



2000년 이후 우리 근해 지진해일 92회 발생

한반도 지진해일 경보체계 시급하다

폐허로 변한 바다 아체의 거리

연합포토

지진해일은 지진에 의해 발생된 파랑이 항구에 진입한 후 공명(resonance)에 의해 파고가 매우 커지는 현상을 묘사하기 위해 항구를 의미하는 津(나루 진)과 파랑을 의미하는 波(물결 파)의 합성어인 진파(津波)에서 유래한 것이다. 현재 많은 나라에서 진파의 일본식 발음인 쓰나미(tsunami)를 공용어로 사용하고 있으며, 국내에서는 지진에 의해 발생하는 해일을 의미하는 ‘지진해일’을 사용하고 있다.

갑작스런 해저 용기·침강으로 발생 ·· 최고 파고 15~20m

일반적으로 대규모 지진해일은 주로 해저지진에 의해 발생하나, 해저봉괴, 해저화산 분출 또는 해저핵실험 등에 의해서도 지진해일이 발생한다. 그러나 해저지진을 제외한다면 다른 원인에 의해 생성된 지진해일은 일반적으로 국부적인 영향만을 일으키므로 본 글에서의 지진해일은 해저지진에 의해 발생하는 것으로 국한한다. 참고로, 국내에서 상영되었던 외국영화 ‘Deep Impact’는 운석에 의해서도 지진해일이 발생할 수 있음을 보여 주고 있다. 해저지진에 의한 갑작스러운 해저지형의 용기 또는 침강은 순간적으로 수면 변화를 일으키며, 이 때 엄청난 양의 위치에너지가 생성된다. 생성된 위치에너지는 운동 에너지로 변화되어 장파의 형태로 모든 방향으로 진행하게 되는데 이것이 초기단계의 지진해일이다. 지진해일의 파장은 진원지의 규모에 비례하며, 그 크기는 대략 50~1천km에 이르고, 대양에서 지진해일은 선형장파(linear long wave)의 이동속도, 즉 $(gh)^{1/2}$ (여기서, g는 중력가속도, h는 수심을 나타낸다)로 전파하는데 평균수심이 약 4천m인 태평양에서의 이동속도는 대략 720km/h에 이른다. 그러나 전형적인 지진해일의 파고는 2~4m에 불과해 대양에서 지진해일을 직접 관측하는 것은 거의 불가능하다.

글_조용식

한양대학교 토목공학과 교수
ysc59@hanyang.ac.kr

〈표 1〉 최근 지진해일 발생 현황

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	Biak, 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	-	165,000

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 볼 수 있다.

지진해일이 대양으로부터 수심이 상대적으로 얇은 해안선 근처에 도달하면 에너지 보존 법칙에 따른 천수효과(shoaling effects)에 의해 파장과 이동속도는 감소하는 반면 파고는 급격히 증가하기 때문에 대규모 범람을 일으켜 엄청난 인명 및 재산피해를 초래할 수 있다. 지진해일은 수심이 상대적으로 얇은 해안부

근으로 접근하면 천수효과, $H=H_0(h_0/h)^{1/4}$ 에 따라 파고가 엄청나게 커진다. 따라서 해안지역에 도달하면 대규모 범람으로 인해 인명 및 재산피해를 초래하게 되는 것이다. 여기서 H와 h는 얇은 바다에서의 파고와 수심, H_0 와 h_0 는 깊은 바다에서의 파고와 수심을 나타낸다.

1960년 칠레지진해일, 15시간 후 하와이 강타

현재까지 기록된 가장 오래된 지진해일은 기원전 2000년 경에 지중해의 시리아 근해에서 발생한 것이며, 우리 나라는 조선왕조실록에 지진해일에 관한 기록이 남아있다. 2004년 서아시아 지진해일전까지 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 1천여 명 이상의 인명피해와 약 4억 달러의 재산피해를, 하와이섬의 힐로항에서는 61명의 인명피해와 2천400만 달러의 재산피해를 초래하였으며, 일본에서는 139명의 인명피해와 3천여 채의 가옥 및 2천여 척의 어선을 파손시키는 등 엄청난 규모의 피해를 냈다.

