

## 매개변수에 따른 지진해일의 처오름높이 예측 Estimation of Tsunami Run-up Heights with Parameters

안영창\* / 황규남\*\* / 조용식\*\*\*

Ahn, Young-Chang / Hwang, Kyu-Nam / Cho, Yong-Sik

---

### Abstract

Since many islands are located in the South Sea, unexpected damage by tsunamis could be caused by mutual interferences between adjacent islands. In this study, the variation of run-up heights is investigated by using different crest lengths of incident waves and different distances between two adjacent islands. The run-up height sharply increases when the crest length of incident waves is greater than the distance between outer boundaries of two islands. The run-up height also increases as the distance between two adjacent islands decreases.

**Keywords** : tsunami, run-up height, crest length of incident wave, shallow-water equations

---

### 요 지

우리나라 남해안 지역은 다도해 지역이므로 대규모 지진해일이 발생하였을 때 섬과 섬 사이의 상호간섭으로 인한 예기치 않은 지진해일 피해가 우려될 수도 있다. 본 연구에서는 두 개의 원형 섬 사이의 처오름높이 변화를 입사파 폭과 두 섬 사이의 거리와 같은 매개변수를 이용하여 계산하였다. 두 개의 원형섬 주위에서 입사파 수평길이 가 두 섬의 양끝 바깥쪽 해저지름 거리보다 클 경우 두 섬 안쪽 부분에서 처오름높이가 급격히 증가하였으며, 두 섬 사이의 간격이 줄어들수록 입사파의 처오름높이가 증가하였다.

**핵심용어** : 지진해일, 처오름높이, 입사파 폭, 천수방정식

---

\* 정회원, (주) 건일엔지니어링 항만부 사원  
Kunil Engineering Coastal and Harbor Division

\*\* 정회원, 전북대학교 토목환경공학과 조교수  
Assistant Professor, Dept. of Civil and Env. Eng., Chonbuk Univ., Chonbuk 561-756, Korea.  
(E-mail : khwang@moak.chonbuk.ac.kr)

\*\*\* 정회원, 교신저자, 한양대학교 토목공학과 부교수  
Corresponding author, Dept. of Civil Eng., Hanyang Univ., Seoul 133-791, Korea.  
(E-mail : ysc59@hanyang.ac.kr)

## 1. 서 론

근래에 들어 세계적으로 지진발생의 빈도가 급증하여, 여러나라에서 지진에 의한 피해가 다수 보도되고 있다. 지진발생의 증가는 단층의 운동이 활발히 이루어지고 있음을 의미하고, 이에 따라 지진해일의 발생빈도 역시 증가하고 있어 지진해일의 연구에 대한 필요성과 그 위험성에 대한 관심이 세계적으로 높아지고 있다.

최근, 수년간 태평양 연안에서는 많은 인명피해와 재산피해를 초래한 대규모 지진해일이 빈번히 발생하였다. 예를 들어, 1992년 인도네시아 Flores섬 지진해일과 1993년 동해에서 발생한 Hokkaido 지진해일은 진원지 부근에 위치한 Babi섬과 Okushiri섬의 배후지역(shadow zone)에서 높은 초오름이 발생하는 특이 현상이 나타났다(Cho와 Liu, 1999). 두 섬에서의 지진해일의 거동은 그 특이 현상으로 인해 학자들의 관심을 끌었으며 그 원인을 규명하기 위해 일본과 미국에서 대규모 수리모형실험을 실시하였다. 또한, 1996년 인도네시아 Irian Jaya 지진해일은 Biak섬으로부터 약 106km 떨어진 태평양에서 발생한 Richter 규모 8.2의 강력한 해저지진에 의해 야기된 것으로 인도네시아에서는 161명의 인명과 많은 재산피해를 초래하였다. 이 지진해일로 우리나라 남해안을 비롯한 일본 및 태평양의 여러 섬과 연안국가까지 지진해일 주의보가 발령되기도 하였다(한국일보, 1996).

더욱이, 한반도 남해는 전국 섬의 60% 이상이 남해안에 몰려있어 1996년 인도네시아 Irian Jaya 지진해일과 같은 지진해일이 발생하였을 때 섬과 섬 사이의 상호간섭으로 인한 예기치 않은 지진해일 피해가 우려될 수도 있으므로 이에 따른 섬들 사이에서 발생하는 초오름높이를 연구하는 것은 공학적인 측면에서 매우 중요하다.

