

HLLC Approximate Riemann Solver를 이용한 천수방정식 해석

Analysis of Shallow-Water Equations with HLLC Approximate Riemann Solver

김대홍* / 조용식**
Kim, Dae-Hong / Cho, Yong-Sik

Abstract

The propagation and associated run-up process of nearshore tsunamis in the vicinity of shorelines have been analyzed by using a two-dimensional numerical model. The governing equations of the model are the nonlinear shallow-water equations. They are discretized explicitly by using a finite volume method and the numerical fluxes are reconstructed with a HLLC approximate Riemann solver and weighted averaged flux method. The model is applied to two problems: The first problem deals with water surface oscillations, while the second one simulates the propagation and subsequent run-up process of nearshore tsunamis. Predicted results have been compared to available analytical solutions and laboratory measurements. A very good agreement has been observed.

Keywords : run-up, shallow-water equations, finite volume method, HLLC approximate Riemann solver, weighted averaged flux method tsunamis

요 지

본 연구에서는 수치모형을 이용하여 근해지진해일의 초오름 현상과 전파양상을 이용하여 해석하였다. 모의에 사용된 수치모형은 지진해일 거동의 해석에 적합한 비선형 천수방정식을 지배방정식으로 채택하였으며, 유한체적법을 이용하여 해석영역을 이산화 하였고 Riemann 문제를 해석하기 위하여 HLLC approximate Riemann solver와 Weighted Averaged Flux 기법을 이용하였다. 수치모형의 검증은 위하여 마찰 없는 수조에서의 수면진동문제와 원형섬 주위에서 고립파의 진행과 초오름에 대한 문제에 적용하여 각각 해석해 및 실험결과와 비교하였다. 수치모형에 의한 결과는 해석해와 수리모형실험 관측자료와 잘 일치하였다.

핵심용어 : 초오름, 천수방정식, 유한체적법, HLLC approximate Riemann solver, 가중평균 플럭스 기법, 지진해일

1. 서 론

지진해일은 매우 빠른 속도로 외해를 지나 해안에 도달하여 대규모 범람을 일으켜 많은 인명과 재산피해를 초래한다. 실제로, 1992년 Indonesia Flores 섬 지진

해일과 1993년 동해에서 발생한 Hokkaido 지진해일은 진원지 부근에 위치한 Babi 섬과 Okushiri 섬에서 매우 높은 초오름을 발생시켜 많은 인명과 재산피해를 초래하였다. 또한, 1996년 인도네시아 Irian Jaya 지진 해일로 인하여 우리나라 남해안을 비롯한 일본 및 태

* 한국수자원공사 수자원연구소 선임연구원

Korea Water Resources Research Team Researcher (E-mail: iceman@kowaco.or.kr)

** 교신저자, 한양대학교 공과대학 토목공학과 부교수

Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University (E-mail: ysc59@hanyang.ac.kr)

평양의 여러 섬과 연안국가까지 지진해일 주의보가 발령되기도 하였다.

지금까지 지진해일에 관한 연구 주제로는 주로 지진해일의 전파와 처오름 및 이로 인하여 발생하는 범람에 관한 연구가 주류를 이루고 있다. 국내연구로 최병호와 이호준(1992)은 1983년에 발생한 동해중부 지진해일을 재현한 바 있고, 우승범 등(1999)은 Taiwan의 1986년 Hwaiien 지진해일에 대한 다중격자 연결 지진해일 모형의 적용에서 폐쇄다중격자 유한차분모형을 이용하여 지진해일의 전파와 처오름을 수치모의하였다. 윤성범 등(1999)은 수심이 완만하게 변하는 해역을 전파하는 지진해일에 대해 천수방정식과 균일격자를 사용하면서도 물리적 분산효과를 정도 높게 수치모의하기 위한 분산보정기법을 개발하였다. 인태훈과 조용식(2003)은 2차 정확도의 upwind 기법을 이용한 비선형 천수방정식의 해석 모형을 개발하여 해석해가 있는 문제에 적용하였다.

국외연구로는 Lautenbacher(1970)가 선형 천수방정식과 유한차분기법을 이용하여 Hawaii, Ohau, Small Islands에 대해 최대 처오름 높이를 제시하였고, Smith와 Sprinks(1975)는 환경사방정식을 이용하여 Lautenbacher에 의해 제시되었던 원형섬 둘레에서의 최대파고에 대한 근사적인 해석해를 제시하였다. 또한, Liu 등(1995)은 천수방정식을 이용하여 대양을 횡단하는 지진해일의 거동과 함께 원형섬 주변에서 지진해일의 전파양상과 섬으로의 처오름 현상을 수치모의하였다.

Approximate Riemann solver는 Euler 방정식의 해석 중, 불연속한 특성의 해석을 위해 개발되었으며, Kim 등(2002, 2004)에 언급한 것과 같이 댐붕괴 파 해석과 같은 천수방정식의 해석에 광범위하게 사용되어 왔다. Hubbard 등(2002)은 2차원 공간에서 파랑의 전파양상과 처오름 현상 해석에 적용하였다. Riemann 문제는 Roe의 approximate Riemann solver를 이용하여 풀었다. 해석 결과가 전반적으로 타당하였지만, Liu 등(1995)의 결과보다는 부정확한 값을 제시하였다. Bradford 등(2002)은 MUSCL 기법을 이용하였으며, 매우 다양한 2차원 문제에 수치모형을 적용하였다.

본 연구에서는 Billett과 Toro(1997)가 제안한 HLLC approximate Riemann solver를 이용한 2차원 수치해석 모형을 이용하여 해석해가 존재하는 이상적인 경우에 대한 파의 거동과, 근해에서 발생하는 지진해일의 전파양상과 원형섬에서의 처오름높이를 예측하였다.

