

# 지진 및 지진해일 발생원인에 대해



김 준 경 | 세명대학교 자원환경공학과 교수

## 1. 서론

최근 2004년 12월 24일 인도네시아 서부말단 부근 해저에서 지진이 발생하였고, 이 지진은 1900년 이래로 현대장비를 이용하여 지진을 관측한 시작한 후 규모면에서 순서를 따질 경우 5번째에 해당하는 슈퍼급의 대지진이다. 특히 이번 지진은 해양에서 발생하였기 때문에 지반진동에 의한 재해뿐만 아니라 해양에서 발생한 해일이 인도양을 거쳐 수천 km 떨어져 위치하고 있는 몰디브, 스리랑카, 인도동부, 해안은 물론이고 인접국인 태국 등의 해안을 초토화 켜버렸다.

또한 2005년 3월 21일 일본 큐슈주 북쪽 해저에서 규모 6.3(미국지질조사연구소)의 지진이 발생하여 일본 지역 뿐만 아니라 국내에서도 부산 및 경남지역을 비롯하여 대부분 지역이 진동을 느꼈다. 따라서 지진이 아주 먼 나라의 현상이 아니고 우리의 일상생활과 아주 가깝게 존재하고 있고 또한 범국가적인 자연현상이라는 것을 매우 잘 입증하고 있다. 다행하게도 지진해일이 발생할 수 있는 조건을 충분히 만족시키지 못하였기 때문에 일본 해안 지역은 물론이고 국내의 도서 및 해안지역에 직접적인 영향은 거의 없는 것으로 확인되고 있다.

현대는 도시의 급격한 팽창으로 인구의 밀집화, 구조물의 대형화 및 원자력발전소 및 방사성 폐기물 처분장 등 중요 기간시설들이 증가함에 따라 지진재해뿐만 아니라 기타 자연재해에 대해 위험이 기하급수적으로 증가하고 있다. 특히 현대사회에서는 인명과 재산의 직접적인 손실뿐만 아니라 정상적인 사회기능이 마비되는 모든 현상을 재해로 규정하고 있다. 또한 현대사회의 다양한 기능은 통신, 수도, 전기, 가스, 철도 및 지하철 등의 생명선(Life-line)으로 밀접하게 구성되어 있는 바 이들 생명선의 일부가 파괴되어도 전체 도시기능이 연쇄적으로 마비되는 특징을 지니고 있다.

이런 문제를 해결하기 위해 UN에서는 제44차 총회에서 150여개 국가가 합의하여 1990년대의 10년간을 국제 자연재해 감소기간(International Decade of Natural Disaster Reduction; IDNDR)으로 결의하고 모든 나라가 자연재해로부터 인명, 재산 및 고통을 경감하기 위한 노력을 해 왔었다. 또한 세계보건기구(WTO)의 보고서에 의하면 1964년부터 1983년까지 20년 동안 자연재해에 의한 사망자 수는 200만 명이 넘고 직접적인 경제손실은 연간 200억 불을 넘는다.

## 2. 지진현상이란?

지진현상이란 지구 내부의 다양한 변화에 의해 일어나는 두꺼운 암석판의 운동이나 지구내부가 역학적으로 균형을 잡기 위하여 돌발적으로 일어나는 지구 내부 물질의 요동현상이다. 지진현상을 인간에게 굳이 비유하자면 사회활동을 통하여 여러가지 요인으로 몸속에 일정 기간동안 축적된 스트레스를 한순간에 갑자기 발산하는 현상이다.

지구 내부물질의 일부에 변형력이 지속적(시간)으로 그리고 집중적(공간적)으로 작용하여 암석들이 순간적으로 쪼개질 때, 이 지점에 국지적으로 모인 탄성·화학·중력에너지가 갑자기 방출되어 생긴 지진파가 지면에 도달하면 지표의 요동이 일어난다.

지진의 크기를 나타내는 규모(Magnitude)는 민감한 지진계로만 검출되는 아주 작은 규모의 지진으로부터 광범위한 지역에 큰 피해를 주는 대규모를 나타내는 값까지 광범위하다. 전 세계적으로 매일 지구상에서 발생하는 지진은 작은 규모부터 대규모까지 약 수천 개에 이른다. 대부분의 지진의 성인을 살펴보면 수억년 내지 수천만 년이라는 오랜 기간에 걸쳐 점진적으로 거대한 대륙의 이동, 대서양 및 태평양 등 해저의 확장, 산맥의 형성 등에 작용하는 지구 내부의 커다란 힘에 의하여 발생된다. 이 밖에도 화산활동으

로 지진이 발생하지만, 이 경우에는 그 규모가 비교적 작다. 또한 폭발물에 의해 인공적으로 지진이 발생하기도 한다. 1900년대 이후 현대적인 장비를 이용하여 관측이 시작된 이래로 발생한 주요 지진은 표 1과 같다.

