영일만에서의 부진동 효과에 의한 지진해일 증폭 효과 분석

Analysis of the tsunami amplification effect by resonance in Yeongil Bay

이은주 · 신성원

한양대학교 해양융합공학과

Eunju Lee · Sungwon Shin

Marine Science and Convergence Engineering, Hanyang University, Ansan, Korea

Abstract

Predicting tsunami hazards based on the tsunami source, propagation, runup patterns is critical to protect humans and property. Potential tsunami zone, as well as the historical tsunamis in 1983 and 1993, can be a threat to the east coast of South Korea. The Korea Meteorological Administration established a tsunami forecast warning system to reduce damage from tsunamis, but it does not consider tsunami amplification in the bay due to resonance. In this study, the Numerical model, Cornell Multi-grid Coupled Tsunami model, was used to investigate natural frequency in the bay due to coastal geometry. The study area is Yeongill bay in Pohang, southeast of South Korea, because this area is a natural bay and includes three harbors where resonance significantly occurs. This study generated a Gaussian-shaped tsunami, propagated it into the Yeongill bay, and compared numerical modeling results with data from tide gauge located in Yeongill bay during several storms through spectral analysis. It was found that both energies of tsunamis and storms were amplified at the same frequencies, and maximum tsunami wave height was amplified about 3.12 times. The results in this study can contribute to quantifying the amplification of tsunami heights in the bay.

Keywords : Tsunami, Amplification, Bay, Resonance, Numerical simulation

1. 서론

해저지진, 해저산사태, 화산폭발 등에 의해 바다에서 발생한 지진해일은 연안에 도달하여 인명 및 물적 피해를 야기한다. 대표적인 사례로 2011년 3월 11일 동일본 대지진(규모 9.0)에 의해 발생한 지진해일은 당시 지진의 피해까지 더해져 약 1.8만 명의 사망자가 발생하였다(NOAA, 2017). 일본의 Port and Airport Research Institute(이하 PARI)는 파랑 관측시스템인 Nationwide Ocean Wave information network for POrts and HARbourS(이하 NOWPHAS)를 일본 전 해역에 설치하여 운용 중이며, NOWPHAS는 육상에서 10-20km 떨어진 외해에 설치된 Global Positioning System buoy(이하 GPS 부이), 수심 20-60m 해저면에 설치된 파고계, 그리고 조위관측소로 구성된다. PARI는 NOWPHAS를 통하여 2011년 동일본 대지진에 의해 발생한 지진해일을 외해, 만 입구, 만 내에서 관측 및 분석하였고, 그 중 일본 동부의 이와테현에 위치한 카마이시 만(Kamaishi bay)과 쿠지 만(Kuji bay)의 지진해일 시계열 관측 자료를 비교하였을 때, 카마이시 만 내 지진해일 파형은 외해 지진해일 파형과 유사하였지만,

쿠지 만의 경우 외해에서 만으로 지진해일이 전파되면서 지진해일 파형의 주기가 짧아지고 진폭이 증폭되는 현상을 발견 후, 스펙트럼 분석을 통하여 주로 수 분의 주기를 지닌 지진해일이 증폭된 것을 확인하였다(Kawai et al., 2014). 또한 일본 동부에 위치한 료리 만(Ryori bay)에 피해를 야기한 지진해일은 1896년, 1933년, 그리고 2011년으로 규모는 각 8.1, 8.5, 9.5이나, 각 지진해일에 의한 최대 치오름 높이는 38, 29, 23m로 지진 규모와 반비례적인 특성을 보였다. 따라서 Yamanaka and Nakamura(2020)는 료리 만에서의 지진해일 증폭 요인을 파악하고자 주기가 다른 가우시안 형태의 지진해일을 료리 만으로 입사시켜 지진해일 수치모형 실험을 수행하였고, 그 결과 7-10분의 주기를 지닌 지진해일이 료리 만에서 증폭되는 것을 확인하였다. 과거 1896년, 1933년, 2011년의 지진해일 우세 주기는 각 9분, 13분, 64분으로 1896년 지진 규모가 다른 지진 사례보다 상대적으로 작았음에도 불구하고 료리 만에서 지진해일에 의한 치오름 높이가 가장 큰 것을 설명하였다.

