

동해 전파특성을 고려한 지진해일 모의

Numerical Simulation of Tsunamis Considering the Characteristics of Propagation in the East Sea

손대희* · 최문규* · 손일수** · 조용식***

Sohn, Dae-Hee* · Choi, Moon-Kyu · Sohn, Il-Soo · Cho, Yong-Sik**

Abstract

In this study, the numerical model for simulation of tsunamis is constructed by using the dispersion-correction scheme, 2nd upwind scheme, dynamic linking method, and so forth. The composed numerical model is used to simulate a historical tsunami event. The target tsunami event is the 1983 Central East Sea Tsunami. And, the predicted run-up heights of the tsunami at Imwon port are very reasonable compared to available observed data.

key words : Tsunami, Dispersion-correction scheme, Run-up heights

1. 서 론

우리나라에 피해를 입히는 지진해일들은 대부분 일본 근해에서 발생하여 약 2시간에 걸쳐 우리나라 동해안에 전파하여 오며, 대표적인 과거 지진해일로는 1983년 동해 중부 지진해일과 1993년의 북해도 남서 외해 지진해일이 있다. 우리나라의 입장에서 보면 이 과거 지진해일들은 원해 지진해일로 구분되어져지며, 그로 인해 지진해일의 전파과정이 정확히 예측되어야 한다.

동해는 중심부에 대화퇴가 위치하고 있어 지진해일이 전파하는 과정에서 굴절 현상이 크게 발생하며, 상대적으로 큰 대양에 비해 수심의 변화가 크게 나타나는 특성을 갖는다. 이호준 등 (1999)은 대화퇴를 제거한 가상의 지형과 실제 지형에서 동일한 조건으로 지진해일 모의를 수행 비교하여 대화퇴에 의한 굴절 현상을 확인하였으며, 지진해일 발생 위치에 따른 에너지 전파 특성의 변화를 또한 검토하였다.

지진해일이 먼 거리를 전파할 때 분산효과와 Coriolis 효과가 중요한 역할을 한다(Kajiura와 Shuto, 1990). 지진해일은 진원지로부터 대양을 가로질러 이동할 수 있기 때문에 지구의 곡률을 고려한 구좌표계를 사용해야 하지만 지진해일의 진행거리가 상대적으로 짧을 경우에는 직교좌표계를 이용할 수 있다(Liu 등, 1994). 동해의 지진해일은 수십 km의 짧은 파장을 가지나 파장에 비해서 먼 거리를 전파하기 때문에 수치모의를 위해서는 분산효과를 고려할 수 있는 수치모형을 이용하여야 한다.

지진해일이 해안에 접근함에 따라 천수효과에 의해 파장은 감소하나 파고는 급격히 증가하게 되어 비선형항의 중요성이 증가된다. 또한, 해안에 접근함에 따라 수심이 감소하게 되어 바닥마찰효과가 중요하게 된다. 따라서 해안 지역에서 지진해일을 정확히 모의하기 위해서는 비선형성과 바닥마찰 효과가 고려되어야 하며, 이동경계조건이 모형에 적용되어야 한다.

본 연구에서는 실용적으로 분산효과를 고려할 수 있는 기법, 그리고 2차 정확도의 upwind 기법 등을 적용하여 수치모형을 구축하였다. 그리고 구축한 모형을 이용하여 과거의 지진해일을 대상으로 수치모의를 수행하여 결과를 검토하였다.

* 정회원·한양대학교 토목공학과·석사과정

** (주)건일엔지니어링

*** 교신저자·정회원·한양대학교 토목공학과·교수 · E-mail: ysc59@hanyang.ac.kr

2. 수치모형의 구축

2.1 전파모형

본 연구에서는 동해를 전파하는 지진해일을 모의하기 위하여 분산효과를 보다 정확히 다루기 위하여 다음과 같은 분산보정기법을 적용한다. 이 기법은 Boussinesq 방정식의 분산항을 제외한 선형 천수방정식을 지배방정식으로 하면서 수치분산을 이용하여 Boussinesq 방정식의 분산효과를 나타낼 수 있도록 하는 특성을 갖는다. 분산항을 생략한 다음과 같은 선형 천수방정식은 다음과 같다.

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

$$\frac{\partial P}{\partial t} + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

여기서, ζ 는 자유수면변위, P 와 Q 는 각각 $P=uh$ 및 $Q=vh$ 로 정의되는 x 와 y 축 방향의 체적흐름율(volume flux), h 는 정수면상의 수심이다.

