단층의 파괴 과정이 지진해일의 전파에 끼치는 영향: 1993년 홋카이도 지진 사례

The Effect of Surface Ruptures on the Propagation of Tsunamis: An Analysis of 1993 Hokkaido Earthquake

정태화* · 손상영**

Jung, Tae-Hwa*, and Son, Sangyoung**

Abstract

An earthquake occurs when the energy condensed at certain points in the Earth's crust exceeds a certain threshold. Changes in depth of the seabed (induced by subsurface deformation) can cause irregular undulations and tsunamis. Surface ruptures usually start at one point and propagate in diverse directions (typically one or two). In this study, we used numerical analysis to examine the effects of surface ruptures on the generation and propagation of tsunamis. The 1993 Hokkaido earthquake was chosen for the test, and three subfaults were adopted to account for the history and process of the rupture. The results revealed the clear effects of surface rupture near the epicenter, showing either an increase or decrease in run-up heights (depending on spatial locations). Although the effects on run-up heights along the coast of the East Sea were unclear, the maximum effect (observed at specific points) generated twice the normal run-up heights.

Key words : Time-delay, Fault Rupture, Tsunamis, Numerical Model, 1993 Hokkaido Earthquake

요 지

지각 내부의 특정 지점에 에너지가 응축되다가 임계값을 지나면 단층이 파괴되면서 지진이 발생한다. 지진에 의한 내부 지형의 변화는 해저 수심에 변화를 주고, 해저 수심의 변화는 자유 수면을 상승시켜 지진해일을 야기한다. 단층 파괴 현상은 특정 지점(진원)에서 시작하여 한쪽 방향 또는 양쪽 방향으로 시간차를 가지며 진행된다. 본 연구에서는 이러한 단층 파괴 과정이 지진해일의 생성 및 전파에 끼치는 영향을 수치 모의를 통하여 검토해보았다. 1993년 홋카이도 지진 사례에 대하여 3개의 소단층을 이용하여 시간 이력에 의한 단층파괴 현상을 고려하였다. 수치해석 결과, 진앙 근처에서는 시간차에 의한 단층파괴를 고려한 경우에 최대 처오름 높이의 증가 및 감소가 공간적으로 명확하게 드러났으나 진원에서 멀어질수록 희미해져서 동해안 근처에서는 거의 나타나지 않았다. 특정 지점에서는 시간차를 고려한 경우 기존에 비해 2배 이상의 최대 처오름 증가가 발생하였다.

핵심용어 : 시간 이력, 단층 파괴, 지진해일, 수치 모형, 1993년 홋카이도 지진

1. 서 론

최근 일본 가나가와 현에서 규모 5.5의 지진이 발생하고, 캘리포니아에서 6.4, 로스앤젤레스 부근에서 7.1의 강진이

발생하는 등 환태평양 불의고리지역(Ring of Fire)에서 지진 활동이 빈번하게 발생하고 있다. 환태평양 조산대는 다수의 해양판과 대륙판이 접하고 있어 이들 사이의 충돌로 인하여 지진 및 화산 활동이 활발하게 발생하고 있다. 우리나라의

*정회원, 한밭대학교 건설환경공학과 교수(E-mail: thjung@hanbat.ac.kr)

Member, Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanbat National University

**교신저자, 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 부교수(Tel: +82-2-3290-4865, Fax: +82-2-3290-5999, E-mail: sson@korea.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Associate professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

경우, 불의 고리 지역에는 포함되지 않지만 판의 내부에서 단층 파괴가 빈번하게 발생하면서 지진발생빈도가 증가하고 있다. 최근 2년(2017-2018)동안 규모 3이상의 지진이 24차례 발생하였으며 2019년에도 5차례 발생하였다(기상청). 이렇듯 빈번하게 발생하는 지진으로 말미암아 한반도 주변에서 발생하는 지진과 관련하여 다양한 지진해일 연구가 수행되었다(Lee et al., 2016; Son et al., 2018).

