실용적인 원지 지진해일 예경보 체계

Practical Forecast-Warning System for Distant Tsunamis

윤 성 범* / 백 운 일** / 박 원 경*** / 배 재 석****

Yoon, Sung Bum / Baek, Unil / Park, Won Kyung / Bae, Jae Seok

Abstract

To construct the practical forecast and warning system for distant tsunamis suitable for Korea the state-of-art of the forecast and warning systems of United States and Korea is investigated, and the action conducted by Korea for the case of 2011 East Japan Tsunami is also analysed. The tsunami sources and propagation characteristics of distant tsunamis that affect the Korean coastal area are considered along with the capability of earthquake monitoring and numerical simulation and the available experts to propose the effective forecast and warning system for distant tsunamis.

Keywords : distant tsunamis, forecast-warning system, East Japan Tsunami, tsunami source, propagation characteristics

요 지

본 연구에서는 우리나라 실정에 부합되는 실용적인 원지 지진해일 예경보 체계 구축을 위해 미국과 우리나라의 지진해일 예경보 체계 현황을 파악하고, 2011년 동일본 지진해일 당시의 대처상황을 분석하였다. 우리나라 해안 지역에 영향을 미치는 원지 지진해일의 발생원 및 전파 특성을 고려하고, 지진탐지 및 수치모의 수행 능력과 가용 전문인력 등을 고려한 효율적인 원지 지진해일 예경보 체계 구축 방안을 제안하였다.

핵심용어 : 원지 지진해일, 예경보 체계, 동일본 지진해일, 발생원, 전파특성

1. 서 론

지난 30년 사이 지각운동이 활발해지면서 지진 및 지진해일의 발생이 빈번해져 해안재해에 대한 사회적 관심이 고조되고 있다. 특히, 2011년 3월 11일에 발생한 동일본 대지진 및 지진해일은 일본 혼슈 북동측 해안 지역에 약 19,000여명의 인명피해 및 천문학적인 재산피해를 발

생시키며 전 세계적으로 지진해일에 대한 경각심을 불러일으켰다.

지진해일은 일단 발생하면 주변 국가를 비롯하여 대양 건너에 위치한 국가 및 지역에게까지 피해를 발생시킬 수 있는 전 지구적인 규모의 자연재해이다. 2011년 동일본 지진해일은 태평양을 건너 칠레 해안에까지 도달하였으며, 미국 서부에서는 인명피해까지 발생시킨 바 있다. 또한

*한양대학교 건설환경공학과 교수 (e-mail: sbyoon@hanyang.ac.kr)

Professor, Dept. of Civil & Env. Engrg., Hanyang University, Ansan 426-791, Korea

**한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정 (e-mail: builhjoo@dic.co.kr)

Ph.D. Student, Dept. of Civil & Env. Engrg., Hanyang University, Ansan 426-791, Korea

***한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정 (e-mail: ocean21c@hanmail.net)

Ph.D. Student, Dept. of Civil & Env. Engrg., Hanyang University, Ansan 426-791, Korea

****교신저자, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정 (e-mail: bjjae194@hanyang.ac.kr, Tel: 031-400-5140)

Corresponding Author, Ph.D. Student, Dept. of Civil & Env. Engrg., Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

지진해일은 지구 반대편 끝인 남극대륙에 까지 도달하여 빙하의 일부가 분리되는 현상이 위성으로 관측되기도 하였다. 이렇게 먼 거리까지 도달하는 지진해일의 특성을 고려한다면 가까운 동해 일본 서안의 단층대에서 발생하는 지진해일뿐만 아니라 태평양에서 발생하여 전파해 올 수 있는 지진해일에 대한 예보도 수행할 필요가 있다.

우리나라에서는 1964년 니이가타 지진해일, 1983년 동해중부 지진해일, 1993년 북해도 남서외해 지진해일 등 동해의 동연에서 발생하는 지진해일에 대한 연구는 어느 정도 진척되어 동해안 일부 주요 도시에 대한 지진해일 해안침수예상도 작성 등의 가시적인 성과를 내고 있으나, 태평양과 같이 원거리에서 발생하는 원지 지진해일에 대해서는 미국이나 일본의 예경보시스템에 의존하여 왔다.

실제로 2011년 동일본 지진해일 발생시 우리나라 기상청에서는 지진해일 발생 1시간 44분 후인 3월 11일 16:30에 1차 보도자료(기상청, 2011)를 통해 “이번 지진은 일본 동북부 해역에서 발생한 관계로 우리나라에는 지진해일의 직접적인 영향이 없을 것으로 예상된다. 기상청은 만일의 사태에 대비하여 금일 15시부터 비상근무에 들어갔다.”고 발표하였고, 발생 2시간 34분 후인 17:20에 2차 보도자료를 통해 “이번 지진은 일본 동북부 해역에서 발생했기 때문에 일본 혼슈에 가로막혀 우리나라에는 지진해일의 직접적인 영향이 없을 것으로 예상되지만, 기상청은 지진이 발생하자마자 비상근무에 들어가 예의주시하고 있다.”고 발표하였는 바, 실제 우리나라 해안에 언제 어느 정도의 크기로 지진해일이 도달할 거라는 정량적인 예보에는 미치지 못 하였다. 사후에 조위관측 자료를 분석하여 본 결과 동일본 지진해일로 인해 우리나라 남해안의 마산에서 최대 0.3m의 작은 지진해일이 도달하여 그 영향이 거의 없었던 것으로 확인되었으나, 만약 우리나라 해안지역에 범람을 발생시킬 수 있을 정도의 큰 지진해일이었다면 상당한 피해를 입었을 것이다. 반면 가까운 중국의 경우만 하더라도 2011년 3월 12일자 China Daily에 따르면 동중국해예보센터(East China Sea Forecast Center)에서 대만(Taiwan)의 동해안에 지진해일이 도달하기 1시간 21분 전인 현지시간 3월 11일 16:20(한국시간 17:20으로 지진발생 후 2시간 34분 경과 시점)에 임시적으로 0.5~1m의 해일이 1시간 10분 후에 도달할 것이라고 예보하고 청색경보를 발령한 바 있다. 실제 해일이 예보시간보다는 11분 늦게 도달하였으나 약 4시간의 전파시간 중 11분의 오차는 그리 크지 않으며 실제 해일고도 0.5m 이하여서 상당히 정도 높은 정량적인 예경보를 발령했다고 할 수 있다. 앞에서 살펴본 바와 같이 중국에서도 정량적인 예

