

2001 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

원자력발전소 지진해일 안전성 검증프로그램 개발

Development of Computer Program for Safety of Nuclear Power Plant against Tsunami

진소범¹⁾, 최강룡¹⁾, 이상국¹⁾, 조용식²⁾

1) 한국원자력안전기술원

대전광역시 유성구 구성동 19

2) 한양대학교

서울특별시 성동구 행당동 17

요약

연안에서 발생한 해저지진에 의한 지진해일에 대하여 원자력발전소의 안전성을 검토할 목적으로 선형 및 비선형 천수방정식을 유한차분법으로 해석하여 지진해일의 전파와 쳐오름을 해석하는 검증용 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. 또한 개발된 컴퓨터 프로그램의 현장 적용성과 정확성을 검증하기 위해 단순한 상황에 대한 수치해를 구한 후 이론적인 해석해와 비교하였다. 계산 결과는 기존의 결과와 잘 일치하였다.

개발된 컴퓨터 프로그램은 원자력발전소의 지진해일 안전성 평가에 활용할 수 있을 뿐만 아니라 지진해일의 먼 거리 전파와 해안에서의 쳐오름·내림 현상의 연구에 이용할 수 있으며, 아울러, 해안 시설물 및 구조물의 설계기준 자료의 결정에 활용이 가능하다.

Abstract

The main objective of this study is the development of a computer program to check the safety of nuclear power plants along the coastline of the Korean Peninsula. The computer program describes the propagation and associated run-up process of tsunamis by solving linear and nonlinear shallow-water equations with finite difference methods. The computer program has been applied to several ideal and simplified problems. Obtained numerical solutions are compared to existing and available solutions and measurements. A very good agreement between numerical solutions and existing measurement is observed.

The computer program developed in this study can be used to check the safety analysis of nuclear power plants against tsunamis. The program can also be used to study the propagation of tsunamis for a long distance, and associated run-up and run-down process along a shoreline. Furthermore, the computer program can be used to provide the proper design criteria of coastal facilities and structures.

1. 서 론

지진해일이 태평양과 같은 대양을 횡단할 경우 분산과 Coriolis 효과는 중요한 역할을 할 수 있는 반면에 비선형 이송관성력은 중요하지 않다. 따라서, Coriolis 효과를 포함하는 선형 Boussinesq 방정식이 지진해일의 전파를 모의하기에 적당하다(Imamura 등, 1988; Liu 등, 1994).

지진해일이 수심이 얕은 해안지역으로 전파되어 오면 천수효과에 의해 파고는 증가하고 파장은 감소하므로 비선형 이송관성력이 매우 중요해진다. 또한, 얕은 수심에서는 분산의 중요성이 감소하는 반면 바닥마찰효과는 매우 중요하다. 따라서, 바닥마찰항력을 포함하는 비선형 천수방정식이 지진해일의 범람을 모의하는 지배방정식으로 사용된다. 아울러, 범람지역에 관한 정보를 얻기 위하여 지진해일의 거동에 따라 이동하게 되는 해안선의 위치를 추적하기 위한 이동경계조건이 필요하다.

선형모형에서는 양해(explicit) leap-frog 기법을 이용하여 선형 천수방정식을 차분한다. 특히, leap-frog 기법에 의해 발생되는 수치분산을 조절하여 선형 Boussinesq 방정식의 물리적 분산을 대체하도록 한다. 비선형모형은 바닥마찰항력을 포함하고 있는 비선형 천수방정식을 지배방정식으로 사용한다. 선형모형과 마찬가지로 양해 leap-frog 기법을 이용하여 선형항을 차분하며, 풍상(upwind)차분기법으로 운동량 방정식의 비선형 이송항을 차분한다. 바닥마찰항은 Chezy 공식과 Manning 공식을 사용하여 고려할 수 있도록 하였으며, 연속방정식으로부터 유도된 이동경계조건을 이용하여 해안선의 움직임을 추적한다. 다중격자 연결모형은 작은 격자와 큰 격자와의 결합에 대하여 설명한다.

개발된 수치모형을 단순화한 문제에 적용하여 모형의 적용성과 정확성을 검증한다. 수치해석 결과는 실험결과와 비교한다.

2. 선형 모형

지진해일의 초기파장은 수십 km에서 수백 km에 이르기 때문에 비선형 항과 바닥마찰항은 영향이 상대적으로 작아서 무시할 수 있는 반면에 분산효과는 파장에 따라 중요성이 변하기 때문에 선형모형의 지배방정식에 포함하는 것이 바람직하다.

지진해일이 태평양과 같은 상대적으로 깊은 바다를 횡단하여 먼 거리를 전파하는 경우에는 선형 Boussinesq 방정식을 이용하여 수치모형을 구성한다(Imamura 등, 1988;

Kajiura와 Shuto, 1990; Liu 등, 1994). 일반적으로 지진해일이 태평양과 같은 대양을 횡단할 경우에는 구면좌표계를 사용해야 하는 반면, 상대적으로 작은 지역을 전파하는 경우에는 직교좌표계만을 사용할 수 있다. 먼저, 비선형항을 무시한 구면좌표계에서 선형 Boussinesq 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \left[\frac{\partial P}{\partial \psi} + \frac{\partial}{\partial \varphi} (\cos Q \varphi) \right] = 0 \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{gh}{R \cos \varphi} \frac{\partial \zeta}{\partial \psi} - fQ \\ &= \frac{1}{R \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \psi} \left[\frac{\partial h^3}{3R \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{\partial}{\partial \psi} \left(\frac{P}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial \psi} \left(\cos \varphi \frac{Q}{h} \right) \right\} \right] \\ & \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{gh}{R} \frac{\partial \zeta}{\partial \varphi} + fP \\ &= \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\frac{\partial h^3}{3R \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{\partial}{\partial \psi} \left(\frac{P}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\cos \varphi \frac{Q}{h} \right) \right\} \right] \end{aligned} \quad (2.2)$$

식 (2.1)–(2.3)에서 (ψ, φ) 는 지구의 경도와 위도이다. 또한, ζ 는 자유수면변위, P 와 Q 는 각각 x 와 y 방향의 체적흐름율(volume flux), h 는 정수면(still water level)에서의 수심, f 는 지구의 회전을 나타내는 Coriolis 변수이다. 식 (2.1)은 연속방정식으로 절삭오차가 없는 정확한 식인 반면에 식 (2.2)와 (2.3)은 운동량방정식으로 동수압의 일부를 고려한 근사식이다. 식 (2.2)와 (2.3)의 왼쪽항에서 첫째 항은 국부가속도에 의한 관성효과, 둘째 항은 압력효과, 세째 항은 Coriolis 효과, 그리고 오른쪽항은 분산효과를 나타낸다.

