



## Tsunami research in Korea: Part 1. Numerical analysis and laboratory experiments

Cho, Yong-Sik<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

Paper number: 18-074

Received: 28 August 2018; Revised: 30 October 2018; Accepted: 30 October 2018

### Abstract

Tsunamis that have occurred around the Pacific Ocean rim over the past decades have taken a heavy toll on lives of human beings and property. The Eastern Coast of the Korean Peninsula is not safe from sudden tsunami attacks and has sustained tsunami damage in the past. In this review, the past, present, and future of some aspects of tsunami research in Korea have been introduced extensively. Tsunamis in Korea, numerical model simulating tsunami behaviors and laboratory experiments will be discussed. In the companion review, field surveys for domestics and overseas tsunami events, countermeasures against tsunami attacks, future research topics and concluding remarks will be described.

**Keywords:** Tsunami, Shallow-water equations, Propagation, Inundation, Run-up heights

## 우리나라의 지진해일 연구: Part 1. 수치해석과 수리실험

조용식<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>한양대학교 공과대학 건설환경공학과

### 요 지

지난 수십 년 동안 태평양 연안을 따라 발생했던 지진해일은 막대한 인명 및 재산피해를 초래하였다. 우리나라의 동해안은 갑작스러운 지진해일의 내습으로부터 안전하지 않고, 과거 지진해일에 의해 피해를 입었다. 본 연구의 목적은 우리나라 지진해일의 연구를 과거, 현재, 미래에서의 관점에서 검토하는 것이다. 아울러, 전파모형과 범람모형으로 구성된 수치모형 및 수리실험에 관하여 서술한다. 또한, 이어지는 논문에서는 지진해일 현장조사, 지진해일 피해를 경감시키기 위한 노력과 지진해일 재해정보도 및 앞으로 더 연구해야 할 주제 등에 대해서 소개한다.

**핵심용어:** 지진해일, 천수방정식, 전파, 범람, 처오름높이

## 1. 서 론

우리나라의 해안지역은 너울성 파랑, 폭풍해일 및 지진해일 등과 같은 해안재해로부터 막대한 인명 및 재산피해가 발생한다. 효과적이며 경제적인 해안방재를 위해서는 과거에 발생했던 자연재해에 관한 피해 연구 및 원인 분석을 통해 발생 가능한 자연재해에 대한 국가차원의 대응책을 수립하는 것이 바람직하다. 여러 해안 자연재해 중에서 지진해일은 예측이 거의 불가능하고 발생지에 인접한 지역뿐만 아니라 멀리

떨어져 있는 지역에도 심각한 피해를 초래한다. 더욱이, 지진해일은 다른 자연재해에 비해 발생빈도는 적을지라도 훨씬 큰 규모의 인명 및 재산피해를 초래한다.

지진해일은 지진에 의해 발생한 파랑이 항만내로 진입한 후 공명(resonance)에 의해 매우 커지는 현상을 묘사하기 위해 항구를 의미하는 津(나루 진)과 파랑을 의미하는 波(물결 파)의 합성어인 津波에서 유래한 것이다. 현재 전세계적으로 학계에서는 진파(津波)의 일본식 발음인 tsunami(tsoo-nah-mee로 발음한다)를 공용어로 사용하고 있으며, 국내에서는 지진에 의해 발생하는 해일을 의미하는 지진해일(地震海溢)을 사용하고 있다.

\*Corresponding Author. Tel: +82-2-2220-0393  
E-mail: ysc59@hanyang.ac.kr (Y.-S. Cho)

우리나라에서 지진해일이라는 용어의 어원은 일본 텐리대 학교가 소유한 제주도의 연대기(chronology)인 탐라지에서 근원을 찾을 수 있다(Fig. 1 참조, Tsuji, 2010). 탐라지는 1707년(숙종 33년) 일본 시코쿠 앞 태평양에서 발생한 규모 8.6의 호에이(Hoei) 지진으로 호에이 지진해일이 발생하여 우리나라 제주도에도 지진해일에 의한 피해가 발생하였음을 기록하고 있다. 탐라지에 지진해일이라는 용어가 기록된 시점이 현재로서는 정확하지는 않지만 조선시대에 이미 지진해일(우리가 현재 사용하고 있는 지진에 의해 발생하는 해일이라는 의미보다는 地震과 海濤를 합하여 이와 같이 표현했을 수도 있다)이라는 용어를 사용하고 있었음을 알 수 있다. 다만, 언제부터 사용하였으며 어떻게 만들었는지에 관한 구체적인 사항은 아직 밝혀지지 않았다.

지난 수십 년 동안 치명적이며 엄청난 규모의 파괴력을 가진 지진이 태평양 연안 소위 불의 고리(Ring of Fire)라 불리는 지역에서 발생하여 엄청난 인명피해와 재산피해를 초래한 대규모 지진해일을 유발시켰다. 지진해일은 지진 발생 지역의 해안가는 물론 멀리 떨어진 다른 나라에도 막대한 인명 및 재산피해를 초래하였다. 현재까지 기록된 가장 오래된 지진해일은 기원전 2,000년경에 지중해의 시리아 근해에서 발생한 것이며(Lander and Lockridge, 1989), 우리나라는 조선왕조실록에 지진해일에 관한 기록이 남아있다. 2004년 수마트라 지진해일(Sumatra Tsunami)이 발생하기 전까지 1900년대 이후 발생한 지진해일 중에서 가장 규모가 큰 것은 1960년 칠레 해안으로부터 100 km 정도 떨어진 태평양에서 발생한 규모 9.5의 해저지진에 의해 야기된 칠레 지진해일(Chilean Tsunami)

이다. 지진해일은 발생 후 약 16시간 동안 태평양을 여행하여 하와이섬(Hawaii Island)을 강타하였으며, 약 24시간에 걸쳐 태평양을 횡단한 후 일본의 태평양 연안을 급습하였다. 지진해일은 칠레연안에서 1,000여명 이상의 인명피해와 약 4억 달러의 재산피해를, 하와이섬의 힐로항에서는 61명의 인명피해와 2,400만 달러의 재산피해를 초래하였으며, 일본에서는 139명의 인명피해와 3,000여 채의 가옥 및 2,000여 척의 어선을 파손시키는 등 당시로서는 엄청난 규모의 피해를 입혔다.

지진해일이 엄청난 규모의 파괴력을 가진 자연재해라는 것을 전세계적으로 각인시킨 것은 아마 수마트라 지진해일과 동일본 지진해일(East Japan Tsunami)일 것이다. 지난 2004년 12월 26일 인도네시아 수마트라 섬 연안에서 규모 9.4의 해저지진에 의해 발생한 수마트라 지진해일은 약 300,000명의 인명피해(사망과 실종) 및 100억 달러에 달하는 재산피해를 발생시켰다. 또한, 2011년 3월 11일 일본 혼슈의 태평양 연안에서 규모 9.0의 해저지진으로부터 발생한 지진해일은 일본에서 20,001명의 인명피해(사망과 실종) 및 3,000억 달러에 달하는 재산피해를 발생시켰다. 또한, 후쿠시마 원자력발전소는 지진해일에 의해 손상되어 그 피해가 현재도 지속되고 있으며, 우리나라에도 사회적으로 큰 영향을 끼쳐 원자력발전소와 관련된 국가정책을 변경시켜 추가적인 발전소 건설을 중단한 실정이다.