2. 지배방정식

지진해일 또는 조석과 같은 장파가 외해로부터 해안선 근처로 접근해 오면 분산항의 중요성은 상대적으로 작아지는 반면에 비선형 이송효과의 영향은 매우 커진다. 따라서 해안선 근처에서 장파의 거동은 비선형 천수방정식을 사용하는 것이 바람직하다. 보존형 형태의 비선형 천수방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} = \mathbf{S} \quad (1)$$

식 (1)에서 보존형 변수 \mathbf{U} , x -와 y -축 방향 flux항 \mathbf{E} 와 \mathbf{F} 및 생성항 \mathbf{S} 는 각각 다음과 같다.

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \\ huw \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} hv \\ huw \\ hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ gh(S_{ox} - S_{fx}) \\ gh(S_{oy} - S_{fy}) \end{bmatrix}$$

식 (2)에서 h 는 수심, u 와 v 는 x -와 y -축 방향의 속도, g 는 중력가속도이며, S_{ox} 와 S_{oy} 는 각각 x -와 y -축 방향의 지형경사를 나타내며, S_{fx} 와 S_{fy} 는 바닥마찰항으로 Manning이나 Chezy의 공식을 이용하여 나타낼 수 있다.

지배방정식을 임의의 계산 요소에 대하여 식 (3)과 같이 적분하여 유한체적법을 이용할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_A \mathbf{U} dA + \oint_{\Omega} \mathbf{G} \cdot \mathbf{n} d\Omega = \oint_{\Omega} \mathbf{S} d\Omega \quad (3)$$

여기서 \mathbf{G} 는 flux tensor, A 와 Ω 는 계산요소의 면적과 경계이며, \mathbf{n} 은 경계와 수직인 단위벡터를 나타낸다. 식 (3)에 변환행렬 \mathbf{T}_s 를 도입하면 식 (4)와 같이 상미분방정식이 되고 비구조적 격자계를 사용할 수 있다.

$$\frac{d\mathbf{U}}{dt} + \frac{1}{|A|} \sum_{s=1}^N \int_{A_s}^{A_{s+1}} \mathbf{T}_s^{-1} \mathbf{G}(\mathbf{T}_s \mathbf{U}) dA = \mathbf{S} \quad (4)$$

3. HLLC approximate Riemann solver

HLLC approximate Riemann solver는 Billett과 Toro(1997)가 제안한 Riemann 문제의 해석기법으로 서론에 기술된 바와 같이 쌍곡선형식의 편미분방정식 해

석과 천수방정식 해석에 적용된 바 있다. HLLC 기법은 처오름 현상에 수반되는 이동경계 문제를 해석함에 있어, 마른바닥(dry bed)의 처리를 해석적으로 수행하여 처오름 현상 해석에 보다 정확한 결과를 제공할 수 있는 장점이 있다. HLLC 기법에 대한 자세한 내용이 상기 문헌에 자세히 기술되어 있으므로 본 절에서는 개략적인 내용만을 기술하였다.

흐름이 x -축 방향으로만 변한다고 가정하고 생성향을 생략하면 지배방정식은 다음과 같이 기술된다.

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

식 (5)에서 \mathbf{U} 는 세 개의 변수에 대한 벡터로써 식 (5)로 표현된 계는 세 개의 실수 고유값(eigenvalue)을 갖게 되고, 세 개의 파속 S 로 구분되는 네 개의 구간으로 구분되어 Riemann 문제의 해가 구성된다. 이를 식으로 표현하면

$$\tilde{\mathbf{U}}(x, y) = \begin{cases} \mathbf{U}_L & \text{for } 0 \leq S_L \\ \mathbf{U}_L^* & \text{for } S_L \leq 0 \leq S_* \\ \mathbf{U}_R^* & \text{for } S_* \leq 0 \leq S_R \\ \mathbf{U}_R & \text{for } S_R \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

과 같고 수치 flux는 다음과 같다.

$$\mathbf{E}_{i+1/2}^{HLLC} = \begin{cases} \mathbf{E}_L & \text{for } 0 \leq S_L \\ \mathbf{E}_L^* = \mathbf{E}_L + S_L(\mathbf{U}_L^* - \mathbf{U}_L) & \text{for } S_L \leq 0 \leq S_* \\ \mathbf{E}_R^* = \mathbf{E}_R + S_R(\mathbf{U}_R^* - \mathbf{U}_R) & \text{for } S_* \leq 0 \leq S_R \\ \mathbf{E}_R & \text{for } S_R \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

식 (7)에서 첨자 $i+1/2$ 는 계산 요소 L 과 R 사이의 경계를 나타내며, 식 (6)과 (7)에 사용된 파속은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} S_L &= \min(u_L - \sqrt{gh_L}, u_* - \sqrt{gh_*}) \\ S_* &= u_* = \frac{u_L + u_R}{2} + \sqrt{gh_L} - \sqrt{gh_R} \\ S_R &= \max(u_R + \sqrt{gh_R}, u_* + \sqrt{gh_*}) \end{aligned} \quad (8)$$

본 연구에서 사용한 HLLC 기법의 장점 중 하나는 사슬한 바와 같이 마른바닥에서의 파속을 해석적으로 구하여 사용하는 점으로, 마른바닥에도 미소수심이 존재한다는 비물리적 가정을 하여 물의 거동을 계산하는 Roe기법보다 정확한 해석이 가능하다 (Billett과 Toro, 1997). 즉, 계산요소의 좌측과 우측이 마른바닥인 경우

파속은 식 (9)와 식 (10)을 각각 적용한다.

$$\begin{aligned} S_L &= u_R - 2\sqrt{gh_R} \\ S_* &= S_L \\ S_R &= u_R - 2\sqrt{gh_R} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} S_L &= u_L - \sqrt{gh_L} \\ S_* &= S_R \\ S_R &= u_L + 2\sqrt{gh_L} \end{aligned} \quad (10)$$

2차 정확도의 수치기법에 수반되는 수치진동을 제어하기 위해 TVD 제한자를 이용하여 수치 flux항을 전개하면 식 (11)과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{i+1/2} &= \frac{1}{2}(\mathbf{E}_i + \mathbf{E}_{i+1}) \\ &\quad - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \text{sign}(c_k) \varphi_{i+1/2}^k \Delta \mathbf{E}_{i+1/2}^k \end{aligned} \quad (11)$$

여기서, $\mathbf{E}_{i+1/2}^k = \mathbf{E}(\mathbf{U}_{i+1/2}^k)$, c_k 는 파속 S_k 를 갖는 파의 Courant number, $\varphi_{i+1/2}^k$ 는 TVD 기법 중 하나인 flux 제한자 함수이며, $\Delta \mathbf{E}_{i+1/2}^k = \mathbf{E}_{i+1/2}^{k+1} - \mathbf{E}_{i+1/2}^k$ 이다.