식 (2.1)–(2.3)으로부터 P 와 Q 를 소거하고 Coriolis력 항을 고려하지 않으면 다음과 같이 ζ 항으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} - \frac{gh}{R^2 \cos^2 \varphi} \left[\frac{\partial^2 \zeta}{\partial \psi^2} + \cos \varphi \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\cos \varphi \frac{\partial \zeta}{\partial \varphi} \right) \right] \\ &= \frac{gh^3}{3R^4 \cos^4 \varphi} \frac{\partial^4 \zeta}{\partial \psi^2} + \frac{gh^3}{3R^4 \cos^4 \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\cos \varphi \frac{\partial}{\partial \varphi} \left\{ \frac{1}{\cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\cos \varphi \frac{\partial \zeta}{\partial \varphi} \right) \right\} \right] \\ &+ \frac{gh^3}{3R^4 \cos^3 \varphi} \left[\frac{\partial^3}{\partial \psi^2 \partial \varphi} \left(\cos \varphi \frac{\partial \zeta}{\partial \varphi} \right) + \cos^2 \varphi \frac{\partial}{\partial \varphi} \left\{ \cos \varphi \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{1}{\cos^2 \varphi} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial \psi^2} \right) \right\} \right] \end{aligned} \quad (2.4)$$

대상영역이 상대적으로 작을 경우에는 Cartesian 좌표계를 사용할 수 있으며, Boussinseq 방정식으로부터 비선형항을 무시하면 Cartensian 좌표계에서 다음과 같은 선형 Boussinseq 방정식을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial t} + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} &= \frac{h^2}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial P}{\partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) \right] \\ &\quad - \frac{h^3}{6} \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial^2}{\partial t \partial x} \left(\frac{P}{h} \right) + \frac{\partial^2}{\partial t \partial y} \left(\frac{Q}{h} \right) \right] \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} &= \frac{h^2}{2} \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial P}{\partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) \right] \\ &\quad - \frac{h^3}{6} \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\partial^2}{\partial t \partial x} \left(\frac{P}{h} \right) + \frac{\partial^2}{\partial t \partial y} \left(\frac{Q}{h} \right) \right] \end{aligned} \quad (2.7)$$

운동량방정식 (2.6)과 (2.7)에서 Coriolis 효과는 고려되지 않았으며, 식 (2.5)–(2.7)로부터 P 와 Q 를 소거하면 다음 식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} &\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} - g \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right) - g \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right) \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{h^2}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right) \right\} - \frac{h^3}{6} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \right) \right] \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{h^2}{2} \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right) \right\} - \frac{h^3}{6} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \right) \right] \end{aligned} \quad (2.8)$$

수심이 일정할 경우에 대해서 식 (2.8)은 다음과 같이 간단히 정리할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} - gh \left(\frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \right) = \frac{gh^3}{3} \left(\frac{\partial^4 \zeta}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \zeta}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \zeta}{\partial y^4} \right) \quad (2.9)$$

식 (2.4)와 식 (2.9)의 4차 도함수는 물리적 분산항이다. 만일, 분산항을 무시한다면 선형 천수방정식으로부터 직접 유도가 가능한 파동방정식(wave equation)을 얻는다.

(2.1)–(2.3)과 식 (2.5)–(2.7)에서 주어진 식은 물리적 분산을 갖는 고차도함수항으로 인해 유한차분기법으로 해석하는 것이 어렵다. 본 연구에서는 leap-frog 유한차분법으로 물리적 분산이 고려되지 않은 선형 천수방정식을 해석한다. 수치해석기법은 매우 간단하고 공간 및 시간격자에 대하여 2차의 정확도(Imamura 등, 1988; Kowalik, 1993)를 갖는다.

3. 비선형 모형

지진해일이 대양을 가로질러 연안으로 접근하면 비선형성이 매우 중요하기 때문에 선형 천수방정식을 쓸 수 없다. 특히, 지진해일이 해안지역으로 접근하면 파장은 짧아지고 파고가 증가할 뿐만 아니라 Coriolis 효과와 분산의 중요성은 감소하기 때문에 비선형 천수방정식을 지배방정식으로 사용하는 것이 타당하다. 더욱이, 해안선 부근에서는 바닥마찰효과가 중요하기 때문에 바닥마찰저항을 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.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{H} \right) + gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \tau_x H = 0 \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{H} \right) + gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \tau_y H = 0 \quad (3.3)$$

식 (3.1)–(3.3)에서 ζ 는 자유수면변위, P 와 Q 는 각각 x 와 y 방향의 체적흐름율(volume flux), $H = h + \zeta$ 는 전체수심, τ_x 와 τ_y 는 각각 x 와 y 방향의 바닥마찰항이다.

식 (3.2)와 (3.3)의 바닥마찰항은 Chezy 식이나 Manning 식과 같은 실험공식을 사용하며, 먼저 Chezy 식은 다음과 같다.

$$\tau_x = \frac{g}{C_f^2 H^3} P(P^2 + Q^2)^{1/2}, \quad \tau_y = \frac{g}{C_f^2 H^3} Q(P^2 + Q^2)^{1/2} \quad (3.4)$$

식 (3.4)에서 C_f 는 Chezy 마찰계수이며, Manning 식은 다음과 같다.

$$\tau_x = \frac{gn^2}{H^{10/3}} P(P^2 + Q^2)^{1/2}, \quad \tau_y = \frac{gn^2}{H^{10/3}} Q(P^2 + Q^2)^{1/2} \quad (3.5)$$

식 (3.5)에서 n 은 Manning 조도계수이다. 실험계수인 n 과 C_f 는 Reynolds수와 해안의 조도 등과 같은 흐름과 현장조건에 따라 다른 값을 갖는다.