한국 기상청에 따르면 1983년, 1993년 일본 서해안에서 발생한 지진해일은 한반도 동해에 위치한 울릉도, 묵호, 속

초, 포항 등으로 전파되어 약 4억 원의 피해가 발생하였다. 또한 일본 서해안에 위치한 지진대는 지진 및 지진해일 발생 가능성이 높은 Potential tsunami zone으로 연구자들에 의해 위험성이 대두되는 실정이다 (Mulia et al., 2020). 따라서 한국 기상청은 지진해일 관측장비인 울릉도 해일파고계의 지진해일 탐지 알고리즘 (Lee et al., 2016), 지진해일 시나리오 DB 정확도 향상 (Sohn et al., 2018), 그리고 조기 경보 목적으로 외해 지진해일 관측장비의 최적 배치 지역 (Lee et al., 2019) 등 지진해일의 피해를 저감하기 위하여 지진해일 예·경보 시스템에 관한 연구를 활발히 수행 중이다.

선행연구 (Kawai et al., 2014; Yamanaka and Nakamura, 2020)를 토대로 지진해일이 만 내로 입사 시 지진해일 주기에 따라 지진해일 에너지 증폭 정도가 더해져 피해를 야기한다. 따라서 본 연구는 지진해일 예·경보 시스템의 정확도 향상에 기여하기 위하여 만 혹은 항만으로 지진해일이 입사 시, 일본 쿠지 만, 료리 만과 같이, 지형 효과에 의해 특정 주파수 대역에서의 지진해일 에너지 증폭을 고려하여 지진해일 증폭률을 분석하고자 한다. 본 연구는 부진동이 현저히 나타나는 포항신항 (Jeon et al., 2006)을 포함한 영일만을 대상으로 지진해일 수치모형실험을 수행하였다. 수치모형실험은 료리 만에서의 지진해일 증폭 요인을 분석한 Yamanaka and Nakamura(2020)을 토대로 지진해일 초기파형을 가우시안 형태로 설정하여 수행하였고, 포항 구항에 위치한 국립해양조사원의 포항 조위관측소 관측자료를 사용하여 수치모형실험 결과를 검증 및 확인하고 지진해일 증폭률을 분석하였다.

2. 본 론

2.1 연구대상 해역

국내 항만에서 부진동 현상이 현저히 나타나는 곳은 경상북도 포항 영일만에 위치한 포항신항이다 (Jeon et al., 2006). 본 연구는 자연만과 항만의 부진동을 동시에 고려하기 위하여 연구 대상 해역을 포항 영일만으로 선정하였다. 포항 영일만 내에 포항구항, 포항신항 그리고 영일만신항이 위치하며, 국립해양조사원의 포항 조위관측소는 포항 구항에 설치되었다(Fig. 1).

Jeon et al.(2006)은 확장완경사방정식을 사용한 표준형식을 갖춘 수치모의를 통해 영일만 신항 건설 이후 각 항만에서의 부진동 주기와 증폭현상을 분석하였다. Jeon et al.(2006)은 수치모형실험을 통하여 영일만의 공진 주기는 16.3분, 27.1분, 80분이고, 포항구항의 공진 주기는 0.5분, 1분, 17분, 80분, 그리고 포항신항의 공진주기는 0.5분, 1분, 17분, 80분으로 확인하였다.