보를 시도하고 있는 실정에서 우리나라가 정성적인 예보 수준에 그친 것은 우리가 전적으로 의존하고 있는 미국의 지진해일 예보 담당기관인 태평양지진해일경보센터(PTWC: Pacific Tsunami Warning Center)에서 2012년 지진해일 당시 발령했던 지진해일 통보문에 중국은 포함되어 있고, 우리나라는 포함되어 있지 않았기 때문이기도 하지만, 그 당시 통보문에서도 도달시간만 통보되었으므로 중국 측에서 예상 해일고를 미리 발표했다는 사실로 미루어 볼 때 중국 자체적으로 해일고를 예측하는 과정이 있었을 것으로 판단된다. PTWC에서는 통상 지진해일이 발생하면 수치모델링을 통해 10분 이내에 태평양 전체의 해일고와 도달시간을 보여주는 전파도를 완성하고 이를 바탕으로 해일의 피해가 우려되는 대표적인 지역을 통보문에 나열하여 각 국에 이메일로 발송한다. 당시 우리나라가 위험지역에서 벗어나 있어 통보문에 포함되지 않았겠지만 PTWC 시스템 자체가 실제로는 미국 해안에 초점이 맞추어져 있으므로 우리나라 쪽으로의 전파과정은 상대적으로 관심이 떨어질 수밖에 없다. 여기서 2가지 문제가 대두된다. 첫 번째는 PTWC 통보문에 포함되어 있지 않다고 해서 우리나라에 전혀 영향이 없을 것인지, 두 번째는 통보문에 포함되더라도 예상 도달시간만을 알려주므로 해일고가 어느 정도일지는 알 수 없다는 사실이다.

우리나라의 국제적 위상을 고려해 볼 때 우리나라의 독자적인 예경보시스템 구축과 방재대책의 수립은 더 이상 미룰 수 없는 시급한 과제로 판단된다. 또한 원지 지진해일 발생 시 우리나라 근해에서의 신뢰성 있는 정량적 예보를 외국 기관에 의존하지 않고 수행할 수 있는 예보체계를 구축하는 것은 기상예보의 주권을 확보하는 중대한 사안이다. 본 연구에서는 원지 지진해일에 대한 우리나라 독자적인 예경보 시스템을 구축하기 위한 기초 연구로서 미국과 우리나라의 지진해일 예경보 시스템을 파악하고 비교하여 우리나라 실정에 부합되며, 효율적인 예경보 시스템을 제안하고자 하였다.

2. 원지 지진해일 예경보 체계 현황

원지 지진해일이 발생한 다음 그 파원역의 지진 규모와 단층 매개변수를 구하고 초기파형을 계산하여 수치모의한 다음 해당 지역에 예경보를 발령하는 것이 이상적인 예경보 체계라 할 수 있다. 그러나 현재까지의 기술 수준과 컴퓨터 계산 능력으로는 해저에서 지진이 발생하고 나서 이러한 과정을 거쳐 지진해일의 위험성이 있는 곳에 예경보를 발령하기까지 장시간이 소요되어 지진해일이

도달할 때까지도 예경보 발령에 필요한 계산 결과를 얻기 힘든 실정이다. 따라서 현재까지의 기술수준에서 가능한 현실적인 예경보 체계를 마련할 필요가 있다.

지진해일 예경보는 크게 광역과 상세역의 2가지로 대별되는 바, 광역 예경보는 우리나라 제주도 또는 남해안 등 넓은 해역에 대해 대표적인 해일 도달시간과 해일고 등을 예보하는 것이며, 상세역 예경보는 마산만이나 여수만 등 특정 지역에 대한 예상 범람 범위 등 상세한 지진해일 정보를 제공하는 것이다. 광역 예경보는 해안에서 어느 정도 떨어진 외해를 대상으로 하므로 상세한 해안 지형의 영향을 받지 않고 해일의 파장이 길어 큰 격자를 사용할 수 있으며, 또한 해일고가 상대적으로 작아 선형이론이 적용 가능하므로 계산 부담이 상대적으로 적다. 반면 상세역 예경보는 방파제 등 복잡한 해안지형을 고려해야 하며, 해일고가 커서 선형이론을 적용할 수 없고, 범람역 계산시 이동경계를 사용해야 하며, 매우 작은 격자를 사용하여야 하므로 계산 부담이 막중하여 특정 지진해일에 대해 특정 지역만을 대상으로 한다. 따라서 상세역 예경보 시스템은 각 특정 지역마다 구축해야 한다.

