53	0.76 (0.23)	1.60	1.93 (0.33)	-0.42	-0.23 (0.20)	-1.52	-1.28 (0.25)	(0.37)
Yeosu	-0.22	0.05 (0.27)	2.16	2.43 (0.27)	0.46	0.73 (0.27)	-2.23	-1.96 (0.27)	(0.30)
Busan	0.08	0.23 (0.15)	0.92	1.07 (0.16)	-0.01	0.16 (0.17)	-0.88	-0.73 (0.15)	(0.17)
Seogwipo	-0.37	0.00 (0.37)	1.64	2.04 (0.35)	0.47	0.84 (0.36)	-1.75	-1.40 (0.35)	(0.38)

*() Max. Tsunami Height

Table 4. Tsunami and sea-level in tidal condition (CASE09)



6. 결 론

지진해일의 경우, 발생빈도가 상대적으로 낮은 자연 재난이지만, 발생 시 매우 큰 피해가 예상된다.

본 연구에서는 그동안 동해안에서 한정된 지진해일 위험성 평가를 한반도 주변 해역으로 확대하여, 남해안에서의 지진해일 위험성 평가를 수행하였다. 본 연구 수행을 통한 주요 결과는 다음과 같다.

1. 조석과 지진해일의 상호작용에 의해 전파되는 해일을 재현하기 위해 유한요소모델인 ADCIRC와 Mansinha and Smylie(1971)가 제안한 지진해일 단층파형 모델을 결합하였다. 유구열도에서 발생하는 가상시나리오 중 규모 Mw 9.0으로 설정된 지진에 의한 초기파형과 조석을 고려하였으며 그 결과, 남해안에서 전파되는 지진해일고가 지진해일만 고려된 해일고보다 전반적으로 낮게 산정되었다.

2. 발생원별 전파 양상은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 일본 열도를 따라 이어진 유구열도를 따라서 북동과 남서 방향이며, 또 하나는 유구열도를 기준으로 직각 방향으로 전파하여 중국 동해안과 남해안을 거쳐 서해안 방향 전파이다. 해저의 수심 변화가 전파특성에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

3. 지진해일이 갖는 에너지의 전파과정을 설명할 수 있는 최대파고 분포를 분석하였다. 결과적으로 에너지 대부분은 중국과 태평양 방향으로 전파하는 양상을 확인할 수 있었다. 가상시나리오의 규모와 초기 파고가 높게 모의 되었지만, 분석결과 동중국해에 있는 상대적으로 수심이 낮은 대륙붕의 넓은 지역을 지나면서 점차 감쇄되어 지진해일 영향이 우리나라 대부분 지역에서 낮은 것으로 분석되었다.

따라서, 지진해일에 의한 위험성 평가시 서·남해안의 지진해일은 조석과 함께 중첩되어 나타나기 때문에 조석을 고려하는 것이 필수적인 것으로 판단된다.

References

Fujii, Y. and Satake, K. (2007). Tsunami source of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake inferred from tide gauge and satellite data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(1A), S192-S207.

Kim, K.O., Jung, K.T. and Ha, T.M. (2021). Development of a tsunami-tide interaction model with simulation of tsunami wave propagation to Korea coasts. *Journal of Coastal Research*,

114(SI), 91-95.

Kowalik, Z. and Proshutinsky, A. (2010). Tsunami-tide interactions: A cook inlet case study. *Continental Shelf Research*, 30(6), 633-642.

Lee, H.H., Cho, H.R. and Cho, Y.-S. (2016). Tsunami inundation map due to fault sources at Ryuku Trench. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 16(1), 319-328 (in Korean).

Lee, H.S., Shimoyama, T. and Popinet, S. (2015). Impacts of tides on tsunami propagation due to potential Nankai Trough earthquakes in the Seto Inland Sea, Japan. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(10), 6865-6883.

Lee, S.Y., Jeong, Y.H., Park, J.R. and Hur, D.S. (2023). Tsunami waveform characteristics of the Korean Peninsula. *Journal of Coastal Research*, 116(SI), 71-75.

Luetlich, R.A., Westerink, J.J. and Scheffner, N.W. (1992). ADCIRC: An Advanced Three-Dimensional Circulation Model for Shelves Coasts and Estuaries Report 1: Theory and Methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL.

Lyard, F., Lefevre, F., Letellier, T. and Francis, O. (2006). Modelling the global ocean tides: Modern insights from FES2004. *Ocean Dynamics*, 56, 394-415.

Mansinha, L. and Smylie, D. (1971). The displacement fields of inclined faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 61(5), 1433-1440.

National Disaster Management Research Institute (NDRM) (2019). Development of South West Sea hypothetical tsunami scenarios. NDMI-PR-2019-08-03-01 (in Korean).

National Disaster Management Research Institute (2020). A Study on the Risk Assessment of Tsunami in the South Coast of Korea. NDMI-PR-2020-08-03-02 (in Korean).

National Disaster Management Research Institute (2021). A Study on Numerical Modeling for Tsunami Inundation Mapping along the Eastern Coast of Korea (II) (in Korean).

National Oceanic and Atmospheric Administration (2023). <https://www.noaa.gov/jetstream/tsunamis/historical-context>.

Yoon, S.B., Lim, C.H. Yoon, K.S. and Choi, B.H. (2003). Analysis of 1-D dispersion property of ADCIRC finite element model for the simulation of tsunami propagation. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 15(2), 108-115 (in Korean).

Received 12 April, 2024

1st Revised 18 April, 2024

2nd Revised 21 April, 2024

Accepted 21 April, 2024