

동해의 지진해일 치오름 모의

Simulation of Run-up of Tsunamis in the East Sea

김재홍* / 조용식**
Kim, Jae-Hong / Cho, Yong-Sik

Abstract

A second-order upwind scheme is used to investigate the run-up heights of tsunamis in the East Sea and the predicted results are compared with the field data and results of a first-order 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 are 1983 Central East Sea Tsunami and 1993 Hokkaido Nansei Oki Tsunami. The predicted results represent reasonably well the run-up heights of tsunamis in the East Sea. And, the results of simulation are used for the design of inundation map.

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

요 지

본 연구에서는 지진해일에 의하여 동해안에 발생하는 치오름을 모의하기 위하여 2차 정확도의 풍상차분기법을 사용하였으며, 그 결과는 현장관측값과 1차 정확도의 풍상차분기법의 산정 결과와 비교하였다. 수치해석 모형에서는 지배방정식으로 원해에서는 선형 천수 방정식, 근해에서는 비선형 천수방정식을 사용하였다. 대상 지진해일은 1983년 지진해일과 1993년 지진해일이다. 수치해석 결과 동해안의 치오름높이를 잘 재현하는 것으로 확인되었다. 또한, 지진해일 치오름 모의 결과를 범람도 작성에 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 지진해일, 비선형 천수방정식, 2차 풍상차분기법, 치오름높이

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-수백 km의 파장을 가지고, 파고는 2-4 m에

불과해 대부분의 지진해일은 장파(long wave)로 간주되며, \sqrt{gh} 의 속도로 전파된다. 또한, 심해에서는 수심에 비해 파고가 매우 작기 때문에 선형이론(linear theory)을 적용할 수 있다. 반면에, 지진해일이 수심이 얇은 해안지역에 도달하면 지진해일의 파고는 증가하고 파장은 감소하므로 바닥마찰을 고려한 비선형이론(nonlinear theory)을 적용하는 것이 바람직하다.

* 한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정
Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea.
(e-mail: sabjil98@ihanyang.ac.kr)

** 교신저자, 한양대학교 공과대학 토목공학과 부교수
Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University
(e-mail: ysc59@hanyang.ac.kr)

지진해일은 세계 각국에서 관측되고 있으며, 특히 일본과 미국에서 많이 관측되고 있다. 미국에서 발생한 지진해일 중 1946년의 Alutian 지진해일, 1960년의 칠레 지진해일, 그리고 1964년의 알래스카 지진해일이 미국 역사상 가장 파괴적인 지진해일로 기록되었다(Lander와 Lockridge, 1989). 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 서아시아 지진해일은 약 280,000여명의 인명피해와 막대한 재산피해를 입혔다(중앙일보, 2004년 1월 26일). 우리나라 근해에서도 일본 근해 동해에서 발생한 1983년의 동해 중부 지진해일과 1993년의 북해도 남서 외해 지진해일에 의해 상당한 재산 피해를 입었으며 인명 손실이 발생하였다. 1983년의 동해 중부 지진해일은 리히터 규모 7.7의 해저지진으로 인해 일본 서해안 추진, 심포 부근 해저에서 발생하였다. 지진해일에 의하여 일본에서는 100명의 사망자가 발생하였고 막대한 재산피해를 입었다. 우리나라 동해안에서도 지진해일의 내습으로 인하여 3명의 사망자가 발생하였으며, 약 4억원의 재산피해를 입었다. 기상청에 따르면 우리나라 근해에서는 최근 해저지진이 자주 발생하고 있으며 그 회수도 매년 증가하고 있다(2000년 10회, 2001년 16회, 2002년 21회, 2003년 21회, 2004년 24회).

수치모형을 이용한 지진해일에 관한 연구는 지진해일의 피해를 많이 입었던 미국과 일본에서 활발히 진행되고 있으며, 우리나라와 러시아에서의 연구도 상당한 수준에 이르렀다. 국내에서는 조용식과 Liu (1995)가 고화질의 그래픽 컴퓨터와 영상장치를 이용한 지진해일의 전파와 처오름 과정의 3차원 영상화에 관하여 연구하였다. 또한, 이호준 등(1999)이 동해안에 도달하는 지진해일의 전파에 있어서 굴절 계산의 중요성에 착안한 격자간격의 선정기준을 제시하였다. 1983년 동해 중부 지진해일이 동해안에 내습했을 때, 최대 피해지역으로 보고된 임원항에서의 지진해일에 관한 연구가 수행되었다(국립방재연구소, 1999; 2000).

