일본 태평양 연안의 Tokai, Tonankai 및 Nankai의 3연동지진에 의한 지진해일이 제주도 연안에 미치는 영향

Effects on the Jeju Island of Tsunamis Caused by Triple Interlocked Tokai, Tonankai, Nankai Earthquakes in Pacific Coast of Japan

이광호* · 김민지** · 川崎浩司*** · 조성**** · 김도삼*****

Kwang Ho Lee*, Min Ji Kim**, Koji Kawasaki***, Sung Cho**** and Do Sam Kim*****

요 지 : 본 연구는 지진해일의 전파과정을 수치모의할 수 있는 비선형수치모델을 구축하고, 이로부터 최근 일본 태평양 연안에서 발생 가능성이 제기되고 있는 리히터 규모 9.0의 Tokai, Tonankai 및 Nankai의 3연동지진으로 인한 지진해일이 제주도 연안에 미치는 영향을 검토하였다. 수치해석에 있어서는 천해역에서의 천수효과를 충분히 재현하기 위해 격자접속기법을 이용하였으며, 2011년에 발생한 동일본지진과 1983년 동해중부지진에 의한 지진해일에 대한 수치계산을 수행하여 수위변동, 전파시간, 침수계산 등에 대한 기존의 계산치 및 관측치와의 비교로부터 본 수치모델의 타당성을 검증하였다. 3연동지진에 대한 수치모의는 지진해일의 영향을 충분히 고려할 수 있도록 지진 발생으로부터 10시간 동안 계산을 수행하였다. 수치모의를 통해 지진해일의 전파과정에서의 수위변동은 해저수심변화, 굴절, 회절, 반사 등의 영향에 의해 크게 좌우되며, 우리나라 제주도 연안에서는 사계항에서 1.6m의 최대지진해일고가 추정되었다.

핵심용어 : Tokai, Tonankai 및 Nankai의 3연동지진, 제주도 연안, 지진해일고, 침수

Abstract : This study proposed a two-dimensional horizontal numerical model based on the nonlinear shallow water wave equations to simulate tsunami propagation and coastal inundation. We numerically investigated the possible impacts of tsunami caused by the triple interlocked Tokai, Tonankai and Nankai Earthquakes on the Jeju coastal areas, using the proposed model. The simultaneous Tokai, Tonankai and Nankai Earthquakes were created a virtual tsunami model of an M9.0 earthquake. In numerical analysis, a grid nesting method for the local grid refinement in shallow coastal regions was employed to sufficiently reproduce the shoaling effects. The numerical model was carefully validated through comparisons with the data collected during the tsunami events by 2011 East Japan Earthquake and 1983 central East Sea Earthquake (Nihonkai Chubu Earthquake). Tsunami propagation triggered by the combined Tokai, Tonanakai and Nankai, Earthquakes was simulated for 10 hours to sufficiently consider the effects of tsunami in the coastal areas of Jeju Island. The numerical results revealed that water level fluctuation in tsunami propagation is greatly influenced by water-depth change, refraction, diffraction and reflection. In addition, the maximum tsunami height numerically estimated in the coastal areas of Jeju Island was about 1.6 m at Sagye port.

Keywords : Tokai, Tonankai and Nankai earthquakes, coast of Jeju Island, tsunami height, inundation

1. 서 론

일본 Nankai해구에서 1946년 12월 21일 발생한 M 8.0의 Nankai지진은 고치현에서 최대 6 m의 지진해일을 발생시켜

약 700명이 사망하고, 35,000채 이상의 가옥이 파손되는 등의 막대한 인적·물적 피해를 초래하였다. Nankai해구는 일본 중부의 Shizuoka현에서 남부 Kyushu의 Miyazaki현까지 수심 4,000 m, 연장 약 780 km에 이르는 지역으로, 필리핀판

* 관동대학교 산학협력단(Industry and Academia Cooperation Foundation, Kwandong University)

** 한국해양대학교 대학원 토목환경공학과 석사과정(Master Course, Department of Civil and Environmental Engineering, Graduate School, Korea Maritime University)

*** (일)나고야대학교 공학연구과 사회기반공학전공(Department of Civil Engineering, Graduate School of Engineering, Nagoya University, Japan)

**** 한국수자원공사 경인 아라뱃길건설처(Gyeong-In water way business division, Korea water resources corporation)

***** 한국해양대학교 건설공학과(Corresponding author : Do Sam Kim, Department of Civil Engineering, Korea Maritime University, Dongsam-Dong, Yeongdo-Gu, Busan, Korea. kimds@hhu.ac.kr)

Fig. 1. Tokai, Tonankai and Nankai tsunamis of the past.

