

사면구조 격자에 의한 지진해일의 범람영역 Inundation of Tsunamis Based on Quadtree Grid System

인 태 훈* / 박 구 용** / 조 용 식***

Lin, Tae-Hoon / Park, Koo-Yong / Cho, Yong-Sik

Abstract

To investigate the inundation of tsunamis in the vicinity of a circular island, a numerical model has been developed based on quadtree grids. The governing equations of the model are the nonlinear shallow-water equations. The governing equations are discretized explicitly by using a finite difference leap-frog scheme on adaptive hierarchical quadtree grids. The quadtree grids are generated around a circular island where refined with rectangular or circular domain. Obtained numerical results have been verified by comparing to available laboratory measurements of run-up heights. A good agreement has been achieved.

Key words : quadtree grid system, inundation, run-up, tsunami, shallow-water equations

요 지

본 연구에서는 지진해일에 의한 원형섬 주변에서의 범람영역을 산정하기 위하여 사면구조(quadtree) 격자 기법을 이용한 수치모형을 개발하였다. 비선형 천수방정식을 지배방정식으로 사용하였으며, 적합화된 계층적 사면구조 격자를 이용하여 leap-frog 기법으로 양해적으로 유한차분하였다. 원형섬 주위를 따라 적용된 사면구조 격자는 사각형 및 원형의 형상으로 세밀화 되었다. 본 모형에 의해 계산된 수치해석결과를 검증하기 위해 원형섬 주변의 초오름높이에 대한 수리실험결과와 비교하였으며, 본 연구의 결과는 수리실험결과와 양호하게 일치하였다.

핵심용어 : 사면구조 격자기법, 범람영역, 초오름, 지진해일, 천수방정식

1. 서 론

지진해일은 해저산사태, 해저화산의 폭발 혹은 해저 지진에 의한 해저지형의 변형에 의해 주로 발생한다. 최근 이와 같은 지진해일이 태평양 연안에서 자주 발생하고 있다(Gonzalez, 1999). 지진해일이 대양으로부터 수심이 상대적으로 얇은 해안선 근처에 도달하면 에너지 보존법칙에 따른 천수효과(shoaling effects)에 의해 파장과 이동속도는 감소하는 반면에 파고는 급격히 증가하기 때문에 대규모 범람을 일으켜 많은 인명 및 재산피해를 초래할 수 있다.

특히, 근해에서 발생한 지진해일은 지진 발생 후 수분 이내에 지진해일이 해안에 이르게 되므로 예보 또는 경보를 발령하더라도 주민들이 대피할 충분한 시간

이 없기 때문에 심각한 해안 범람을 일으킬 뿐만 아니라 막대한 인명피해를 야기시킨다. 예를 들어, 1993년 Hokkaido 지진해일은 발생 후 약 4분만에 Okushiri섬을 급습하여 239명의 사람이 사망하였으며, 약 6억 달러의 재산피해를 입혔다. 또한, 1998년 Papua New Guinea 북쪽에 위치한 Aitape로부터 약 30km 떨어진 태평양에서 발생한 지진해일은 발생 후 7분만에 Aitape와 주변지역을 엄습하여 최소한 2,200여명의 주민이 목숨을 잃었거나 실종되었을 뿐만 아니라 대부분의 가옥들이 파괴되었으며, 관측된 지진해일의 최대 초오름높이는 약 15m인 것으로 보고되었다(Gonzalez, 1999).

지진해일의 피해를 줄이기 위한 효과적이고 경제적인 방법은 지진해일 범람에 취약한 해안선을 따라 범

* 현대건설(주) 기술개발원(taehoon@hdec.co.kr)

