



Run-up heights of solitary waves on a circular island with asymmetric crest lengths

Cho, He Rin^{a*} · Cho, Yong-Sik^b

^aWater Resources Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

^bDepartment of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

Paper number: 17-066

Received: 16 August 2017; Revised: 23 August 2017; Accepted: 23 August 2017

Abstract

Many islands are scattered around the southern area of the Korean Peninsula and they may be very vulnerable to unexpected tsunami attacks. During the East Japan Tsunami Event occurred on March 11, 2011, many islands located at the southern area were affected by tsunamis. In this study, maximum run-up heights of solitary waves on a circular island with asymmetrical crest lengths investigated by using a numerical model based on the shallow-water theory. The obtained results could be used by local authorities to establish a defense plan against unexpected tsunami invasion.

Keywords: Solitary wave, Run-up height, Shallow-water equations, Coastal inundation

비대칭 파봉선 길이에 따른 원형섬에서 고립파의 처오름높이

조혜린^{a*} · 조용식^b

^a한국건설기술연구원 수자원·하천 연구소, ^b한양대학교 공과대학 건설환경공학과

요 지

우리나라 해안지역에는 많은 섬들이 위치하고 있어 대규모 지진해일이 발생하였을 때 섬과 지진해일의 상호작용으로 예기치 않은 지진해일 피해가 우려된다. 2011년 발생한 동일본 지진해일의 경우 제주도를 비롯한 남해안 섬들에 영향을 미쳤다. 본 연구에서는 천수이론에 근거한 수치모형을 이용하여 섬 중앙에 대하여 비대칭으로 입사하는 고립파의 처오름높이에 관하여 연구한다. 연구에서 얻은 결과는 지진해일의 급습에 대비한 방재대책을 수립하는데 사용될 수 있을 것이다.

핵심용어: 고립파, 처오름높이, 천수방정식, 해안범람

1. 서 론

지난 10여 년간 최근 태평양 연안, 소위 불의 고리(ring of fire)라 불리는 지역에서는 많은 해저지진이 발생하여 엄청난 인명피해와 재산피해를 초래한 대규모 지진해일을 유발시켰다. 지진해일은 해안가는 물론 주변에 위치한 섬들을 급습하여 상상을 초월하는 인명 및 재산피해를 초래하였다. 예를 들어, 1992년 인도네시아 플로레스(Flores)섬 지진해일과 1993

년 동해에서 발생한 홋카이도(Hokkaido) 지진해일은 진원지 부근에 위치한 바비(Babi)섬과 오키시리(Okushiri)섬의 배후지역(shadow zone)에서 높은 처오름이 발생하는 특이 현상이 나타났다(Cho and Liu, 1999). 두 섬에서의 지진해일의 거동은 그 특이 현상으로 인해 학자들의 관심을 끌었으며 그 원인을 규명하기 위해 일본과 미국에서 대규모 수치모형실험을 실시하였다(Cho, 1995). 또한, 1996년 인도네시아 이리안 자야(Irian Jaya) 지진해일은 비아크(Biak)섬으로부터 약 106 km 떨어진 태평양에서 발생한 리히터 규모 8.2의 강력한 해저 지진에 의해 야기된 것으로 인도네시아에서는 53명의 인명 피해와 많은 재산피해를 초래하였다. 이 지진해일로 우리나라

*Corresponding Author. Tel: +82-31-910-0551
E-mail: hrcho@kict.re.kr (H. R. Cho)

남해안을 비롯한 일본 및 태평양의 여러 섬과 연안국가까지 지진해일 주의보가 발령되기도 하였다(Hankookilbo, 1996).

