

[2] 지진해일의 발생과 예보체계

Occurrence of Tsunami and Warning System



김 현 승

Hyun-Seung Kim

- (주)한국해양과학기술 부설연구소
- E-mail : blue-holic@hanmail.net

1. 서 론

2004년 12월 26일에 인도의 수마트라에서 발생한 지진해일은 인도 남부에서 인도양 연안으로 전파되어 막대한 인명피해를 발생시킨바 있으며, 2006년 12월 26일에는 대만 남서부 해안에서 발생한 강진의 여파로 인명피해 및 통신, 금융, 인터넷 서비스가 중단 또는 지체되는 혼란이 발생하였다. 우리나라의 경우는 지진 및 지진해일로부터 비교적 안전하다고 알려져 왔지만, 최근 국내의 지진학자들은 한반도 역시 지진에 대해 안전지대가 아님을 주장하고 있다. 이와 같은 주장을 뒷받침하는 사례로 1983년과 1993년에 일본 서해안에서 지진으로 인한 지진해일이 발생하였고, 한반도 동해안에서는 큰 피해가 발생하였다.

최근에 곳곳에서 지진 및 지진해일이 연이어 발생함에 따라, 이러한 활발한 단층 운동이 한반도 인근해역에서도 예외가 아님을 감안할 때 한반도 동해안은 추가적인 지진해일 발생에 따른 피해에 노출되어 있으며, 남해안과 동중국해에서도 지진과 함께 지진해일이 발생할 수 있는 가능성이 존재한다.

2. 지진해일의 정의

어원으로부터 본 지진해일의 의미는 항만, 포구에서 피해를 일으키는 파로, 국제 공용어로 Tsunami라 불리고 있고, 우리나라에서는 지진해일이라고 알려져 있다. 지진(규모 6.5이상)에 의해 해저 단층의 수직적인 운동이 발생하여 해저가 융기나 침강을 일으키면 그 형태대로 해수면이 변화하여 파형이 형성되고 사방으로 전파하게 된다. 이렇게 형성된 장파(long wave)를 지진해일이라 부른다.

지진해일의 크기는 지진의 규모에 따라 결정되지만 직접적으로는 지진으로 인한 해저변형의 정도와 속도 등에 관련이 있다. 장주기파인 지진해일의 속도는 천해파의 진행속도 $c = \sqrt{gh}$ 의 관계식으로부터 구할 수 있는데 여기서, g 는 중력가속도, h 는 수심을 의미한다. 예를 들면, 평균수심이 900m인 해역에서 전파되는 지진해일은 약 340km/h의 속도를 가지고 진행하게 된다.

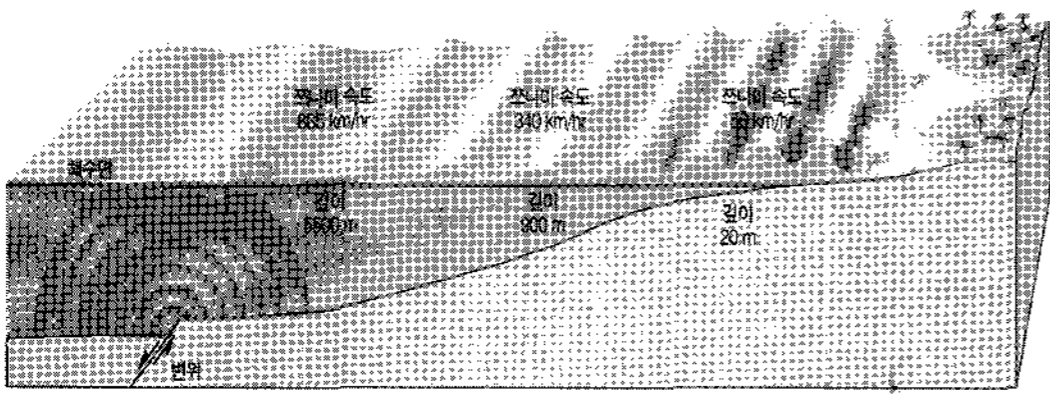


그림 1. 지진해일 3차원 모식도

지진해일이 해안에 도착함으로써 일어 날수 있는 첫 번째 현상은 해수면이 급격히 변하는 것이다. 가장 낮은 조류일 때보다도 해안이 더 많이 드러날 수도 있다. 이렇게 바닷물이 빠져나가는 이런 현상은 다음에 해일이 밀려온다는 신호이며, 큰 힘을 가지고 해안을 강타하는 해일은 엄청난 파괴력을 가지고 있다. 다음 현상은 해수면의 상승이다. 지진해일의 최대 높이는 2차, 3차의 해일파에서도 나타나므로, 1차 해일파가 지나간 후에도 여전히 위협적이라고 볼 수 있다. 지진해일파는 수심이 깊은 곳에서는 낮게 전파되는 반면 수심이 얕아질수록 파고가 점점 높아진다. 따라서 지진해일파는 해안에 가까워지면서 파고가 높아져서 해안에 큰 피해를 발생 시킨다.

3. 지진해일 발생 및 피해 사례

1900년대 이후 우리나라에서 관측된 지진해일은 모두 네 차례였으며 이는 모두 일본의 서쪽 해역 즉 먼 동해에서 발생한 지진에 의한 것이었다.

표 1 한반도 동해안의 지진해일 기록 (1940-1993)

지명	발생일	진원	규모	도달 시간	최대 파고
울릉도	1983.5.26	동해중부	7.7	78분	124cm
	1993.7.12	북해도 남서부	7.8	91분	119cm
속초	1983.5.26	동해중부	7.7	102분	156cm
	1993.7.12	북해도 남서부	7.8	103분	179cm
묵호	1940.8.2	신위갑 외해	7.0	113분	120cm
	1983.5.26	동해중부	7.7	105분	400cm
	1993.7.12	북해도 남서부	7.8	113분	273cm
포항	1983.5.26	동해중부	7.7	112분	62cm
	1993.7.12	북해도 남서부	7.8	133분	91cm
부산	1964.6.16	니가타	7.5	190분	32cm
	1983.5.26	동해중부	7.7	180분	50cm
	1993.7.12	북해도 남서부	7.8	183분	31cm

그 중 1983년과 1993년에 발생한 지진해일은 우리나라 동해안에 상당한 피해를 남겼다.

세계적으로 가장 피해가 컸던 지진 해일은 1883년 인도네시아 크라카타우섬에서 발생한 것으로, 강력한 화산 폭발로 섬 북쪽의 3분의 2가 바닷속으로 가라앉으면서 선다해협에 거주하던 3만6000여명의 마을 주민이 사망했으며, 2004년 12월 26일 인도네시아 수마트라섬에서 발생한 지진해일은 28만명의 사망자와 12억 달러의 피해액을 기록했다.