2.2 포항 조위관측소

국립해양조사원의 조위관측소 중 울릉도, 고흥, 목호, 마산, 모슬포, 서귀포, 완도, 여수에 위치한 조위관측소는 2011년 동일본 지진해일 관측하였으나, 포항 조위관측소 관측자료는 2018년부터 확보 가능하다. 따라서 본 연구는 2019년, 2020년 한반도에 영향을 미친 태풍 시 관측 자료를 활용하여 스펙트럼을 산출함으로써 영일만(포항구항)에서의 공진 주파수를 확인하였다(Fig. 2). 지진해일 관측자료가 아닌 태풍 시 관측자료를 활용한 것은 포항 조위관측소의 지진해일 관측자료 부재 뿐만 아니라, Thomson et al.(2007)이 미

Fig. 1. Location of Yeongill bay and tide gauge (triangle) at Pohang harbor

국 동부 연안 조위관측소에 동시 관측된 2004년 수마트라 지진해일과 태풍에 의한 고파랑을 Frequency-time diagram과 태풍 및 지진해일 발생 시각을 통하여 발생 기작이 다른 두 파랑 성분이 유사한 주기대역에 위치함을 보였기 때문이다. 한반도에 영향을 미친 태풍은 2019년 프란시스코, 다나스, 미탁, 그리고 2020년 하이선, 마이삭으로 (Table 1), 스

Fig. 2. A spectrum of tide gauge at Pohang harbor during storms

펙트럼 산출 시 태풍에 의해 발생한 파랑 성분이 포함된 15일 동안의 조위관측소 관측자료를 통해 스펙트럼을 산출하였다(Fig. 2). 스펙트럼 산출 전 지진해일과 동일한 주기대역의 파랑 성분을 고려하기 위하여 3시간보다 짧은 주기를 지닌 파랑 성분만 남기는 High-pass filtering을 수행하였다 (Rabinovich, 2020). Fig. 2를 통해 포항 조위관측소의 태풍 시 스펙트럼을 통하여 유의 파고, 유의 주기, 그리고 경로 등 서로 다른 태풍이 포항구항에 입사 시 동일한 주파수 대역 (대략 9분, 14-16분, 26-28분, 80-82분 등)에서 에너지가 증폭함을 확인하였다.

2.3 지진해일 수치모형실험

본 연구는 영일만에서의 지진해일 증폭 효과를 분석하고자 Cornell Multi-grid Coupled Tsunami model (이하 COMCOT)을 활용하여 수치모형실험을 수행하였다. COMCOT은 지진해일 발생, 전파, 범람을 모의하는 수치모델로 선형 및 비선형 천수방정식을 지배방정식으로 하며, 직교 좌표계 뿐만 아니라, 구형 좌표계도 지원 가능하다 (Wang, 2008).

격자는 1993년 일본 서해안에서 발생한 홋카이도 지진해일을 수치모의한 Jung and Son(2020)을 참고하여 설정하였으며, 지진해일 수치모의의 시간과 정확도를 고려하여 격자접속기법을 사용하였고(Fig. 3; Table 2), 1 arc-second, 15 arc-second의

Table 1. The list of typhoons to be used for analyzing natural frequency at Pohang harbor

Case	Typhoon	Time
1	Francisco	2019.08.06 18:00 - 2019.08.07. 21:00
2	Danas	2019.07.20. 06:00 - 2019.07.21. 15:00
3	Mitag	2019.10.02. 15:00 - 2019.10.03. 12:00
5	Haishen	2020.09.07. 00:00 - 2020.09.07. 15:00
6	Maisak	2020.09.03. 03:00 - 2020.09.03. 09:00

Fig. 3. Location of grids for COMCOT

Table 2. Information of grid for COMCOT

Layer	Coordinate	Governing equation	Longitude (deg)	Latitude (deg)	dx=dy (arc seconds)	nx	ny
1	Spherical	Nonlinear	116.9979-142.9729	29.9979-49.9979	90	1040	801
2	Spherical	Nonlinear	128.8879-131.1079	35.3879-37.5829	18	445	440
3	Spherical	Nonlinear	129.2812-130.6946	35.8312-37.1845	6	849	813
4	Spherical	Nonlinear	129.3358-129.8467	35.8891-36.3466	3	614	550
5	Spherical	Nonlinear	129.3381-129.6595	35.8913-36.1652	1	1158	987

Fig. 4. Snapshot of propagation of gaussian-shaped tsunami on East Sea which amplitude is 1m and period is 19.5 minutes through numerical modeling

수심자료를 기반으로 설정하였다. 영일만 대상 지진해일 수치모형실험에도 불구하고 광역격자가 한반도 및 일본을 포함하도록 설정한 이유는 전파된 지진해일이 경계에서의 반사로 인한 영향을 최소화하기 위해서이다. 외해에서 발생한 지진해일이 천해로 입사 시 발생하는 비선형 효과를 고려하기 위하여 지배방정식은 비선형 천수방정식으로 설정하였다.