서아시아 인도양에서 발생한 수마트라 지진해일은 역사에 기록된 자연재해 중 인명피해 관점에서 세 번째에 해당될 정도로 엄청난 재앙을 초래하였다. 최근, 수년간 태평양 연안에서는 많은 인명피해와 재산피해를 초래한 대규모 지진해일이 빈번히 발생하였다. 특히, 2004년 발생한 수마트라 지진해일은 스리랑카와 몰디브 등과 같은 섬지형에 엄청난 인명피해는 물론 막대한 재산피해를 입혔다. 특히, 인도양에 위치한 여러 섬, 예를 들어 스리랑카와 몰디브는 진원에서 상당한 거리가 떨어져있음에도 불구하고 지진해일에 의해 엄청난 인명피해와 재산피해가 발생하였다. 최근, 2011년 3월 11일 발생한 동일본 지진해일은 일본에서 20,001명의 인명피해(사망과 실종)와 약 3,000억 달러의 재산피해 물론, 현재도 진행 중인 후쿠시마 원자력발전소의 피해 등을 유발시켜 전세계적으로 엄청난 사회적 충격을 주고 있다. 지진해일은 우리나라의 남해안과 제주도를 비롯한 여러 섬들에서 관측되었으나 다행히 초오름높이는 높지 않아 인명 및 재산피해는 발생하지 않았다.

우리나라 해안에는 많은 섬들이 위치하고 있을 뿐만 아니라 많은 원자력발전소와 화력발전소는 물론 모든 항만과 여항시설이 건설되어 있어 지진해일의 급습에 노출되어 있다. 따라서, 우리나라 근해에서 발생한 지진해일뿐만 아니라 우리나라에서 멀리 떨어진 지역에서 발생한 지진해일에 대해서도 방재 대책을 구축하는 것이 바람직하다. 특히, 한반도 남해에는 전국 섬의 60% 이상이 위치하고 있어 2011년 동일본 지진해일과 같은 대규모 지진해일이 발생하였을 때 섬과 지진해일과의 상호작용 등으로 인해 예상하지 못한 피해가 우려될 수 있으므로 이에 따른 섬지역에서 지진해일의 최대 초오름높이를 연구하는 것은 공학적인 측면에서 매우 중요하다. 역사적으로도, 일본 텐리대학교에서 보관중인 제주도의 읍지 탐라지에 따르면 1707년 일본 남동쪽 태평양연안 호에이(Hoei) 지역에서 일어난 규모 8.6의 지진으로 지진해일이 발생하여 우리나라 제주도에도 지진해일의 영향을 받았다는 기록이 있다(KBS, 2011).

지금까지 지진해일에 관한 연구는 많은 학자들에 의해 수행되어 왔다. 여러 연구 중에서 Cho and Liu(1999)는 1992년 인도네시아 바비(Babi)섬과 1993년 일본 오키시리섬의 배후 지역에서 발생한 예상하지 못한 높은 지진해일 초오름높이에 대한 공학적 규명을 위해 수치해석을 수행하였다. 수치해석의 결과는 미국 육군 공병단에서 수행한 수리모형실험의 관측 자료와 비교하였으며, 매우 잘 일치하는 것으로 보고되었다. 그러나 Cho와 Liu의 연구는 섬에 입사하는 파랑이 섬 중앙을 기준으로 대칭으로 입사하는 것으로 한정하였다.

본 연구에서는 원형섬에 입사하는 고립파의 최대 초오름높이 변화를 수치모형을 이용하여 해석한다. 특히, 입사파의 파봉선 길이의 변화에 따른 비대칭으로 입사하는 고립파의 초오름높이의 변화를 연구하여 섬지역에서의 지진해일 방재 대책 구축에 필요한 자료를 제공한다. 참고로, 기존의 많은 지진해일 연구에서 원형섬에 비대칭으로 입사하는 고립파의 초오름높이를 연구한 경우는 없다(예를 들어, Choi et al., 2016).

다음 장에는 본 연구의 수치모형을 검증하기 위해 사용한 관측 자료를 제공한 미국 육군 공병단 해안공학연구소의 수리모형실험에 대하여 간단히 설명하였다. 제3장에서는 사용된 수치모형의 지배방정식과 수치기법에 대하여 간단히 서술하며, 제4장은 수치해석 결과와 결과에 대한 토론을 기술한다. 마지막으로, 제5장에서는 결론을 도출한다.