** 현대건설(주) 기술개발원, 공학박사

*** 정희원, 교신저자, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

표 1. 조파기에 의한 파봉선의 길이

m	조파관 개수	파봉선 길이
1	14	6.041m
2	29	13.256m
3	44	20.117m
4	60	27.432m

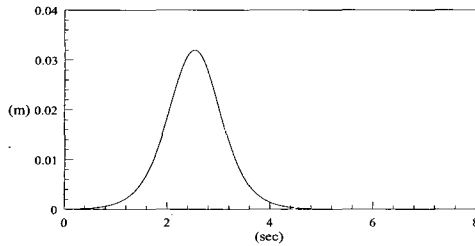
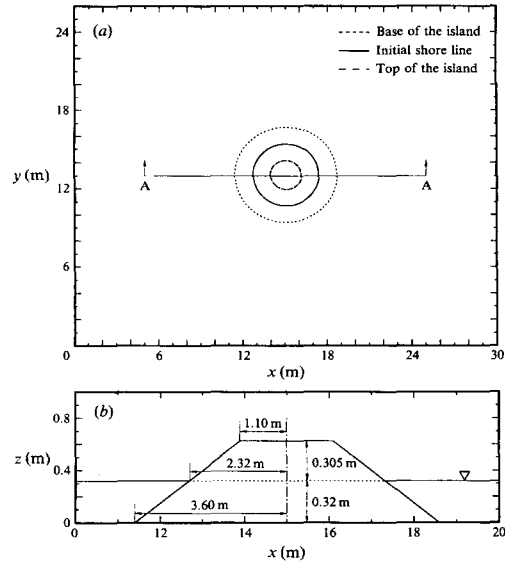


그림 1. 입사파의 초기 파형



(a) 평면도 (b) 원형섬의 단면도
그림 2. 수리모형실험 장치:

람도(inundation map)를 작성하여 이용하는 것이다. 실용적이고 신뢰할 수 있는 범람도를 작성하기 위해서는 진원지에서부터 지진해일에 의해 처오름과 범람이 발생할 가능성이 있는 해안지역까지의 지진해일의 전파 과정을 정확히 모의할 수 있는 수치모형을 사용하는 것이 필수적이다.

본 연구에서는, 지진해일에 의해 원형섬 주변에서 발생하는 범람영역을 결정하기 위하여 적합화된 사면구조 격자를 적용하였다. Liu 등(1995)은 계산 영역 전체를 균일한 사각형 격자로 분할하여 계산한 반면, 본 연구에서는 주 관심영역인 섬 주위를 따라 부분적으로 세밀화된 사면구조 격자를 사각형 및 원형 영역에 대해 적용한다. 사면구조 격자에 의해 계산된 처오름높이를 Liu 등(1995)의 수치해석 결과와 미국 육군 공병단 해안공학연구소(Coastal Engineering Research Center; Liu 등, 1995)에서 수행한 수리모형실험 관측자료와 비교하여 검증한다.

먼저, 본 연구에서는 수리모형실험에 대하여 간략하게 기술한 후 사면구조 격자기법에 대하여 소개하였고, 사면구조 격자기법을 이용한 지배방정식을 차별화하는 과정에 대하여 설명하였다. 그리고, 본 수치모형에 의해 계산된 처오름높이를 수리모형실험 자료와 비교하여 정확도를 검증하였으며, 원형섬에서의 범람영역을 계산하였다.

2. 수리모형실험

수리모형실험은 미국 육군 공병단 산하의 해안공학

연구소(CERC)에서 수행되었으며(Liu 등, 1995), 수조의 중앙에 높이 0.625m, 해저지름 7.2m, 비탈면 경사각 14.04°의 원형섬이 위치한다(그림 2). 지진해일을 모의하기 위한 입사파는 주기(T) 4.905sec, 파장(L) 5.1m, 파고(A) 0.032m의 단일파인 고립파이며 파형은 그림 1과 같다. 비선형성의 크기를 나타내는 수심(h)에 대한 입사파의 파고의 비, 즉 $\epsilon(=A/h)$ 은 0.1이다. 그림 2는 미 공병단 해안공학연구소에서 사용되었던 수리실험장치를 간략히 도시한 것이다.

조파기(directional spectral wave generator, DSWG)는 각각 독립적으로 작동이 가능한 60개의 소형 조파기로 구성되어 있으며, 그림의 x축을 따라 설치되었다. 실험에 사용된 입사파의 파봉선 길이(λ)는 6.041m, 13.256m, 20.117m, 27.432m이며 각각을 $m=1, 2, 3, 4$ 로 표시하였으며(표 1 참조), 조파기에서 발생한 입사파는 x축에 평행한 방향으로 전파한다. 아울러, 원형섬 주위에서의 최대 처오름높이를 예측하기 위하여 섬 주위를 따라 $\pi/8$ 간격으로 파고계를 설치하였다.