해저 지형 아래에서 단층파괴(또는 파열)가 발생할 경우, 해저 지형의 변화를 가져오고 이러한 변화는 지진해일을 야기시켜 해안 지역에 막대한 피해를 준다. 단층 파괴는 지각 내부의 특정 지점에서 응축되는 에너지가 한계값을 초과할 때 발생한다. 이러한 파괴 현상은 국지적으로 발생하여 시간차를 가지며 한 방향 또는 양 방향으로 전파되면서 진행된다. Table 1은 최근에 발생한 지진에서 단층들의 파괴 속도를 정리한 것이다(Ren et al., 2019).

Table 1. Rupture Time and Velocity for Recent Submarine Earthquakes

Case	Mw	Rupture Time (sec.)	Rupture Velocity (km/s)
2004 Indian Ocean	9.1	1273	0.8-1.0
2010 Chile	8.8	120	2.0-2.5
2011 Tohoku, Japan	9.1	200	1.5
2014 Iquique, Chile	8.2	90	1.5
2015 Illapel, Chile	8.4	125	1.75

이러한 단층 파괴의 운동학적특성은 해저 지형의 변형을 거쳐 지진해일의 초기 파형에 변화를 주며 최종적으로 지진해일의 전파 속도 및 연안에서의 처오름 높이 등에 영향을 주기 때문에, 단층 파괴와 관련하여 다양한 연구가 수행되었다. Bizzarri (2012)는 다양한 법칙을 이용하여 단층 파괴 속도의 특성을 연구하였으며, Ammon et al. (2005), Ishii et al. (2005), Fujii and Satake (2007) 및 Rhie et al. (2007) 등은 2004년 Sumatra-Andaman 지진의 단층 파괴 과정에 대해, Maercklin et al. (2012) 및 Satake et al. (2013) 등은 2011년 Tohoku-oki 지진의 단층 파괴 과정에 대해 기술하였다. 이와는 별개로, 시간차에 따른 단층 파괴 현상이 지진 해일에 미치는 영향도 다양하게 검토되었다. Grilli et al. (2007)은 FUNWAVE를 이용하여 단층의 파괴 속도를 감안한 2004 Indian Ocean 지진에 대하여 수치모의를 수행하였으며, Imai et al. (2010)은 1707년 Hoei 지진 사례를 이용하여 시간차에 따른 단층의 파괴가 일본 해안선에서의 처오름 높이를 계산하였다. Le Gal et al. (2017)은 해석적인 접근을 통해 단층의 파괴 속도가 지진해일에 미치는 영향을 검토하였으며 Le Gal et al. (2018)은 1947

Gisborne 및 2011 Tohoku-Oki 지진해일에 대하여 단층의 시간차를 고려한 수치 모의를 실행하여 시간차에 의한 단층 파괴가 지진해일의 전파에 미치는 영향을 검토하였다. Ren et al. (2019)는 가상의 지형조건에 시간차에 의한 발생하는 지진해일을 수치모의하여 단층의 운동학적 파괴 양상이 지진해일의 전파에 미치는 영향을 검토하였다.

지금까지 언급한 바와 같이 시간차에 의한 단층의 파괴 양상이 지진해일의 전파에 미치는 영향이 해외 지진해일 사례에 대하여 다양하게 검토되었지만 아직까지 우리나라에 대해 검토된 바는 없다. 따라서 본 연구에서는 우리나라 주변에서 발생하는 시간차에 의한 단층 파괴 현상이 지진해일의 전파에 미치는 영향을 검토해보았다.

한편, 단층 파괴 과정과 관련하여 아직까지 단층 파괴 속도에 관해 보고된 바는 없으며 이에 본 연구에서는 가상의 단층 파괴 시나리오를 설정하여 수치모의를 수행하고자 한다. 1707년에 발생한 Hoei 지진에 대해 Imai et al. (2010)은 선형 장파 모델을 이용하여 4개의 소단층에 대해 지진해일 수치 모의를 수행한 후에 선형 중첩을 통해 시간 이력 단층 파괴가 지진해일에 미치는 영향을 검토한 바 있다. 이에 본 연구에서는 Imai et al. (2010)의 접근방법을 사용하여 1993년 홋카이도 지진에 대하여 시간차에 의한 단층 파괴 활동을 고려하여 지진해일 수치 모의를 수행하고 그 결과를 분석하였다.

