

디지털 수치수조 기법에 의한 연안 Tsunami의 수치 시뮬레이션

박종천* · 진호환*
*부산대학교 조선해양공학과

Numerical Simulation of a Near shore Tsunami Using a Digital Wave Tank Simulation Technique

JONG-CHUN PARK* and HO-HWAN CHUN*
*Dept. of NAOE, Pusan National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Nearshore Tsunami 연안 쓰나미, Nonlinear Wave Motions 비선형성 파동, CFD Technique CFD 기술, Navier-Stokes Equations N-S 방정식, Ohkushiri Island Ohkushiri섬, Digital Wave Tank 디지털 파랑수조, GIS Interface, GIS 공유

ABSTRACT: A Digital Wave Tank simulation technique, based on a finite-difference method and a modified marker-and-cell (MAC) algorithm, is applied in order to investigate the characteristics of nonlinear Tsunami propagations and their interactions with a 2D sloping beach, Ohkushiri Island, and to predict maximum wave run-up around the island. The Navier-Stokes (NS) and continuity equation are governed in the computational domain, and the boundary values are updated at each time step, by a finite-difference time-marching scheme in the frame of the rectangular coordinate system. The fully nonlinear, kinematic, free-surface condition is satisfied by the modified marker-density function technique. The near shore Tsunami is assumed to be a solitary wave, and is generated from the numerical wave-maker in the developed Digital Wave Tank. The simulation results are compared with the experiments and other numerical methods, based on the shallow-water wave theory.

1. 서 론

Tsunami는 해저나 해안지역에서 지각변동으로 인한 해표면의 변위차 때문에 주로 발생된다. 이 변위차에 기인하는 Tsunami의 초기 형상은 약 0.5에서 1.0m에 불과하지만 그 길이(파장)는 수심에 비해 아주 길어서 수백km가 넘기도 한다. Tsunami의 전파속도는 일반적으로 수심과 증력가속도와 곱에 대한 제곱근으로 계산되어지며, 예를 들어 3km의 수심에서는 분당 약 200km의 속도로 전파를 하게 된다. 그래서 심수역에서 발생한 Tsunami는 처음에는 빠르게 전파되며 연근해역에 접근함에 따라 수심의 급격한 감소로 인해 파형은 급준화되고 전파속도는 감소하게 된다. 따라서 Tsunami가 천수역인 해안, 만, 항구 등에 도달할 시점에는 파 에너지가 급준화된 파정부근에 집중하고 경우에 따라서는 30m가 넘는 파고를 이루기도 한다. 비록 해저지진의 발심원이 수심 키로나 떨어져 있다고 하더라도 Tsunami는 지형의 조건에 따라 단 몇 분도 걸리지 않아 해안선에 도달할 것이다.

전 세계적으로 1900년 이후의 Tsunami로 인한 희생자는 30,000명도 훨씬 넘는다. 참고를 위해 1900년 이후 대표적인

Tsunami 재해 기록을 Table 1에, 1900년 이후의 국가별 사망자 수를 Fig.1에 각각 표시한다(<http://www.ngdc.noaa.gov/seg/hazard/tsudb.html>). 최근에는 1998년 Papua New Guinea의 북서해안을 강타한 Tsunami에 의해 2,300명 이상의 희생자가 기록되었다(<http://www.adrc.or.jp>). 이와 같이 한번 발생하면 대규모의 인명피해를 내는 Tsunami 재해의 방제 대책으로, 최근에는 다양한 Tsunami 관측 시스템과 경보 시스템, 방파제, 피난 시스템 및 Tsunami 전파의 수치예측 시스템이 개발되고 있다. 이 가운데 수치예측 시스템이란 Tsunami의 발생과 거동을 수치적으로 예측해 낼 수 있고 Tsunami의 피해 방제에 적극 활용할 수 있기 때문에 그 효용 가치가 크며, 최근의 컴퓨터의 급속한 발전과 더불어 더욱더 각광을 받고 있다. 하지만, 현재까지 개발되어 온 기술들은 포텐셜의 이론에 근거한 천수파 이론이나, 수심방향의 유체 거동을 무시하는 정수압 근사를 이용하는 등 유동장을 선형적으로 취급한 예가 대부분이다(Yeh et al., 1995). 그러나 실제 연안에서의 Tsunami는 급준한 지형변화와의 상호간섭 및 쇄파현상 등을 동반하며 비선형성이 강한 거동을 보이기 때문에, 보다 정확한 수치예측을 행하기 위해서는 유동장의 비선형적인 3차원적 운동을 정확히 취급하는 것이 바람직할 것이다.

본 연구의 목적은, 디지털 수치수조 기법을 이용하여 대진폭의 비선형성이 강한 Tsunami 전파의 고정확도 예측 시뮬

제1저자 박종천 연락처: 부산광역시 금정구 장전동 산30
051-510-2480 jcpark@pusan.ac.kr

레이터를 개발하는 것이다. 또한, 지형정보시스템(GIS)과의 인터페이스 구축을 통해 가까운 장래에 연안유동 시뮬레이션의 다양한 응용력 확보를 꾀한다.

Table 1 The major Tsunamis since 1900

year	Name of the Tsunami	Striken Area	Number of Death
1902	El salvador earthquake	Central America	185
1906	Chile offshore earthquake	Chile	3,760
1922	Chile offshore earthquake	Chile	1,000
1933	Showa sanriku earthquake	Japan	3,064
1940	Peru offshore earthquake	Peru	250
1944	Showa south Nankai earthquake	Japan	1,223
1946	Showa nankai earthquake	Japan	1,223
1946	Aleutian Islands(Alaska)	Hilo(Hawaii)	173
1960	Chile offshore earthquake	Chile/Hawaii /Japan	5,700
1964	Alaska earthquake	Alaska	131
1968	The Philippines earthquake	The Phillippines	207
1974	Peru offshore earthquake	Peru	78
1976	Mindanao Island	The Phillippines	8000
1983	the middle of East Sea earthquake	Japan	100
1991	Costa Rica earthquake	Central America	75
1992	Flores	Indonesia	1,713
1992	Nicaragua	Central America	184
1993	Hokkaido south-west earthquake	Japan	230
1998	Sissano	Papua New Guinea	2,300