2. 지배방정식과 수치모형

본 연구에서는 Cho and Liu (1999)가 사용하였던 수조와 조파시스템을 그대로 사용한다. 또한, 두 섬 사이에서의 입사파 폭과 두 섬 사이의 거리에 따른 초오름높이를 계산하기 위하여 두 섬 사이의 거리를 변화시키면서 원형섬 주위에서의 초오름높이 변화에 대하여 연구하였다. 일반적으로 KdV 방정식은 두 개의 정확해, 즉 고립파(solitary wave)와 크노이드파(cnoidal wave)를 갖는다. 특히, 고립파는 지진해일을 가장 잘 나타내는 파랑으로 알려져 있어 대부분의 지진해일의 수치해석과 수리모형실험에서는 고립파를 입사파로 사용한다. KdV 방정식은 Boussinesq 방정식으로부터 유도되는 식으로 파랑의 비선형성(nonlinearity)과 분산성(frequency dispersion)이 적절하게 균형을 이루며 형태의 변형 없이 먼 거리를 전파할 수 있다(Goring, 1978).

본 연구에서는 Boussinesq 방정식 대신에 상대적으로 유한차분 수치해석이 용이한 비선형천수방정식을 이용하여 수치해석한다. Kajiura (1963)에 따르면, 수심 h 와 지진해일의 특성길이 Λ 를 이용하여 지진해일의 선단파의 실제 여행거리가 Eq. (1)에 의해 계산되는 δ 보다 크면 지배방정식에 분산항을 포함하는 것이 바람직하다고 제안하였다.

$$\delta = \frac{3\Lambda^3}{32h^2} \quad (1)$$

본 연구에서의 입사파는 고립파이며, 지진해일의 특성길이 Λ 는 다음과 같이 계산되는 고립파의 파장을 사용한다. 참고로, 고립파의 파장과 주기는 이론적으로 무한대이나 일반적으로

고립파를 생성하였을 때 파고가 최고파고의 5%가 되는 두 지점사이의 거리를 파장으로 간주한다(Goring, 1978).

$$L = \frac{2}{\theta} \cosh^{-1} \left[\frac{1}{0.05} \right]^{1/2} \quad (2)$$

여기서, θ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\theta = \left[\frac{3A}{4h^3} \right]^{1/2} \quad (3)$$

수심 h 는 0.32 m, 입사파는 파고 A 가 0.032 m인 고립파의 파장은 5.09 m이며, 특성길이 L 에 고립파의 파장 L 을 사용한다. 따라서, Eq. (1)로부터 δ 를 계산하면, $\delta = 120$ m가 되며, 수리모형실험에 사용된 수조에서 입사파의 이동거리는 최대 30 m이므로 분산항의 중요성은 상대적으로 떨어진다.

본 연구에서는 비선형천수방정식을 지배방정식으로 하여 유한차분법을 이용하여 해석한다. Eqs. (4)~(6)은 마찰항을 생략한 비선형천수방정식이다. Liu et al. (1995)에 따르면 수치모형에 의해 계산된 최대 처오름높이를 수리실험에 의한 관측자료와 비교한 결과 바닥마찰저항은 큰 역할을 하지 않는 것으로 밝혀져 본 연구에서는 바닥마찰저항은 고려하지 않았다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

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

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{H} \right) + gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

지배방정식 Eqs. (4)~(6)에서 P 와 Q 는 각각 x 축과 y 축 방향의 체적 흐름율, 즉 $P = uH$ 와 $Q = vH$ 를 나타내고, $H = h + \zeta$ 로 H 는 전체수심, ζ 는 자유수면변위를 나타낸다. 지배방정식 Eqs. (4)~(6)의 유한차분기법과 이동경계조건은 기존의 연구(예를 들어, Liu et al., 1995; Cho and Liu, 1999)에서 이미 상세히 언급되어 있으므로 본 연구에서는 생략한다.

3. 수리모형실험

수리모형실험에 사용된 수조의 길이는 가로 30 m, 세로 26 m의 콘크리트 수조이며, 수조 중앙에 원형섬이 위치한다.

원형섬은 경사가 1:4이며, 해저지름은 7.20 m, 상부의 지름은 2.20 m, 높이는 0.625 m이다. 수조의 수심(h)은 0.32 m, 입사파는 파고(A)가 0.032 m인 고립파를 사용하였으며, 비선형성의 크기를 나타내는 수심에 대한 입사파의 파고의 비, 즉 $\epsilon (= A/h)$ 은 0.1이다.