3. 사면구조 격자기법

수치기법을 이용하여 미분방정식을 해석할 때 국부적인 특성을 고려한 격자를 사용하기 위해서는 효율적이며 경제적인 격자 생성 기술이 요구된다. 사각 혹은 균등 격자들로 이루어진 수치모형은 우리나라의 해안선과 같이 매우 복잡한 지형에 적합하지 못하며, 특히 지진해일의 처오르내림 과정과 같이 고해상도의 정확한 해를 구하는 경우에는 매우 비효율적이다. 따라서,

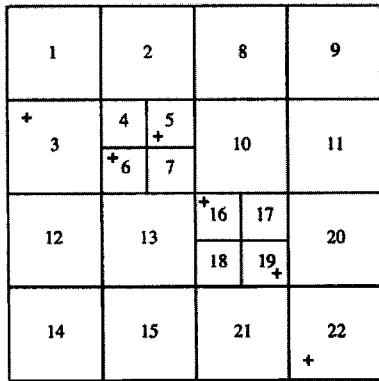


그림 3. 분할된 사면구조 격자

상대적으로 관심이 적은 지역에서는 상세한 계산이 필요 없는 지역에서는 다소 큰 격자를 사용할 수 있는 반면, 관심 지역에 있어서 세부적인 해를 위한 국부적인 격자의 세밀화를 위해서는 효율적이고 경제적인 격자 생성 기술이 반드시 필요하다.

본 연구에서는 계층적 구조의 사면구조 격자(hierarchical quadtree grids)를 근해 지진해일의 전파와 초오르내림 과정에 대한 수치모형에 사용한다. 사면구조 격자를 생성하기 위해서는 먼저, 관심 대상영역을 단위길이의 정사각형에 규격화시킨다. 그리고, 격자를 세밀화하고자 하는 영역에 대하여 원하는 해상도를 만들기 위해 씨앗점들을 지정한다. 정사각형 한 개가 씨앗점이 하나만을 포함하게 될 때까지 정사각형은 2:1 비율에 의해 4개의 정사각형으로 분할되는 작업을 계속한다. 만약, 이웃하는 격자가 2:1의 비율을 만족하지 않으면 인접 격자들은 조건에 맞도록 자동적으로 더욱 분할된다. 이러한 과정은 대상 격자와 이웃하는 격자가 1차 레벨 이상 차이가 나는 것을 제한하게 되는데, 그렇게 함으로서 보존의 법칙이 정확하게 유지된다(Park, 1999).

계층적 격자구조를 이루고 있는 사면구조는 각각의 격자를 정의하거나 인접한 격자에 대한 정보를 얻고자 할 때 매우 유용한 체계이다. 모든 격자는 기억 지시자(pointer)에 의해 저장되고 뿌리(root) 격자까지의 경로에 대한 정보가 정의되어 있다. 따라서, 어떤 주어진 대상 격자와 이웃하는 격자를 분별하기 위해서는 계통도의 상향으로 진행하여 최소 길이의 경로를 통해 하향 진행하여 이웃 격자에 도달하게 된다. 각각의 격자는 계통도 내에서의 절점, 모서리 수, 격자의 고유번호를 기억장소에 보관한다. 그림 3은 씨앗점에 대하여 격자가 분할되는 과정을 간단하게 나타낸 것이며, 그림 4는 그림 3의 격자가 이루고 있는 계층적인 격자구성을

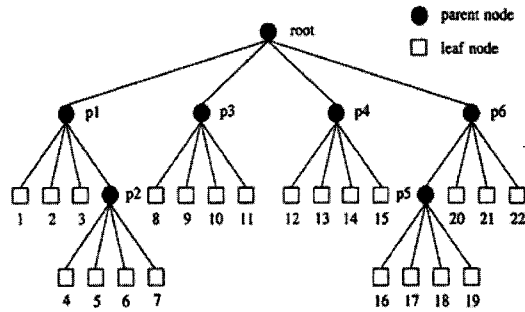


그림 4. 그림 3에 대한 사면구조 계통도

도식화한 것이다.