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 해석하였다. 수치모

형을 이용하여 1983년 동해중부 지진해일과 1993년 북해도 남서 외해 지진해일에 의한 임원에서의 처오름높이를 계산하였다.

2. 지배방정식과 경계조건

지진해일이 태평양과 같이 상대적으로 수심이 깊은 바다를 횡단하여 먼 거리를 전파하는 경우에는 분산효과를 고려하기 위하여 선형 Boussinesq 방정식을 이용하여 수치모형을 구성한다(Imamura와 Goto, 1988; Liu 등, 1994). 그러나, 본 연구에서는 선형 천수방정식을 이용하여 수치기법에 의하여 발생하는 수치분산을 물리적인 분산효과와 동일하게 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.

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

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

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

식 (1)-(3)에서 ζ 는 자유수면변위, P 와 Q 는 각각 x 와 y 방향의 체적흐름율(volume flux)을 나타낸다. 여기서, $P = u(h + \zeta)$, $Q = v(h + \zeta)$ 이며, h 는 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(Kajiura와 Shuto, 1990; Liu 등, 1994). 아울러, 해안선의 움직임을 정확히 추적하기 위한 이동경계조건을 해안선을 따라 설정해야 한다.

바닥마찰효과를 포함하는 비선형 천수방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{H} \right) \quad (5)$$

$$+ gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gn^2}{H^{7/3}} P(P^2 + Q^2)^{1/2} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{H} \right) \quad (6)$$

$$+ gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gn^2}{H^{7/3}} Q(P^2 + Q^2)^{1/2} = 0$$

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

기존 대부분의 연구에서는 지진해일을 해석함에 있어 비선형 천수방정식의 이송항을 1차 정확도 풍상차분 기법으로 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). 아울러, 유한차분기법에서 공간과 시간에 대하여 모두

엇갈림격자를 사용한다.

Shyy (1985)에 의한 2차 정확도의 풍상차분기법은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(u\phi)}{\partial x_{i,j}} = \frac{1}{2\Delta x} [3(u\phi)_{i,j} - 4(u\phi)_{i-1,j} + (u\phi)_{i-2,j}]$$

$$(u \geq 0)$$

$$= \frac{1}{2\Delta x} [-3(u\phi)_{i,j} + 4(u\phi)_{i+1,j} - (u\phi)_{i+2,j}]$$

$$(u < 0)$$

식 (5)와 (6)의 비선형항을 차분화하면 다음과 같다. 식 (7)-(10)에 의한 차분화 과정에서 발생하는 오차는 모두 $O((\Delta x)^2)$ 또는 $O((\Delta y)^2)$ 으로 나타나 수치모형 전체적으로 2차 정확도를 갖는다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{H} \right) &= \frac{1}{2\Delta x} \left[3 \frac{(P^2)_{i+1/2,j}^n}{H_{i+1/2,j}} - 4 \frac{(P^2)_{i-1/2,j}^n}{H_{i-1/2,j}} + \frac{(P^2)_{i-3/2,j}^n}{H_{i-3/2,j}} \right], & P_{i+1/2,j}^n \geq 0 \\ &= \frac{1}{2\Delta x} \left[-3 \frac{(P^2)_{i+1/2,j}^n}{H_{i+1/2,j}} + 4 \frac{(P^2)_{i+3/2,j}^n}{H_{i+3/2,j}} - \frac{(P^2)_{i+5/2,j}^n}{H_{i+5/2,j}} \right], & P_{i+1/2,j}^n < 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{H} \right) &= \frac{1}{2\Delta y} \left[3 \frac{(PQ)_{i+1/2,j}^n}{H_{i+1/2,j}} - 4 \frac{(PQ)_{i+1/2,j-1}^n}{H_{i+1/2,j-1}} + \frac{(PQ)_{i+1/2,j-2}^n}{H_{i+1/2,j-2}} \right], & Q_{i+1/2,j}^n \geq 0 \\ &= \frac{1}{2\Delta y} \left[-3 \frac{(PQ)_{i+1/2,j}^n}{H_{i+1/2,j}} + 4 \frac{(PQ)_{i+1/2,j+1}^n}{H_{i+1/2,j+1}} - \frac{(PQ)_{i+1/2,j+2}^n}{H_{i+1/2,j+2}} \right], & Q_{i+1/2,j}^n < 0 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{H} \right) &= \frac{1}{2\Delta x} \left[3 \frac{(PQ)_{i,j+1/2}^n}{H_{i,j+1/2}} - 4 \frac{(PQ)_{i-1,j+1/2}^n}{H_{i-1,j+1/2}} + \frac{(PQ)_{i-2,j+1/2}^n}{H_{i-2,j+1/2}} \right], & P_{i,j+1/2}^n \geq 0 \\ &= \frac{1}{2\Delta x} \left[-3 \frac{(PQ)_{i,j+1/2}^n}{H_{i,j+1/2}} + 4 \frac{(PQ)_{i+1,j+1/2}^n}{H_{i+1,j+1/2}} - \frac{(PQ)_{i+2,j+1/2}^n}{H_{i+2,j+1/2}} \right], & P_{i,j+1/2}^n < 0 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{H} \right) = \frac{1}{2\Delta y} \left[3 \frac{(Q^2)_{i,j+1/2}^n}{H_{i,j+1/2}} - 4 \frac{(Q^2)_{i,j-1/2}^n}{H_{i,j-1/2}} + \frac{(Q^2)_{i,j-3/2}^n}{H_{i,j-3/2}} \right], \quad Q_{i,j+1/2}^n \geq 0$$