유한차분법을 이용하여 수치계산을 수행하기 위해서는 전체영역을 일정한 수의 격자로 차분화해야 하며, 초기에는 모든 영역에서 자유수면변위와 체적흐름율이 0이 된다. 또한 초기의 해안선은 전체수심, 즉 수심과 자유수면변위의 합이 0이 되는 곳을 연결한 선으로 정의된다. 본 연구의 수치모형에서는 혼란을 방지하기 위해 격자가 육지에 속할 때는 수심은 0보다 작은 값을 갖도록 하며, 초기수심은 평균해수면상의 수심으로 주어진다. 그럼 3.1은 이동경계조건을 설명하기 위한 단순화된 계단지형을 보여주고 있다. 초기에 정지해수면(SWL, Still Water Level)보다 높은 격자, 즉 건조격자(dry grid, 격자 i+1)는 전체수심 H 가 0보다 작은 값을 가지며, 평균해수면보다 아래에 존재하는 격자, 즉 침윤격자(wet grid, 격자 i-1, i)는 전체수심 H 가 0보다 큰 값을 갖는다. 따라서, 건조격자와

침윤격자의 경계는 초기의 해안선을 형성하게 된다.

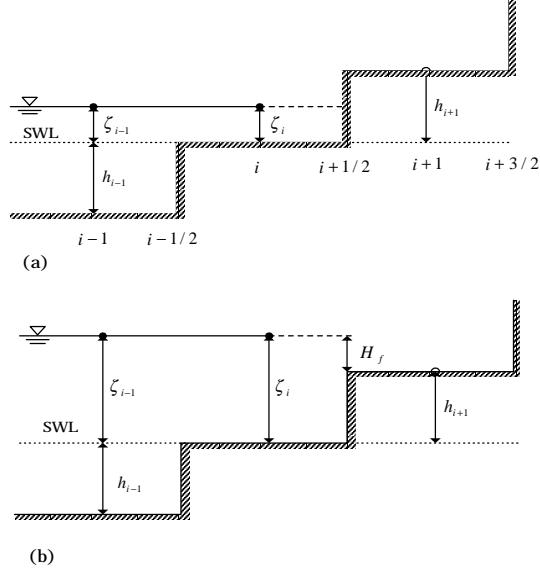
본 연구의 수치모형에서는 먼저 연속방정식을 해석하여 전 영역에서의 자유수면변위를 계산한다. 이 때 초기의 건조격자, 즉 전체수심이 0보다 작은 격자의 자유수면변위는 계속 0을 유지하게 되는데, 이는 주변격자의 체적흐름율이 0이기 때문이다. 다음으로, 연속방정식에서 새로이 계산한 자유수면변위를 이용하여 해안선의 격자를 수정한다. 즉, 그림 3.1을 이용하여 해안선에서의 전체수심이 육지방향의 다음 격자로 해안선의 이동이 가능한가를 검사하며, 이 때 운동량방정식을 이용하여 체적흐름율 P 와 Q 를 계산한다.

이동경계조건에서 발생 가능한 두 경우, 즉 해안선이 육지방향으로 이동하지 않는 경우와 이동하는 경우에 대하여 간단히 설명한다. 그림 3.1에서와 같이 실제 경사지형은 계단지형으로 단순화되었으며, 격자 $i-1$, i 및 $i+1$ 에서는 자유수면변위를, 격자 $i-1/2$, $i+1/2$ 및 $i+3/2$ 에서는 체적흐름율을 각각 계산한다. 그림 3.1(a)의 경우에서 격자 i 는 침윤격자이므로 초기에 전체수심 H_i 는 0보다 큰 값을 갖는 반면에, 격자 $i+1$ 은 건조격자이므로 전체수심 H_{i+1} 은 0보다 작은 값을 갖는다. 또한, 해안선은 격자 i 와 $i+1$ 사이에 존재하며, 격자 $i+1/2$ 에서의 체적흐름율 $P_{i+1/2}$ 은 0이므로 해안선은 육지방향으로 이동하지 않는다. 그림 3.1(b)의 경우는 입사파의 영향으로 수위가 상승한 것으로, 격자 $i+1/2$ 에서의 체적흐름율 $P_{i+1/2}$ 은 0보다 큰 값을 갖게 된다. 따라서, 격자 i 와 $i+1$ 사이에 존재하던 초기의 해안선은 육지방향으로 이동한다.

본 연구의 수치모형에서는 연속방정식에서 새로운 자유수면변위와 전체수심을 계산한 후에 격자 i 의 전체수심 H_i 가 0보다 작은 경우에는 물론 해안선이 육지방향으로 이동하지 않는다. 그러나, H_i 가 0보다 큰 경우에는 해안선이 육지방향으로 이동할 수 있다.

섬 또는 방파제와 같은 특수지형이 수치계산 영역내에 존재하더라도 개발된 이동경계조건의 적용이 가능하며, 해안선이 외해방향으로 이동할 때도 수정없이 사용이 가능하다. 또한, 앞에서 언급한 것과 같이 위의 기법은 x 축 방향만을 고려한 것이지만 y 축 방향에 대해서도 같은 과정을 반복하여 사용할 수 있다.

수치계산을 하는 동안 모든 격자에 대하여 위의 과정을 반복하게 되면 엄청난 컴퓨터 사용시간을 필요로 하게 되므로 매우 비경제적이다. 따라서, 범람 우려가 전혀 없는 산악지형 등과 같은 고도가 높은 지역에 대해서는 적절한 한계고도를 미리 설정하여 이동경계조건의 적용에서 제외시키는 것이 경제적이며 또한 효율적이다. 아울러, 바닥마찰저항을 고려할 경우에는 Chezy 공식과 Manning 공식 모두 분모항에 전체수심을 포함하고 있어, 특히 해안선 근처의 격자에서 전체수심이 매우 적은 값을 갖는 경우에 바닥마찰저항이 매우 커지게 되어 비현실적인 해를 얻을 수 있으므로, 전체수심에 관한 최소 한계값을 미리 지정해 두는 것이 바람직하다.