2. 수치모의

2.1 수치모형

지진해일 수치 모의를 위하여 COMell Multi-grid COupled Tsunami model (COMCOT)을 활용하였다. COMCOT은 미국의 코넬대학교에서 개발한 천수방정식 기반의 지진해일 수치모델로서 지진해일 해석에 널리 활용되고 있다. 원해에서는 파고가 수심에 비해 매우 작기 때문에 주로 선형 모델이 사용되며 대상 영역이 매우 광범위하기 때문에 코리올리(Coriolis)효과가 포함되어 있다. 코리올리 효과란 위도에 따라 지구 자전의 속도가 달라서 발생하는 힘으로 다음과 같이 코리올리 계수(f)를 이용하여 고려할 수 있다.

$$f = \Omega \sin \phi \quad (1)$$

여기서 Ω 와 ϕ 는 각각 지구의 자전 속도와 위도를 의미한다.

지진해일이 근해로 접근하면서 파장은 짧아지고 파고는 증가하기 때문에 비선형 천수방정식을 사용해야 한다. 아울러, 대상 영역이 협소해짐에 따라 코리올리 효과는 고려할 필요가 없지만 바닥의 영향력이 커짐에 따라 마찰력은 고려할 필요가 있다. 이를 요약하여 식으로 나타내면 선형 및 비선형 천수방정식은 각각 다음과 같이 표현된다.

선형 모델:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \left\{ \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} \right\} = - \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - fQ = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial y} + fP = 0 \quad (4)$$

여기서, η 는 자유 수면을 의미하며, $P(=hu)$ 와 $Q(=hv)$ 는 각각 x 및 y 방향 유량을 의미한다.

비선형 모델:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \left\{ \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} \right\} = - \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{P^2}{H} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{PQ}{H} \right\} + gH \frac{\partial \eta}{\partial x} + F_x = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{PQ}{H} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{Q^2}{H} \right\} + gH \frac{\partial \eta}{\partial y} + F_y = 0 \quad (7)$$

여기서, H 는 전 수심 ($h+\eta$)을 의미하며, F_x 와 F_y 는 각각 x 방향 및 y 방향 바닥 마찰력을 의미하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$F_x = \frac{gn^2}{H^{7/3}} P(P^2 + Q^2)^{1/2} \quad (8)$$

$$F_y = \frac{gn^2}{H^{7/3}} Q(P^2 + Q^2)^{1/2} \quad (9)$$

여기서, n 은 Manning의 조도계수를 의미한다. 여기서 언급하지 않은 변수에 대한 설명 및 수치해를 구하는 자세한 과정은 매뉴얼(COMCOT V1.7)을 참조하면 알 수 있다.

2.2 격자구성

계산 영역은 일본 서쪽에서 발생하는 지진해일을 고려할 수 있도록 충분히 넓게 설정하였으며, 해안선에서의 처오름 높이를 정도 높게 계산하기 위하여 Fig. 1과 같이 총 4단계 격자망을 구성하였다.

Layer 1의 좌측 하단 및 우측 상단 지점 위치는 각각 (경도 117.0°, 위도 30.0°) 및 (경도 142.9776°, 위도 49.9872°)이며, 격자의 크기는 0.0288°이다. Layer 2,3 및 4의 격자 크기는 상위 격자의 1/4로 감소하며 격자망을 구성하는데 필요한 수심 자료는 GEBCO (<http://www.gebco.net>)에서 제공하는 자료를 활용하였다. 세부 격자망의 자세한 정보는 Table 2에 나타난 바와 같다.

2.3 지진해일 초기파형

1993년에 발생한 일본 홋카이도 지진을 대상사례로 하여 시간차에 의한 단층 파괴 현상이 지진해일의 전파 및 우리나라 동해안 연안의 처오름 높이에 끼치는 영향을 검토하였다. 홋카이도 지진은 1993년 7월 12일 홋카이도 서쪽 오키시리 해령 바로 아래에서 발생한 규모 7.8의 지진으로, 울릉도에 0.89~1.19 m 및 동해에 2.13~2.76 m의 처오름을 형성하며

Fig. 1. Schematic Diagram of Multi-Layered Grid System (left: layer 1 and 2; right: layer 3 and 4)

Table 2. Grid Information (Longitudes and latitudes are in degree.)