식 (5)는 생성향을 포함하고 있지 않지만, 실제 현상을 해석하기 위해서는 생성향을 포함시켜야 하는 경우가 대부분이다. 본 연구에서는 식 (12) 및 식 (13)을 이용하는 splitting technique을 이용하여 생성향을 처리하였다. 보다 자세한 과정은 Toro (1999)와 Hu 등(2000)에 기술되어 있어 본 연구에서는 생략하였다.

$$\left(\begin{array}{l} PDE: \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} = 0 \\ IC: \mathbf{U}_k \end{array} \right) \xrightarrow{\Delta t} \mathbf{U}_*^{k+1} \quad (12)$$

$$\left(\begin{array}{l} ODE: \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} = S_x \\ IC: \mathbf{U}_{*k+1} \end{array} \right) \xrightarrow{\Delta t} \mathbf{U}^{k+1} \quad (13)$$

본 연구에서는 두 종류의 경계조건이 부여되도록 모형을 구성하였다. 첫 번째로 transmissive 경계조건은 식 (14)와 같이, reflective 경계조건은 식 (15)와 같이 부여하였다.

$$\mathbf{U}_b = \mathbf{U}_{b+1}, \quad \mathbf{U}_{b+1} = \mathbf{U}_{b-2} \quad (14)$$

$$\mathbf{U}_b = \begin{pmatrix} h_{b-1} \\ -u_{b-1} \\ v_{b-1} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{U}_{b+1} = \begin{pmatrix} h_{b-2} \\ -u_{b-2} \\ v_{b-2} \end{pmatrix} \quad (15)$$

여기서 U_b 는 1차원 공간에서의 오른쪽 경계 변수벡터를 나타낸다.

끝으로, 해석대상 영역을 2차원 공간으로 확장하기 위하여 fractional step method를 이용하였다. 2차원 천수방정식은 fractional step method에 의해 식 (5)와 같이 x-와 y-축에 대한 각각의 1차원 문제로 분할되며, 분할된 일차원 문제는 상기 과정과 같이 해석이 가능하다. x-와 y-축에 대한 1차원 문제의 해석과정을 $x^{\Delta t}$ 과 $y^{\Delta t}$ 로 표현하면 2차원문제는 $U^{k+1} = y^{\Delta t} x^{\Delta t} (U^k)$ 를 이용하여 해석이 가능하다. 그러나 이는 1차 정확도이므로 식 (16)을 이용하여 2차 정확도의 해를 구하였다.

$$U^{k+1} = y^{\Delta t/2} x^{\Delta t/2} y^{\Delta t/2} x^{\Delta t/2} (U^k) \quad (16)$$

4. 수치모형의 적용

본 절에서는 HLLC approximate Riemann solver를 이용한 수치모형의 근해지진해일 전파와 처오름 현상모의 결과의 정확성과 적용성을 검증하기 위하여 해석해가 있는 문제(Thacker, 1981)와 미국 육군공병단 해안공학연구소(Liu 등, 1995)에서 수행한 수리실험을 대상으로 수치모형을 적용하고 그 결과를 비교 분석하였다.

첫 번째로 비선형 천수방정식에 대한 해석해가 있는 수면진동 현상을 수치모형을 이용하여 해석하였다. 본 문제는 그림 1과 같은 포물형 수조 위의 중심부에 포물선형 수면형상이 초기조건으로 주어지는 경우 유체의 거동을 묘사하는 문제로서 수면이 진동하여 경사면을 따라 처오름과 처내림 현상이 주기적으로 반복된다.

수면진동현상 해석을 위하여 계산영역을 $\Delta x=10m$ 와 $\Delta y=10m$ 의 정사각형 요소로 분할하였다. 해석 대상영역의 지형은 식 (17)과 같이 표현된다.

$$z_b = z_{b0} (1 - r^2/a^2) \quad (17)$$

식 (17)에서 r 은 해석영역 중심으로부터의 거리이며, 해석하는 식 (18)과 같다(Thacker, 1981).

$$h = z_{b0} \left[\frac{\sqrt{1-A^2}}{1-A\cos\omega t} - 1 - \frac{r^2}{a^2} \left\{ \frac{1-A^2}{(1-a\cos\omega t)^2} - 1 \right\} \right] \quad (18)$$

식 (18)에서 $\omega = \sqrt{8gz_{b0}}/a$, $A = (a^4 - r_0^4)/(a^4 + r_0^4)$, $r_0=2000m$, $a=2500m$ 그리고 $z_{b0}=1.0m$ 이다.

그림 2는 수조의 중심을 지나는 단면을 나타내는 것으로서, 서로 다른 수치모형으로 예측된 수면변화가 해석해와 서로 매우 근사한 결과를 보이고 있다. 그러나 HLLC approximate Riemann solver를 이용한 수치모형과 인태훈과 조용식(2003)이 제시한 수치모형이 보다 정확한 계산 결과를 제공하고 있다. 특히, $t=4T/4$, 즉 유체유동의 한 주기가 완료되는 순간 두 모형은 매우 정확한 결과를 보이는 반면, Liu 등(1995)이 제시한 모형은 유체 중심부의 수면 값이 해석해와 약간 다른 양상을 보이고 있다. 이는 비교 대상 모형이 비선형항을 이산화함에 있어 1차 정확도의 upwind 기법을 이용하였기 때문인 것으로 판단된다.

