

# ‘지진해일경보시스템’으로 피해 최소화한다

## 04

글\_ 우승범 인하대학교 해양과학과 교수 sbwoo@inha.ac.kr

2004년 12월 26일 오전 9시58분(우리 나라 시간)에 발생한 인도네시아 수마트라섬 북부해의 지진해일은 15만 명 이상의 목숨을 앗아갔다. 당시 발생한 지진은 리히터 규모 9.0으로 1900년 이후 다섯 번째로 큰 규모였으나, 인명피해는 사상 유례가 없을 정도의 막대한 것이었다. 지진해일의 피해는 동남아 전역에 걸쳐 발생하였으며 해일로 인한 피해가 아프리카에서도 크게 발생했다고 하니, 이번 지진해일을 금세기 최악의 자연재해라고 할 만하다. 이러한 지진해일은 어떻게 발생하며, 또 왜 이렇게 많은 인명 피해를 불러오는 것일까.

### 수직 방향의 해저지각변동이 지진해일 일으켜

지진해일의 발생 원인은 해저나 해안에서의 갑작스런 에너지 공급이다. 막대한 에너지가 해양에 급격히 가해지면 그 에너지는 파랑의 형태로 사방으로 퍼지게 된다. ‘이러한 긴 파장의 파랑을 통해 전파되던 에너지가 해안에 그대로 전달되어 막대한 피해를 입히는 것이다.

에너지의 공급원에는 해저 지각변동이나 화산폭발, 위성과의 충돌, 해안에서의 사면 붕괴 등 다양한 종류가 있다. 이 중에서도 가장 빈번히 발생하는 에너지원은 해저에서의 지각변동이다. 해저 지각변동은 3차원적인 거동이므로 같은 규모의 지진이라 할지라도 해저 지각의 변동 형태는 매우 다를 수 있다. 쓰나미를 일으킬 수 있는 가장 효과적인 형태의 해저 지각변동은 수직적인 움직임이다.

동일한 강도의 지진이 발생하더라도 쓰나미를 일으킬 수 있는 지진과 그렇지 않은 경우로 나눌 수 있다. 따라서 쓰나미의 거동을 살피기



(그림 1) 지진해일의 진앙지(2004.12.26)

위해서 무엇보다 먼저 쓰나미를 일으킬 수 있는 지진인가를 신속히 판단하는 것이 중요하다.

이렇게 에너지가 유입돼 쓰나미가 발생하고 나면 그 다음 과정은 파랑 형태로의 전파이다. 쓰나미는 장파, 즉 파장의 길이가 수심에 비해 매우 긴 파장이 되는데, 이러한 장파가 진행하는 속도는  $\sqrt{gh}$ 이다. 여기서,  $g$ 는 중력가속도,  $h$ 는 수심을 의미하며 장파의 진행속도가 오로지 수심에 따라 정해진다는 점에 주목할 필요가 있다. 수심은 이미 알고 있는 정보이므로 초기의 쓰나미 발생위치와 크기를 알면 대략 언제쯤 해안에 초기 파형이 도달할 수 있는지 알 수 있는 것이다. 평균수심이 3천800m인 해역에서 전파되는 지진해일은 약 700km/h의 속도를 가지고 진행하게 되며 이는 제트 항공기의 속도와 맞먹는다.

해양을 통해 전파되어 오던 파랑 에너지는 수심이 낮아지는 해안에서 파고를 증가시키는 형태로 변형된다. 파랑의 전파 속도를 고려해 볼 때 이러한 변형은 매우 급격히 진행되며, 따라서 해안에서 있던 사람들에게는 잔잔하던 바다에서 갑자기 짐채만한 파도가

덮치는 것으로 보인다.

그러나 이러한 쓰나미의 내습 전에 갑자기 해안에서 바닷물이 급격히 빠져나가는 '초동현상'이 흔히 목격된다. 이는 질량이 일정한 바닷물에서 쓰나미가 전파되어 오며 해양의 수면이 들어 올려지기 때문에 나타나는 현상이다. 초동현상이 발생하면 쓰나미의 내습이 곧 닥쳐올 것으로 알고 육지쪽으로 급히 대피하여야 한다. 그러나 이러한 지식이 없으면 해저 바닥이 갑자기 드러나며 생선들이 여기저기 널리게 되는 등 여러 신기한 현상들을 구경하기 하기 위해 오히려 바다 쪽으로 더 들어가게 되어 인명피해가 발생하게 된다.