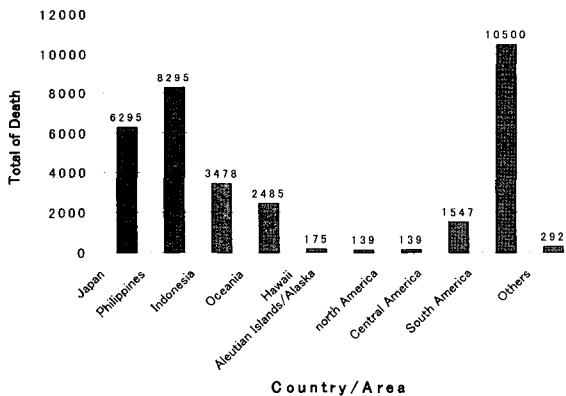


Fig. 1 The total of death by Tsunami since 1900

디지털 수치구조 기술은 Navier-Stokes와 연속방정식을 지배방정식으로 하며 개량된 MAC 알고리즘을 이용하는 유한차분법에 기초한다. 자유표면의 비선형적인 운동학적 조건은 밀도함수법에 의해 만족시킨다. 이 수치기술은 자유표면의 쇄파현상을 동반하는 비선형성 거동을 정도 높게 예측해 낼 수 있으며, 쇄파 후에도 계산을 지속할 수 있다. 유입조건인 연안 Tsunami는 고립파로써 가정을 하며, 디지털 수치구조의 유입경계면에 장착되어 있는 수치조파기에 의해 발생시킨다.

본 연구에서는, 수치조파기에 의한 Tsunami 생성에 관한 수치 조파 기술, Tsunami의 해저경사를 포함한 2차원 연직벽

면과의 상호간섭에 대한 수치 시뮬레이션, 그리고 실패역의 문제로서 Ohkushiri 섬을 강타하는 Tsunami의 비선형성 거동에 관해 수치 시뮬레이션을 각각 행하였다. 본 연구에서 시뮬레이션된 값들은 Yeh et al.(1995)에 소개된 실험치와 다른 이론에 의한 계산치, 그리고 관측치들과 비교되어 진다.

2. 디지털 수치구조의 시뮬레이션 기술

2.1 시뮬레이션 기법

디지털 수치구조 내의 비압축성 유동장을 풀기 위한 지배방정식은 다음과 같은 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식이다.

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = - \left(\frac{\nabla p}{\rho} + \frac{2}{3} k \right) + \mathbf{a} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

여기서,

$$\mathbf{a} = - (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + (\nu + \nu_s) \nabla^2 \mathbf{u} + (\nabla \nu_s) S + \mathbf{f} \quad (3)$$

$$S = \begin{matrix} 2 \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} & 2 \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} & \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} & 2 \frac{\partial w}{\partial z} \end{matrix} \quad (4)$$

위의 식에서 $\mathbf{u}=(u, v, w)$ 는 속도벡터, p 는 압력, ρ 는 밀도, t 는 시간, ∇ 는 구배 연산자이다. 또한, ν 는 층류에 관한 동점성계수, ν_s 는 SGS 난류 모델에 의한 eddy 점성계수이고, \mathbf{f} 는 중력을 포함한 외력을 각각 나타낸다.

지배방정식은 유한차분법에 의해 이산화되어지며, 개량된 MAC법의 알고리즘을 이용하여 매시간 스텝의 경계조건을 이용하여 풀리게 된다. 디지털 수치구조의 계산 알고리즘은 Park et al.(1999), 박종천(2003)과 유사하다.

대류항의 차분에는 3차의 MUSCL형 상류스킴을 적용하며, 그밖의 공간차분에는 2차의 중심차분을 사용한다. 시간에 관한 차분에는 2차의 Adams-Bashforth 법을 적용한다. 압력장을 풀기 위한 Poisson방정식의 해법에는 SOR법을 이용한다. 난류모델로는 SGS 난류모델을 적용한다.

급준한 파도나 쇄파 등의 비선형성이 강한 자유표면의 거동을 표현하기 위하여, 자유표면의 운동학적 조건을 식(5)과 같이 밀도함수의 수송방정식을 풀어내는 밀도함수법(Miyata and Park, 1995)에 의해 만족시킨다.

$$\frac{\partial M_p}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{u} M_p = 0 \quad (5)$$

여기서, M_p 는 전 계산영역에 정의되는 밀도함수이며 0과 1사이의 값을 취하게 된다. 즉, 자유표면을 경계로 하는 두 유체의 밀도함수 값을 각각 0과 1로 정의할 때, 자유표면은 $\overline{M_p} = \frac{M_p^1 + M_p^2}{2} = 0.5$ 의 등치면으로 가정할 수 있게 된다.

본 연구에서는, 자유표면의 보다 정확한 위치결정을 위해 식(5)를 직접 푸는 대신에 변환함수 ϕ 를 매개변수로 한 식(6)을 풀기로 한다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \mathbf{u} \phi = 0. \quad (6)$$

여기서, ϕ 는 자유표면으로부터의 거리함수를 적용한다.

식(6)에서 얻어낸 ϕ 의 공간상의 분포는 수치오차를 포함하고 있으며 이를 보완하기 위해 다음과 같은 Level-set 법의 재배치 알고리즘(Sussman et al. 1994)을 도입하기로 한다.

$$M_\rho = \begin{cases} M_\rho^1 & (\text{if } \phi > \epsilon_0) \\ M_\rho^2 & (\text{if } \phi < \epsilon_0) \\ \bar{M}_\rho + \tilde{M}_\rho(\phi/\epsilon_0) & (\text{otherwise}) \end{cases}. \quad (7)$$

여기서, $\bar{M}_\rho = \frac{M_\rho^1 - M_\rho^2}{2}$ 이며, $\epsilon_0 = 2(\Delta x)_{\min}$ 이다.

한편, 자유표면의 동역학적 조건은 자유표면상에의 속도 외삽과 Irregular Stars법을 이용해 만족시킨다.