표 2 역대 주요 해외 지진해일 피해 사례

발생일	발생장소	피해결과
1883년 8월 27일	인도네시아	3,600명 사망
1896년 6월 15일	일본 신리쿠	26,000명 사망
1906년 1월 31일	콜롬비아 연안	1,500명 사망
1950년 5월 22일	태평양	1,000명 사망
1954년 3월 28일	알래스카	120명 사망
1998년 7월 17일	파푸아뉴기니	2,000명 사망
2004년 12월 26일	인도네시아	280,000명 사망

3.1 한반도 동해중부 지진해일

3.1.1 1986년 일본 아키다 지진해일

1983년 5월 26일 11시 59분에 일본 아키다현 서쪽 해역에서 발생한 리히터 규모 7.7(지진의 세

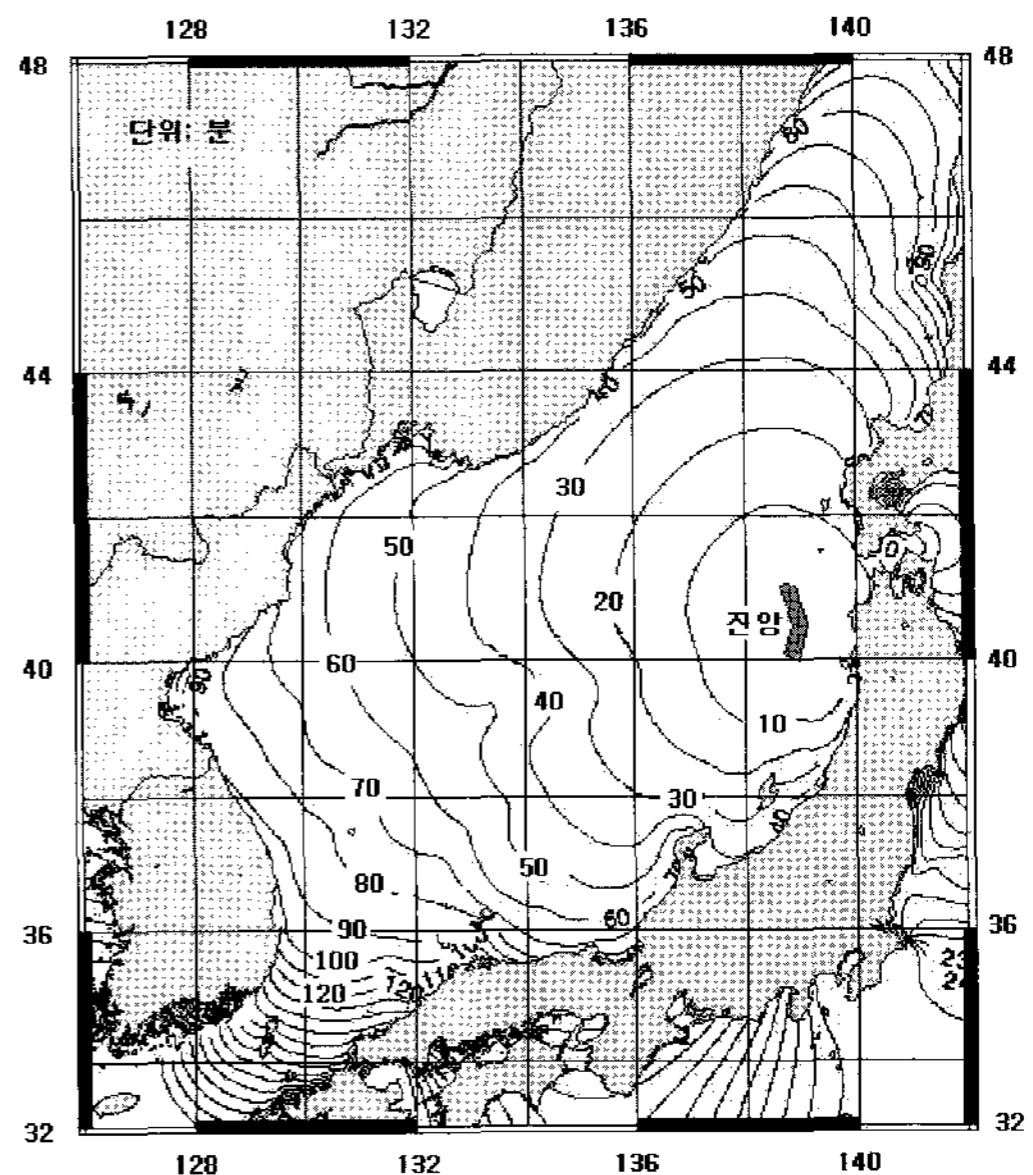


그림 2. 1983년 아키다 지진해일 전파 모식도

기를 에너지 개념으로 표기한 것)의 지진으로 동해상에 큰 지진해일이 발생하였는데, 지진해일은 우리나라뿐만 아니라 일본과 러시아에도 많은 피해를 남겼다.

가장 피해가 컸던 우리나라 동해안의 임원항에서는 깊이 5m의 항구바닥이 드러날 정도로 한꺼번에 물이 빠져나갔다가 10분쯤 후 다시 밀려왔으며, 1명이 사망하고 2명이 실종되는 인명피해와 배 81척이 파괴되고 건물 44동이 부서지는 등의 많은 피해가 발생하였다. 그림 2는 1983년 일본의 아키다현 서쪽해역에서 발생한 지진해일이 시간이 지남에 따라 퍼지는 모양을 그린 것으로 지진이 발생한 후 77분 만에 울릉도에, 100분 후에는 동해안의 전 지역에 지진해일이 도착하였다는 것을 알 수 있다.

표 4 1983년 지진해일 내습 시 피해상황

피해	내용
재산	약 3억 7천만 원
인명	5명 (사망 1명, 실종 2명, 부상 2명) 및 이재민 405명
건물	44동 (전파 1동, 소파 22동, 침수 21동)
선박	81척 (전파 47척, 반파 34척) 및 시설물 62동



그림 3. 지진해일로 침수된 임원항

3.1.2 1993년 일본 오키시리 지진해일

1993년 7월 12일 22시 17분에 일본 홋카이도 오키시리섬 북서해역에서 발생한 규모 7.8의 지진으로 지진해일이 발생하여 우리나라 동해안에 1시간 30분~3시간 동안 10분 주기로 지진 해일이 밀려와 많은 피해를 주었다. 울릉도와 속초시 대포항, 장사항의 어선 침몰을 비롯하여 동해, 삼척, 임원항에 이르는 강원도와 경상북도 동해안 일원

에 최대 2~3m의 지진 해일이 발생하였다.

