

# 입사파폭에 따른 원추형 섬에서의 처오름높이 계산

## Calculation of Run-up Height on a Conical Island with Variable Transverse Lengths of Incident Waves

조 용 식\*

Cho, Yong-Sik

---

### Abstract

Using a numerical model solving the shallow-water equations, unusual huge run-up heights observed in the lees of both Babi and Okushiri islands were investigated in detail. The effects of incident tsunami widths were particularly examined by adjusting the transverse length of the wave-maker in laboratory and numerical experiments. The calculated run-up heights were compared with the laboratory experimental data. It has been found that the run-up heights in the lee of a conical island are strongly dependent on the ratio of a transverse length of incident tsuanmis to a base diameter of the island.

*keywords* : shallow-water equations, tsunami, run-up height, conical island

---

### 요 지

천수방정식을 해석하는 수치모형을 이용하여 Babi 섬과 Okushiri 섬의 배후지역에서 관측되었던 지진해일의 매우 높은 처오름높이에 관한 연구를 수행하였다. 특히, 입사파의 폭을 조절하여 섬의 바닥지름과 입사폭의 비율 변화에 따른 원추형 섬에서의 최대 처오름높이의 변화를 조사하기 위해 여러 경우의 입사파폭에 대하여 수치계산을 수행하여 수치모형실험 결과와 비교하였다. 원추형 섬의 배후지역에서의 처오름높이는 섬의 해저지름에 대한 입사파 폭의 비율과 밀접한 관련이 있음을 밝혀냈다.

**핵심용어** : 천수방정식, 지진해일, 처오름높이, 원추형 섬

---

\* 세종대학교 공과대학 토목환경공학과 조교수

## 1. 서 론

1992년 12월 인도네시아 Flores 섬 부근과 1993년 7월 일본 Hokkaido 섬 부근의 동해상에서 발생한 강력한 해저지진에 의해 야기된 지진해일은 각각 부근에 위치한 Babi 섬과 Okushiri 섬에서 매우 높은 초오름높이를 야기시켜 많은 인명 및 재산피해를 입혔다. 특히, Babi 섬과 Okushiri 섬에서의 지진해일의 거동은 많은 학자들의 관심을 끌었는데, 두 섬에서의 지진해일의 거동은 일반적인 관점과는 매우 다르게 지진해일에 직접 노출되지 않았던 섬의 배후지역에서 매우 큰 초오름높이가 관측되었을 뿐만 아니라 막대한 인명 및 재산피해를 초래하였기 때문이다(Yeh 등, 1993; Hokkaido Tsunami Survey Group, 1993). Fig. 1은 Babi 섬의 대략적인 위치 및 형태와 지진해일의 진행방향을 도시한 것으로, Babi 섬은 원형에 근사하며, 지진해일은 북쪽(Fig. 1의 상단)으로부터 섬을 향해 진행하고 있다.

Babi 섬에서는 지진해일 진행방향과 반대편에 위치한 섬의 뒤쪽의 두 마을이 지진해일에 완전히 파손되었으며 264명의 사람이 목숨을 잃었는데 이는 섬 전체 주민의 25%에 이르는 수치이다. 또한, Okushiri 섬에서도 지진해일 진행방향의 반대방향에 위치한 Aonae 지방에서 관측된 최대 초오름높이는 30 m로써 섬 전체에서 가장 높은 관측치였다. Okushiri 섬을 포

함한 일본연안 뿐만 아니라 러시아 및 우리나라의 동해안 여러 항구에도 그 영향을 끼쳐 많은 재산피해를 야기시켰다. 일본에서는 약 200여명의 사람이 목숨을 잃었으며 6억 달러 이상의 재산피해를 초래하였다. 우리나라의 동해안에는 많은 항구 및 원자력발전소가 위치하고 있어 지진해일의 영향을 받았을 것이나 지진해일에 의한 피해에 관한 구체적인 연구는 아직 없다. 동해안에서는 또한 1983년에도 일본 연안에서 발생한 지진해일에 의해 여러 항구에서 상당한 인명 및 재산피해를 초래하였다.

