



Tsunami research in Korea: Part 2. Field survey and disaster mitigation

Cho, Yong-Sik^{a*} · Lee, Kwang Jun^a · Kang, Cheol^a

^aDepartment of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

Paper number: 18-075

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

Abstract

Catastrophic tsunamis triggered by undersea earthquakes may invade not only neighboring but also distant coastal communities. Many coastal communities and nuclear power plants are located along the Eastern Coast of the Korean Peninsula and they may be very vulnerable to unexpected tsunami attacks. In this companion review, field survey of tsunamis, prevention against tsunamis, future research topics will be described.

Keywords: Tsunami, Field survey, Emergency action plan, Hazard map

우리나라의 지진해일 연구: Part 2. 현장조사와 방재대책

조용식^{a*} · 이광준^a · 강철^a

^a한양대학교 대학원 건설환경공학과

요 지

해저지진에 의해 촉발되는 파괴적인 지진해일은 지진의 진원지 부근은 물론 멀리 떨어진 해안지역에도 피해를 입힐 수 있다. 우리나라의 동해안은 많은 인구밀집지역과 원자력발전소가 위치하고 있어 예상하지 못한 지진해일의 내습으로부터 위험에 노출되어 있다. 본 논문에서는 지진해일 현장조사, 방재대책 및 추가적으로 연구해야 할 주제 등에 대하여 기술한다.

핵심용어: 지진해일, 현장조사, 비상대처계획, 재해정보도, 원자력발전소

1. 서 론

지진해일은 해안지역에 위치한 인구밀집지역에서의 인명 및 재산피해는 물론 모든 항만 및 어항시설을 포함한 기간시설물에도 막대한 피해를 줄 수 있으므로 피해를 최소화하기 위해서는 적절한 방재대책을 수립함은 물론 기간시설물의 설계단계에서 지진해일의 영향을 반드시 고려하여야 한다. 우리나라의 해안지역에는 전체인구의 27.4%인 약 1,400여만 명이 거주하고 있으며(2015년 기준, 해양수산부 홈페이지), 무역항 31곳, 연안항 29곳과 더불어 약 2,168여 곳의 어항(국가어항 110곳, 지방어항 285곳, 어촌정주어항 373곳, 비법정

어항 1,400곳) 등이 위치하고 있어 지진해일을 비롯한 해안재해에 대하여 항상 경계를 늦출 수 없는 실정이다. 더욱이, 우리나라 연안에는 원자력발전소 24기(고리 4기, 신고리 2기, 월성 4기, 신월성 2기, 한울원자력 6기, 한빛원자력 6기)가 가동 중이며, 추가로 4기(신고리 2기, 신한울 2기)를 건설하고 있다. 원자력발전소는 엄청난 양의 냉각수 때문에 필연적으로 해안가에 건설할 수밖에 없으므로 건설 전은 물론 가동 중에도 항상 지진해일에 대한 안전성을 평가해야 한다.

효율적이고 경제적인 지진해일 방재대책을 수립하기 위해서는 이미 발생했던 지진해일 또는 발생 가능한 최대지진해일(PMT, probable maximum tsunami) 중에서 가장 큰 지진해일을 수치해석하여 최대처오름높이와 예상범람구역을 결정하고, 이를 근거로 지진해일 재해정보도를 제작하는 것이 바람

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

직하다. 재해정보도 작성과 기간시설물 설계에 지진해일의 영향을 고려하기 위해서는 수치해석과 더불어 실제 지진해일이 발생했을 경우 현장조사를 통해 다양한 정보를 수집하여 가상 시나리오를 작성하는 것이 필요하다. 작성된 시나리오는 실제 지진해일이 발생했을 경우 신속하고 효율적인 방재에 이용될 수 있으며, 실제 지진해일의 급습이 예상될 때 범람구역으로부터 재빨리 주민을 대피시킬 수 있다.

첫째 저자는 일본의 오후나토(Ohunato), 케세누마(Kesenuma) 및 센다이(Sendai)를 포함하는 동북지방을 2010년 6월 3일부터 6일까지 방문한 적이 있었다. 일본의 동북지방은 2011년 3월 11일 발생한 동일본 지진해일에 의해 많은 인명 및 재산피해가 발생했던 곳이다. 첫째 저자가 동북지방을 방문한 2010년은 최근 100년 동안 발생했던 지진 중 가장 규모가 큰 것으로 기록되고 있는 칠레 지진(규모 9.5)과 지진해일이 발생한 지 50년이 되는 해로 첫째 저자는 일본지역안전학회의 초청으로 우리나라의 지진해일 방재대책에 관한 주제로 강연을 하기 위해 칠레 지진해일 50주년 특별심포지엄에 참석하였다. 일본 동북지역의 해안은 리아스식 해안으로 많은 항구가 발달해 있을 뿐만 아니라 해안을 따라 양식업을 많이 하고 있는 매우 아름다운 지역으로 거주인구 또한 매우 많은 지역이다. 그러나, 이 지역은 1960년 칠레 지진해일은 물론 2010년 2월에 발생한 칠레 지진해일에 의해서도 약 4억 엔의 재산피해가 발생하였을 뿐만 아니라 2011년 발생한 동일본 지진해일에 의해 엄청난 피해를 입었던 지역이다. 특별심포지엄은 1960년 칠레 지진해일이 발생한 지 50주년을 추모하기 위해 당시 가장 피해가 컸던 오후나토에서 개최되었다. 심포지엄을 마치고 오후나토를 둘러보았을 때 Fig. 1과 같이 거리 곳곳에 1960년 칠레 지진해일 때 해일이 도달했던 높이를