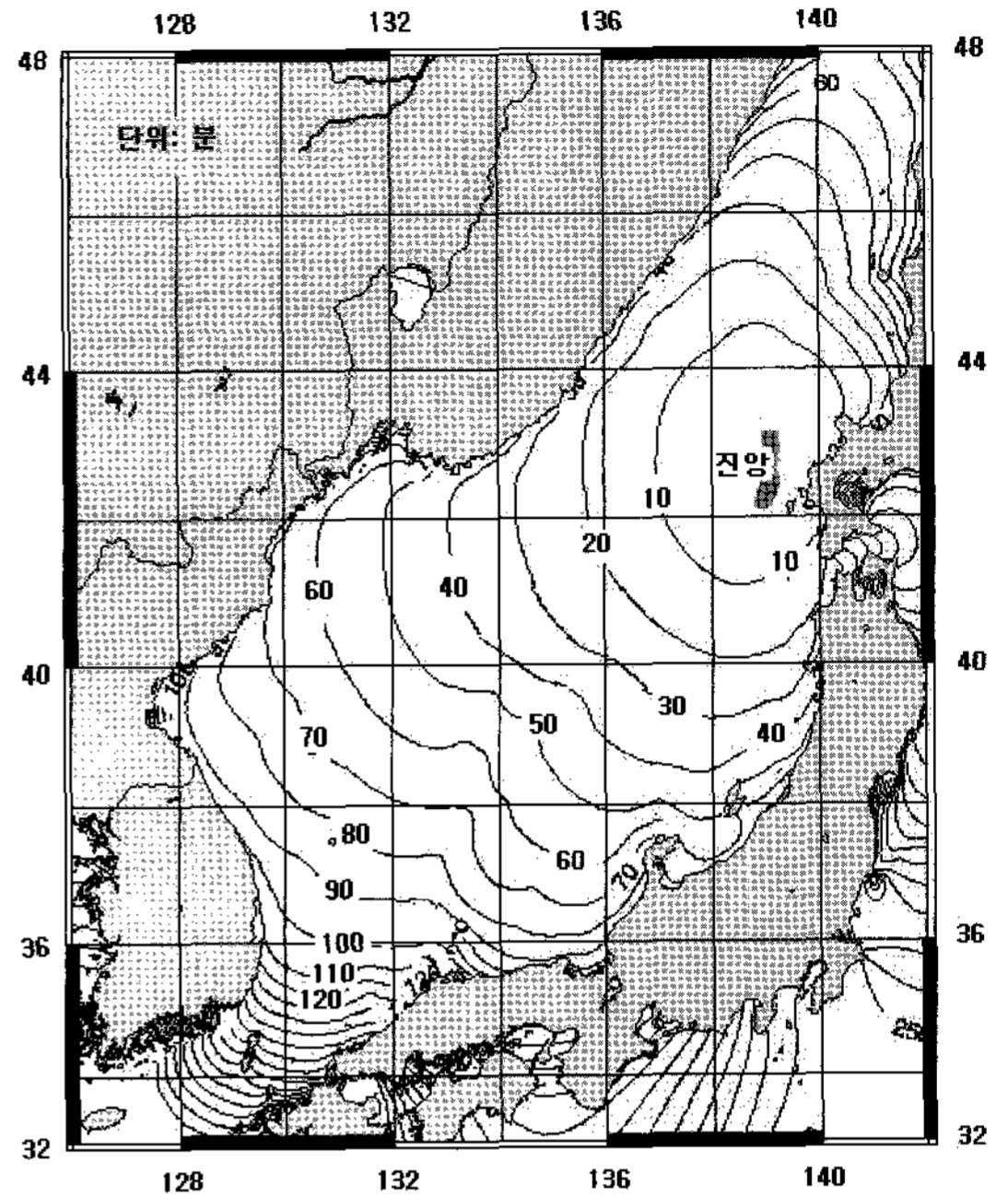


그림 4. 1993년 오키시리 지진해일 전파 모식도

1983년 아키다 지진 해일과는 달리 기상청은 지진 해일 특보를 발표하고, 신속한 지진 해일 대비 업무를 수행하여 인명 피해는 없었으며 선박에 대한 피해도 줄일 수 있었다.

표 5 1993년 지진해일 내습 시 피해상황

피해	내용
재산	약 3억 9천만 원
인명	없음
어망	3,000여 통
선박	5척(소형) 및 시설물

3.2 인도네시아 수마트라 지진해일

2004년 12월 26일 21시 58분(우리나라 시간)에 인도네시아 수마트라섬 북부해안에서 발생한 지진해일에 의하여 많은 피해가 발생하였다. 당시 발생한 지진의 진도는 리히터 규모 9.0으로 이는

1900년 이후 5번째로 큰 규모로 알려져 있으며 수소폭탄 270개가 동시에 터진 위력이다. 이때 발생한 지진해일에 의한 피해는 동남아의 스리랑카와 인도 태국 등 해안에 인접한 나라에서 10만 명이상이 사망하고 엄청난 재산상의 손실이 발생하였는데 특히, 스리랑카의 경우는 국토의 절반 이상이 피해를 입어 1백만 명 이상의 이재민이 발생하였으며 주민들의 보건체계가 무너지고 식수는 오염되어 전염병의 위험에 노출되는 상황을 초래하였다.

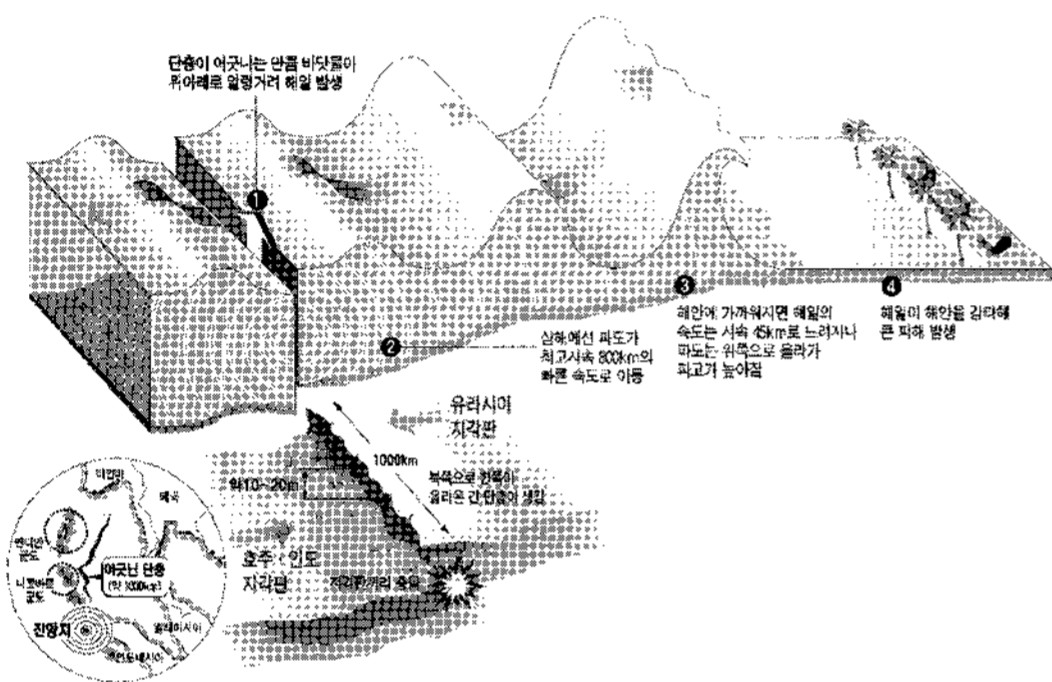


그림 5. 지진해일의 발생 및 전파 과정 모식도

당시의 지진해일로 인해 인도 해안지대에서는 지형에도 변화를 일으킨 것으로 보이며 미얀마와 인도네시아 사이 550여개의 섬으로 이루어진 안다만과 니코바르 군도의 일부 섬들이 지진의 발생으로 인해 이동했을 가능성이 있다고 밝힌 바 있었다.



그림 6. 인도네시아 수마트라 지진해일로 인한 피해 (반다아체 해안지역)

또한, 인도의 지질학자들은 수마트라 지진으로 인도판(plate)이 북쪽으로 이동하여 인도 북부의 지진 다발지역에 영향을 주었을 가능성을 우려하였다.

4. 남해안의 지진해일 발생 가능성

4.1 한반도 남해안 및 동중국해에서 발생한 지진

한반도 동해안은 과거 두 차례의 지진해일 피해로 인해 지진해일에 대한 많은 연구와 조사가 이루어져 지진해일에 의한 피해의 심각성이 인식되어져 있다. 또한, 한반도 동해안에 직접적인 영향을 주는 일본 서해 중부해안의 지진 공백역(지진이 발생하지 않았던 지역)에 대한 관심이 커지고 있는데, 이곳은 인근해역의 잦은 지진 발생으로 인해 가까운 장래에 큰 규모의 지진이 발생할 가능성을 내제하고 있는 지역이기 때문이다.

반면, 한반도 남해안은 일본의 서·남해안에서 발생한 지진해일의 영향권에 드는 지역으로 현재까지 지진해일의 내습이 없어서 상대적으로 지진해일에 대해서는 안전하다고 알려져 있다.