4. 지배방정식과 수치모형

지진해일이 해안선 근처로 접근해 오면 분산항과 Coriolis 효과의 중요성은 급격히 작아지는 반면에 비선형 이송효과와 바닥마찰저항의 상대적인 영향은 매우 커진다. 따라서, 해안선 근처에서의 지진해일의 거동은 다음과 같은 비선형 천수방정식(nonlinear shallow-water equations)에 의해 지배된다(Liu 등, 1994).

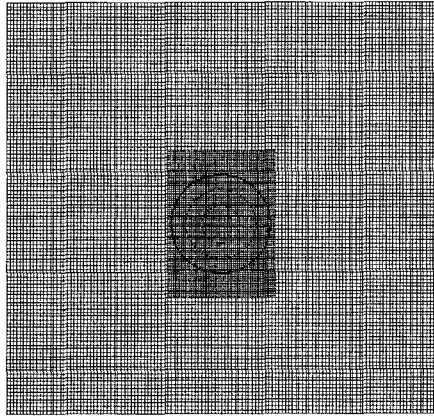
$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{H} \right) + gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

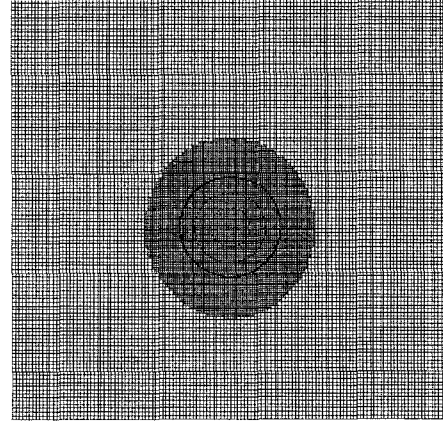
$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{H} \right) + gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

식 (1)~(3)에서 ζ 는 자유수면변위, P와 Q는 각각 x와 y방향의 체적흐름율(volume flux), $H=h+\zeta$ 는 수심과 자유수면변위를 합한 전체수심이다. 본 연구에서 사용한 수치모형은 비선형 천수방정식을 엇갈림 격자(staggered grid)의 유한차분법으로 해석한 것으로, 비선형항은 풍상(upwind)기법으로, 나머지 항들은 leap-frog기법으로 차분화하였다(Liu 등, 1995). Liu 등(1995)은 균등 사각격자망을 이용하여 수치모의실험을 수행하였다. 수치모의 과정 중, 바닥마찰효과는 섬 주위에서의 최대 초오름높이 결과에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 보고되었기 때문에(Liu 등, 1995), 본 연구에서는 바닥마찰효과를 고려하지 않기로 한다. 고립파에 대한 수치적 알고리즘은 Liu와 Cho(1994)에 제시되어 있다.

본 연구에서는, 원형섬 주위에서의 초오름높이를 산정하기 위하여 적합화된 사면구조 격자기법을 도입하였다.



(a) 사각형 영역



(b) 원형 영역

그림 5. 사면구조 격자모형

그림 5(a)와 (b)에서 나타낸 바와 같이, 원형섬을 중심으로 사각형 및 원형 영역으로 사면구조 격자망을 생성하였다. 수치실험 결과를 전술한 수치모형실험 결과와 비교하여, 수치모형의 정확성을 검증하였다. 사면구조 격자망에 사용된 최소격자의 크기는 $\Delta x = \Delta y = 0.1m$ 이며, 수치 안정조건을 만족시키기 위한 계산 시간간격은 $\Delta t = 0.02sec$ 로 고정하였다. 이 때의 Courant 수는 $Cr (= C_0 \Delta t / \Delta x) = 0.345$ 이며, $C_0 (= \sqrt{gH})$ 는 전파속도이다.

조파기에서 발생된 입사파는 섬을 향해 정면으로 진행하지만, 섬에 부딪혀 진행방향이 변하거나 섬을 통과한 파는 모형의 벽면에 도달하게 된다. 따라서, 수치모형의 정확도를 향상시키기 위해 모형의 벽면과 조파기에 대해 개방경계조건을 설정하여 진행파가 재반사 없이 경계를 통과하도록 하였다. 또한, 입사파가 해안선에 도달하면 연속하여 초오르내림을 반복하므로 이를 정확하게 추적하기 위해 해안선을 따라 이동경계조건을 설정하였다.