도시한 표지판이 눈에 많이 띄었으며, 지진해일 대피 안내를 위한 지도가 도시 곳곳에 설치되어 있어 지진해일에 대비한 방재가 생활화되어 있음을 알 수 있었다.

일본이 지진해일에 대한 방재대책을 잘 갖추고 이를 생활화하고 있음에도 불구하고 동일본 지진해일에 의한 피해를 막기엔 역부족이었으며, 특히 미야기현을 포함한 동북지방에서 피해가 컸던 것으로 알려졌다. 지진해일에 대비한 가장 최고 수준의 방재대책을 보유하고 있다고 알려져 있으며, 방재대책에 대해 자신감이 매우 높았던 일본은 동일본 지진해일로 인해 국가 이미지에 큰 타격을 받았다. 지진해일은 태풍 등과 같은 다른 자연재해들과 달리 발생을 예측할기가 거의 불가능하고 한번 발생하게 되면 광범위한 지역에 걸쳐 엄청난 피해를 야기할 수 있다. 따라서, 적절한 방재대책을 수립하여 국민의 생명과 재산을 보호할 수 있도록 해야 한다.

본 논문의 다음 장에서는 지진해일 국외 및 국내현장조사에 관한 경험을 기반으로 현장조사에 대하여 기술한다. 제 3장에서는 지진해일 방재대책에 서술하며, 재해정보도 작성 및 비상대처계획 등에 관하여 기술한다. 또한, 원자력발전소에서 지진해일 방재대책에 대해서도 언급한다. 제4장에서는 추가로 연구해야할 주제 및 인력양성 등에 대하여 서술한다. 마지막으로 결론을 도출한다.

2. 현장조사

지난 2004년 12월 26일 인도양에서 엄청난 인명피해를 초래한 지진해일이 발생했다. 현지시간 오전 6시 29분에 인도네시아 수마트라섬 부근 인도양에서 일어난 규모 9.4의 해저지



(a) Observed tsunami height



(b) A hazard map

Fig. 1. (a) Observed height of 1960 Chilean Tsunami, (b) A hazard map at Ohunato

진에 의해 발생한 수마트라 지진해일은 매우 강력한 것이었다. 지진의 진원지는 수심 1,300 m 정도에 위치한 순다(Sunda) 해구근처에 있었고, 해저에서 10 km 정도 아래에 위치하고 있었기에 지진해일의 규모가 매우 컸다. 지진해일은 발생 후 수 분만에 인도네시아 반다 아체(Banda Aceh) 지역을 강타했고, 수백분후에 스리랑카, 인도, 몰디브, 태국에 큰 피해를 발생시켰으며, 수백분후에 말레이시아, 미얀마, 방글라데시 및 아프리카의 소말리아 해안에도 엄청난 피해를 발생시켰다. 지진해일은 전체적으로 약 30만 명의 인명피해(사망과 실종)와 약 100억 달러의 재산피해를 초래하였다.

한국해양해양공학회는 수마트라 지진해일에 의한 피해를 직접 조사하기 위하여, 현장조사단을 구성하여 Fig. 2에 도시된 인도의 안다만-니코바(Andaman-Nicobar)제도에서 현장조사를 실시하였다. 조사단은 성균관대학교 최병호 교수, 한양대학교 조용식 교수, 인도 바라치다산(Bharathidasan) 대학교 Lakshumanan 교수(당시 한국해양연구원에 박사 후 과정으로 있었음)와 한양대학교 대학원생 1명 및 성균관대학교 학부생 2명과 현지에서 고용한 타밀어를 통역해 줄 인도인 1명 등 모두 7명으로 구성되었다. 현장조사를 위해 준비한 장비는 토탈스테이션 1대, 레벨 1대, 측량스태프 3개, 비디오카메라 2대, 녹음기 3대, GPS 2대, 노트북 2대 등을 가지고 갔으며, 현지에서 운전기사를 포함한 차량을 2대 임대하여 2개조로 나누어 현장조사를 실시하였다. 특히, 니코바제도는 지역적으로 멀리 떨어진 까닭에 헬기를 임대하여 조사하였다. 조사단은 2005년 3월 24일 인천공항을 출발하여 싱가포르를 경유하여 인도의 첸나이(Chennai)에 도착하여 하루를 묵은 후, 3월 25일 최종 목적지인 안다만제도의 포트 블레어(Port Blair)에 도착하였다(Fig. 2 참조). 조사단은 3월 31일까지 포트 블레어에 머무르면서 피해조사를 수행한 후 4월 1일 귀국

하였다. 인도정부 발표에 따르면 안다만-니코바제도에서는 지진해일에 의해 약 1,925명이 사망하였으며, 5,555명이 실종된 것으로 보고되었다. 현장조사는 26개 지역에서 이루어졌는데 리틀 안다만(Little Andaman)의 여객 부두에서 최대 초오름높이 17.26 m가 기록되었고, 치디아토포(Chidiyatopu)는 최대범람지역으로 해안선으로부터 500m 떨어진 곳까지 범람이 발생하였다(Cho *et al.*, 2008; Cho *et al.*, 2009).

