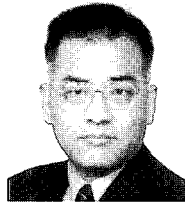


지진해일과 연안방재



조 용 식 | 한양대학교 토목공학과 교수

1. 서론

2004년 12월 26일 서아시아 수마트라 근해에서 발생한 지진해일(tsunami)에 관한 이해를 돕고자 지진해일의 특성과 최근 태평양 연안 등에서 빈번히 발생하는 지진해일의 특성, 발생 현황 및 지진해일 경방재대책 등에 관해 서술한다.

지진해일은 지진에 의해 발생된 파랑이 항구에 진입한 후 공명(resonance)에 의해 파고가 매우 커지는 현상을 묘사하기 위해 항구를 의미하는 津(나루진)과 파랑을 의미하는 波(물결 파)의 합성어인 津波(진파)에서 유래한 것이다. 현재 많은 나라에서 津波의 일본식 발음인 tsunami(“tsoo-nahmee”로 발음한다)를 공용어로 사용하고 있으며, 국내에서는 지진에 의해 발생하는 해일을 의미하는 지진해일(地震海溢)을 사용하고 있다.

일반적으로, 대규모 지진해일은 주로 해저지진에 의해 발생하나, 해저붕괴, 해저화산분출 또는 해저핵 실험 등에 의해서도 지진해일이 발생한다. 그러나, 해저지진을 제외한 다른 원인에 의해 생성된 지진해일은 일반적으로 국부적인 영향만을 일으키므로 본 글에서의 지진해일은 해저지진에 의해 발생하는 것으

로 국한한다. 참고로, 국내에서 상영되었던 외국영화 “Deep Impact”는 운석에 의해서도 지진해일이 발생할 수 있음을 보여주고 있다.

해저지진에 의한 갑작스러운 해저지형의 융기 또는 침강은 순간적으로 수면변화를 일으키며, 이 때 엄청난 양의 위치에너지가 생성된다. 생성된 위치에너지는 중력에 의해 운동에너지로 변화되어 장파의 형태로 모든 방향으로 진행하게 되는데 이것이 초기 단계의 지진해일이다. 지진해일의 파장은 지원지의 규모에 비례하며, 그 크기는 대략 50~1,000km에 이르며, 대양에서 지진해일은 선형장파(linear long wave)의 이동속도, 즉 $[gh]^{1/2}$ (여기서, g 는 중력가속도, h 는 수심을 나타낸다)로 전파하는데 평균수심이 약 4,000m인 태평양에서의 이동속도는 대략 720km/hr에 이른다. 그러나, 전형적인 지진해일의 파고는 2~4m에 불과해 태평양이나 동해와 같은 대양에서 지진해일을 직접 관측하는 것은 거의 불가능하다. 지진해일은 진행속도가 매우 빠르고 파장이 길기 때문에 파형의 큰 변화없이 먼 거리를 진행할 수 있으므로, 태평양이나 인도양과 같은 대양에서 지진해일이 발생하게 되면 주변 지역은 물론 멀리 떨어진 지역에서도 피해를 입을 수 있다(Cho, 1995).

지진해일이 대양으로부터 수심이 상대적으로 얇은 해안선 근처에 도달하면 에너지 보존 법칙에 따른 천수효과(shoaling effects)에 의해 파장과 이동속도는 감소하는 반면에 파고는 급격히 증가하기 때문에 대규모 범람을 일으켜 엄청난 인명 및 재산피해를 초래할 수 있다. 지진해일은 수심이 상대적으로 얇은 해안부근으로 접근하면 천수효과, $H = H_0[h_0/h]^m$ (여기서 H 와 h 는 얇은 바다에서의 파고와 수심, H_0 와 h_0 는 깊은 바다에서의 파고와 수심을 나타낸다)에 따라 파고가 엄청나게 커진다. 따라서, 해안지역에 도달하면 대규모 범람으로 인해 인명 및 재산피해를 초래할 수 있다.