입사파의 파봉선 길이(λ , crest length)와 원형섬의 해저지름(D , Fig. 1에서 7.2 m)과의 비율(λ/D)에 따른 지진해일 처오름높이에 대한 물리적 현상을 규명하기 위해 조파기의 수를 조절하여 3경우의 조파기 길이에 대한 수치모형실험을 수행하였다. 입사파는 수조의 중앙을, 즉 $x = 15$ m를 기준으로 비대칭으로 입사하며, 입사파의 파봉선의 길이는 Fig. 1에 도시된 것과 같이 3경우에 대하여 실험한다. 입사파의 수평길이에 대한 정보는 Table 1에 열거하였으며, Fig. 1에 상세하게 도시

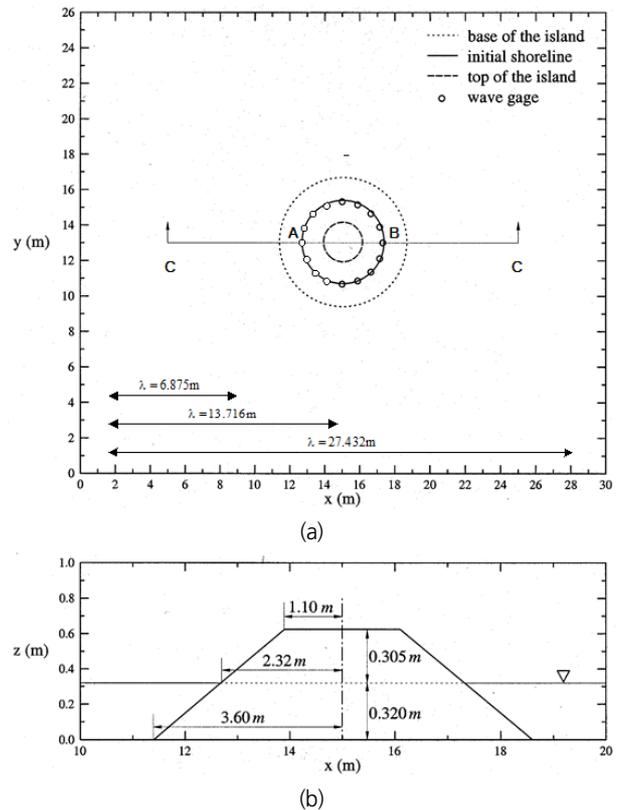


Fig. 1. A plane view of wave tank, a circular island and asymmetric crest lengths and a sectional view of an island

Table 1. Ratios of crest lengths (λ) to base diameters of an island (D)

Crest length (λ)	λ/D
6.875 m	0.955
13.716 m	1.905
27.432 m	3.810

하였다. 또한, 원형섬 주위에는 최대 초오름높이를 측정하기 위하여 16개의 파고계가 0.125π 의 간격으로 설치되어 있다.

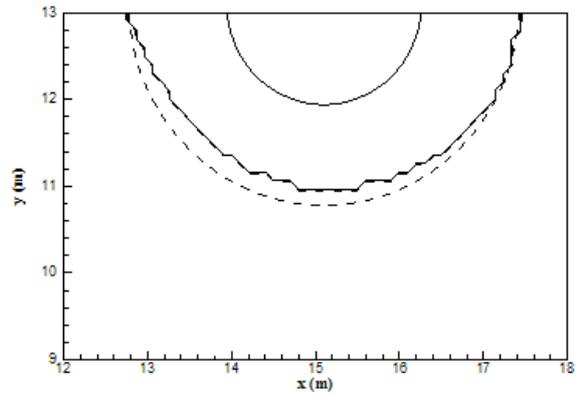
입사파는 고립파를 사용하였으며, Cho (1995)에 따르면 지진해일이 상대적으로 짧은 거리를 진행할 경우 분산성이 덜 중요할 수 있다. 더욱이, 지진해일이 대양을 가로질러 연안으로 접근하면 파장은 짧아지고, 파고가 증가할 뿐만 아니라 분산의 중요성이 감소하기 때문에 비선형성이 매우 중요한 요인으로 작용한다. 따라서, 해안선 부근에서의 지진해일의 거동은 일반적으로 비선형천수방정식을 이용하여 해석한다.

