동수압을 고려한 지진해일 최대침수예상구역 예측

Prediction of Maximum Inundation Area with a Hydrodynamic Pressure

이진우* · 한세종** · 조용식***

Lee, Jin Woo · Han, Sejong · Cho, Yong-Sik

Abstract

Predicted maximum inundation area with a three-dimensional hydrodynamic pressure model is developed in this study. Recently, the tsunami disaster is increasingly interested due to the East Japan Tsunami. The numerical model is composed of propagation model and inundation model. For the predicted inundation area, hydrodynamic pressure model is employed. Predicted maximum inundation area at Imwon port is calculated for 3 historical tsunamis and 11 virtual tsunamis. When dealing with tsunami disaster, the produced maximum inundation area can be utilized.

Key words : hydrodynamic pressure, tsunami, maximum inundation area

요 지

본 연구에서는 동수압을 고려한 수치모형을 이용하여 임원항에서의 최대침수영역을 예측하고 이를 바탕으로 최대침수예상도를 작성하였다. 최근 발생한 동일본 지진해일로 인하여 지진해일 방재대책에 대한 관심이 높아지고 있는 실정이다. 본 연구에서 사용한 수치모형은 기존의 지진해일 전파모형을 사용하였으며, 해안지역에서는 동수압을 고려한 범람모형을 사용하였다. 3개의 역사 지진해일과 11개의 가상 지진해일을 이용하여 임원항에서의 최대침수영역을 예측하였고, 예측된 최대침수영역을 이용하여 최대침수예상도를 작성하였다. 작성된 최대침수예상도는 지진해일 방재와 관련하여 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 동수압, 지진해일, 최대침수영역

1. 서 론

지진해일은 해저지진에 의해 발생하는 해일로, 파장이 매우 긴 장파이기 때문에 전파속도가 빨라 에너지의 손실 없이 먼 거리를 전파할 수 있다. 지진해일이 해안가로 점차 도달하게 되면 천수효과로 인하여 대규모 범람을 일으켜 엄청난 인명 및 재산 피해를 초래한다. 최근 강력한 지진해일로 인한 피해가 빈번히 발생하고 있는 실정이다. 2004년 12월 26일에 발생한 인도네시아 수마트라 지진해일로 인하여 막대한 피해(사망 283,106명, 실종 14,100명, 재산피해 100억 달러)가 발생하였고, 이로 인하여 세계적으로 지진해일에 의한 관심이 고조되었다. 또한, 2011년 3월 11일 발생한 동일본 지진해일은 막대한 인명 및 재산피해(사망 및 실종자 20,000여명, 이재민 80,000여명, 재산피해 25조엔) 뿐만 아니라 원자력 발전소까지 피해가 발생하였다.

우리나라 동해안의 경우 일본 서해안에서 발생하는 지진해일의 영향을 받는 지역으로 과거 1983년 동해 중부 지진해일과 1993년 북해도 남서 외해 지진해일에 의해 인명 및 재산피해가 발생하였다. 특히, 삼척시 임원항의 경우 지진해일로 인하여 사망 1명, 실종 2명의 인명피해가 유일하게 발생하였다.

지진해일을 보다 정확히 예측하기 위하여 많은 연구가 수행되어오고 있다. 지진해일의 전파에 대한 수치해석을 위하여 Cho *et al.* (2007)은 선형 천수방정식의 차분과정에서 발생하는 수치분산이 선형 Boussinesq 방정식의 분산항을 대체할 수 있도록 조정하는 기법을 적용하였다. 또한, 수심이 얇은 해안지역에서의 지진해일 범람모의를 위하여 바닥마찰의 영향을 고려한 비선형 천수방정식을 사용하였다(Kajiura *et al.*, 1990; Liu *et al.*, 1994).