2. 지진해일 발생 및 연구현황

현재까지 기록된 가장 오래된 지진해일은 기원전 2,000년경에 지중해의 시리아 근해에서 발생한 것이며(Lander와 Lockridge, 1989), 우리나라는 조선왕조실록에 지진해일에 관한 기록이 남아있다. 2004년 서아시아 수마트라(Sumatra) 지진해일이 발생하기 전까지 기록된 지진해일중에서 가장 규모가 큰 것은 1960년 칠레해안으로부터 100km 정도 떨어진 태평양에서 발생한 해저지진에 의해 야기된 지진해일이다. 지진해일은 발생 후 약 15시간이 지난 다음 하와이섬을 강타하였으며, 약 24시간에 걸쳐 태평양을 횡단한 후 일본의 태평양 연안을 엄습하였다. 지진해일은 칠레연안에서 1,000여명 이상의 인명피해와 약 4억 달러의 재산피해를, 하와이의 힐로(Hilo)항에서는 61명의 인명피해와 2,400만 달러의 재산피해를 초래하였으며, 일본에서는 139명의 인명피해와 3,000여 채의 가옥 및 2,000

여 척의 어선을 파손시키는 등 엄청난 규모의 피해를 입혔다. 그림 1은 지진해일 태평양 전역에 영향을 끼치면서 전파하는 과정을 저자가 박사과정으로 재학할 당시 코넬(Cornell)대학교 슈퍼컴퓨터를 이용하여 천수이론에 근거한 수치모형으로 수치해석한 결과의 일부를 것을 동영상화한 것이다. 그림은 지진해일 발생 후 15시간이 경과한 것으로 비록 파고는 매우 작을지라도 태평양 전역이 지진해일의 영향권에 들어 있음을 알 수 있다.

1900년 이후에 우리나라에 직접적인 영향을 끼친 지진해일은 표 1에 열거한 것과 같이 대략 6건이다. 특히, 1983년 5월 26일 발생한 동해 중부 지진해일의 경우는 지진해일이 동해안 전역을 엄습하여 임원항과 묵호항 및 여러 지역에서 3명의 인명피해(사망 1명, 실종 2명)와 재산피해 약 4억원을 초래하였다. 또한, 2004년 12월 26일 발생한 서아시아 수마트라 지진해일의 경우 비록 한반도 부근에서 발생한 것은 아니나 주변국가를 관광중이던 우리나라 국민 20명이 사망 또는 실종되어 가장 많은 인명피해를 발생시킨 지진해일로 기록되었다.

표 2는 1990년 이후에 발생한 비교적 규모가 큰 지진해일은 열거한 것으로 대부분이 태평양 연안을

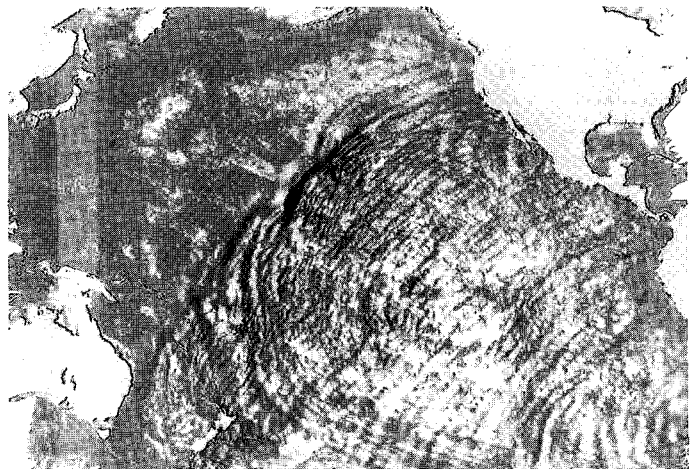


그림 1. 1960년 칠레 지진해일의 전파과정(발생 후 약 15시간 경과)

표 1. 우리나라에 영향을 끼친 지진해일 현황(1900년 이후)

