해안선에서의 지진해일 처오름높이의 증폭

조용식

1. 서론

강력한 해저지진에 의해 야기된 지진해일은 선형 장파의 속도로 심해를 지나 수심이 상대적으로 작은 해안선 근처에 도달한다. 지진해일이 해안선 근처에 도달하면 천수효과에 의해 파장은 감소하며 파고는 급격히 증가하기 때문에 해안선 근처에서 대규모 범람을 일으켜 많은 인명 및 재산피해를 초래할 수 있다.

최근 수 년간 태평양 연안에서는 많은 인명피해와 재산피해를 초래한 대규모 지진해일이 빈번하게 발생하고 있다(표 1 참조). 특히, 1996년 2월 17일 인도네시아 이리안 자야주의 비아크(Biak)섬에서 106 km 정도 떨어진 태평양에서 발생한 리히터 규모 7.5의 강력한 해저지진에 의해 발생된 지진해일로 인해 인도네시아에서는 수 십 여명의 인명과 많은 재산피해가 발생했음은 물론, 우리나라의 남해안, 일본 및 많은 태평양의 여러 섬과 연안국가에서 지진해일 주의보가 발령되기도 하였다(한국일보, 1996). 우리나라의 연안에는 제주도를 비롯한 많은 섬과 항만시설들이 위치하고 있을 뿐만 아니라 현재 건설되었거나 건설중인 모든 원자력발전소가 해안가에 위치하고 있어 지진해일 엄습시 이와 같은 섬, 항만시설 및 원자력발전소에 미칠 영향을 연구하는 것은 재해예방 측면에서 매우 중요하다.

표 1의 여러 지진해일중에서 1992년과 1993년에 발생하였던 지진해일은 일반적인 개념과는 다르게 지진해일 진행방향의 반대편, 즉 shadow zone에 위치한 지점에서 매우 높은 처오름높이가 관측되었다. 특히, 인도네시아의 Babi섬의 대부분의 지역에서 관측된 최대 처오름높이는 4 - 5 m에 불과하였으나, 지진해일 진행방향의 shadow zone에 위치한 섬의 뒷면에서 관측된 최대 처오름높이는 26 m에 이르렀다(Okal, 1993). 또한, 1993년 동해에서 발생한 Hokkaido 지진해일에 의해 일본의 Okushiri섬의 최대 처오름높이는 30 m에 이르렀는데 관측된 장소는 지진해일의 진행방향과 반대편에 있던 shadow zone이었다.

표 1의 여러 지진해일에 관한 물리적 특성을 규명하고자 미국에서는 과학재단(National Science Foundation)에서 지원하는 Cornell 대학교, Harvard 대학교, University of Washington at

---

정회원, 세종대학교 토목공학과 조교수 및 수운산업연구소 연구위원

Seattle, University of Southern California 및 공병단 해안공학연구소(Coastal Engineering Research Center, US Corps of Engineers)의 공동 연구를 수행하고 있다. 연구결과의 일부는 이미 보고되었으나(Briggs *et al.*, 1994; Liu *et al.*, 1995), 본 연구에서는 아직 본격적으로 연구되지 않은 입사파의 폭과 원추형섬의 바닥지름의 비율에 따른 최대 처오름높이와 속도벡터의 변화를 연구한다.

2. 수리모형실험과 수치모형실험

표 1의 인도네시아의 Babi섬과 일본의 Okushiri섬의 지진해일에서는 지진해일의 진행방향과 반대편에 위치한 지점에서 매우 높은 처오름높이가 관측되었다. 이와 같은 shadow zone에서 관측된 높은 처오름높이에 관한 물리적 현상을 규명하기 위하여 공동 연구의 일부로써 해안공학연구소에서는 대규모 수리모형실험을 실시하였다(Briggs *et al.*, 1994; Liu *et al.*, 1994).