과 유라시아판이 만나는 섭입대이다. Fig. 1은 Tokai(東海), Tonankai(東南海), Nankai(南海)지진대로 이루어진 Nankai해구에서 발생한 과거지진의 사례를 나타낸 것으로, 1854년 Tokai지진, 1944년 Tonankai지진, 1946년 Nankai지진이 발생하였으며, 특히 Tokai지진의 경우는 1984년에 발생한 이후에 150년 이상 잠복기에 있는 것으로 알려져 있다. 日本 中央防災會議(2012)에서 이들 3개 지진은 최대 규모 M 8.0급으로 각각 100~150년의 주기로 발생하였고, 동시발생은 300~500년 주기로 추정하고 있다. 또한 Nankai해구에서 강진이 1707년에 마지막으로 발생하였고, 그 지진해일의 규모는 300~500년마다 증가하기 때문에 2011년 동일본대지진에 상응하는 규모의 지진이 일본의 남서쪽에서도 발생할 수 있다고 예측하고 있다. 한편, 日本 地震調査委員会(2012)는 Nankai해구에서 각각의 지진이 단독으로 30년 이내에 발생할 확률을 Tokai지진의 경우는 88%, Tonankai지진은 70%, Nankai지진은 60%로 추정하였다. Fig. 2에 2001년 日本 中央防災會議에서 발표한 Tokai, Tonankai 및 Nankai의 3연동지진에 의한 예상 지진해일고의 분포와 Nankai해구의 범위를 제시한다. 그림에 주어진 바와 같이 거대한 규모의 연동형 지진이 발생할 경우 우리나라의 연안에서도 지진해일의 전파에 따른 적지 않은 영향을 받을 수 있다. 특히, 파원역에서 가장 인접해 있는 제주도 연안에서의 피해발생이 가장 우려되며, 따라서 제주도 연안에서 예상 지진해일고 및 예상 침수지역을 추정하는 것은 장기적인 연안방재 및 연안개발의 측면에서 기본적으로 숙지 및 고려되어야 하는 요소로 판단된다. 지금까지 제주도 연안으로 지진해일의 전파 및 그에 따른 피해사항이 거의 알려져 있지 않지만 속중 33년(1707년) 10월 제

Fig. 2. Distribution of tsunami height in Tokai, Tonankai and Nankai tsunamis.

주도 연안에서 지진해일이 관측된 것으로 보고되었고(최 등, 2012), 발생빈도는 매우 낮지만 제주도 연안이 지진해일로부터 안전한 지역이 아니라는 것이 확인된다. 그리고, 최 등 (2012)은 Tokai, Tonankai 및 Nankai의 3연동지진으로 인한 지진해일이 우리나라 제주도 연안과 남해안에 미치는 영향을 검토하였으나 제주도 연안에 대한 상세역 계산을 수행하지 않아 대상 해역의 정확한 지진해일고와 침수대상위치 및 침수 범위를 예측하기에는 다소 어려움이 따른다.

따라서, 본 연구는 이상과 같은 배경으로부터 일본 태평양 연안에서 발생 가능성이 높은 규모 9.0의 Tokai, Tonankai 및 Nankai의 3연동지진으로 인한 지진해일이 우리나라 제주도 연안에 전파되어 발생할 수 있는 지진해일고와 침수위치 및 침수영역을 수치적으로 검토한다. 더불어, 지진해일의 전파시간 등과 같은 기본적인 수리특성을 고찰하여 향후 연안방재와 연안개발에 중요한 기초자료를 수집하고자 한다.