원추형 섬 주위에서의 장파의 초오름높이에 관한 연구는 선형이론을 이용하여 Arthur(1946), Lautenbacher(1970), Smith와 Sprinks(1975) 등에 의해 일부 연구되었으나 앞에서 언급한 Babi 섬과 Okushiri 섬에서의 지진해일의 특이한 거동을 해석하기 위하여 최근 본격적으로 다시 시작되었다. 특히, 미국과 일본에서는 대규모 수리모형실험을 수행하여 원추형 섬 주위에서의 고립파의 최대 초오름높이를 조사하였다(Briggs 등, 1994; Liu 등, 1994). 그러나, 수리모형실험을 통한 연구는 엄청난 비용이 소요될 뿐만 아니라 실험조건의 일관성 유지가 힘들어 수치모형을 이용한 연구와 병행하여 서로 보완하는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 수치모형을 이용하여 원추형 섬 주위에서 지진해일의 최대 초오름높이를 계산하여 미국 공병단의 해안공학연구소(CERC, Coastal Engineering

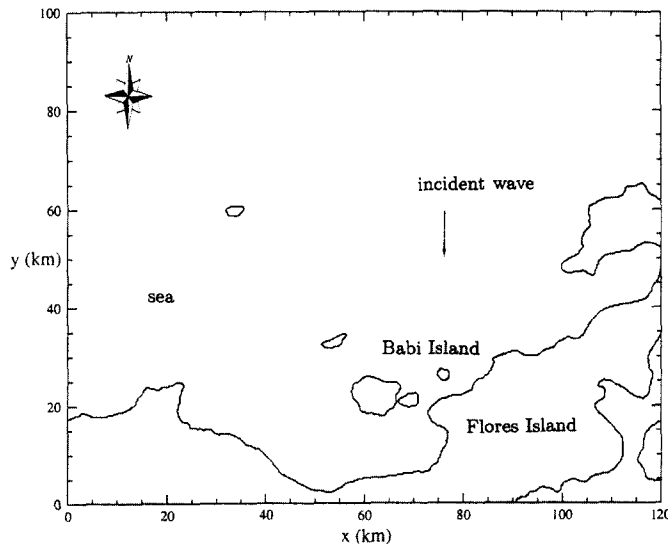


Fig. 1. The Shoreline of Babi and Flores Islands, Indonesia

Research Center)에서 수행한 수리실험의 관측결과와 비교하여 원추형 섬 주위에서 처오름높이의 특성을 해석한다. 특히, 지진해일에 의한 원추형 섬에서의 피해를 예방하기 위한 작업에 국한시켜 섬의 해저지름과 입사파폭의 비율을 조절하여 여러 경우의 비율에 대한 처오름높이의 변화를 중점적으로 조사한다.

## 2. 지배방정식과 수치모형

본 장에서는 지진해일의 진행과 원추형 섬 주위에서의 처오름을 수치모의하기 위한 적절한 방정식에 대하여 간략히 서술한다. 지진해일과 같은 장파가 왜해로부터 수심이 상대적으로 얇은 해안선 근처로 접근해 오면 분산항의 상대적인 중요성은 작아지는 반면에 비선형 효과는 매우 커진다. 따라서, 해안선 근처에서의 장파의 거동은 다음과 같은 비선형 천수방정식에 의해 지배된다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \nabla \cdot [(h + \zeta) \mathbf{u}] = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} + g \nabla \zeta = 0 \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서  $\zeta$ 는 자유수면변위,  $\mathbf{u}$ 는 수평방향의 평균유속 벡터,  $h$ 는 평균해수면상의 수심을 표시하며,  $H$ 는 전체수심, 즉  $H = h + \zeta$ 이며,  $\nabla$ 는 2차원 연산자이다. 식 (2)에서 바닥마찰저항은 고려되지 않았으나, Manning 공식 또는 Chezy 공식과 같은 실험공식을 이용하여 고려할 수 있다. Liu 등(1995)에 따르면 수치모형에 의해 계산된 최대 처오름높이는 수리실험에 의한 관측자료와 비교한 결과 바닥마찰저항은 큰 역할을 하지 않는 것으로 밝혀져 본 연구에서는 바닥마찰저항을 고려하지 않는다.