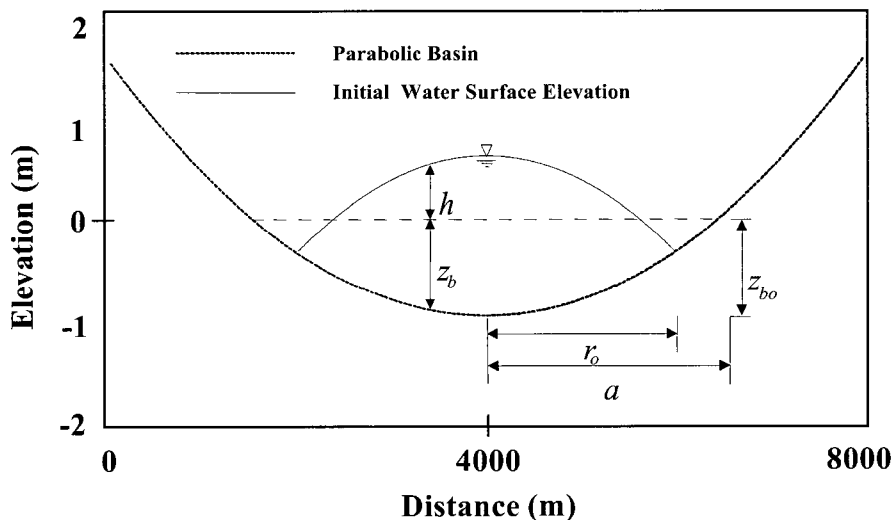
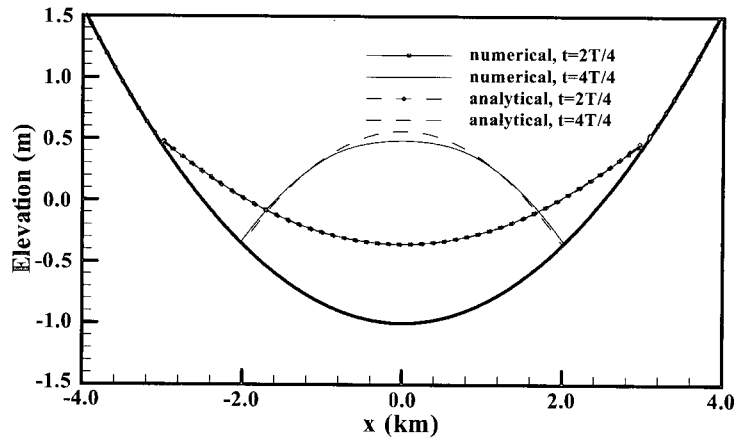
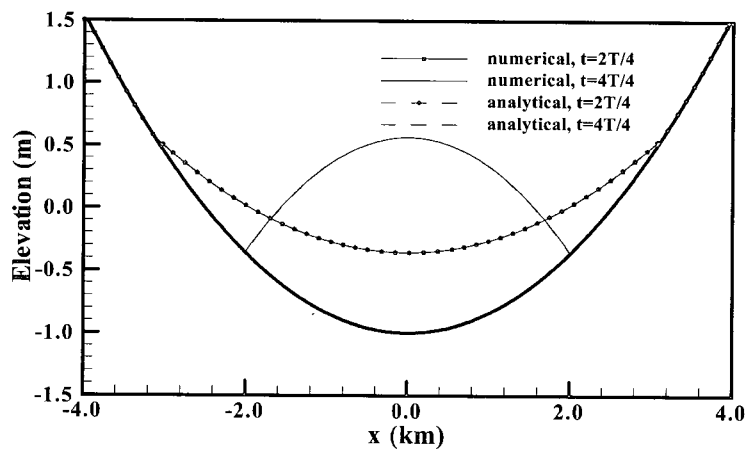


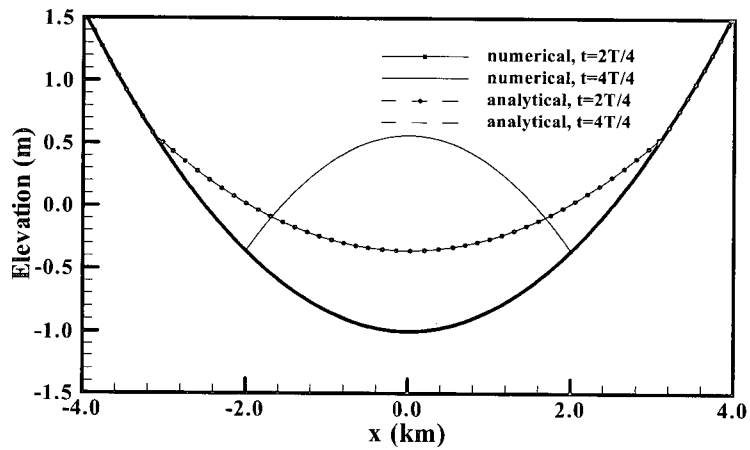
그림 1. 수조와 초기수면 모식도



(a) Liu 등 (1995)



(b) 인태훈과 조용식 (2003)