$$\frac{1}{2\Delta y} \left[-3 \frac{(Q^2)_{i,j+1/2}^n}{H_{i,j+1/2}} + 4 \frac{(Q^2)_{i,j+3/2}^n}{H_{i,j+3/2}} - \frac{(Q^2)_{i,j+5/2}^n}{H_{i,j+5/2}} \right], \quad Q_{i,j+1/2}^n < 0$$

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. 이러한 문제를 해결하기 위하여 격자의 세분화를 이용하는 다중격자 연결모형을 사용하였다.

동해의 지형은 지진해일 수치모형의 기본 격자간격을 1.1 km로 선정하여 구축하였다. 초기조건으로는 초기 체적흐름을 P 와 Q 모두 0으로 가정하였으며, 경계조건은 해안선으로 표시되는 육지경계와 외부해역과 연결되는 외해경계조건으로 나누었다. 육지경계에서는 해안선과 직각방향 체적흐름을 0으로 하는 완전반사조건과 개방경계에서 반사된 파랑이 경계를 자유롭게 지나고 수치계산의 영역으로부터 밖으로 나가는 것을 허용하는 자유투과조건 및 다중격자 연결 조건을 외해경계조건으로 적용하였다. 아울러, 대상영역이 상대적으로

로 작기 때문에 앞서 언급한 바와 같이 구면좌표의 영향을 무시하고 직교좌표계를 사용하여 수치해석하였다. 각 영역별 세부조건은 표 1과 2와 같다.

3. 수치해석

2차 정확도 풍상차분기법의 정확성은 이미 인태훈 등(2003)에 의해 검증된 바 있다. 인태훈 등은 새로운 수치모형을 Thacker (1981)가 사용한 포물형 수조에서의 유체의 주기적인 거동 모의에 적용하였는데 이는 구배가 아주 완만하여 동해 연안에서의 급경사 지형과는 많이 다르다. 따라서, 본 연구에서는 2차 정확도의 풍상차분기법이 실제지형에서도 적용이 가능한지 평가해 보았다. 본 연구의 대상 지진해일은 1983년 동해 중부 지진해일과 1993년 북해도 남서 외해 지진해일이며, 대상영역은 $\Delta x = 123.3m$ 을 사용하여 모의하였다. 또한, $\Delta x = 4.5m$ 의 세부격자를 이용하여 임원 부근의 지형을 나타냈으며, 수치모의한 영역은 그림 1과 같다. 모의 결과는 현장 관측값과 국립방재연구소(1999)에서 1차 풍상차분기법으로 모의한 결과와 비교하였다.

표 1. 선형 영역의 세부조건

구 분	영역 O	영역 A	영역 B
영역 크기	1413 km × 1413 km	338.9 km × 358.9 km	71.5 km × 117.8 km
격자 간격	1.11 km	370.0 m	123.3 m
격자수	1273 × 1273	916 × 970	580 × 955
전파시간	2시간 30분	2시간 30분	2시간 30분
육지경계조건	완전반사	완전반사	완전반사
외해경계조건	자유투과	다중격자연결	다중격자연결

표 2. 비선형 영역의 세부조건

구 분	영역 C	영역 D	영역 E
영역 크기	23.1 km×20.1 km	2.3 km×3.2 km	0.98 km×1.21 km
격자 간격	41.1 m	13.7 m	4.5 m
격자수	562×490	169×235	217×268
전파시간	2시간 30분	2시간 30분	2시간 30분
육지경계조건	완전반사	완전반사	완전반사
외해경계조건	다중격자연결	다중격자연결	다중격자연결