수리모형실험에 사용된 수조는 너비 30 m, 길이 25 m의 콘크리트 구조이며, 수조의 중앙에 높이 0.625 m, 바닥지름 7.2 m, 경사 1V:4H의 원추형섬이 위치한다(Fig. 1 참조). 입사파는 파고(A)가 0.032 m인 고립파(solitary wave)이며, 비선형성의 크기를 나타내는 수심에 대한 입사파의 파고의 비, 즉 $\varepsilon (= A/h)$은 0.1이다.

Fig. 1은 해안공학연구소에서 사용된 수리모형실험장치를 간단히 도시한 것이다. 조파기(DSWG, directional spectral wave generator)는 각각 독립적으로 작동이 가능한 60개의 소형 조파기로 구성되어 있으며, x축을 따라 수평으로 설치되었다. 입사파의 수평길이와 섬의 바닥지름과의 비율에 따른 처오름높이를 규명하기 위해 모두 7가지 경우의 조파기 길이(λ)를 이용하여 수리실험을 수행하였다.

본 연구에서는 비선형 천수방정식을 유한차분법으로 해석하여 섬의 바닥지름과 입사파폭의 여러 경우의 비율에 대한 처오름높이와 속도벡터의 변화를 조사한다. 일반적으로 지진해일이 해안선에 도달하면 연속하여 처오르내림을 반복하므로 이를 정확하게 추적하기 위해 해안선을 따라 이동경계 조건을 설정한다. 본 연구의 수치모형에 관한 보다 상세한 설명은 Liu *et al.*(1995)을 참조할 수 있다.

입사파의 파장과 원추형섬의 바닥지름의 비율에 따른 처오름높이의 변화에 관한 연구(Arthur, 1946)와 선형이론을 이용한 원추형섬에서의 처오름높이 산정에 연구(Lautenbacher, 1970)는 보고된 적이 있으나, 입사파폭에 따른 처오름높이의 변화와 속도에 관한 연구는 아직 보고되지 않았다. 이와 같은 연구를 통해 지진해일에 의한 최대 처오름높이를 계산하여 예상되는 범람구역을 모의할 수 있을 뿐만 아니라 해안선 근처에서의 지진해일에 의해 유사의 이동 등을 추정할 수 있다.

표 1: 최근 태평양 연안에서 발생한 지진해일

No	location	date	epicenter depth (km)	Ms	maximum run-up (m)	loss of lives
1	Cape Mendocino	Apr. 25, 1992	15.0	7.1	1.0	1
2	Santa Cruz Island	May 7, 1992	19.0	7.0	-	0
3	Sanriku, Japan	Jul. 18, 1992	29.0	6.9	0.5	0
4	Nicaragua	Sep. 2, 1992	45.0	7.2	10.0	170
5	Flores Island, Indonesia	Dec. 12, 1992	28.0	7.5	26.0	1000
6	Kamchatka, Russia	Jun. 8, 1993	71.0	7.3	0.1	0
7	Hokkaido, Japan	Jul. 12, 1993	17.0	7.6	30.0	200
8	Guam	Aug. 8, 1993	59.0	8.0	1.0	0
9	East Java, Indonesia	Jun. 2, 1994	18.0	7.2	14.0	220
10	Cape Mendocino	Sep. 1, 1994	10.0	7.0	0.1	0
11	Kurils, Russia	Oct. 2, 1994	33.0	8.1	10.0	0
12	Kurils, Russia	Oct. 9, 1994	23.0	7.0	0.2	0
13	Mindoro Island, Indonesia	Nov. 11, 1994	33.0	7.1	7.0	70
14	Sanriku, Japan	Dec. 28, 1994	33.0	7.5	1.0	0
15	Jalisco, Mexico	Oct. 9, 1995	30.0	7.6	11.0	1
16	Palu, Indonesia	Jan. 1, 1996	39.0	7.8	4.0	24
17	Biak, Indonesia	Feb. 17, 1996	-	8.2	8.0	53