태평양과 같은 대양에서 해저지진이 발생하면, 초기 자유수면은 갑작스럽게 약 수 미터 정도(약 2-5 m) 변화하게 된다. 갑작스럽게 변화된 수면은 중력에 의해 모든 방향으로  $[gh]^{1/2}$  ( $g$ 는 중력기속도,  $h$ 는 현지의 수심)의 속도로 전파된다. 예를 들어, 수심이 4,000 m인 대양에서의 지진해일의 전파속도는 약 200 m/sec (720 km/hr)가 된다. 일반적으로, 태평양과 같은 깊은 바다에서의 지진해일은 수심과 비교하여 파고가 매우 작기 때문에 선형이론으로 해석한다. 반면에 지진해일이 해안으로 접근하면, 천수효과로 인하여 파고는 증가하며 파장이 짧아지므로 해안 근처에서의 지진해일의 거동은 바닥마찰을 포함한 비선형 천수방정식에 의해 지배된다.

지진해일은 여러 자연재해 중에서 가장 많은 인명 및 재산피해를 발생시킬 수 있을 뿐만 아니라 현재의 과학기술로는 예측이 불가능하다. 따라서 지진해일에 의한 피해를 최소화하기 위해서는 경제적이며 효과적인 방재대책을 세우는 것이 매우 중요하다(Cho, 1995). 현재까지 개발된 가장 경제적이며 효과적인 지진해일 방재대책은 비상대처계획(EAP, Emergency Action Plan)과 재해정보도(Hazard Map)를 제작하여 인명 및 재산피해를 최소화하는 것이다.

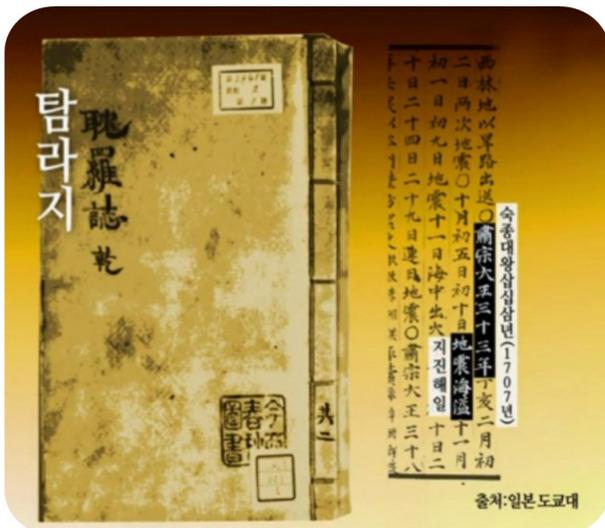


Fig. 1. Chronology of Tamra Island

다음 장에서는 1900년 이후 우리나라에 영향을 끼쳤던 지진해일 현황과 피해 등을 조사하고, 제3장에서는 현재 널리 사용되고 있는 전파 및 범람모형에 대하여 기술한다. 아울러, 수치모형을 사용한 지진해일 거동의 수치해석에 대해서 소개한다. 제4장에서는 수리실험을 이용한 지진해일 연구에 대하여 서술하며, 마지막으로 결론을 기술한다.

## 2. 우리나라의 지진해일

우리나라, 일본 및 러시아에 둘러싸인 동해는 역사적으로 지진해일이 자주 발생하는 지역 중의 하나이다. 동해에서 발생했던 대부분의 지진해일은 일본 근해에서 발생하였으며 우리나라와 러시아에도 영향을 끼쳤지만 대부분 일본에 더욱 심각한 피해를 유발했다. 지난 1900년 이후 동해에서는 1940년 8월 2일 발생한 홋카이도 외해 지진해일, 1964년 6월 16일 발생한 니이가타 지진해일, 1983년 5월 26일 발생한 동해중부 지진해일과 1993년 7월 12일 발생한 홋카이도 남서외해 지진해일 등 4개의 지진해일이 발생하여 우리나라에도 영향을 끼쳤다. Fig. 2는 1900년 이후 우리나라 동해안을 따라 영향을 끼친 지진해일을 유발시킨 해저지진의 발생위치를 보여준다. 또한, 동해 전역의 개략적인 수심을 함께 보여주고 있는데 깊은 곳은 수심이 3,000 m 이상에 이르고 있다. 동해의 가운데에는 수심이 상대적으로 얇은 대화퇴(Yamato Rise)라 불리는 해저고원이 있어 일본에서 전파해오는 지진해일이 굴절되어 동해안의 일부 지역에 집중되어 높은 초오름을 유발시킬 수 있다.

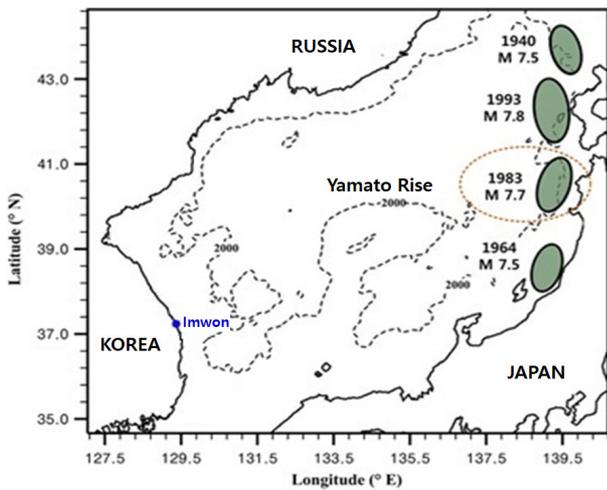


Fig. 2. Locations of epicenters of 4 historical tsunamis

동해에서 발생한 지진해일 중 1983년 지진해일의 경우 강원도 삼척시 원덕읍에 위치한 임원항(Fig. 2 참조)에서는 3명의 인명피해(1명 사망, 2명 실종)를 발생시켰으며, 동해 전역에서 약 수 미터의 초오름높이를 유발시켰다(Tsuji and Konishi 1985; Tsuji 1986; Lee *et al.*, 1999). 그러나, 우리나라의 경우, 정부의 경고방송은 물론 피난대책도 전혀 없었던 반면에, 일본은 공영방송인 NHK를 통해 지진해일의 발생 수분 후에 지진해일의 위험성을 경고하는 방송을 하였다. 동해중부 지진해일 때와는 대조적으로 1993년 홋카이도 남서외해 지진해일 때는 우리나라 관련 당국에서도 지진해일에 관한 정보를 일본 기상청(JMA)을 통해 입수하여 지진해일이 밤에 발생했음에도 불구하고 해안지역에 거주하는 주민들에게 대피 경고를 하여 인명피해가 발생하지 않았다. Fig. 2에 표시한 지진해일에 관련된 정보 및 우리나라에서의 피해상황을 Table 1에 열거하였다.