(a) 경계가 이동하지 않는 경우, (b) 경계가 이동하는 경우
그림 3.1 수치모형의 이동경계조건 개략도

4. 다중격자 연결모형

서로 다른 격자크기를 가지고 있는 두 지역사이의 정보를 교환하기 위한 기법을 소개한다. 그림 4.1에 도시된 것과 같이 1:3의 비율로 큰 격자 안에 작은 격자들이 있다. 화살표는 각각의 격자점을 횡단하는 체적흐름율 P 와 Q 를 나타내고 원과 점은 자유수면변위를 구하기 위한 지점을 나타낸다.

동일한 시간단계일 때 두 격자계사이의 경계를 따라 작은 격자계에 대한 체적유입을 제외하고는 큰 격자와 작은 격자 안에서의 체적흐름율은 운동량방정식으로부터 결정된다. 이들 값은 큰 격자계로부터 인접한 체적흐름율을 보간하여 결정하며, 작은 격자계에서 다음 시간단계일 때 자유수면변위는 연속방정식으로부터 계산된다. 일반적으로 작은 격자계에서 시간단계의 크기는 유한차분법의 안정조건을 만족시키기 위해 큰 격자계에서 사용하는 값보다 작다. 따라서, 다음 시간단계에서 작은 격자계의 경계를 따라서 생기는 체적흐름율은 큰 시간간격에 대해 큰 격자계로부터 구한 인접 체적흐름율을 보간함으로써 구할 수 있다. 작은 격자계에서 자유수면변위는 큰 격자계의 다음 시간단계까지 계산된 후에 큰 격자계의 자유수면변위는 연속방정식을 해석하여 새로운 값을 얻게 된다.

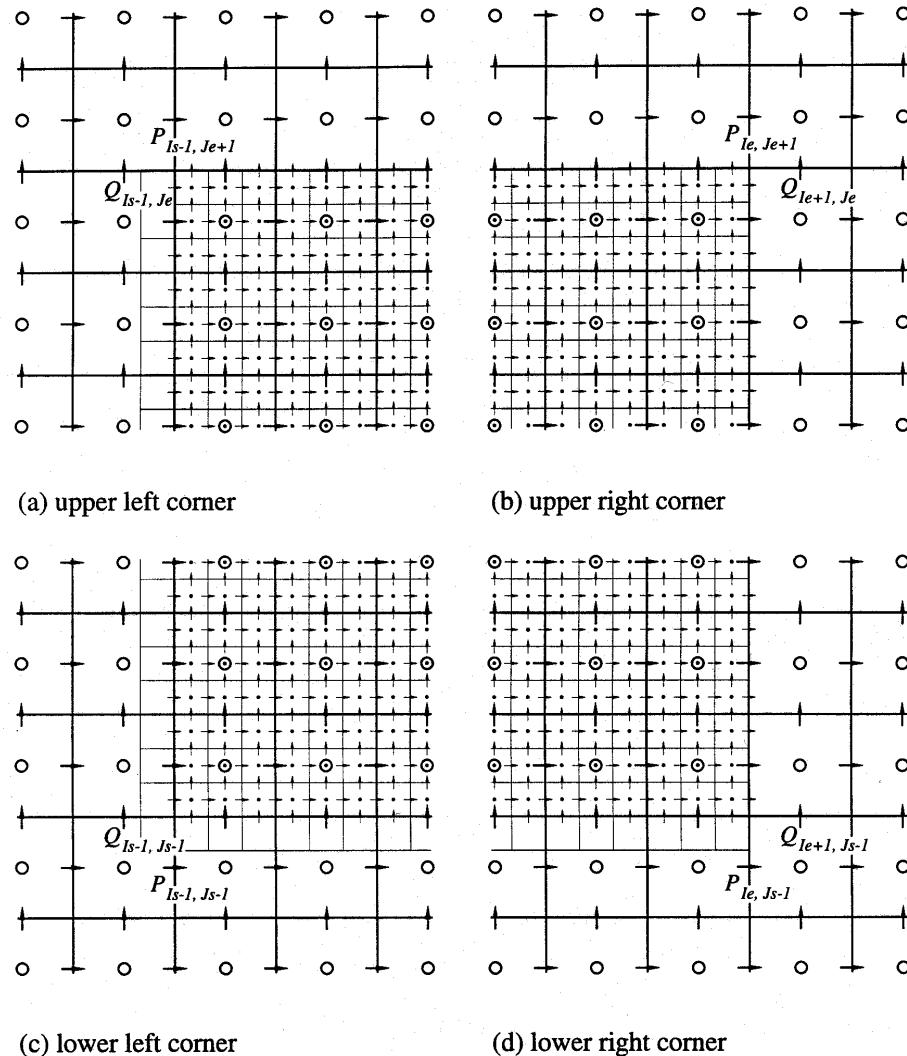


그림 5.2 큰 격자와 작은 격자의 연결시스템

5. 모형 검증

지진해일 쳐오름모형을 검증하기 위해 미국에서 수행된 수리모형실험을 이용한다. 실험은 미공병단 산하의 해안공학연구소(CERC, Coastal Engineering Research Center)에서 수행되었으며, 수조의 중앙에 높이 0.625m, 해저지름 7.2m, 경사 1V:4H의 원형섬이 위치한다. 입사파는 파고(A)가 0.032m인 고립파이며, 비선형성의 크기를 나타내는 수심(h)

에 대한 입사파의 파고의 비, 즉 $\varepsilon (=A/h)$ 은 0.1이다. 그림 5.1은 해안공학연구소에서 사용되었던 수리실험장치를 간단히 도시한 것이다.

그림 5.1에 도시된 파고계간의 간격은 $\pi/8$ 이며, $\beta=0$ 과 $\beta=\pi$ 는 각각 입사파가 진입하는 섬의 전면 중앙과 섬의 배후지역 중앙을 나타내며, 입사파는 x 축을 따라 설치된 조파기에서 발생하여 섬을 향해 입사한다(Cho 등, 1999).