## 3. 지진 발생원인과 주요 발생지

대부분의 지진 즉 지구 내부암석에 쌓인 응력의 발산은 기존의 약한 부분에 응력이 집중되어 내부암석의 쪼개짐 즉 단층(斷層)과 함께 발생한다. 이를 보다 자세히 설명하면 내부암석에 변형시키는 힘이 집중되고, 변형이 점차 심해지면 내부암석에 탄성에너지가 모인다. 변형이 보다 심해지고 변형력이 물질의 강도를 초과하게 되고 이런 경우 암석이 쪼개져 어긋나며 단층이 생긴다. 이 점을 진원(震源)이라고 하고, 진원으로부터 수직방향으로의 지표상의 지점을 진앙(震央)이라 한다.

진원에서의 어긋남은 인접지역 변형력을 증대시켜 더욱 넓은 지역의 암석이 쪼개지는 단층현상이 전파되어 나간다. 이 때 지각의 양면이 쪼개져서 갑자기 반대방향으로 튕겨짐에 따라 주위에 모였던 탄성에너지가 파동에너지로 바뀌어 지진파가 사방으로 전파해

표 1. 주요 대규모 지진발생 목록

| 지진발생지역           | 규모  | 지진 발생일       | 피해정도                                       |
|------------------|-----|--------------|--|
| 칠레지진             | 9.5 | 1960년 5월 22일 | 산티아고 해일 발생, 5,000여명이 사망, 200만 명 이상 이재민 발생  |
| 알래스카해안 지진        | 9.2 | 1964년 3월 28일 | 125명 사망, 약 326조원 재산피해                      |
| 알래스카 지진          | 9.1 | 1957년 3월 9일  | 약 15m가 넘는 해일이 발생, 하와이를 비롯하여 서사모아 제도 지역에 영향 |
| 캄차카반도 지진         | 9.0 | 1952년 11월 4일 | -  |
| 인도네시아 수마트라섬 서부지진 | 9.0 | 2004년 12월26일 | 현재 약 10만 명 이상 사망 추정                        |
| 일본 칸토지진          | 8.3 | 1923년 9월 1일  | 약 14만 명 사망                                 |
| 중국 당산지진          | 8.0 | 1976년 7월 28일 | 약 60만 명 사망                                 |

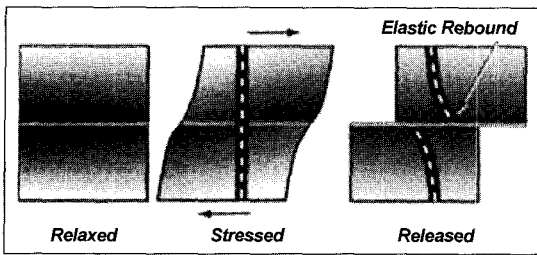


그림 1. 지진발생과 탄성반발설

간다. 이 이론을 탄성반발설(彈性反撥說)이라 하는데, 진원이 지하 70km 이내인 천발지진(淺發地震)의 발생을 설명해 주며, 1906년 샌프란시스코의 지진발생 후 H. 레이드가 제시하였다(그림 1).

장기적으로 지구상에서 지진이 발생하지 않는 지역은 없다. 하지만 세계에서 지진활동이 활발한 지역은 크게 2개의 띠를 이루고 있어 거의 정해져 있다고 할 수 있다. 2개의 커다란 지진대중에서 세계에서 지진활동이 가장 활발한 태평양 연안을 둘러싸고 있는 환태평양지진대(環太平洋地震帶)가 있고, 이 지진대는 남미, 및 북미 대륙의 서해안에서 알류산열도·캄차카반도·쿠릴열도·일본·필리핀·동인도제도를 거쳐 뉴질랜드로 이어져 있다. 대부분의 슈퍼급의 지진이 환태평양지진대에서 발생하여 왔다. 또한 알프스-히말라야지진대가 활발한 활동을 하고 있으며, 이 지진대의 띠는 대서양의 아조레스 제도에서 지중해·중동·인도 북부·수마트라섬·인도네시아를 거쳐 환태평양 지진대와 연결된다.