Fig. 3은 1983년 지진해일 발생 당시 임원항의 모습을 보여주는 사진이다. 지진해일에 의해 발생한 소용돌이에 의해 임원항 내에서 몇 척의 배들이 갇혀 있는 모습을 볼 수 있다. 더불어, 지진해일이 임원항을 범람하여 일부 선박들이 인가가 밀집한 지역으로 밀려와 있으며 일부 가옥이 침수되었음을 보여주고 있다.

비록 1983년과 1993년의 지진해일이 우리나라에 직접적인 영향을 끼쳤더라도 지진해일은 대다수의 국민들의 관심을 끌지 못하였다. 많은 국민들이 지진해일에 관심을 갖게 된 것은 어쩌면 미국에서 제작한 재난영화 Deep Impact (1998)와 Armageddon (1998)이 국내에서 상영된 후일 것이다. 두 영화는 각각 혜성(comet)과 소행성(asteroid)에 의해 지구에 거대한 해일이 발생하는 것을 주제로 하고 있으나 정확히 말하면 영화에서의 해일은 지진해일은 아니며 아마 우주해일로 표현하는 것이 적절할 것이다. 그러나, 우리나라 국민들에게 지진해일이 얼마나 무서우며 막대한 피해를 줄 수 있다는 것을 보여준 것은 2004년 12월 26일 발생한 수마트라 지진해일일 것이다. 마치 프로야구 경기를 중계하듯이 우리나라 모든 방송국에서 거의 실시간으로 지진해일에 의한 참상을 보여주어 전 국민들의 관심을 끌기에 충분하였으며, 현지에 거주하던 우리 국민과 관광객 등 모두 20여명의 대한민국 국적의 인명피해(사망자)가 발생하였다. 또한, 수마트라 지진해일을 모티브로 제작하여 2009년 개봉한 영화 해운대(저자가 기술자문을 하였다)의 기록적인 흥행(관람객 약 1,132만 명)에 의해 우리나라 대부분의 국민들이 지진해일의 파괴적인 위력을 충분히 인지하게 되었다. 더욱이, 2011년 3월 11일 발생한 동일본 지진해일은 지진해일이 남의 나라의 재해가 아닌 우리의

Table 1. Details of 4 historical tsunamis in Korea

Date of occurrence	Epicenter	Tsunami height	Government's response	Damaged area	Casualties	Property damage
August 2, 1940	Hokkaido Offshore, Japan (Magnitude 7.5)	About 2 m	-	Samcheok, Uljin, Ulleung Island	None	56 damaged houses 6 damaged fishing boats
June 16, 1964	Niigata Offshore, Japan (Magnitude 7.5)	Busan 0.32 m Ulsan 0.39 m	-	None	None	None
May 26, 1983	Akita Offshore, Japan (Magnitude 7.7)	Ulleung Island 0.8-1.3 m Mukho 1.5-2 m Sokcho 1.23-1.56 m Pohang 0.52-0.62 m	-	Ulleung Island, Samcheok, Uljin	3 people (death+missing)	44 damaged houses 81 damaged fishing boats
July 12, 1993	Hokkaido Southwest Offshore, Japan (Magnitude 7.8)	Ulleung Island 0.89-1.19 m Sokcho 1.3-2.03 m Donghae 2.13-2.76 m Pohang 0.76-0.92 m	Breaking news announcement on Tsunami	Ulleung Island, Samcheok	None	35 damaged fishing boats 3,000 damaged fishing nets

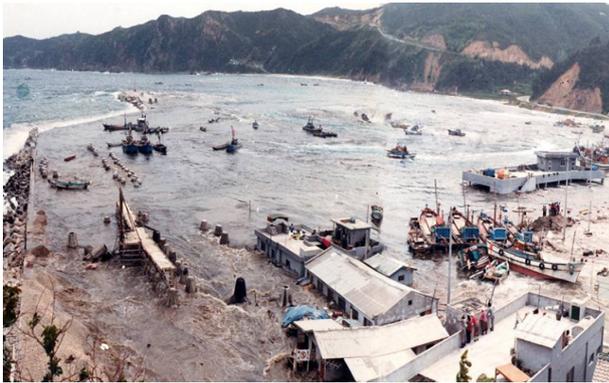


Fig. 3. Invasion of Central East Sea Tsunami at Imwon Port

재해가 될 수 있음을 확실하게 각인시켰을 뿐만 아니라 사회적으로 큰 충격을 주었다.

### 3. 지진해일 수치해석

해저지진에 의해 유발된 지진해일은 Fig. 4에 도시된 것과 같이 발생, 전파 그리고 범람과정을 거치면서 해안가에 도달한다. 예를 들어, 지난 1960년 발생한 칠레 지진해일은 진원지 근처에 인접한 칠레를 비롯한 남아메리카의 여러 국가에 막대한 인명 및 재산피해를 끼친 것은 물론 태평양을 가로질러 전파하여 16시간의 여행 끝에 하와이섬에 도달하여 60여명 이상의 인명피해와 상당한 재산피해를 입혔다. 또한, 24시간 이상의 여행 끝에 일본 연안에 도달하여 139명의 인명피해와 막대한 재산피해를 입혔다(Cho, 1995). 또한, 동해에 위치한 일본 연안 근처에서 발생한 지진해일은 동해를 가로질러 우리나라에 도달할 수 있으므로 분산효과(dispersive effects)가 중요한 역할을 할 수도 있다(Sohn *et al.*, 2009).

### 3.1 전파모형

먼 거리를 전파하는 지진해일은 일반적으로 선형 Boussinesq 방정식에 의해 지배된다. 반면에, 수심이 상대적으로 작은 해안선 부근에서는 지진해일의 진폭은 증가하고 파장은 감소하게 되므로 비선형 효과와 바닥마찰이 더 중요해진다. 따라서, 해안선 부근에서의 지진해일의 거동은 바닥마찰항을 포함한 비선형 천수방정식에 의해 지배된다. 지진해일의 거동을 정확히 모의하기 위한 수단으로 지진해일의 거동을 해석하는 수치모형은 전파모형과 범람모형으로 구성되며, 각각 다른 지배방정식으로 구성된다. 따라서, 대양을 횡단하는 지진해일의 거동은 지구의 회전에 따른 Coriolis 효과를 포함하는 선형 Boussinesq 방정식을 이용하여 모의하는 것이 적절하다(Liu *et al.*, 1995).