2. 수치해석이론

2.1 지배방정식

지진해일의 기초방정식으로 연속방정식과 Navier-Stokes운동방정식을 파형경사 및 수심파장비가 충분히 작다고 가정하는 장파근사를 이용하여 연직방향으로 적분한 비선형천수방정식을 적용하였다. 장파근사의 가정에 의해 압력은 정수압 분포가 되며 수평방향(x방향과 y방향)에 대한 유속성분인 u , v 는 연직방향에 대하여 일정한 분포를 갖는다. 지진해일의 거동은 해면상의 수위분포를 초기조건으로 하여 연속방정식과 운동방정식을 시간발전에 따라 해석함으로써 수치적으로 표현할 수 있다. 본 연구에서는 지진해일의 수치해석을 위하여 적용한 연속방정식과 운동방정식을 식 (1)~(3)에 나타낸다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{g n_n^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn_n^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (3)$$

여기서, t 는 시간, x, y 는 수평방향의 좌표, g 는 중력가속도, η 는 수면변위, n_n 은 Manning의 조도계수, D 는 수심 h 와 지진해일에 의한 수면변위 η 를 합한 전수심, M, N 은 x, y 방향의 유량플럭스로 다음과 같이 정의된다.

$$M = \int_{-h}^{\eta} u dz = u(h + \eta) = uD \quad (4)$$

$$N = \int_{-h}^{\eta} v dz = v(h + \eta) = vD \quad (5)$$

지진해일의 수치시물레이션 방법에는 지진해일의 운동을 나타내는 상기의 방정식을 유한차분법이나 유한요소법을 적용하여 계산하는 것이 일반적이다. 본 연구에서 적용하는 지진해일의 수치해석모델에서는 연속방정식 및 운동방정식을 Leap-frog법에 의해 차분화하였다. Leap-frog법에서는 수면변위 η 와 유량플럭스 M, N 이 정의되는 지점을 1/2격자만큼 엇갈리게 배치한다.

2.2 경계조건

2.2.1 육측경계조건

육상에서의 침수를 고려하기 위하여 小谷 등(1998)에 의해 제안된 경계조건을 적용하였다. 小谷 등(1998)에 의해 제안된 경계조건에서 지진해일의 선단은 전수심이 $D=0$ 이 되는 지점과 $D>0$ 이 되는 지점의 경계에 위치하는 것으로 가정하여, x, y 방향으로 유량계산에는 식 (6)과 (7)에 나타내는 바와 같이 각 방향의 전수심 D^x, D^y 를 수위와 지반고와의 차로부터 산정한다.

$$D_{i,j}^x = \eta_{i,j} - h_{i+1,j} \quad (6)$$

$$D_{i,j}^y = \eta_{i,j} - h_{i,j+1} \quad (7)$$

또한, Fig. 3과 같이 각각의 전수심이 (-)가 되는 경우에는 침수가 발생하지 않은 것으로 판단하여 유량을 0으로 하며, 육상에서의 침수를 고려하지 않는 경우는 정선을 연직벽으로 가정한 완전반사조건으로 한다.

$$M_{i,j} \text{ or } N_{i,j} = 0 \quad (8)$$

2.2.2 월류경계조건

본 수치모델에서는 지진해일의 높이가 제방의 높이를 상회하는 경우에 지진해일이 월류하는 것으로 하여 다음과 같은

Fig. 3. Front of wave condition.

Fig. 4. Mimetic diagram of overflow formula.

本間(1940)의 월류공식으로부터 유량을 산정한다.

$$M_{i,j} \text{ or } N_{i,j} = \begin{cases} 0.35Lh_1\sqrt{2gh_1} & \text{for } \frac{h_2}{h_1} < \frac{2}{3} \text{ Complete overflow} \\ 0.91Lh_2\sqrt{2g(h_1-h_2)} & \text{for } \frac{h_2}{h_1} \geq \frac{2}{3} \text{ Submerged overflow} \end{cases} \quad (9)$$

Fig. 4에서 H_r 은 구조물의 해측에서의 수위, H_0 는 바닥에서부터 구조물 천단까지의 높이(천단고), H_f 는 구조물 배후(육측)에서의 수위, L 은 월류폭이며, h_1 과 h_2 는 구조물의 천단고를 기준으로 구조물 전후의 수위차이다($h_1 = H_r - H_0$, $h_2 = H_f - H_0$).