5. 결과 비교

새로운 격자체계를 이용하여 계산한 근해 지진해일의 초오름높이를 검증하기 위하여, 미국공병단에서 수행한 원형섬에 대한 초오름높이의 수치모형실험 결과값과 비교하였다. 수치모의 결과, 섬 주위를 원형 영역으로 사면구조 격자를 적용한 모형이 사각형 영역으로 적용한 모형의 결과보다 정확한 계산값을 나타내었기 때문에 본 연구에서는 원형 영역에 의한 사면구조 격자모형의 계산결과만을 제시하였다.

본 연구에 사용된 사면구조 격자 수치모형의 정확도를 검증하기 위해 $\epsilon = 0.1$ 일 때, 원형섬 주위에서의

고립파의 최대 초오름높이를 계산한 후, 이를 수치모형 실험에서 계측한 자료와 비교하여 그림 6에 도시하였다. 그림에서 β 는 섬의 앞면 중앙으로부터 반시계방향 $\pi/8$ 간격으로 측정된 각도로써, $\beta = 0$ 과 $\beta = \pi$ 는 각각 섬의 앞면과 섬의 뒷면, 즉 입사파가 진입하는 방향의 중앙과 배후 지역의 중앙을 각각 의미한다. 또한, R은 섬에서의 실제 초오름높이이며 $A (= 0.032m)$ 는 입사파의 파고이다.

Cho와 Liu(1999)는 지진해일 파봉선의 길이에 따른 최대 초오름높이의 변화에 대해 연구하였다. 원형섬의 해저지름보다 지진해일의 파봉선의 길이가 작을 경우, 섬 주위에서의 초오름높이는 입사파의 파봉선 길이에 비례하여 증가한다. 그러나, 파봉선의 길이가 섬 해저지름의 두배 이상일 경우 파봉선 길이가 증가하여도 초오름높이는 거의 변화하지 않는다.

일반적으로 최대 초오름높이는 섬의 정면인 $\beta = 0$ 지점에서 발생하고, β 가 증가함에 따라 초오름높이는 선형적으로 감소한다. 그러나, 입사파 파봉선의 길이가 증가할수록 섬의 뒷면($\beta = \pi$)에서의 초오름높이가 급격히 증가하고 있다. 이는 그림 6에서 설명한 것과 같이 원형섬 주위에 간헐적으로 마주 보고 진행하던 파랑이 $\beta = \pi$ 에서 충돌하여 초오름높이를 형성하기 때문이다(조용식, 1998).

그림 6(c)와 (d)에서의 수치모형실험 관측치는 섬 전면보다 후면에서의 초오름높이가 더 크게 나타났으나, 수치계산에 의한 결과는 그보다 작은 값을 보이고 있다. 이러한 현상은 비선형항의 차분식에 사용된 풍상차분기법에 의한 인위적인 점성(artificial viscosity)에 기인한 것으로 판단된다(Roache, 1976). 섬 후면에서의

오차를 제외하고는 전체적으로 수리모형실험에 의한 처오름높이와 수치계산에 의한 처오름높이는 매우 잘 일치하고 있다. 수치모형 중, 원형 영역에 대하여 사면 구조 격자를 적용한 수치모형에서의 처오름높이가 수

리모형실험 관측치와 가장 유사한 결과를 보이고 있다. 이것은 섬을 주위로 원형 영역의 사면구조 격자가 집중되어 있으므로 파의 거동을 좀 더 세밀히 묘사할 수 있기 때문이다.