지진해일의 전파모형은 다음과 같은 선형 Boussinesq 방정식을 지배방정식으로 사용한다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{P} = 0 \tag{1}$$

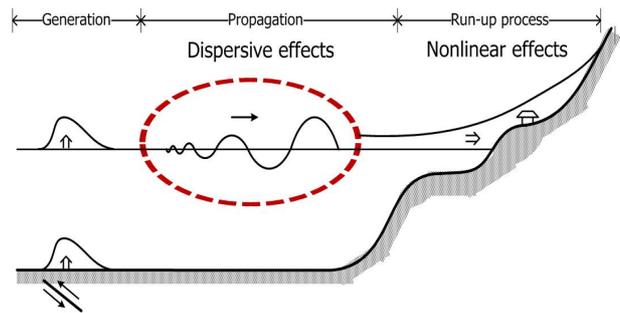


Fig. 4. Behaviors of tsunami: generation, propagation and run-up process

$$\frac{\partial \vec{P}}{\partial t} + gh\nabla\zeta + 2\vec{\omega} \times \vec{P} = \nabla \left[ \frac{h^3}{3} \frac{\partial}{\partial t} \left( \nabla \cdot \frac{\vec{P}}{h} \right) \right] \quad (2)$$

Eqs. (1) and (2)에서  $\zeta$ 는 자유수면변위,  $\vec{P} = (P, Q)$ 는 체적 흐름율로  $P = uh$ 와  $Q = vh$ 로 정의되며, 사용된  $u$ 와  $v$ 는  $x$ 축 및  $y$ 축 방향의 수심적분한 유속이다. 또한,  $h$ 는 정수면(SWL, still water level)에서의 수심,  $\vec{\omega}$ 는 지구의 회전각속도,  $g$ 는 중력가속도이며,  $\nabla$ 은 수평연산자이다.

Eq. (1)은 연속방정식으로 질량오차가 없는 정확한 식인 반면에 Eq. (2)는 운동량방정식으로 동수압의 일부를 고려한 근사식이며, 오른쪽 항은 분산효과를 나타낸다. 앞에서 언급한 것과 같이 대양에서의 수심은 파고에 비해 무척 크기 때문에 (예를 들어 태평양의 평균수심은 약 4 km인 반면에, 파고는 약 2 m 정도이다) 이송가속도에 의한 관성효과, 즉 비선형효과와 바닥마찰항의 영향은 무시할 수 있으므로 Eq. (2)에서 제외되었다. 참고로, Eq. (2)의 분산효과는 연직가속도 성분에 의한 것이며, 오른쪽 항을 생략하면 Eqs. (1) and (2)는 Coriolis 효과를 고려한 선형 천수방정식이 된다.

직교좌표계에서 Coriolis 효과를 고려하지 않은 선형 Boussinesq방정식은 다음과 같이 주어진다.

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial t} + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} = \\ \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \left[ h^2 \left( \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q}{\partial x \partial y} \right) - \frac{h^3}{3} \left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( \frac{P}{h} \right) + \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left( \frac{Q}{h} \right) \right\} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} = \\ \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \left[ h^2 \left( \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 Q}{\partial y^2} \right) - \frac{h^3}{3} \left\{ \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left( \frac{P}{h} \right) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left( \frac{Q}{h} \right) \right\} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

운동량방정식 Eqs. (4) and (5)의 오른쪽항은 분산항(dispersive terms)이며, 분산항은 3차미분항으로 표현되므로 유한차분법을 이용한 수치해석이 상대적으로 어렵다.

Imamura and Goto (1988)는 대양을 횡단하는 지진해일을 모의하기 위해 leap-frog 차분기법을 사용하여 선형 Boussinesq 방정식 대신에 천수방정식을 해석하였다. Imamura and Goto는 유한차분 과정에서 발생하는 수치오차(numerical errors)가 분산항과 유사함을 이용하여 수치오차가 분산오차(numerical dispersion)으로 나타나는 것에 착안하여 수치분산오차가 물

리적 분산(physical dispersion)의 역할을 하게하여 천수방정식을 해석하였으나 결과는 선형 Boussinesq방정식으로 해석한 결과를 얻었다. 단, 수치해석에서 격자 크기는 다음의 조건을 만족하여야 한다(Choi *et al.*, 2016).

$$\Delta x = \sqrt{4h^2 + gh\Delta t^2} \quad (6)$$

국내에서 지진해일에 관한 연구는 원자력발전소의 지진해일에 대한 안전성을 검토하기 위한 수단으로 수치해석을 수행하면서 본격적으로 시작되었다(Yoon and Liu, 1992). 참고로, 원자력발전소는 엄청난 양의 냉각수를 필요로 하기 때문에 필연적으로 해안가에 건설하고 있다. Yoon and Liu (1992)는 Imamura and Goto (1988)의 유한차분모형에 대응하는 유한요소모형을 제안하였으나 상당한 양의 컴퓨터 메모리와 과도한 계산시간을 필요로 했기에 실제문제의 적용에는 한계가 있었다. Cho (1995), Cho and Yoon (1998)은 Imamura and Goto (1988)의 모형을 개선하여 보다 효율적이며 정확한 모형을 제안하였다. 그러나, Cho의 모형은 수심이 급격히 변화하는 지역에 적용하기에는 한계가 있다. Yoon (2002)은 균일한 격자시스템을 사용하면서 수심의 변화에 따른 국부적인 분산을 만족시키는 새로운 유한차분모형을 제안하였다. 새로운 모형은 Yoon and Liu (1992)의 유한요소모형보다 더 경제적이며, Imamura and Goto (1988) 및 Cho (1995)의 유한차분모형보다 더 정확한 결과를 제공하는 것으로 알려졌다.

Yoon (2002)의 모형은 후에 더 효율적인 분산교정 모형으로 개발되어 현재 사용되고 있다(Yoon *et al.*, 2007). Cho *et al.* (2007)은 국부적으로 수심이 일정하다고 가정한 후 Eq. (4)에 의한 격자의 제한이 없는 선형 천수방정식에 근거한 새로운 형태의 분산교정 유한차분모형을 개발하였다. Cho *et al.* (2007)의 새로운 모형은 코리올리 효과를 다룰 수 있고 범람모형과 쉽게 접속(네스팅)할 수 있기 때문에 Yoon *et al.* (2007)에 의해 제안된 모형보다 더 편리하다. 그러나, Yoon *et al.* (2007)의 모형은 계산시간에 있어서 Cho *et al.* (2007)의 새로운 모형보다 더 효율적인 것으로 알려졌다. 기존의 제안된 모든 모형들은 모두 수심이 국부적으로 일정하다고 가정한다. 더욱이, 파랑의 분산에 관한 바닥경사의 효과는 무시된다. 최근에, Ha and Cho (2015)는 파랑의 분산에 관한 바닥경사의 효과를 포함하기 위해 Cho *et al.* (2007)에 의해 제안된 모형을 개선시켰다.