2.2.3 개경계조건

계산영역의 내부에서 개경계로 방사되는 지진해일에 대해서는 진행성 장파의 특성곡선에 기초하여 지진해일을 투과시킨다. 특성곡선으로부터 경계부에서의 유량은 식 (10)과 같이 주어진다.

$$\sqrt{M^2 + N^2} = \sqrt{gh} \cdot |\eta| \quad (10)$$

2.3 격자점속기법

지진해일 수치시물레이션에서 지진해일을 충분히 재현하려면 계산영역 내에 과원역이 포함되어야 하므로 광대한 계산영역을 필요로 한다. 그리고 연안에서는 천수, 굴절, 반사 등의 여러 현상이 발생하여 육지의 침수계산에 큰 영향을 미치기 때문에 높은 공간 해상도가 요구된다. 하지만 광역에서 높

Fig. 5. Nesting method.

은 공간해상도로 계산을 수행하는 경우 방대한 격자수와 계산시간이 필요하므로 지진해일 수치시뮬레이션에서는 다른 크기의 격자간격의 영역을 접속시켜 동시에 계산을 실시하는 격자접속기법이 많이 이용되며, 본 모델에서도 유량 및 수위를 영역마다 접속시켜 계산하였다.

2.3.1 유량접속

Fig. 5는 격자접속기법에 있어서의 영역간의 접속방법을 나타낸다. 본 연구에서는 공간해상도를 1:3의 비율로 설정하였다. 유량의 접속은 소영역 경계상에서의 유량에 넓은 영역에서 계산된 유량을 적용하였다. 또한 넓은 영역의 유량과 소영역의 유량이 중복되는 격자에 대해서는 넓은 영역에서 계산된 유량을 적용하고 그 외의 경계선상의 유량에 대해서는 선형 보간을 이용하여 산정된 유량을 적용하였다.

2.3.2 수위접속

수위에 대해서는 계산의 안정을 위해 소영역에서 계산된 수

위를 넓은 영역에 접속하고 있어 넓은 영역격자가 포함하는 전수심이 0인 격자를 제외한 소영역격자에서 산정된 수위의 평균을 넓은 영역격자의 수위로 적용하였다.

3. 수치모델검증

3.1 2011년 동일본지진해일

본 수치해석모델로부터 예측된 지진해일의 전파에 대한 계산 정도를 검증하기 위해 지난 2011년 3월 11일 일본 동북부지역에서 발생한 M 9.0의 동일본지진을 대상으로 수치해석을 수행하였다. 동일본지진의 단층파라미터는 Tohoku대학, 日本 建築研究所 등의 여러 연구기관에 의해 제시되고 있으나, 본 연구에서는 日本 建築研究所가 공개한 Table. 1의 Fujii et al.(2011)에 의한 단층파라미터 값을 적용하였으며, Okada (1985)방법에 의해 해저지반의 연직변동량을 산정하여 수위에 대한 초기조건을 결정하였다. 여기서, Fig. 6은 단층파라미터 중에 해저지반의 활동량의 분포를, 그리고 Fig. 7은 Okada(1985)방법에 의해 산정된 초기수위의 분포를 나타

Fig. 6. Distribution of sea bottom displacement by East Japan tsunami (Fujii et al, 2011).

Fig. 7. Initial water level of East Japan tsunami.

Table 1. Fault parameters for 2011 East Japan earthquake

Latitude (°N)	Longitude (°E)	H' (km) (Depth)	θ (deg) (Strike angle)	λ (deg) (Dip angle)	δ (deg) (Slip angle)	L (km) (Length)	W (km) (Width)
38.103	142.860	24	193	81	14	500	200

Fig. 8. Time history of observed and computed water level.

Table 2. Fault parameters for 1983 Central east sea earthquake

Aida	Latitude (°N)	Longitude (°E)	H' (km) (Depth)	θ (deg) (Strike angle)	λ (deg) (Dip angle)	δ (deg) (Slip angle)	L (km) (Length)	W (km) (Width)	u' (m) (Dislocation)
Fault 1	40.21	138.84	2	22	40	90	40	30	7.60
Fault 2	40.54	139.02	3	355	25	80	60	30	3.05

낸다. 이로부터 얻어진 초기수위데이터를 본 연구의 수치해석모델에 적용하여 지진해일의 제반 특성을 추정하였다.