조사단의 주된 임무는 인도의 안다만-니코바제도에서 발생한 초오름높이와 인명피해 및 재산피해를 직접 조사하여 기록하는 것이다. 더불어, 현장조사에서는 주로 바닷물에 잠겼던 지점의 높이, 해안으로부터의 거리, 첫 번째 해일의 도달 시간 등을 조사하고, 현지인과 인터뷰 등을 통해 피해상황 등을 녹음하고 저녁 때 숙소에서 자료를 다시 정리하였다. Fig. 3은 현지에서 촬영한 것으로 현지주민들이 낱자와 시간에 따라 건물에 표시된 물자국을 표시한 것으로 이와 같은 자료는 조사단에게는 매우 귀중하게 사용되었다. 안다만-니코바제도에서의 현장조사에 관한 보다 상세한 자료는 Cho *et al.* (2008) 및 Cho *et al.* (2009)을 참조할 수 있다.

많은 인명 및 재산피해를 초래한 자연재해는 역설적으로 많은 과학적 사실을 인류에게 제공한다. 해저지진의 진원지는 안다만-니코바제도에서 매우 가까운 곳에 있었다. 조사당시 지진해일 피해를 입은 지 3개월여가 지났지만 안다만-니코바제도 전역에서는 여진이 빈번히 발생하여 피해를 입히고 있다. 지대가 낮은 시피가트(Sippihat) 지역에서는 해수가 지류를 따라 농경지로 침범해 들어오는 현상이 발생하였으며, 이는 이전에는 없었던 현상으로 만조 때 지역주민들의 집이 해수의 범람에 피해를 입고 있다. 우기가 시작되면 빗물이 만조 때 해수를 정체시켜 피해가 커질 위험이 있다. 조수의 영향이 강력해지면 빗물은 낮은 지대로 몰리고, 낮은 지대를 흐

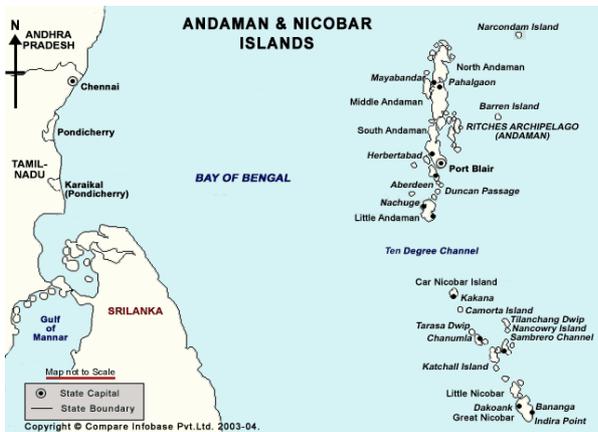


Fig. 2. Map of Andamn-Nicobar Islands, India



Fig. 3. Watermarks at Cerea Top, Andaman Islands, India

르던 해수와 합쳐져서 수면이 상승하여 주변지역으로 퍼져나가면서 범람에 의한 피해가 발생할 것이므로 인도정부 차원의 대책이 절실한 실정이다.

한반도에서 1900년 이후 인명 및 재산피해를 초래한 지진해일은 1983년 지진해일이 유일하다. 그러나 안타깝게도 우리나라에서는 지진해일에 대한 현장조사가 제대로 이루어지지 않는다는. 첫째 저자는 학생들과 더불어 강원도 삼척시 원덕읍에 위치한 임원항에 대하여 비록 지진해일 발생 후 20여년이 지나긴 했으나 몇 번에 걸쳐 현장조사를 실시하였다. Table 1은 수치모형으로 예측한 처오름높이를 기존의 관측자료(Ahn *et al.*, 2010)와 비교한 것을 보여주고 있다. 전체적으로 수치해석을 통해 예측한 처오름높이는 현장조사에서 획득한 처오름높이와 비교하여 상당히 근사한 결과를 보이고 있다. Fig. 4는 Table 1에 열거된 현장관측지점을 표시하고 있다. 임원항 현장조사 때는 1983년 당시의 흔적을 찾기는 불가능

하였기에 당시에 거주했던 주민들을 상대로 대화를 통해 어디 지점까지 물에 잠겼는가를 확인하였다. 신뢰성을 높이기 위해 대화한 주민들 중 3명 이상이 일치하는 자료만을 채취하였다. 전체적으로 임원항을 포함한 인근지역에서는 약 3~4 m의 처오름높이가 발생하였다.