**대형 쓰나미 발생빈도 급격히 높아져**

지진해일을 연구하는 많은 과학자는 최근 10여 년간 급격히 증가되고 있는 쓰나미의 발생에 주목하고 있다. 1980년대 중반에서 지금까지 수백 명의 사망자가 발생한 대형 쓰나미가 약 7~8회에 이르고 있으며, 이는 과거의 기록에 비추어 볼 때 발생 빈도와 파괴 강도에 있어 급격히 증가한 것이다.

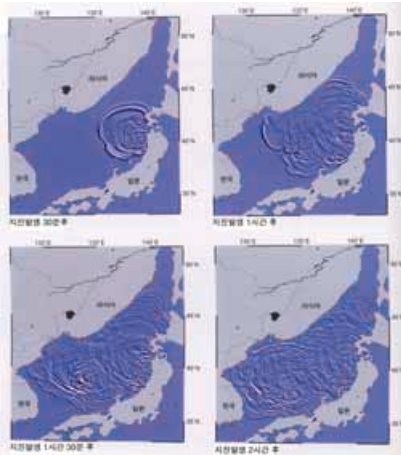
이러한 원인으로 전지구적인 환경변화를 꼽는 경우가 많다. 지구 온난화에 의한 기후 변화와 해양순환 체계의 불안정, 이에 따른 지각변동 상황의 변화 등이 총체적으로 맞물려 쓰나미를 일으키는 대형 지각 변동을 촉발시킨다는 설명이다.

그렇다면 이러한 쓰나미로부터 우리나라는 얼마나 안전한 것일까. 과거의 역사 기록으로 보면 우리 나라 역시 쓰나미로부터 다양한 피해를 보았다. 일본 열도 때문에 태평양에서 발생한 쓰나미로부터는

연합포토



쓰나미가 휩쓸 인도네시아 수마트라섬 멜라보 전경



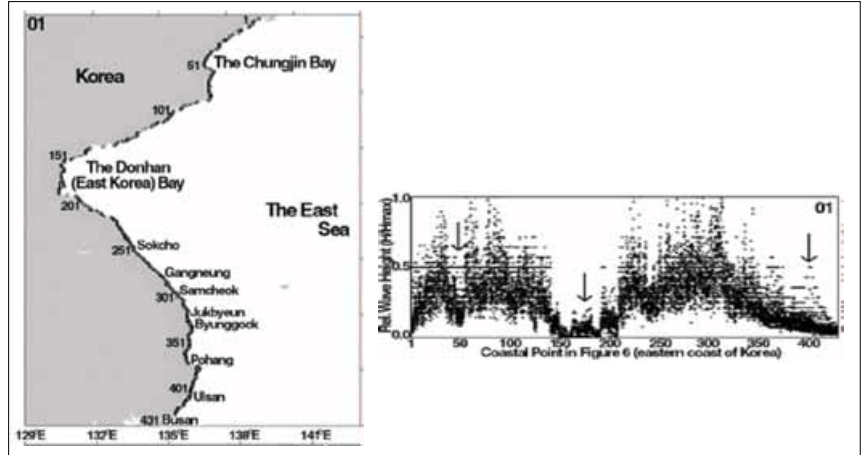
〈그림 2〉 지진해일전파 수치모의도 (최병호, 1983년 일본 아키타현)

보호된다고 하지만 동해에서 발생한 쓰나미로부터는 안전하지 못하다는 것이 최근 20여년 사이의 피해 기록으로 증명되고 있다. 그리고 고기록을 살펴보면 황해에서도 쓰나미의 내습으로 사망자가 발생했으며, 최근 남해에서도 쓰나미로 인한 피해가 있었다.