Fig. 8은 진원지역에 근접하여 극심한 피해가 발생한 Iwate현과 Miyagi현의 북부에서 뿐만 아니라 진원지에서 먼 곳에 위치하는 Shizuoka현의 Omaezaki와 Ito지역에서 수치해석결과와 관측치의 시간에 따른 수위변화를 비교한 것이다. Fig. 8에 보이는 수치해석결과는 상세역에 대한 결과로 계산에 적용된 격자간격은 50 m이다. 그림으로부터 확인되는 바와 같이 수위변동에 대한 수치해석결과는 지진의 발생으로부터 제 1파가 도달하는 양상과 최고수위에 대한 관측치를 잘 재현하고 있으므로 본 수치모델은 지진해일의 전파과정을 정도 높게 예측할 수 있음을 알 수 있다. 한편, 수치해석결과와 관측치 사이에 나타나는 작은 위상차와 지진해일고의 차이는 비교적 큰 격자간격(50 m)의 적용으로 인해 수심 및 해안선의 변화에 대한 불충분한 해상도에 기인된 것으로 판단된다.

3.2 1983년 동해중부지진해일

우리나라 동해 연안에 위치한 임원항은 1983년 5월 26일 일본 Akita현의 앞바다에서 발생한 M 7.7의 동해중부지진에 의해 발생한 지진해일의 내습으로 침수피해를 입은 사례가 있다. 따라서, 본 연구에서 적용하는 수치모델의 침수계산에 대한 계산정도를 확인하기 위해 1983년에 발생한 동해중부지진에 의한 임원항의 침수피해를 수치적으로 재현하였다. 동해중부지진에 대한 여러 가지 단층모델 중에서 실제로 측정된 결과와 대응성이 높다고 알려진 Aida(1984)의 모델을 적용하였으며, 구체적인 단층파라미터를 Table. 2에

Fig. 9. Maximum inundation area at Imwon port.

나타낸다. 전술한 바와 같이 Okada(1985)방법에 의해 초기수위를 산정하고 본 수치모델로부터 지진해일고와 침수지역을 산정하였다. Fig. 9는 동해중부지진해일의 전파로 인해 발생한 임원항 주변에서 침수영역에 대한 계산결과를 Google에서 제공하고 있는 항공사진에 겹쳐서 표시한 것이다. Fig. 9에 나타난 침수범위에 대한 계산결과와 기존의 최·이(1993), 윤 등(2002), 김 등(2007)에 의해 수행된 임원항의 침수영역에 대한 결과와의 정량적인 비교는 수행하지 않았으나 침수위치와 범위는 기존의 연구결과와 잘 일치하는 것으로 판단된다.

이상의 일본 동북부지역에서 발생한 동일본지진해일의 전파에 대한 수치계산 결과와 일본 Akita현에서 발생한 동해중부지진해일로 인한 임원항의 침수계산을 통해 본 연구에서 제안한 수치모델의 타당성을 확인하였다. 이를 근거로 Tokai, Tonankai 및 Nankai의 3연동지진에 의한 지진해일이 제주도 연안에 미치는 영향을 수치적으로 검토한다.

4. Tokai, Tonankai 및 Nankai의 3연동지진에 의한 지진해일

4.1 대상영역 및 계산조건

대상영역은 Tokai, Tonankai 및 Nankai의 3연동지진에 의한 지진해일이 충분히 재현될 수 있도록 좌하측 격자점(경도 124.667°, 위도 28.75°) 및 우상측 격자점(경도 142.15°, 위도 36.733°)을 취하였다. Fig. 10은 제1영역에서 수심의 공간분포를 나타내며, 이는 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 1'테이터(약 1.8 km 간격)를 사용하였다. NOAA에서 주어지는 수심자료는 구좌표이므로 ArcGIS프로그램(ArcMap 10, 2011)을 이용하여 직각좌표로 변환하였고, 이와 우리나라 전자수치해도로부터 얻어지는 직각좌표의 상세역을 접합하였다. 여기서, Fig. 10의 제 1영역에서 주어지는 수심분포도로부터 진원지 주변인 일본의 태평양 연안에서는 수심이 1~3 km에서 4~8 km로 급격히 변화되는 것을 볼 수 있고, 이로 인하여 지진해일의 전파양상이 크게 변할 것으로 예상된다.