지진해일 현장조사는 방재대책 수립에 매우 중요한 자료를 제공하므로 지진해일과 같은 대형 자연재해가 발생하면 반드시 현장조사를 하는 것이 바람직하다. 지진해일은 자주 발생하는 재해가 아닌 이유로 방재대책을 적절하게 수립하는 것도 쉽지 않을 뿐만 아니라 매우 어렵다. 더욱이, 지진해일 현장조사는 국내에서 경험하는 것이 거의 불가능하고 국외에서의 경험 또한 매우 어렵기 때문에 차후 다른 나라에서 지진해일이 발생하면 반드시 조사단을 파견하여 방재대책에 필요한 정보를 수집하는 것이 바람직하다(Choi *et al.*, 1994).

3. 방재대책

지진해일 방재대책 수립은 안전한 해안사회 구축에 필수적인 사항으로 해안재해로 인한 인명피해는 물론 막대한 경제적인 손실을 저감시키고 중요한 산업시설을 보호한다는 국가 기본전략으로서의 특성을 갖고 있다. 국내의 경우 일본의 기상청으로부터 정보를 통보받아 지진해일 경보를 발령하고 있으며, 대부분의 방재체계도 일본의 체계와 유사한 것을 사용하고 있다. 그러나 지진해일은 지역적인 특성에 따라 피해양상이 크게 좌우되는 자연재해이기 때문에 우리나라 실정에 적합한 재해지도 작성과 비상대처계획(EAP)을 수립하고 원자력발전소의 지진해일에 대한 안전성을 검토하는 것이 매우 중요하다.

3.1 재해지도

지진해일 방재대책 수립에서 가장 중요한 것은 지진해일 재해지도의 작성 및 배포이다. 지진해일 재해지도는 침수흔적도, 침수예상도 및 재해정보도를 통칭하는 것으로 현장조사와 수치모의 등과 같은 과학적인 연구결과를 토대로 지역적인 특성을 고려하여 작성해야 한다. 특히, 지진해일 재해정보도는 위험지역과 대피정보가 모두 포함된 것으로서 재해발생 시 주민들의 인명 및 재산피해를 최소화하는데 매우 중요한 역할을 하기 때문에, 각 지방자치단체에서는 지진해일 재해정보도를 작성하여 주민들에게 배포하고 적극 홍보하여 실제 위기상황이 발생했을 때 주민들이 안전하고 신속하게 대피할 수 있도록 유도해야 한다. 또한, 지진해일은 한 번 발생하면 매우 큰 피해를 발생시키는데 비해 상대적으로 태풍이나 홍수 등에 비해 발생빈도가 적기 때문에 지진해일에 대한 주민들의

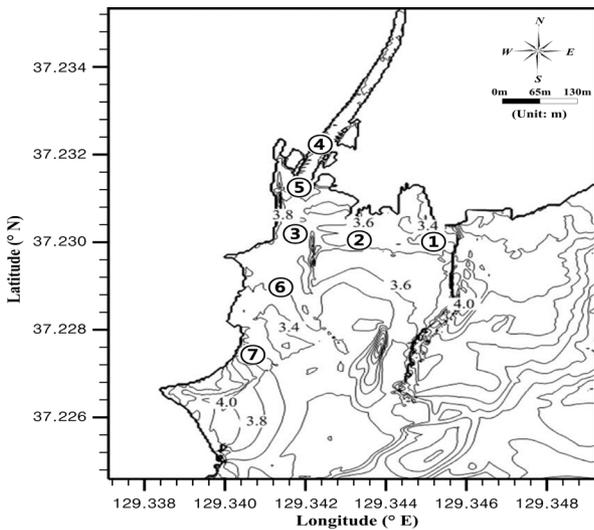


Fig. 4. Field observed locations at Imwon Port for 1983 event

Table 1. Comparison of observed and predicted maximum run-up heights

No	Location	maximum run-up height (m)	
		filed survey	numerically predicted
①	Geobuk Store	3.5	3.4
②	Wonduk Fishery Cooperative	3.4	3.3
③	Imwon Bridge	3.8	3.5
④	First Imwon Bridge (left)	3.3	3.3
⑤	Second Imwon Bridge	3.7	3.6
⑥	Hoorit Village	3.9	3.7
⑦	Imwon Beach	3.9	3.7

경각심이 매우 부족한 실정이다. 따라서 지방자치단체에서는 정기적인 교육이나 비상대피훈련 등의 제도적인 장치를 두어, 주민들이 지진해일에 대해 잘 이해하고 위험성에 대해 숙지할 수 있도록 관리하는 것이 필요하다.