2.1. 미국의 예경보 체계

원지 지진해일 예경보 체계 구축이 가장 앞선 미국의 경우에도 아직 광역 예경보 체계만을 구축하여 운영 중이며, 상세역 예경보는 아직 실시하고 있지 못한 실정이다. 미국의 지진해일 광역 예경보 체계를 살펴보면 다음과 같다. 미국의 지진해일 광역 예경보 체계는 2원화되어 있다. 1차적인 광역 예경보는 하와이에 있는 태평양지진해일경보센터(PTWC, Pacific Tsunami Warning Center)에서 담당하며, 해저 지진대의 어느 특정 위치에서 해저지진이

발생하면 전 세계의 지진과 탐지망에 의해 지진파를 탐지하고 분석하여 진앙의 위치와 지진규모를 즉각적으로 파악하고, 지진해일을 동반할 것으로 판단되면 그 지진규모에 해당하는 초기 파원을 추정하여 다음 20초 내에 광역 수치모델링을 수행하여 태평양 전체에 대한 지진해일의 도달시간 및 최대해일고를 도면으로 표시한 전파도를 작성하고, 이를 바탕으로 환태평양의 각 주요 해안 지점에 대한 해일고를 천수식 등의 간략한 공식을 사용하여 산정하여 통보한다. 한편 미국 해양대기국인 NOAA의 지진해일 연구센터(NCTR: NOAA Center for Tsunami Research)에서는 좀 더 상세한 2차 광역 예보를 담당하는 바, 원지 지진해일 예경보를 위해 지진해일을 발생시킬 가능성이 있는 태평양, 인도양 및 대서양 지진대 전체를 따라 지진 모멘트 규모 7.5에 해당하는 단층길이 100 km, 단층폭 50 km, 단층변위 1 m의 단위발생원(unit source)을 설정하고 각 발생원에 대한 수치모의를 실시하여 예경보 발령 대상 해안지역에 대한 지진해일 계산 결과를 DB (Data Base) 화하였다. 이 지진대의 어느 특정 위치에서 해저지진이 발생하면 지진대에 평행하게 외해 쪽에 설치된 관측 부이인 DART 부이 시스템에서 지진해일을 감지하고 초기 몇 십분 정도의 파형을 분석하여 역추적을 통해 지진해일 발생역 내의 단위발생원의 단층변위를 좀 더 현실적으로 추정하여 다음, 각 예경보 발령 대상 해안지역의 해당 단위발생원에 의한 지진해일 계산 결과에 역추적에 의한 단층변위량을 곱하고, 지진해일 발생에 기여한 모든 발생원에 대해 합산하여 그 지역의 지진해일에 의한 수면 거동을 수정하여 예측하는 2단계의 예경보 시스템을 구축하였다. 이 과정에는 각각의 단위발생원에 의한 지진해일이 서로 영향을 미치지 않는다는 선형시스템의 가정 하에 비례가정

(a) West Rim

(b) East Rim

Fig. 1. Unit Source Fault Distribution along West Rim (a) and East Rim (b) of Pacific Ocean (<http://nctr.pmel.noaa.gov/propagation-database.html>)

(proportionality)과 중첩가정(superposition)이 적용되었다.

이를 위해 NCTR에서는 Fig. 1에 보인 바와 같이 태평양 해저지진대와 인도양 해저지진대 및 대서양 해저지진대를 따라 기본적으로 2열의 단층을 설정하였다. 또한 해구(trench)와 해안 사이의 거리가 멀어 해저지진대의 폭이 큰 일본의 태평양 해안과 인도네시아의 인도양 해안의 해저지진대에는 5~10열의 단층을 설정하여, 전 세계적으로 총 1,691개의 단위발생원에 대한 수치모의를 수행한 다음, 그 결과를 주요 해안지역에 대해 DB화 하였다. Fig. 2는 2006년 11월 15일 쿠릴 열도 주변 해역에서 발생한 M8.3의 지진해일에 대해 부근 DART 부이에 감지된 초기 지진해일 파형을 이용하여 파원역의 초기파형을 역추적한 다음, 이를 이용하여 지진해일에 의한 최대 해일고를 산출한 2차 광역예보를 위한 수정된 결과를 보여주고 있다.

이러한 광역 예정보 시스템은 예정보 발령 대상 지역에 가까운 외해에서의 지진해일고와 도달시간 및 전파방향 등 지진해일에 대한 기본적인 정보를 줄 수 있으나, 해안의 특정 지역에 대한 예상 범람 범위 등 상세한 정보를 주지는 못한다. 따라서 이에 대한 보완책으로 특정지역 각각에 대한 상세역 예정보 체계가 필요하다. 그러나 상세역 예정보를 위해 1,691개의 모든 단위발생원에 대해 범람과정을 수치모의 하기에는 너무 방대한 작업이고, 그 계산 결과를 DB화 할 수도 없으며, 범람과정의 비선형효과로 인해 선형시스템 가정이 적용되지 않으므로 의미가 없다. 따라서 대상 지역에 의미가 있는 지진해일 범람을 발생시킬 가능성이 있는 지진대를 선별하여 정하고, 최대 가능

지진해일을 가정하여 범람계산을 수행한 다음 각각에 대한 최대 해안침수예상도를 작성하여 방재대책 수립에 사용한다. 따라서 상세역 예정보는 광역 예정보와는 달리 지진해일이 발생할 때마다 그 지진해일에 부합되는 실시간 예정보를 발령하는 단계에는 아직 이르지 못하고 방재 차원에서 최대 가능 지진해일에 대한 최대 침수예상범위를 제시하는 단계에 머물러 있다.