지금까지 지진해일에 관한 연구는 국내외적으로 여러 학자들에 의해 수행되어 왔다. 최병호와 이호준(1992)은 1983년에 발생한 동해중부지진해일을 산정하기 위한 연구를 하였고, 조용식(1995)은 2차원 경계요소법 수치모형을 이용하여 급경사에서 고립파의 초오름과 진행과정을 연구하였다. 또한, 조용식과 윤태훈(1996)은 크노이드파 이론을 이용하여 장파의 초오름높이를 연구하였으며, 우승범 등(1999)은 Taiwan의 1986년 Hwa-lien 지진해일에 대한 다중격자연결 지진해일 모형의 적용에서 폐쇄다중격자 유한차분모형을 이용하여 지진해일의 전파와 초오름을 수치모의하였다.

Cho와 Liu(1999)는 1992년 인도네시아 Babi섬의 배후지역에서 발생한 높은 초오름높이에 대한 물리적 규명을 위해 수리모형실험에서의 해와 수치해를 비교하였다. 그러나 기존 연구의 대부분이 단일 섬에 의한 것이므로, 두 개의 섬이 위치해 있을 때 섬과 섬 사이의 상호간섭으로 인한 지진해일 초오름 변화에 대해서는 아직 연구가 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 두 개의 원형 섬 사이의 초오름높이 변화를 입사파 폭과 두 섬 사이의 거리와 같은 다양한 매개변수를 이용하여 연구하였다. 아울러, 두 섬 사이의 초오름높이에 따른 물리적 변화를 조사하였다.

다음 장에는 본 연구의 수치모형을 검증하기 위해 사용한 자료를 제공한 미국 육군 공병단 해안공학연구소의 수리모형실험에 대하여 간단히 설명하였다. 제3장에서는 수치모형의 지배방정식과 수치기법에 대하여 간단히 서술하며, 제4장은 수치해석 결과를 기술한다. 마지막으로, 제5장에서는 결론을 서술하였다.

## 2. 수치모형실험

본 연구에서는 수조의 영역을 제외한 섬에 대한 제원은 Cho와 Liu(1999)가 사용하였던 제원을 그대로 선택하였다. 또한, 두 섬 사이에서의 입사파 폭과 두 섬 사이의 거리에 따른 초오름높이를 계산하기 위하여 두 섬 사이의 거리를 점점 증가시키거나 감소시키면서 원형섬 주위에서의 초오름높이 변화에 대하여 연구하였다.

본 연구에 사용된 수조의 길이는 가로 40m, 세로 56m의 수조를 그 대상 영역으로 하였고 수조의 수심( $h$ )은 0.32m, 입사파는 파고( $A$ )가 0.032m인 고립파를 사용하였으며, 비선형성의 크기를 나타내는 수심( $h$ )에 대한 입사파의 파고의 비, 즉  $\epsilon(=A/h)$ 은 0.1 이다.

입사파의 수평길이( $\lambda$ )와 두 섬 사이의 거리( $D$ )와의 비율( $\lambda/D$ )에 따른 지진해일 초오름높이에 대한 물리적 현상을 규명하기 위해 조파기의 수를 조절하여 여러 경우의 조파기 길이에 대한 수치모형실험을 수행하였다. 아울러, 입사파의 수평길이는 고정시키고 두 섬 사이의 거리를 점차 증가시키면서 초오름높이의 변화를 조사하였다.

입사파는 수조의 중심인  $x=28m$ 를 기준으로 좌우로 대칭이 되게 들어오며, 두 섬 사이의 거리와 섬에 대한 제원은 표 1에, 입사파의 수평길이에 대한 정보는 표 2에 열거하였다. 표 1과 표 2에서 거리는 두 섬의 바깥쪽까지의 거리를 나타내며,  $D$ 로 표시한다(그림 1

표 1. 두 섬사이의 거리와 섬에 대한 제원

구 분	거리 15.2m	거리 19.2m	거리 27.2m
해저 바닥지름	7.2m	7.2m	7.2m
경 사	1V : 4H	1V : 4H	1V : 4H
중심점	섬 A : 24m	섬 A : 22m	섬 A : 18m
	섬 B : 32m	섬 B : 34m	섬 B : 38m

표 2. 입사파의 수평길이

입사파의 수평길이	$\lambda/D$ (거리 15.2m)	$\lambda/D$ (거리 19.2m)	$\lambda/D$ (거리 27.2m)
$\lambda=10m$	0.657	0.520	0.367
$\lambda=16m$	1.052	0.833	0.588
$\lambda=26m$	1.710	1.354	0.955
$\lambda=36m$	2.368	1.875	1.323
$\lambda=46m$	3.03	2.395	1.691