3. 수리모형실험과 수치모형실험 결과 비교

표 2는 입사파의 상대 수평길이, 즉 입사파의 수평길이 λ를 섬의 바닥지름 D로 나눈 길이에 따른 섬의 뒷면에서의 최대 처오름높이를 비교한 것이다. 표에서 β는 섬의 앞면 중앙으로부터 반시계방향으로 측정한 각도이며, $\beta=\pi$는 섬의 뒷면, 즉 shadow zone의 중앙을 의미한다. 전체적으로 λ가 커질수록 $\beta=7\pi/8$에 대한 $\beta=\pi$에서의 처오름높이의 비율이 커지는데, 이는 λ가 커질수록 섬 주위를 따라 진행하는 파의 에너지가 증가하기 때문이다. 수치모형의 결과와 수리실험 결과는 서로 비슷한 경향을 보여주고 있다.

표 2: 입사파의 상대 수평길이(λ/D)에 따른 최대 처오름높이 비교.

λ/D	수리실험			수치모형		
	$\beta=7\pi/8$	$\beta=\pi$	비 율	$\beta=7\pi/8$	$\beta=\pi$	비 율
0.8890	0.0174 m	0.0237 m	1.362	0.0180 m	0.0220 m	1.222
1.8415	0.0311 m	0.0538 m	1.730	0.0290 m	0.0490 m	1.690
2.7940	0.0469 m	0.0937 m	1.998	0.0430 m	0.0780 m	1.814
3.8100	0.0469 m	0.0998 m	2.128	0.0430 m	0.0790 m	1.837

Fig. 2는 λ = 6.401 m(m=1)과 27.432 m(m=4)에 대한 섬 주위에서의 속도벡터의 snapshot을 도시한 것으로, (a)와 (b)에서 최대속도는 각각 0.32 m/sec와 0.39 m/sec이다. 따라서, λ가

커질수록 처오름 속도 또한 증가함을 알 수 있다. 섬의 뒷면에서의 최대 처오름 속도는 각각 (c)와 (d)에서 발생하며 전면에서의 크기와 비슷한 값을 갖는다. 그러나, 전면에서의 처오름은 매우 넓은 지역에 걸쳐 발생하는 반면에, 섬의 뒷면에서의 처오름은 매우 좁은 지역에 국한되어 발생함을 알 수 있다. 이는 전면에서의 처오름은 입사파 대부분에 의해 영향을 받고 있는 것과는 달리, 섬 뒷면의 처오름은 섬주위에 갇혀 섬의 해안선을 따라 서로 반대방향으로 진행하는 파가 섬의 뒷면에서 충돌해서 생기기 때문이다.

감사의 글

본 연구는 1997년도 세종대학교 학술조성연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

한국일보 (1996). 1996년 2월 18일, 제 14845호.

Arthur, R.S. (1946). "Refraction of water waves by islands and shoals with circular bottom contours," *Trans. Am. Geophy. Union*, **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, Canada

Lautenbacher, C.C. (1970). "Gravity wave refraction by islands," *J. of Fluid Mechanics*, **41**, pp. 655-672.

Liu, P.L.-F., Cho, Yong-Sik, Briggs, M.J. Kanoglu, U. and Synolakis, C.E. (1995). "Run-up of solitary wave on a circular island," *J. of Fluid Mechanics*, **302**, pp. 259-285.

Liu, P.L.-F., Cho, Yong-Sik. 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, Canada.

Okal, E.A. (1993), "Predicting large tsunamis," *Nature,* **361**, pp. 686-687.