Fig. 3은 미국 하와이(Hawaii) 제도의 오�하우(Ohau) 섬에 위치한 진주만(Pearl Harbour)에 대한 지진해일 해안 침수예상도를 보여준다. 그림 중앙의 사각형 박스 안쪽의 그림은 광역 예정보의 결과로서 큰 원은 각 단위발생원에서 발생한 지진해일이 진주만에 도달하는 시간을 색깔로 표시하고, 작은 원은 단위발생원에 의한 진주만 외곽에서의 최대 지진해일고를 나타낸다. 사각형 외부의 14개 박스안의 그림은 상세역 예정보에 해당하는 것으로서, 전술한 바와 같이 진주만에 영향을 줄 수 있는 태평양 주위의 지진대를 따라 총 14개의 대표적인 위치에 가상 최대 지진 모멘트규모(Mw) 9.3을 설정하고 각각의 지진해일에 대한 진주만 내에서의 범람을 수치모의 하여 최대 범람역을 표시한 지진해일 해안침수예상도이다. 그러므로 이 해안침수예상도는 어떤 특정한 지진해일 이벤트가 발생했을 때 이에 해당하는 실시간 예보가 아님에 주의해야 한다.

현재 미국에서는 특정 지진해일 이벤트에 대한 상세 예정보 체계를 구축하기 위한 연구가 진행 중에 있으나 현실적으로 쉽지 않은 일이다. 이상에서 살펴 본 바와 같이 원지 지진해일 예정보 시스템이 가장 앞선 미국에서도 지

Fig. 2. Far-Field Propagation Map Showing Arrival Time and Maximum Tsunami Height for 2006 Kuril Tsunami (<http://nctr.pmel.noaa.gov/propagation-database.html>)

Fig. 3. Tsunami Inundation Map for Pearl Harbor of Hawaii
(<http://nctr.pmel.noaa.gov/propagation-database.html>)

진해일을 발생시킬 가능성이 있는 모든 지진대를 1,691개에 달하는 단위발생원으로 나누고, 각각의 단위발생원마다 수치모의를 실시하여 DB화 한 다음 이를 선형 비례와 중첩을 이용하여 합성하는 광역 예보시스템에 머물러 있으며, 특정지역에서의 특정 지진해일 이벤트에 의한 범람을 예보하는 실시간 상세역 예정보 체계는 아직 구축하지 못하고 있다. 향후 전산환경이 크게 개선되고 전문인력 확보가 충분해 이루어지면 상세역 예정보 체계의 구축도 가능할 것으로 판단된다.

2.2 한국의 예정보 체계

앞에서 살펴본 바와 같이 원지 지진해일에 대비한 예보시스템을 구축하기 위해서는 방대한 수치계산을 필요로 하고, 전 세계적으로 분포하는 지진대를 따라 지진과 지진해일을 감지하는 관측망을 운용해야 한다. 또한 상세역 실시간 예정보를 위해서는 특정 대상지역 별로 전 과정을 담당하기 위한 전문인력이 상시 대기해야 한다. 아직 먼 바다에 관측 부이를 설치하고 운용해 본 경험이 없으며, 전문인력과 예산 또한 태부족인 우리나라에서 미국과 같은 지진해일 예보시스템을 갖추기도 힘들고, 이를 운영하는 것은 더욱 어려운 실정이다. 더욱이 미국 예정보시스템의

예보대상에 우리나라는 상대적으로 중요성이 부각되지 않아 전적으로 미국의 예정보시스템에 의존할 수도 없는 실정이다. 따라서 우리나라 실정에 부합하면서도 원지 지진해일을 효율적으로 예보하기 위한 방안이 필요하다.

우리나라 동해안에 적용한 지진해일 예정보 시스템 구축 연구 연혁을 살펴보면 다음과 같다. 국립방재연구소(1998)에서 처음 제안한 동해 지진해일 예보 체계는 현재 미국 NOAA의 지진해일 연구센터(NCTR)에서 구축 중인 2차 광역 예보체계와 비슷한 개념으로서 동해 동연의 지진해일 발생 해역을 1분 격자(약 $1.5 \times 1.5 \text{ km}$)의 작은 단위발생원으로 나누고, 각 단위발생원에 초기파형으로 수면상승고 1m를 부여하여 전파과정을 수치모의 하고 우리나라 동해안의 주요 지점마다 수면변위 이력 즉 단위발생원에 대한 응답을 DB화한다. 실제 지진해일이 이 지역에서 발생하면 단층 파라미터를 신속히 추정하여 초기 파형을 구하고, 그 초기파원 영역 내에 위치하는 모든 단위발생원의 초기 수면변위량을 구한 다음, 동해안 각 지점에 대해 저장된 DB에서 추출한 단위발생원 응답에 해당 초기 수면변위를 곱하고, 관련된 모든 발생원에 대해 중첩하여 특정 지역에서의 지진해일 수면변화를 구한다. 여기에서도 미국의 경우와 같이 선형 비례와 중첩 가정이 적용되

Fig. 4. Schematic to Construct Inundation Map for Near Field Tsunami Forecast along East Coast of Korea

었다. 이 방법은 동해안 각 해안에서의 수면변위 이력과 지진해일고를 비교적 상세하게 구할 수 있는 장점이 있으나, 2011년 동일본 대지진의 경우에서와 같이 지진해일 발생 직후 단층 파라미터의 추정이 불가능하므로, 파원역 가까이 여러 지점에서 해양관측시스템이 운영되지 않으면 현실성 있는 초기 파형 추정이 어려우며, 상세역 범람 과정에는 선형 비례와 중첩 가정이 적용되지 않으므로 상세역 예경보 체계는 따로 구축해야 한다.