발생일시	지진 발생지점	지진해일 높이	정부대응	피해지역	인명피해	재산피해
1940년 8월 2일	일본 북해도 외해 (규모 7.5)	약 2m	-	삼척, 울진, 울릉도 등 동해지역	없음	가옥피해 56동, 어선 피해 6척
1964년 6월 16일	일본 니이가타 외해 (규모 7.5)	부산 0.32m, 울산 0.39m	-	없음	없음	없음
1983년 5월 26일	일본 아카다현 외해 (규모 7.7)	울릉도 0.8-1.3m, 목호 1.5-2m, 속초 1.23-1.56m, 포항 0.52-0.62m	-	울릉도, 삼척, 울진, 동해지역	4명 (사망 + 실종)	가옥피해 44동 어선피해 81척 (피해액 3억 7천만원)
1993년 7월 12일	일본 북해도 오쿠시리섬 외해 (규모 7.7)	울릉도 0.89-1.19m, 속초 1.3-2.03m, 동해 2.13-2.76m, 포항 0.76-0.92m	지진해일 특보발표	울릉도, 삼척, 동해지역	없음 (빠른 사전대 응이 있었음)	어선피해 35척 어망 3,000여통 (피해액 3억 9천만원)
1996년 2월 17일	인도네시아 비아크섬 근해 (규모 8.2)	-	지진해일 주의보 발령 (남해안)	없음	없음	없음
2004년 12월 26일	인도네시아 수마트라 근해 (규모 9.0)	-	-	-	20명, (사망 + 실종)	-

표 2. 대규모 지진해일 발생 현황(1990년 이후)

No	위치	발생일	지진규모	최오름높이(m)	인명피해 (사망+실종)
1	Nicaragua	Sep. 02, 1992	7.2	10.0	116
2	Flores Island, Indonesia	Dec. 12, 1992	7.5	26.0	2,200
3	Hokkaido, Japan	Jul. 12, 1993	7.6	30.0	239
4	East Java, Indonesia	Jun. 02, 1994	7.2	14.0	220
5	Mindoro Island, Philippines	Nov. 11, 1994	7.1	7.0	70
6	Jalisco, Mexico	Oct. 09, 1995	7.6	5.0	40
7	Palu, Indonesia	Jan. 01, 1996	7.8	4.0	24
8	Blak, Indonesia	Feb. 17, 1996	8.2	8.0	53
9	Papua New Guinea	Jun. 17, 1998	7.1	15.0	2,183
10	Morocco	Feb. 23, 2000	6.4	-	628
11	El Salvador	Jan. 14, 2001	7.6	-	844
12	Peru	Jul. 23, 2001	8.4	7.0	74
13	Papua New Guinea	Sep. 09, 2002	7.8	5.0	2,100
14	Sumatra Island, Indonesia	Dep. 26, 2004	9.0	15.0	280,000

따라 발생하고 있으며, 동해와 지중해 그리고 인도양에서도 지진해일이 발생하고 있음을 알 수 있다. 표에 나타난 것과 같이 2004년 수마트라 지진해일은 역사상 가장 많은 인명피해와 재산피해를 초래한 지진해일로 기록되었다.

지진해일에 관한 연구는 일본과 미국은 물론 러시아를 비롯한 태평양 연안에 인접한 여러 국가와 지중해 연안 국가 등에서 비교적 활발한 연구활동을 하고 있다. 우리나라에서 지진해일에 관한 연구는 1983년 5월 동해 일본 중부 지진해일이 동해안 전역을 내습하여 임원항, 묵호항 및 울진 원자력발전소(당시 부지정지 공사중이었음) 일대에 인명피해와 재산피해를 초래하기 전까지는 전무한 상태이다. 1983년 당시 일본의 방재연구소에서는 전문가를 우리나라에 보내 우리나라 소수의 학자들의 도움으로 보고서를 작성하였으나 우리나라의 독자적인 보고서는 없었다. 1993년 홋카이도 남서 외해 지진해일 당시 한국해양과학기술학회에서는 해운항만청의 지원으로 일부 지역의 범람피해와 처오름높이를 현장조사하였다.

국내에서 지진해일에 관한 연구는 아직은 수치모형을 이용하여 기존의 지진해일을 재현하는 수준에 머물러 있으며, 지진해일의 전파 및 처오름과 관련된 여러 물리적 현상을 이론적 또는 실험적으로 규명하기 위한 본격적인 연구는 매우 저조한 실정이다. 다만, 최근의 국내 연구수준은 이론적인 연구분야에서는 미국과 일본을 따라가고 있는 수준에 이르고 있으며, 한양대학교와 성균관대학교 등에서 비교적 활발한 연구활동을 하고 있다.