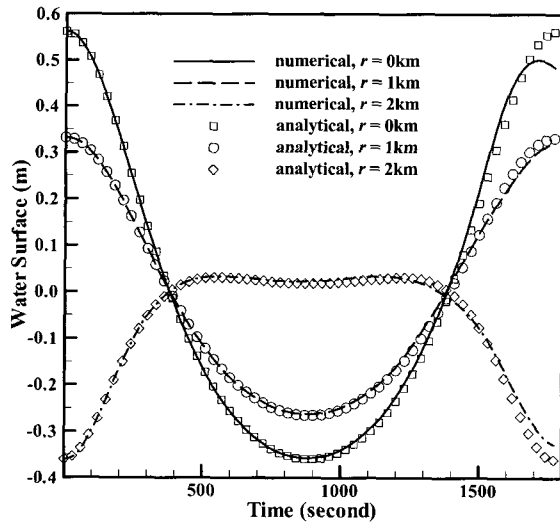


(c) present study

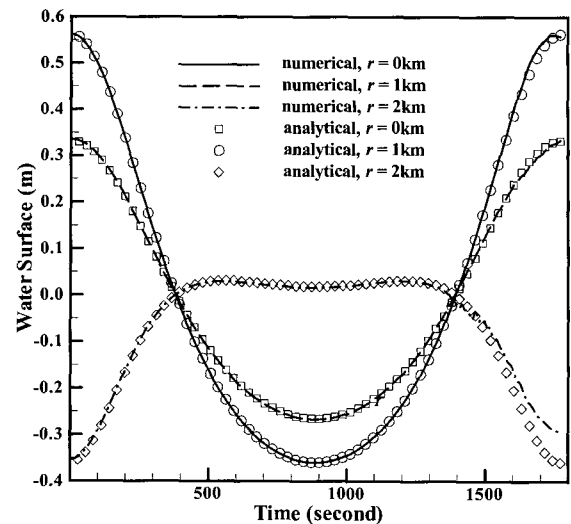
그림 2. 자유수면변위의 비교

그림 3은 수조 중심으로부터의 거리가 각각 0km, 1km 및 2km 인 지점에서의 시간에 따른 수위를 도시한 것으로, HLLC approximate Riemann solver를 이용한 수치모형이 해석해와 가장 잘 일치하고 있음을 보여

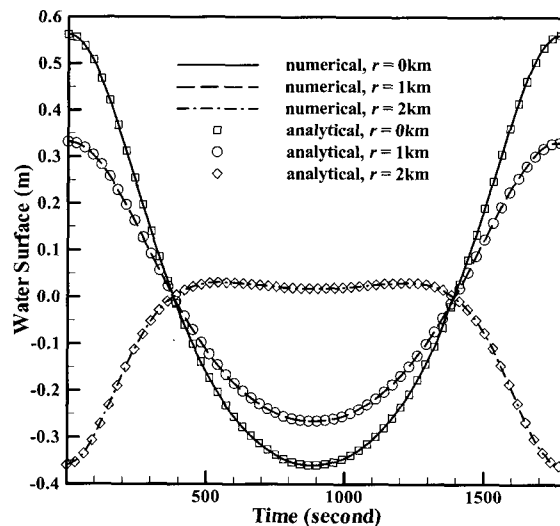
준다. 그림 3(a)에 나타난 것과 같이, 1차 정확도의 upwind 기법에 의한 수치해는 시간의 경과에 따라 $r=1\text{km}$ 및 $r=2\text{km}$ 지점에서 해석해와의 차이가 증가한다. 또한, 2차 정확도의 upwind 기법에 의한 수치해는



(a) Liu 등 (1995)



(b) 인태훈과 조용식 (2003)



(c) present study

그림 3. 시간에 따른 지점별 수치해와 해석해의 자유수면변위 비교

시간의 경과에 따라 $r=2\text{km}$ 지점에서 해석해와 차이가 발생하였다. 반면에, HLLC approxiamte Riemann solver를 이용한 수치기법에 의한 수치해는 시간과 위치에 관계없이 해석해와 매우 잘 일치하고 있다.

그림 2와 그림 3으로부터 HLLC approxiamte Riemann solver를 이용한 수치모형은 경사지형에서 장파의 처오름 현상으로 인한 이동경계 현상을 비선형 천수방정식을 해석하여 매우 정확히 모의할 수 있음을 검증하였다. 따라서, 조석이나 지진해일에 의한 해안에서의 파랑의 처오르내림 예측에 적용할 수 있음을 보여준다.

두 번째 예제는 원형섬 주변에서 고립파의 진행과 처오름 현상을 모의한 것으로 그림 4와 같은 미국 육군

공병단 해안공학연구소의 대형 수조에서 수리실험을 수행한 결과에 대한 것이다. 수조는 직사각형 형태로 가로 폭이 30m이고 측벽의 길이가 26m이며, 수조의 중심인 $x=15\text{m}$, $y=13\text{m}$ 지점에 원형섬이 위치하도록 하였다. 그림 4의 30m 변의 한 쪽에 60개의 소형조파기로 구성된 길이 27.432m의 directional spectral 조파기를 설치하여 파랑을 발생시켰다.

수리실험에서 발생시킨 입사파의 파봉선 $h=6.401\text{m}$, 13.259m , 20.117m 및 27.432m 이었으며, 수심 0.32m 에 대한 입사파의 진폭의 비로 정의되는 비선형성 ϵ 의 값을 0.05, 0.1, 0.2로 변화시키며 실험을 수행하였다. 또한, 실험에서 그림 5에 도시된 위치에서 시간경과에 따른