지진해일 재해정보도는 지진해일 전파 및 범람 수치모형을 통한 최대 침수역의 예측과 현장조사 및 대피 시뮬레이션을 통한 재해정보 작성을 통해 만들 수 있다. 그동안 국내에서 정확도 높은 지진해일 수치모델링 기법이 꾸준히 연구되어 왔으며, 이미 세계적인 수준의 기술력을 확보하고 있기 때문에 이를 활용하여 지방자치단체별로 신뢰도 높은 최대 침수역을 예측할 수 있다. 최대 침수역의 예측은 이후 방재대책 수립의 기본이 되는 매우 중요한 자료이기 때문에 반드시 정확도 높은 수치모형을 이용하여야 한다(예, Ha and Cho, 2015). 최대 침수예상지역의 계산결과로부터 피해를 예측할 수 있으며, 피해양상 및 규모에 따라 대피소와 대피경로 등을 결정할 수 있다. 대피소와 대피경로의 결정은 실제 모의훈련을 통하여 발생 가능한 피해를 예측하여 최적의 조건으로 결정하는 것이 바람직하지만 이는 비용과 시간적인 면에서 현실적으로 수행이 불가능하다. 따라서 지진해일 대피 시뮬레이션 수치모형을 통하여 가상의 공간에서 모의훈련을 수행하여 최적의 조건을 예측할 수 있다.

Fig. 5는 1983년 동해 중부 지진해일이 일본 근해에서 발생한 후 동해를 가로질러 우리나라 동해안으로 전파해가는 과정을 수치모형으로 해석한 지진해일의 최초 도달시간을 예측한 등시간도이다. 우리나라에는 발생 후 대략 100-120분 정도의 시간이 지난 후에 지진해일이 도달함을 알 수 있으며, 적절한 경보시스템을 운용할 경우 이와 같은 원해 지진해일로부터 인명피해를 최소화하는 것이 가능하다. 반면에, 우리나라 연

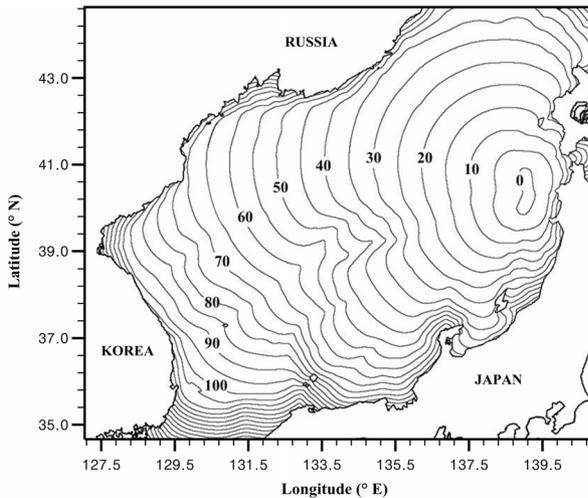


Fig. 5. Predicted travel time of leading tsunamis for 1983 Event

안에서 지진해일이 발생했을 경우 도달시간은 수분 이내이므로 경보체계를 갖추었다더라도 주민들이 대피하는 것이 매우 어렵다. 그러므로, 지진해일에 의한 피해를 예방하는 가장 효과적인 방법은 지진해일에 의한 피해가 예상되는 해안선을 따라 예상범람구역을 설정하는 것이 바람직하다. 예상범람구역 내에는 초등학교, 병원 및 양로원 등과 같이 대피능력이 현저히 떨어지는 어린이나 노약자 등이 이용하는 시설은 절대로 건축할 수 없도록 해야 한다.

Fig. 6은 강원도 삼척시에 위치한 임원항의 재해정보도이다. 임원항의 재해정보도는 우리나라에서 작성된 최초의 지진해일 재해정보도이며, 지진해일과 관련된 정보는 물론 대피에 필요한 정보를 제공하고 있다. 재해정보도는 11개의 가상 지진해일(virtual tsunamis)과 3개의 역사 지진해일(historical tsunamis)을 근거로 작성된 것으로 관련된 정보는 참고문헌을 참조할 수 있다. 참고로, 임원항의 재해정보도는 처음 제작된 후 몇 번에 걸쳐 수정 및 보완된 것이다(Ahn *et al.*, 2010; Park and Cho, 2012; Cho *et al.*, 2015; Choi *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2017).

3.2 비상대처계획(EAP, Emergency Action Plan)