운동량방정식 (2)는 보존형태(conserved form)가 아니므로 이들을 유한차분화했을 경우 수치모형에서 운동량이 보존되지 않을 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 다음과 같은 보존형태의 천수방정식을 지배방정식으로 사용한다.

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

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{P^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{PQ}{H} \right) + gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{PQ}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Q^2}{H} \right) + gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

지배방정식 (3)-(5)에서  $P$ 와  $Q$ 는 각각  $x$ 축과  $y$ 축 방향의 체적흐름율, 즉  $P = uH$ 와  $Q = vH$ 를 나타내며, 식 (4)와 (5)는 연속방정식 (1)을 운동량방정식 (2)에 대입하여 유도한 것이다.

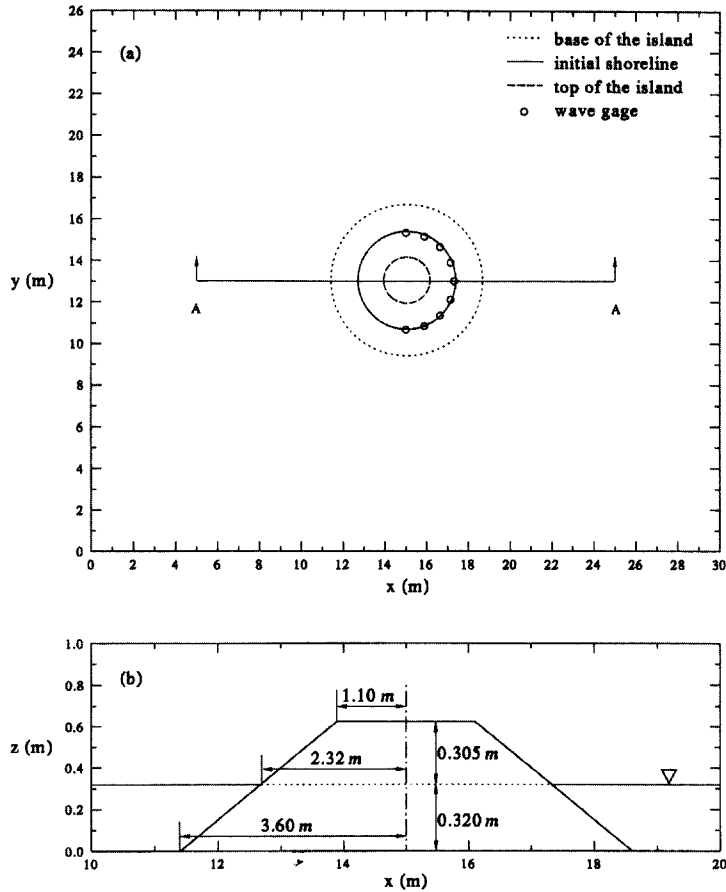
본 연구에서 지배방정식 (3)-(5)의 선형항은 양해법의 하나인 leap-frog 기법을 이용하여 적분하며, 운동량방정식의 비선형항은 upwind 차분기법을 이용하여 선형화한다. 유한차분기법에서는 공간과 시간에 대하여 모두 교호격자를 사용하며, 식 (3)-(5)의 유한차분식은 일반적인 것으로 많은 참고문헌(예, Roache, 1976)에서 쉽게 찾을 수 있으므로 여기서는 생략한다. 본 연구에서 사용된 수치모형과 경계조건에 관한 보다 상세한 설명은 Liu 등(1995)을 참조할 수 있다.

본 연구에서 사용되는 입사파는 고립파이며, 일반적으로 고립파를 모의하기 위해서는 Boussinesq 방정식을 사용해야 하나 Liu 등(1995)에서 언급한 것과 같이 고립파의 진행거리가 짧을 경우에는 분산항의 중요성이 상대적으로 적어지기 때문에 비선형 천수방정식으로 모의하는 것이 가능하다. 더욱이, 최대 처오름높이를 측정하기 위해서는 해안선을 따라 이동경계조건을 설치해야 하는데 Boussinesq 방정식을 사용할 경우에는 3차 미분항으로 표시되는 분산항 때문에 이동경계조건을 설정하는 것이 거의 불가능하므로 본 연구에서는 비선형 천수방정식을 지배방정식으로 사용한다.