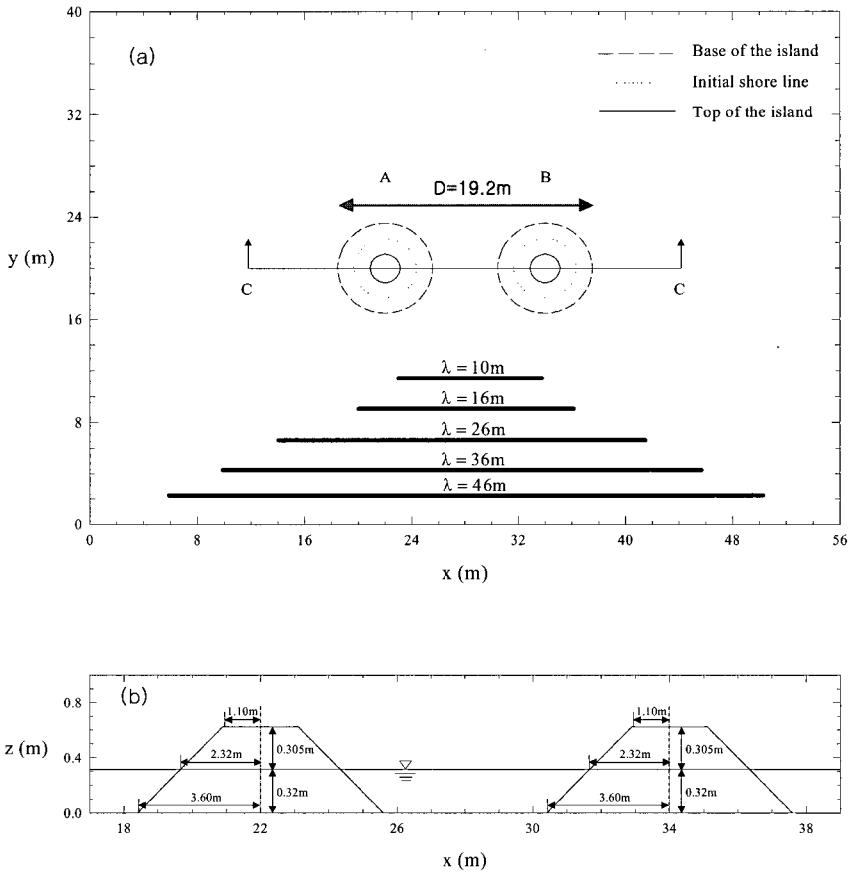


그림 1. 수치실험에 이용된 수조와 두 개의 원형섬의 평면도와 측면도 ( $D=19.2m$ )

참조). 또한, 수치모형실험에 사용된 수조의 평면도와 측면도는 그림 1에 도시하였다.

### 3. 지배방정식

본 연구에서 수치모형의 지배방정식으로는 비선형 천수방정식을 사용한다. 지진해일이 대양을 가로질러 연안으로 접근하면 파장은 짧아지고, 파고가 증가할 뿐만 아니라 분산의 중요성이 감소하기 때문에 비선형성이 매우 중요한 요인으로 작용한다. 식 (1)-(3)은 마찰 항을 생략한 비선형 천수방정식이다.

Liu 등(1995)에 따르면 수치모형에 의해 계산된 최대 초오름높이를 수리실험에 의한 관측자료와 비교한 결과 바다마찰저항은 큰 역할을 하지 않는 것으로 밝혀져 본 연구에서는 바다마찰저항은 고려하지 않았다. 지배방정식 (1)-(3)에서  $P$ 와  $Q$ 는 각각  $x$  축과  $y$  축 방향의 체적 흐름을, 즉  $P=uH$ 와  $Q=vH$ 를 나타내고,  $H=h+\zeta$ 로  $H$ 는 전체수심,  $\zeta$ 는 자유수면변위를 나타낸다

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

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

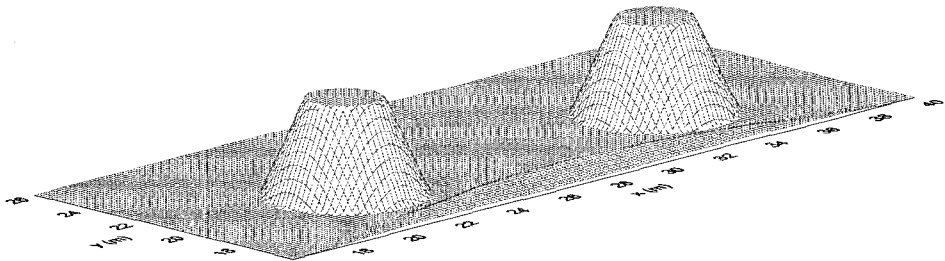
$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{PQ}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Q^2}{H} \right) + gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

지배방정식 (1)-(3)의 유한차분기법과 이동경계조건은 기존의 연구(예를 들어, Liu 등, 1995; Cho와 Liu, 1999)에서 이미 상세히 언급되어 있으므로 본 연구에서는 생략한다.