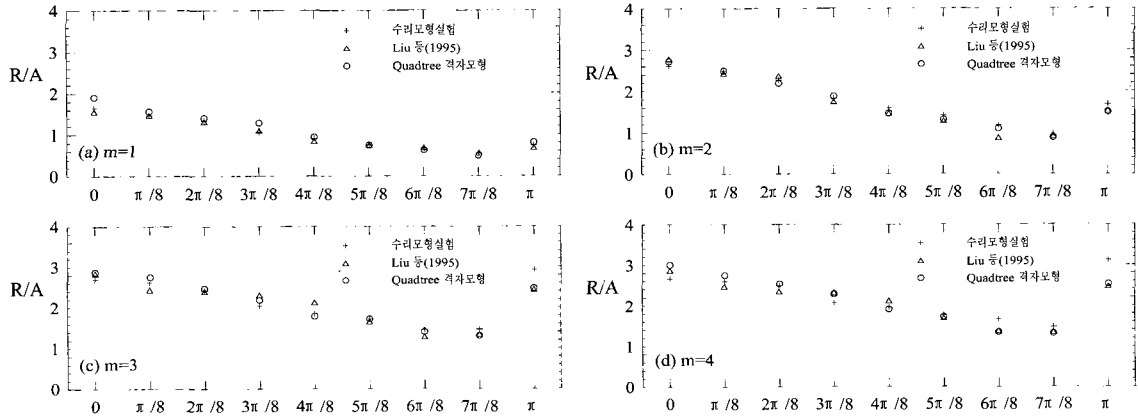


그림 6. 원형섬 주변에서의 최대 처오름높이 비교

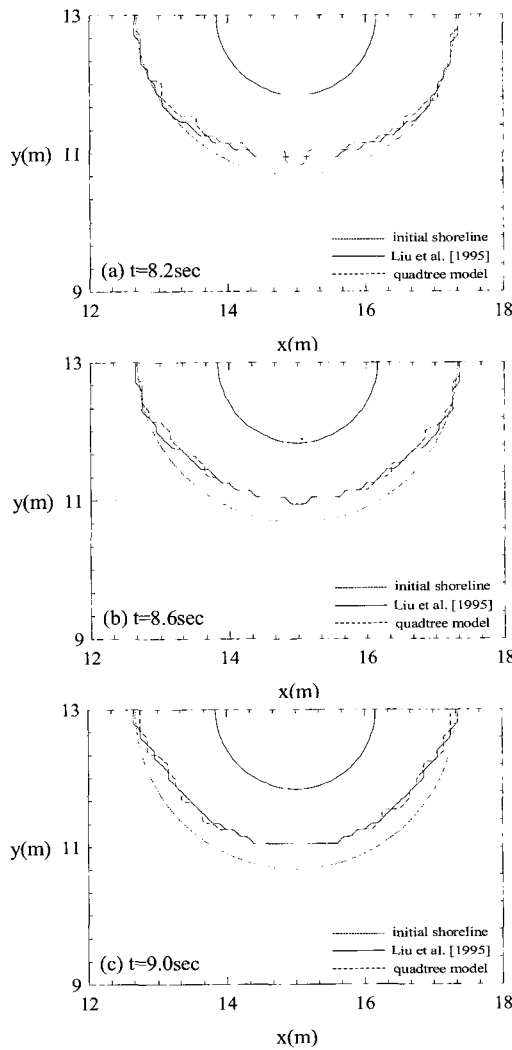


그림 7. 원형섬 전면에서의 범람영역

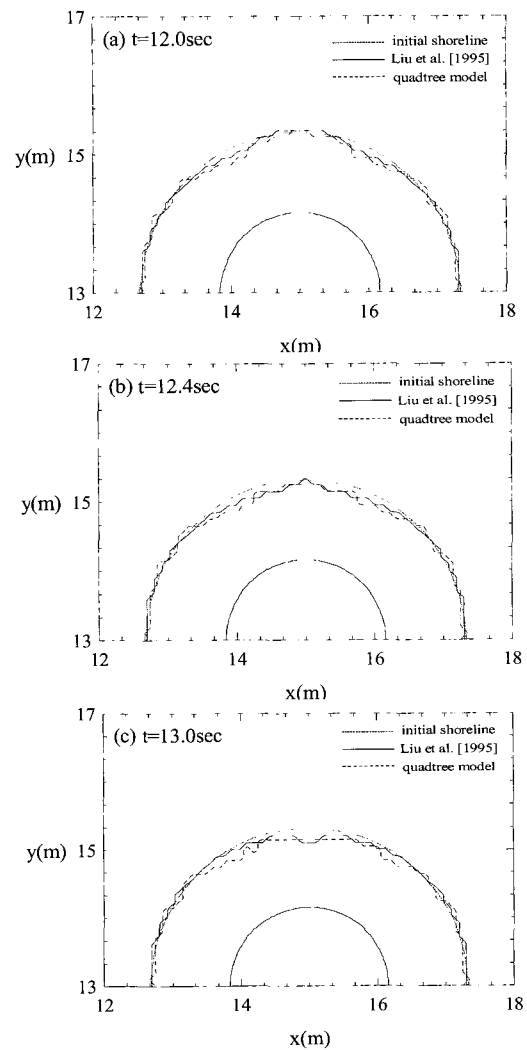


그림 8. 원형섬 후면에서의 범람영역

그림 7과 8은 각각 원형섬의 전면과 후면에서 시간 변화에 따라 사면구조 격자에 의해 계산된 범람영역을 도시한 것이다. 또한, Liu(1995) 등이 균등한 격자에 의해 계산한 범람영역을 함께 나타내어 비교하였다. 그림에 나타난 바와 같이 두 모형의 범람영역 산정 결과는 거의 유사하다. 그러나, Liu(1995) 등의 모형에 의해 섬 전면 및 후면의 중앙부근에서 계산된 범람영역에서 알 수 있듯이 일직선에 가까운 해안선을 나타내고 있는 반면, 사면구조 격자에 의해 계산된 범람영역은 자연상태의 해안선 형태에 보다 가깝게 표현되어 있고, 찰흙이 주로 발생하는 섬 전면과 후면의 중앙 부근에서 범람현상을 잘 구현하고 있음을 볼 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 비선형 천수방정식을 유한차분법을 이용하여 원형섬 주위에서의 지진해일의 범람영역을 사면구조 격자모형으로 수치해석하였다. 찰흙높이 계산에 필요한 주 관심영역인 섬 주위를 따라 부분적으로 세밀화된 사면구조 격자를 사각형 및 원형 영역에 대해 적용하였다. 모형의 정확도를 검증하기 위하여 원형섬 주변에서의 찰흙높이를 계산하여 기존의 수치해석 결과(Liu 등, 1995)와 수리모형실험 관측치에 비교하였다.

원형섬에 입사하는 지진해일에 의한 최대 찰흙높이는 섬의 앞면에서 주로 나타나게 되지만, 입사파의 파봉선의 길이가 증가할수록 섬 뒷면에서의 찰흙이 급격히 증가하여 섬 앞면에서의 찰흙보다 더 크게 나타난다. 사면구조 격자에 의한 수치모형결과는 기존의 계산보다 더욱 향상된 값을 제공하였다. 이것은 섬 주위의 관심영역에 대해 세밀화된 격자를 사용하여 보다 정확도 높은 계산을 수행할 수 있기 때문이다. 또한, 범람영역을 산정하고자 하는 관심영역에 대해 선택적으로 격자를 세밀화 시킬 수 있으므로 전체 계산시간이 단축되며 요구되는 정밀도를 만족시킬 수 있다.

본 연구에서 사용된 사면구조 격자기법은 지진해일에 의해 섬에서 예상되는 범람영역과 지진해일의 거동을 보다 정확하게 모의할 수 있을 뿐만 아니라, 보다 높은 해상도를 요구하는 관심영역에 대해 세밀화된 격