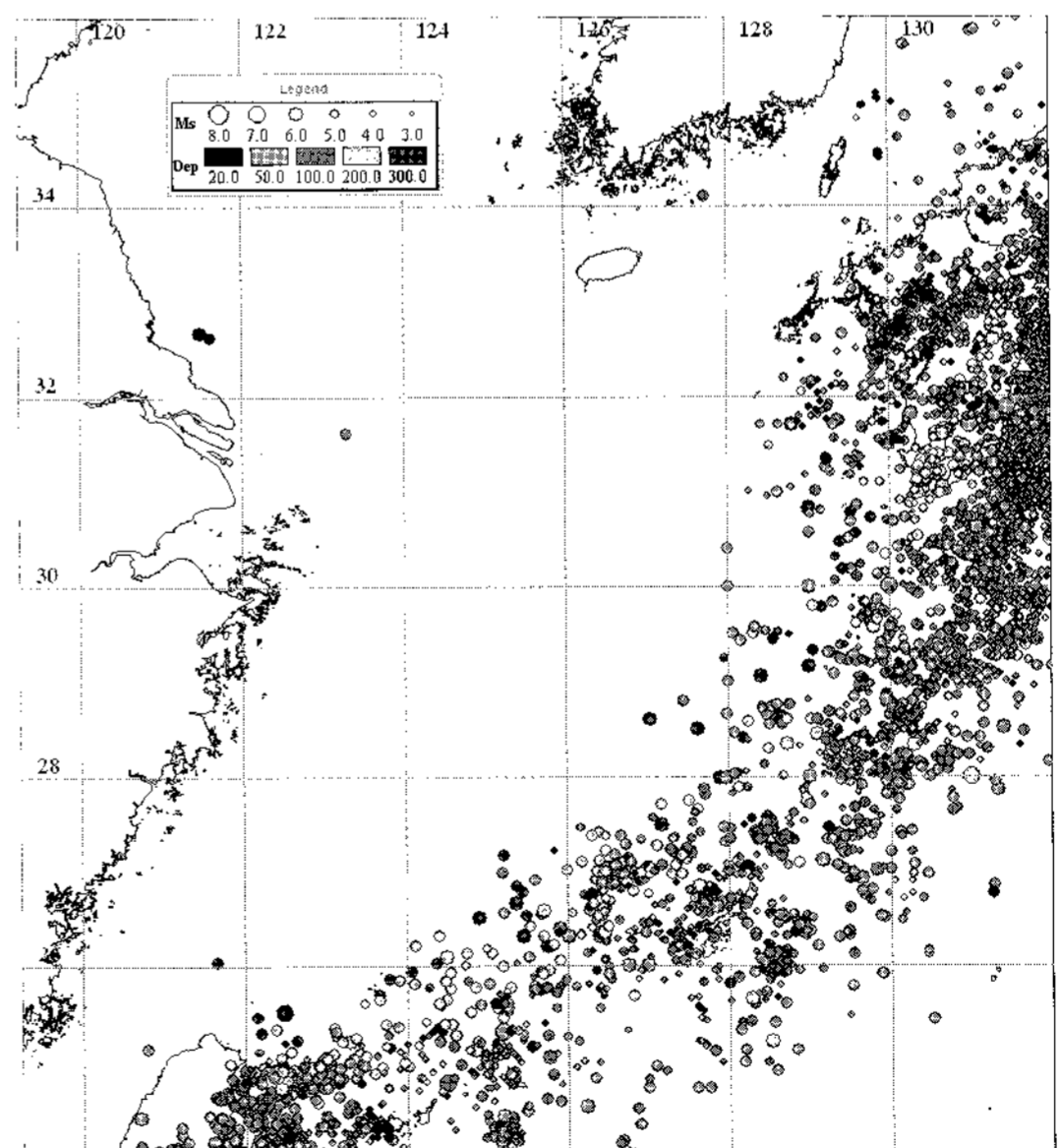


그림 7. 지진 발생지점(남해안 및 동중국해, 1900-2006)

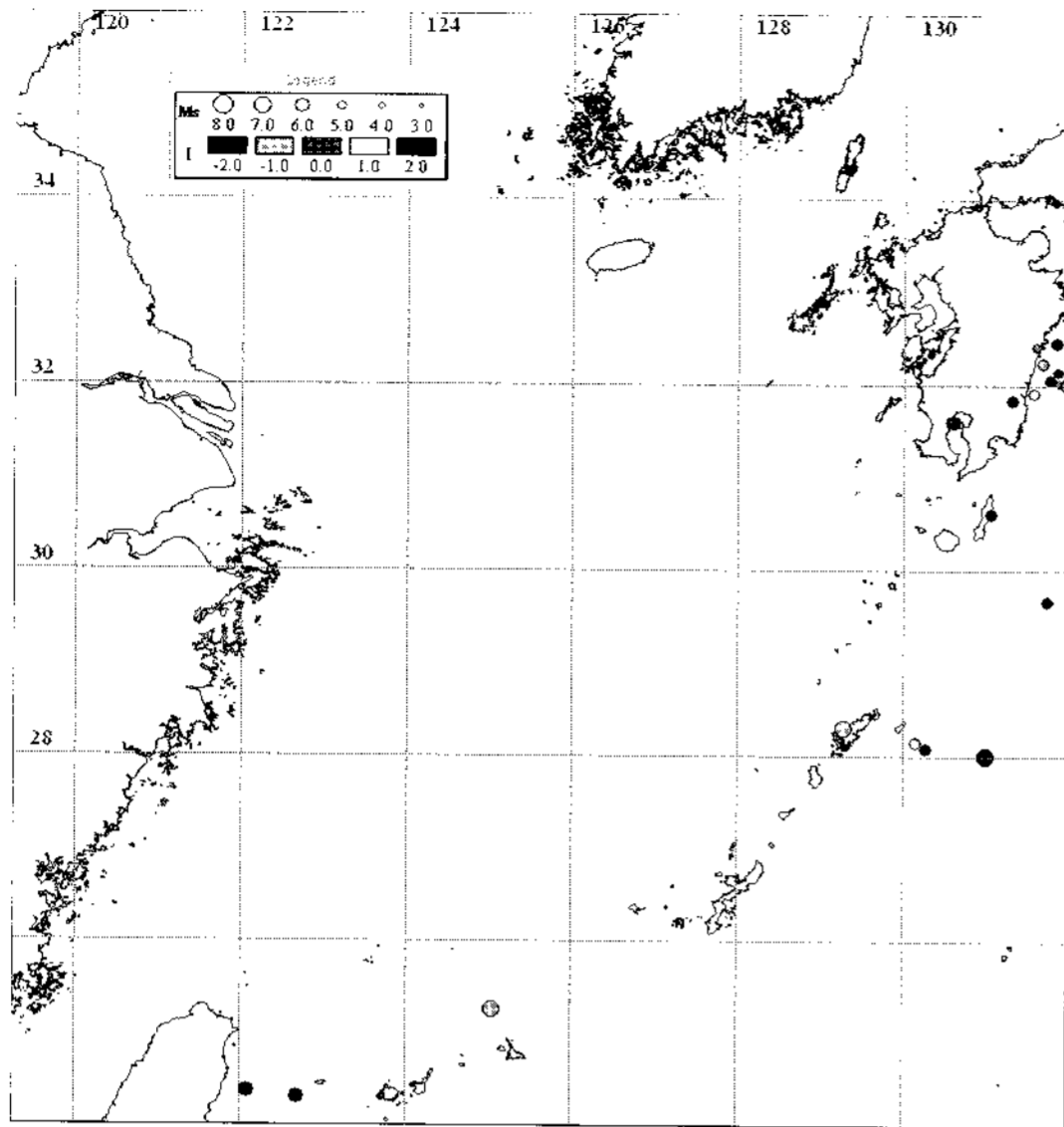


그림 8. 지진해일 발생지점(남해안 및 동중국해, 1900-2006)

과거의 지진해일은 한반도 남해안에서 멀리 떨어진 일본 남·동해안과 동중국해의 대륙붕단에 위치한 유구열도(琉球列島)에서 발생한 것을 알 수 있으며, I값(해일의 높이에 따른 지진해일의 규모를 나타내는 상수, Imamura, 1949)이 모두 음수이므로 지진의 규모는 크지만 지진해일은 한반도 보다 가까이 위치한 일본에도 영향을 주지 않을 정도로 전파되는 과정에서 해일이 소멸하였다는 것을 알 수 있다.