Immamura와 Goto(1988)와 Cho와 Yoon(1998) 등은 staggered 격자계를 이용한 leap-frog 유한차분기법을 적용하여 분산효과를 고려할 수 있는 기법을 제안하였다. 그러나 수심이 변하는 지역에서는 기존의 기법들은 실용성이 떨어졌으며, 안정성에서 문제가 발생하기도 하였다. 본 연구에서 적용한 기법은 기존의 기법에 분산보정항을 추가하여 실용성을 향상시킨 기법으로 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\zeta_{i,j}^{n+1/2} - \zeta_{i,j}^{n-1/2}}{\Delta t} + \frac{P_{i+1/2,j}^n - P_{i-1/2,j}^n}{\Delta x} + \frac{Q_{i,j+1/2}^n - Q_{i,j-1/2}^n}{\Delta y} = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{P_{i+1/2,j}^{n+1} - P_{i+1/2,j}^n}{\Delta t} + gh_{i+1/2,j} \frac{\zeta_{i+1,j}^{n+1/2} - \zeta_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta x} \\ & + \frac{\alpha g}{12\Delta x} h_{i+1/2,j} [\zeta_{i+2,j}^{n+1/2} - 3\zeta_{i+1,j}^{n+1/2} + 3\zeta_{i,j}^{n+1/2} - \zeta_{i-1,j}^{n+1/2}] \\ & + \frac{\gamma g}{12\Delta x} h_{i+1/2,j} [(\zeta_{i+1,j+1}^{n+1/2} - 2\zeta_{i+1,j}^{n+1/2} + \zeta_{i+1,j-1}^{n+1/2}) - (\zeta_{i,j+1}^{n+1/2} - 2\zeta_{i,j}^{n+1/2} + \zeta_{i,j-1}^{n+1/2})] = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{Q_{i,j+1/2}^{n+1} - Q_{i,j+1/2}^n}{\Delta t} + gh_{i,j+1/2} \frac{\zeta_{i,j+1}^{n+1/2} - \zeta_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta y} \\ & + \frac{\alpha g}{12\Delta y} h_{i,j+1/2} [\zeta_{i,j+2}^{n+1/2} - 3\zeta_{i,j+1}^{n+1/2} + 3\zeta_{i,j}^{n+1/2} - \zeta_{i,j-1}^{n+1/2}] \\ & + \frac{\gamma g}{12\Delta y} h_{i,j+1/2} [(\zeta_{i+1,j+1}^{n+1/2} - 2\zeta_{i,j+1}^{n+1/2} + \zeta_{i-1,j+1}^{n+1/2}) - (\zeta_{i+1,j}^{n+1/2} - 2\zeta_{i,j}^{n+1/2} + \zeta_{i-1,j}^{n+1/2})] = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

식 (4)-(6)의 수치분산항을 이용하여 선형 Boussinesq 방정식의 분산항을 나타내기 위해서는 다음과 같은 분산보정계수 α 와 γ 에 대한 관계식을 만족해야 한다.

$$\alpha = \frac{[4h^2 + gh(\Delta t)^2] - (\Delta x)^2}{(\Delta x)^2} \quad (7)$$

$$\gamma = \alpha + 1 \quad (8)$$

2.2 범람모형

일반적으로 지진해일이 해안선 근처에 도달하면 천수효과에 의해 파장은 감소하나 파고는 급격히 증가하게 되어 비선형항의 중요성이 증가한다. 아울러, 해안선 근처에서는 수심이 급격히 감소하기 때문에 바닥마찰의 영향이 증가하여 이를 적절히 고려할 수 있어야 한다. 일반적으로 바닥마찰항을 포함한 비선형 천수방정식이 비선형항과 바닥마찰항을 포함하고 있어 해안선 부근에서의 지진해일의 모의에 적합하다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{H} \right) + gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gn^2}{H^{7/3}} P(P^2 + Q^2)^{1/2} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{H} \right) + gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gn^2}{H^{7/3}} Q(P^2 + Q^2)^{1/2} = 0 \quad (11)$$

식 (9)-(11)에서 $H (= h + \zeta)$ 는 전체수심, n 은 Manning 공식의 조도계수이다.