2.2 디지털 수치수조의 벽면경계조건

디지털 수치수조의 각각의 벽면은 실험목적에 따라 크기와 형태, 성격 등이 유동적으로 변화시킬 수 있다. 기본적으로, 해저 지형 및 물체표면을 포함한 모든 벽면은 no-slip 조건을 적용하는 마찰벽면이나 free-slip 조건을 적용하는 미끄럼벽면으로 가정하며 문제의 성격에 맞추어 선택할 수 있다. 또한, 반사파가 문제가 되는 실험 등에서는 이를 막기 위하여 수치 소파영역이 설치된 완전 개경계 조건(Park et al. 1999)이나 약한 개경계 조건(Kim et al. 2002)을 적용할 수 있도록 옵션이 설정되어 있다.

연안류 시뮬레이션의 경우, 국부파고의 시간변화에 따라 해저지형이 물속에 잠기거나(submerged) 물밖으로 노출되는(dried) 격자가 나타나기도 하는데, 이때 육지내 격자에 정의되는 파고는 기본적으로, Fig. 2에서 보여주듯이, 유체영역으로부터 해안선의 법선방향 구배가 제로가 되도록 외삽한다. 또한, 자유표면 상방의 속도분포는 Fig. 3과 같은 방법으로 외삽한다.

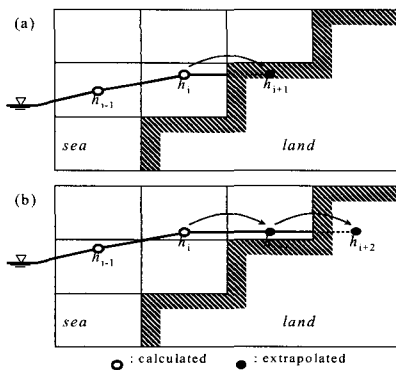


Fig. 2 Extrapolation of wave height; (a) case of a dried cell and (b) case of a submerged cell

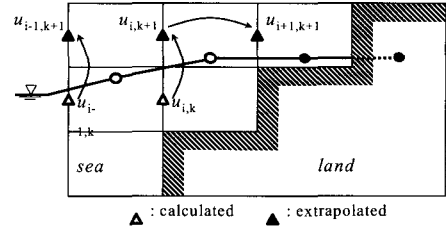


Fig. 3 Extrapolation of velocity onto free-surface

2.3 Tsunami 생성에 관한 수치조파 기술

본 연구에서는 연안에 도달하는 Tsunami를 단순한 고립파로 가정하고 디지털 수치수조 내의 수치조파 기술을 이용하여 고립파 생성에 대한 조파기술을 확립한다.

고립파 생성에 관한 기술로는 세 가지 방법을 들 수 있다. 첫 번째는 디지털 수치수조 내에 고립파의 초기 프로파일을 직접 적용하는 방법(Case1)이며, 두 번째는 입구경계의 파고를 수치적으로 조절하는 방법(Case2)이다. 세 번째는 물리실험에서와 같은 방법으로 수치조파기에 이동속도를 제공하는 방법(Case3)이다.

Case1의 경우, Bousinesq의 근사식을 이용해 얻어낸 고립파의 파형을 디지털 수치수조 내에 초기설정하며, 그와 동시에 흐름장의 속도분포와 압력분포를 각 계산격자에 초기조건으로 주게 된다(Chan and Street, 1970).

Case2의 경우, 일반적으로 Bousinesq의 근사식으로부터 매시간 스텝의 파고를 얻어내며, 입구경계에의 수치조파기에 속도 조건 대신 파고변화를 적용하게 된다(Hino et al., 1983).

Case3의 경우, 피스톤형의 수치조파기를 도입하며 그에 대한 이동변위는 다음 식(8)을 따른다고 가정한다.

$$\xi_{(cm)} = A_1 \tanh(A_2 t - A_3). \quad (8)$$

여기서, A_1, A_2, A_3 는 고립파의 진폭, 주기, 위상차를 나타내는 계수이다. Fig. 4에는 조파기의 이동변위에 대한 시간변화를 나타낸다. 수치조파기는 실제로 고정된 벽으로 가정을 하고 있기 때문에 이동변위를 조건으로 주는 대신에 식(9)와 같은 조파기의 이동속도에 대한 값을 경계 값으로 주게 된다.

$$u_{(cm/sec)} = A_1 A_2 \operatorname{sech}^2(A_2 t - A_3). \quad (9)$$

Fig. 5에는 세 가지의 방법에 의해 생성한 고립파의 파형을 비교했다. 단, 그림의 횡축에 나타낸 파고는 목적 파고인 0.032m로 무차원화시켰다. 각각의 방법에는 장단점이 있지만, 최종적으로 얻어낸 결과는 상호 일치함을 알 수 있다. Fig. 6은 파고의 시간변화에 대한 Case3의 결과와 실험 계측값(Liu et al. 1995)을 비교하였으며, 고립파 생성에 대한 타당성을 입증한다.

3. 연직벽면상의 Tsunami Runup 시뮬레이션

3.1 실험 모델

본 연구에서는, 해저지형을 포함하는 연직벽면상의 Tsunami Runup(Briggiss et al., 1995)에 관한 수리실험을 다

지털 수치수조 내에 재현하였다. Fig. 7에는 2차원 수리수조와 파고계의 위치를 나타낸다. 수조의 길이는 총 23.23m이며, 수치조파기로부터 21.8m 떨어진 지점까지는 21.8cm의 일정한 수심을 갖는다. 그 후 해저지형은 세부분에 걸쳐 기울기(1:53, 1:150, 1:13)가 변하게 되는데, 이것은 Massachusetts의 Revere 해안을 모사한 것이라고 한다. 수조 중앙부분(y=0)에는 10개의 파고계를 설치하여, 입사파와 반사파에 대한 파고의 시간변화를 계측하였다.