지진해일 비상대처계획(Emergency Action Plan)은 해안

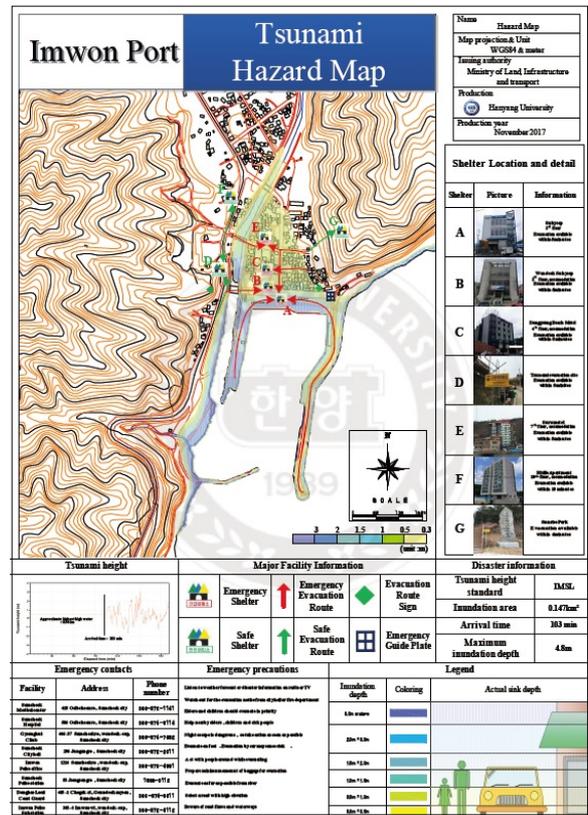


Fig. 6. Tsunami hazard map at Imwon Port

지대에서 지진해일 발생 시 국민의 생명을 보호와 재산손실을 최소화하기 위해 중앙정부, 지방자치단체 및 유관기관이 재해로 인한 피해규모와 발생 가능한 비상상황(Emergency: 지진해일, 폭풍해일, 지진 등)을 예상하고, 대응조치(Action: 비상상황관리, 응급조치, 재해구호 및 지역안정 등)를 신속하고 효율적으로 대처하기 위해 가능한 최선의 사전계획(Plan)을 수립하는 것이다. 방재대책에서 재해정보도와 더불어 중요한 것은 지진해일 비상대처계획일 것이다.

지진해일 EAP는 지진해일 발생 시 각 지방자치단체에서 국민들의 안전 및 생명보호를 위한 대처방법을 제시하며, 지진해일 범람시의 침수상황과 대피방법 등의 정보를 주민에게 알기 쉽게 제공하는 것을 목적으로 한다. 따라서, 지진해일 EAP는 재해발생으로부터 재해종료 후 복구대책까지를 포함한 종합적인 방재대책수단이라 할 수 있다.

지진해일은 방대한 지역에 걸쳐서 피해를 발생시키는 대규모 재해이기 때문에 지역에 따라 피해규모가 다르며, 같은 지역이라 하더라도 지진해일 발생위치에 따라 피해양상이 다르게 나타난다. 이처럼 지역적인 특성에 따라 지진해일의 거동이 큰 차이를 보이기 때문에 각 지방자치단체에서는 이를 고려하여 자체적으로 지진해일 EAP를 수립하여 피해를 최소화하여야 한다. 그러나 오랫동안 지진해일을 연구한 전문가가 아닌 이상 지진해일의 거동 특성을 파악하고 세부적인 지역 특성을 잘 반영하여 대책을 마련하는 일은 현실적으로 매우 어려운 일이다. 따라서, 다음과 같은 일반적인 사항을 포함하여 각 지방자치단체에서 현지의 여건을 반영하여 자체적으로 지진해일 EAP를 수립하는 것이 바람직하다.

비상대처계획 수립의 주체인 지방자치단체와 시설물 관리 주체는 관할구역 내 해안지대의 기상 및 수문학적 특성과 지형학적 특성에 근거하여 가능한 지진해일 발생에 의한 비상상황을 예상하고 이에 효율적으로 대처하기 위하여 지역특성에 맞는 EAP를 수립하여야 한다. 일반적으로 지진해일 EAP에 포함되어야 할 주요 내용은 경보순서도, 위험 및 비상감지, 평가 및 분류, 담당업무 및 책임, 대비활동, 비상대처조직과 비상대처 활동 내용, 재해정보도, 이재민 대피 및 수용계획, 비상연락망, 구호활동 사항, 기타 관련 지도 등이다.

3.3 원자력발전소의 안전성

우리나라 지진해일 방재대책에서 반드시 포함되어야 할 것은 원자력발전소의 안전성 여부이다. 앞에서 언급한 것과 같이 우리나라 해안에는 모두 24기의 원자력발전소가 가동 중이며, 이러한 원자력발전소는 지진해일의 급습에 노출되어 있다. 원자력발전소는 Fig. 7과 같이 냉각수로 사용하기 위

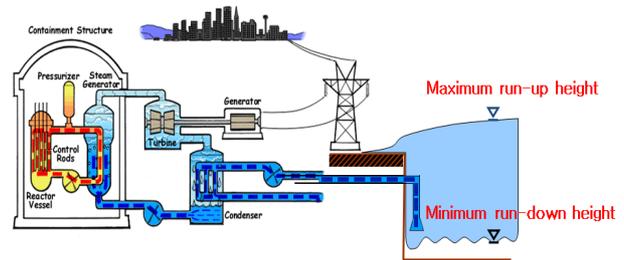


Fig. 7. A schematic sketch of a cooling water supply system at a nuclear power plant

해 많은 양의 바닷물을 공급해주어야 한다. 따라서, 그림에서와 같이 원자력발전소에서는 지진해일에 대비하여 최대처오름높이와 최저저내림높이에 대하여 안전성을 검토한다. 즉, 최대처오름높이는 범람으로 원자력발전소가 바닷물에 침수되는가 여부를 검토하고, 최저저내림높이는 바닷물의 수위가 취수구조물보다 내려가 취수가 불가능한가 여부를 검토하는 것이다. 실제로 2011년 동일본 지진해일 때 후쿠시마 원자력발전소는 냉각수를 공급하는 펌프가 지진해일에 의해 바닷물에 잠겨 냉각수 공급이 적기에 이루어지지 않아 원자로가 과열된 후에 파괴된 것으로 알려져 있다.