그러나, 일본 서·남해안과 유구열도는 환태평양 조산대에서 필리핀 단층대에 속하는 부분으로 수심이 깊고 해저의 단층운동이 활발한 곳이다. 발생한 지진의 횡수에 비해 지진해일은 상대적으로 적게 발생하였지만, 지진해일은 해저 지진에 의해서 발생하는 것이므로 지진이 자주 발생했다는 지진해일의 발생 가능성이 커진다는 것을 의미한다.

4.2 2005년 후쿠오카 지진

2005년 3월 20일 오전 11시경에 일본 후쿠오카 북서쪽 45km 해역에서 발생한 지진은 해저 9km 지점에서 리히터 규모 7.0의 강진이었으며,

그 진동이 한반도 전역에서 감지되었다.

후쿠오카 지진은 해저 단층의 수평적인 이동으로 인해 실제로는 심각한 지진해일이 발생하지는 않았으나 지진발생 당시 일본 기상청(JMA)에서는 대한해협으로의 지진해일 발생 가능성을 예상하는 등 한반도 남해안은 지진해일의 발생 가능성에 대한 위협에 노출되어 있다.



그림 9. 2005년 후쿠오카 지진의 진앙지

5. 지진해일 예보 체계

5.1 미국의 지진해일 방재 대책

미국에서의 지진해일의 경보체제는 근지와 원지의 지진해일에 모두 대응하고 있다. NOAA(미국 해양대기관리처)의 지진해일 예·경보체제를 개선하기 위해 심해에서 지진해일을 감지할 수 있는 장치를 설치하고, 미국 서해안의 지진 감지네트워크를 Hawaii의 PTWC와 Alaska의 West Coast/ Alaska Tsunami Warning Center에 연결하는 사업을 수행하였다.

실시간의 심해 지진해일 감지장치는 PMEL (Pacific Marine Environmental Laboratory)에 의해 개발되었다. 이 시스템은 해저의 수압센서, Acoustic modem, Buoy, GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite)로 구성되어 있고, Buoy와 Modem을 개량하고 GOES의 전달 장치를 개선하여 전체적으로 보강되어 오고 있으며, 1997년 9월에 처음

으로 Alaska와 Washington 연안의 4600m 와 2900m의 수심에 설치되었다. 이 장치들은 3cm 이상의 지진해일 파고를 감지하여 해저면의 센서로부터 Buoy에 전달하고 GOES위성을 통해 Warning Center에 전달하는 기능을 가진다.

지진해일의 감지로부터 Warning Center에 전달되기까지 소요되는 시간은 3분이 소요된다. 이 데이터로부터 지진해일의 발생여부를 판단하고, 지진해일이 발생했다면 심해에서의 파고를 추산하게 된다. 이 데이터는 미국 연안에 내습하는 지진해일의 평가에 중요한 정보가 된다.

5.2 일본의 지진해일 방재 대책

1941년 이래, 일본 기상청은 지진해일 재해로부터 수많은 인명과 재산의 피해를 막고자 지진해일 예보를 실시해 왔다. 그 후에도 1983년의 동해 중부 지진 지진해일과 1993년의 북해도 남서 외해 지진 지진해일을 포함한 많은 지진해일에 의한 피해가 발생되어 왔다. 이러한 지진해일에 대한 경험은 보다 즉각적이고 정확한 지진해일의 예보를 가능하게 하였다. 일본 기상청은 지진의 위치와 규모의 추정을 신속히 수행하기 위해 170개의 고감도 지진계를 1994년 3월에 설치 완료하고 지진 관측망을 구성하였다. 또한, 새로운 수치 모형을 이용하여 계산된 다양한 종류의 결과를 DB화하여 지진해일을 예보할 수 있는 새로운 방법도 도출하였다. 이렇게 정확한 지진해일 예보 작업을 통해, 전 일본 연안의 대상 지역에서의 지진해일 도달시간과 정확한 높이를 예보할 수 있도록 체계를 갖추고 있다.

5.3 한반도의 지진해일 방재 대책

우리나라의 경우 지진해일에 대한 관심이 학문적으로나 정책적으로 시작된 것은 1983년 동해 중부 지진해일 후부터였다. 당시 임원에서 두 명의 사상자와 재산 피해가 발생하여 지진해일에 대한 방재적인 측면의 인식이 부각되었고, 과거에 이러한 현상이 전혀 없었던 것은 아니지만, 자연 재해로서 막대한 재산 피해를 유발할 가능성과 한

반도가 지진해일에 대해 안전지대가 아님을 확인하였다.

본격적인 지진해일의 조사와 연구는 이로부터 10년 후인 1993년 북해도 남서 외해의 지진해일 내습이 계기가 되어 시작되었다. 지진해일의 내습이 발생하였을 때 즉시 조사단이 파견되는 등의 실제 연구가 수행되기 시작하였다.