1940년부터 1993년까지 우리 나라 동해안에 내습한 지진해일 중 가장 큰 규모는 1983년 5월 26일에 일본 중부 아키타현에서 발생한 지진으로 진도는 리히터 규모 7.7이고 파고는 14.93m로 가장 큰 해일고를 기록한바 있다. 당시 검조소에 기록된 수위자료에 따르면 동해안의 묵호 3.9m, 속초 1.56m, 울릉도 1.25m, 포항 0.62m였다. 동해안의 최대 피해지역은 임원항으로 수위가 최대 4m 이상까지 올라갔던 것으로 알려졌다.

### ‘지진해일 전파도’로 피해예상지역 예보

대규모의 자연재해를 인위적으로 막는다는 것은 거의 불가능하다. 그러나 앞으로 발생할 재해의 규모와 내습 양상을 미



〈그림 3〉 지진해일 위험도 평가 (동해안)

리 알면 인적·경제적 손실을 크게 줄일 수 있다. 지진해일의 경우 초기 지진 발생 위치와 쓰나미의 발생 정도, 그리고 전파양상을 신속히 파악하는 것이 쓰나미 예보체계의 수립을 위해 필수적인 요건이 된다. 그리고 쓰나미 예보체계의 정보를 바탕으로 사람들의 신속한 대피를 위한 경보체계를 수립하여야 한다.

대표적인 경보시스템으로는 태평양쓰나미경보시스템을 꼽을 수 있는데, 하와이에 본부를 두고 미국, 일본, 러시아 등이 지역시스템과 연계하여 운영하고 있다. 이 시스템은 1946년의 알류산해구 지진에 의한 쓰나미로 159명이 사망하자 설치되었다. 쓰나미 예보시스템의 성공 여부는 해양에 설치한 쓰나미 관측 부이가 얼마나 정확하고 신속하게 쓰나미와 같은 장파의 성분을 검출하느냐에 달려있다. 비록 태평양쓰나미예보시스템은 성공적으로 설치되어 운영되고 있으나 실제 쓰나미가 발생할 경우에 예보시스템이 얼마나 효율적으로 작동하게 될지에 대한 검증은 미지수로 남아 있다.

우리 나라의 경우 아직 체계적인 쓰나미 경보 체계가 수립되지 못하고 있는 실정이다. 지진 정보로부터 쓰나미를 일으킬 수 있는가를 신속히 판단하는 것이 중요한데 이러한 판단을 아직까지 일본 기상청의 정보에 의존하고 있는 실정이다. 쓰나미가 발생할 경우 발생 정보로부터 어떠한 양상으로 쓰나미가 전파되어 오는지를 정확히 알아야 한다. 최근에는 컴퓨터를 이용하여 수치모형실험을 이용하여 지진해일의 전파양상을 모의할 수 있는데 〈그림 2〉는 아키타현에서 발생한 지진해일의 전파양상의 수치실험 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 동해에서 발생하는 쓰나미는 동해 중부의 대화퇴에 의해 파랑 전파 양상이 변하게 된다.

이러한 정보를 바탕으로 다양한 수치실험을 통해서 동해안에서 쓰나미의 위험에 취약한 지역과 그렇지 않은 지역을 구분할 수 있다. 〈그림 3〉과 같이 동해안은 상대적으로 쓰나미에 피해를 덜 보는 지역이지만, 삼척이나 죽변 등의 동해안 지역은 쓰나미 내습에 대해 그 위험도가 매우 높은 지역임을 알 수 있다.

우리나라 동해안의 지진해일 기록 (1940년~1993년)

지명	발생일	진원	진도	도달시간	최대파고
울릉도	1983. 5.26	동해중부	7.7	1시간 18분	124cm
	1993. 7.12	훗카이도 남서부	7.8	1시간 31분	119cm
속 초	1983. 5.26	동해중부	7.7	1시간 42분	156cm
	1993. 7.12	훗카이도 남서부	7.8	1시간 43분	179cm
목 호	1940. 8. 2	신위갑 외해	7.0	1시간 53분	120cm
	1983. 5.26	동해중부	7.7	1시간 45분	400cm
	1993. 7.12	훗카이도 남서부	7.8	1시간 53분	273cm
포 항	1983. 5.26	동해중부	7.7	1시간 52분	62cm
	1993. 7.12	훗카이도 남서부	7.8	2시간 13분	91cm
부 산	1964. 6.16	니가타	7.5	3시간 10분	32cm
	1983. 5.26	동해중부	7.7	3시간 00분	50cm
	1993. 7.12	훗카이도 남서부	7.8	3시간 03분	31cm