따라서 소방방재청에서는 다음과 같은 실용적인 예경보 체계를 제시하였다. 이 방법을 살펴보면 Fig. 4에 보인 바와 같이 동해의 동쪽 끝인 일본 서안을 따라 존재하는 해저 지진대를 따라 11개의 발생원 위치와 M7.4~M8.0의 범위에서 규모 0.1 간격의 7개 규모를 선정하여 총 77개의 가상 해저지진에 대한 지진해일 전파 및 범람 수치모의를 예보대상 지역에 대해 수행하고, 각각에 대한 해안침수예상도를 작성하여 둔 다음, 실제 지진해일이 발생했을 때 지진감시망을 통해 지진규모와 진앙의 위치가 알려지면 그에 해당하는 전파도와 해안침수예상도를 DB에서 곧바로 찾아내어 예보에 이용할 수 있도록 하므로 정량적인 예보가 가능하다. 여기서 전파도는 특정 지진해일에 대한 동해 전체의 지진해일 도달시간 및 최대 지진해일고 분포를 1장의 지도에 표시한 것으로 광역 예보에 사용되고, 특정 지역마다 작성해둔 해안침수예상도는 그 지역에 대한 상세 예경보용으로 사용된다. 또한 과거 동해에서 발생했던 지진규모 중 최대규모인 M7.8의 지진에 의한 지진해일 범람도 11개를 중첩시켜 대상지역의 최대예상범람도 즉 지진해일 최대 해안침수예상도를 제작하여 주민들에게 배포하여 방재대책 수립 및 대피에 활용하고 있다.

이 지진해일 예경보 개념은 2006년부터 3년간에 걸쳐 소방방재청(2009)에서 실시한 <지진해일 재해저감기술 개발> 연구를 통해 그 개념이 정립되었고, 삼척시의 임원항과 삼

Fig. 6. Inundation Map For Near Field Tsunami Forecast along East Coast of Korea (Imwon Harbor, M7.7, Source No. 5)

Fig. 7. Maximum Tsunami Inundation Map for Imwon Harbor

3. 실용적인 원지 지진해일 예경보 체계

이상적인 원지 지진해일 예경보 체계 구축을 위해 선결 사항은 먼저 지진을 탐지하고 그 규모와 위치를 파악하는 일이다. 다음으로는 그 지진이 지진해일을 유발시킬 수 있다고 판단될 경우 초기 파형을 가정하고 지진해일의 전파과정을 모의하여 지진해일 전파과정과 해일고를 파악하는 일이며, 위험 예상지역에 1차적인 광역예보를 통보하는 일이다. 이러한 전 과정을 신속히 처리하기 위해서는 지진감시망, 전용 컴퓨터와 통신망 등의 하드웨어와 함께, 수집된 지진자료로부터 지진해일 발생가능성을 판단하고 지진해일 전파 수치모의를 수행하며, 그 결과를 분석하여 위험 예상지역에 신속히 통보하는 전 과정을 자동화하고, 중간 결과로부터 다음 과정으로의 진행을 판단하고 결정하는 전문가가 24시간 교대로 대기해야 한다. 또한 지진해일의 실제 발생 여부를 확인하고 임시적으로 통보한 1차 광역예보의 정밀도를 높이기 위해 해양 관측망을 운영하여 지진해일을 실시간으로 감지하여 해일 전파도중 수시로 예보를 수정하여 통보한다. 이러한 2차 광역예보를 위해 지진해일을 유발시킬 수 있는 전 지구상에 존재하는 해저지진대를 총 1,691개의 단위발생원으로 나누고 단위발생원마다 수치모의를 실시하여 DB화하는 과정에서 그 전파과정의 시간이력(time history)을 모두 저장해야 하므로 DB 기억용량이 방대하다. 또한 지진 모멘트 규모 7.5에 해당하는 단층길이 100 km, 단층폭 50 km, 단층변위 1 m의 단위발생원(unit source)에 대한 결과를 조합하여 실제 지진해일 이벤트에 대한 전파양상을 파악하므로 실제 지진해일의 초기파형을 상대적으로 정확히 고려할 수 있으나, 지진해일 자체를 감지하고 DB로부터 해당 전파 계산 결과를 찾아내어 조합한 다음 도달시간 및 최대해일고를 구하는 과정에 상당한 인력과 시간이 필요하다. 또한 특정지역의 상세 예보를 위해서는 우리나라에서 수립한 것과 거의 동일한 과정을 다시 수행하여야 한다. 이러한 방식으로 미국 태평양지진해일정보센터를 비롯한 유사 지진해일정보센터가 운영되고 있다.

우리나라에서 이 모든 시스템을 일시에 갖추기에는 아직 부족한 점이 많다. 따라서 최소한의 시설과 인력으로 효율적인 예경보 체계를 구축하는 것이 필요하다. 우선 환태평양 섭입대에서 발생하는 해저 지진을 실시간으로 감지하기 위한 지진감시망은 우리나라 독자적으로 구축할 수 없고 국제적인 공조를 통해서만 가능하다. 다행히 미국 지질조사국(USGS)이나 태평양지진해일정보센터에서 거의 실시간으로 지진규모와 위치 등 지진정보를 얻을 수

있으므로 이를 이용하고, DART부이 등 지진해일 관측망은 지진해일 발생 여부를 확인하고 임시적으로 통보한 1차 광역예보의 정밀도를 높이기 위한 것이므로 필수적인 것은 아니다. 실시간 수치모의를 위해서는 전용 컴퓨터를 갖추는 것 이외에도 지진해일 전문인력이 상시 대기하고 있어야 하므로 현재의 상황에서는 여의치 않다. 그렇다면 지진규모와 진원 위치 정보만으로 최대한 예보의 정확도를 높이고 광역예보와 상세예보를 겸하는 방법을 강구할 필요가 있다. 현재 우리나라에서 동해안에 대해 구축 중인 예경보 체계는 앞에서 살펴 본 바와 같이 실시간 광역예보를 위한 수치모의나 DB화를 따로 수행하지 않고, 상세예보 체계 작성 과정에서 광역예보를 위한 전파도가 자동적으로 생산되며, 지진해일 이벤트에 대한 전파도이므로 지진해일 전파의 시간이력을 DB화 할 필요가 없어 DB의 규모가 크게 작아진다. 다만 미국의 2차 광역예보 체계에 비해 지진해일 이벤트의 특성을 상세하게 고려할 수 없는 단점이 있으나 우리나라에 도달하는 지진해일은 모두 원지 지진해일이므로 지진해일의 초기 파형이나 지진규모 및 진원의 위치 등을 정확히 고려하지 않아도 실용적인 목적으로 사용하기에는 문제가 없다. 실제 원지 지진이 발생하면 우리나라에서 지진해일 예경보 발령을 위해 즉각적으로 구할 수 있는 자료는 미국 지질조사국(USGS)과 태평양지진해일경보센터(PTWC), 그리고 일본 기상청(JMA) 등에서 통보해주는 지진 발생 시각, 지진의 모멘트 규모와 진원의 위치 정도가 전부이다. 따라서 이러한 기초적인 정보만을 가지고 지진해일을 예보하기에는 우리나라의 예경보 체계가 더 효율적이다. 따라서

