1993년 북해도 남서 외해 지진해일 처오름 해석

Analysis Run-up of 1993 Hokkaido Nansei Oki Tsunami

김재홍*, 손대희, 조용식*****

Jae-Hong Kim, Dea-Hee Son, Yong-Sik Cho

Abstract

A second-order accuracy upwind scheme is used to investigate the run-up heights of tsunamis in the East Sea and the predicted results are compared with field observed data and results of a first-order accuracy upwind scheme. In the numerical model, the governing equations solved by the finite difference scheme are the linear shallow-water equations in deep water and nonlinear shallow-water equations in shallow water. The target events is 1993 Hokkaido Nansei Oki Tsunami. The predicted results represent reasonably the run-up heights of tsunamis in the East Sea. And, The results of simulation is used to design inundation map.

keywords : tsunami, nonlinear shallow-water equations, second-order accuracy upwind scheme, run-up height

1. 서 론

대부분의 지진해일은 해저지진에 의해 발생된다. 지진 진원지의 해저 운동은 순간적으로 수면변위를 일으키며, 급격히 증가된 위치에너지는 중력에 의해 운동에너지로 변환되어 파랑의 형태로 전파되는데 이를 지진해일이라 한다. 지진해일의 선단파는 대략 수십-수백km의 파장을 가지고, 파고는 2-4 m에 불과해 대부분의 지진해일은 장파(long wave)로 간주된다. 또한, 심해에서는 수심에 비해 파고가 매우 작기 때문에 선형천수이론(linear shallow-water theory)을 적용할 수 있다. 반면에, 수심이 얕은 해안지역에서는 바닥마찰을 고려한 비선형천수이론(nonlinear shallow-water theory)을 적용하는 것이 바람직하다.

지진해일은 세계 각국에서 관측되고 있으며, 특히 일본과 미국에서 많이 관측되고 있다. 1960년의 칠레 지진해일은 약 15시간 동안 태평양을 전파하여 하와이 섬을 강타하였다. 진원지 부근의 칠레 해안(최소 1,000명 사망, 총 재산피해 약 41,700만 달러) 뿐만 아니라 하와이의 Hilo항(사망 61명, 재산피해 약 2,350만 달러)에서도 막대한 피해가 발생하였으며, 일본 해안까지 피해를 일으켰다. 더욱이, 2004년 12월에 인도네시아 근해에서 발생한 수마트라 지진해일은 약 280,000여명의 인명피해와 막대한 재산피해를 입혔다(중앙일보, 2004년 1월 26일). 우리나라는 일본 근해 동해에서 발생한 1983년의 동해 중부 지진해일과 1993년의 북해도 남서 외해 지진해일에 의해 인명 및 재산 피해를 입었다.

최근에는 2004년 5월 울진 근해에서 리히터 규모 5.2의 해저지진이 발생하는 등 근해 지진해일의 해석이 중요시되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 근해 지진해일에 대한 해석의 정확성을 높이기 위해 인태훈 등(2003)이 제안한 2차 정확도 풍상차분기법을 이용하여 비선형 천수방정식의 비선형항을 해석한다. 수치모형을 이용하여 1993년 북해도 남서 외해 지진해일에 의한 임원에서의 처오름높이를 계산한다.

* 정회원·한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정·E-mail : sabjil98@ihanyang.ac.kr

** 정회원·한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정·E-mail : isnut@hanmail.net

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

2. 지배방정식과 경계조건

지진해일이 태평양과 같은 상대적으로 수심이 깊은 바다를 횡단하여 먼 거리를 전파하는 경우에는 분산효과를 고려하기 위하여 선형 Boussinesq 방정식을 이용하여 수치모형을 구성한다(Liu 등, 1994). 그러나, 본 연구에서는 선형 천수방정식을 이용하여 수치기법에 의하여 발생하는 수치분산을 물리적인 분산효과와 같게 설정하여 해석하였다(조용식, 1996). 또한, 지진해일이 태평양과 같은 대양을 횡단할 경우에는 구면좌표계를 사용해야하나, 동해와 같이 상대적으로 작은 지역을 전파하는 경우에는 다음과 같은 직교좌표계에서의 선형 천수방정식을 사용할 수 있다.