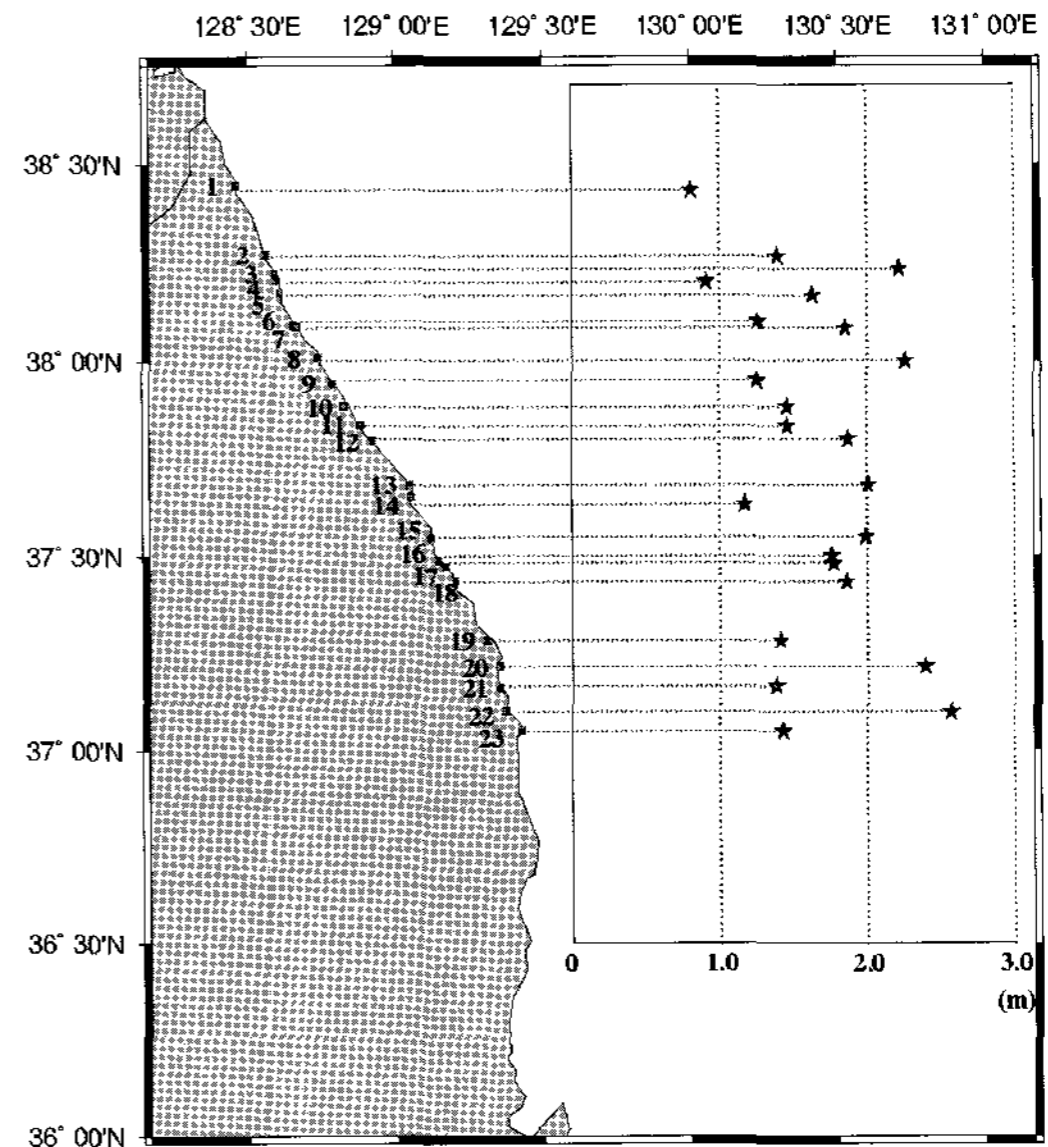


그림 10. 동해 연안에서 관측된 1993년 지진해일의 관측치

표 6 동해 연안에서 관측된 1993년 지진해일의 각 관측지점의 관측치

관측지점	관측치 (m)	관측지점	관측치 (m)
1. Geojin Port	0.81	13. Jungdongjin	2.01
2. Ayajin Port	1.39	14. Gumjin Port	1.17
3. Sajin Port	2.22	15. Mukho Port	1.99
4. Sockcho	0.91	16. Donghae Port	1.76
5. Daepo Port	1.63	17. Chuam Beach	1.77
6. Osan Port	1.26	18. Samchuk Port	1.86
7. Susan Port	1.85	19. Jangho Port	1.41
8. Gisamun	2.26	20. Imwon Port	2.39
9. Namae Port	1.26	21. Hosan Port	1.38
10. Jumunjin	1.46	22. Bugu	2.57
11. Sachunjin	1.46	23. Junkbyun Port	1.43
12. Gangmun	1.87		

최근 지구상에서는 지진이 빈번히 발생하고 있고 동해에서의 주 단층대인 동해 동연(일본의 서해안)과 일본 남·서해안에서의 새로운 지진 발생 가능성은 한반도로 하여금 효율적으로 준비된 예·경보 시스템의 도입이 시급함을 시사해 주고 있다. 우리나라에서는 지진이 잦은 일본과 가까운 울릉도에 지진해일 관측 장비인 해일파고계의 설치에 이어 최근 해일관측 CC-TV카메라가 설치되었다.

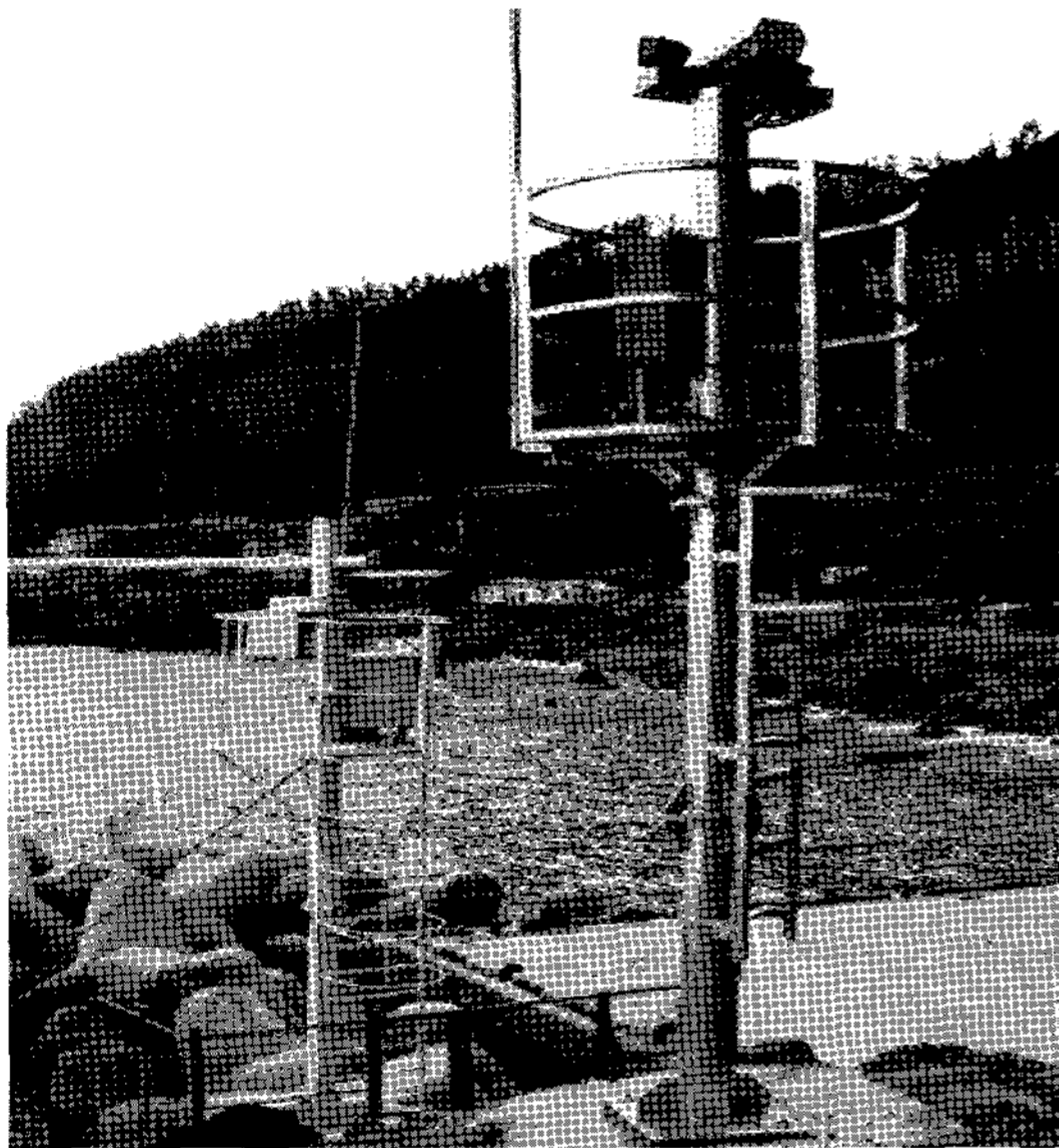


그림 11. 울릉도 해일관측 CC-TV

앞서 설명된 것처럼 미국의 경우 심해에 지진해일 감지 센서를 설치하여 경보를 발령하는 시스템을 개발하여 현재 운영 중에 있다. 일본 역시 해저에 지진 감지 장치를 설치하여 지진해일 발생 여부를 판단한 후 연안에 전송하는 방법을 사용하고 있으며, 만의 입구 등에 지진해일 감지 센서를 설치하여 즉각적인 대응을 실시하는 노력을 경주하고 있다. 이와 비교하여 우리나라의 경우 지진해일 감지 시설 내지는 통신시설은 완비되지 않았고, 필요하다면 이의 설치운용도 바람직하다. 이러한 기반 시설 없이 지진해일의 예·경보를 실시하기 위한 방법으로 널리 사용되는 방법으로는 수치모형의 결과를 이용하는 방법이 있다. 이를 위해

서는 현지 자료를 수집하고, 사전에 수많은 시뮬레이션이 선행되어야 한다.