또 다른 매우 좁은 지진대가 대서양·태평양·인도양을 잇는 해저산맥을 지나고 있으나 일반적으로 규모는 작다고 할 수 있다. 이렇게 현재 활발하게 활동하고 있는 지진대에 비해 캐나다·브라질·오스트레일리아·인도·아라비아반도·남아프리카·시베리아 등 주요 대륙의 내부지역과 해양저 지역에서는 일반적으로 지진활동이 매우 드물다.

앞서 설명한 바와 같이 지진이 왜 특정한 지진대에서 많이 발생하며, 또한 지진이 발생하더라도 지역에

따라 대규모 혹은 작은 규모의 지진이 발생하는 특징적인 현상에 대해 과학자들이 많은 연구를 기울여 왔다. 뿐만 아니라 해저산맥에서는 천발지진이, 해구의 베니오프 지역에서는 심발지진이 발생하는가에 대해서는 1960년대에 이르러 판구조론(板構造論)이 도입되기 전까지 지진학에서 미해결의 문제였다.

#### 4. 대규모 지진, 지진밀집 지역과 판구조론

판구조론(Plate tectonics)에 의하면, 지구의 표면은 평균두께 약 100km의 여러 개의 암석권(lithosphere) 또는 암석판으로 이루어져 있고(그림 2), 강체(剛體)의 성질을 가진 이 암석판들은 그 바로 하부의 연약권(asthenosphere) 위에서 미끄러지면서 지구생성 이래로 수억년 동안에 걸쳐 지구표면을 움직여 다닌다. 이러한 암석판은 해저산맥에서 생성되며 해구로 향해 여행하다가 결국 해구에서 연약권으로 떨어지면서 소멸한다. 암석판들은 그 내부에서는 단층이나 습곡 등 지각변형이 잘 발생하지 않고, 특히 주위 암석판들과의 경계지역에서 서로의 마찰에 의해 지진을 포함한 여러 가지 복잡한 지질활동이 일어난다.

암석판은 온도가 낮은 견고한 암석권인데 비해 연약권은 고온이고 소성변형이 가능하다. 지구 내부의 방사성원소 붕괴로 발생하는 열로 연약권에서 맨틀물질의 열적대류(熱的對流)가 일어나고, 해저산맥을 이



그림 2. 암석판의 경계 및 2개의 지진대

루는 암석권이 쪼개지며, 천발지진이 발생하고 양쪽으로 벌어진다. 이 틈으로 마그마가 상승하여 냉각되면 새로운 해양암석판이 만들어진다.

판구조론에 의하면 2개의 거대한 암석판이 충돌하면 바다를 여행하여 왔기 때문에 상대적으로 무거운 암석판이 다른 가벼운 암석판 밑으로 침강하면서 가벼운 암석판을 밀어 올려 안데스, 알프스 및 히말라야 같은 거대한 산맥을 만들었다. 특히 인도-오스트레일리아 판이 유라시아판의 남쪽 부분을 밀어 올린 히말라야 산맥은 해발 8km 이상으로 밀려올라 간 결과이다.

거대한 암석판이 침강하고 밀어 올리는 과정에서 두 단층판 사이에서 마찰이 작용하게 되고 암석판의 내부에 거대한 스트레스가 수십 년 혹은 수백 년 동안 차곡차곡 쌓이게 된다. 쌓인 스트레스가 암석판이 견딜 수 있는 한계를 넘거나, 두 암석판을 미는 외부 힘이 두 암석판 사이의 마찰력을 초과하게 되면 버티지 못하고 암석판 내부에서 갑자기 단층을 수반하면서 수십 km에서 수백 km 정도의 길이가 쪼개져 버리거나, 로킹되어 있던 두 암석판 사이가 갑자기 미끄러져 버린다. 이 순간 갇혀 있던 막대한 탄성에너지가 아주 짧은 시간에 방출하게 된다. 이러한 현상에 의해 슈퍼급의 지진이 발생하고 또한 2개의 암석판 사이의 거대한 마찰열에 의하여 암석판 물질이 일부 녹아 마그마가 형성되어 지표로 노출되어 화산을 형성한다. 따라서 슈퍼급의 지진은 암석판 경계부에서 주로 발생한다. 최근 인도네시아 수마트라섬 지진의 경우 암석판의 쪼개진 수평길이가 1,000km(부산에서 신의주까지 직선길이보다 훨씬 긴 거리)가 넘는 거대한 지진으로 일본의 관련 연구소가 발표하였다.