## 3. 수리모형실험

인도네시아의 Babi 섬과 일본의 Okushiri 섬에서 지진진행과 반대방향에 위치한 지점에서 관측된 엄청난 높이의 지진해일의 처오름높이에 관한 물리적 현상을 규명하기 위하여 최근에 미국과 일본에서 대규모 수리모형실험을 실시하였다(Briggs 등, 1994; Liu 등, 1994; Cho, 1995). 본 연구에서는 미국 공병단의 해안공학연구소에서 수행한 수리모형실험 관측자료를 이용하여 수치모형에 의한 결과와 비교한다.

해안공학연구소의 수리실험에서 사용된 수조는 가로 30 m, 세로 25 m의 콘크리트 구조이며, 수조의 중앙에 높이 0.625 m, 해저지름 7.2 m, 경사 1V:4H의 원추형 섬이 위치한다. 수조의 수심은 0.32 m, 입사파는 파고 (A) 가 0.016 m, 0.032 m 인 고립파이며, 수심에



(a) Wave Tank, (b) Cross Section A-A View of the Island

Fig. 2. The Plan View of the Wave Tank and the Wave Gages

대한 입사파의 파고의 비, 즉  $\varepsilon (= A/h)$ 은 0.05와 0.1이다. Fig. 2는 해안공학연구소에서 사용되었던 수리실험장치중의 원추형 섬과 최대 처오름높이를 측정하기 위해 원추형 섬 주위에 배치한 파고계의 위치를 간단히 도시한 것이다. 비록, Fig. 2에 도시되지는 않았으나 조파기는 각각 독립적으로 작동이 가능한 60개의 소형 조파기로 구성되어 있으며,  $x$ 축을 따라 수평으로 설치되었다.

따라서, 조파기의 수를 조절하여 입사파의 수평길이를 쉽게 변화시킬 수 있으며, 입사파의 수평길이와 섬의 해저지름과의 비율에 따른 처오름높이를 규명하기 위해 Table 1에 열거한 것과 같이 일곱 경우의 조파기 길이( $\lambda$ ), 즉  $\lambda = 1.372$  m, 3.200 m, 6.401 m, 10.058 m, 13.259 m, 20.117 m 및 27.432 m를 이용

Table 1. Number of Paddles and Transverse Length of Incident Wave

module(M)	number of paddles	transverse length( $\lambda$ )	ratio ( $\lambda/D$ )
1	3	1.372 m	0.191
2	7	3.200 m	0.444
3	14	6.401 m	0.889
4	22	10.058 m	1.397
5	29	13.259 m	1.842
6	44	20.117 m	2.794
7	60	27.432 m	3.810

하여 수리실험을 수행하였다. 수리실험장치에 관한 보다 상세한 설명은 Briggs 등(1994)을 참조할 수 있다. Table 1에 나타나 있듯이 입사파의 수평길이, 즉 파봉

선의 길이는  $M$ 이 3보다 작거나 같으면 섬의 해저지름보다 작으며,  $M$ 이 3보다 크면 해저지름보다 크다. Fig. 2에 도시된 파고계간의 간격은  $\pi/8$ 이며,  $\beta=0$ 과  $\beta=\pi$ 는 각각 입사파가 진입하는 섬의 전면 중앙과 섬의 배후지역 중앙을 나타내며, 입사파는  $x$ 축에 설치된 조파기로 발생되어 섬을 향해 입사한다.

#### 4. 결과 비교

본 장에서는 먼저 원추형섬의 배후지역  $x=15.0\text{ m}$ ,  $y \geq 15.5\text{ m}$  (Fig. 2 참조)에 설치한 파고계에서 측정된 도달시간, 즉 조파기에서 입사파가 발생하는 시간부터 입사파의 파봉이 파고계에 도착할 때까지 소요되는 시간과 수치모형에 의해 계산된 도달시간을 비교한다. 지진해일의 정확한 도달시간을 예측하는 것은 지진해일 방재측면에서 매우 중요하다. 즉, 지진해일의 도달시간에 관한 정확한 예측은 실제 지진해일 발생시 예경보를 통해 주민들을 신속히 대피시켜 예상되는 피해를 최소화할 수 있는데 매우 중요하게 사용될 수 있다.