Fig. 11은 세부영역인 제 2영역에서 제 6영역을 나타내고 있다. 계산시간은 지진해일의 영향을 충분히 고려할 수 있도록 지진 발생시간부터 10시간 동안 수치모의하였으며, 수치 계산에서의 상세한 조건을 Table. 3에 나타낸다. 먼저, 제 1영역에 대한 수치계산을 수행하여 제주도 전 연안에서 지진해일고의 공간분포를 검토하였고, 이로부터 서귀포시 연안에서 상대적으로 큰 지진해일고를 나타내는 것을 알 수 있었다. 따라서, 제주도 서귀포시 연안에서 지진해일에 의한 수위

Fig. 10. Distribution of water depth at area 1.

Fig. 11. Computation area for nesting.

Table 3. Computation conditions

Number of area	Mesh size (m)	Number of mesh
Area NO.1	1215 m	1300 × 780
Area NO.2	405 m	1215 × 888
Area NO.3	135 m	1071 × 1488
Area NO.4	45 m	1056 × 771
Area NO.5	15 m	873 × 717
Area NO.6	5 m	453 × 543

Fig. 12. Initial water level by simultaneous occurrence of Tokai, Tonankai and Nankai tsunamis.

상승고를 보다 정확히 예측하기 위해 6개의 영역을 구성하였고, 이 때 제 6영역의 격자크기는 5 m이다.

4.2 지진해일의 초기수위

日本中央防災会議(2003)에서는 Tokai, Tonankai 및 Nankai의 3연동지진을 최대 M 8.7로 상정하였지만 2011년 동일본 대지진 발생 이후 M 9.0 지진의 발생 가능성을 제기하였다. 지진의 에너지 E_J 와 규모 M 과의 관계를 나타내는 Gutenberg-Richter의 식 (11)에 의하면 M 9.0의 지진에너지는 M 8.7의 2.82배에 상당하므로 본 연구에서는 일본 중앙방재회의에서 검토된 3연동지진에 대해 Okada(1985)모델에서 계산된 지각 변동량과 수위변동량을 각각 2.82배한 값을 적용함으로써 파원역을 변경하지 않고 계산을 수행하였다(川崎·鈴木, 2012). Fig. 12는 Tokai, Tonankai 및 Nankai의 3연동지진에 의한 지진해일의 초기수면형상을 나타낸 것으로 그림으로부터 초기수위의 최대치가 약 13 m에 달하는 것을 볼 수 있다.

$$\log_{10} E = 4.8 + 1.5M \quad (11)$$

4.3 수치해석결과

Fig. 13은 Tokai, Tonankai 및 Nankai의 3연동지진에 의한 지진해일을 제 1영역에 대해 시뮬레이션한 결과이다. 결과에 의하면 지진발생 후 약 4시간 후에 제주도로 지진해일이 전파되어 오는 것을 알 수 있다. 전체적인 전파양상을 살펴보면 지진발생과 동시에 지진해일파가 일본 태평양 연안으로 전파되고, 시간의 경과와 더불어 일본의 남서측으로 굴절되면서 일부는 우리나라 제주도 및 남해안으로 전파되어가는 것을 알 수 있고, 상대적으로 남중국측으로 큰 에너지의 지진해일이 전파되는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 10에

Fig. 13. Propagation by simultaneous occurrence of Tokai, Tonankai and Nankai tsunamis.

제시된 수심분포로부터 충분히 예상되는 것으로 판단된다. Fig. 14에 수지해석으로부터 제 1영역에서 최고수위분포를 나타내었으며, 이로부터 진원지 부근에서는 수위가 최대 20 m 상승하는 것을 알 수 있다.