원지 지진해일에 대한 예경보 체계 구축에 이미 우리나라에서 수립한 개념을 적용하는 것이 현실적일 것이며, 후에 모든 여건이 성숙되면 미국과 같은 체계로 전환하는 것이 바람직하다.

3.1 예경보체계 구축 대상 지진 발생역 및 지진규모

동해안에 적용된 예경보 체계 개념을 이용하더라도 지진해일을 발생시킬 수 있는 지구상의 모든 지진대를 포함하고, 또한 모든 지진규모를 고려한다면 수치모의를 위한 작업량과 DB의 규모가 방대해져 현실적이지 못하다. 따라서 우리나라에 의미가 있는 영향을 미칠 수 있는 지진의 위치와 규모만을 고려할 필요가 있다. Fig. 8은 1900년 이후 발생한 M8.5 이상의 계기지진의 진원 위치를 보여준다. 계기지진 역사상 가장 큰 지진은 1960년 칠레에서 발생한 지진으로 M9.5이며, 지진해일을 동반하여 태평양 연안 모든 국가에 영향을 미쳤다. 두 번째로 큰 지진은 1964년 알래스카에서 발생한 지진으로 M9.2이며, 역시 지진해일이 발생하였다. 3위는 2004년 인도네시아 수마트라에서 발생한 M9.1 지진, 4위는 2011년 동일본 지진으로 M9.0이다. 이상의 지진은 지각판 경계인 섭입대에서 발생하여 지진해일을 동반하였으며, 주로 알래스카에서 일본으로 이어지는 섭입대에서 7회, 칠레에서 페루로 이어지는 해안에 나란한 섭입대에서 4회의 지진해일이 발생하여 우리나라에 영향을 미칠 가능성이 높은 지역으로 판단된다. 반면 인도네시아 인접 해역에서 발생한 4회의 지진해일은 섬에 가로 막혀 우리나라에 영향을 미치지 않는다. 이상의 결과로 부터 우리나라에 영향을 미칠 수 있는

Fig. 8. Underwater Earthquakes Greater than M8.5 that Generated Tsunami since 1900 (Red Circle: Tsunami Source Area, Yellow Line: Subduction Belt, Gray Line: Divergence Belt, Brown Arrow: Direction of Ocean Plate Movement)

지진해일의 발생원은 환태평양 지진대로 국한되며, 발생원이 우리나라에서 멀어질수록 그 영향이 작아지며, 발생원 위치 변화에도 크게 민감하지 않으므로 멀리 떨어진 지역에 대해서는 규모가 큰 지진만을 고려하고, 발생원 위치 또한 대표적인 소수의 지역으로 국한시킬 수 있다. 대신 우리나라에 가까운 해역에 대해서는 다양한 지진규모와 발생원 위치를 고려하는 것이 필요하다.

Fig. 9는 일본 주변 해역에서 AD600년 이후 발생했던 모든 지진해일의 파원역을 보여주는 바, 일본 열도의 태평양 쪽 섭입대에서 주로 발생하였고, 우리나라 동해의 동연을 따라서도 규모는 상대적으로 작지만 지진해일이 발생하고 있다(Tsuji, 2011). 태평양 쪽 섭입대를 따라 발생하는 지진해일은 주된 에너지 전달 방향이 태평양을 향하고 있어 우리나라 해안으로의 영향은 미약하다. 반면 우리나라 동해에서 발생하는 지진해일은 주된 에너지 전달 방향이 우리나라 동해안을 향하고 있어 우리나라에 미치는 영향은 상대적으로 더 크다.

2011년 동일본 지진해일의 경우를 살펴보면 지진규모가 M9.0으로 세계 계기지진 역사상 4번째로 큰 지진이었고, 환태평양 지진대 중에서 우리나라에 상대적으로 가까운 곳(Fig. 10의 AREA4)에서 발생하였음에도 우리나라 남해안에서 0.3m 이하의 해일고를 기록한 점을 고려하면 우리나라 해안지역에서의 상세 범람해석을 수행할 필요성이 있는 지진대는 Fig. 10에 보인 바와 같이 AREA1으로 표시된 동해의 동연지역, AREA2로 표시된 일본 류큐 열도 부근 해역, 그리고 AREA3으로 표시된 일본 남부 해

역으로 국한된다. 이 3개의 해역 중에서 동해의 AREA1 해역에 대해서는 전술한 바와 같이 전파도와 침수예상도를 순차적으로 작성하는 등 예경보 체계를 구축 중에 있으며, AREA2와 AREA3 해역에 대해서도 AREA1에 적용되는 방식으로 예경보 시스템을 구축할 필요가 있다. 그 외의 환태평양 지진대에 대해서는 최대 지진 규모에 대한 우리나라에의 도달시간과 전파양상만을 파악할 수 있는 정도이면 충분할 것으로 판단된다.