원자력발전소의 지진해일 안전성 검토는 원자력발전소의 부지선정 과정부터 충분히 검토하여야 한다. 동해의 해저지형을 반영하고 예상되는 지진의 발생위치 등을 종합적으로 검토하여 충분하고 정확하게 부지선정을 하여야 한다. 또한 원자력발전소가 완공되어 가동중에도 일정기간을 주기로 지진해일에 대한 안전성 검토를 수행해야 한다.

4. 추가 연구주제

국내에서 지진해일에 관한 연구는 아직은 수치모형을 이용하여 기존의 지진해일을 재현하는 수준에 머물러 있으며, 지진해일의 전파 및 처오름과 관련된 여러 물리적 현상을 수리실험을 통해 규명하기 위한 본격적인 연구는 매우 저조한 실정이다. 다만, 최근의 국내 연구수준은 이론적인 연구분야에서는 미국 및 일본 등 선진국과 어깨를 나란히 하는 수준에 이르고 있다.

발생, 전파 및 범람과정 등을 모두 포함하는 지진해일의 거동에 관한 연구는 초기수면변화, 쇄파(breaking), 난류생성(turbulence), 유사이송(sediment transport) 및 처오름 등과 같은 여러 자연현상에 관한 물리적 특성을 규명하는 것은 물론이고 예기치 못한 지진해일의 급습으로부터 인명과 재산을 보호하기 위한 방재작업의 수단으로도 매우 중요한 것이므로



Fig. 8. Transport of sediment due to East Japan Tsunami

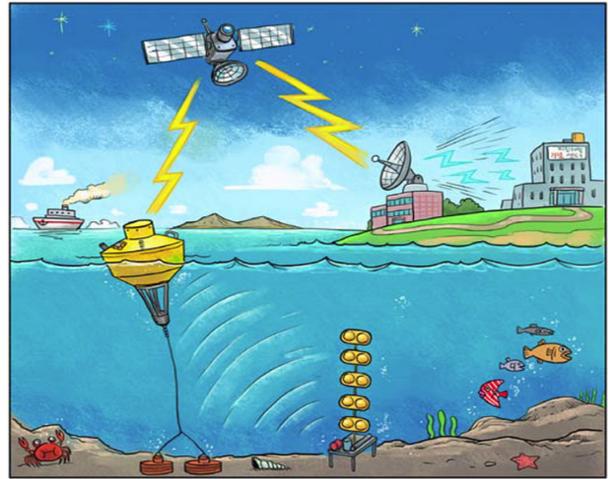


Fig. 10. Early tsunami detection system



Fig. 9. Vortex generation during East Japan Tsunami

국내에서도 보다 활발하고 다양한 연구가 진행되어야 한다. 현장조사 경험을 가진 소수의 전문가에 의존하여 지진해일 연구가 수행되어 왔으나 대부분의 전문가들이 정년을 앞두고 있어, 지속적인 다양한 연구를 위한 연구 인력은 부족한 실정이다.

지진해일과 관련하여 앞으로 연구해야 할 첫 번째는 원자력발전소의 안전성 검토이다. 동일본 지진해일 당시 후쿠시마 원자력발전소의 경우와 같이 원자력발전소의 안전 여부는 대규모 인명 및 재산피해는 물론 전력수급을 변경하는 등 국가정책을 변경할 정도로 매우 중요한 사항이다. 둘째, 지진해일에 의한 대규모 유사이송이다. Fig. 8은 동일본 지진해일이 센다이지역에 상륙하여 내륙으로 전파해가는 모습으로 그림에서와 같이 지진해일은 대량의 유사를 포함하고 있다. 이와

같은 유사이송은 예기치 못한 침식과 퇴적을 수반하므로 이에 관한 연구가 필요하다. 셋째, 지진해일은 많은 부유물질을 이동시키는데 이는 사람 및 건물 등에 피해를 야기할 수 있기 때문에 이에 관한 연구가 필요하다. 넷째, 지진해일은 전파하면서 다양한 물리적 현상을 일으킨다. Fig. 9은 동일본 지진해일 당시 앞바다에서 찍은 사진으로 지진해일에 의해 대형와류가 발생하고 있다. 이와 같은 와류에 배가 갇힐 경우 매우 위험할 수 있으므로 이러한 물리적 현상에 대하여 연구가 필요하다. 특히, 이와 같은 현상은 비록 규모는 작았으나 1983년 지진해일 당시 임원항 내에서도 발생하였다. 다섯째, 우리나라의 지진해일 발생빈도나 경제적인 여건과 과학기술의 수준으로 쉽지는 않겠으나 Fig. 10에 도시된 지진해일 조기경보시스템에 관한 연구가 필요하다. 적절하고 바람직한 조기경보시스템을 갖출 경우 인명피해를 최소화하는 데 매우 도움이 될 것이다. 마지막으로, 소규모이더라도 수리실험을 이용한 연구와 확률개념을 도입한 지진해일 연구가 필요하다. 수치모형을 이용한 지진해일 연구는 이미 세계적 수준에 접근하였으므로 다양한 방법을 이용하여 지진해일 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것이다(Ha *et al.*, 2014; Cho *et al.*, 2013; Kim *et al.*, 2018; Lu *et al.*, 2017).