그림 5.2는 $\varepsilon=h/\lambda=0.05$ 일 때 원형섬 주위에서의 고립파의 최대 쳐오름높이를 도시한 것으로 수치모형의 결과가 하나인 반면에 수리실험 관측자료가 많은 것은 동일한 조건하에서 여러 차례 실험을 수행했기 때문이다. 본 연구에서 최대 쳐오름높이는 해안선에 도달한 파랑이 해안 경사면을 올라가는 최고높이까지의 최초 수면으로부터의 연직높이를 의미한다. 그림에서 R 과 A 는 각각 최대 쳐오름높이와 입사파의 파고를 의미한다. $M=3$ 일 경우에는 쳐오름높이의 변화가 다소 단조로운 반면에 M 이 증가할수록 $\beta=0$ 이후에서는 쳐오름높이가 계속 감소하다가 $\beta=\pi$ 에서 매우급격하게 증가함을 알 수 있다. 특히, $M=7$ 의 경우에는 $\beta=\pi$ 에서의 최대 쳐오름높이는 $\beta=7\pi/8$ 의 쳐오름높이의 두 배에 이르고 있음을 알 수 있다. 이는 $\beta=\pi$ 에서의 쳐오름높이는 섬주위를 따라 진행하던 파가 섬의 배후지역에서 충돌하여 발생하기 때문이다. 즉, 파랑의 진행속도는 대략 $h^{1/2}$ 에 비례하므로 외해지역의 파가 빠르게 진행하는 관계로 입사파는 전체적으로 섬을 향해 굴절되어 진행한다. 이 때, 섬의 경사지역에 파랑의 일부가 간혀 섬주위를 따라 진행하다가, 섬의 뒷면에서는 서로 반대방향에서 마주보며 진행하다가 충돌하여 매우 큰 쳐오름높이를 발생시킨다.

그림 5.3는 $\varepsilon=0.1$ 일 때 원형섬 주위에서의 고립파의 최대 쳐오름높이를 비교한 것으로 그림 5.2의 결과와 비슷한 경향을 나타내고 있다. 다만, M 이 6보다 클 경우에는 $\beta=\pi$ 에서의 쳐오름높이가 $\beta=0$ 에서의 쳐오름높이보다 크게 관측되고 있다. 전체적으로 쳐오름높이는 섬의 전면에 매우 크게 관측된 후에는 β 가 증가함에 따라 서서히 감소하다가 $\beta=\pi$ 에서 급격히 증가하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 지진해일의 범람피해는 섬의 배후지역에서 매우 국부적으로 발생하는 반면에 섬의 전면에서는 광범위한 지역에서 발생함을 알 수 있다. 그림 5.3에서 M 이 증가할수록 섬의 배후지역에서의 최대 쳐오름높이가 매우 급하게 증가하고 있음을 알 수 있다. 즉, M 이 증가할 경우 간힌 파가 보유한 에너지가 증가하기 때문에 최대 쳐오름높이 또한 커지기 때문이다.

마지막으로, 그림 5.4은 원형섬의 뒤, 즉 섬의 배후지역 바로 직전, 즉 $\beta=7\pi/8$ 에서의 지진해일 쳐오름높이와 배후지역, 즉 $\beta=\pi$ 에서의 쳐오름높이를 비교한 것으로 M 이 증가할수록 비율이 커짐을 알 수 있다. 비록 수리실험관측 결과와 수치해가 다소 차이를 보이고 있기는 하나 전체적으로 매우 유사한 결과를 제공함을 알 수 있다.

전체적으로 쳐오름 수치모형에 의한 결과는 수리모형실험 관측치와 잘 일치하고 있을 뿐만 아니라 이동경계조건 또한 매우 만족하게 작동함을 알 수 있다.