본 논문에서는 Ha and Cho (2015)가 제안한 수치기법에 관하여 소개한다. 먼저 수심은 다음과 같이 변화한다고 가정한다. 즉, 수심은  $x$ 축 및  $y$ 축 방향으로 선형적으로 변화한다.

$$h = ax + by + c \tag{7}$$

Eq. (7)로 주어진 수심을  $x$  및  $y$ 로 편미분하면 다음 관계식을 얻을 수 있다. 즉,

$$\frac{\partial h}{\partial x} = a, \frac{\partial h}{\partial y} = b \tag{8}$$

수심을 관계식을 이용하여 지진해일의 전파를 모의할 수 있는 수치모형을 다음과 같이 제안한다.

$$\frac{\zeta_{i,j}^{n+1/2} - \zeta_{i,j}^{n-1/2}}{\Delta t} + \frac{P_{i+1/2,j}^n - P_{i-1/2,j}^n}{\Delta x} + \frac{Q_{i,j+1/2}^n - Q_{i,j-1/2}^n}{\Delta y} = 0 \tag{9}$$

$$\begin{aligned} & \frac{P_{i+1/2,j}^{n+1} - P_{i+1/2,j}^n}{\Delta t} + gh_{i+1/2,j} \frac{\zeta_{i+1,j}^{n+1/2} - \zeta_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta x} \\ & + \frac{\alpha}{12\Delta x} gh_{i+1/2,j} [\zeta_{i+2,j}^{n+1/2} - 3\zeta_{i+1,j}^{n+1/2} + 3\zeta_{i,j}^{n+1/2} - \zeta_{i-1,j}^{n+1/2}] \\ & + \frac{\gamma}{12\Delta x} gh_{i+1/2,j} [(\zeta_{i+1,j+1}^{n+1/2} - 2\zeta_{i+1,j}^{n+1/2} + \zeta_{i+1,j-1}^{n+1/2}) \\ & - (\zeta_{i,j+1}^{n+1/2} - 2\zeta_{i,j}^{n+1/2} + \zeta_{i,j-1}^{n+1/2})] \\ & - \frac{\beta}{12} gb(\zeta_{i,j+1}^{n+1/2} - 2\zeta_{i,j}^{n+1/2} + \zeta_{i,j-1}^{n+1/2}) \\ & - \frac{\delta}{12} gb(\zeta_{i+1,j}^{n+1/2} - 2\zeta_{i,j}^{n+1/2} + \zeta_{i-1,j}^{n+1/2}) = 0 \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned} & \frac{Q_{i,j+1/2}^{n+1} - Q_{i,j+1/2}^n}{\Delta t} + gh_{i,j+1/2} \frac{\zeta_{i,j+1}^{n+1/2} - \zeta_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta y} \\ & + \frac{\alpha}{12\Delta y} gh_{i,j+1/2} [\zeta_{i,j+2}^{n+1/2} - 3\zeta_{i,j+1}^{n+1/2} + 3\zeta_{i,j}^{n+1/2} - \zeta_{i,j-1}^{n+1/2}] \\ & + \frac{\gamma}{12\Delta y} gh_{i,j+1/2} [(\zeta_{i+1,j+1}^{n+1/2} - 2\zeta_{i,j+1}^{n+1/2} + \zeta_{i-1,j+1}^{n+1/2}) \\ & - (\zeta_{i+1,j}^{n+1/2} - 2\zeta_{i,j}^{n+1/2} + \zeta_{i-1,j}^{n+1/2})] \\ & - \frac{\beta}{12} ga(\zeta_{i+1,j}^{n+1/2} - 2\zeta_{i,j}^{n+1/2} + \zeta_{i-1,j}^{n+1/2}) \\ & - \frac{\delta}{12} ga(\zeta_{i,j+1}^{n+1/2} - 2\zeta_{i,j}^{n+1/2} + \zeta_{i,j-1}^{n+1/2}) = 0 \end{aligned} \tag{11}$$

Eq. (10)과 (11)에서  $\alpha$ 와  $\gamma$ 에 관한 설명은 Cho *et al.* (2007)을 참조할 수 있으며,  $\beta$ 와  $\delta$ 는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$\beta = \frac{-20h^2 + gh\Delta t^2 + \Delta x^2}{\Delta x^2}, \delta = \frac{\Delta x^2 - 24h^2}{\Delta x^2} \tag{12}$$

Eqs. (9)~(11)로 주어진 유한차분식은 선형 Boussinesq 방정식 Eqs. (3)~(5)에서 분산항을 제거한 식, 즉 선형 천수방정

식을 수치해석하는 것으로 결과는 선형 Boussinesq 방정식의 결과를 얻는다(Cho *et al.*, 2007; Ha and Cho, 2015).

### 3.2 범람모형

지진해일이 수심이 상대적으로 얇은 해안지역으로 접근하면 파장은 짧아지고 진폭은 더 커진다. 따라서 비선형 효과와 바닥 마찰은 점점 중요해지는 반면, 분산효과의 중요성은 감소한다. 해안선 부근에서 지진해일의 거동을 해석하기 위한 범람모형의 지배방정식은 다음과 같은 비선형 천수방정식으로 주어진다(Choi *et al.*, 2016).

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \tag{13}$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{P^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{PQ}{H} \right) + gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \tau_x H = 0 \tag{14}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{PQ}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Q^2}{H} \right) + gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \tau_y H = 0 \tag{15}$$

여기서,  $H = h + \zeta$ 로  $H$ 는 전체수심,  $P$ 와  $Q$ 는 각각  $P = u(h + \zeta)$ 와  $Q = v(h + \zeta)$ 로 정의되며,  $\tau_x$ 와  $\tau_y$ 는 Eq. (16)과 같이 Manning 공식과 같은 실험공식으로 표현되는 바닥마찰 항이다.

$$\tau_x = \frac{g m^2}{H^{10/3}} P(P^2 + Q^2)^{1/2}, \tau_y = \frac{g m^2}{H^{10/3}} Q(P^2 + Q^2)^{1/2} \tag{16}$$

Eq. (16)에서  $n$ 은 Manning의 조도계수이다.

Eqs. (14) and (15)의 선형항은 앞에서와 같이 leap-frog 유한차분기법으로 이산화하며, 비선형항은 upwind 기법으로 이산화한다(Cho *et al.*, 2007). 본 연구에서는 차분화 과정에서 공간과 시간에 대하여 모두 엇갈림격자(staggered grid)를 사용한다. Eqs. (13)~(15)의 유한차분식은 참고문헌에서 쉽게 찾을 수 있으므로(예, Cho and Liu, 1999) 여기서는 생략하며, 비선형항의 차분식에 대해서만 언급한다. Eqs. (14) and (15)의 비선형항을 upwind 기법을 이용하여 차분화하면 다음과 같다(Roache, 1976).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{P^2}{H} \right) = \tag{17}$$

$$\frac{1}{\Delta x} \left[ \lambda_{11} \frac{(P_{i+3/2,j}^n)^2}{H_{i+3/2,j}^n} + \lambda_{12} \frac{(P_{i+1/2,j}^n)^2}{H_{i+1/2,j}^n} + \lambda_{13} \frac{(P_{i-1/2,j}^n)^2}{H_{i-1/2,j}^n} \right]$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{PQ}{H} \right) = \quad (18)$$

$$\frac{1}{\Delta y} \left[ \lambda_{21} \frac{(PQ)_{i+1/2,j+1}^n}{H_{i+1/2,j+1}^n} + \lambda_{22} \frac{(PQ)_{i+1/2,j}^n}{H_{i+1/2,j}^n} + \lambda_{23} \frac{(PQ)_{i+1/2,j-1}^n}{H_{i+1/2,j-1}^n} \right]$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{PQ}{H} \right) = \quad (19)$$

$$\frac{1}{\Delta x} \left[ \lambda_{31} \frac{(PQ)_{i+1,j+1/2}^n}{H_{i+1,j+1/2}^n} + \lambda_{32} \frac{(PQ)_{i,j+1/2}^n}{H_{i,j+1/2}^n} + \lambda_{33} \frac{(PQ)_{i-1,j+1/2}^n}{H_{i-1,j+1/2}^n} \right]$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Q^2}{H} \right) = \quad (20)$$

$$\frac{1}{\Delta y} \left[ \lambda_{41} \frac{(Q_{i,j+3/2}^n)^2}{H_{i,j+3/2}^n} + \lambda_{42} \frac{(Q_{i,j+1/2}^n)^2}{H_{i,j+1/2}^n} + \lambda_{43} \frac{(Q_{i,j-1/2}^n)^2}{H_{i,j-1/2}^n} \right]$$