본 연구에서는 비선형 천수방정식의 선형항에 대해서는 전파모형과 동일한 staggered 격자계를 이용한 leap-frog기법을 적용하여 해석한다. 그리고 운동량 방정식 (10)와 (11)의 비선형항에 대하여 2차 정확도의 upwind 기법(Shyy, 1985)을 이용하여 차분화해 정확도를 향상시킨다. Shyy (1985)에 의해 제안된 2차 정확도의 upwind 기법은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(u\phi)}{\partial x_{i,j}} &= \frac{1}{2\Delta x} [3(u\phi)_{i,j} - 4(u\phi)_{i-1,j} + (u\phi)_{i-2,j}] (u \geq 0) \\ &= \frac{1}{2\Delta x} [-3(u\phi)_{i,j} + 4(u\phi)_{i+1,j} - (u\phi)_{i+2,j}] (u < 0) \end{aligned} \quad (12)$$

지진해일이 해안선에 도달하면 연속하여 초오르내림을 반복하므로 이를 정확하게 추적하기 위해 해안선을 따라 이동경계 조건을 적용하여야 한다. 본 연구에서는 기존의 연구(조용식과 윤태훈, 1996)에서 검증된 이동경계조건을 이용한다.

3. 수치모의

실제 동해 전역의 크기는 대략 위도방향, 경도방향으로 각각 1,200km 정도로 지진해일 거동해석을 위해 10m 간격으로 세분화할 경우 격자수가 120,001×120,001에 육박하게 된다. 따라서, 계산시간의 증가와 계산시간 간격의 세분화에 따른 누적오차의 증대 등의 문제점이 발생하게 된다. 즉, 실용적인 지진해일의 모의를 위해서는 수심이 큰 지역과 해안 지역을 구분하여 격자간격을 다르게 구성할 필요가 있으며, 유한차분기법의 특성상 이러한 점을 만족시키기 위해 다중격자연결기법을 이용하는 것이 적절하다. 다중격자연결기법은 격자크기가 다르게 구성된 몇 개의 영역들 각각에 대해서 합당한 수치모의를 수행하고, 각 영역 사이의 경계조건을 동적으로 일치하게 하여 결과의 신뢰성을 확보하는 방법을 말한다. 본 연구에서는 격자 크기의 비가 1:3이 되도록 영역들을 구성하였으며, 다중격자연결기법을 적용하여 영역들의 연결과 수치모의의 효율성을 확보하였다. 물론, 수치모의시 각 영역 별로 앞서 구축한 전파모형과 범람모형을 나누어 적용하여 신뢰성을 갖게 하였다. 표 1은 각 영역들의 수치모의 정보를 나타낸 것이다.

표 1. 각 영역의 계산 정보

영역	공간격자크기(m)	격자수	계산시간간격(sec)	적용된 수치모형
A	1110	1273×1273	3.6	전파모형
B	370	916×970	1.2	전파모형
C	123.3	580×955	0.6	전파모형
D	41.1	562×490	0.6	전파모형
E	13.7	169×235	0.3	범람모형
F	4.5	217×268	0.1	범람모형

본 연구에서는 과거 우리나라에 큰 피해를 야기하였던 1983년 동해 중부 지진해일을 대상으로 수치모의를 수행하였고, 당시 이 지진해일로 인해 막대한 피해를 입었던 임원항을 대상으로 결과를 검토하였다.

그림 1과 2는 각각 1983년 지진해일을 모의하여 임원지역에서 나타난 최대 처오름높이와 최저 처내림높이의 분포를 나타낸 것이다. 국립방재연구소 (2000)에 따르면 1983년 지진해일에 의해 임원 지역에서 약 3~4m의 처오름높이가 관측되었다고 한다. 그림 1의 최대 처오름높이 결과는 관측자료와 비교하였을 때, 임원천 주위로 처오름이 약간 크게 나타나고 있기는 하지만 전체적으로 유사한 결과를 나타내고 있다고 판단된다. 그리고 그림 1의 방파제 안쪽 부분 가까이에서 사각형으로 표시한 두 개의 지점에서는 과거의 관측 자료가 존재하는데, 본 모의 결과와 40cm 이내의 오차로 일치함이 확인된다. 또한, 그림 2의 최저 처내림높이 분포 역시 -3m 정도가 최저로 신뢰할만한 결과가 얻어졌다고 생각된다.