다음으로, Tokai, Tonankai 및 Nankai의 3연동지진이 발생할 경우 우리나라에서 가장 빨리 지진해일이 도달하는 제주도를 상세역으로 계산한 영역별 최고수위분포결과를 Fig. 15~19에 나타내었다. Fig. 17을 통해 제주도 서귀포시 연안에

Fig. 14. Maximum water level at area1.

Fig. 15. Maximum water level at area 2.

Fig. 18. Maximum water level at area 5.

Fig. 16. Maximum water level at area 3.

Fig. 19. Maximum water level at area 6.

Fig. 17. Maximum water level at area 4.

Fig. 20. Calculation points.

Fig. 21. Maximum water level at calculation points.

서는 약 1 m 정도의 수위가 상승하는 지역들이 다소 나타나

는 것을 볼 수 있다. 그리고, Fig. 19는 마지막 영역의 최고 수위분포로, 화순항 주변은 약 1.0~1.1 m, 사계항 주변은 약

Fig. 22. Time history of water level at each point suggested in Fig. 16.

Fig. 23. Predicted inundation area at area 6.

1.5~1.6 m 수위가 상승하는 것으로 예측된다.

다음의 Fig. 20은 제주도 연안을 따라 최대수위상승고를 계산한 지점들을 표시한 것이고, 그 결과를 Fig. 21에 나타내었다. 대부분 지역에서는 약 1 m 정도 수위가 상승하지만 사계항에서는 최대 1.6 m로 수위가 상승하는 것을 알 수 있다. Fig. 22에는 17에 표시된 서귀포 연안의 네 지역, 모슬포항, 송악공원, 사계항 및 화순항에서의 지진해일고의 시간변동을 나타내었으며, 네 지역 모두 약 4시간 후에 제 1파가 도달하는 것으로 예측된다. point 1인 모슬포항에서의 최고수위는 약 0.9 m, 최저수위는 약 -0.6 m, point 2인 송악공원 주변에서의 최고수위는 약 1.0 m, 최저수위는 -0.3 m, point 3인 사계항에서의 최고수위는 1.6 m, 최저수위는 -1.1 m, point 4인 화순항에서의 최고수위는 1.1 m, 최저수위는 -0.75 m로 각각 예측된다. 네 지역 모두 제 1파는 약 0.5 m이지만 반사파와 지형의 영향으로 인해 높은 수위변동이 나타나고, 특히 사계항과 화순항의 경우는 지진해일에 의한 부진동의 영향도 일부 포함된 것으로 판단된다.

한편, 화순항 주변과 사계항 주변에서 침수계산을 수행하였으며, 이로부터 사계항 주변은 침수되지 않는 것으로 나타났다, 화순항 주변은 일부 침수가 발생하였으며, 그 결과를 Fig. 23에 나타낸다. 그림에서부터 침수면적은 상대적으로 넓

지 않고 저개발된 비주거 지역이며, 따라서 침수범람으로 인한 큰 피해는 예상되지 않지만 향후 이러한 예상침수역이 고려된 연안개발의 방향이 수립될 필요가 있을 것으로 여겨진다.

5. 결 론

우리나라 제주도 연안에 영향을 미칠 가능성이 있는 Tokai, Tonankai 및 Nankai의 3연동지진에 의한 지진해일에 있어서 제주도 연안에서의 수위변동, 전파시간 등과 같은 지진해일의 기본특성을 본 수치해석모델로부터 검토하였다. 수치계산에서는 Okada(1985)의 지반탄성이론에 기초하여 초기수위를 산정하고, 이의 결과를 본 해석모델에 적용하여 지진해일의 전파특성을 추정하였으며, 본 수치해석모델의 검증은 2011년 동일본지진에 의한 지진해일과 1983년 동해중부지진에 의한 지진해일에 대해 실시되었다. 이로부터 모슬포항, 송악공원, 사계항 및 화순항에서 정확한 수위변동의 크기와 침수영역의 범위를 예측하였다. 이상과 같은 과정에서 얻어진 중요한 사항을 본 연구의 결론으로 하여 아래에 기술한다.