기존의 천수방정식의 경우 Navier-Stokes 방정식을 수심방

*정회원. 한양대학교 일반대학원 건설환경공학과 박사후연구원(formerly 한양대학교 건설환경공학과 박사과정, E-mail: moonguy@hanyang.ac.kr)
Member. Post Doctoral Researcher, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

**정회원. 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 박사과정
Member. Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

***교신저자. 정회원. 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 교수(Tel: +82-2-2220-0393, Fax: +82-2-2220-1945, E-mail: ysc59@hanyang.ac.kr)
Corresponding Author. Member. Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

향으로 적분하여 얻어지는 2차원 방정식으로써 정수압 분포 가정을 하고 있다. 그러나 정수압 모형은 수심이 파장의 파장에 비해 상대적으로 작은 경우에만 적용이 가능하며, 수심이 상대적으로 깊어지게 되는 경우 즉, 단파의 해석에는 정확도가 떨어지는 계산 결과를 제공할 수 있다(Koçyigit *et al.*, 2002). 따라서, 본 연구에서는 좀 더 정확한 수치결과의 제공을 위하여 기존의 전파모형과 동수압을 고려한 범람모형을 이용하였고, 연직방향 격자 크기(Δz)를 변화시키는 방법을 이용하여 이동경계를 해석할 수 있도록 하였다(Lee and Cho, 2013). 개발된 수치모형을 이용하여 3개의 역사지진해일과 11개의 가상지진해일에 대하여 임원항에서의 범람해석을 실시하였으며, 이를 바탕으로 최대침수영역을 예측하였다.

2. 지배방정식

지진해일에 의한 최대침수예상구역을 예측하기 위하여 기존의 지진해일 전파모형과 동수압을 고려한 범람모형을 설명하였다. 각각의 수치모형에 대한 상세한 설명은 기존의 연구결과나 논문에서 쉽게 참고할 수 있으므로 간략히 서술하였다(Liu *et al.*, 1994; Cho *et al.*, 2007; Sohn *et al.*, 2009; Lee and Cho, 2013).

2.1 지진해일 전파모형

지진해일은 파장이 매우 길고 심해에서의 전파과정에서는 비선형성과 바닥마찰의 영향을 무시할 수 있어 선형천수이론(linear shallow-water theory)을 적용할 수 있다. 일본 서해안에서 발생하여 우리나라 도달하는 지진해일은 굴절, 회절 및 반사가 일어나고 전파과정에서 분산효과가 중요하게 된다. 따라서, 이러한 지진해일을 해석하기 위하여 일반적으로 선형 Boussinesq 방정식을 사용하는 것이 바람직하다(Imamura *et al.*, 1988).

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} = \frac{h^2}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) \right] - \frac{h^3}{6} \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial^2}{\partial t \partial x} \left(\frac{P}{h} \right) + \frac{\partial^2}{\partial t \partial y} \left(\frac{Q}{h} \right) \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} = \frac{h^2}{2} \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial P}{\partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) \right] - \frac{h^3}{6} \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\partial^2}{\partial t \partial x} \left(\frac{P}{h} \right) + \frac{\partial^2}{\partial t \partial y} \left(\frac{Q}{h} \right) \right] \quad (3)$$

여기서, ζ 는 자유수면변위, P 와 Q 는 각각 $P=uh$ 및 $Q=vh$ 로 정의되는 x -축과 y -축 방향의 체적흐름율(volume flux), u 와 v 는 각각 x -축과 y -축 방향의 수심평균된 유속, h 는 정수면(still water level)상의 수심이다.

2.2 동수압 모형

지진해일이 수심이 얇은 해안가에 도달하게 되면 천수효과로 인하여 파장이 짧아지고 파고가 증가한다. 또한, 해안부근에서는 바닥마찰의 효과가 매우 중요하기 때문에 바닥마찰항을 포함하여야 한다(Liu *et al.*, 1994). 동수압을 고려한 범

람모형의 3차원 비압축성 유체에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - g \quad (7)$$

여기서, u , v 그리고 w 는 각각 x -축, y -축과 z -축 방향의 유속 성분이고, t 는 시간, p 는 압력을 기준밀도로 나누어준 modified pressure를 나타내며, g 는 중력가속도, ν 는 물의 동점성계수이다.