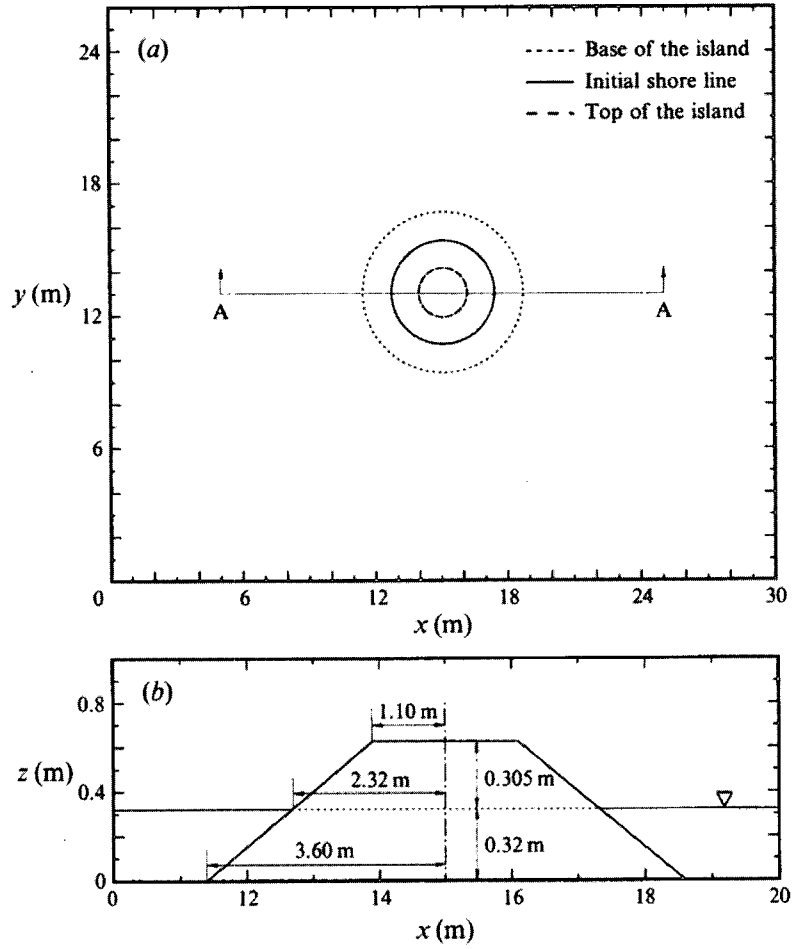


그림 4. 수리모형실험에서 사용된 수조와 원형섬의 단면

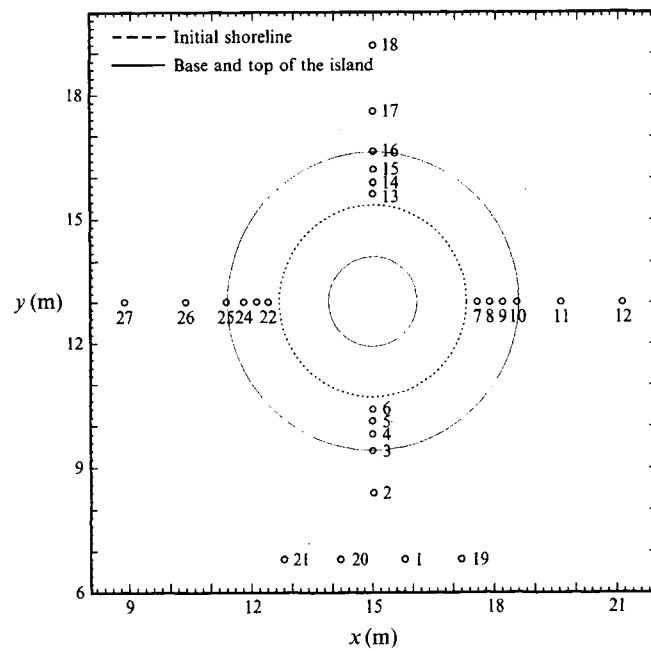


그림 5. 수리모형실험에 사용된 파고계 위치

수위 변화를 기록하였으며, 원형섬을 중심으로 $\pi/8$ 간격으로 섬 위로의 최대 처오름높이를 관측하였다.

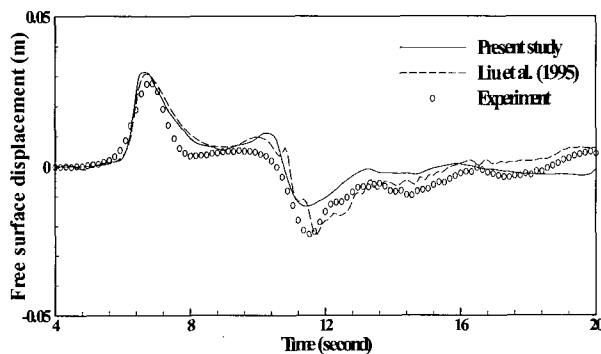
본 연구에서는 $l=27.432\text{m}$ 와 $\epsilon=0.1$ 인 경우에 대한 수치모의를 수행하여 실험결과와 비교하였다. 또한, Liu 등(1995)과의 비교를 위하여 격자의 크기는 Δx 와 Δy 를 0.1m 로 하였고 마찰을 고려하지 않았다. 실험에 대한 보다 자세한 내용은 Liu (1995)등에 기술되어 있어 본 연구에서는 생략하였다.

그림 6은 몇 개의 관측지점에서 수치모의 결과와 실험관측으로 구한 시간에 따른 수위를 비교한 것이다. 그림 6(a)-(c)에 나타난 바와 같이 섬 앞쪽에 위치한 관측지점에서 입사파의 양상을 비교하여 보면, 실험의 경우 대칭형상을 이루고 있으나 수치모형에 의한 계산결과는 파랑이 선단부 쪽으로 경사져 있음을 나타내고 있다. 이와 같은 차이는 실제 자연현상에서 나타나는 분산효과(dispersive effects)가 수치모형에 반영되어 있지 않기 때문이다. 차이가 발생하는 두 번째 주요 원인은 수치모형에 벽면 경계로 transmissive 경계조건을 부여하였기 때문이다. 실험실에서는 벽면에 파랑이 도달할 때 일부가 반사되어 수조내로 다시 전파되는 것으로

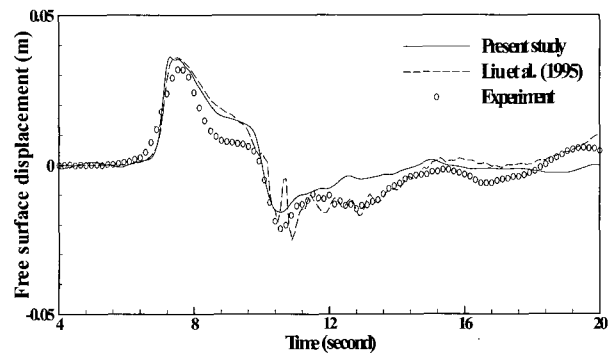
관측되었다.

두 수치모형 계산 결과 모두 실험결과와 전반적으로 잘 일치하고 있다. Liu 등(1995)이 제시한 계산결과가 처오름과 내림 현상이 끝난 직후 수치진동 현상이 발생하기는 하였으나 전반적으로 실험결과와 비교하여 HLLC approxiamte Riemann solver를 이용한 수치모형의 계산결과 보다 근접한 값을 제시하고 있다. 이는 비교 모형이 이산화 과정에서 수치적 분산효과가 Boussinesq 방정식의 분산효과를 나타낼 수 있도록 하였기 때문으로 판단된다(Liu 등, 1995). 본 연구에서 적용한 수치모형은 이를 고려하지 않아 분산효과가 나타나지 않았다. 상기 원인 등으로 인하여 실험결과와 정확히 일치하는 결과를 보이고 있지는 않으나 전반적으로 타당한 결과를 제시하고 있다.