연안에서 발생하는 재해를 방지하고 그 피해를 최소화하기 위하여 해양물리학이나 연안공학 분야에서 파랑과 해일 및 쓰나미와 같은 이상해상 상태에 대한 연구가 진행되고 있다. 즉, 자연재해로부터 해안주거시설과 구조물 등을 안전하게 보호하기 위해 해안방어수위를 확률적으로 평가하는 연구가 수행된바 있고, 지진해일모형을 수립하여 운용하기 위한 연구가 대학과 연구소를 중심으로 진행되고 있다.

**재난경보 시스템 신속히 구축해야**

미국 국립해양대기청(NOAA)은 이번 인도네시아 지진 발생 직후 쓰나미 경고를 세계 각국에 통보했다. 그러나 이번 쓰나미 피해를 많이 본 동남아의 여러 국가는 이러한 정보를 제대로 파악하지 못하고 대피 경보를 발령하지 않아 많은 인명피해가 발생하였던 것이다. 그리고 이들 국가에서 피해 경보를 발령하려고 해도 해안에 거주하고 있는 많은 사람들에게 그러한 정보를 신속하게 전달할 만한 인프라가 제대로 구축되어 있지 못한 것도 사실이다.

미국의 태평양쓰나미경고센터(PTWC)는 태평양에서 쓰나미가 발생하면 태평양 인접 국가들에 통보하게 되며, 이 경우 언론들은 NOAA의 기상전문서비스(WWS)를 통해 즉각 통보를 받게 된다. 그러나, PTWC 가입국이 아닌 인도와 스리랑카, 몰디브에는 이러한 경고가 전달되지 않아 피해가 가중된 것으로 보고 있다. 이러한 사실들로 볼 때 이번 쓰나미는 천재가 아닌 인재라고 볼 수도 있다.

동해에서 쓰나미가 발생하면 어떻게 될까. 일본 서해안에서 쓰나미를 일으키는 지진이 발생하면 동해안에는 1시간~1.5시간 후에 쓰나미가 도달한다. 따라서 지진 발생 후

최대 수분 이내에 쓰나미에 대한 여러 정보를 파악하고 경우에 따라서 쓰나미 대피 경보를 발령해야 한다. 남해나 서해에서 지진이 발생하면 쓰나미가 한국의 해안에 도달하는 시간이 더 줄어들므로 이러한 정보를 더욱 신속히 파악하고 대처해야 한다.

그러나 우리 나라에서 쓰나미와 같은 재해에 대한 정보를 파악하는 능력은 아직 선진국에 비해 상당히 미미한 수준이다. 또한 재해 정보를 파악하여 재해 경보를 발령하려고 해도 이를 신속히 주민들에게 전달하는 인프라가 제대로 구축되지 않은 실정이다. 그리고 재해 경보가 제대로 주민들에게 전달된다 하더라도 재해에 대한 의식 결여로 대피 요령을 따르지 않는 것도 우리가 신속히 해결해야 할 문제이다.

재해 대처에 관한 여러 문제들을 해결하고자 하는 국가적 차원의 노력이 이제 시작되고 있다. 그러나 보다 체계적이고 효율적인 시스템 구축을 위해서는 관·학·산·연의 사회 구성원이 보다 적극적으로 참여할 수 있는 토대를 만들어야 한다. 지금까지 우리 나라에서 겪은 많은 시행착오의 공통점, 즉 급히 일을 마무리하려 허점이 너무 많이 생기는 오류를 쓰나미 등의 재해대책 수립에는 저지르지 말아야 할 것이다. 사람 목숨에 관련된 일이기 때문이다. ㉔



글쓴이는 성균관대학교 토목공학과 졸업 후 동대학원에서 석사학위를 미국 코네티컷에서 박사학위를 받았다.