Layer No.	X_min	X_max	Y_min	Y_max	dx=dy
Layer1	117.00000	142.97760	30.00000	49.98720	0.0288
Layer2	127.33000	131.30440	35.00000	39.50000	0.0072
Layer3_1	129.00000	130.82880	35.35000	37.29940	0.0018
Layer3_2	127.80000	129.82860	37.25000	39.01940	0.0018
Layer4_1	129.35000	129.65960	35.53500	36.40485	0.00045
Layer4_2	129.30000	129.60960	36.41500	37.28485	0.00045
Layer4_3	128.82000	129.34965	37.29500	37.87460	0.00045
Layer4_4	128.40000	128.91975	37.88500	38.46460	0.00045

Table 3. Fault Parameters for 1993 Hokkaido Earthquake

Fault No.	N(°)	E(°)	H(km)	Θ(°)	δ(°)	λ(°)	L(km)	W(km)	U(cm)
1	42.10	139.30	5	163	60	105	24.5	25	1200
2	42.34	139.25	5	175	60	105	30	25	250
3	43.13	139.40	10	188	35	80	90	25	571

우리나라 동해안에 막대한 피해를 야기했다(기상청). 위성 자료 또는 파고계 자료 등을 이용하여 많은 연구자들이 지진과 관련된 단층매개변수 값들을 제시하였다. 1개의 단층을 이용하는 경우에는 시간차에 의한 단층 파괴 현상을 고려하기가 어렵기 때문에 본 연구에서는 Choi et al. (2003)이 제시한 단층 정보를 사용하여 지진해일을 재현하였다. Choi et al. (2003)은 1993년 홋카이도 지진을 재현하기 위하여 Table 3과 같이 총 3개의 소단층을 사용하였다. 단층 매개변수를 통해 지진해일의 초기 파형은 Okada 모형을 사용하였다(Okada, 1985).

3. 수치해석

1993년 홋카이도 지진의 경우, 단층 파괴 과정이 명확하게 밝혀진 바가 없다. 따라서본 연구에서는 가상의 단층 파괴 시나리오에 대하여 동해안에서의 처오름 높이를 계산하였다. 단층의 파괴는 단층1에서 3의 순으로 발생한다고 가정하였으며 단층 간의 시간차는 1분 간격으로 0분에서 60분까지 변화를 주면서 총 3,721 경우에 대해 처오름 높이를 계산하였다. 각각의 경우에 대하여 수치모의를 개별적으로 수행하기에는 경우의 수가 지나치게 과다하여 본 연구에서는 개개의 단층 단독으로 초기파형을 만들어 수면변위에 대한 시계열 자료를 구한 뒤에 시간차를 두면서 선형중첩하여 처오름 높이를 계산하였다(Fig. 2).

Fig 3은 각각의 단층 파괴 활동에 의해 발생한 지진해일에 의한 동해안의 처오름 높이를 계산한 그림이다. 단층 1이 가장 큰 값을 보이며 단층 2와 3은 거의 비슷한 양상을 보였다. 전체적으로 위도가 증가할수록 처오름 높이는 증가

하였으며 도달 시간은 감소하였다. Fig. 4는 각 단층에 의해 발생한 지진해일이 동해안에 도착하는 시간을 나타낸다.

단층의 시간차를 고려한 경우에 대하여 해안선의 각 지점에서 최대 처오름 높이를 계산한 후에 다음과 같이 정의되는 기하평균값을 구하였다.

$$\left(\prod_{i=1}^N H_{\max,i} \right)^{1/N} \quad (10)$$

여기서, $H_{\max,i}$ 는 i 번째 해안지점에서의 최대 처오름 높이를 의미하며, N 은 처오름 높이를 계산한 해안선의 측정 지점의 총 개수를 의미한다. Fig. 5는 시간차를 고려한 총 3,721 경우에 대하여 기하평균값을 계산한 결과이다. y축은 단층 1과 단층 2사이의 시간차를 의미하며, x축은 단층 2와 단층 3사이의 시간차를 의미한다. 전체적으로, 단층 사이의 시간차가 클수록 기하평균값은 감소하였다. 최대 기하평균값은 단층 1과 2는 동시에 파괴가 발생하고, 4분 후에 단층 3이 파괴하는 경우에 발생하였으며 1.0310의 값을 가졌다.