Fig. 3에 도시된 것과 같이  $M=3$ 일 경우에는 수치해석에 의한 결과(numerical로 표시)가 관측자료(experimental로 표시)보다 다소 크게, 즉 도달시간이

느리게 나타나고 있는 반면,  $M=7$ 일 경우에는 수치해석 결과는 수리모형실험의 관측자료와 대체로 일치하고 있다. 수치모형에 의한 자료가 관측자료보다 도달시간이 느리게 나타나는 이유는 지배방정식의 비선형항을 차별화할 때 사용된 upwind 기법에 의한 발생하는 인위적인 점성 때문인 것으로 판단된다(Roache, 1976). Fig. 3에서는 또한 입사파가 원추형 섬을 향해 굴절되어 있음을 알 수 있는데 이는 원추형 섬 주위의 수심보다 외해지역의 수심이 깊기 때문에 파랑이 더욱 빨리 진행하기 때문이다.

Fig. 4는  $\epsilon=0.05$  일 때 원추형 섬 주위에서의 고립파의 최대 처오름높이를 도시한 것으로 수치모형의 결과가 하나인 반면에 수리실험 관측자료가 많은 것은 동일한 조건하에서 여러 차례 실험을 수행했기 때문이다. 본 연구에서 최대 처오름높이는 해안선에 도달한 파랑이 해안 경사면을 올라가는 최고높이까지의 최초 수면으로부터의 연직높이를 의미한다. 그림에서  $R$ 과  $A$ 는 각각 최대 처오름높이와 입사파의 파고를 의미한다.  $M=3$ 일 경우에는 처오름높이의 변화가 다소 단조로운 반면에  $M$ 이 증가할수록  $\beta=0$  이후에서는 처오름높이가 계속 감소하다가  $\beta=\pi$ 에서 매우 급격하게 증가함을 알 수 있다. 특히,  $M=7$ 의 경우에는

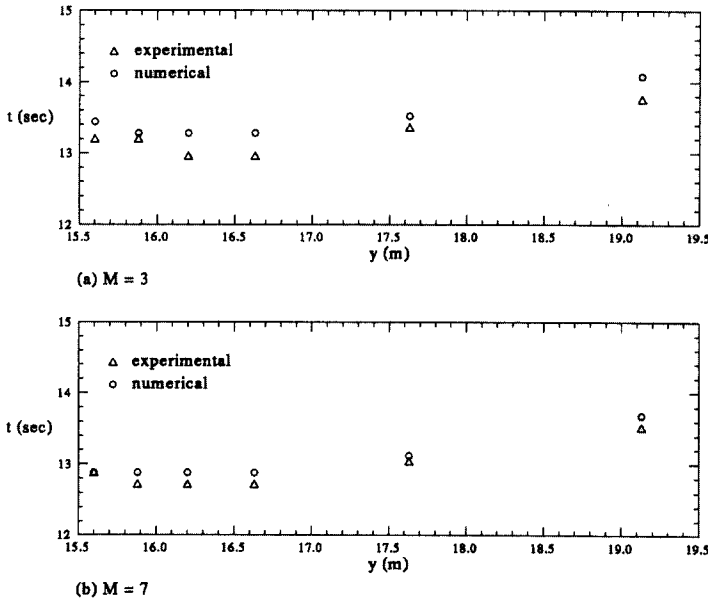


Fig. 3. Comparison of Arrival Time of the Leading Wave Peaks ( $\epsilon = 0.1$ )