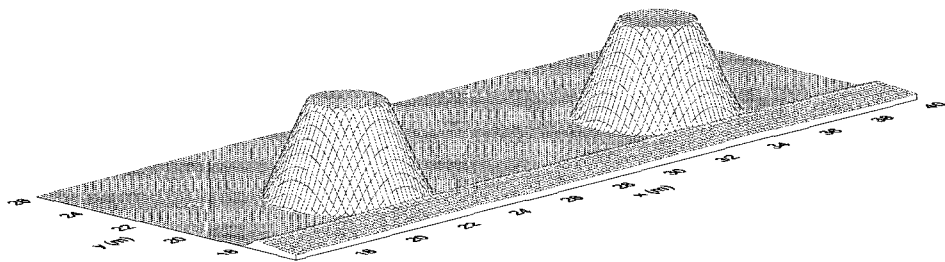
### 4. 수치해석 결과

본 연구의 이해를 돕기 위해 먼저, 고립파가 두 개의 원형섬을 향해 진행할 때 섬 주위에서의 수면변화를 그림 2에 도시하였다. 그림 2에서 보는 바와 같이 두 개의 섬 사이로 들어오는 입사파는 서로 대칭이 됨을 알 수 있다.

그림 2는 두 섬 사이의 거리가 19.2m일 때의 양상으로 비선형성( $\epsilon = A/h$ ,  $A$ 는 파고)을 나타내는  $\epsilon$ 이

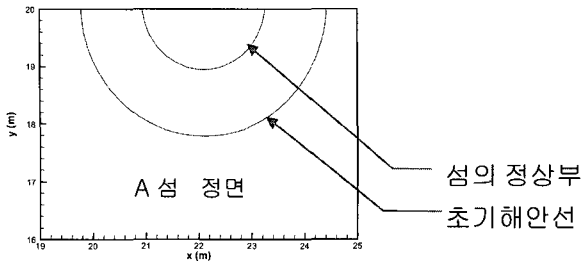


(a)  $\lambda/D=0.520$ ,  $t=14$  sec

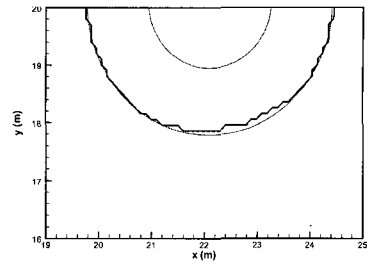


(b)  $\lambda/D=1.875$ ,  $t=14$  sec

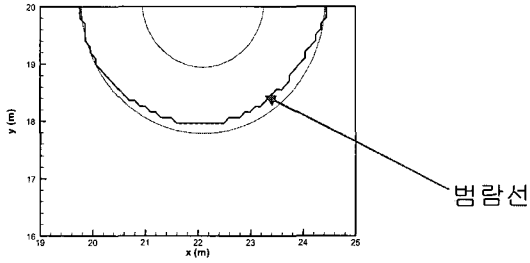
그림 2. 순간촬영(snapshot)한 자유수면변위



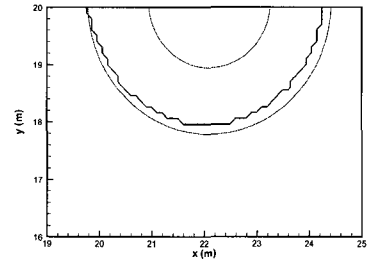
(a)  $t=0$  sec



(b)  $t=16$  sec

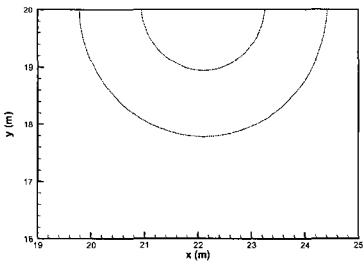


(c)  $t=17$  sec

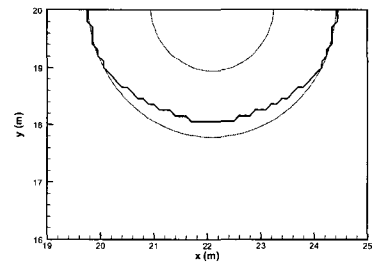


(d)  $t=18$  sec

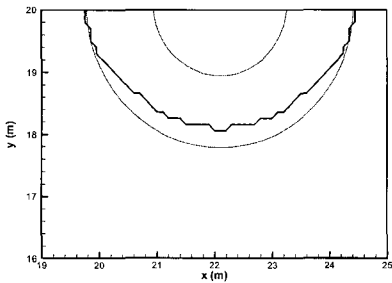
그림 3. 지진해일의 시간에 따른 범람양상 ( $\lambda/D=0.520$ )