수조입구에 설치된 조파기로부터는 세 종류의 기울기($\epsilon = 0.05, 0.3$ & 0.7)를 갖는 Tsunami가 생성되며, 편의상 각각의 경우를 Case A, Case B, 그리고 Case C로 구분하기로 한다. 이때 입사파의 기울기(ϵ)는 입사파의 진폭(η_i)과 수심(d)의 비로써 나타낸다. Fig. 8에는 고립파 생성을 위한 실제 조파기의 이동변위를 나타내며, 식(8)에 의해 근사된 값들을 함께 비교하였다. Table 2에 보이는 바와 같이, 각각의 경우에 있어서 근사된 값들은 Case A:2.2%, Case B:2.1%, Case C:4.2%의 오차한계를 갖는다.

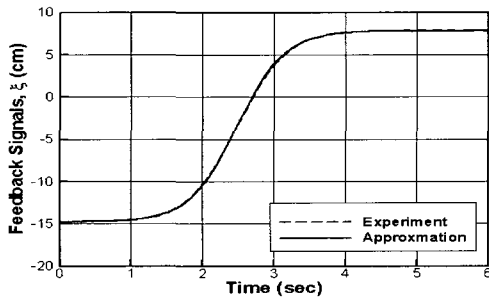


Fig. 4 Wave paddle trajectories for generation of solitary wave (Tsunami)

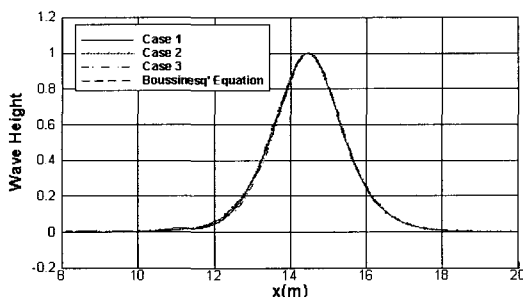


Fig. 5 Comparison of fully-developed tsunami profile

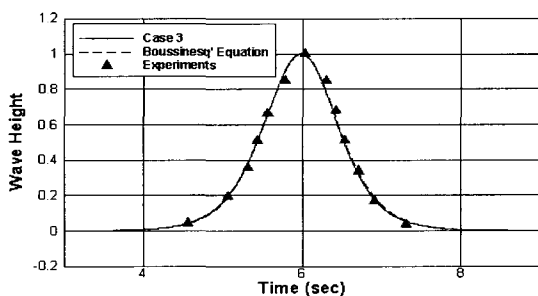


Fig. 6 Comparison of wave height

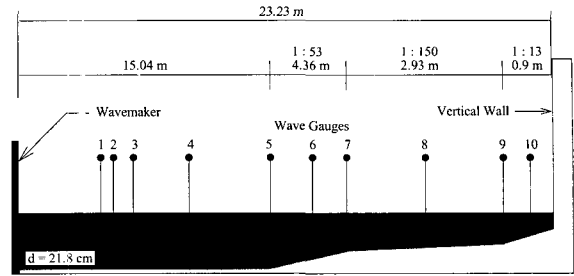


Fig. 7 Schematic view of 2D wave flume and gauge placements

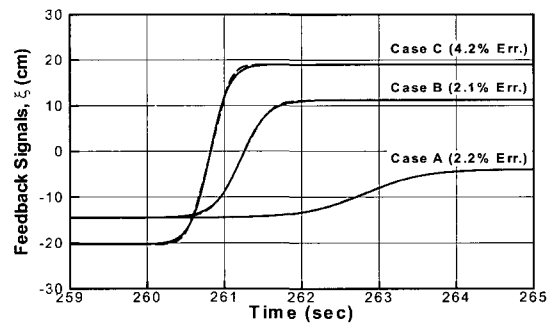


Fig. 8 Wave paddle trajectories for 2D simulation of Tsunami runup (solid lines: experiments, long-dashed lines: approximation)

Table 2 Approximate equations of the wave maker movements and the maximum error between the experiments

Case	$\xi_{(cm)} = a \tanh \{ b(t - 258) - c \} - d$				Max. Error
	a	b	c	d	
A	5.275	1.30	6.26	9.245	2.2%
B	12.85	2.93	9.42	1.63	2.1%
C	19.63	3.70	10.41	0.67	4.2%

3.2 시뮬레이션 결과

먼저, 3.1 절에서 설명한 세가지의 경우(Case A,B,C)에 있어서 입사파인 고립파를 수치적으로 재현한 결과, Table 3에 보이는 바와 같이, Case A와 Case B의 경우 조파기 근처에서의 파고가 수치실험 결과와 일치하는 반면, Case C의 경우에는 설정 파고에 비해 30%가량 적게 재현이 되었다. Case C의 경우, 수치 조파기 근방에서 쇄파현상이 동반되어 목적 파고에 비해 충분한 파고를 얻을 수 없었다. 이에, Case C에 대하여 앞서 언급한 조파방법인 Case 1과 2의 방법을 적용하였다. 그 결과, 수치 조파기 근처에서의 쇄파현상은 나타나지 않았지만 파동의 전파과정에서 급격한 에너지 감소를 보였으며, 전체적으로 만족하지 못할 결과를 얻었다. 하지만, Case C의 경우 수치실험(Briggs et al., 1994)에서도 쇄파에 대하여 언급되어 있는 점을 고려해 본다면, Case C의 보다 정확한 재현을 위해서 쇄파현상에 기인한 에너지 소산(dissipation) 메커니즘을 고려하는 등 현 수치해석 기술에 대한 개선이 필요할 것이다.

다음에, 격자 크기($\Delta x, \Delta y$) 및 시간 증분(Δt)이 각각 다른 10종류의 수치실험을 행하고, 그 중 가장 타당한 시뮬레이션 조건을 택하여, 본 계산을 수행하였다. 그 결과 Table 4와 같은 조건을 얻을 수 있었다.

Case A, B, C에 대한 시뮬레이션 결과를 Fig. 9, Fig. 10, 그리고 Fig. 11에 각각 표시한다. Case A와 B의 경우에 있어서, 실험값들과 정성적 및 정량적으로 일치하고 있으며, 특히 연직벽면에 충돌한 뒤 반사하는 비선형성이 강한 반사파가 정확하게 재현되고 있음을 알 수 있다. 한편, Case C의 경우에 있어서는, 초기 입사와 재현의 실패로 인해 전반적으로 파고가 적게 재현이 되고 있지만, 수치실험의 결과에서 연직벽면에 가까워짐에 따라 파고가 현저히 감소하는 경향을 보이고 있다. 이것은 파동의 전파과정에서 발생한 쇄파현상에 의한 에너지 소산을 포함하고 있기 때문이다(Briggs et al., 1994).