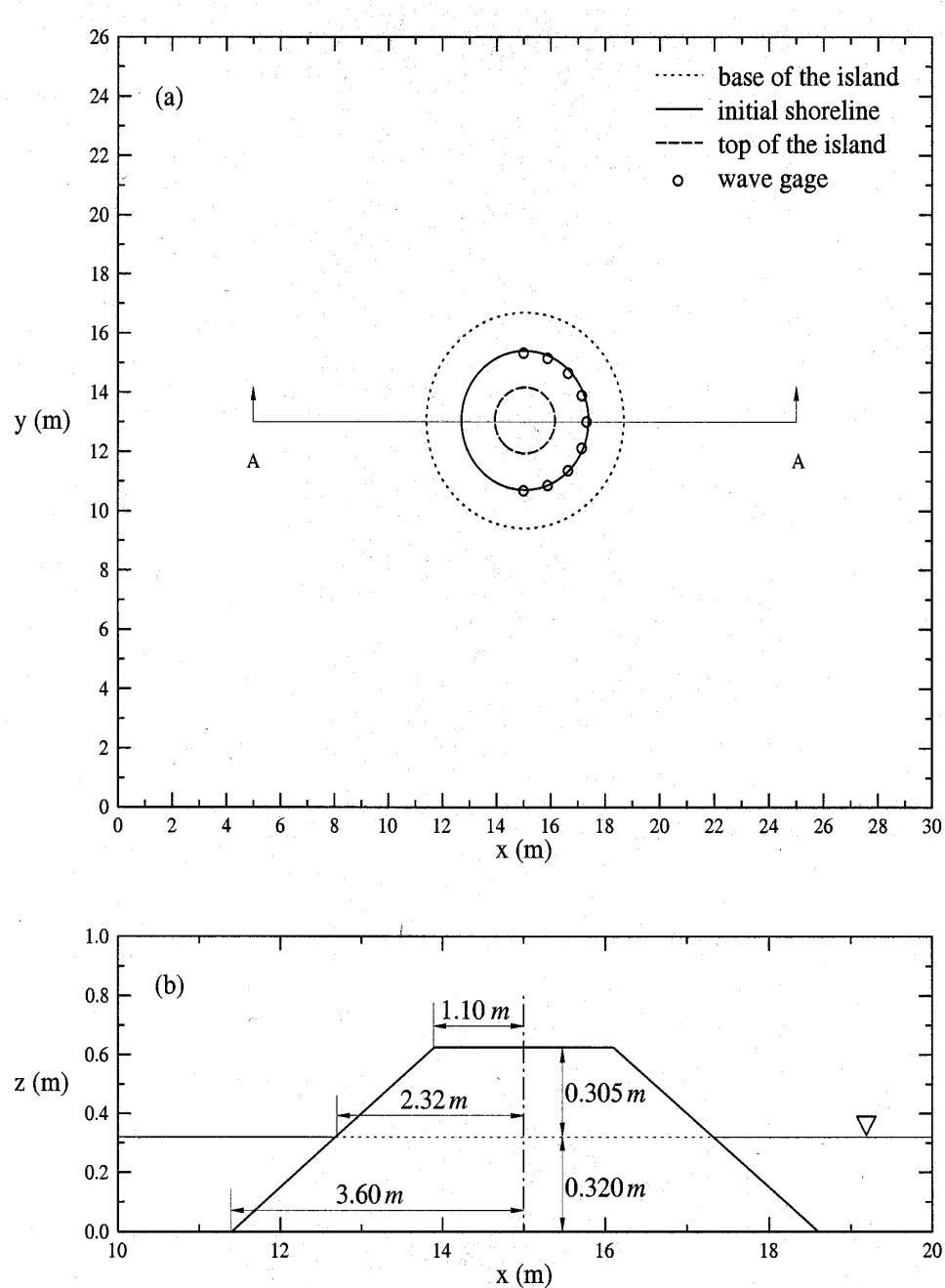


그림 5.1 수리모형실험 장치: (a) 평면도, (b) 원형섬의 단면도