자유수면의 해석에는 연속방정식을 연직방향으로 적분한 자유수면방정식(free surface evolution equation)을 사용한다(Casulli and Cheng, 1992).

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\int_{-h}^{\eta} u dz \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\int_{-h}^{\eta} v dz \right] = 0 \quad (8)$$

여기서, h 는 수심이고 η 는 자유수면변위이다.

운동량 방정식의 압력항을 정수압과 동수압으로 분리한 뒤 운동량 방정식에 대입하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial q}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (9)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\partial q}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (10)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial q}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (11)$$

여기서, q 는 동수압이고, 수면에서의 경계조건은 바람에 의해 발생하는 응력으로 바람응력계수(γ_I)와 x -축과 y -축 방향의 바람 유속 성분(u_a , v_a)을 이용하여 Eq. (12)와 같이 나타낼 수 있으며, 바닥에서의 마찰은 Eq. (13)으로 나타낼 수 있다.

$$\nu \frac{\partial u}{\partial z} = \gamma_I (u_a - u), \quad \nu \frac{\partial v}{\partial z} = \gamma_I (v_a - v) \quad (12)$$

$$\nu \frac{\partial u}{\partial z} = \gamma_B u, \quad \nu \frac{\partial v}{\partial z} = \gamma_B v \quad (13)$$

여기서, γ_B 는 바닥마찰 계수이고, γ_I 는 와점성계수로 양의 값으로 가정하였다.

동수압과 자유수면의 해석을 위해서 첫 번째 단계에서는 임시의 유속성분과 자유수면변위를 구하고 두 번째 단계에서는 임시의 유속성분과 자유수면 변위가 동수압을 고려하여 수정되어 계산된다.

먼저, 반음해법으로 운동량 방정식을 차분하면 다음과 같이

나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{u}_{i+1/2jk}^{n+1} = & F u_{i+1/2jk}^n - (1-\theta) \frac{\Delta t}{\Delta x} [g(\eta_{i+1j}^n - \eta_{ij}^n) + q_{i+1jk}^n - q_{ijk}^n] - \theta g \frac{\Delta t}{\Delta x} \\ & \frac{\tilde{u}_{i+1/2jk+1}^{n+1} - \tilde{u}_{i+1/2jk}^{n+1}}{\Delta z_{i+1/2jk+1/2}^n} - \frac{\tilde{u}_{i+1/2jk}^{n+1} - \tilde{u}_{i+1/2jk-1}^{n+1}}{\Delta z_{i+1/2jk-1/2}^n} \\ & (\tilde{\eta}_{i+1j}^{n+1} - \tilde{\eta}_{ij}^{n+1}) + v \Delta t \frac{\Delta z_{i+1/2jk+1/2}^n - \Delta z_{i+1/2jk-1/2}^n}{\Delta z_{i+1/2jk}^n} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \tilde{v}_{ij+1/2k}^{n+1} = & F v_{ij+1/2k}^n - (1-\theta) \frac{\Delta t}{\Delta x} [g(\eta_{ij+1}^n - \eta_{ij}^n) + q_{ij+1k}^n - q_{ijk}^n] - \theta g \frac{\Delta t}{\Delta x} \\ & \frac{\tilde{v}_{ij+1/2k+1}^{n+1} - \tilde{v}_{ij+1/2k}^{n+1}}{\Delta z_{ij+1/2k+1/2}^n} - \frac{\tilde{v}_{ij+1/2k}^{n+1} - \tilde{v}_{ij+1/2k-1}^{n+1}}{\Delta z_{ij+1/2k-1/2}^n} \\ & (\tilde{\eta}_{ij+1}^{n+1} - \tilde{\eta}_{ij}^{n+1}) + v \Delta t \frac{\Delta z_{ij+1/2k+1/2}^n - \Delta z_{ij+1/2k-1/2}^n}{\Delta z_{ij+1/2k}^n} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \tilde{w}_{ijk+1/2}^{n+1} = & F w_{ijk+1/2}^n - (1-\theta) \frac{\Delta t}{\Delta z_{ijk+1/2}^n} (q_{ijk+1}^n - q_{ijk}^n) + \\ & \frac{\tilde{w}_{ijk+3/2}^{n+1} - \tilde{w}_{ijk-1/2}^{n+1}}{\Delta z_{ijk+1}^n} - \frac{\tilde{w}_{ijk+1/2}^{n+1} - \tilde{w}_{ijk-1/2}^{n+1}}{\Delta z_{ijk}^n} \\ & v \Delta t \frac{\Delta z_{ijk+1}^n - \Delta z_{ijk}^n}{\Delta z_{ijk+1/2}^n} \end{aligned} \quad (16)$$