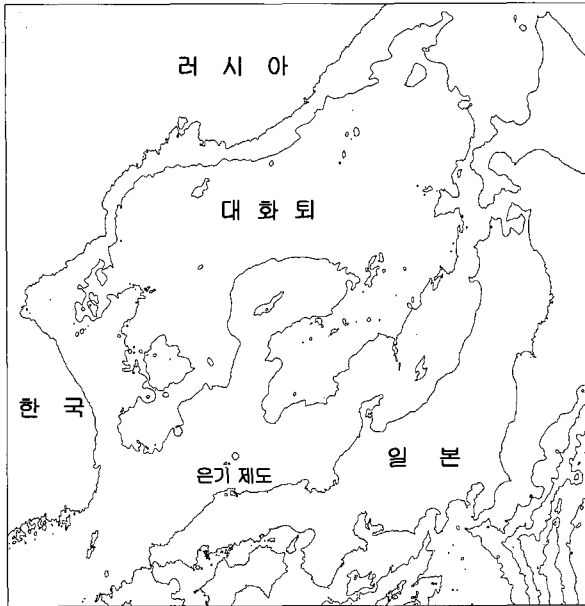


그림 1. 동해에서의 지진해일 계산을 위한 전체영역

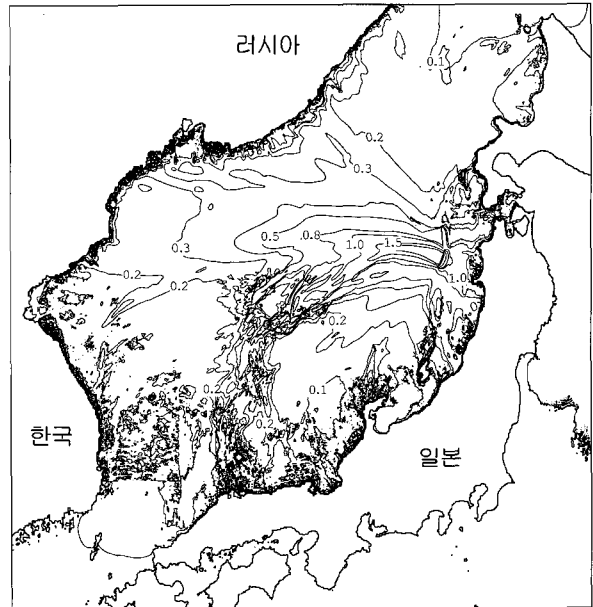


그림 2. 1983년 지진해일의 영역 내 최대 파고분포(단위: m)

그림 2는 1983년 동해 중부 지진해일의 영역내의 최대 파고분포를 나타내고 있다. 그림 2에서 지진해일 에너지의 전파 양상을 살펴보면 에너지의 상당한 부분은 러시아 방향으로 전파하고 있지만, 대화퇴 부근에서 굴절되는 성분이 나타나고 있다. 대화퇴에서의 지진해일 전파를 상세히 보면, 대화퇴에는 두 개의 봉우리가 있고, 남쪽의 은기제도로 향하는 에너지 성분은 동쪽의 봉우리에서 분기된 것이다. 또한, 서쪽의 봉우리로부터 분기되는 성분은 우리나라 연안으로 향하고 있다.

1983년 지진해일을 $\Delta x = 123.3m$ 격자로 동해안에서의 처오름높이를 모의하면 그림 3과 같이 나타난다. 임원 부근에서는 가장 높은 $4.2m$ 의 처오름높이가 나타나며, 장호 $2.7m$, 부구 $2.6m$, 읍남은 $2.3m$ 의 처오름높이가 나타나고 있다. 그리고, 처오름높이가 전체적으로 임원 부근에서 가장 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 지진해일이 전파되어 오는 과정에서 동해안 중앙에 있는 대화퇴에서 굴절되어 지진해일이 임원 부근으로 집중되기 때문이다.

아울러, 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_0 와 A_0 는 임의 지점의 수심과 파고를 나타내며, h 와 A 는 처오름높이를 산정하고자 하는 지점의 수

심과 파고를 나타낸다. 본 연구에서 사용한 관측값과 1차 풍상차분기법에 의한 결과는 국립방재연구소(1999)의 산정 결과를 참고하였다.