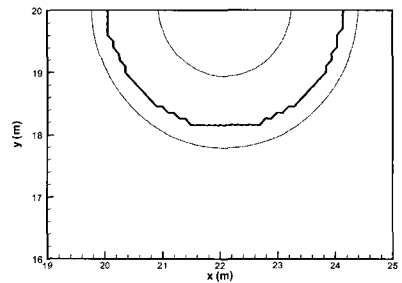
(a)  $t=0$  sec



(b)  $t=16$  sec



(c)  $t=17$  sec



(d)  $t=18$  sec

그림 4. 지진해일의 시간에 따른 범람양상 ( $\lambda/D=1.875$ )

0.1이고, 파봉선의 길이( $\lambda$ )와 두 섬 사이의 양끝 해저 지름 거리( $D$ )와의 비 즉,  $\lambda/D$ 가 0.520과 1.875일 때를 순간촬영(snapshot)의 형태로 나타낸 것이다.

다음은 시간에 따른 지진해일의 범람과정을 범람도를 이용하여 도시하였다. 섬의 위치, 입사되는 입사파 둘 다 대칭이기 때문에 두 섬에서의 물리적 양상 또한 같다. 따라서, 두 개의 섬 중, A점을 선택하여 섬 정면에서의 지진해일 범람을 그림 3과 그림 4에 나타내었다. 그림 3과 그림 4는 두 섬 사이의 거리가 19.2m일 때를 대상으로 하였다.

먼저, 그림 3은  $\lambda/D$ 가 0.520일 때의 양상으로 그림에서 보는 바와 같이 입사파 폭의 길이가 A점을 기준으로 오른쪽으로 더 긴 파봉선이 들어오는 역할을 하므로 섬 안쪽이 바깥쪽 보다 지진해일에 의한 최대 범람 구역이 더 큰 것을 알 수 있다.

또한,  $\lambda/D$ 가 1.875인 그림 4에서는 입사파 폭의 길이가 늘어남에 따라 지진해일에 의한 최대 범람구역은 섬 정면에서  $\lambda/D$ 가 0.520일 때 보다 더 넓어지는 것을 볼 수 있으며, 이러한 현상은 입사파의 수평길이가 가장 클 때 해안선 근처에서의 수심변화로 인한 굴절로 두 섬 모두 섬의 중심을 기준으로 좌우로 파랑이 focusing되어 섬 정면에서 매우 높은 처오름높이를 발생시킨다. 결과적으로 입사파의 수평길이가 늘어남에 따라 최대 범람 지역도 넓어지므로 지진해일에 의한 피해는 상대적으로 작은 섬이 큰 섬에 비해 클 수 있음을 나타낸다.

다음은 입사파의 수평길이와 두 섬 사이의 거리에 따른 지진해일의 처오름높이 변화를 예측하기 위하여 두 섬 사이의 거리를 점점 증가시키거나 감소시키면서 원형섬 주위에서의 처오름높이 변화에 대하여 조사하였다.