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

$$\frac{\partial P}{\partial t} + gh\frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gh\frac{\partial \zeta}{\partial y} = 0 \tag{3}$$

식 (1)-(3)에서 ζ는 자유수면변위, P와 Q는 각각 x와 y방향의 체적흐름율(volume flux)을 나타낸다. 여기서, $P=u(h+\zeta)$, $Q=v(h+\zeta)$이며, h는 정수면에서의 수심이다. 식 (1)-(3)의 유한차분식에 관한 상세한 설명은 Cho와 Yoon(1998)을 참조할 수 있다.

지진해일이 해안지역으로 접근하면 파장은 짧아지고 파고가 증가할 뿐만 아니라, Coriolis효과와 분산의 중요성은 감소하는 반면에 비선형성이 중요해지므로 비선형 천수방정식을 지배방정식으로 사용한다. 더욱이, 해안선 부근에서는 바닥마찰효과가 중요하기 때문에 바닥마찰항을 포함하는 것이 바람직하다(Liu 등, 1994). 아울러, 해안선의 움직임을 정확히 추적하기 위한 이동경계조건을 해안선을 따라 설정해야 한다.

바닥마찰효과를 포함하는 비선형 천수방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{P^2}{H}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{PQ}{H}\right) + gH\frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gn^2}{H^{7/3}}P(P^2+Q^2)^{1/2} = 0 \tag{5}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{PQ}{H}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{Q^2}{H}\right) + gH\frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gn^2}{H^{7/3}}Q(P^2+Q^2)^{1/2} = 0 \tag{6}$$

식 (4)-(6)에서 $H(=h+\zeta)$는 전체수심, n은 Manning 조도계수이다.

기존 대부분의 연구에서는 지진해일을 해석함에 있어 비선형 천수방정식의 이송항을 1차 정확도 풍상차분기법으로 계산하였다. 그러나, 본 연구에서는 비선형항의 정확도를 높이기 위해 운동량 방정식 (5)와 (6)의 비선형 이송항을 2차 정확도의 풍상차분기법(Shyy, 1985; 인태훈 등, 2003)으로 차분하며, 식 (4)-(6)의 나머지 항은 leap-frog기법을 이용하여 해석하였다(Liu 등, 1994).

본 연구에서는 동해에서의 지진해일에 대한 거동을 해석하기 위하여 다중격자 연결모형을 사용하였다. 이는 크기가 위도방향, 경도방향으로 각각 1,200 km인 동해 전역의 지진해일 거동해석을 위해 10 m 간격으로 세분화할 경우 격자수가 120,001×120,001이 되므로 기존의 컴퓨터 능력으로 볼 때 계산시간 간격의 세분화에 의하여 계산시간이 길어질 뿐만 아니라, 누적오차가 상대적으로 커지는 결과를 초래할 가능성이 있기 때문이다.

3. 수치해석

인태훈 등(2003)은 2차 정확도 풍상차분기법을 Thacker(1981)가 사용한 포물형 수조에서의 유체의 주기적인 거동 모의에 적용하였는데 이는 구배가 아주 완만하여 동해 연안에서의 급경사 지형과는 많이 틀린다. 따

라서, 본 연구에서는 2차 정확도의 풍상차분기법이 실제지형에서도 적용이 가능한지 평가해 보았다. 본 연구의 대상 지진해일은 1993년 북해도 남서 외해 지진해일이며, 대상영역은 $\triangle x$=123.3m을 사용하여 모의하였다. 또한, $\triangle x$=4.5m의 세부격자를 이용하여 임원 부근의 지형을 타나냈다. 모의 결과는 현장 관측값과 국립방재연구소(1999)에서 1차 풍상차분기법으로 모의한 결과와 비교하였다.

또한, 선형모형의 결과는 Green 법칙(Mei, 1989)에 의해 계산된 파고와 비교하였다. Green 법칙은 선형이론에 근거한 식으로 다음과 같이 표현된다.