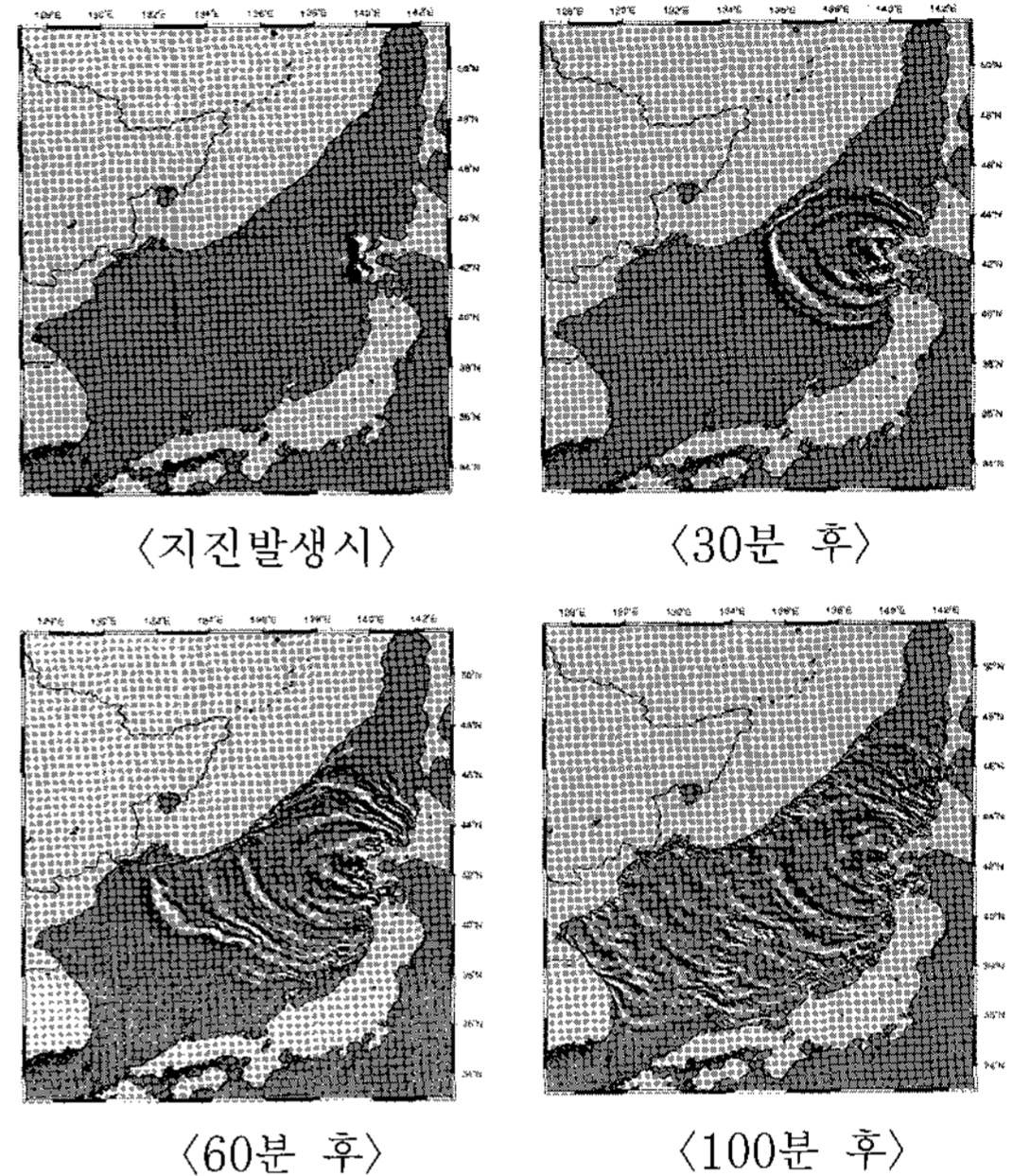


그림 12. 지진해일전파 수치모의도 (최병호, 1993년 일본 오키시리)

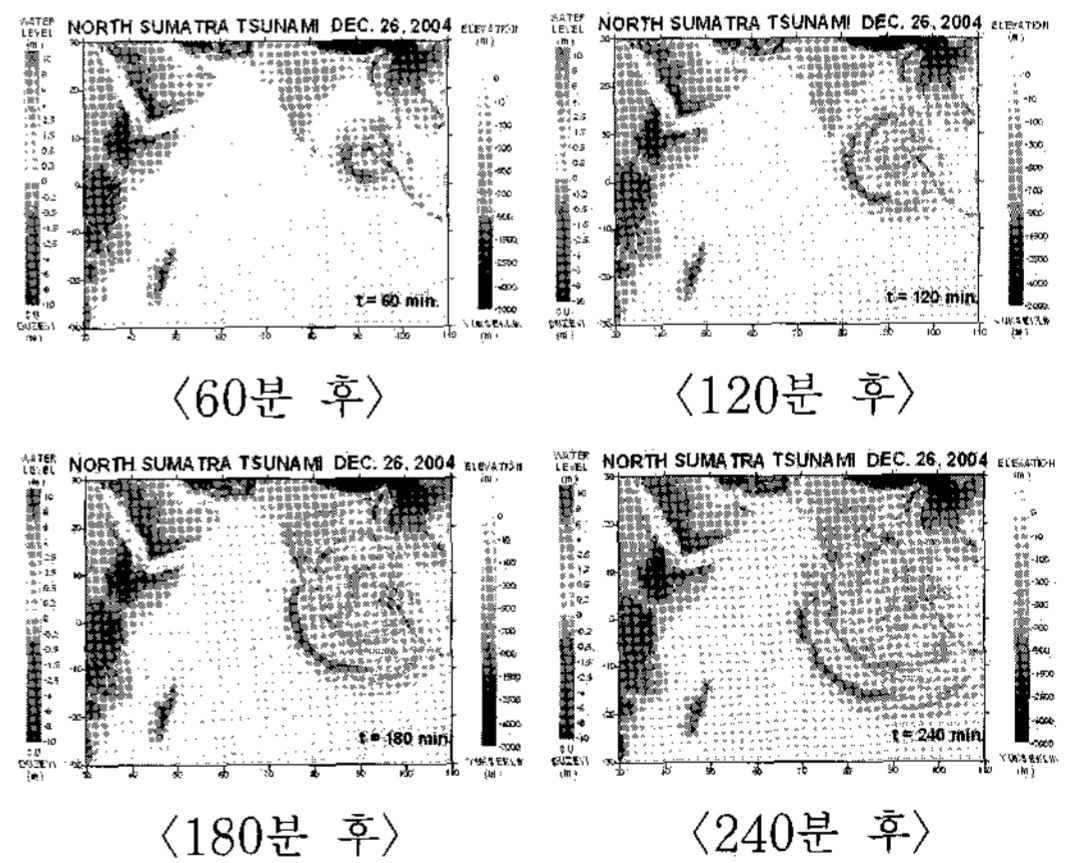


그림 13. 지진해일전파 수치모의도 (Fumihiko Imamura, 2004년 인도네시아 수마트라)

수치모형을 이용한 지진해일 예·경보시스템의 확보는 국가와 지방 자치 단체 등과 같은 행정 주체의 방재 대책 환경을 만족시킬 수 있지만, 주민의 경우는 이와 다르다. 지진해일 발생 상황에서

잘 정리된 시스템에 의해서 30분 ~ 1시간 이내에 경보발령과 대피 및 대책 마련에 성공했다 할지라도, 이러한 내용을 전달 받은 주민들이 사전에 지진해일에 대한 정보의 습득과 상황의 심각성 등 재해에 대한 주의심이 적을 경우에는 대피 및 대책에 준하는 행동을 보이지는 않을 것이기 때문에 적지 않은 피해를 일으킬 수 있는 가능성이 높다. 일본의 경우 이미 주민 교육 프로그램 및 재해 문화의 육성 등 간접적이고 비물질적인 방재 정책의 중요성이 강조되어 오고 있고 실제 이에 대한 예도 제시된 바 있다.