그러나 드물게는 판의 내부에서도 지진이 발생하는데, 그 이유는 충분히 밝혀지지 않았으나 판의 운동과 암석판 내부물질의 기존의 약한 부분에 응력집중 특성과 관련된 것으로 제시되어 있다. 판내부의 지진도 규모가 의외로 대규모인 경우도 있고 규모에

비해 약 60만명이라는 사상 초유의 인명피해를 야기한 중국 당산지진이 대표적인 예이다.

특히 앞 경우처럼 서로 다가서는 방향으로 암석판이 충돌하는 경우도 있으나 암석판들 사이의 운동방향이 경계에 거의 평행일 경우가 있고, 캘리포니아의 샌앤드레아스 단층(San Andreas Fault)이 그 대표적인 예이다. 미국에서 발생하고 있는 지진의 90퍼센트 이상이 샌앤드레아스 단층에서 발생하여 왔다. 따라서 세계의 주요 지진대는 모두 암석판의 경계 부분이며, 암석판의 내부에서는 지진활동이 비교적으 낮다.

## 5. 해일과 지진

해일은 태풍과 같이 기상현상에 의해서도 발생할 수도 있으나 여기서는 해저지진에 의한 해일을 말한다. 지진해일은 일명 쓰나미라고도 하며 해저에서 일어나는 지진이나 화산폭발 및 해저 산사태 등에 의해 유발되는 해일현상을 말한다. 기상현상에 의한 해일과는 달리 지진해일은 매우 긴 주기의 장파가 아주 빠른 속도(평균수심이 약 2,000m일 경우 시속 560km 정도)로 대단히 멀리까지 전파되며 연안에서는 특히 매우 높은 파고로 전환된다(그림 3 참조). 따라서 지진해일에 의한 인명 및 재산피해는 연안지역에서는 천문학적으로 커질 수 있다. 칠레지진의 경우 지진해일이 약 20,00km 떨어져 있는 일본 열도의 연안까지 그 영향을 미쳤다.

지진해일은 아주 잘 발달되는 조건이 따로 있고 이 조건은 진앙은 해저, 지진규모는 약 6.3이상, 진원깊이는 해저 바닥으로부터 심도 약 80km 이내, 압축응력이고, 거의 수직단층이다. 최근 대재앙을 일으킨 인도네시아 지진도 규모는 9.0, 진원심도 약 6 km, 압축응력 그리고 거의 수직단층 등 모든 조건을 만족하였기 때문에 지진해일이 아주 잘 발달되었고 수천

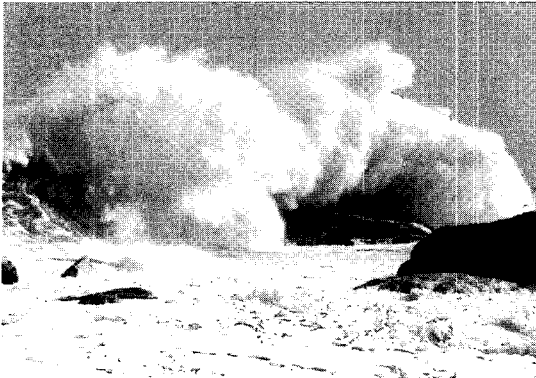


그림 3. 지진해일의 예

km 떨어져 있는 몰디브, 인도, 스리랑카 등의 해안을 약 10m의 파도 높이를 가지고 덮었다.

현재 한반도에 영향을 미친 지진해일의 대부분은 일본 북해도 서쪽해안 즉 동해안 지역의 역단층대에서 발생한 지진에 의한 것이었다. 1960년대 이후 일본에서 발생하여 동해안까지 도달한 지진해일은 1964년 6월 16일에 발생한 니이гада 지진해일, 1983년 5월 26일 동해중부 지진해일 및 1993년 7월 12일 일본 북해도 지진해일 등이 있다. 특히 1983년 5월 26일 동해중부 지진해일은 인명피해로는 사망 1명, 실종 2명, 부상 2명 그리고 재산피해는 소형 선박 81척 및 건물시설 100여건 등의 피해를 주었다. 그리고 1993년 7월 12일 일본 북해도 지진해일은 소형선박 35척 및 어망 및 어구 등 3,000여건의 피해를 주었다.