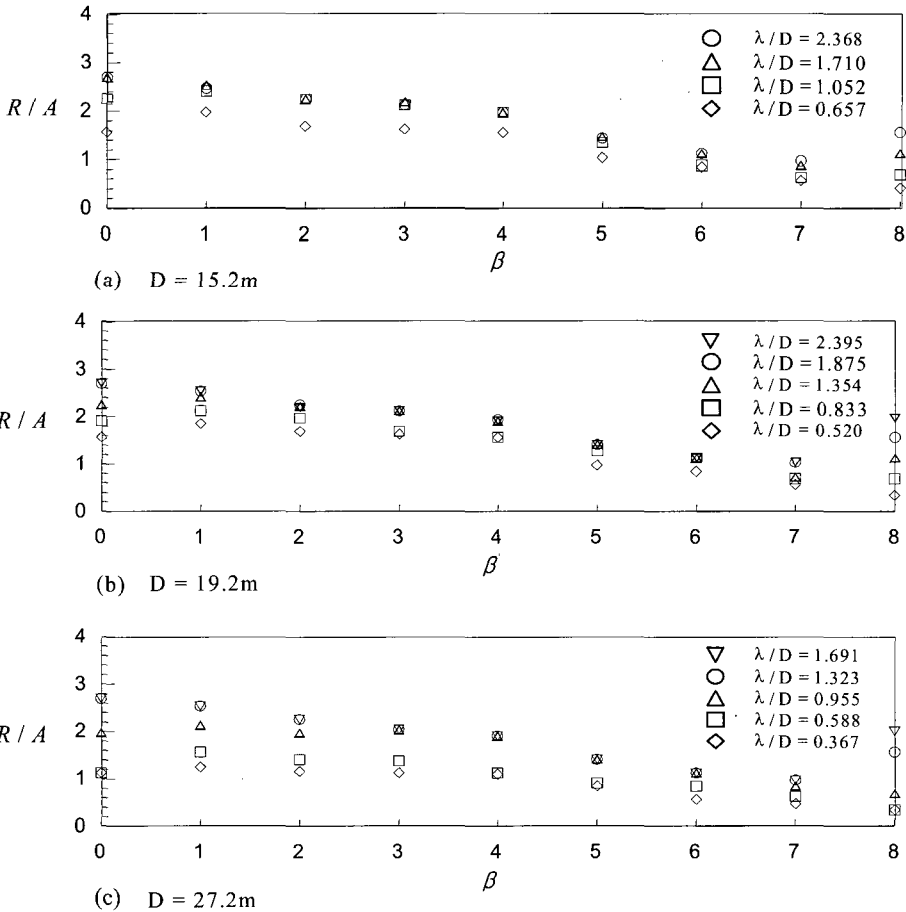


그림 5.  $\lambda/D$ 에 따른 섬 안쪽부분에서의 처오름높이 비교

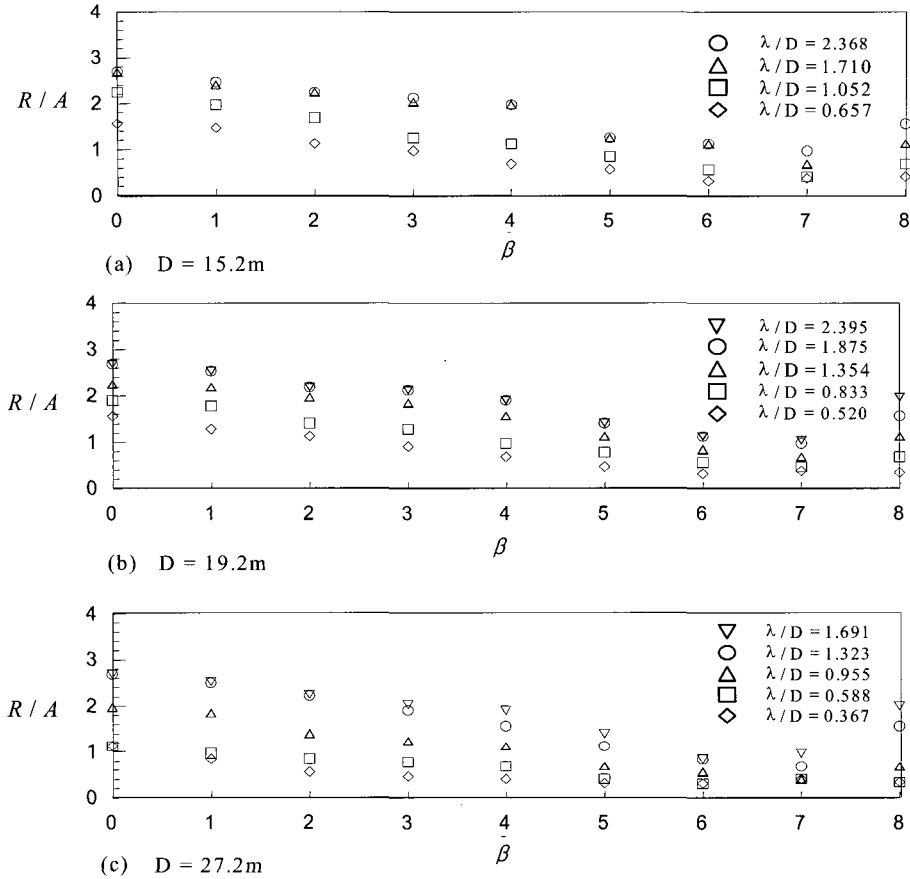


그림 6.  $\lambda/D$ 에 따른 섬 바깥쪽부분에서의 처오름높이 비교

그림 5와 그림 6은 표 1과 표 3에 제시한 바와 같이 두 섬 사이의 거리가 15.2m, 19.2m, 27.2m일 때, 섬 안쪽부분과 바깥쪽부분에서 처오름높이의 변화를  $\lambda/D$ 의 크기에 따라 나타낸 것으로, 처오름높이의 결과는 두 섬의 물리적 양상이 서로 같기 때문에 두 개의 섬 중 A섬의 처오름높이만을 산정하여 도시하였다. 또한, 입사파 방향에서 반시계 방향을 섬의 안쪽 측면인 inside, 시계방향을 섬의 바깥쪽 측면인 outside로 정하고  $\beta$ 를 따라  $\pi/8$ 씩 돌아가며 처오름높이를 측정하였다. 여기서,  $R$ 은 처오름높이,  $\beta$ 는 입사파 방향에서 섬 둘레를 시계방향과 반시계방향으로 측정한 각도를 나타낸다.