1993년 북해도 지진해일, 동해안·러시아에 피해

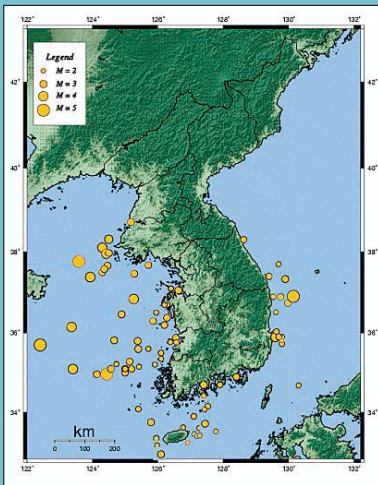
우리 나라에 직접적인 영향을 끼친 지진해일은 1983년 5월 26일에 발생한 동해 중부 지진해일과 1993년 7월 12일에 발생한 일본 홋카이도 남서 외해 지진해일이다. 1983년의 경우, 지진해일이 동해안 전역을 엄습하여 임원항과 묵호항 및 여러 지역에서 3명의 인명피해(사망 1명, 실종 2명)와 재산피해 약 4억 원을 초래하였다.

1993년 7월 12일, 일본 홋카이도 부근에서 발생한 지진해일은 진원지에서 약 80km 떨어진 동해상에 위치한 일본의 오쿠시리섬에서 239명의 인명피해와 약 6억 달러의 재산피해를 남겼고, 우리 나라 동해안과 러시아도 피해를 보았다. 우리 나라 동해안에서는 인명피해는 없었으나 약 4억 원의 재산피해가 발생하였다.

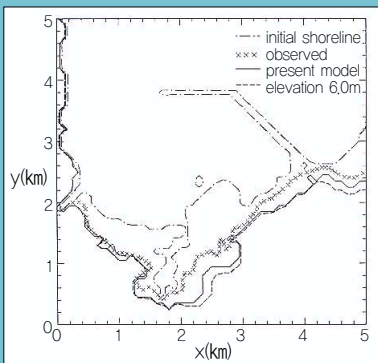
FOCUS 지진과 해일의 과학②



〈그림 1〉 1983년 동해 중부 지진해일의 전파시간(단위: 분)



〈그림 2〉 2000년 이후 우리 나라 주변에서 발생한 해저지진 현황



〈그림 3〉 하와이 힐로항에서의 예상범람구역 (1960년 칠레 지진해일)

또한, 1996년 2월 17일 인도네시아 이리안 자야지역에서 발생한 지진해일은 인도네시아에서는 161명의 인명과 많은 재산피해를 초래하였다. 지진해일로 인해 인도네시아는 물론 우리 나라의 남해안을 비롯한 일본 및 태평양의 여러 섬과 연안국가에 지진해일주의보가 발령되었다. <표 1>은 1990년 이후에 발생한 비교적 큰 지진해일을 열거한 것으로 대부분이 태평양 연안을 따라 발생하고 있으며, 동해와 지중해 그리고 인도양에서도 지진해일이 발생하고 있음을 알 수 있다.

원근해 지진해일 해석 · ‘예상 범람구역’ 설정해야

1993년 7월 12일 발생한 홋카이도 남서 외해 지진해일과 1998년 6월 17일의 파푸아 뉴기니 지진해일은 인구밀집지역에서 매우 가까운 위치에서 발생하여 많은 인명 및 재산피해를 초래하였다. 이와 같이 근해에서 발생하는 지진해일은 발생 후 대략 3~5분 이내에 해안에 이르기 때문에 예보 또는 경보를 발령하더라도 주민들이 대피할 충분한 시간이 없다. 1993년의 경우, 지진해일 발생 당시 일본 기상청에서는 지진해일 발생 후 5분 만에 진원지에서 80km 떨어진 오쿠시리섬을 비롯한 일본 전역에 지진해일 경보를 발령하였으나, 지진해일은 발생 후 약 4분 만에 오쿠시리섬을 급습하여 239명이 사망하였으며, 약 6억 달러의 재산피해를 냈다. 또한, 1998년 6월 17일 파푸아 뉴기니 북쪽에 위치한 조그만 어촌인 아이타페로부터 약 30km 떨어진 태평양에서 발생한 지진해일은 발생 후 7분 만에 아이타페와 주변지역을 엄습하여 최소한 2천183명의 주민이 목숨을 잃거나 실종되었을 뿐만 아니라, 대부분의 가옥들이 파괴되었으며, 관측된 지진해일의 최대 치오름높이는 약 15m였던 것으로 보고되었다.

2004년 12월 26일 발생한 수마트라 지진해일의 경우, 가장 많은 인명피해 및 재산피해가 발생한 지역은 진원지에서 65km 떨어진 인도네시아의 아체지역이다. 인도네시아의 경우, 물론 경보체계도 없었지만 있었다라도 지진해일 발생 후 수분 만에 지진해일이 도달했기 때문에 대피할 충분한 시간적 여유가 없었기 때문에 인명피해가 더욱 컸다. 반면에 스리랑카, 인디아 및 몰디브지역에서는 지진해일이 도달하는데 발생 후 약 120~150분 정도의 대피시간이 있었으나 경보체계 미비로 인명피해가 컸다.