여기서, $\tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{w}$ 와 $\tilde{\eta}$ 는 각각 임시적인 유속장과 자유수면변위를 나타낸다. Δz 는 바닥과 자유수면 근처를 제외한 나머지 격자내의 연속 2차원 표면사이의 거리로 정의하였고, 수면과 바닥 또는 자유수면 사이의 거리이다. 따라서, Δz 는 공간적인 위치나 시간에 따라 달라지고, 지형의 변화 또는 이동경계를 고려하기 위하여 그 값이 0이 되기도 한다. 계수 F 는 이송항의 근사값이고, θ 는 0.5에서 1.0 사이의 값을 갖는 음해기법의 정도를 설정하는 변수이다(Casulli and Cattani, 1994).

Eqs. (14)와 (15)는 선형의 3대각 행렬로 구성되어있고 미지수인 자유수면 변위를 포함하고 있다. 먼저 이를 해석하기 위해 자유수면 방정식을 차분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tilde{\eta}_{ij}^{n+1} = & \eta_{ij}^n - \theta \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[\sum_{k=m}^M \Delta z_{i+1/2jk}^n \tilde{u}_{i+1/2jk}^{n+1} - \sum_{k=m}^M \Delta z_{i-1/2jk}^n \tilde{u}_{i-1/2jk}^{n+1} \right] \\ & - \theta \frac{\Delta t}{\Delta y} \left[\sum_{k=m}^M \Delta z_{ij+1/2k}^n \tilde{v}_{ij+1/2k}^{n+1} - \sum_{k=m}^M \Delta z_{ij-1/2k}^n \tilde{v}_{ij-1/2k}^{n+1} \right] \\ & - (1-\theta) \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[\sum_{k=m}^M \Delta z_{i+1/2jk}^n u_{i+1/2jk}^{n+1} - \sum_{k=m}^M \Delta z_{i-1/2jk}^n u_{i-1/2jk}^{n+1} \right] \\ & - (1-\theta) \frac{\Delta t}{\Delta y} \left[\sum_{k=m}^M \Delta z_{ij+1/2k}^n v_{ij+1/2k}^{n+1} - \sum_{k=m}^M \Delta z_{ij-1/2k}^n v_{ij-1/2k}^{n+1} \right] \end{aligned} \quad (17)$$

Eqs. (14)와 (15)를 행렬형태로 나타낸 뒤 행렬형태로 치환한 Eq. (17)에 대입하게 되면 미지수 $\tilde{\eta}_{ij}^{n+1}$ 에 대한 5대각 행렬을 구할 수 있다. 이는 반복계산법을 이용하여 해석할 수 있고, 이를 해석하여 새로운 자유수면변위가 계산이 되면, Eqs. (14)와 (15)를 이용하여 임시적인 유속성분을 구할 수 있다.