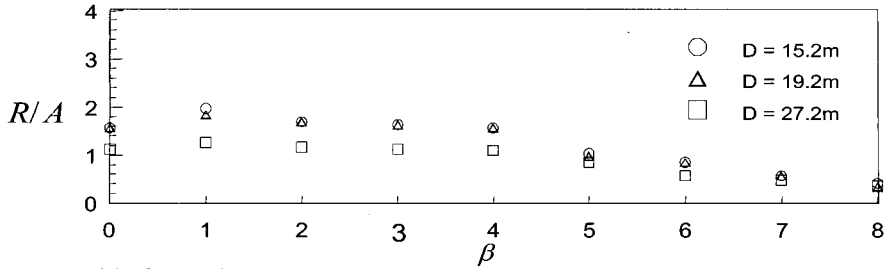
그림에서 보는 바와 같이 각 섬 사이의 거리마다 섬 안쪽부분에서의 처오름높이는 공통적으로  $\lambda/D$ 의 비율에 따라 증가하고 있으며,  $\lambda/D$ 가 1보다 크게 되면 즉, 입사파의 수평길이가 두 섬 사이의 거리보다 크게 되면

섬 안쪽은  $\beta$ 를 따라 일부 구역 또는 전체 영역에서 처오름높이가 더 이상 증폭되지 않는 최대치를 이룬다.

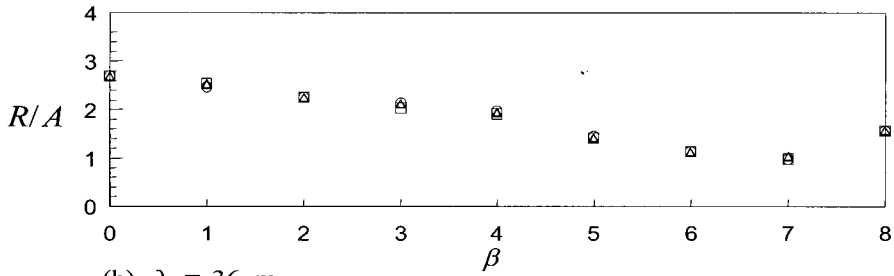
각도  $\beta$ 에 따른 처오름높이의 변화도 섬 안쪽부분에서는 섬의 정면보다는 측면에서 처오름높이가 더 높았으며,  $\lambda/D$ 가 증가하면서 처오름높이는 점차 감소하다가 섬 후면인  $\beta=\pi$ 에서는 급격히 증가하는 모습을 보인다. 반면에, 섬 바깥쪽부분에서는 처음부터 처오름높이의 변화가  $\beta$ 가 증가함에 따라 점차 감소하며  $\beta=\pi$ 에서 급격히 증가하였다.

다음은 입사파 수평길이 각각에 대하여 두 섬 사이의 거리변화에 따른 처오름높이를 서로 비교한 것으로, 그림 7은 섬 안쪽을, 그림 8은 섬 바깥쪽부분의 처오름높이를 도시하였다.

두 섬 사이의 거리 변화에 따른 처오름높이는 그림에서와 같이 두 섬 사이의 거리가 멀어질수록 처오름높이 역시 작아지는 것을 볼 수 있다. 아울러, 파봉선의