4. 수치해석

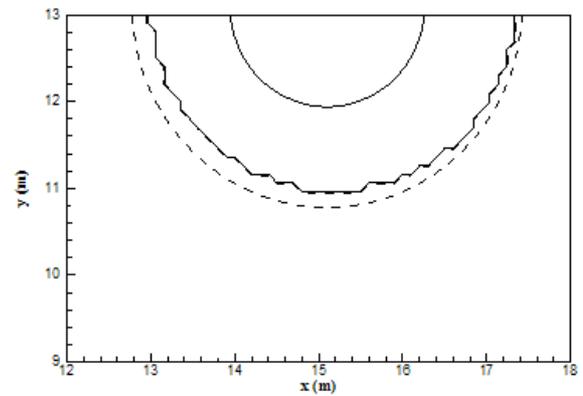
본 연구의 이해를 돕기 위해 먼저, 고립파가 원형섬을 향해 진행할 때 섬 주위에서의 수면변화를 Fig. 2에 도시하였다. 그림은 파봉선과 해저지름의 비가 1.905인 경우를 도시한 것으로 시간은 조파 후 9 sec가 경과한 것이다. 그림에 나타난 것과 같이 고립파가 왼쪽으로 입사하는 관계로 섬의 왼쪽이 더 많이 범람되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3은 원형섬 주위의 최대범람구역을 도시한 것으로 점선은 초기 해안선을 의미하며, Figs. 3(a) and 3(b)는 입사파를 발생 시킨 후 각각 9초와 10초 후의 해석결과다. 시간의 경과에 따라 범람구역 특히, 섬의 뒤쪽으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 고립파가 섬에 초오르내림을 한 후 섬의 해안선을 따라 뒤쪽으로 이동하며 계속하여 범람을 일으키기 때문이다.

Fig. 4는 $\lambda/D=0.955$ 일 경우, 파봉선의 길이에 따른 원형섬 주위의 초오름높이를 계산한 후 수리모형실험에서 획득한



(a) $t = 9$ sec



(b) $t = 10$ sec

Fig. 3. Variation of maximum inundation areas with time

관측자료와 비교한 것이다. 그림에서 가로축의 β 는 섬 중앙에서 반시계방향으로 측정한 파고계의 간격으로 $\beta = \pi/8$ 이며, 원형섬 주위에 모두 16개의 파고계가 설치되어 있다(Fig. 1 참조). 그림에서 세로축은 입사파의 최대파고에 대한 상대

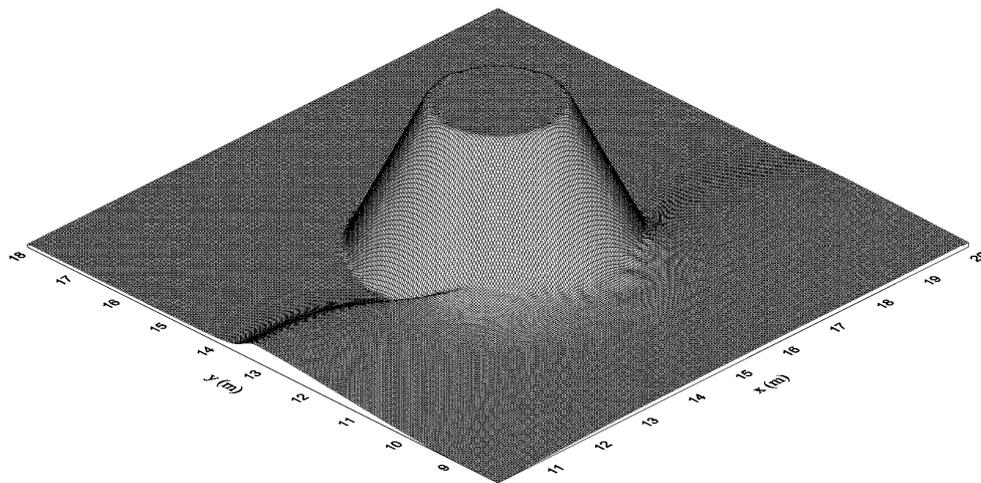


Fig. 2. Snapshot of free surface displacement ($t = 9$ sec)