Table 5에는 연직 벽면상의 최대 runup을 실험 및 Yeh et al.(1995)의 workshop에 제출된 타 연구결과를 비교하였다. Case A와 Case B의 경우, 본 연구결과는 타 계산결과에 비하여 수치실험과 좋은 일치를 보이고 있다. Case C의 경우, 벽면에서 수치실험과 정량적으로 일치하고 있지만 다소 신뢰감이 없는 결과라고 할 수 있다.

Fig. 12는 Case B의 경우에 있어서 Tsunami가 연직벽면에 도달한 순간을 포착한 것이며, 수심의 감소로 인해 급준해진 파도가 연직벽면에 충돌하여 벽면상에 sheet 형태의 jet를 이루고 있는 모습이 보인다. 즉, Case B에 비해 파고의 기울기가 더 큰 경우 쇄파현상이 현저하게 되며 쇄파현상을 동반하게 된다는 사실을 이해할 수 있다.

Table 3 Experimental and numerical data of ϵ

Case	Target ϵ	Exp. ϵ	present ϵ
A	0.05	0.039	0.040
B	0.30	0.264	0.267
C	0.70	0.696	0.490

Table 4 Condition of simulation

Case	Δx (cm)	Δy (mm)	Δt (sec)
A	5	1.1	1/1500
B	4	2	1/3000
C	3	2	1/4000

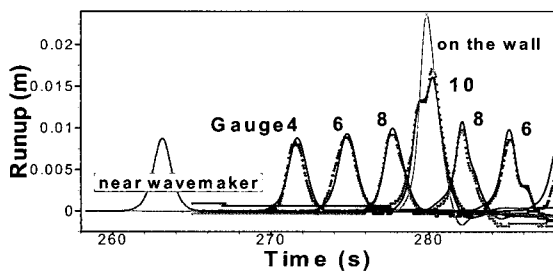


Fig. 9 Time history of 2D Tsunami runup in the case of $\epsilon = 0.05$ (—: the simulated results, : experiments)

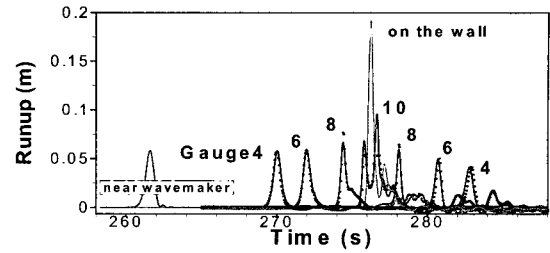


Fig. 10 Time history of 2D Tsunami runup in the case of $\epsilon = 0.3$ (—: the simulated results, : experiments)

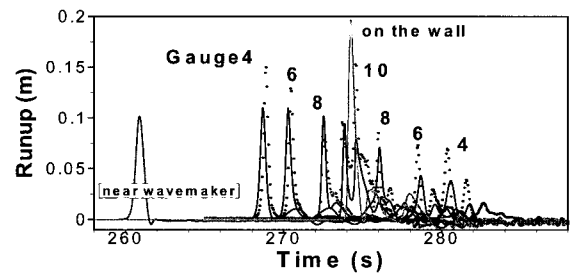


Fig. 11 Time history of 2D Tsunami Runup in the case of $\epsilon = 0.7$ (—: the simulated results, : experiments)

Table 5 Maximum runup on the vertical wall

Researchers	max. runup/depth		
	Case A	Case B	Case C
Briggs et al.(Experiments)	0.13	2.10	1.26
present results	0.124	1.712	1.235
Kobayashi & Tega	0.124	0.459	0.674
Grilli	0.116	0.435	-
Kanoglu & Synolakis	0.147	0.881	2.055
Takagi	0.101	1.514	-
Walters	0.106	0.367	0.734
Watson et al.	0.132	0.504	0.851
Gardarsson	0.110	0.294	0.395
Kennedy	0.099	3.564	-

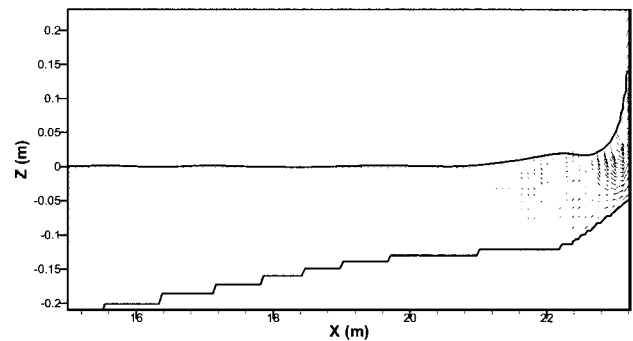


Fig. 12 Typical wave profile and velocity vector of 2D Tsunami runup near vertical wall in the case of $\epsilon = 0.3$ (Case B)

4. Okushiri 섬 주위의 Tsunami 시뮬레이션

본 연구에서는, 1993년 7월 12일 Hokkaido 남서해안에서 강도 7.8의 지진으로 인해 발생한 Tsunami가 Hokkaido의 서쪽에 위치한 Okushiri 섬을 강타한 사건(Takahashi, 1995)을 수치적으로 모델링하여 시뮬레이션하였다. Fig. 13은 Okushiri 섬 주위의 수심을 나타낸다. 섬의 정서쪽은 최대수심 3400m이며, 섬 근처에서 급격한 수심의 변화를 보인다.