이상의 결과를 종합하여 보면 Fig. 11에 보인 바와 같이

Fig. 10. Potential Source Areas of Significant Tsunamis Affecting the Coastal Area of Korea

Fig. 9. Source Areas of Tsunamis Occurred Off the Coast of Japan (Tsuji, 2011)

Fig. 11. Potential Source Areas for the Construction of Distant Tsunami Forecast System

우리나라에 유의한 수준의 영향을 줄 것으로 판단되는 적색 타원으로 표시한 류큐열도 섭입대(Fig. 10의 AREA2)와 일본 남부 섭입대(Fig. 10의 AREA3)에 대해서는 동해의 동연(Fig. 10의 AREA1)에서와 같이 발생원의 위치와 지진규모를 세분화하고, 노란색 선으로 표시한 그 밖의 환태평양 섭입대에 대해서는 등간격으로 나누어 발생원을 정하고 가능 최대 지진을 비롯한 대표적인 규모 몇 개만을 상정하여 미리 전파도를 작성하여 두는 광역 예보체계를 구축하는 것이 바람직하다. 상세역 예보 구축은 해안의 주요 지역별로 광역예보에서 설정한 발생원 위치와 지진규모에 대해 범람계산을 실시해야 하는 바, 상세역 예보체계 구축 시 우리나라 전체에 대한 광역 예보체계가 자동적으로 산출된다.

3.2 광역 예경보 체계 구축 예

Fig. 12는 환태평양 섭입대의 동일본 해역에 지진규모 M9.0의 가상 지진에 의해 유발되는 지진해일에 대한 최대해일고 분포와 예상 도달시간을 보여준다. 가상지진의 단층 파라미터는 단층길이 380 km, 단층폭 90 km, 단층면 위 23 m, 상연깊이 10 km, slip angle 90°, dip angle 14°로 설정하여 Mansinha and Smylie (1971) 단층모형을 이용하였고, 해일전파 수치모형은 Yoon et al. (2007)과 Lim et al. (2007)의 분산보정 유한차분 모형을 사용하였다. 동일본 해역에서 발생한 지진해일은 태평양을 건너 미국 캘리포니아 해안과 칠레 해안까지 도달하고 있으며, 특히 해

저 지형의 영향으로 주된 에너지가 칠레 해안으로 집중되고 있는 형상을 보여준다. 또한 예상도달시간은 하와이가 7.5시간, 칠레해안이 22시간에 달한다. 이 지진해일의 태평양 전파과정을 3분 격자를 이용하여 수치모의하는 데 인텔 3.4GHz CPU를 장착한 개인용 컴퓨터에서 약 6시간이 소요되었다. Fig. 13은 PTWC에서 2011년 동일본 지진해일이 발생한 직후 자체적인 수치계산을 수행하여 1차 광역 예보를 위해 작성한 최대해일고 및 예상도달시간을 나타낸 전파도로서 Fig. 12의 계산 예와 거의 동일한 최대해일고 및 도달시간 분포를 보여주고 있다.

PTWC에서 2011년 동일본 지진해일 당시 작성했던 전파도 자체를 각국에 통보해 주었다면 우리나라에서도 어느 정도의 정량적인 예보가 가능했었으나, Fig. 14에 보인 바와 같이 PTWC에서 태평양 연안 국가에 통보한 첫 번째 통보문(PTWC, 2011)과 이 논문에 보이지는 않았으나 다음날까지 총 27회에 걸친 문장(text)형식의 통보문에서 우리나라는 언급되어 있지 않아 그저 영향이 미미할 것으로 추측할 수 있었을 뿐이다. 반면 타이완은 첫 번째 통보문에서부터 도달예상시간이 제시되어 있어 정량적 예보에 근접한 예보가 가능했을 수도 있다. Fig. 13에 보인 PTWC의 전파도는 지진해일 발생 이후 상당한 시일이 경과한 다음 국제지진해일정보센터(ITIC: International Tsunami Information Center)의 Web site (ITIC, 2011)에 게시되었으며, 지진해일 전파 도중에는 실시간으로 공개되지 않는 것으로 보인다.

(a) Maximum Tsunami Height

(b) Arrival Time

Fig. 12. Propagation Map for Tsunami due to M9.0 Potential Earthquake Off the East Coast of Japan

(a) Maximum Tsunami Height

(b) Arrival Time

Fig. 13. Propagation Map Constructed by PTWC for 2011 East Japan Tsunami

WEPA40 PHEB 110555
 TSUPAC
 TSUNAMI BULLETIN NUMBER 001
 PACIFIC TSUNAMI WARNING CENTER/NOAA/NWS
 ISSUED AT 0555Z 11 MAR 2011 ----- 중략 -----
 A TSUNAMI WARNING IS IN EFFECT FOR
 JAPAN / RUSSIA / MARCUS IS. / N. MARIANAS
 A TSUNAMI WATCH IS IN EFFECT FOR
 GUAM / WAKE IS. / TAIWAN / YAP / PHILIPPINES / MARSHALL IS. /
 ----- 중략 -----
 AN EARTHQUAKE HAS OCCURRED WITH THESE PRELIMINARY
 PARAMETERS REPORTED BY THE JAPAN METEOROLOGICAL AGENCY.
 ORIGIN TIME - 0546Z 11 MAR 2011
 COORDINATES - 38.0 NORTH 142.9 EAST
 DEPTH - 10 KM
 LOCATION - NEAR EAST COAST OF HONSHU JAPAN
 MAGNITUDE - 7.9 ----- 중략 -----
 ESTIMATED INITIAL TSUNAMI WAVE ARRIVAL TIMES AT FORECAST
 POINTS WITHIN THE WARNING AND WATCH AREAS ARE GIVEN
 BELOW. ----- 중략 -----