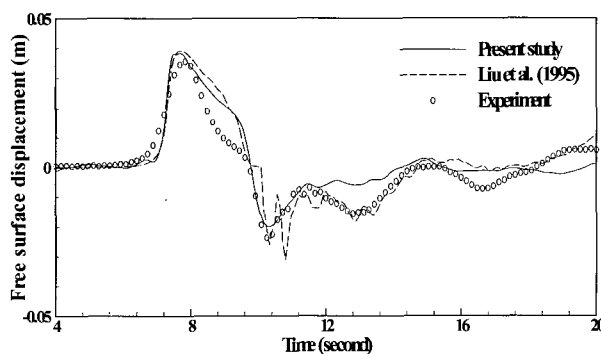
마지막으로, 그림 7은 최대 처오름높이에 대한 관측값과 수치해석 결과를 도시한 것이다. 앞에서 언급한 것과 같이 실험실에서 벽에 부딪힌 파랑의 일부가 수조내로 반사되었다. 그러나 반사된 파랑은 처오름높이에 영향을 주지 못하는 미미한 정도이며, 최대 처오름높이는 입사파에 의해 결정된다(Liu 등, 1995).



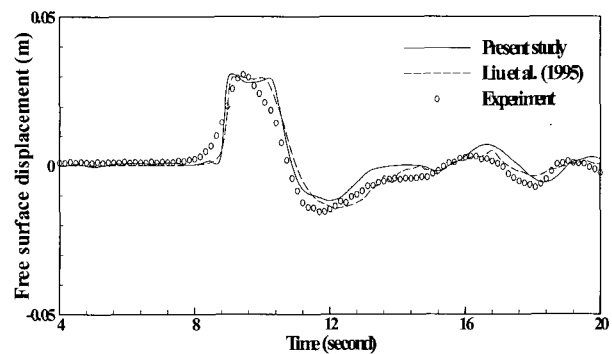
(a) gage 2



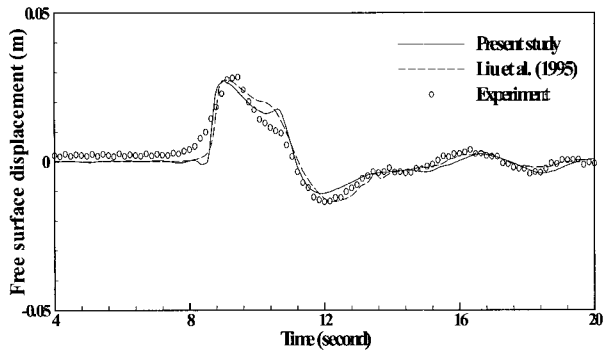
(b) gage 4



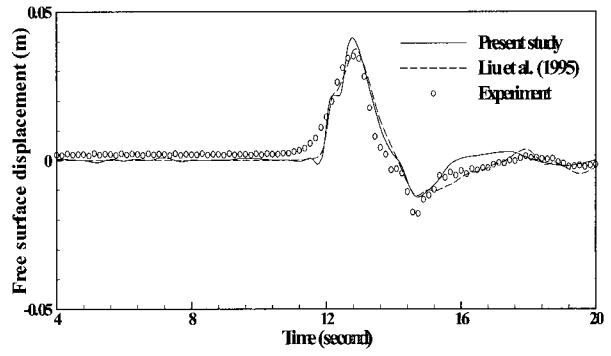
(c) gage 5



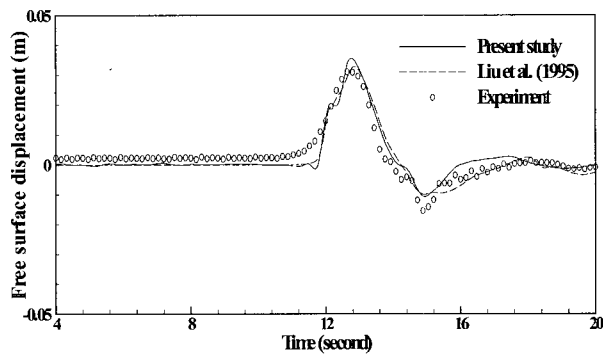
(d) gage 8



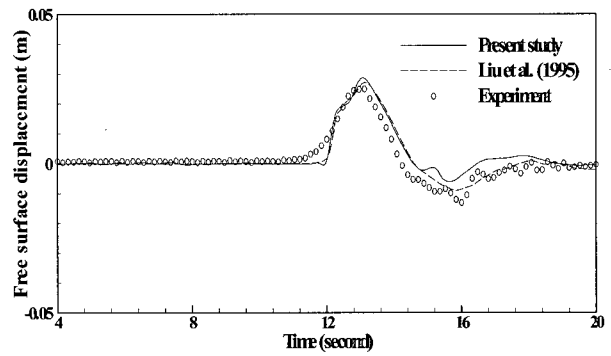
(e) gage 10



(f) gage 14



(g) gage 15



(h) gage 17

그림 6. 자유수면변위 비교

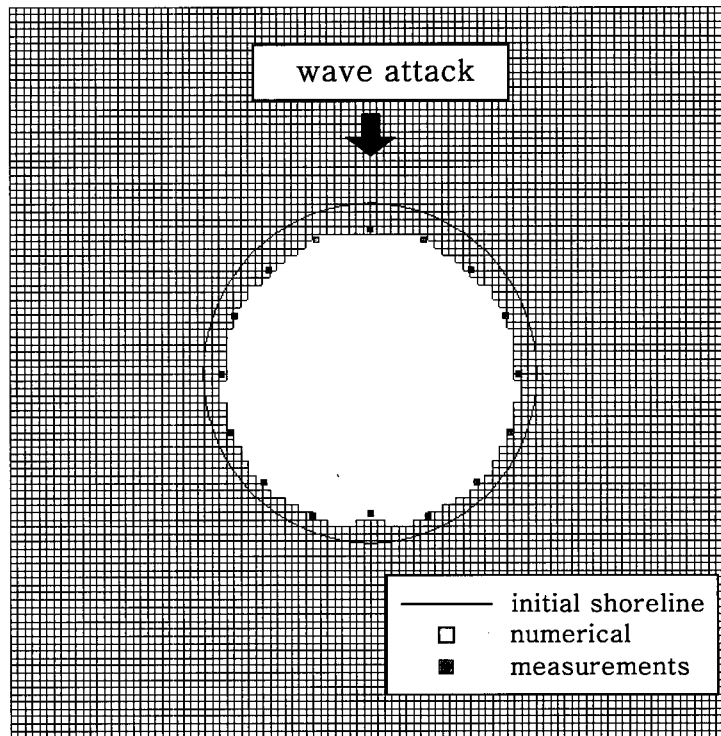


그림 7. 원형섬 주위에서의 최대 처오름높이 비교

수치모의 결과는 0.001m 보다 수십이 깊은 지점만을 나타내었다. 일반적으로 최대치오름은 섬의 앞부분에서 발생하고 섬을 따라 후미로 가며 점진적으로 줄어들게 된다. 그러나 섬의 배후에서는 섬에 의해 분리되었던 파랑이 충돌하며 치오름높이가 크게 증가하게 된다. 수치모의 결과와 실험결과 모두 이러한 현상을 정확히 재현하고 있다. 그림 7과 같이 두 결과는 잘 일치하고 있다. 수치실험 결과가 다소 크게 치오름높이를 예측하고 있는데, 이는 수치모의시 마찰을 고려하지 않은 점파 flux항과 source 항간에 균형을 이루지 못하기 때문인 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 HLLC approximate Riemann solver 를 도입한 수치모형을 이용하여 근해지진해일의 거동 예측에 관한 문제에 있어 해석해 및 실험결과와 비교하여 검증 수행하였다. 지배방정식의 이산화는 유한체 적법을 이용하였다. 모형의 정확성과 적용성의 검증을 위해 먼저, 포물형 수조에서 이동경계를 수반하는 수면 진동 문제를 해석하였다. 수치모의 결과는 해석해를 매우 정확하게 재현하였다. 다음으로, 원형섬에서 지진해일의 전파 및 치오름 과정을 수치해석하여 미국 육군 공병단 해안공학연구소에서 수행한 수리실험 결과와 비교하였다. 수치모형은 지진해일의 진행양상과 치오름 현상을 전반적으로 정확히 재현하였다. 따라서 본 수치모형이 근해지진해일의 전파와 치오름 해석에 적합한 것으로 판단된다.

본 수치모형은 지배방정식을 분산항이 포함되어 있지 않은 천수방정식으로 하였기 때문에 분산효과를 고려할 수가 없어 적용이 근해에 한정된다. 향후 이를 극복하기 위하여 천수방정식에 고려되어있지 않은 분산효과를 수치모형에 포함시키면 보다 정확한 모형을 개발할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었습니다(KRF-2003-041-D00573).

참 고 문 헌

김우구, 정관수, 김재한 (2003). "WAF 기법을 이용한 천수방정식 해석." **한국수자원학회논문집**, 제36권 제5호, 777-785.
 우승범, 조용식, Liu, P.L.-F. (1999). "Application of multi-grid coupled tsunami model to 1986 Hwa-lien (Taiwan) tsunami." **자연재해경감학술**

발표회 논문집, pp. 81-95.
 윤성범, 김진훈, 이종인 (1999). "완변수심상 지진해일 전파 수치모형의 일방향 분산보정." **대한토목학회 논문집**, 제19권 제2-5호.