Eqs. (17)~(20)에서 위첨자  $n$ 은 시간단계를 나타내며,  $\lambda$ 는 계수로서 지진해일의 흐름방향에 따라 다음과 같이 결정된다(Roache, 1976).

$$\lambda_{11} = 0, \quad \lambda_{12} = 1, \quad \lambda_{13} = -1 \quad \text{if } P_{i+1/2,j}^n \geq 0 \quad (21a)$$

$$\lambda_{11} = 1, \quad \lambda_{12} = -1, \quad \lambda_{13} = 0 \quad \text{if } P_{i+1/2,j}^n < 0$$

$$\lambda_{21} = 0, \quad \lambda_{22} = 1, \quad \lambda_{23} = -1 \quad \text{if } Q_{i+1/2,j}^n \geq 0 \quad (21b)$$

$$\lambda_{21} = 1, \quad \lambda_{22} = -1, \quad \lambda_{23} = 0 \quad \text{if } Q_{i+1/2,j}^n < 0$$

$$\lambda_{31} = 0, \quad \lambda_{32} = 1, \quad \lambda_{33} = -1 \quad \text{if } P_{i,j+1/2}^n \geq 0 \quad (21c)$$

$$\lambda_{31} = 1, \quad \lambda_{32} = -1, \quad \lambda_{33} = 0 \quad \text{if } P_{i,j+1/2}^n < 0$$

$$\lambda_{41} = 0, \quad \lambda_{42} = 1, \quad \lambda_{43} = -1 \quad \text{if } Q_{i,j+1/2}^n \geq 0 \quad (21d)$$

$$\lambda_{41} = 1, \quad \lambda_{42} = -1, \quad \lambda_{43} = 0 \quad \text{if } Q_{i,j+1/2}^n < 0$$

지진해일의 전파 및 범람과정을 수치해석을 할 때 전파모형과 범람모형을 결합하는 방법으로 동적연결기법(dynamic nesting technique)을 사용한다. 동적연결기법은 격자문제 해결은 물론 전파모형과 범람모형의 접속부분에서 필요한 물리적인 정보를 제공한다. 또한, 지진해일이 해안선에 도달하면 해안선을 따라 초오름과정을 반복하므로 이를 지속적으로 모의할 수 있는 이동경계조건(moving boundary condition)을 해안선을 따라 설치하여야 한다. 동적연결기법과 이동경계

조건에 관한 상세한 설명은 기존의 많은 문헌에서 찾을 수 있으므로 여기서는 생략한다(예, Cho, 1995; Liu *et al.*, 1995).

### 4. 지진해일 수리실험

지진해일과 같은 장파를 수리실험을 통하여 연구하는 것은 쉽지 않다. 따라서 많은 연구자들이 수치모형을 이용하여 지진해일의 공학적 특성을 규명하고 있다. 지진해일과 관련된 수리실험에서는 입사파로 주로 고립파(solitary wave)를 사용한다, 입사파를 고립파로 사용하는 것은 고립파가 지진해일의 특성을 비교적 잘 나타낼 뿐만 아니라 가장 높은 초오름높이를 제공하기 때문이다. Fig. 5는 해안 경사지역에 초오르는 파랑을 개략적으로 그린 것으로  $R$ 은 파랑이 최대 도달한 지점에서 정수면까지의 연직높이를 의미하며, 이를 최대 초오름높이(maximum run-up height)로 정의한다.

고립파는 실험실에서 비교적 쉽게 발생시킬 수 있으며, 파장과 주기는 이론적으로 무한대이나 일반적으로 고립파를 발생시켰을 때 파고가 최대파고의 5%가 되는 두 지점사이의 거리를 파장으로 간주한다(Goring, 1978; Cho, 1995). 고립파의 파형은 다음과 같이 주어진다.

$$\zeta = A \operatorname{sech}^2 \sqrt{\frac{3A}{4h^3}}(x - ct) \quad (22)$$

여기서  $A$ 는 고립파의 파고이며, 파속  $c$ 와 파장  $L$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$c = \sqrt{g(h + \zeta)} \quad (23)$$

$$L = \frac{2}{\theta} \cosh^{-1} \left[ \frac{1}{0.05} \right]^{1/2} \quad (24)$$

여기서  $\theta$ 는 다음과 같이 주어진다.

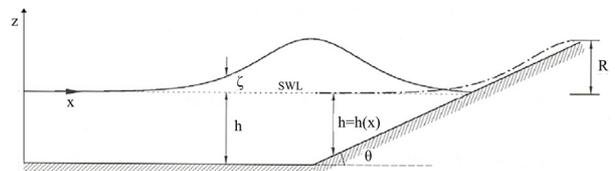


Fig. 5. A definitive sketch of a maximum run-up height of an incident wave

$$\Theta = \left[ \frac{3A}{4h^3} \right]^{1/2} \tag{25}$$

따라서, 고립파의 주기는 다음과 같이 계산된다.

$$T = \frac{2}{c\Theta} \left[ 3.8 + \frac{A}{h} \right] \tag{26}$$

Fig. 6은 Eq. (22)를 이용하여 발생시킨 고립파이며, 그림에서와 같이 고립파의 파형은 매우 단순하다. 그러나, 크노이드파 이론(cnoidal wave theory)에서 고립파는 정현파(sinusoidal wave)와 더불어 극한치 중 하나로 표현되는 파형으로 가장 높은 초오름높이를 제공하며(Cho, 2003), 이는 고립파보다 긴 장파를 이용한 최신연구(Lu *et al.*, 2017)에 의해 규명된 바 있다.