Fig. 6은 Fig. 5의 3,721 경우의 수 중에서 가장 큰 기하평균값을 보여주는 경우에 대하여 비선형 천수방정식을 이용하여 수치모델링을 수행한 후 그 결과를 도시한 결과이다. 단층의 시간차를 고려하지 않은 경우와 비교하여 위하여 시간차를 고려한 경우의 최대 파고값에서 시간차를 고려하지 않은 경우의 최대 파고값을 제하였다. 진원 근처에서는 영역에 따라 시간차를 고려한 경우의 파고 증대 및 감소가 두드러지게 발생하였으나, 진원에서 멀어질수록 파고 증대 효과가 주로 발생하였다. 그러나 그 값이 아주 크지는 않았다.

Fig. 2. Schematic Diagram of Multi-layered Grid System (left: layer 1 & 2; right: layer 3&4)

Fig. 3. Maximum Run-up Height of Each Fault Along Coastline

Fig. 4. Arrival Time of Each Fault Along Coastline

Fig. 5. Geometric Average of Maximum Wave Run-up Heights Along the Coastline

Fig 7은 해안선을 따라 처오름 높이값을 계산한 결과이다. 시간차에 의한 단층 파괴 효과를 보기 위하여 y축의 값은 시간차를 고려한 경우의 최대 처오름 높이를 시간차를 고려하지 않은 경우의 최대처오름 높이로 무차원화하였다. 고 위도로 갈수록 최대 처오름과의 증가가 나타나긴 하였으나 그 효과는 미미하였다. 시간차를 고려한 경우 일부 지역에서는 시간차를 고려하지 않은 경우보다 2배 이상의 증가를 보이는 지역도 발생하였다.

Fig. 7. Normalized Maximum Run-up Height Along Coastline

4. 결 론

시간차에 의한 단층파괴 현상이 지진해일의 전파에 미치는 영향을 검토하였다. 1993년에 발생한 동해(훗카이도) 지진을 3개의 소단층을 통해 재현하였으며, Okada 모형을 통하여 지진해일의 초기파형을 생성하였다. 각각의 소단층에 대해 선형 장파 모델을 이용하여 파형에 관한 시계열 자료를 계산하였다. 위도가 증가할수록 진원에 가까워지기 때문에 지진해일의 도달시간은 감소하였으며 최대 처오름

Fig. 6. Difference of Maximum Wave Height Between with Delay and Without Delay Cases