지진크기 · 진행거리 따른 방재대책의 수립은 어려워

지진해일을 연구할 때 일반적으로 지진해일의 진행거리에 따라 원해 지진해일과 근해 지진해일로 구분하여 해석한다. 즉, 지배방정식과 특성뿐만 아니라 해석방법 등이 지진해일의 진행거리에 따라 다를 수 있다. 따라서 방재대책도 해일의 두 가지 특성을 고려하여 수립하는 것이 바람직하다.

우리 나라의 경우, 지진해일이 동해상의 일본 근해에서 발생하면 우리 나라까지 도달하는데 약 100~120분이 소요되므로 일본 기상청과의 공조체계를 이용하면 인명피해를 최소화할 수 있다. <그림 1>은 1983년 동해 중부 지진해일이 우리 나라 동해안에 도달하는 시간을 수치모형을 이용하여 예측한 것으로 100~120분 정도가 소요됨을 알 수 있다.

반면에 우리 나라 연안에서 지진해일이 발생했을 경우 도달시간은 수분 이내이므로

경보체계를 갖추었다더라도 대피를 하는 것이 매우 어렵다. 따라서, 지진해일에 의한 피해를 예방하는 가장 효과적인 방법은 지진해일에 의한 피해가 예상되는 해안선을 따라 예상범람구역을 설정한 후 이를 토대로 예상범람구역에는 주거 시설을 제한하여야 한다. 특히, 초등학교, 병원 및 양로원 등과 같이 대피능력이 현저히 떨어지는 어린이나 노약자 등이 이용하는 시설은 절대로 건축할 수 없도록 해야 한다.



지진 해일로 바다에서 밀려온 유람선이 태국 푸켓 파퓰비치 상가밀집지역 앞 도로까지 밀려와 있다.

쇄파·유사이송 등 자연현상 특성부터 규명해야

〈그림 2〉는 2000년부터 2004년까지 우리 나라 근해에서 발생한 해저지진을 표시한 것으로 2000년 10회, 2001년 16회, 2002년 21회, 2003년 21회 및 2004년 24회 등 2000년 이후 92회가 발생하였으며, 지진발생 수가 매년 증가하고 있다. 〈그림 3〉은 1960년 발생한 칠레 지진해일에 의한 하와이 힐로항에서의 예상범람구역을 천수이론에 근거한 수치모형을 이용하여 예측한 것이다. 진원지와 힐로항과의 거리는 약 1만km이며, 지진해일은 발생 후 약 15시간이 지나서 하와이섬을 강타하였다. 그림에서 수치모형으로 예측한 범람구역은 현장 관측자료 및 미국 해양대기국(NOAA)에서 보고한 6m 등 고선과 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

발생, 전파 및 범람과정 등을 모두 포함하는 지진해일의 거동에 관한 연구는 초기수면 변화, 쇄파(breaking), 난류생성(turbulence), 유사이송(sediment transport) 및 침오름 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 예상범람구역을 설정하여 이를 토대로 경보체계를 구축한 후, 실제 지진해일의 엄습이 예상될 때 범람구역으로부터 재빨리 주민을 대피시키는 것이다.

한반도 연안에 도시 집중, 정부차원 대책 세워야

신뢰할 만하고 현실적인 예상범람구역을 설정하기 위해서는 적절한 지배방정식과 경계조건을 수치모형을 이용하여 해석한 후 해안선을 따라 지진해일의 최대 침오름높이를 결정하여 이를 예상범람구역으로 설정하는 것이 가장 바람직하다. 아울러, 방파제, 항만 시설 및 원자력 발전소 등과 같은 연안 토목구조물을 설계할 때는 지진해일의 영향을 반드시 고려해야 한다.

많은 인구밀집지역과 모든 원자력발전소와 다수의 화력발전소는 물론 모든 항만 및 어항과 같은 국가기간시설물이 연안에 위치한 우리 나라는 지진해일에 관한 정부차원의 체계적이며 종합적인 연구와 이를 근거로 한 방재대책이 절실히 요구된다. **ST**



글쓴이는 미국 코넬대학교 대학원 토목환경공학부에서 지진해일 연구로 박사학위를 받은 후 코넬대학교 및 한국과학재단 Post-Doc 과정을 거쳤다.