(1) 2011년 동일본지진에 의한 지진해일의 시간에 따른 수위변화의 계산치와 관측치를 비교·검토한 결과, 수위변동의 크기, 지진해일의 도달시간 모두 잘 재현되었다. 더불어, 1983년 동해중부지진해일의 내습으로 침수피해를 입은 임원항에 본 수치모델에 의한 최대수위상승고 및 최대침수영역의 계산결과와 기존의 해석결과를 비교하여 본 모델의 타당성을 검증할 수 있었다.

(2) Tokai, Tonankai 및 Nankai의 3연동지진해일 대한 제 1영역의 수치해석결과로부터 진원지인 일본 중남부 부근에서는 최대 20 m의 수위변화가 발생하였으며, 우리나라 제주도 및 남해안보다는 남중국으로 더 많은 에너지가 전파되는 것을 확인할 수 있었다.

(3) 지진해일의 내습에 따른 제주도 연안에서 최고수위분포를 살펴보면 서귀포시 연안에서 약 1~1.2 m 정도, 최대 1.5~1.6 m 상승할 것으로 예상되며, 지진발생으로부터 약 4시간 후에 서귀포시 연안에 도달할 것으로 예측되고, 모슬포항에서

의 최고수위는 약 0.9 m, 송악공원 주변에서의 최고수위는 약 1.0 m, 사계항에서의 최고수위는 1.6 m, 화순항에서의 최고수위는 1.1 m로 각각 예상되며, 화순항 주변에서는 일부 침수도 예상된다.

참고문헌

- 김도삼, 김지민, 이광호 (2007). 동해연안에 영향을 미친 지진해일의 수치시뮬레이션. 한국해양공학회지, 21(6), 72-80.
- 윤성범, 임채호, 조용식, 최철순 (2002). 지진해일 전파 분산보정 유한차분모형의 정밀도 평가. 한국해양·해양공학회지, 14(2), 116-127.
- 최병호, 이호준 (1993). 1983년 동해 쓰나미의 산정. 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 13(3), 207-219.
- 최병호, 윤성범, 조용식, 김경옥 (2012). 일본서남해의 지진에 의한 쓰나미의 제주도로의 전파. 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 발표논문집, 1951-1954.
- Aida, I. (1984). A Source Models of the 1983 Nihonkai-earthquakes Tsunami. Proc. Symp. Nihonkai Chubu Earthquake Tsunami, JSCE, 673-700.
- Fujii, Y., Satake, K., Sakai, S., Shinohara, M. and Kanazawa, T. (2011). Tsunami source of the 2011 of the Pacific coast of Tohoku, Japan earthquake. Earth Planets Space, Letters, 63, 815-820.
- Hiller, A (2011). Manual for working with ArcGIS 10. Selected Works, University of Pennsylvania.
- Okada, Y. (1985). Surface deformation due to shear and tencile faults in a half-space. Bulletin of the Seismological Society of America, 75(4), 1135-1154.
- 川崎浩司, 鈴木一輝 (2012). 東海・東南海・南海三連動型大地震に伴う津波伝播特性に関する数値的研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開), 68(2) (印刷中).
- 小谷美佐, 今村文彦, 首藤伸夫 (1998). GIS を利用した津波遡上計算と被害推定法, 海岸工学論文集, 第45巻, 356-360.
- 本間仁 (1940). 低溢流堰堤の越流係数, 土木学会誌, 第26巻, 6号, 635-645, 9, 849-862.
- 日本 地震調査委員会 (2012). 溝型地震の長期評の概要 (算定基準日 平成24 年(2012年) 1月1日), <http://www.jishin.go.jp/main/choukihyoka/kaikou.htm>.
- 日本 中央防災会議 (2001). 東南海, 南海地震の被害想定について, 東南海, 南海地震等に関する伝門調査会(第14回), 資料 2, 38-40, <http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/14/>.
- 日本 中央防災会議 (2003). 津波の計算手法, 東南海, 南海地震等に関する伝門調査会(第16回), 参考資料 2, 110-124, <http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/16/>.
- 日本 中央防災会議 (2012). 南海トラフの巨大地震モデル検討会 (第16回) 議事概要について, <http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/16/>.

원고접수일: 2012년 7월 25일

수정본채택: 2012년 8월 22일 (1차)

2012년 8월 24일 (2차)

게재확정일: 2012년 8월 24일