 인태훈, 조용식 (2003). "2차 정확도 풍상차분기법을 이용한 유체의 주기적 거동 해석." **2003년도 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 1059-1062.
 최병호, 이호준 (1992). "동해 중부지진에 의한 쓰나미 산정." **한국해안해양공학회 학술발표회 논문집**, pp. 29-33.
 Billett, S.J. and Toro, E.F. (1997). "On WAF-type schemes for multidimensional hyperbolic conservation laws." *J. Comp. Physics*, 130(1), 1-24.
 Bradford, S.F. and Sanders, B.F. (2002). "Finite-volume model for shallow-water flooding of arbitrary topography." *J. Hydraul. Eng.*, 128(3), 289-298.
 Cho, Y.-S. and Liu, P.L.-F. (1999). "Crest length effects in nearshore tsunami run-up around islands." *J. Geophys. Res.*, 104, 7907-7913.
 Hu, K., Mingham, C.G. and Causon, D.M. (2000). "Numerical simulation of wave overtopping of coastal structures using the non-linear shallow water equations." *Coastal Engineering*, 41, 433-465.
 Hubbard, M.E. and Dodd, N. (2002). "A 2D numerical model of wave run-up and overtopping." *Coastal Engineering*, 47, 1-26.
 Kim, D.-H., Cho, Y.-S., and Kim, W.-G. (2004). "WAF-type scheme for shallow-water equations with fractional step method." *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 130, No. 2, 152-160.
 Kim, D.-H., Kim, W.-G., Chae, H.-S. and Park, S.-G. (2002). "Development of 2D dam break flow analysis model using fractional step method." *Water Engineering Research*, 3(1), 23-30.
 Lautenbacher, C.C. (1970). "Gravity wave refraction by islands." *J. Fluid Mech.*, 41, 655-672.
 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." *J. Fluid Mech.*, 302, 259-285.
 Smith, R. and Sprinks, T. (1975). "Scattering of surface waves by a conical island." *J. Fluid Mech.*, 72, 378-384.

Thacker, W.C. (1981). "Some exact solutions to the nonlinear shallow water wave equations." *J. Fluid Mech*, 107, 499-508.

Toro, E.F. (1999). *Riemann solvers and numerical*

methods for fluid dynamics, Springer.

(논문번호:04-66/접수:2004.07.12/심사완료:2004.09.10)