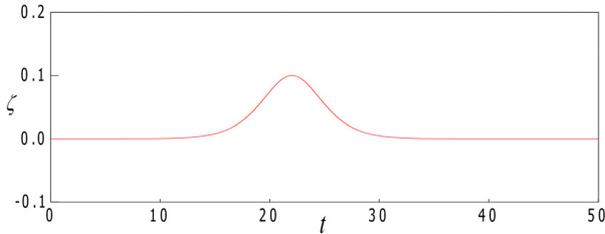


Fig. 6. Profile of a solitary wave

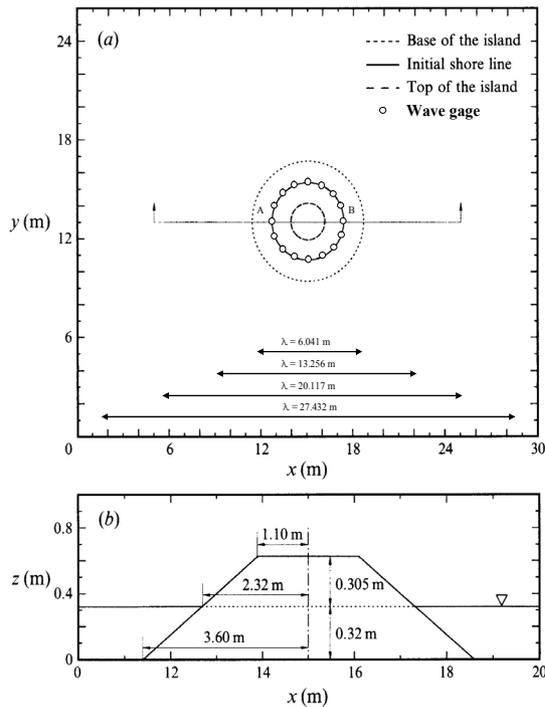


Fig. 7. A schematic sketch of laboratory experiments: (a) Plan view, (b) Cross-sectional view of island

지진해일에 관한 체계적이고, 광범위한 실험은 1990년대 초에 미국 육군공병단 산하의 해안공학연구소(US Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center)에서 수행한 원형섬에 입사하는 일련의 고립파의 초오름높이에 관한 실험이다(Cho, 1995). 수리실험을 수행하게 된 동기는 1992년 발생한 플로레스(Flores)섬 지진해일과 1993년 발생한 홋카이도 남서외해 지진해일 때 각각 인근에 위치한 바비(Babi)섬과 오쿠시리(Okushiri)섬의 배후지역(shadow zone)에서 관측된 예상하지 못한 높은 초오름높이 때문이다(Cho, 1995; Liu *et al.*, 1995). 원형섬에 입사하는 고립파의 초오름높이에 관한 실험은 지진해일 관련 수치모형의 검증에 현재도 많이 사용되고 있다. 미국 육군공병단의 수조와 원형섬 등을 사용하여 수치해석을 수행하였으며, 최대 초오름높이 뿐만 아니라 초기파의 도달시간, 섬의 배후지역에서의 초오름, 입사파의 갇힘현상(trapping), edge wave의 발생 등을 함께 연구하였다(Cho, 1995).

Fig. 7는 해안공학연구소에서 사용한 수조를 개략적으로 그린 것으로 그림에서와 같이 수조의 중앙에 높이 0.625 m, 해저지름 7.2 m, 비탈면 경사 1:4 (14.04°)의 원형섬이 위치하고 있다(Cho, 1995). 입사파는 주기 (T) 4.905 sec, 파장(L) 5.1 m, 파고(A) 0.032 m인 고립파이며, 비선형성의 크기를 나타내는 수심(h)에 대한 입사파의 파고의 비, 즉 ε (= A/h)은 0.1이다. 조파기(directional spectral wave generator)는 각각 독립적으로 작동이 가능한 60개의 소형 조파기로 구성되어 있으며, 그림의 x축을 따라 설치되었다. 실험에 사용된 입사파의 파봉선 길이(λ)는 6.041 m, 13.256 m, 20.117 m, 27.432 m이며 각각을 m = 1, 2, 3, 4로 표시하였다(Table 2 참조). 원형섬 주위에서의 최대 초오름높이를 계측하기 위하여 그림과 같이 섬 주위를 따라 π/8 간격으로 파고계를 설치하였다.

Fig. 8은 입사파의 파고와 수심의 비가 0.1일 때, 원형섬 주위에서의 고립파의 최대 초오름높이를 저자가 개발한 지진해일 범람을 위한 수치모형(HYCEL-LONG)을 이용하여 계산하여 비교한 것이다. 그림에서 x축은 원형섬 주위를 나타내며, 수치해석의 결과는 present model (Eqs. (13)~(15))로 표시하였다. 수치모형은 비선형 천수방정식을 유한차분법으로

Table 2. Crest lengths of incident solitary waves

m	Number of generators	Crest length
1	14	6.041 m
2	29	13.256 m
3	44	20.117 m
4	60	27.432 m

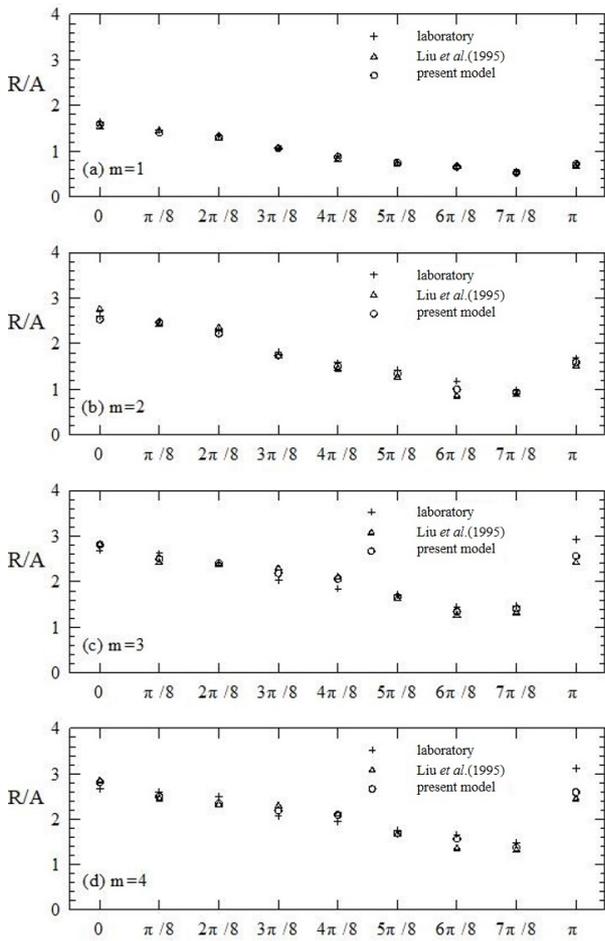


Fig. 8. Comparison of run-up heights around a circular island

해석하였으며, 비선형항은 2차 정확도를 갖는 풍산차분법으로 해석하였다(Cho *et al.*, 2004). 결과는 수리모형실험에서 측정한 자료 및 Liu *et al.* (1995)의 1차 정확도 풍산차분법을 이용해 계산한 초오름높이 결과와 비교하였다. 그림에서 섬 중앙을 기준으로 대칭인 관계로 섬의 전면( $x=0$ )부터 섬의 뒷면( $x=\pi$ )까지의 결과만을 비교하였다. 즉,  $x$  축은 섬의 앞면 중앙으로부터 반시계방향  $\pi/8$  간격으로 측정된 각도로써,  $x=0$ 과  $x=\pi$ 는 각각 섬의 전면과 섬의 뒷면, 즉 입사파가 진입하는 방향의 중앙과 배후 지역의 중앙을 각각 의미한다. 또한,  $R$ 은 원형섬에서의 최대 초오름높이이며,  $A$ (=0.032 m)는 입사파의 파고이다.