진 발생이 드물고 지진 관련 재해에 대한 인식이 적은 한반도에 있어서 지진해일이라는 용어 자체가 알려지지 않는다면, 지진해일에 대한 방재 정책을 수행하는 것은 의미가 없는 일이다. 일본과 같이 지진과 지진해일의 발생 빈도가 비교적 높은 경우에도 경험의 부족으로 피해가 발생하는 것과 비교할 때 우리나라의 경우는 실제 상황에서 더욱 불리한 입장에 있다고 할 수 있다. 모든 재해에서 그러하듯 방재 정책의 기본은 정책을 실천하는 대상이 주민이라는 것에서 시작되어야 하고, 이것을 인식시키기 위한 교육이 무엇보다 중요하다.

6. 결 론

지구상에 분포하는 해저지진대 부근의 해안에는 지진해일에 대한 위험이 항시 존재하고 있기 때문에, 외국의 경우 해안으로부터 진앙까지의 거리 등의 지형 특성에 알맞은 재해 대책을 수립하고 있다. 그러한 외국의 대표적인 예가 태평양과 같이 면적이 넓은 경우 해상에 위치하는 부이(Buoy)로부터 해일을 관측하여 연안에 통보하는 시스템이 있는가 하면, 해안 부근에서 발생하여 불과 1분 이내에 내습하는 지진해일에 대비한 비상체제가 운용 중에 있다. 한반도에 도달하는 지진해일은 동해안을 중심으로 관측되고 있는데, 모두 일본의 서해안에 진앙을 두고 전파되어 오고 있다.

1983년과 1993년에 동해안에 내습한 지진해일의 발생 후 해안도달까지의 두 시간이라는 긴 시간을 이용하여 적절한 대피와 준비를 통해 인명과 재산 피해를 줄이고자 하는 방안이 제시된 바 있다. 하지만, 주의보 내지는 경보를 발령하기 위해서는 충분한 정확도의 해일 예보시스템이 준비되어야 하고, 피난하는 지역에는 지진해일에 대한 정보가 제공되어야 한다. 물론, 일본과 같이 잦은 지진해일 피해를 겪어온 경우 지진해일에 대비한 방과제의 건설 등의 실제적인 방안이 준비되고 있기는 하지만, 한반도에서는 지진해일이 내습하는 빈도가 일본의 경우보다 낮기 때문에 지진해일에 대한 예·경보와 정보제공에 의한 방법만으로 충분한 대비가 이루어 질수 있다고 사료된다.

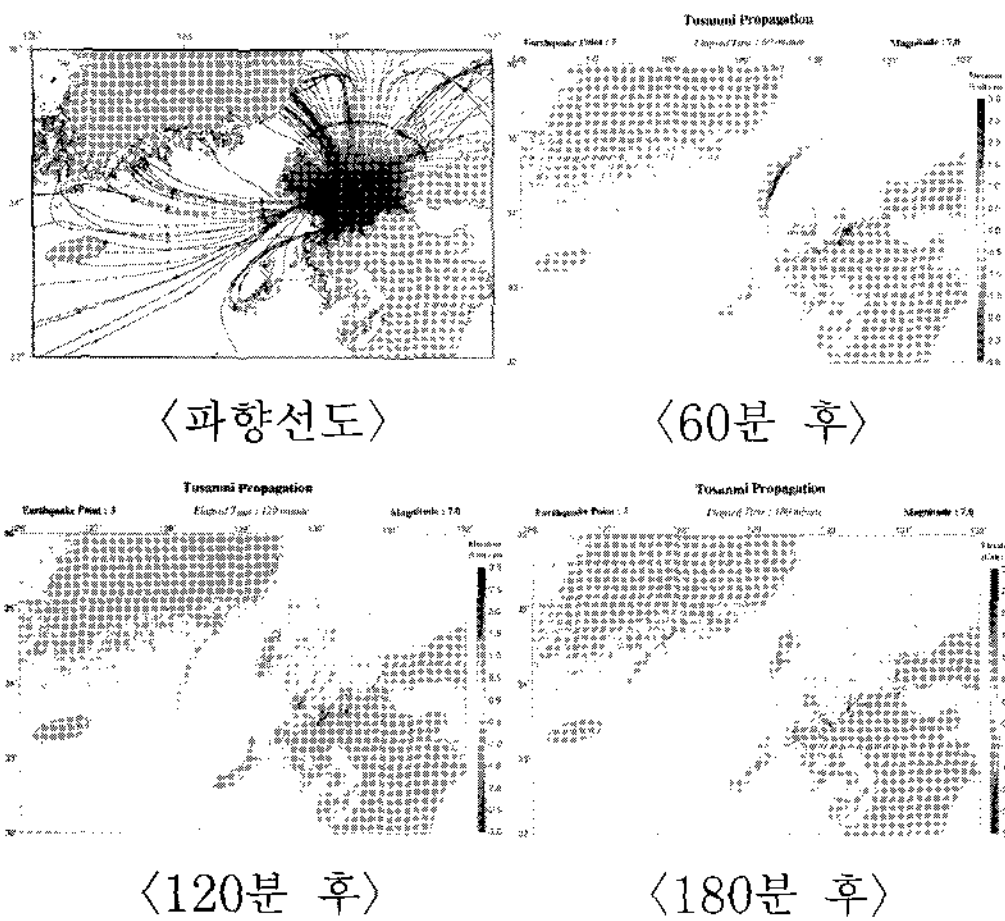


그림 14. 가상 지진해일전파 수치모의도 (김현승, 2005년 일본 후쿠오카)

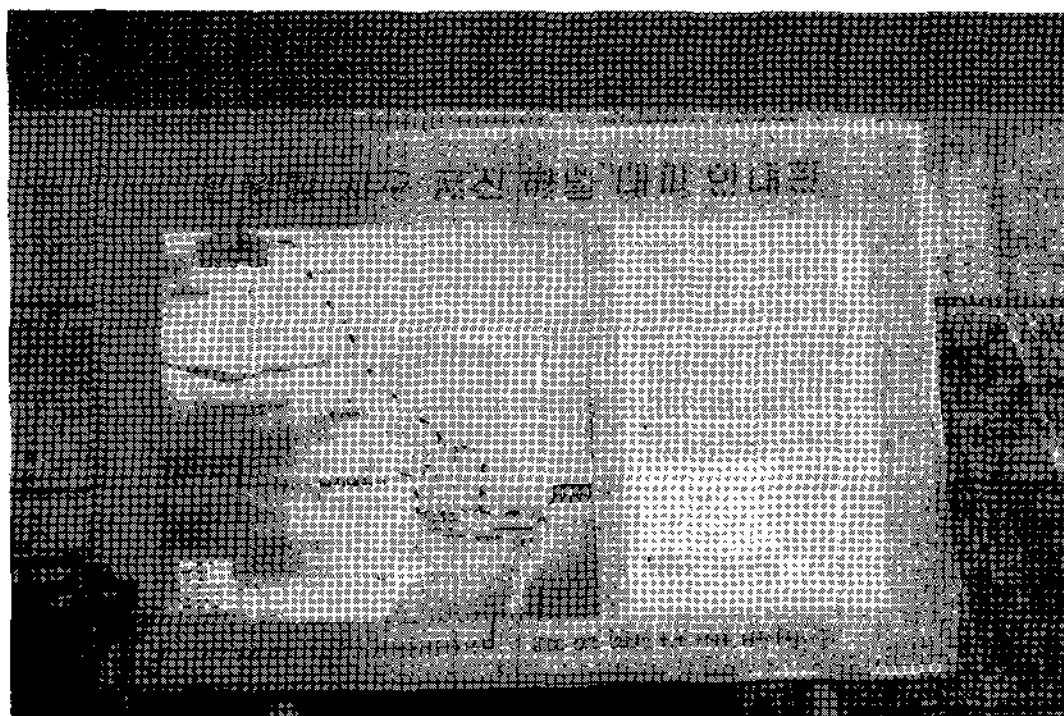


그림 15. 임원항 지구 지진해일 대피 안내판

우리나라에서 지진해일과 관련한 대민 방재 정책의 첫걸음은 지진해일을 알리는 데에 있다. 지