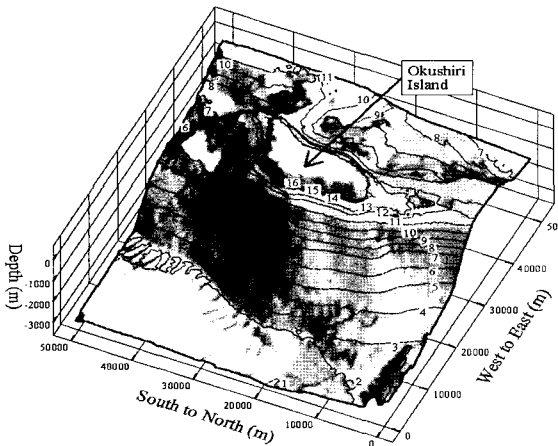


Fig. 13 Bathymetry around the Okushiri Island

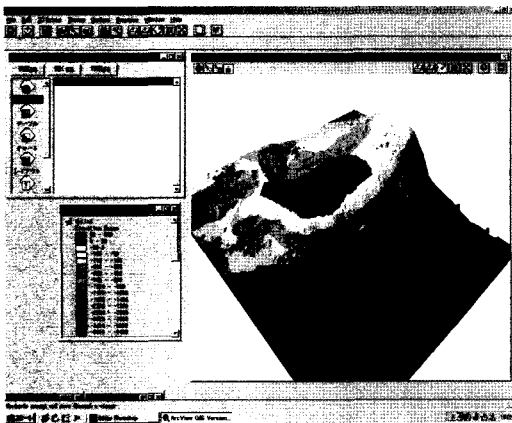


Fig. 14 3D view of converted grid by "ArcView GIS"

4.1 GIS를 이용한 실해역 격자생성

해도로부터 추출한 실해역의 지형 데이터를 입력하여 시뮬레이션에 필요한 격자를 생성하도록 지리정보시스템(GIS) 소프트웨어인 ArcViewGIS(<http://www.esri.com/software/arcgis/arcview/inex.html>)와의 인터페이스를 구축하였다. 이는, 비록 현실에서는 GIS의 해양정보 확보 및 그 활용이 미약한 실정이지만, 가까운 장래에 GIS의 해양정보를 공유하여 실시간 시뮬레이션 시스템을 구축하기 위한 발판을 마련해 놓기 위해서다. Fig. 14에는 ArcViewGIS를 이용하여 Okushiri 섬 주위의 해역에 관한 격자생성 작업의 한 예를 보인다.

Okushiri 섬 주변에 관한 450m 간격의 실해역 데이터를 GIS

를 이용하여 convert시킨 뒤, 400m와 350m 간격의 시뮬레이션 격자를 생성하였다. 이때, 데이터의 보간에는 ArcViewGIS의 IDW(Inverse Distance Weighted) 보간자를 사용하였으며, 이는 보간하려는 점 주위의 8점을 이용하는 보간법이다.

4.2 Tsunami의 초기 조건

Hokkaido 서남부 지진 이후에 7종류의 단층모델이 서로 다른 연구기관으로부터 제안이 되었다. 하지만, 그러한 단층모델들의 정확성을 판단할 수 있는 확고한 이론은 아직 없다. 따라서, 본 연구에서는 단층모델에 의한 Tsunami의 재현이 아닌, 단순한 평면 고립파를 가정하여 평면적인 고립파가 실해역에서 전파되어지는 과정과 섬주위에서 측정되는 최대 파고치를 예측하는데 주안을 두기로 한다. 즉, 실해역의 연안 모형이 설치되어 있는 디지털 수조내의 수치조파기로부터 평면 고립파를 생성한다. Tsunami의 초기 주기(T)와 파고(H)는 7종류의 단층모델로부터 대략 그 평균적인 값인 T=4min과 H=4.9m를 선택하였다.

4.3 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 격자의 크기가 다른 세가지 경우에 대하여 수행하였다. 편의상, 450m의 격자를 이용한 경우를 Case-450, 400m의 경우는 Case-400, 350m는 Case-350이라고 한다.

Fig. 15에는 Case-350의 Okushiri 섬 정서쪽에 설치한 수치조파기로부터 평면 Tsunami가 생성되고 전파되어 Okushiri 섬을 습격하는 모습을 보인다. 섬의 서북쪽에 먼저 도달한 파도는 그 이후 섬 전체를 휘감듯이 휩쓸며 전파되고 있다.

Table 6는, Fig. 16에 표시한 섬의 각 지점에서의 최대 파고치를 비교하였다. 전체적으로 격자가 조밀함에 따라 정확도가 향상되고 있으며, 관측치와 비교하여 정성적인 일치를 보이고 있다. Kuki Point와 Monai에서는 정량적으로 차이를 보이고 있는데, 그 이유로는 큰 격자간격으로 인한 복잡한 해안선의 단순화와 파도의 수치적 소산화를 들 수가 있다.

Table. 7에는 Tsunami가 Monai로부터 Aonae West에 도달한 시가를 실제 관측치와 함께 비교하였다. 여기서 실제 관측치는 Tsunami 발생 후에 파견된 조사단이 침수되어 고장난 시계 등으로부터 얻어낸 정보이다 (http://www.pmel.noaa.gov/tsunami/okushiri_devastation.html). 본 방법에 의한 결과는 실제 관측치에 비해 다소 늦게 추정이 되고 있는데, 이는 Monai에서의 최대파고가 실제보다 작게 추정된 점에 기인한다고 볼 수 있다.

Table 6 Maximum runup at major locations

Locations	Case-450	Case-400	Case-350	Surveyed
Inaho	9.3	10.0	10.7	10.0
Minouta	6.9	7.3	7.9	5.0
Horonai	7.3	7.4	8.4	6.0
Kamuiwaki	7.4	8.1	8.7	6.0
Monai	11.8	12.0	12.2	21.0
KukiPoint	12.1	12.1	12.2	22.0
Aonae West	4.0	4.2	4.0	7.0