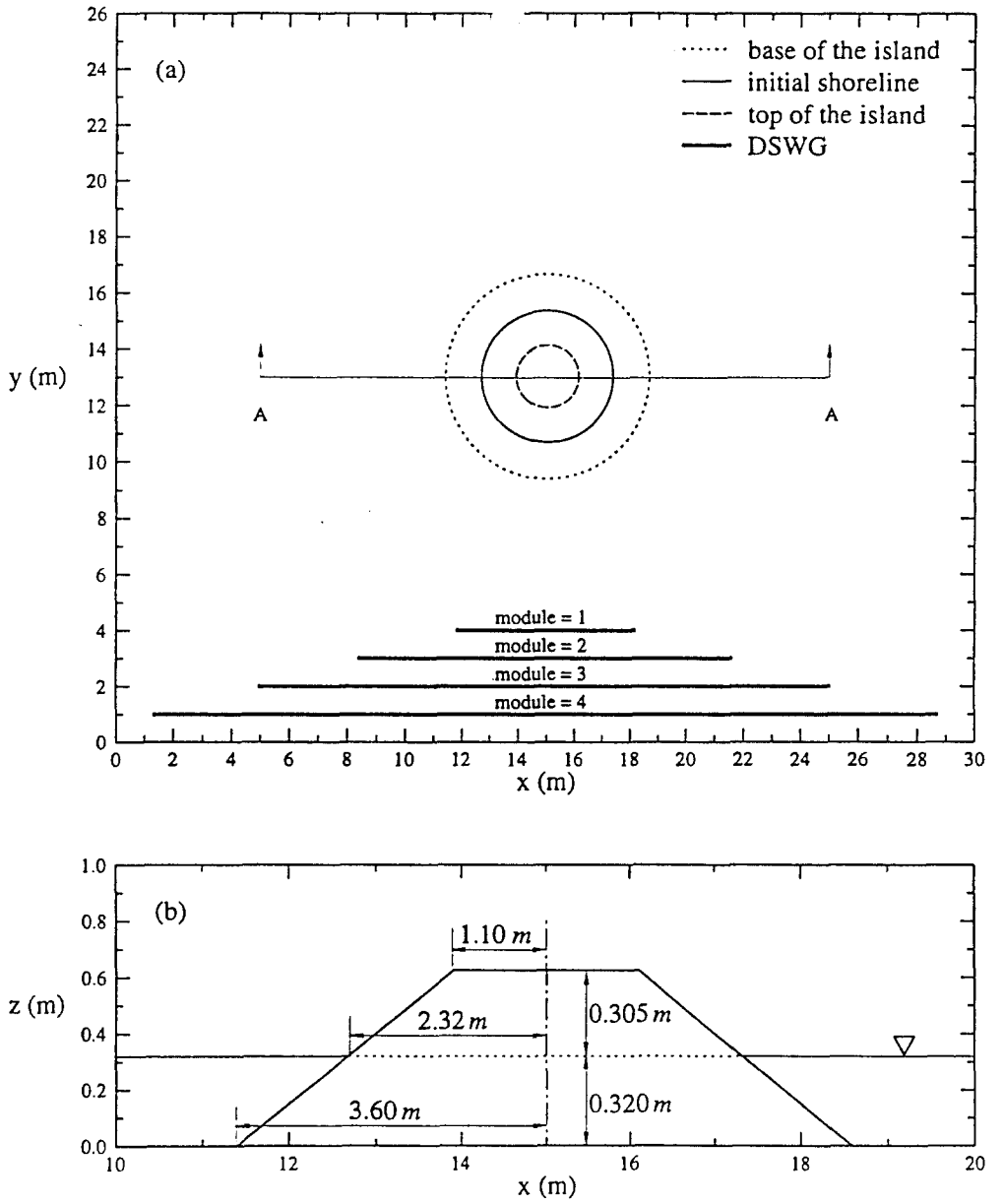

Fig. 1: The plan view of the experiment facility: (a) the basin, DSWG and the island, (b) cross sectional view of the island.