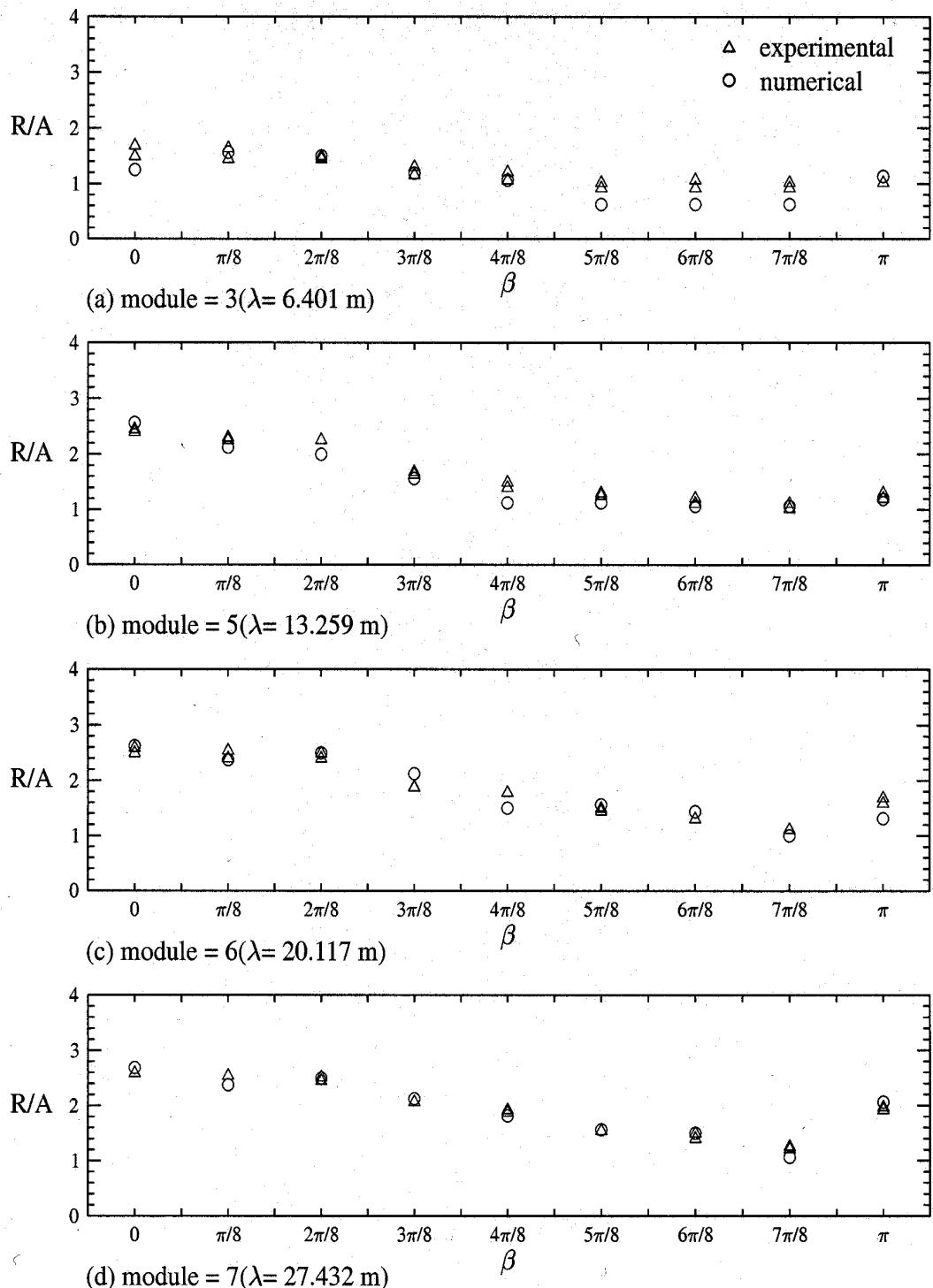
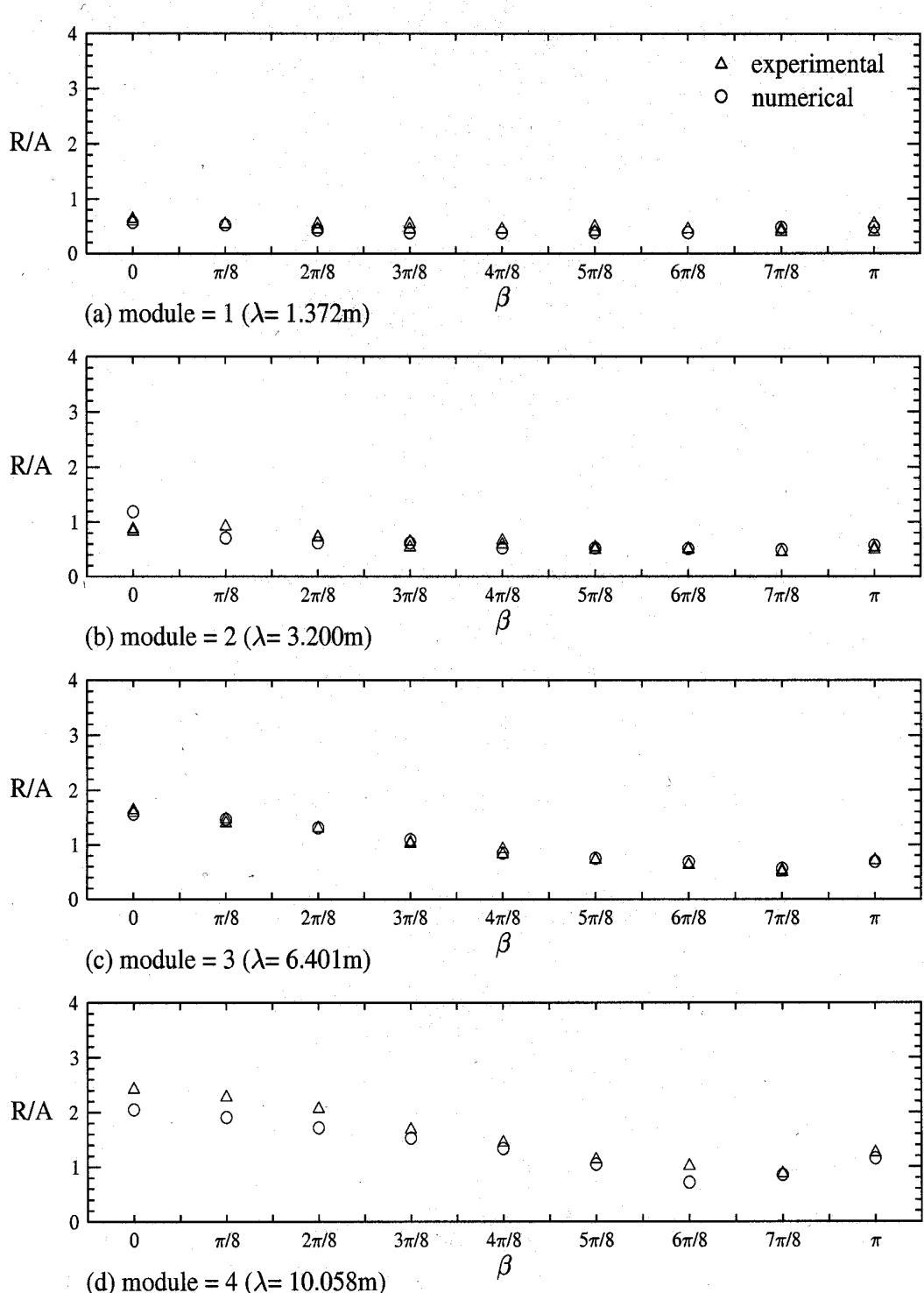