본 연구는 Yamanaka and Nakamura(2020)을 토대로 가우시안 형태의 지진해일 초기파형을 통해 외해에서 발생시켜 영일만으로 전파된 지진해일 선행파와 진폭의 증폭률을 분석하였다. 진폭의 경우, 단위 단층을 기준으로 1, 2m로 설정하였다. Rabinovich(2020)은 과거 20년 간 발생한 지진해일 파형의 특성과 유사한 기상해일을 조사한 결과 기상해일 및 지진해일 주기를 3분에서 3시간으로 정의하였다. 또한

Kawai et al.(2014)는 수 시간이 아닌 수 분의 주기를 지닌 지진해일이 만으로 입사 시 증폭하는 것을 확인하였다. 따라서, 본 연구는 태풍 시 조위관측소 관측자료를 통하여 태풍 시 에너지가 증폭한 주기 중 28분까지 고려하여 지진해일 수치모형실험 시 지진해일 초기파형의 주기를 3분부터 30분 사이로 설정하였다.

Fig. 4는 지진해일 수치모형실험 중 진폭 1m, 주기 19.5분인 가우시안 형태의 지진해일 초기파형을 발생하고 전파하는 양상을 시간 순서 별로 도식화하였다. 각 그래프 상단의 시간은 가우시안 형태의 지진해일 초기파형 발생 후 소요시간을 의미하며, 지진해일이 영일만으로 입사 시 광역 격자에 의한 지진해일 반사에 대한 영향이 미포함된 것을 확인하였다.

Fig. 5는 진폭 1m, 주기 7.5분인 지진해일 초기파형을 발

Fig. 5. Results of numerical modeling which initial tsunami waveform has 1m amplitude and 7.5 minute period

생시킨 수치모형실험 결과로 좌측 지도에 표시된 적색 영역에서 추출한 지진해일 시계열을 나타내었다. Fig. 5(a)는 포항신항에 인접한 만 중앙 (129.3844°E, 36.0356°N)에서의 지진해일 파형으로 동일한 지진해일이 만으로 입사하였으나 만 우측 (Fig. 5(b); 129.5017°E, 36.035°N)보다 지진해일 선행파의 진폭이 두 배 정도 증폭하였다.

3. 결 과

본 연구는 지진해일 수치모형실험 결과를 검증하기 위하여 포항 조위관측소 위치 (129.3747°E, 36.0506°N)에서 COMCOT 이 수치모의한 지진해일 시계열 자료를 추출하여 스펙트럼을 산출하고, 태풍 시 포항 조위관측소 관측 자료로부터 산출한 스펙트럼을 비교하였다(Fig. 6). Fig. 6은 지진해일 초기 파형의 진폭과 상관없이 지진해일 주기를 10분 간격으로 분류하여 스펙트럼을 작성하였으며, Fig. 6의 회색 선은 지진해일 수치모형실험 케이스 별 조위관측소 위치에서의 스펙트럼을 의미한다. 전반적으로 포항구항에 지진해일이 입사 시 26-28분 주기 대역 제외하고 태풍 입사 시 에너지가 증폭하였던 주기 대역에서 지진해일 에너지가 증폭하였다. 그리고 영일만으로 입사한 모든 지진해일은 13-16분 그리고 19분 주기 대역에서 지진해일 에너지가 증폭한다. 또한 Fig. 6(a)는, Fig. 6(b), (c)와 달리, 9분 이하의 주기에서 에너지가 뚜렷하게 증폭하였다. 따라서, 10분 이하의 주기를 지닌 지진해일이 영일만으로 입사 시 10분 이상의 주기를 지닌 지진해일보다 영일만 내에서 에너지가 증폭할 것이라 사료된다.