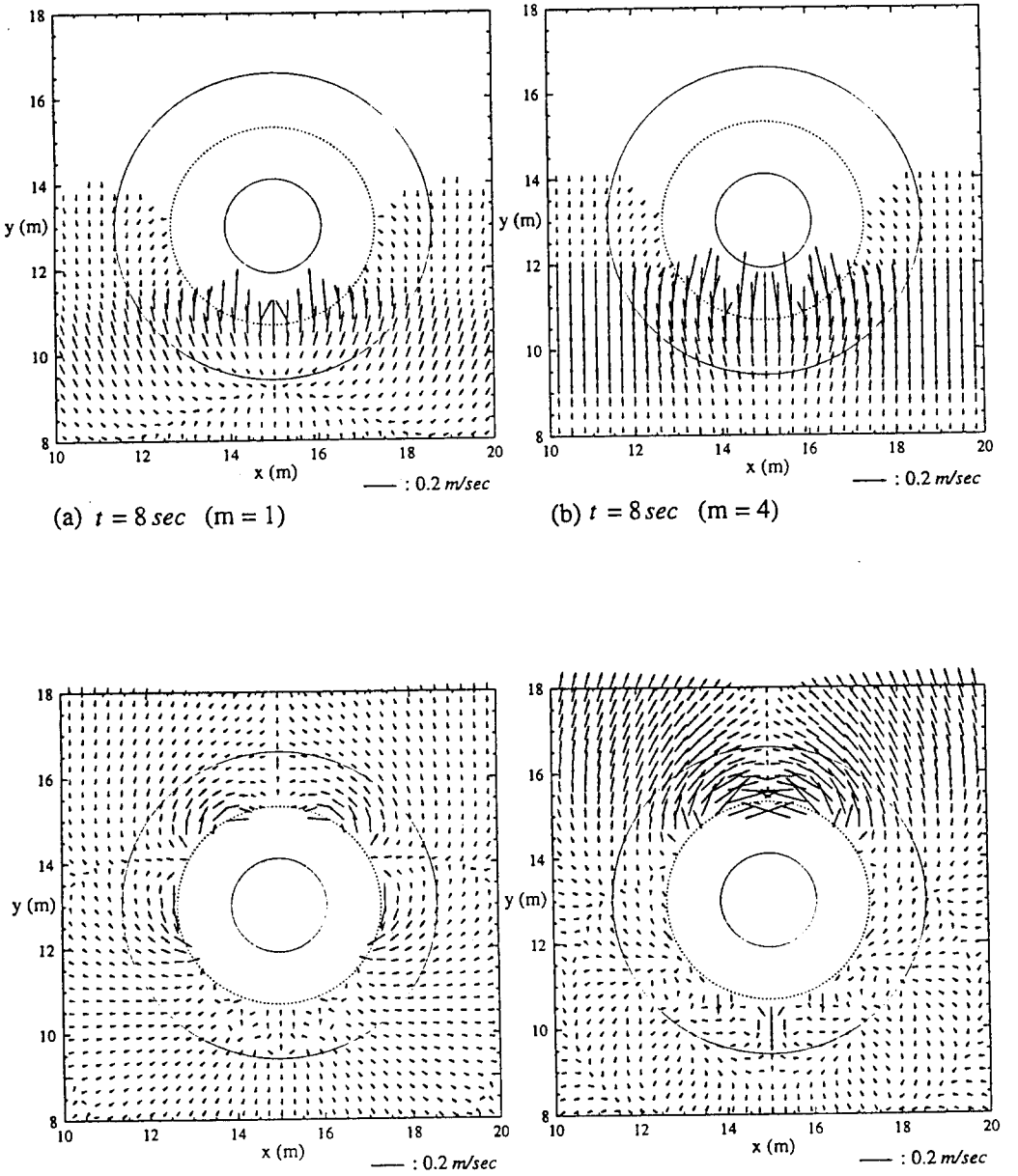

Fig. 2: Snapshots of velocity vectors around the island ($\varepsilon = 0.1$).