LOCATION	FORECAST POINT	COORDINATES	ARRIVAL TIME
JAPAN	KATSUURA	35.1N 140.3E	0635Z 11 MAR
	OKINAWA	26.2N 127.8E	0912Z 11 MAR
----- 중략 -----			
RUSSIA	URUP IS	46.1N 150.5E	0714Z 11 MAR
----- 중략 -----			
TAIWAN	HUALIEN	24.0N 121.7E	0932Z 11 MAR
	HUALIEN	24.0N 121.6E	0933Z 11 MAR
	TAITUNG	22.7N 121.2E	0936Z 11 MAR
	CHILUNG	25.2N 121.8E	1004Z 11 MAR

----- 후략 -----

Fig. 14. First Warning Issued by PTWC for 2011 East Japan Tsunami (time: UTC)

만약 우리나라에서 원지 지진해일 예보체계를 미리 구축해 두었다면 2011 동일본 지진해일시 PTWC에서 첫 번째 통보문을 접수하고 즉시 Fig. 12와 같은 전파도를 DB에서 꺼내 전반적인 상황 파악과 함께 우리나라 해안

Fig. 15. Maximum Tsunami Height and Arrival Time of 2011 East Japan Tsunami

에서의 정량적인 광역예보가 가능했을 것이다. Fig. 15는 Fig. 12의 전파도에서 우리나라 해역을 확대하여 최대해일고와 도달시간을 겹쳐 작성한 것으로 좀 더 상세한 예보를 하는 데 도움이 될 수 있다. 이렇게 광역예보를 하더라도 우리나라 해안의 특정 지점(예를 들어 마산항, 부산항, 여수항 등)에 대한 대피계획 등 방재대책 수립을 위한 상세역 예보체계는 각 지점의 범람해석을 통해서만 가능하다.

4. 결 론

본 연구에서는 우리나라 실정에 부합되는 실용적인 원지 지진해일 예경보 체계 구축을 위해 미국과 우리나라의 지진해일 예경보 체계 현황을 파악하고, 2011년 동일본 지진해일 당시의 대처상황을 분석하였다. 미국의 경우 지진감시망, 전용 컴퓨터와 통신망 등의 하드웨어와 함께, 수집된 지진자료로부터 지진해일 발생가능성을 판단하고 지진해일 전파 수치모의를 수행하며, 그 결과를 분석하여 위험 예상지역에 신속히 통보하는 전 과정을 자동화하고, 다음 과정으로의 진행을 판단하고 결정하는 전문가가 24시간 교대로 대기한다. 또한 지진해일의 실제 발생 여부를 확인하고 임시적으로 통보한 1차 광역예보의 정밀도를 높이기 위해 해양 관측망을 운영하여 지진해일을 실시간으로 감지하고 해일 전파도중 수치로 예보를 수정하여 통보한다. 우리나라에서 이 모든 시스템을 일시에 갖추기에는 아직 부족한 점이 많으므로 최소한의 시설과 인력으로 효율적인 예경보 체계를 구축할 필요성이 있다. 이를 위해 동해안에 구축 중인 지진해일 예경보 체계와 유사한 개념의 예경보 체계를 제안하였다. 이 개념은 지진규모와 진원 위치 정보만으로도 예보의 정확도를 높이고 광역예보와 상세예보를 겸하는 것으로서 우리나라 해안 지역에 영향을 미칠 가능성이 있는 원지 지진해일에 대해 발생원 위치 및 지진규모 별로 미리 전파과정을 수치모의하여 DB화 해두는 방법이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 지원 첨단항만건설기술개발사업(과제명: 항만권역 태풍 및 지진해일 재해대응체계 구축)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

국립방재연구소 (2000). 동해안에서의 지진해일 재해저감을 위한 연구 II (11-1310148-000053-01). 행정자치부 국립방재연구소.

기상청 (2011). 보도자료(2011년 3월 11일). 입수가능웹사이트: 기상청(<http://www.kma.go.kr>)> 행정과정책> 보도자료, 웹사이트접속일 2012. 2. 19.

소방방재청 (2009) 지진해일 재해저감기술 개발(NEMA-06-NH-06). 소방방재청.

ITIC (2011). Energy and Max wave amplitudes and Max wave amplitudes by country. Available at: International Tsunami Information Center(<http://itic.ioc-unesco.org>)> Technical Info> List of Tsunamis> Tsunamis 2010-pres> 2011 Tsunamis> 11 March 2011, MW 9.0, Near the East Coast of Honshu Japan Tsunami> 2) Sea Level> RIFT tsunami forecast during event, M9.1 (PTWC), Accessed 19 Feb., 2012.

Lim, C.H., Bae, J.S., Jeon, Y.J., and Yoon, S.B. (2007). Grid nesting for dispersion-correction finite difference model for tsunami simulation. *Proceedings of 32nd Congress of the International Association of Hydraulic Engineering and Research*, Venice, Italy.

Mansinha, L., and Smylie, D.E. (1971). "The displacement fields of inclined faults." *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, Vol. 61, No. 5, pp. 1433-1440.

PTWC (2011). Pacific.2011.03.11.055508. Available at: Pacific Tsunami Warning Center (<http://ptwc.weather.gov>)> Pacific Ocean> Pacific Ocean message archive, Accessed 19 Feb., 2012.

Tsuji, Y. (2011). Damage of the tsunami of the East Japan Earthquake of March 11th, 2011 along the coasts of the Kanto and Tohoku Districts. *Annual Conf of Korean Assoc. of Ocean Science and Technology Societies*, Busan, Korea.

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*, CGU, Vol. 18, No. 1, pp. 31-53.

논문번호: 12-064	접수: 2012.06.15
수정일자: 2012.07.02/07.09	심사완료: 2012.07.09