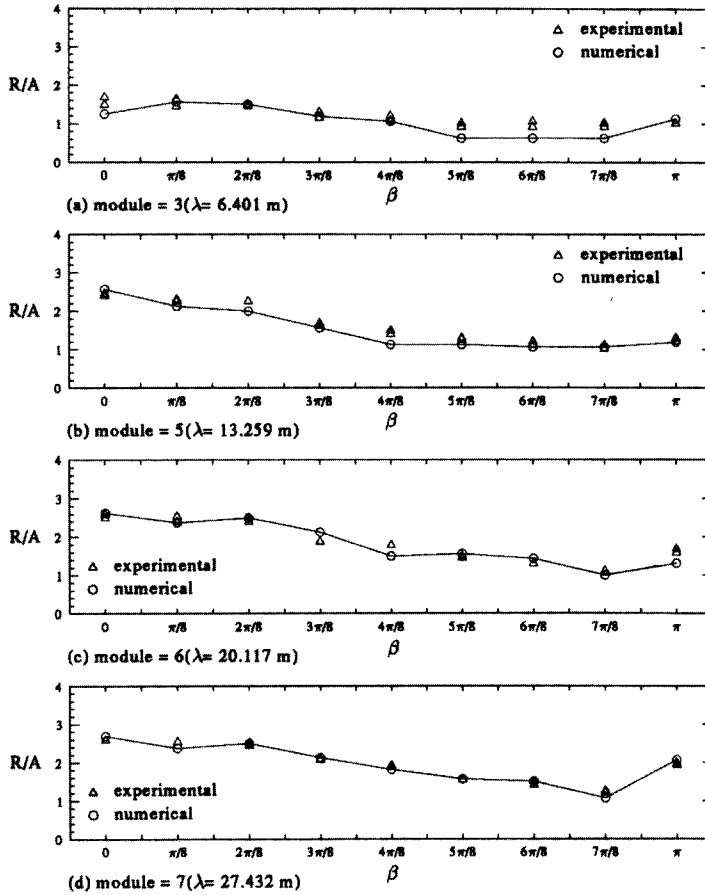


Fig. 4. Comparison of the Normalized Maximum Run-up Height around the Conical Island ( $\epsilon = 0.05$ )

$\beta = \pi$ 에서의 최대 초오름높이는  $\beta = 7\pi/8$ 의 초오름높이의 두 배에 이르고 있음을 알 수 있다. 이는  $\beta = \pi$ 에서의 초오름높이는 섬 주위를 따라 진행하던 파가 섬의 배후지역에서 충돌하여 발생하기 때문이다. 즉, 파랑의 진행속도는 대략  $h^{1/2}$ 에 비례하므로 외해 지역의 파가 빠르게 진행하는 관계로 입사파는 전체적으로 섬을 향해 굴절되어 진행한다. 이 때, 섬의 경사 지역에 파랑의 일부가 갇혀 섬 주위를 따라 진행하다가, 섬의 뒷면에서는 서로 반대방향에서 마주보며 진행하다가 충돌하여 매우 큰 초오름높이를 발생시킨다.

Fig. 5는  $\epsilon = 0.1$ 일 때 원추형 섬 주위에서의 고립파의 최대 초오름높이를 비교한 것으로 Fig. 4의 결과와 비슷한 경향을 나타내고 있다. 다만, M이 6보다 클 경우에는  $\beta = \pi$ 에서의 초오름높이가  $\beta = 0$ 에서의 초

오름높이보다 크게 관측되고 있다. 전체적으로 초오름높이는 섬의 전면에서 매우 크게 관측된 후에는  $\beta$ 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. Fig. 5에서 M이 증가할수록 섬의 배후지역에서의 최대 초오름높이가 매우 급하게 증가하고 있음을 알 수 있다. 즉, M이 증가할 경우 갇힌 파가 보유한 에너지가 증가하기 때문에 최대 초오름높이 또한 커지기 때문이다.