본 연구는 태풍 시 포항 조위관측소 관측자료의 스펙트럼과 비교를 통하여 지진해일 수치모형실험 결과를 검증하였고, 수치모형실험으로부터 추출한 지진해일 파형을 기반으로 영일만에서의 지진해일 진폭의 증폭률을 산출하고자 한다. 영일만의 지형 효과에 의한 지진해일 증폭 효과를 분석하기 위하여 포항 조위관측소의 지진해일 선행파의 진폭을 영일만 앞에서의 지진해일 선행파의 진폭으로 나눔으로써 포항구항으로 입사한 지진해일의 증폭률을 계산하였다(Fig. 8). Fig. 7은 COMCOT으로부터 지진해일 시계열 자료를 추출한 영일만 앞 (Bay head)과 조위관측소 (Tide gauge)의 위치를 나타내며, Fig. 8은 지진해일 선행파의 진폭에 따른 영일만에서의 지진해일 증폭률이다. 영일만 앞에서 지진해일 시계열 자료를 추출한 것은 영일만 도달하기 전 지진해일의 천수효과를 배제하기 위함이다. 이를 통하여 지진해일 주기가 6-9분, 14-17분, 26분일 때 증폭률이 급격하게 커지는 것을 확인하였다. 또한 최대 증폭률은 지진해일 주기 14분일 때 3.12배임을 확인하였다.

(a) Period of initial tsunami waveform: 1-10 min

(b) Period of initial tsunami waveform: 11-20 min

(c) Period of initial tsunami waveform: 21-30 min

Fig. 6. Comparison spectrum calculating from time series of between observation during storms and numerical modeling at tide gauge

4. 토의 및 결론

본 연구는 한반도에서 부진동이 현저히 일어나는 포항 신항을 포함한 영일만에서의 지진해일 증폭 효과를 분석하기

Fig. 7. Location of the tide gauge and the bayhead of the Yeongill bay

(a) Amplitude of initial tsunami waveform is 1m

(b) Amplitude of initial tsunami waveform is 2m

Fig. 8. The ratio of the amplitude of the primary wave at the tide gauge and the bay head

위하여 지진해일 수치모형실험을 수행하였으며, 태풍 시 포항 조위관측소 관측자료를 통하여 검증하였다. 지진해일 수치모형실험은 Cornell Multi-grid Coupled Tsunami model를 이용하여 수행하였으며, Yamanaka and Nakamura(2020)과 동일하게 가우시안 형태의 지진해일을 발생시킨 후 영일만에 입사된 지진해일 시계열 자료를 토대로 분석하였다. 태풍 시 포항 조위관측소 관측자료의 스펙트럼과 지진해일 수치모형실험 결과로 산출한 스펙트럼을 통하여 특정 주기 대역에서 지진해일 및 폭풍해일 에너지가 증폭하였고, 10분 이하의 지진해일이 입사 시 그 이상의 주기를 지닌 지진해일보다 영일만에서 9분 이하의 주기 대역에서 크게 증폭함을 확인하였다. 또한 지진해일 선행파의 진폭을 기준으로 14분의 주기를 지닌 지진해일이 포항 구항으로 입사 시 3.12배 정도 증폭을 확인하였다.

일본의 경우 지진해일을 야기하는 지진대가 일본 해역에 위치하고 있는 관계로, 한국 지진해일 예경보 시스템과 동일하게 지진해일 시나리오 DB를 구축하여 예·경보를 수행한다. 지진해일 시나리오 DB는 육상으로부터 15km 떨어진 해역에서의 지진해일고로 구성되며, 실제 지진해일이 발생 시 해안선에서의 지진해일고 예측을 위하여 Green's law를 기반으로 지진해일 시나리오 DB의 지진해일고를 보정한다. 하지만, Kawai *et al.*(2014)는 만 내에서 수 분의 짧은 주기를 지닌 지진해일이 증폭하는 것을 2010년 칠레, 2011년 동일본 지진해일 관측자료를 통해 확인하였으며, Green's law는 파랑의 굴절, 방파제의 효과 또는 항만 부진동을 포함하지 않는 관계로 만에서의 지진해일 예·경보 수행 시 Green's law를 통한 지진해일고 추정은 어렵다고 제안하였다. 본 연구 결과는 Kawai *et al.*(2014)와 유사하게 수 분 이하의 주기를 지닌 지진해일이 더욱 증폭됨을 확인하였다.