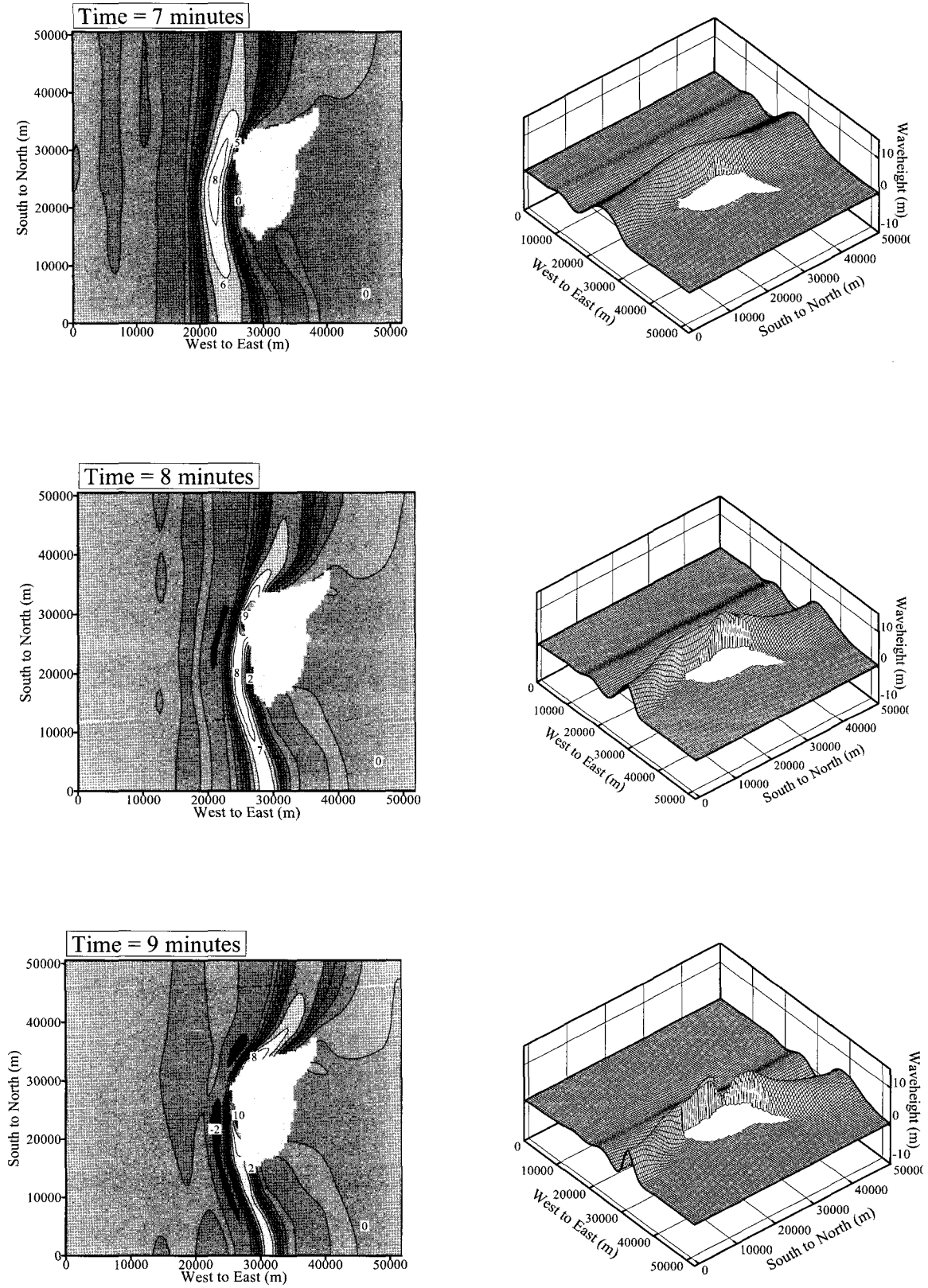


Fig. 15 Time sequences of Tsunami propagation attacking Ohkushiri Island; left: 2D contour, right: 3D snapshot