Table 2는 M의 변화에 따른  $\beta = \pi$ 과  $\beta = 7\pi/8$ 에서의 최대 초오름높이의 비율, 즉  $R_{\pi}/R_{7\pi/8}$ 를 열거한 것이다. M이 4보다 작을 경우에는 M의 증가에

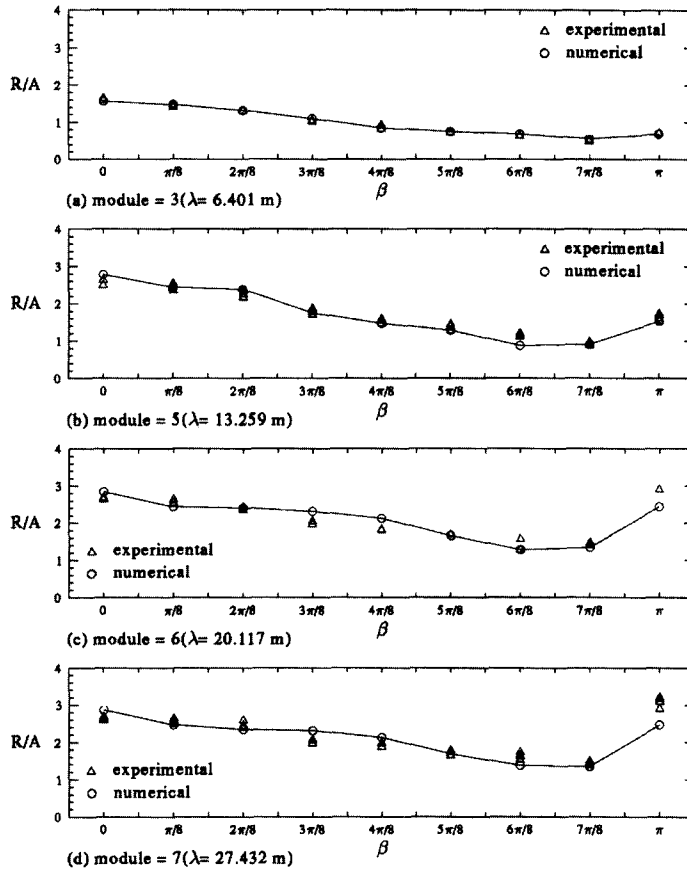


Fig. 5. Comparison of the Normalized Maximum Run-up Height around the Conical Island ( $\epsilon = 0.1$ )

Table 2. Comparison of Maximum Run-up Height in the Lee of the Conical Island

M	experimental test			numerical model		
	$\beta = 7\pi/8$	$\beta = \pi$	ratio	$\beta = 7\pi/8$	$\beta = \pi$	ratio
1	0.0145 m	0.0160 m	1.103	0.0153 m	0.0154 m	1.006
2	0.0152 m	0.0174 m	1.145	0.0158 m	0.0163 m	1.032
3	0.0174 m	0.0237 m	1.362	0.0180 m	0.0220 m	1.222
4	0.0289 m	0.0411 m	1.422	0.0273 m	0.0369 m	1.352
5	0.0311 m	0.0538 m	1.730	0.0290 m	0.0490 m	1.690
6	0.0469 m	0.0937 m	1.998	0.0430 m	0.0780 m	1.814
7	0.0469 m	0.0998 m	2.128	0.0430 m	0.0790 m	1.837

따른 비율의 증가가 완만한 반면, M이 4보다 큰 경우에는 증가가 매우 급한 것을 보여주고 있다. 즉, 입사파의 폭이 해저지름보다 작을 경우에는 섬의 배후지역에서의 최대 초오름높이가 상대적으로 적은 반면에, 파

봉선의 길이가 해저지름보다 클 경우에는 최대 초오름높이가 크게 발생함을 알 수 있다. 따라서, 지진해일에 의한 피해는 상대적으로 작은 섬이 큰 섬에 비해 클 수 있음을 알 수 있다.

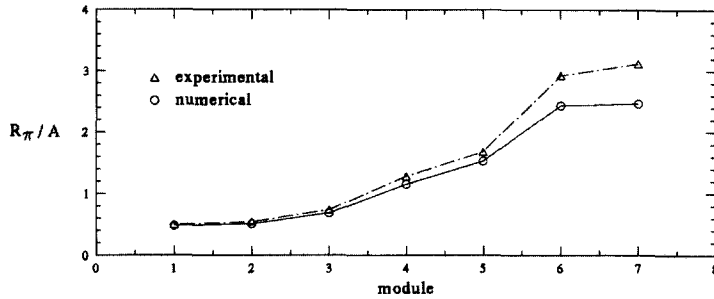


Fig. 6. Relative Run-up Height in the Lee Side of the Conical Island ( $\epsilon = 0.1$ )