$$A=A_0\left(\frac{h_0}{h}\right)^{1/4}$$

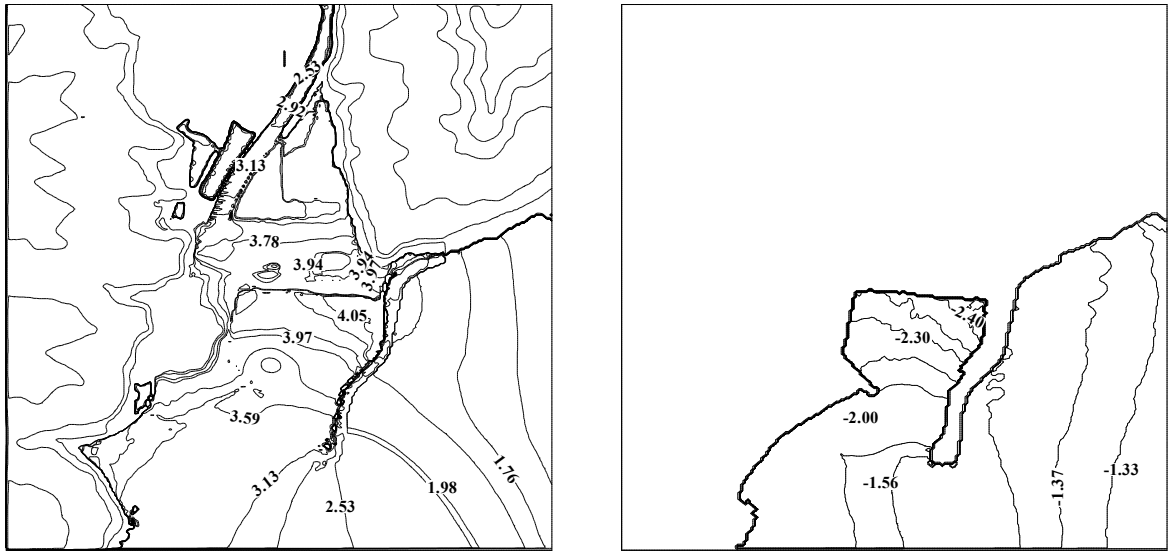
여기서, h_0와 A_0는 임의 지점의 수심과 파고를 나타내며, h와 A는 처오름높이를 산정하고자 하는 지점의 수심과 파고를 나타낸다. 본 연구에서 사용한 관측값과 1차 풍상차분기법에 의한 결과는 국립방재연구소(1999)를 참고하였다.

표 3은 1993년 지진해일에 대하여 $\triangle x$=123.3m 간격으로 모의한 후 묵호, 삼척, 장호, 임원 및 부구의 처오름높이 결과를 관측값, 1차 풍상차분기법 및 Green 법칙과 비교하였다. 2차 풍상차분기법의 결과가 1차 풍상차분 기법이나 Green 법칙보다 더 정확한 것을 알 수 있다.

표 1. 지진해일의 처오름높이($\triangle x$=123.3m, 단위: m)

구 분	묵호	삼척	장호	임원	부구
관 측 값	1.3	1.1	1.3	2.6	2.8
1차 풍상차분기법	1.0	0.9	1.9	2.1	2.5
2차 풍상차분기법	1.2	0.9	1.4	2.8	2.7
Green 법칙	2.0	2.0	2.2	2.5	2.2

1993년 지진해일에 대하여 $\triangle x$=4.5m 간격의 세부격자로 모의하였다. 모의 결과 항내의 최대 파고는 4.05 m로 나타났으며, 최대 처오름높이는 4.0 m로 나타나고 있다. 이는 육지에서 구조물의 영향을 고려하지 않았기 때문에 모의 결과가 다소 과대평가되었을 것으로 생각된다. 그리고, 임원천을 따라서도 지진해일의 영향이 미침을 알 수 있다. 지진해일의 전파 양상은 북으로부터 전파되어 동측 방파제를 남으로 돌아 다시 북으로 유입되는 양상을 보인다. 또한, 임원에서의 최저 처내림높이는 -2.40 m로 나타나고 있다. 이는 1993년의 지진해일에 의한 해수유동이 작았을 것임을 알 수 있다.



(a) 최고 파고분포 (b) 최저 파고분포

그림 1. 임원에서의 파고분포($\triangle x$=4.5m, 단위: m)

표 4는 임원 지역($\triangle x$=4.5m)에 대하여 1993년 지진해일의 처오름높이를 관측값과 1차 풍상차분기법과 비교하였다. 2차 풍상차분기법이 더 정확한 것을 알 수 있다.

표 2. 임원에서의 처오름높이 비교($\triangle x$=4.5m, 단위: m)

구 분	관측값	1차 풍상차분기법	2차 풍상차분기법
1993년 지진해일	2.6	4.2	4.0

1993년 지진해일에서 대하여 조도계수를 변화시키면서 민감도를 분석하였다. 표 5는 조도계수 변화에 따른 처오름높이를 나타내고 있다. 조도계수를 0.05까지 증가시킬 때는 처오름높이의 변화가 없었지만 그 이후로는 선형적으로 감소하는 것을 알 수 있다.