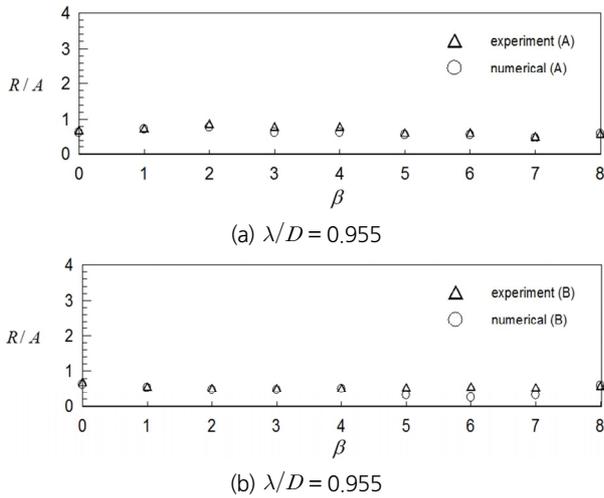


Fig. 4. Comparison of maximum run-up heights ($\lambda/D = 0.955$)

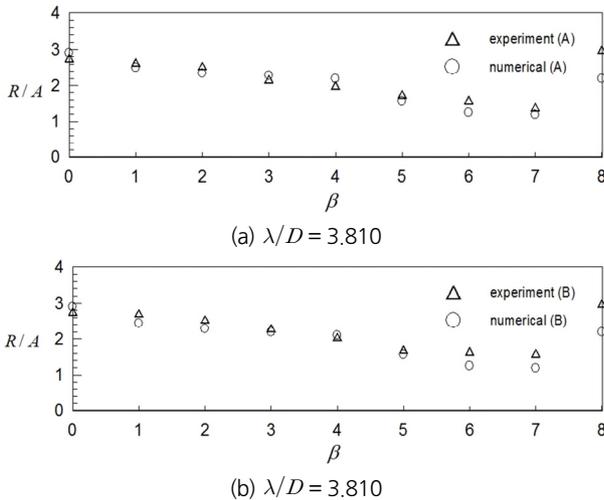


Fig. 5. Comparison of maximum run-up heights ($\lambda/D = 3.810$)

적인 최대 초오름높이를 의미한다. 수리모형실험 관측자료 (experiment)와 수치실험에 계산결과(numerical)를 A와 B로 표시한 것은 A는 섬의 정면에서 오른쪽 방향, 즉 반시계방향으로 관측한 것이며, B는 섬의 정면에서 왼쪽 방향, 즉 시계방향으로 관측한 것을 의미한다.

입사파의 파봉선 길이가 섬의 해저지름보다 작을 경우, 즉 $\lambda/D=0.955$ 일 때 초오름높이는 상대적으로 크지 않다. 대부분의 경우 고립파의 최대파고보다 작고 왼쪽과 오른쪽의 차이도 눈에 띄게 나타나지 않음을 알 수 있다. 전체적으로 섬 주위를 따라 거의 균일한 초오름높이가 발생하고 있다.

Fig. 5는 $\lambda/D=3.810$ 일 경우, 파봉선의 길이에 따른 원형섬 주위의 초오름높이를 계산한 후 수리모형실험에서 획득한 관측자료와 비교한 것이다. Fig. 4와 비교하여 최대 초오름높이

Table 2. Comparison of maximum run-up heights (laboratory experiments)

λ/D	Maximum run-up heights (R/A)		
	Front of island	Lee of island	Ratio (%)
0.955	0.750	0.586	78.10
3.810	2.610	3.100	118.77

Table 3. Comparison of maximum run-up heights (numerical experiments)

λ/D	Maximum run-up heights (R/A)		
	Front of island	Lee of island	Ratio (%)
0.955	0.625	0.594	95.04
3.810	2.911	2.515	86.39