마지막으로, Fig. 6은 M의 변화에 따른 원추형 섬의 배후지역에서의 상대적인 처오름높이의 변화를 도시한 것이다. Table 2에서 설명한 것과 같이 M이 4보다 작을 경우에는 처오름높이의 증가가 완만한 반면에, M이 4보다 큰 경우에는 증가가 매우 급하게 나타남을 알 수 있다. 전체적으로 수치모형에 의한 결과는 수리실험 관측자료보다 작게 계산되어 있음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

인도네시아의 Flores 섬 지진해일과 일본의 Hokkaido 섬 지진해일에서 관측되었던 원추형 섬 배후지역의 높은 처오름높이에 관한 원인을 수치모형실험을 통하여 해석하였다. 수치모형은 비선형 천수방정식을 유한차분법으로 적분하였으며, 수치모형을 이용하여 원추형섬 주위에서의 입사파의 도달시간과 배후지역에서의 최대 처오름높이를 계산하여 수리모형실험 관측자료와 비교한 결과 수치모형은 관측자료와 매우 근사한 결과를 제공하는 것으로 증명되었다.

원추형섬 주위의 최대 처오름높이는 섬주위의 해저 지형에 갇힌 파랑에 의해 발생하며, 특히 섬의 배후지역에서는 섬주위를 따라 서로 반대 방향으로 진행되는 파랑이 충돌하여 매우 큰 처오름높이를 발생시키는 것을 밝혀냈다. 원추형섬 주위에서의 최대 처오름높이는 원추형섬의 해저지름과 입사파의 파봉선 길이의 비율에 따라 변하고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 섬의 형상을 원추형, 경사각을 1V:4H로 고정하였으나 여러 가지 형상의 섬과 경사각등 다양한 환경에서의 최대 처오름높이의 변화를 연구하는 것 또한 가치있을 것이다. 아울러, 원추형섬 주위를 따라 진행되는 갇힌 파에 의해 발생하는 edge파의 특성 또한 추후 연구되어야 할 과제이다.

## 감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단의 연구비(과제번호: 1997-003-E00536)를 지원받아 연구를 수행하였기에 이에 사의를 표합니다. 아울러, 본 논문의 최종본이 나올 수 있도록 유익한 조언을 해주신 심사자 분들께도 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- Arthur, R.S. (1946). "Refraction of water waves by islands and shoals with circular bottom contours." *Trans. Am. Geophys. Union*, Vol. 27, pp. 168-177.
- Briggs, M.J., Synolakis, C.E. and Harkins, G.S. (1994). "Tsunami runup on a conical island." *Proc. of Int. Sym.: Waves-Physical and Numerical Modelling*, pp. 446-455.
- Cho, Y.-S. (1995). *Numerical simulations of tsunami propagation and run-up*, PhD Thesis, Cornell University, USA.
- Hokkaido Tsunami Survey Group (1993). "Tsunami devastates Japanese coastal region." *EOS, Transactions, AGU*, Vol. 74, pp. 417, 432.
- Lautenbacher, C.C. (1970). "Gravity wave refraction by islands." *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 41, pp. 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. of Fluid Mechanics*, Vol. 302, pp. 259-285.



- Liu, P.L.-F., Cho, Y.-S. and Fujima, K. (1994). "Numerical solutions of three-dimensional run-up on a circular island." *Proc. of Int. Sym.: Waves-Physical and Numerical Modelling*, pp. 1031-1040.
- Roache, P.J. (1976). *Computational fluid dynamics*. Hermosa Publishers.
- Smith, R. and Sprinks, T. (1975). "Scattering of surface waves by a conical island." *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 72, pp. 373-384.
- Yeh, H.H., Imamura, F. Synolakis, C.E., Tsuji, Y., Liu, P.L-F. and Shi, S. (1993). "The Flores island tsunamis." *EOS, Transactions*, Vol. 74, pp. 369-373.
- (논문번호:98-024/접수:98.04.22/심사완료:98.06.12)