그림 5.2 원형심 주위에서의 고립파의 최대 쳐오름높이 ($\varepsilon=0.05$)



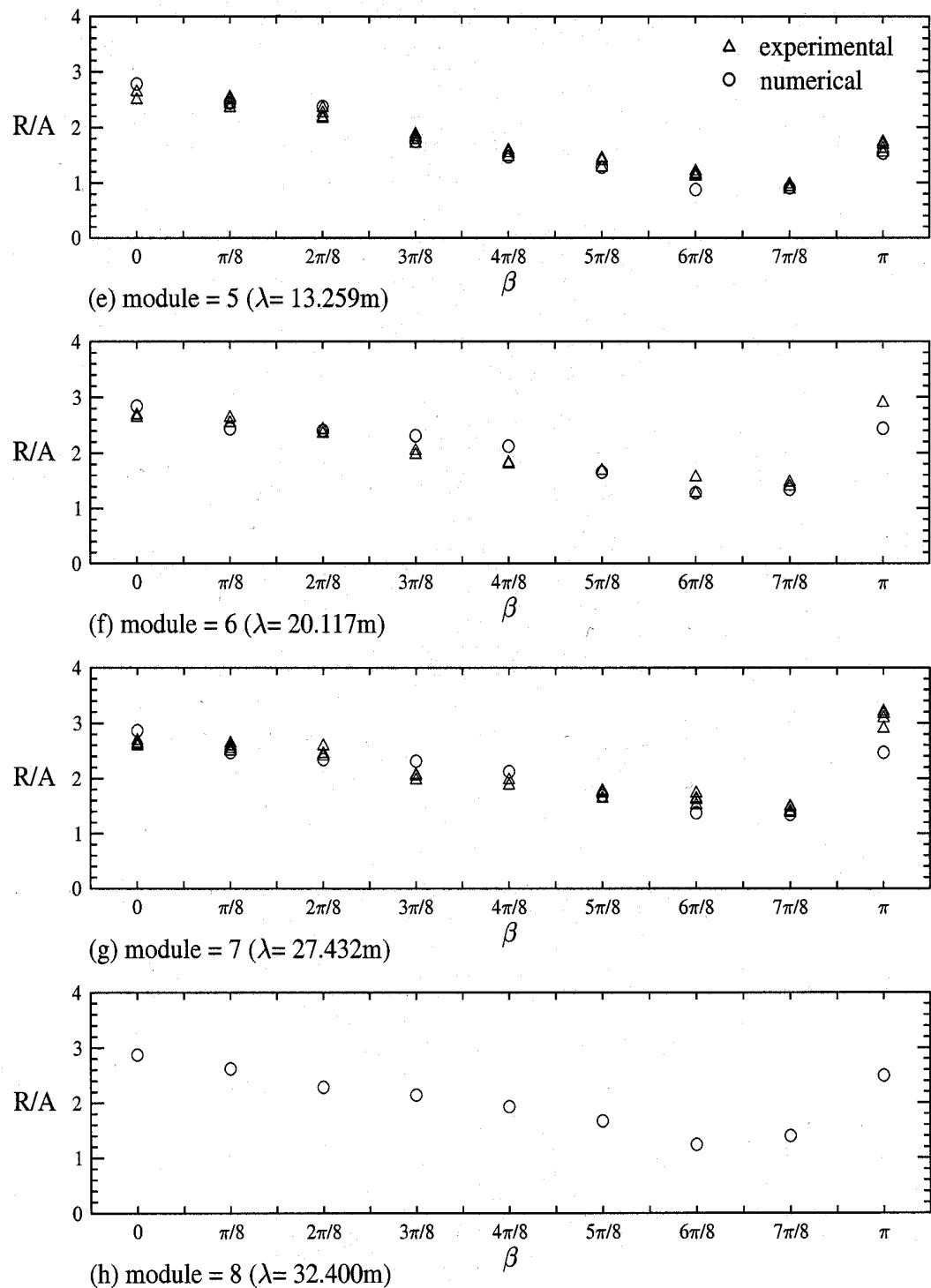


그림 5.3 원형심 주위에서의 고립파의 최대 쳐오름높이 ($\varepsilon=0.1$)

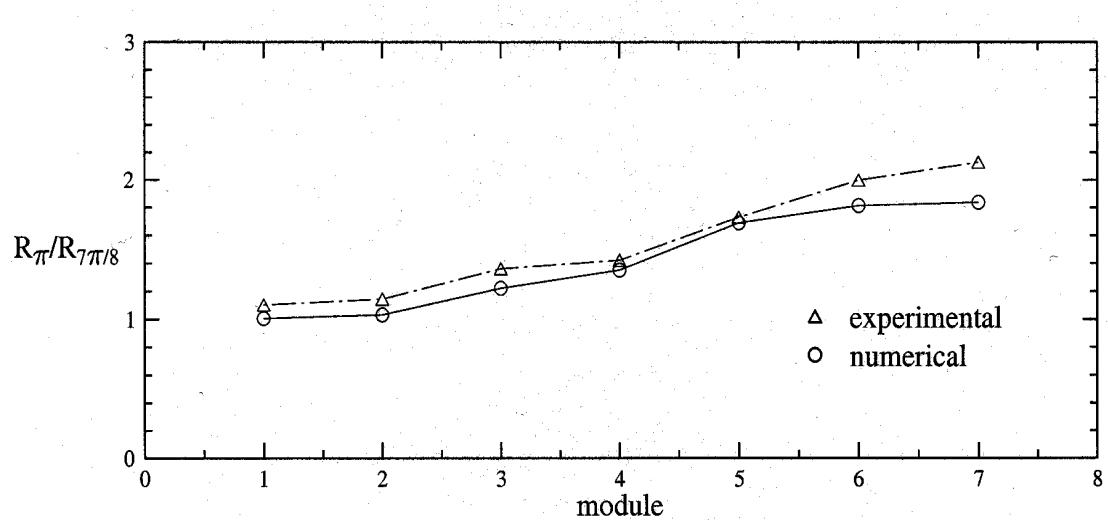


그림 5.4 원형섬 배후에서 고립파의 최대 쳐오름높이($\varepsilon=0.1$)

6. 결론

지진해일이 태평양과 같은 대양을 횡단하여 전파할 경우에는 파장의 크기에 따라 분산항이 중요한 역할을 할 수 있으므로 지배방정식은 분산항을 포함하는 선형 Boussinesq 방정식이 적절하다. 그러나, 선형 Boussinesq 방정식의 분산항은 고차 미분항을 포함하고 있어 이를 유한차분화할 경우에 수치해의 안정성을 해칠 뿐 아니라 더 많은 컴퓨터 기억 용량과 계산시간을 필요로 하게 된다. 본 연구에서는 corrected modified equation 방법을 이용하여 선형 천수방정식을 leap-frog 차분기법으로 수치해석하였다. 공간격자의 크기와 시간격자의 크기를 적절히 조절하면 선형 천수방정식의 수치해는 선형 Boussinesq 방정식을 만족하게 된다. 따라서, 선형 Boussinesq 방정식을 유한차분화 했을 때 발생할 수 있는 안정성문제를 방지할 수 있다.

지진해일이 수심이 상대적으로 작은 해안선 근처로 진입하면 분산효과의 중요성은 작아지는 반면에 비선형과 바닥마찰저항의 중요성은 매우 커진다. 따라서, 해안선 근처에서의 지진해일의 거동은 바닥마찰저항을 포함하는 비선형 천수방정식을 이용하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 비선형 천수방정식을 leap-frog 및 upwind 기법으로 차분화하여 쳐오름모형을 개발하였다. 쳐오름 모형을 검증하기 위하여 원형섬주위에서의 지진해일의 쳐오름높이를 수치해석하여 수리모형실험의 결과와 비교하여 모형을 검증하였다.

개발된 컴퓨터 프로그램은 원자력발전소의 지진해일 안전성 평가에 활용할 수 있을 뿐만 아니라 지진해일의 먼 거리 전파와 해안에서의 쳐오름·내림 현상의 연구에 이용

할 수 있으며, 아울러, 해안 시설물 및 구조물의 설계기준 자료의 결정에 활용이 가능하다.

참고문헌

1. 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.
2. 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.
3. Kajiura, K. and Shuto, N., 1990. “Tsunami,” in The Sea, edited by B. Le Mehaute, and D.M. Hanes, Vol. 9, Part B, pp. 395–420, *John Wiley & Sons, Inc.*
4. Kowalik, Z., 1993. “Solution of the linear shallow water equations by the fourth-order leapfrog scheme,” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 98, pp. 10205–10209.
5. Liu, P.L.-F., Cho, Y.-S., Seo, S.N. and Yoon, S.B., 1994. Numerical Simulations of Tsunami Propagation and Inundation with Application to Hilo, Hawaii, Technical Report, *Cornell University*.