가 전체적으로 매우 큰 것을 알 수 있다. 초오름높이는 섬의 전면에서 3.0에 접근하다가 섬의 뒤쪽으로 접근할수록 감소하다가 섬의 뒤쪽에서 매우 커지는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 Cho (1995)에서 설명한 것과 같이 섬의 전면에서 최대 초오름높이를 야기시킨 지진해일이 섬의 해안선을 따라 이동하다가 섬의 뒤쪽에서 충돌하면서 큰 초오름을 일으킨 것이다. 섬의 뒷면에서의 최대 초오름높이는 섬의 전면의 초오름높이보다 큰 것을 알 수 있다. 참고로, Fig. 4의 경우와 달리 Fig. 5는 입사파가 원형섬의 중앙을 기준으로 대칭으로 입사하여 비스듬히 입사하는 영향이 없으며, 수리실험에서는 Fig. 5(a) and 5(b)의 결과 실험적인 여건으로 약간 차이가 나지만 수치 해석에 의한 결과는 서로 같음을 알 수 있다. 결과적으로, 해저 지름보다 입사파의 파봉선 길이가 클 경우 지진해일에 의해 매우 큰 피해가 커질 수 있다. 즉, 상대적으로 큰 섬이 작은 섬보다 지진해일에 안전하다.

마지막으로, λ/D 가 0.955와 3.810일 때 섬의 전면과 뒷면에서의 초오름높이를 비교하였다. Table 2는 수리모형실험에서 측정한 관측자료이며, Table 3은 수치해석에서 계산된 초오름높이를 비교한 것이다. 표에서 비율은 섬의 뒷면에서의 초오름높이를 전면에서의 초오름높이로 나눈 값이다. 전체적으로, λ/D 가 1보다 작을 경우에는 섬의 전면과 후면의 초오름높이가 입사파의 파고보다 작음을 알 수 있다. 그러나, λ/D 가 3.810로 증가하면, 섬 전면과 후면에서의 초오름높이가 급격히 증가함을 알 수 있다. 특히, 수리모형실험 관측자료에 따르면 섬의 뒷면에서의 초오름높이가 전면의 것보다 커짐을 알 수 있다. 따라서, 지진해일의 급습이 예상되는 지역에서는 섬이 상대적으로 작을 경우 섬의 전면은 물론 섬의 배후지역에서도 방재대책을 강구해야 한다.

5. 결 론

본 연구에서는 비선형 천수방정식을 유한차분법으로 해석하여 섬 중앙에 대하여 비스듬히 입사하는 고립파의 처오름높이 변화를 범람도와 처오름높이 등을 통하여 제시하였다. 고립파를 지진해일의 거동을 가장 잘 나타내는 파랑으로 알려져 있어 최근 자주 발생하는 지진해일의 피해를 저감하는 노력의 일환으로 섬지형에서의 지진해일의 범람특성을 규명하였다. 입사하는 지진해일의 파봉선 길이가 길수록 섬에서의 처오름높이가 커짐을 밝혔다.

입사파 파봉선 길이가 섬의 해저지름보다 월등히 클 경우 섬의 전면은 물론 섬의 뒷면에서도 매우 높은 처오름높이가 관측되었다. 따라서, 지진해일의 급습이 예상되는 섬에서는 지진해일에 직접 노출되는 지역뿐만 아니라 배후지역에서도 방재대책을 세워야 인명 및 재산피해를 최소화할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문은 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구입니다(과제명: 2단계 항만권역 태풍폭 및 지진해일 재해대응체계 구축 [No. 20130264]).

References

- Cho, Y.-S. (1995). *Numerical simulations of tsunami propagation and run-up*. Ph. D. Thesis, Cornell University, USA.
- 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.
- Choi, B.-H., Cho, Y.-S., and Yoon, S. B. (2016). "Tsunami research in Korea." *Natural Hazards*, Vol. 84, No. 2, pp. 437-454.
- Goring, D. G. (1978). *Tsunamis-the propagation and long waves onto a shelf*. Ph. D. Thesis, California Institute of Technology, USA.
- Hankookilbo (1996). Article 14845, February 18 1996.
- Kajiura, K. (1963). "The leading wave of a tsunami." *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, Vol. 41, pp. 535-571.
- KBS (2011). KBS 1 Television News June 2nd 2011 at 09:00 PM.
- 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.