지진해일 피해를 빈번히 받고 있는 일본에서는 칠레 지진해일로 139명의 인명피해를 낸 1960년도부터 지진해일의 연구가 본격화되었으며, 정부의 재해방재 연구소 및 대학에서 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 도호쿠(Tohoku)대학교에는 지진해일의 발생, 전파 및 처오름 등의 현상을 해석하고, 감지체제와 예경보시스템을 종합적으로 연구하고 있다.

미국은 태평양 중심에 하와이주가 위치하고 있어 환태평양 지진대에서 발생하는 거의 모든 지진해일의 영향권에 들어 일찍부터 지진해일에 대한 연구가 코넬대학교를 비롯한 태평양 연안의 여러 대학, 미국 육군 공병단 해안공학연구소(Coastal Engineering Research Center) 및 해양대기국(National Oceanic and Atmospheric Administration) 등을 중심으로 다양한 수치모형을 이용한 수치해석과 수리모형실험 등을 이용하여 활발히 진행중이다(Cho, 1995; Cho 등, 2004).

3. 지진해일 방재대책

최근 우리나라 주변에 자주 발생하고 있는 지진해일로부터 인명과 재산 피해를 최소화하기 위한 수단으로 수치모형을 이용하여 지진해일의 거동을 해석하고 이로 인한 연안지역에서의 인명 및 재산피해를 최소화하기 위한 수단을 강구한다.

지진해일을 연구할 때 일반적으로 지진해일의 진행거리에 따라 원해 지진해일(offshore tsunami)과 근해 지진해일(nearshore tsunami)로 구분하여 해석한다. 즉, 지배방정식과 특성뿐만 아니라 해석방법 등이 지진해일의 진행거리에 따라 다를 수 있다. 즉, 원해 지진해일은 선형 Boussinesq 방정식과 비선형 천수방정식을 조합하여 해석하는 반면에, 근해 지진해일은 비선형 천수방정식만으로 해석한다(Cho와 Yoon, 1998; Cho와 Liu, 1999).

따라서, 방재대책도 두 해일의 특성을 고려하여 수립하는 것이 바람직하다. 근해 지진해일은 해안선에서 비교적 가까운 거리에서 발생하여 발생 후 10분 이내에 도달하므로 지진해일 경보시스템을 갖추고 있더라도 인명피해를 줄이는 것이 쉽지 않다. 예를 들어, 1993년 홋카이도 북서 외해 지진해일의 경우, 일본 기상청에서는 지진해일 발생 후 5분만에 진원지에서 약 80km 떨어진 오쿠시리(Okushiri)섬을 비롯한 일본

전역에 지진해일 경보를 발령하였으나, 지진해일은 발생 후 약 4분만에 오쿠시리섬을 급습하여 239명의 사람이 사망하였으며, 약 6억 달러의 재산피해를 야기시켰다. 또한, 1998년 6월 17일 파푸아 뉴 기니아 북쪽에 위치한 조그만 어촌인 아이타페(Aitape)로부터 약 30km 떨어진 태평양에서 발생한 지진해일은 발생 후 7분만에 아이타페와 주변지역을 엄습하여 최소한 2,183여명의 주민이 목숨을 잃었거나 실종되었을 뿐만 아니라, 대부분의 가옥들이 파괴되었으며, 관측된 지진해일의 최대 초음높이는 약 15m인 것으로 보고되었다. 2004년 12월 26일 발생한 서아시아 수마트라 지진해일의 경우, 가장 많은 인명피해 및 재산피해가 발생한 지역은 진원지에서 약 65km 떨어진 인도네시아의 아체(Aceh)지역이다. 인도네시아 경우 물론 지진해일 경보시스템이 구축되어 있지도 않았지만, 만일 경보시스템이 있었다면 지진해일 발생 후 수 분만에 지진해일이 도달했기 때문에 대피할 충분한 시간적 여유가 없었기 때문에 인명피해가 더욱 컸다.

반면에, 1993년 홋카이도 남서 외해 지진해일의 경우 비교적 먼 거리에 위치한 우리나라는 지진해일 발생 후 대략 100-120분 정도의 대피시간을 가질 수 있어 인명피해를 최소화할 수 있었다. 2004년 서아시아 수마트라 지진해일의 경우, 진원지 부근에 위치한 인도네시아와는 달리 태국, 인도, 스리랑카 및 아프리카 인도양 인접국들은 지진해일이 도달하기까지 충분히 대피할 시간을 있었으나 경보시스템이 구축되지 않았던 까닭에 엄청난 인명피해가 발생한 것이다.