높이는 증가하는 양상을 보였다. 소단층에 의해 계산된 시계열 자료를 시간차를 두면서 선형중첩하여 해안선을 따라 최대 처오름 높이를 계산한 후에 기하평균을 구하여 대표값을 설정하였다. 소단층 사이의 시간차가 작을수록 기하평균값은 증가하였으며 단층 1과 2는 동시에 파괴되고 4분 후에 단층 3의 파괴가 발생할 때 최대 기하평균값이 발생하였다. 최대 기하평균이 발생하는 경우에 대하여 비선형 장파모형을 이용하여 지진해일의 전파특성을 분석하였다. 시간차를 고려하지 않은 경우와 비교해보면, 진원 근처에서는 지역적으로 시간차를 고려한 경우의 최대파고가 증가하거나 감소하는 영역이 명확하게 나타났으나 진원에서 멀어지는 경우에는 최대파고가 전체적으로 증가하였으나 멀어질수록 그 효과는 미미하였다. 해안선에서 최대 처오름 높이를 비교해보면, 위도에 따른 특징은 보이지 않고 처오름높이의 증가와 감소가 반복적으로 발생하였으며 일부 지역에서는 시간차를 고려하지 않은 경우에 비해 2배 이상의 증가를 보였다. 본 연구에서는 1993년 훗카이도 지진의 한 사례를 대상으로 단층의 시간차 파괴가 지진해일의 전파 및 연안에서의 처오름 높이에 미치는 영향을 검토하였다. 비록 단층 파괴와 관련하여 가상의 시나리오를 작성하여 모의하였으나 지역에 따라 단층의 파괴를 고려하지 않은 경우에 비하여 처오름 파고의 증가가 명확하게 발생하였다. 파의 특성을 보면 연안에서는 천수 현상 등에 의해 파고가 증가하여 비선형적인 거동을 보인다. 따라서 처오름에 관한 정교한 해석을 위해 비선형 천수방정식을 이용한 모의가 필요하며 아울러 단층 파괴의 동적 거동과 관련하여도 실제 발생 가능한 시나리오에 대하여 정밀하게 모의할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 기상청 기상·지진 See-At 기술개발 연구사업(KMI2018-09510)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Ammon, C.J., Ji, C., Thio, H.-K., Robinson, D., Ni, S., Hjorleifsdottir, V., et al. (2005). Rupture process of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake. *Science*, Vol. 308, No. 5725, pp. 1133-1139.
- Bizzarri, A. (2012). Rupture speed and slip velocity: What can we learn from simulated earthquake? *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 317-318, pp. 196-203.
- Choi, B.H., Pelinovsky, E., Hong, S.J., and Woo, S.B. (2003). Computation of Tsunamis in the East (Japan) sea using dynamically interfaced nested model. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 160, pp. 1383-1414.
- 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 American*, Vol. 97, No. 1A, pp. S192-S207.
- Grilli, S.T., Ioualalen, M., Asavanant, J., Shi, F., Kirby, J.T., and Watts, P. (2007). Source constraints and model simulation of the December 26, 2004, Indian ocean tsunami. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 133, No. 6, pp. 414-428.
- Imai, K., Satake, K., and Furumura, T. (2010). Amplification of tsunami heights by delayed rupture of great earthquake along the Nankai trough. *Earth Planets Space*, Vol. 62, No. 4, pp. 427-432.
- Ishii, M., Shearer, P.M., Houston, H., and Vidale, J.E. (2005). Extent, duration and speed of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake imaged by the Hi-Net array. *Nature*, Vol. 435, pp. 933-936.
- Le Gal, M., Violeau, D., and Benoit, M. (2017). Influence of timescales on the generation of seismic tsunamis. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, Vol. 65, pp. 257-273.
- Le Gal, M., Violeau, D., Ata, R., and Wang, X. (2018). Shallow water numerical models for the 1947 gis-borne and 2011 Tohoku-Okai tsunamis with kinematic seismic generation. *Coastal Engineering*, Vol. 139, pp. 1-15.
- Lee, H.H., Cho, H.-R., and Cho, Y.-S. (2016). Tsunami inundation map due to fault sources at Ryuku trench. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 16, No. 1, pp. 319-328.
- Maercklin, N., Festa, G., Colombelli, S., and Zollo, A. (2012). Twin ruptures grew to build up the giant 2011 Tohoku, Japan, earthquake. *Nature Scientific Reports*, Vol. 2, Article No. 709. doi:10.1038/srep00709
- Okada, Y. (1985). Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 75, No. 4, pp. 1135-1154.
- Ren, Z., Liu, H., Zhao, X., Wang, B., and An, C. (2019). Effect of kinematic fault rupture process on tsunami propagation. *Ocean Engineering*, Vol. 181, pp. 43-58.
- Rhie, J., Dreger, D., Bürgmann, R., and Romanowicz, B. (2007). Slip of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake from joint inversion of long-period global seismic waveforms and GPS static offsets. *Bulletin of the Seismological Society of American*, Vol. 97, No. 1A, pp. S115-S127.
- Satake, K., Fujii, Y., Harada, T., and Namegaya, Y. (2013). Time and space distribution of coseismic slip of the 2011 Tohoku earthquake as inferred from tsunami waveform data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 103, No. 2B, pp. 1473-1492.
- Son, 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. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 3, pp. 303-310.

Received	August 22, 2019
Revised	August 29, 2019
Accepted	September 23, 2019