표 3은 1993년 지진해일에 대하여 $\Delta x = 123.3m$ 간격으로 모의한 후 장호, 임원, 부구 및 읍남의 처오름높이 결과를 관측값, 1차 풍상차분기법 및 Green 법칙

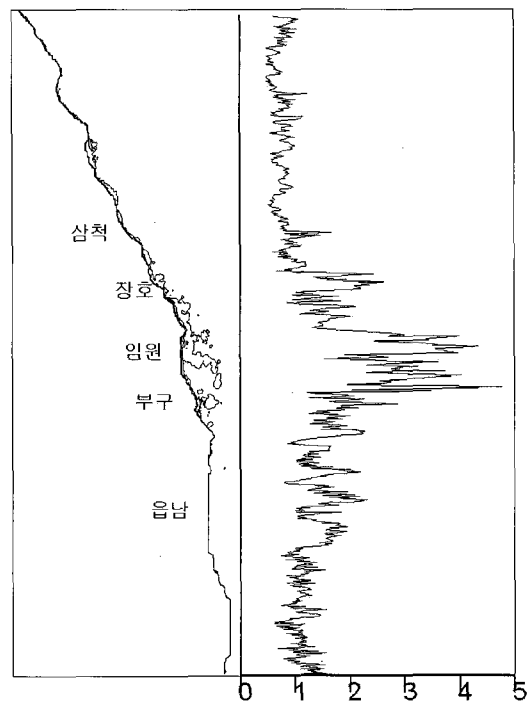


그림 3. 동해안의 처오름높이 ($\Delta x = 123.3m$, 단위: m)

표 3. 지진해일의 처오름높이($\Delta x = 123.3m$, 단위: m)

구 분	장호	임원	부구	읍남
관 측 값	2.9	3.6	2.5	2.6
1차 풍상차분기법	2.7	4.3	2.2	1.8
2차 풍상차분기법	2.7	4.2	2.6	2.3
Green 법칙	2.2	3.4	3.8	2.0

과 비교하였다. 임원 이외의 지역에서는 2차 풍상차분 기법의 결과가 1차 풍상차분 기법이나 Green 법칙보다 더 정확한 것을 알 수 있다.

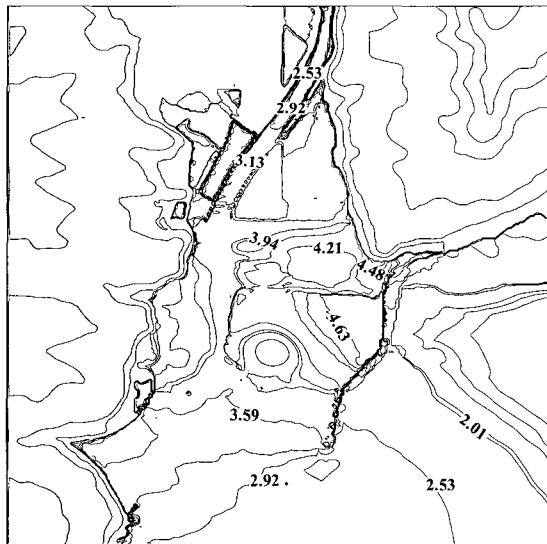
임원지역에 대하여서는 $\Delta x = 4.5m$ 간격의 세부격 자에서 처오름높이를 모의하였다. 모의 결과 임원 항내의 최대 파고는 $4.7m$ 로 나타났으며, 최대 처오름높이는 $4.5m$ 로 나타나고 있다. 그러나, 항의 북측에 위치하는 주택가와 상가에 대하여서는 표고만 부여하였기 때문에 실제 건물이나 구조물의 영향을 고려되지 않았다. 실제 건물이나 구조물의 영향을 고려하면 모의 결과는 다소 낮아질 것으로 예상된다. 실제로 표 4에 제시된 바와 같이 관측지는 2차 풍상차분기법으로 추정된 수치보다 $0.9m$ 낮다. 그리고, 지진해일에 의해 전파된 파가 임원천을 거슬러 올라가는 것을 알 수 있다. 임원천을 따라 지진해일의 범람을 모의하기 위해서는 임원천의 유량 등을 고려해야 하나, 이러한 조건 없이 육지로 처리하여 과소평가 되었을 것이라고 생각된다. 지진

해일의 전파양상은 동측 방파제를 돌아 항만으로 유입된 성분과 더불어 직접 방파제를 넘어 유입된 것도 알 수 있는데, 동측 방파제의 높이는 $5m$ 로 측정되었다. 또한, 임원항 내에서 입사파와 반사파에 의하여 항내의 파고가 높아짐을 알 수 있다.