표 3. 1993년 동해 중부 지진해일($\triangle x$=4.5m)

n (조도 계수)	처오름높이(단위: m)	n의 증가에 따른 증가량(%)
관측값	2.6	-
0.025	**4.0**	**0**
0.04	4.0	0
0.05	4.0	0
0.06	3.9	2.5
0.07	3.8	2.6

4. 결 론

본 연구에서는 근해 지진해일의 수치모의를 위하여 비선형 천수방정식을 지배방정식으로 사용하였다. 기존의 연구와는 달리 실제 지형에 비선형 천수방정식을 적용함에 있어서 운동량방정식 중 비선형 이송항을 2차 정확도의 풍상차분기법으로 계산하였다. 수치모의 결과는 현장 관측값과 1차 정확도의 풍상차분기법의 계산결과와 비교하였다. 대상영역은 동해안으로 하였으며 임원에 대하여는 $\triangle x$=4.5m 간격의 세부격자를 이용하였다. 대상 지진해일은 1993년 지진해일을 사용하였다.

동해안을 $\triangle x$=123.3m 간격의 격자를 이용하여 수치모의 한 결과 1993년 지진해일은 임원 부근에서 가장 큰 처오름높이를 나타내고 있다. 이는 현장 관측값과 비교하였을 때 비슷한 양상을 보이고 있음을 알 수 있다. 그리고, 선형 모형임에도 불구하고 처오름높이 산정이 비교적 정확히 이루어지고 있음을 알 수 있었다. $\triangle x$=4.5m 간격의 세부격자에서도 비록 실제 구조물의 영향은 고려되지 않았지만, 처오름높이 산정이 잘 되고 있음을 알 수 있었다.

또한, 조도계수 n에 따른 처오름높이의 변화를 살펴본 결과 조도계수를 0.05까지 증가시킬 때는 처오름높이의 변화가 없지만 이후 처오름높이가 선형적으로 작아짐을 알 수 있었다.

수치모의한 결과는 1차 정확도의 풍상차분기법의 수치모의 결과보다 더 정확하게 나타남을 알 수 있다. 따라서, 지진해일의 범람을 산정함에 있어 2차 정확도의 풍상차분기법을 사용함으로써 좀 더 정확한 지진해일 범람도를 작성할 수 있을 것으로 생각된다.

감 사 의 글

본 연구는 (주) 한국수력원자력의 울진 원전 지진해일 전산해석 사업의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 국립방재연구소 (1999). 동해안에서의 지진해일 재해저감을 위한 연구(Ⅰ). 연구보고서, NIDP-1999-07, 국립방재연구소.
2. 국립방재연구소 (2000). 동해안에서의 지진해일 재해저감을 위한 연구(Ⅱ). 연구보고서, NIDP-2000-03, 국립방재연구소.
3. 인태훈, 이봉희, 조대희, 조용식 (2003). "범람 모의를 위한 이동경계조건." 한국수자원학회논문집, 제36권, 제6호, pp. 937-947.
4. 조용식 (1996). "대양을 횡단하는 지진해일의 수치모의." 대한토목학회논문집, 제16권, 제3B호, pp. 303-310.
5. 중앙일보 (2004). "남아시아 쓰나미 사망자 28만명 넘어." 1월 26일. 제40판, p. 18.
6. Cho, Yong-Sik 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.
7. Imamura, F. and Goto, C. (1988). "Truncation error in tsunami simulation by the finite difference method." *Coastal Engineering in Japan*, Vol. 31, pp. 245-263.
8. Liu, P.L.-F., Cho, Y.-S., Yoon, S.B. and Seo, S.N. (1994). "Numerical Simulations of Tsunamis Propagation and Inundation with Application topat Hilo, Hawaii." *Recent Development in Tsunami Research*, Edited by M.I. El-Sabh, *Kluwer* Academic Publishers.
9. Mei, C. C. (1989). *The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves*. World Scientific Publishing Co, pp. 740.
10. Shyy, W. (1985). "A study of finite difference approximations to steady-state, convection-dominated flow problems." *Journal of Computaional Physics*, Vol. 87, pp. 415-438.
11. Thacker, W.C. (1981). "Some exact solutions to the nonlinear shallow water wave eqution." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 107, pp. 499-508.