그림 2는 1983년 동해 중부 지진해일이 일본 근해에서 발생한 후 동해를 가로질러 우리나라 동해안으로 전파해가는 과정을 선형이론에 근거한 수치모형을 이용하여 해석한 것으로 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 최

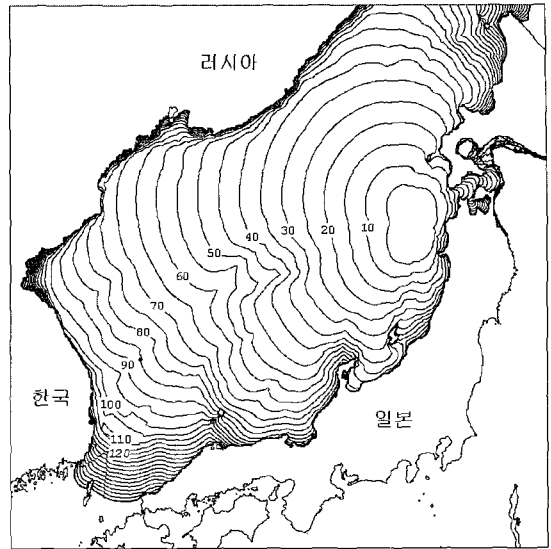


그림 2. 1983년 동해 중부 지진해일의 전파시간(단위 : 분)

소화하는 것이 가능하다.

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

그림 3에 나타난 것과 같이 한반도 근해에서는 2000년 10회, 2001년 16회, 2002년 21회, 2003년 21회 및 2004년 24회 등 2000년 이후 92회의 해저 지진이 발생하였으며, 지진발생 회수가 매년 증가하고 있다.

끝으로, 그림 4는 1960년 발생한 칠레 지진해일에 의한 하와이 힐로항에서의 범람구역을 천수이론에 근거한 수치모형을 이용하여 예측한 것이다. 진원지와 힐로항과의 거리는 약 10,000km이며, 지진해일은 발생 후 약 15시간이 지난 후 하와이섬을 강타하였다.

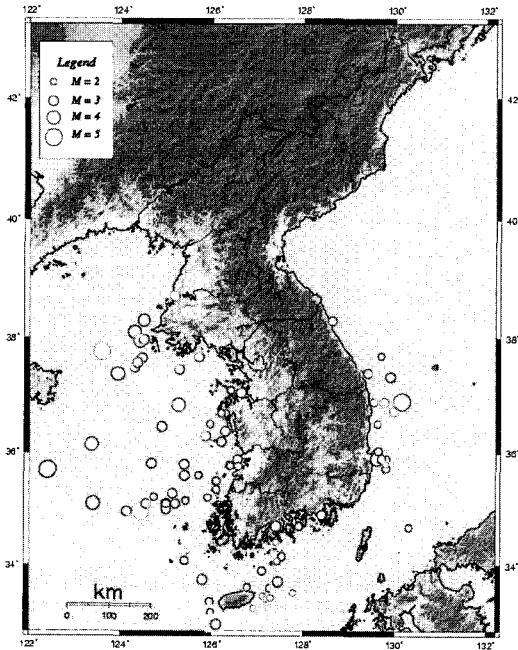


그림 3. 2000년 이후 우리나라 주변에서 발생한 해저 지진 현황

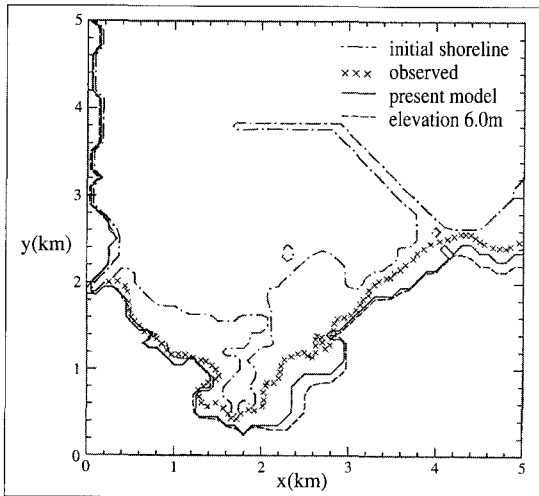


그림 4. 하와이 힐로항에서의 지진해일 범람구역 (1960년 칠레 지진해일)

그림에서 수치모형으로 예측한 범람구역(present model)은 현장 관측자료(observed) 및 미국 해양대기국에서 보고한 6m 등고선과 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다(Lander와 Lockridge, 1989).