본 연구는 지진해일 파형 형태 중 가장 단순화한 가우시안 형태의 지진해일에 대한 영일만에서의 증폭 정도를 비교하였다면, 향후 실제 지진해일 시나리오를 활용하여, 실제 지진해일 파형이 영일만에 입사 시의 증폭률을 보고자 한다. 또한 만 및 항 내에서 시간에 따른 자유수면변위를 분석함으로써 부진동 효과를 자세하게 분석하고자 한다.

감사의 글

이 논문은 2021년도 정부(환경부)의 재원으로 기상청의 지원을 받아 수행된 “지진·지진해일·화산 감시 및 예측기술 개발(Development of earthquake, tsunami, volcano monitoring and prediction technology)” 연구이다(과제번호: 1365003423).

References

Jeon, M.-S., Lee, J.-W., Jeong, J.-H., Yang, S.-Y. and Jeong, Y.-H. (2006). “Variation of Harbor Oscillations in Yeongil Bay.”

- Journal of Navigation and Port Research*, Vol. 30, No. 6, pp. 533-539 (in Korean).
- Jung, T. and Son, S. (2020). "The Effect of Fault Failure with Time Difference on the Runup Height of East Coast of Korea." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 32, No. 4, pp. 223-229 (in Korean).
- Kawai, H., Satoh, M., Kawaguchi, K. and Seki, K. (2014). "2010 Chile and 2011 Tohoku tsunami profiles measured by GPS buoys and coastal wave and tide gauges in a nationwide ocean wave information network for ports and harbors." *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, Vol. 140, No. 2, pp. 135-145.
- Lee, E., Jung, T., Kim, J.-C. and Shin, S. (2019). "A Study of the Optimal Deployment of Tsunami Observation Instruments in Korea." *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 33, No. 6, pp. 607-614 (in Korean).
- Lee, J.-W., Park, S.-C., Lee, D. K. and Lee, J. H. (2016). "Tsunami arrival time detection system applicable to discontinuous time series data with outliers." *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 16, No. 12, pp. 2603-2622.
- Mulia, I. E., Ishibe, T., Satake, K., Gusman, A. R. and Murotani, S. (2020). "Regional probabilistic tsunami hazard assessment associated with active faults along the eastern margin of the Sea of Japan." *Earth, Planets and Space*, Vol. 72, No. 1, pp. 1-15.
- NOAA (2017). "National Geophysical Data Center/World Data Service (NGDC/WDS): Global Historical Tsunami Database." National Geophysical Data Center. NOAA (last date accessed: 8 August 2019).
- Rabinovich, A. B. (2020). "Twenty-seven years of progress in the science of meteorological tsunamis following the 1992 Daytona Beach event." *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 177, No. 3, pp. 1193-1230.
- Sohn, D.-H., Park, S.-C., Lee, J.-W., Moon, K.-S., Kim, H.-S. and Lee, D.-K. (2018). "Classification of tsunami hazard area along the Eastern coast of South Korea based on improved tsunami scenario database." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 18, No. 3, pp. 303-310 (in Korean).
- Thomson, R. E., Rabinovich, A. B. and Krssovski, M. V. (2007). "Double jeopardy: Concurrent arrival of the 2004 Sumatra tsunami and storm-generated waves on the Atlantic coast of the United States and Canada." *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, L15607. doi:10.1029/2007GL030685
- Wang, X. (2009). "User manual for COMCOT version 1.7 (first draft)." Cornell University, 65.
- Yamanaka, Y. and Nakamura, M. (2020). "Frequency-dependent amplification of the Sanriku tsunamis in Ryori Bay." *Earth, Planets and Space*, Vol. 72, No. 1, pp. 1-14.