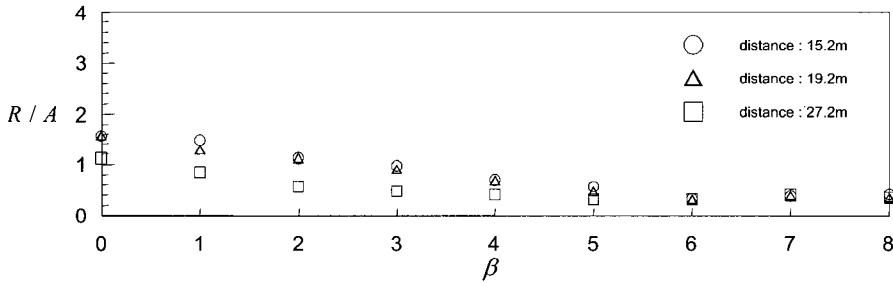


(a)  $\lambda = 10$  m

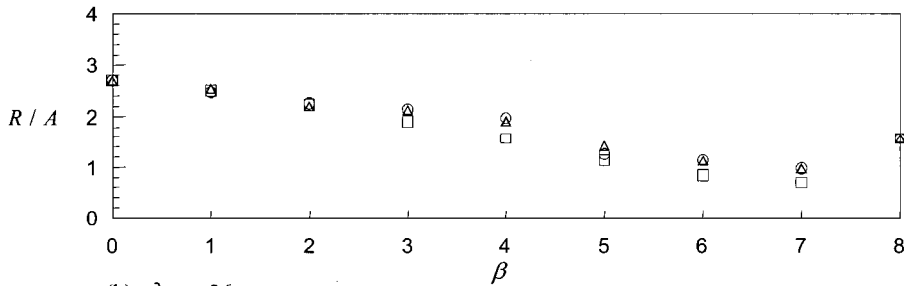


(b)  $\lambda = 36$  m

그림 7. 두 섬 사이의 거리에 따른 섬 안쪽에서의 처오름높이 비교



(a)  $\lambda = 10$  m



(b)  $\lambda = 36$  m

그림 8. 두 섬 사이의 거리에 따른 섬 바깥쪽의 처오름높이 비교

길이와 각 섬 사이의 거리와의 비( $\lambda/D$ )가 1에 근사하거나 1보다 큰  $\lambda=26$ m가 되면 두 섬 사이의 거리인  $D$

가 가장 좁은 원형섬 안쪽부분에서의 처오름높이의 증폭은 한계치에 도달하며,  $D$ 가 점점 커질수록 처오름높



이에 대한 증폭은 국부적으로 한계치에 도달한다(표 2 참조). 또한,  $\lambda=26\text{m}$ 일 때의  $D$ 에 따른 처오름높이로 볼 때 두 섬 사이의 거리인  $D$ 가 멀어질수록 그에 따른 섬 안쪽에서의 처오름높이의 증폭에 도달하는 파봉선의 길이는 더 길어진다는 것을 알 수 있다.

결론적으로, 두 섬 사이의 거리에 따른 처오름높이의 증폭에 대한 한계도 파봉선의 길이에 비례한다는 사실을 알 수 있다. 따라서, 지진해일에 의한 피해는 근접한 두 개의 원형섬이 먼 거리에 있는 두 개의 원형섬에 비해서 상대적으로 그 피해가 클 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 비선형 천수방정식을 유한 차분법으로 해석하여 두 섬 사이의 거리에 따른 지진해일의 처오름높이 변화를 자유수면변위와 범람도, 처오름높이 등을 통하여 제시하였다. 일정한 거리를 두고 있는 두 개의 원형 섬 주위에서의 입사파 폭에 따른 처오름높이의 변화는 입사파의 수평길이가 두 섬의 양끝 바깥쪽 해저지름의 거리보다 컸을 때 섬 안쪽 부분에서 처오름높이의 최대치를 나타내었다. 특히, 입사파의 수평길이가 가장 클 때는 해안선 근처에서의 수심변화로 인한 굴절로 두개의 섬 모두 섬 정면에서 섬의 중심을 기준으로 좌우로 파랑이 focusing되어 매우 높은 처오름높이를 발생하였다. 또한, 입사파 폭이 점점 증가할수록 그에 따른 처오름높이도 같이 커지는 것으로 보아 그 피해는 해상에 존재하는 섬 중 상대적으로 작은 섬이 큰 섬에 비해 클 수 있음을 알 수 있다.

본 연구에서 사용된 수치모형은 지진해일에 의한 피해를 모의할 수 있을 뿐만 아니라 범람도 작성에도 적용할 수 있다. 그러나, 실질적인 수치결과를 위해서는 세부적이고 정확한 지형에 대한 정보가 요구된다.

## 감사의 글

본 연구는 기상청 기상연구소의 특정사업 지진예지 및 지진해일 예측기술 개발의 지원으로 수행되었습니다. 본 연구는 또한 과학기술부 국가지정연구실사업 (한양대학교 해안공학연구실)으로 수행되었기에 이에 사의를 표합니다.

## 참 고 문 헌

- 우승범, 조용식, Liu, P.L.-F. (1999). "Application of multi-grid coupled tsunami model to 1986 Hwailien (Taiwan) tsunami." **자연재해경감학술발표회 논문집**, pp. 81-95.
- 조용식 (1995). "급경사에서 고립파의 처오름과 진행과정." **한국수자원학회논문집**, 제28권, 제6호, pp. 159-168.
- 조용식, 윤태훈 (1996). "급경사에서 크노이드파의 처오름." **한국해안해양공학회지**, 제8권, 제1호, pp. 44-51.
- 최병호, 이호준 (1992). "동해 중부지진에 의한 쓰나미 산정." **한국해안해양공학회 학술발표회 논문집**, pp. 29-33.
- 한국일보 (1996). 1996년 2월 18일, 제14845호.
- 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.
- Liu, P.L.-F., Cho, Y.-S., Briggs, M.J., Synolakis, C.E. and Kanoglu, U. (1995). "Run-up of solitary wave on a circular island." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 302, pp. 259-285.

(논문번호:03-19/접수:2003.02.14/심사완료:2003.04.22)