자를 적용할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한강수리환경연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 조용식(1998) 해안선에서의 지진해일 찰흙높이의 증폭. 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제18권, 제II-1호, pp. 41-46.
- Cho, Y.-S. and Liu, P.L.-F.(1999) Crest length effects in nearshore tsunami run-up around islands. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104, pp. 7907-7913.
- Gonzalez, F.I.(1999) Tsunami. *Scientific American*, May, pp. 56-65.
- Liu, P.L.-F. and Cho, Y.-S.(1994) An integral equation model for wave propagation with bottom frictions. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 120, pp. 594-608.
- 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, in *Recent Development in Tsunami Research*, edited by M.I. El-Sabh, Kluwer Academic Publishers.
- Liu, P.L.-F., Cho, Y.-S., Briggs, M.J., Kanoglu, U. and Synolakis, C.E.(1995). Run-up of solitary wave on a circular island. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 302, pp. 259-285.
- Park, K.-Y.(1999) *Quadtree grid numerical model of nearshore wave-current interaction*. Ph.D. thesis, Oxford Univ., U.K.
- Roache, P.J.(1976) *Computational Fluid Dynamics*. Hermosa Publishers, pp. 446.

◎ 논문접수일 : 2004년 6월 03일

◎ 심사의뢰일 : 2004년 6월 04일

◎ 심사완료일 : 2004년 6월 22일