일반적으로 최대 초오름높이는 섬의 정면인  $x=0$  지점에서 발생하고, 섬의 후면으로 갈수록 초오름높이는 선형적으로 감소한다. 그러나, 입사파 파봉선의 길이가 증가할수록 섬의 뒷면( $x=\pi$ )에서의 초오름높이가 급격히 증가하고 있다. 이는 원형섬 주위에 간헐 서로 마주 보고 진행하던 파랑이

$x=\pi$ 가 되는 지점에서 충돌하여 높은 초오름을 형성하기 때문이다(Cho and Liu, 1999). Fig. 8 (c)와 (d)에서의 수리모형 실험 관측결과는 섬의 전면에서 보다 후면에서 초오름높이가 더 크게 나타났으나, 수치계산에 의한 결과는 그보다 작은 값을 보이고 있다. 이러한 현상은 비선형항의 차분식에 사용된 풍산차분기법에 의한 수치점성(artificial viscosity)에 기인한 것이며, 본 모형에 의해 계산된 결과는 인위적 점성효과를 감소시켜 수리모형실험의 결과에 보다 근접하고 있다. 섬 후면에서의 오차를 제외하고는 전체적으로 수리모형실험에 의한 초오름높이와 수치계산에 의한 초오름높이는 잘 일치하고 있다.

Choi *et al.* (2012)은 상용모델인 Flow-3D을 이용하여 앞에서 언급한 원형섬 주위에서의 고립파의 초오름높이를 연구하였으나 Cho (1995) 및 Liu *et al.* (1995)의 결과보다 뛰어나지는 않았다. 지진해일이 해안선 근처로 접근해오면 바닥마찰이 매우 중요한 역할이라고 할 수 있다. 일반적으로 자연적인 해변에서의 추천되는 Manning의 조도계수  $n$  값은  $0.025 \text{ sec/m}^{1/3}$ 이다. 그러나 지진해일이 범람하여 육지에 이르면 빌딩이나 키가 큰 나무들이 많이 있는 지역에서  $n$ 은 급격히 증가할 수 있다. Choi *et al.* (2012)은 수리실험에 기반하여 Manning 조도계수가  $h^{2/3}$ ( $h$ 는 범람수심이다)으로 증가했음을 확인하고 다양한 조건에서의 Manning 조도계수를 추정하는 경험공식을 제안했다.

### 5. 결론

본 논문은 저자가 박사과정 이후 수행했던 연구와 학생들과 함께 수행한 지진해일 연구 결과를 간략하게 서술하였다. 본 논문에서는 우리나라에서의 지진해일 피해상황, 수치기법을 이용한 지진해일의 전파와 범람모의, 그리고 수리실험을 이용한 지진해일 연구 등을 기술하였다. 우리나라에서의 지진해일 연구들 중에서 수치기법을 이용한 연구는 세계적 수준에 버금가는 지진해일에 대한 방재는 아직 많은 연구가 필요하다. 비록 우리나라가 지진해일로부터 일본에 비해 상대적으로 더 안전하기는 하지만, 우리나라도 동해에서 발생하는 예상하지 못한 지진해일의 급습에 대비해야 한다.

### 감사의 글

본 논문은 저자가 2014년 제3회 원태상기념 강연을 하게 된 것을 계기로 작성하게 된 것임에 이에 사의를 표합니다.

## References

- Cho, Y.-S. (1995). *Numerical Simulations of Tsunami Propagation and Run-up*. Ph. D. Thesis, Cornell University, USA.
- Cho, Y.-S. (2003). "A note on estimation of the Jacobian elliptic parameter in cnoidal wave theory." *Ocean Engineering*, Vol. 30, No. 15, pp. 1915-1922.
- Cho, Y.-S., Jin, S.-B., and Lee, H.-J. (2004). "Safety analysis of Ulchin Nuclear Power Plant against the Nihonkai-Chubu Earthquake Tsunami." *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 228, No. 1-3, pp. 393-400.
- Cho, Y.-S., Sohn, D. H., and Lee, S.-O. (2007). "Practical modified scheme of linear shallow-water equations for distant propagation of tsunamis." *Ocean Engineering*, Vol. 34, No. 8, pp. 1769-1777.
- Cho, Y.-S., and Yoon, S.-B. (1998). "A modified leap-frog scheme for linear shallow-water equations." *Coastal Engineering Journal*, Vol. 40, No. 2, pp. 191-205.
- Choi, B.-H., Cho, Y.-S., and Yoon, S.-B. (2016). "Tsunami Research in Korea." *Natural Hazards*, Vol. 84, No. 2, pp. 437-454.
- Choi, J., Kwon, K.-K., and Yoon, S.-B. (2012). "Tsunami inundation simulation of a built-up area using equivalent resistance coefficient." *Coastal Engineering Journal*, Vol. 54, No. 2, pp. 1250015-1-25.
- Goring, D. G. (1978). *Tsunamis-the Propagation of Long Waves onto a Shelf*. Ph. D. Thesis, California Institute of Technology, USA.
- Ha, T., and Cho, Y.-S. (2015). "Tsunami propagation over varying water depths." *Ocean Engineering*, Vol. 101, pp. 67-77.
- Imamura, F., and Goto, C. (1988). "Truncation error in numerical tsunami simulation by finite difference method." *Coastal Engineering in Japan*, Vol. 31, No. 2, pp. 245-263.
- Lander, J. F., and Lockridge, P. A. (1989). *United States Tsunamis*. U.S. Department of Commerce.
- Lee, H.-J., Kim, K.-H., and Jin, S.-B. (1999). *New field survey of 1983 East Sea tsunami. Tsunami Warning Beyond 2000 Theory, Practice and Plans*. IOC-ICG/ITSU 20.
- 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.
- Lu, H., Park, Y.-S., and Cho, Y.-S. (2017). "Modelling of long waves generated by bottom-tilting wave maker." *Coastal Engineering*, Vol. 122, pp. 1-9.
- Roache, P. J. (1976). *Computational Fluid Dynamics*. Hermosa Publishers.
- Sohn, D. H., Ha, T.-M., and Cho, Y.-S. (2009). "Distant tsunami simulation with corrected dispersion effects." *Coastal Engineering Journal*, Vol. 51, No. 2, pp. 123-141.
- Tsuji, Y. (1986). "Comparison of observed and numerically calculated heights of the 1983 Japan Sea tsunami." *Science of Tsunami Hazards*, Vol. 4, No. 2, pp. 91-110.
- Tsuji, Y. (2010). *Private Communication*.
- Tsuji, Y., and Konishi, T. (1985). *Tsunamis in the Japan Sea with numerical calculation*. Report 35 (in Japanese), Natl Res Center for Disaster Prev, Research.
- Yoon, S.-B. (2002). "Propagation of tsunamis over slowly varying topography." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107, No. 10, pp. 4(1)-4(11).
- Yoon, S.-B., Lim, C.-H., and Choi, J. (2007). "Dispersion-correction finite difference model for simulation of transoceanic tsunamis." *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, Vol. 18, No. 1, pp. 31-53.
- Yoon, S.-B., and Liu, P. L.-F. (1992). *Numerical simulation of a distant small-scale tsunami*. Recent Adv in Marine Sci and Tech, PACON92, Pacific Congr Marine Sci and Tech, Kona, Hawaii.