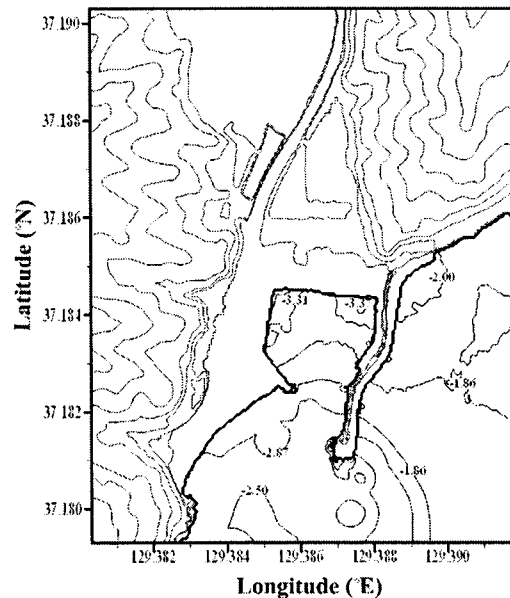
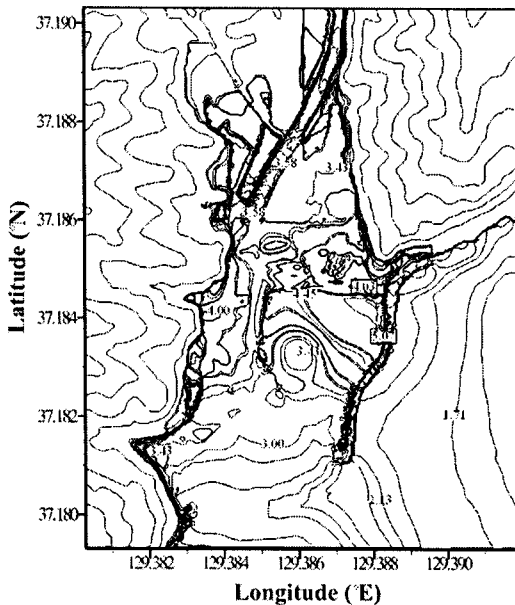


그림 1. 임원지역의 최대 처오름높이 분포 그림 2. 임원 지역의 최저 처내림높이 분포

4. 결 론

본 연구에서는 정확하고 실용적인 지진해일 수치모의를 위해 다중격자연결기법을 기반으로 전파모형과 범람모형을 나누어 구성하였다. 이때, 전파모형에서는 과거 수치모형에 비해 분산효과를 정도 높게 고려하기 위해 분산보정기법을 적용하였고, 범람모형에서는 비선형과 마다마찰 효과를 고려하고 정확한 범람결과를 얻기 위해 5m 이하의 세격자와 2차 정확도의 upwind 기법 등을 이용하였다. 대상 영역과 지진해일 사건은 각각 동해의 임원항 지역과 1983년 동해 중부 지진해일이었다. 임원항 지역에서 최대 처오름높이와 최저 처내림높이의 분포를 구하여 기존의 관측치와 결과를 비교하였으며, 그 결과 비교적 만족할만한 결과가 얻어졌음이 확인되었다.

감사의 글

본 연구는 (주)전일엔지니어링에 재정적 지원을 받았습니다.

참고문헌

- 국립방재연구소, 2000. 동해안에서의 지진해일 재해저감을 위한 연구 (II).
- 이호준, Imamura, F., Shuto, N., 1999. 동해에서의 쓰나미 거동특성, 대한토목학회논문집, 19(2-3), 401-409.
- 조용식, 윤태훈, 1996. 경사지형에서의 이동경계조건, 대한토목학회논문집, 제16권, 제1B호, pp. 73-81.
- Cho, Y.-S. and Yoon, S.-B. (1998). "A modified leap-frog scheme for linear shallow-water equations." Coastal Engineering Journal, Vol. 40, No. 2, pp. 191-205.
- Imamura, F. and Goto, C. (1988). "Truncation error in numerical tsunami simulation by the finite difference method." Coastal Engineering in Japan, Vol. 31, pp. 245-263.
- Kajiura, K. and Shuto, N. (1990). "Tsunami." in The SEA, edited by B. Le Mehaute, and D.M. Hanes, John Wiley & Sons, Inc, Vol. 9, Part B, pp. 395-420.
- Liu, P.L.-F., Cho, Y.-S., Yoon, S.-B. and Seo, S.-N. (1994). "Numerical simulation of the 1960 Chilean tsunami propagation and inundation at Hilo, Hawaii." in Recent Development in Tsunami Research, edited by M.I. ElSabh, Kluwer Academic Publishers.