앞에서 구한 임시적인 유속성분과 자유수면변위를 이용하여

동수압을 고려한 지진해일 최대침수예상구역 예측

Fig. 1. A schematic sketch of computational grid system

여 동수압이 고려된 최종적인 유속장($u_{i+1/2jk}^{n+1}, v_{ij+1/2k}^{n+1}, w_{ijk+1/2}^{n+1}$)과 자유수면변위(η_{ijk}^{n+1})가 계산된다(Chen, 2003a; 2003b).

$$u_{i+1/2jk}^{n+1} = \tilde{u}_{i+1/2jk}^{n+1} - \theta \frac{\Delta t}{\Delta x} (\tilde{q}_{i+1jk}^{n+1} - \tilde{q}_{ijk}^{n+1}) \quad (18)$$

$$v_{ij+1/2k}^{n+1} = \tilde{v}_{ij+1/2k}^{n+1} - \theta \frac{\Delta t}{\Delta y} (\tilde{q}_{ij+1k}^{n+1} - \tilde{q}_{ijk}^{n+1}) \quad (19)$$

$$w_{ijk+1/2}^{n+1} = \tilde{w}_{ijk+1/2}^{n+1} - \theta \frac{\Delta t}{\Delta z_{ijk+1/2}^n} (\tilde{q}_{ijk+1}^{n+1} - \tilde{q}_{ijk}^{n+1}) \quad (20)$$

여기서, $\tilde{q}$ 는 임시적인 동수압을 나타낸다.

자유수면을 포함하지 않는 모든 연직 격자층에서는 연속방정식을 차분하고, 자유수면을 포함하고 있는 격자층에서는 자유수면방정식을 차분한다. 각각 차분된 연속방정식과 자유수면방정식에 Eqs. (18)-(20)을 대입하게 되면 동수압 $\tilde{q}_{ijk}^{n+1}$ 이 미지수인 두 개의 방정식(자유수면을 포함하지 않는 모든 연직 격자층, 자유수면을 포함하고 있는 격자층)을 구할 수 있고, 두 개의 방정식을 더하게 되면 7개의 대각선을 갖는 행렬식을 구할 수 있다. 이는 반복계산법을 이용하여 해석이 가능하고, 반복계산법을 이용하여 동수압이 계산되면 수평방향 및 연직방향 유속성분은 Eqs. (18)-(20)을 이용하여 구할 수 있다.

최종적인 자유수면변위와 동수압은 앞에서 구한 임시적인 동수압과 자유수면변위를 이용하여 다음의 식으로 계산된다.

$$\eta_{ij}^{n+1} = \tilde{\eta}_{ij}^{n+1} + \frac{\tilde{q}_{ijM}^{n+1}}{g} \quad (21)$$

$$\tilde{q}_{ijk}^{n+1} = g(\tilde{\eta}_{ij}^{n+1} - \eta_{ij}^{n+1}) + \tilde{q}_{ijk}^{n+1} = \tilde{q}_{ijk}^{n+1} - \tilde{q}_{ijM}^{n+1} \quad (22)$$

3. 수치모의 대상지역

본 연구에서는 강원도 삼척시 원덕읍 임원리에 위치한 임원항(북위 37° 13'57", 동경 129° 20'37")을 수치모의 대상지역으로 선정하였다(Fig. 2). 임원항은 어항으로 서측 방파제를 따라 내륙으로 이어지는 임원천이 흐르고 있다. Fig. 3은 수치모의 대상지역인 임원항의 지형도 및 수심도를 나타내고 있다. 임원항의 경우 1983년 동해 중부 지진해일의 내습당시 동해의 여러 항구 중 유일하게 인명피해가 발생하였고, 상당

Fig. 2. Detailed bathymetry and observation points of run-up heights at Imwon port

한 재산피해가 발생하였다. 따라서, 본 연구에서는 임원항을 대상으로 지진해일 범람 수치해석을 실시하였으며, 이를 바탕으로 최대침수영역을 예측하였다.

4. 수치해석

본 연구에서는 강원도 삼척시 원덕읍 임원리에 위치한 임원항(북위 37° 13'57", 동경 129° 20'37")을 수치모의 대상지역으로 선정하였다(Fig. 2). 임원항은 어항으로 서측 방파제를 따라 내륙으로 이어지는 임원천이 흐르고 있다. Fig. 3은 수치모의 대상지역인 임원항의 지형도 및 수심도를 나타내고 있다. 임원항의 경우 1983년 동해 중부 지진해일의 내습당시