## 6. 국내 지진발생 특징과 대책

우리나라는 판경계로부터 아주 멀리 떨어진 지역에 위치하고 있고 이러한 지역에서 발생하는 판내부지진(Intraplate Earthquake)은 판경계부(Interplate Earthquake) 지진에 비해 일반적으로 규모가 작고 발생빈도도 작다. 판내지역 환경에서는 대규모 지진

의 발생 재래주기는 지역에 따라 수백 년에서 수만 년에 이르기기도 한다. 이러한 점에서 근래에 한반도 주변에서 대규모 피해를 일으킨 지진이 대규모 지진이 발생하지 않고 있으나 앞으로도 계속 우리나라에서 큰 규모의 지진이 발생 않는다고 속단할 수 없다.

약 2,000년에 걸친 우리의 역사문헌 기록에는 대규모 지진이 발생하여 100여명의 인명피해를 내는 등 상당한 정도의 피해를 발생시킨 지진기록이 다수 존재한다. 또한 우리나라에서 20세기 이후로 피해를 일으킨 지진은 1963년 지리산 쌍계사 지진과 1978년 홍성에서 발생하였던 지진으로 알려져 있다. 또한 동해에서는 규모 5.7 이상의 지진이 1960년대에 2회 발생한 사실이 있고 특히 1952년 한국전쟁 동안에 북한의 평양부근 강서에서 발생한 지진은 북한 지진연구소에 따르면 규모 6.3으로 평가되었다. 따라서 한반도는 지진으로부터 완전하게 안전하다고 말할 수 없다.

지진이란 현상은 자연적인 현상으로서 지진발생을 인간의 힘으로 억제할 수 없고 이에 효과적으로 대비를 하여야 한다. 보다 효과적인 대비를 위해 현재 가능한 최신의 과학적인 방법을 이용하여 지진이라는 자연현상이 발생할 가능성 혹은 연발생확률(지진규모, 발생장소 및 발생일 등)을 정량적으로 평가할 필요가 있다. 이를 위해서는 계속적으로 우리 주변에서 계속 발생하고 있는 지진이라는 자연현상에 대해 관측자료를 지속적으로 수집, 분석 및 평가하여 한반도에 고유한 지진발생 원인 규명 등에 대한 기초연구가 선행되어야 하고 국내에서도 현재 이러한 연구가 일부 수행중이다.

지진이라는 현상은 느닷없이 돌발적으로 일어나는 현상이 아니고 판구조운동에 의해 오랜 기간 동안 스트레스가 축적되면서 한계점에 도달하고 일시에 쌓여 있는 에너지가 방출되는 현상이다. 따라서 발생준비과정으로서 암석판내에 물리 및 화학적인 변화가 오랫동안 계속되어 인간에게 전조현상을 귀뜸해 주고

있는 것이 사실이나 아직 현재의 과학수준으로는 완전하게 이해할 수 없는 현실이다. 따라서 이들 현상에 대한 장기적인 모니터링 및 체계적인 해석을 통해 우리나라 주변 지진발생 메커니즘을 이해하고 장래 지진예보에 필요한 자료를 제공할 필요가 있다. 이러한 작업은 장시간을 두고 국가적인 연구사업으로서 지속되어야 한다.

그리고 지진발생이라는 자연현상을 억제하지 못한다 하더라도 대재난을 최소한으로 감소시키기 위해 국가적으로 지진조기경보시스템을 구축하는 것이 반드시 필요하다. 이웃나라 일본은 세계에서 보기 드문 지진 다발국이지만 지진조기경보시스템이 사회의 주요 기간시설인 신간선 고속열차 및 원자력발전소 등에 체계적으로 구축되어 있어 지진재해에 효과적으로 대비하고 있다.

지진해일의 경우 국내에 영향을 주는 지진원이 일본 북해도 부근 지역의 지진원으로 거의 규명되어 있고, 이 지역에서 발생한 해일이 우리나라 동해연안에 도달하는 데에 약 2시간 정도가 걸리는 것으로 이미 여러가지 연구결과를 통해 알려져 있다. 따라서 우리나라도 동해안 일부에 지진해일 조기경보시스템이 구축되어 있으나 향후 해일과 같은 대재난에 효과적으로 대응하기 위해 보다 체계적으로 관리하는 것이 필요하다. 이러한 해일 조기경보시스템을 구축을 위해 우리나라, 일본, 러시아 및 중국 등 주변 국가간의 공동협력체제가 원활하게 이루어져야 한다.

나아가서 국내 원자력발전소에서는 일부 수행되고 있지만 민관 협조체제를 유지하면서 지진 및 지진해일에 대비한 방재훈련이 평소 얼마나 효과적으로 이루어지고 있느냐 하는 것도 대단히 중요하다.