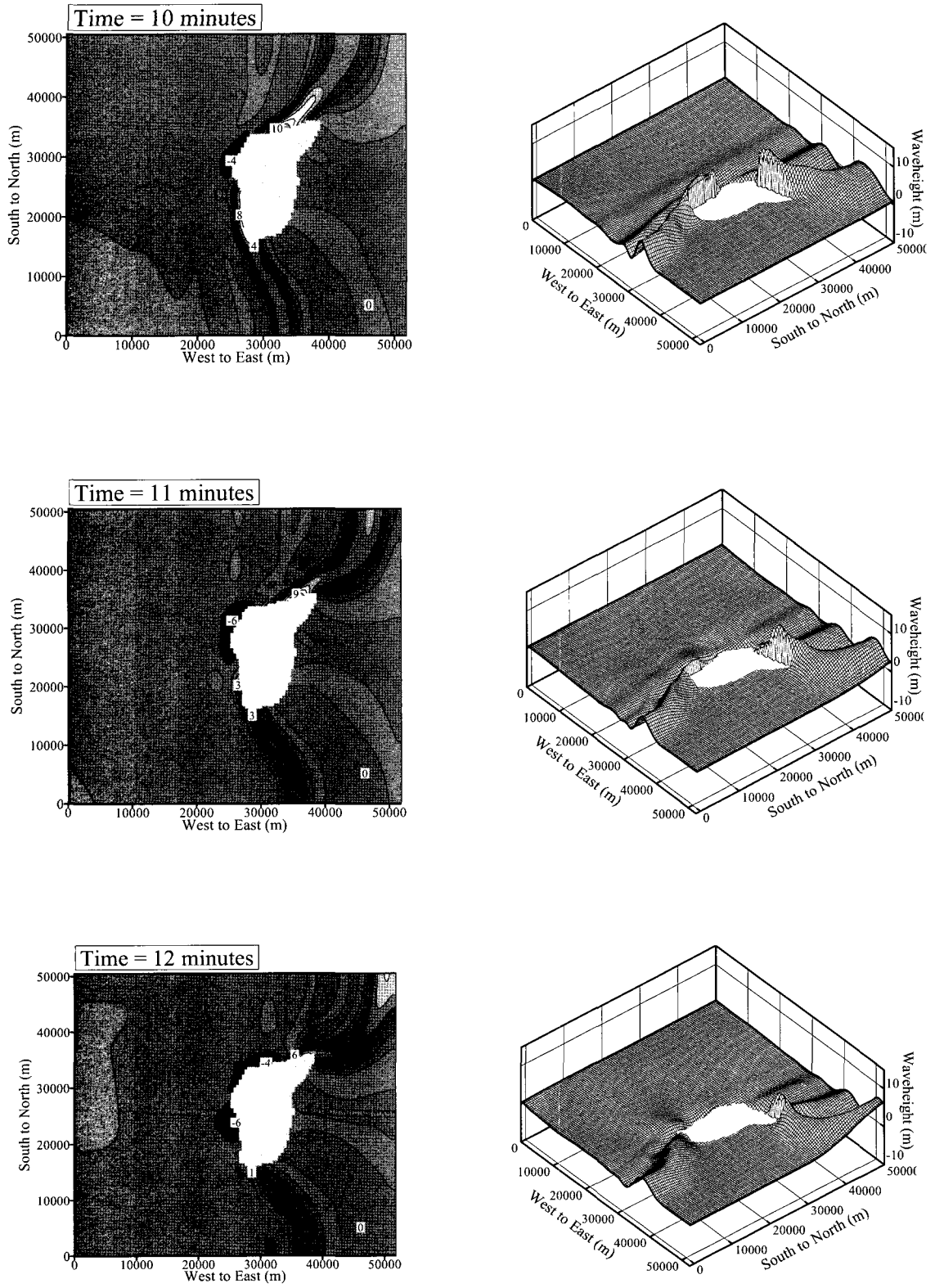


Fig. 15 Continued

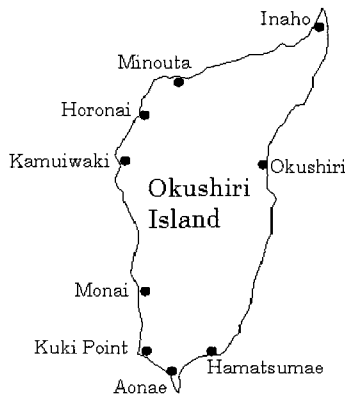


Fig. 16 Locations of towns in Okushiri Island

Table 7 Arrival time of Tsunami (minute)

Locations	Case-350	Surveyed
Monai	0	0
Aonae West	1.1	0~1

5. 결 론

본 연구에서는, 디지털 수치수조 기법을 이용하여 대진폭의 비선형성이 강한 Tsunami 전파의 고정확도 예측 시뮬레이터를 개발하여, 2차원 해저지형을 포함한 연직벽면상의 Tsunami runup문제와 Okushiri 섬 주위의 Tsunami 전파에 대한 문제에 적용해 보았다. 또한, 실해역의 지형데이터를 입력하여 시뮬레이션에 필요한 격자를 생성할 수 있도록 지형정보시스템(GIS)과의 인터페이스를 구축하였다. 이는 가까운 장래에 GIS의 실해역 해상데이터를 바탕으로 보다 실제에 근접한 해양 및 연안류 시뮬레이션 시스템을 구축하기 위한 시도이며, 이 분야에 있어서 다양한 응용력 확보에 크게 기여할 것이다.

후 기

이 연구는 해양수산부 해양한국발전 프로그램(KSGP)의 지원에 의해 연구되었습니다.

참 고 문 헌

박종천 (2003), "해양환경공학의 다목적 시뮬레이션을 위한 수치파랑수조 기술", 한국해양공학회지, 제17권, 제4호, pp 174-180.
 Abe, K. (1989), "Estimate of Tsunami Heights from Magnitude of Earthquake and Tsunami.", Bulletin of Earthquake Research Institute University of Tokyo, Vol

64, pp 51-69.
 Briggs, M., Synolakis, C.E., Kangolu, U. and Green, D.R. (1994), "Benchmark Problem 3: Runup of Solitary Waves on a Vertical Wall.", U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg.
 Chan, R.K.C. and Street, R.L. (1970), "SUMMAC-A Numerical Model for Water Waves", Technical Report No 135, Dept. of Civil Engineering, Stanford University.
 Hino, T., Miyata, H. and Kajitani, H. (1983), "A Numerical Solution Method for Nonlinear Shallow Water Waves (1st Report)", J. of The Society of Naval Architects of Japan, Vol 153, pp 1-12.
 Kim, M.H., Niedzwecki, J.M., Roesset, J.M., Park, J.C., Tavassoli, A. and Hong, S.Y. (2000), "Fully Nonlinear Multi-Directional Wave Simulations By 3D Numerical Wave Tanks", J. of OMAE, ASME Transaction, Vol 123, pp 124-133.
 Liu, P.L.F., Cho, Y.S., Briggs, M.J., Kanoglu, U. and C.E. Synolakis (1995), "Runup of solitary waves on a circular island", J. Fluid Mech., Vol 302, pp 259-285.
 Miyata, H. and Park, J.C. (1995), "Ch.5: Wave Breaking Simulation", Potential Flow of Fluids, ed. M. Rahman, Computational Mechanics Publications, UK., pp 149-176.
 Park, J.C., Kim, M.H. and Miyata, H. (1999), "Fully Nonlinear Free-Surface Simulations By a 3D Viscous Numerical Wave Tank", Int. J. for Numerical Methods in Fluids, Vol 29, pp 685-703.
 Sussman, M., Smereka, P. and Osher, S. (1994), "A Level Set Approach for Computing Solutions to Incompressible Two-Phase Flow", J. of Comp. Physics, Vol 114, pp 272-280.
 Takahashi, T. (1995), "Benchmark Problem 4: The 1993 Okushiri Tsunami-Data, Conditions and Phenomena" Long-Wave Runup Models, pp 272-280.
 Takahashi, T., Sudo, N., Imamura, F. and Ortiz, M. (1994), "Fault Model to Explain the Tsunami of Hokkaido Nansei-Oki Earthquake", Coastal Engineering Journal, Vol 41, pp 251-255.
 Titov, V.V. and Synolakis, C.E. (1998), "Numerical Modeling of Tidal Wave Runup". J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol 124, No 4, pp 157-170.
 Yeh, H., Liu, P. and Synolakis, C. (1995), International Workshop on Long-wave Runup Models, World Scientific.

2003년 6월 30일 원고 접수

2003년 12월 3일 최종 수정본 채택