Table 1. Computational information for each region

계산영역	공간격자 크기 (m, $\Delta x = \Delta y$)	공간격자 수		계산시간 간격 (sec, Δt)
		x	y	
A	1215.0	976	1114	3.0000
B	405.0	1090	1051	1.0000
C	135.0	787	964	0.33333
D	45.0	751	886	0.11111
E	15.0	739	817	0.03704
F	5.0	469	685	0.03704

동해의 여러 항구 중 유일하게 인명피해가 발생하였고, 상당한 재산피해가 발생하였다. 따라서, 본 연구에서는 임원항을 대상으로 지진해일 범람 수치해석을 실시하였으며, 이를 바탕으로 최대침수영역을 예측하였다.

Fig. 3은 수치모의를 위한 전체 영역과 계산격자를 나타내고 있으며, Fig. 3에서 알 수 있듯이 전체영역은 A-F로 나누어 총 6개의 영역으로 나누어 계산하도록 하였다. 각 영역의 크기와 격자의 크기는 Table 1에 나타내었다. 전파모형이 적용되는 4개의 영역(A-D)은 각각 1.215 km, 405 m, 135 m 그리고 45 m의 크기로 격자를 구성하였으며, 범람 모형이 적용되는 2개의 영역(E-F)는 각각 15 m와 5 m의 크기로 격자를 구성하였다.

1983년 동해 중부 지진해일 이후 우리나라에서는 처음으로 지진해일 피해에 대한 현장조사가 이루어졌다. 본 연구의 대상영역인 삼척시 임원항의 경우 1983년 동해 중부 지진해일 당시 최대 처오름 높이가 약 4.0 m로 나타났다. 본 연구에서는 1983년 동해 중부 지진해일을 재현하여 수치해석을 실시하였고, 수치해석 결과를 Fig. 2에 표시한 7개 지점에서의 현장조사결과와 비교하였다. Fig. 4는 임원항에서 관측된 최대처오름 높이와 수치해석 결과를 비교한 그림이다. Fig. 4와 Table 2에서 알 수 있듯이 본 연구의 결과는 수심적인 된 수치모형을 사용하였을 경우의 수치해석 결과와 비교하였을 때, 보다 높은 정확도의 결과를 제시함을 알 수 있다.

Fig. 3. Computational domains and bathymetry of the East Sea (A-F regions)

Fig. 4. Comparison of the run-up heights at Imwon port

본 연구에서는 과거 발생했던 지진해일 중 동해안에 영향을 주었던 3개의 역사지진해일(1964년 니카타 지진해일, 1983년 동해 중부 지진해일, 1994년 북해도 남서 외해 지진해일)과 지진공백역에 속하여 지진발생 가능성이 높은 11개의 가상지진해일을 선정하여 수치해석을 실시하였다. 지진단층 매개변수는 한반도에너지개발기구(KEDO, 1999)가 제시한 값을 적용하여 초기수면변위를 발생시켰다. 또한, 지진해일 수

치해석을 위한 초기수면변위의 재현은 초기수면변위가 해저변위의 연직성분과 같다는 가정을 기초로 한 Mansinha and Smylie (1971)의 모형을 사용하여 재현하였다.

Table 3와 4에서 H 는 단층면의 상연깊이, θ 는 진북과 이루는 단층면의 주향, δ 는 단층면의 경사각(dip angle), λ 는 단층면이 미끄러지는 방향(slip angle), L 은 단층의 길이, W 는 단층의 폭, D 는 단층의 변위 그리고 M 은 지진의 규모를 나타낸다.