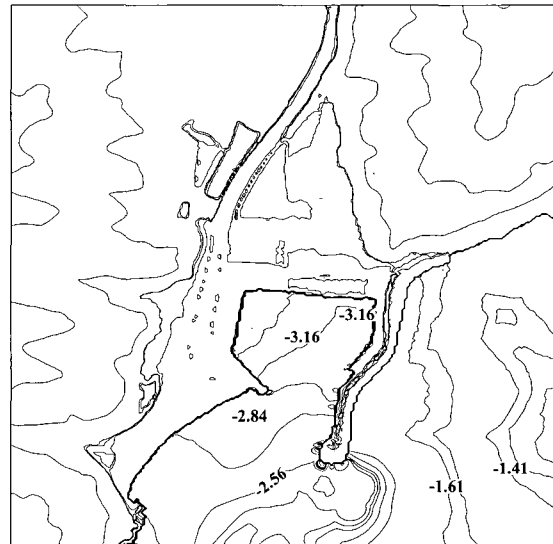
임원항의 수심은 깊은 곳에서 $5m$ 정도이고, 그 외 지역은 대략 $3.5m$ 정도이다. 임원에서의 최저 처내림 높이는 $-3.38m$ 로 산정되었다.

표 4는 임원 지역($\Delta x = 4.5m$)에 대하여 1983년 지진해일의 처오름높이를 관측값과 1차 풍상차분기법의 산정 결과와 비교하였다. 2차 풍상차분기법이 다소 더 정확한 것을 알 수 있다.

그림 5는 1993년 북해도 남서 외해 지진해일의 영역 내 최대 파고분포를 나타낸 것이다. 최대 파고분포로부터 판단할 수 있는 것은 진원이 1983년의 동해 중부 지진해일의 경우보다 북쪽에 위치하고, 대화퇴와의 위치 관계에 의해 다른 양상이 나타나고 있음을 알 수 있다.



(a) 최고 파고분포



(b) 최저 파고분포

그림 4. 임원에서의 파고 분포($\Delta x = 4.5m$, 단위: m)

표 4. 임원에서의 처오름높이 비교($\Delta x = 4.5m$, 단위: m)

구 분	관측값	1차 풍상차분기법	2차 풍상차분기법
1983년 지진해일	3.6	5.0	4.5

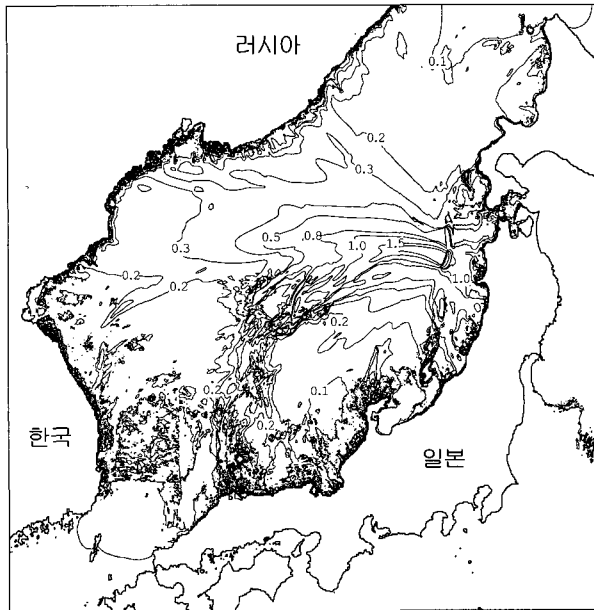


그림 5. 1993년 지진해일의 영역 내 최대 파고분포(단위: m)

특히, 우리나라 동해안으로 향하는 에너지는 동해 중부 지진해일의 경우와는 다르게 동쪽 봉우리로부터의 것이 많고 대화퇴를 통과하는 지진해일은 서로 엇갈린 방향으로 굴절되고 있다.

1993년 지진해일을 $\Delta x = 123.3m$ 격자로 동해안에서의 초오름높이를 모의하면 그림 6과 같이 나타난다. 임원 부근에서 가장 높은 2.8 m의 초오름높이가 나타나며, 묵호 1.2 m, 삼척, 0.9 m, 장호 1.4 m, 부구 2.7 m로 초오름높이가 나타나고 있다. 그리고, 1983년 지진해일과 같은 양상으로 초오름높이가 전체적으로 임원 부근에서 가장 높게 나타남을 알 수 있다. 그리고, 1983년 지진해일에 비하여 전체적으로 초오름높이가 작게 나타남을 알 수 있다. 이는 파원의 위치가 북해도 지방이므로 인근 북해도 해안과 러시아 연안에 대부분의 에너지가 집중되어 동해를 횡단하는 에너지의 양이 상대적으로 작기 때문이다.