5. 결론

지진해일에 의한 재해는 일단 발생하면 인명피해는 물론이며 막대한 재산피해를 동반하므로 재해가 발생하기 전에 예방하는 것이 최선이기기는 하지만, 만일 발생하더라도 피해를

최소화하는 것이 필요하다. 재해의 예방 또는 재해 발생 시 재해를 최소화하기 위한 대책을 수립하기 위해서는 재해에 관련된 각종 정보를 확보하고 이들 정보를 쉽고 빠르게 활용할 수 있는 체계의 확립이 필수적이다.

지진해일은 지역적인 특성에 따라 피해양상이 크게 좌우되는 자연재해이기 때문에 우리나라의 실정에 적합한 방재대책을 수립하는 것이 무엇보다 중요하다. 지진해일 최대처음높이와 최저처내림높이는 모든 해안구조물의 천단고와 원자력발전소의 안전성 및 취수구조물 설계에 중요한 요소이며, 특히 동해안에서는 1983년과 1993년 등 두 차례의 지진해일이 내습한 적이 있어 인명 및 재산피해를 최소화하기 위한 수단으로 광범위한 지진해일 연구가 필요하다. 아울러, 발생 가능성이 높아지고 있는 일본연안 지진공백역의 지진해일에 대한 모든 연안구조물과 원자력발전소의 안전성에 대한 검토가 요구된다.

현재 국내에서의 지진해일에 대한 연구는 이론적 부분에 치중되어 있는 상황이다. 앞으로의 지진해일에 대한 연구는 수리실험을 통한 물리적 현상 규명, 조기경보시스템 그리고 확률개념 도입과 같이 다양한 분야에 대해 지속적으로 수행될 필요가 있다.

감사의 글

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

References

- Ahn, S.-H., Ha, T.-M., and Cho, Y.-S. (2010). "Generation of Tsunami Hazard Map." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 10, No. 4, pp. 127-133.
- Cho, H.-R., Cho, J.-S., and Cho, Y.-S. (2015). "Tsunami response system for ports in Korea." *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 15, No. 9, pp. 1999-2008.
- Cho, Y.-S., Kim, Y.-C., and Kim, D.-K. (2013). "On the spatial pattern of the distribution of the tsunami run-up heights." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 27, No. 6, pp. 1,333-1,346.
- Cho, Y.-S., Lakshumanan, C., Choi, B.-H., and Ha, T.-M. (2008). "Observations of run-up and inundation levels from the tele tsunami in the Andaman and Nicobar Islands: A field report." *Journal of Coastal Research*, Vol. 24, No. 1, pp. 216-223.
- Cho, Y.-S., Lakshumanan, C., Choi, B.-H., Lee, S.-O. and Hwang, K.-N. (2009). "A field report on the impact of the 2004 Sumatra Tsunami along the Southeast Coast of India." *Coastal Engineering Journal*, Vol. 51, No. 1, pp. 1-26.
- 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, B.-H., Ko, J.-S., Chung, H. F., Kim, E.-B., Oh, I.-S., Choi, J.-I., Sim, J.-S., and Pelinovsky, E. (1994). "Tsunami run up survey at East Coast of Korea due to the 1993 Southwest of the Hokkaido earthquake." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 6 No. 1, pp. 117-125 (in Korean).
- Ha, T. and Cho, Y.-S. (2015). "Tsunami propagation over varying water depths." *Ocean Engineering*, Vol. 101, pp. 67-77.
- Ha, T., Lin, P., Shim, J. and Cho, Y.-S. (2014). "Three-dimensional numerical simulation of solitary wave run-up using the IB method." *Coastal Engineering*, Vol. 84, pp. 38-55.
- Kim, K.-H., Cho, Y.-S., and Kwon, H.-H. (2018). "An integrated Bayesian approach to the probabilistic tsunami risk model for the location and magnitude of earthquakes: application to the Eastern Coast of the Korean Peninsula." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 32, No. 5, pp. 1,243-1,257.
- Kim, T.-R., Cho, H.-R., and Cho, Y.-S. (2017). "Inundation Map at Imwon Port with Past and Virtual Tsunamis." *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 21, No. 1, pp. 1-9.
- 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.
- Park, K.-W., and Cho, Y.-S. (2012). "Hazard Map with Probable Maximum Tsunamis." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 2, pp. 263-270.