Table 3와 4에 제시한 3개의 역사지진해일과 11개의 가상지진해일을 수면변위로 사용하여 수치해석을 실시하였다. 최대침수영역을 산정하기 위하여 본 연구에서는 지진해일 발생 후 200분이 경과하였을 때 임원항에서의 범람양상을 Fig. 5에 나타내었다. 전체 14개의 지진해일 가운데 범람이 크게 형성된 8개의 지진해일(1983년 동해 중부 지진해일, 가상지진해일 발생원 2-8)에 대하여 그림으로 나타내었다. 지진해일의 범람양상을 살펴보면, 11개의 가상지진해일 event 중 7개의 event(발생원 2-8)에서 범람이 많이 발생되는 것을 확인할 수 있으며, 범람깊이 또한 최대로 발생하였다. 역사지진해일 중 1983년 발생한 동해 중부 지진해일에서 가장 넓은 범람면적이 발생하였으며, 범람깊이 또한 가장 크게 나타났다. 또

Table 2. Comparisons of the maximum run-up heights (RMS error)

관측지점	1	2	3	4	5	6	7	RMS error
Observed	3.50	3.41	3.81	3.32	3.70	3.92	3.85	-
Depth-integrated model	3.42	3.30	3.58	3.32	3.68	3.72	3.70	0.129
Present study	3.45	3.36	3.68	3.33	3.69	3.80	3.74	0.018

Table 3. Location of the 3 historical tsunamis occurrence and fault parameters

발생 년도	단층발생지점		H (km)	θ (°)	δ (°)	λ (°)	L (km)	W (km)	D (km)	M (규모)
	경도 (°E)	위도 (°N)								
1964	139.42	38.74	1.0	189	56	90	80	30	3.30	7.5
1983	138.84	40.21	2.0	22	40	90	40	30	7.60	7.8
	139.02	40.54	3.0	355	25	80	60	30	3.05	
1993	139.30	42.10	5.0	163	60	105	24.5	25	12.00	7.8
	139.25	42.34	5.0	175	60	105	30	25	2.50	
	139.40	43.13	10.0	188	35	80	90	25	5.71	

Table 4. Location of the 11 virtual tsunamis occurrence and fault parameters

발생원	단층발생지점		H (km)	θ (°)	δ (°)	λ (°)	L (km)	W (km)	D (km)	M (규모)
	경도 (°E)	위도 (°N)								
1	137.5	37.5	1.0	0.0	40	90	125.899	62.945	6.31	8.0
2	137.7	38.3		14.5						
3	138.0	39.0		27.5						
4	138.4	39.7		17.0						
5	138.7	40.2		10.0						
6	138.9	40.9		1.0						
7	139.0	41.7		1.0						
8	139.1	42.1		4.0						
9	139.1	42.9		2.0						
10	139.2	43.5		2.0						
11	139.2	44.4		3.0

(a) 1983 Central East Sea Tsunami

(b) Virtual tsunami event, case 2

(c) Virtual tsunami event, case 3

(d) Virtual tsunami event, case 4

(e) Virtual tsunami event, case 5

(f) Virtual tsunami event, case 6

(g) Virtual tsunami event, case 7

(h) Virtual tsunami event, case 8

Fig. 5. Predicted maximum inundation area of Imwon port

한, 3개의 역사지진해일과 11개의 가상지진해일 결과를 비교 하였을 경우, 역사지진해일에 비해 가상지진해일에서의 범람 면적과 범람깊이가 크게 나타남을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 기존의 정수압 수치모형이 아닌 동수압을

고려한 수치모형을 이용하여 지진해일 범람해석을 실시하였다. 우리나라 동해안에 영향을 주어 피해를 발생시켰던 3개의 역사지진해일과 일본 서해안에서 발생하여 우리나라에 영향을 줄 것으로 예상되는 가상지진해일 11개를 이용하여 대상영역에서의 수치해석을 실시하였다. 본 연구에서 개발한 수치모형을 사용하여 지진해일 범람해석을 실시할 경우 초오류 해석에 신뢰할 수 있는 결과를 제공할 수 있을 것으로 보인다. 또한, 14개의 지진해일 정보를 이용한 수치해석을 통하여 대상지역에서의 최대침수영역을 예측하였다. 역사지진해일 중 1983년 동해 중부 지진해일에서 가장 많은 피해가 발생한 것으로 나타났다. 가상지진해일 또한 7개의 event에서 많은 피해가 발생할 것으로 예상되었다.