표 5는 1993년 지진해일에 대하여 $\Delta x = 123.3m$ 간격으로 모의한 후 묵호, 삼척, 장호, 임원 및 부구의 초오름높이 결과를 관측값, 1차 풍상차분기법 및 Green 법칙과 비교하였다. 관측치와 비교하여 볼 때 2차 풍상

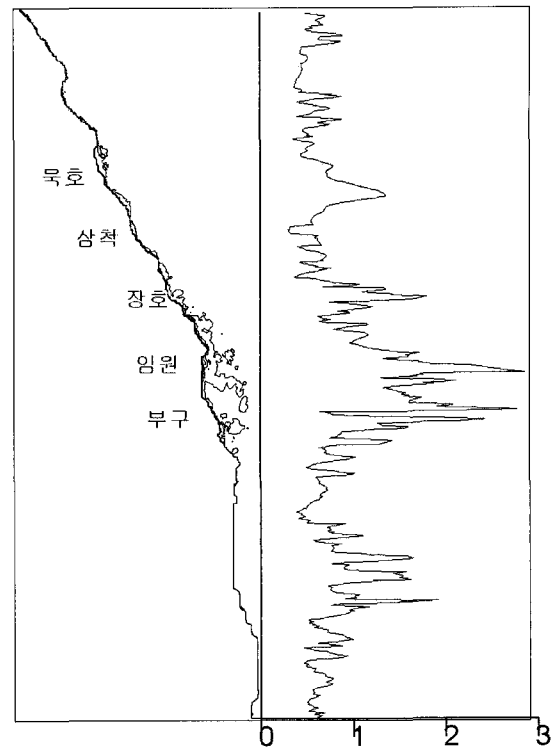


그림 6. 동해안의 초오름높이 ($\Delta x = 123.3m$, 단위: m)

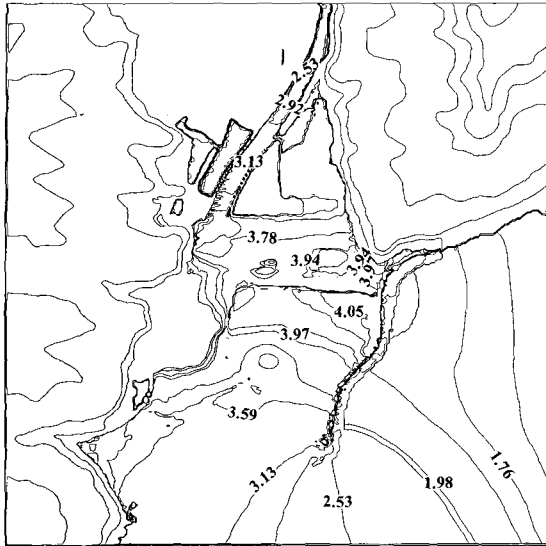
차분기법의 결과가 1차 풍상차분 기법이나 Green 법칙보다 더 정확한 것을 알 수 있다.

1993년 지진해일에 대하여도 $\Delta x = 4.5m$ 간격의 세부격자로 모의하였다. 모의 결과 항내의 최대 파고는 4.05 m로 나타났으며, 최대 초오름높이는 4.0 m로 1983년 지진해일보다 작게 나타나고 있다. 이 역시도 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, 1993년 지진해일의 모의 결과는 등고선 간격이 넓게 분포하고 있어 1983년의 경우보다 해면의 경사는 낮았을 것으로 예상된다.

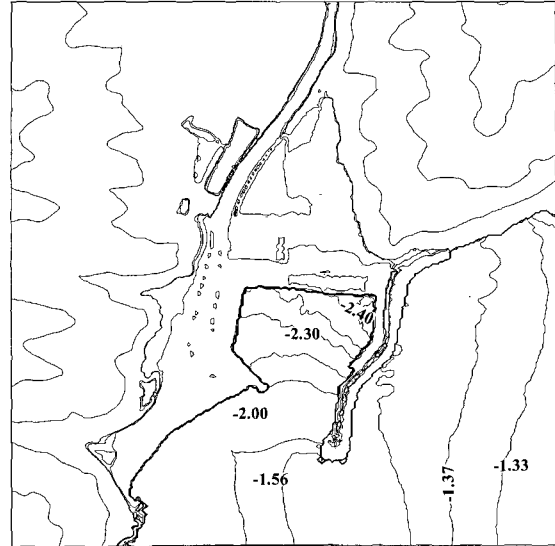
임원에서의 최저 초오름높이는 -2.40 m로 나타나고 있다. 이는 1993년의 지진해일에 의한 해수유동이 1983

표 5. 지진해일의 초오름높이($\Delta x = 123.3m$, 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



(a) 최고 파고분포



(b) 최저 파고분포

그림 7. 임원에서의 파고분포($\Delta x = 4.5m$, 단위: m)

표 6. 임원에서의 처오름높이 비교($\Delta x = 4.5m$, 단위: m)

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

년 지진해일에 의한 해수유동보다는 작았을 것임을 알 수 있다.