지진해일에 의한 재해는 일단 발생하면 인명피해는 물론이며 막대한 재산피해를 동반하므로 재해가 발생하기 전에 예방하는 것이 최선이기는 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.

지진해일 최대 처오름높이와 최저 처내림높이는 모든 해안구조물의 천단고와 원자력발전소의 안전성 및 취수구 구조물 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 지진 공백역의 지진해일에 대한 모든 연안구조물과 원자력발전소의 안전성에 대한 검토가 요구된다.

4. 결론

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 국내에서도 보다 활발하고 다양한 연구가 진행되어야 한다.

지진해일에 의한 피해를 예방하는 가장 경제적이면서 효과적인 방법은 지진해일에 의한 피해가 예상되는 해안선을 따라 그림 4와 같은 예상범람구역을 설정하여 이를 토대로 경보체계를 구축한 후, 실제 지진해일의 엄습이 예상될 때 범람구역으로부터 재빨리 주민을 대피시키는 것이다. 신뢰할만하고 현실적인

예상범람구역을 설정하기 위해서는 적절한 지배방정식과 경계조건을 수치모형을 이용하여 해석한 후 해안선을 따라 지진해일의 최대 처오름높이를 결정하여 이를 예상범람구역으로 설정하는 것이 가장 바람직하다. 아울러, 방파제, 항만시설 및 원자력 발전소 등과 같은 연안 시설물을 설계할 때는 지진해일의 영향을 반드시 고려해야 한다.

많은 인구밀집지역과 모든 원자력발전소와 다수의 화력발전소는 물론 모든 항만 및 어항과 같은 국가기간시설물이 연안에 위치한 우리나라는 지진해일에 관한 정부차원의 체계적이며 종합적인 연구와 이를 근거로 한 방재대책이 절실히 요구된다. 우리나라의 태풍뿐만 아니라 지진해일에 대한 사전대비 정책은 거의 없으며, 자연재해에 대비한 정책은 주로 사건발생 후 복구에 주력하고 사전 예방에 대해서는 거의 투자를 하지 않고 있는 실정이다.

끝으로, 2004년 서아시아 수마트라 지진해일의 경우 정부에서는 약 5천만 달러의 구호금과 구호품을 물론 여러 민간단체에서도 많은 구호금과 구호품을 보내고 있다. 그러나, 안타까운 것은 정부 차원의 합동조사단을 파견하지 않고 있다는 것이다. 엄청난 인명 및 재산피해를 일으킨 자연재해는 역설적으로 엄청난 과학적 사실과 정보를 제공한다. 정부 차원에서 전문가를 포함한 조사단을 인도네시아, 태국 및 스리랑카 등에 파견하여 이와 유사한 자연재해가 우리나라에 발생했을 경우 어떻게 대처할 것인가를 조사하고 아울러, 인명피해와 재산피해를 최소화하기 위한 방법을 강구해야 할 것이다.

지진해일의 최근 국내외 연구동향과 관련 논문 및 다양한 참고자료는 저자의 인터넷 홈페이지 (<http://www.civil.hanyang.ac.kr./coast/>)를 참조할 수 있다.

참고문헌

1. Cho, Y.-S., 1995. Numerical Simulations of Tsunami Propagation and Run-up, Ph.D. Thesis, Cornell University, U.S.A.
2. 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.
3. Cho, Y.-S., Park, K.-Y. and Lin, T.-H., 2004. Run-up heights of nearshore tsunami based on quadtree grid system, Ocean Engineering, Vol. 31, pp. 1093-1109.
4. Cho, Y.-S. and Yoon, S.B., 1998. A modified leap-frog scheme for linear shallow-water equations, Coastal Engineering Journal, Vol. 40, pp. 191-205.
5. Lander, J.F. and Lockridge, P.A., 1989. United States Tsunamis, U.S. Department of Commerce.