본 연구에서 제시한 결과와 각종 재난 대응정보를 활용하여 재해정보도를 작성하여 관련 기관 및 국민들에게 배포하게 된다면 보다 정확한 재난정보의 제공이 가능할 것으로 판단된다. 또한, 본 연구의 결과는 재해 발생 시 국민의 생명과 재산손실의 최소화를 위해 중앙정부, 지방자치단체, 유관기관 등이 재해에 대하여 신속하게 대처할 수 있도록 하는 비상대처계획(EAP, Emergency Action Plan) 수립에 사용될 수 있으며, 이는 국가방재전반에 도움이 될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 소방방재청 지진 및 지진해일 피해저감기술개발사업의 지원으로 수행한 ‘지진해일에 의한 구조물 피해분석 기술 개발’ [NEMA-지진-2012-05]과제의 성과입니다.

References

Casulli, V. and Cattani, E. (1994) Stability, accuracy and efficiency of a semi-implicit method for three-dimensional shallow water flow. *Computers & Mathematic Applications*, Vol. 27, No. 4, pp. 99-112.

Casulli, V. and Cheng, R.T. (1992) Semi-implicit finite difference methods for three-dimensional shallow water flow. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 15, pp. 629-648.

Casulli, V. and Stelling, G.S. (1998) Numerical simulation of 3D quasi-hydrostatic, free surface flows. *Journal of Hydraulic*

Engineering, Vol. 127, No. 7, pp. 678-686.

Chen, X. (2003a) A free-surface correction method for simulating shallow water flows. *Journal of Computational Physics*, Vol. 189, No. 2, pp. 557-578.

Chen, X. (2003b) A fully hydrodynamic model for three-dimensional, free-surface flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 42, No. 9, pp. 929-952.

Cho, Y.-S., Sohn, D.-H. and Lee, S.-O. (2007) Practical modified scheme of linear shallow-water equations for distant propagation of tsunamis, *Ocean Engineering*, Vol. 34, pp. 1,769-1,777.

Imamura, F. and Goto, C. (1998) Truncation error in numerical tsunami simulation by finite difference method. *Coastal Engineering in Japan*, Vol. 31, pp. 245-263.

Kajiura, K. and Shuto, N. (1990) Tsunami, *The Sea*, Edited by B. Le Mchaut and D.M. Hanes, Vol. 9, Part B, John Wiley & Sons, Inc., pp. 395-420.

KEDO (1999) *Estimation of Tsunami Height for KEDO LWR project*, Korea Power Engineering Company, Inc..

Kocyyigit, M.B., Falconer, R.A. and Lin, B. (2002) Three-dimensional numerical modelling of free surface flows with non-hydrostatic pressure. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 40, No. 9, pp. 1145-1162.

Lee, J.W. and Cho, Y.-S., (2001) Development of TVD Numerical Models: II. Shallow-Water Equations. *Journal of The Korea Water Resources Association*, Vol. 34, No. 2, pp. 187-195.

Lee, J.W. and Cho, Y.-S., (2013) Run-up Heights of Solitary with a Hydrodynamic Pressure Model. *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 13, No. 1, pp. 347-352.

Liu, P.L.-F., Cho, Y.-S., Briggs, M.J., Kanoglu, U. and Synolakis, C. E. (1995) Run-up of solitary waves on a circular island. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 302, pp. 259-285.

Liu, P.L.-F., Cho, Y.-S., Yoon, S.-B. and Seo, S.-N. (1994) *Numerical simulations of the 1960 Chilean tsunami propagation and inundation at Hilo, Hawaii*, Recent Development in Tsunami Research, Edited by M.I. El-Sabh, Kluwer Academic Publishers.

Mansinha, L. and Smylie, D.E. (1971) The displacement fields of inclined faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 61, No. 5, pp. 1433-1440.

Sohn, D.-H., Ha, T.-M. and Cho, Y.-S. (2009). Distant tsunami simulation with corrected dispersion effects, *Coastal Engineering Journal*, Vol. 51, No. 2, pp. 123-141.

© Received March 9, 2013

© Revised April 1, 2013

© Accepted May 22, 2013