표 6은 임원 지역($\Delta x = 4.5m$)에 대하여 1993년 지진해일의 처오름높이를 관측값과 1차 풍상차분기법과 비교하였다. 2차 풍상차분기법이 더 정확한 것을 알 수 있다.

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 계산 결과와 비교하였다. 대상영역은 동해안으로 하였으며 임원에 대하여는 $\Delta x = 4.5m$ 간격의 세부격자를 이용하였다. 대상 지진해일은 우리나라에 피해를 입힌 1983년과 1993년 지진해일을 사용하였다.

동해안을 $\Delta x = 123.3m$ 간격의 격자를 이용하여 수치모의한 결과 1983년과 1993년 지진해일 모두 임원 부근에서 가장 큰 처오름높이를 나타내고 있다. 이는 현장 관측값과 비교하였을 때 비슷한 양상을 보이고 있음을 알 수 있다. 그리고, 선형 모형임에도 불구하고 처

오름높이 산정이 비교적 정확히 이루어지고 있음을 알 수 있다. $\Delta x = 4.5m$ 간격의 세부격자에서도 비록 실제 구조물의 영향은 고려되지 않았지만, 처오름높이 산정이 잘 되고 있음을 알 수 있다.

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

감사의 글

본 연구는 (주)한국전력공사 전력연구원의 울진 원전부지 지진해일 전산해석 사업의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 국립방재연구소 (1999). "동해안에서의 지진해일 재해 저감을 위한 연구(I)." 연구보고서, NIDP-1999-07, 국립방재연구소.
- 국립방재연구소 (2000). "동해안에서의 지진해일 재해 저감을 위한 연구(II)." 연구보고서, NIDP-2000-03, 국립방재연구소.
- 이호준, Imamura, F., Shuto, N. (1999). "동해에서의

- 쓰나미 거동특성.” **대한토목학회논문집**, 제19권, 제 2-3호, pp. 401.-409.
- 인태훈, 이봉희, 조대회, 조용식 (2003). “범람 모의를 위한 이동경계조건.” **한국수자원학회논문집**, 제36 권, 제6호, pp. 937-947.
- 조용식 (1996). “대양을 횡단하는 지진해일의 수치모 의.” **대한토목학회논문집**, 제16권, 제3B호, pp. 303-310.
- 조용식, Liu, P.L.-F. (1995). “Three-dimensional visualization of tsunami propagation and inundation.” **한국해양해양공학회지**, 제7권, 제1호, pp. 70-74.
- 조용식, 서승원 (2001). “이동경계를 이용한 지진해일의 최대범람구역 추산.” **한국해양해양공학회지**, 제13 권, 제2호, pp. 100-108.
- 중앙일보 (2004). “남아시아 쓰나미 사망자 28만명 넘 어.” 1월 26일. 제40판, p. 18.
- 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.
- 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.
- Kajiura, K. and Shuto, N. (1990). “Tsunami.” *The Sea*, Edited by B. Le Mehaute, and D.M. Hanes, John Wiley & Sons, Inc, Vol. 9, Part B, pp. 395-420.
- Lander, J.F. and Lockridge, P.A. (1989). *United States Tsunamis*. U.S. Department of Commerce, pp. 265.
- Liu, P.L.-F., Cho, Y.-S., Yoon, S.B. and Seo, S.N. (1994). “Numerical Simulations of Tsunamis Propagation and Inundation with Application to Hilo, Hawaii.” *Recent Development in Tsunami Research*, Edited by M.I. El-Sabh, Kluwer Academic Publishers.
- Mei, C. C. (1989). “*The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves*.” World Scientific Publishing Co, pp. 740.
- Shyy, W. (1985). “A study of finite difference approximations to steady-state, convection-dominated flow problems.” *Journal of Computational Physics*, Vol. 87, pp. 415-438.
- Thacker, W.C. (1981). “Some exact solutions to the nonlinear shallow water wave equations.” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 107, pp. 499-508.

(논문번호:05-08/접수:2005.1.13/심사완료:2005.05.23)