

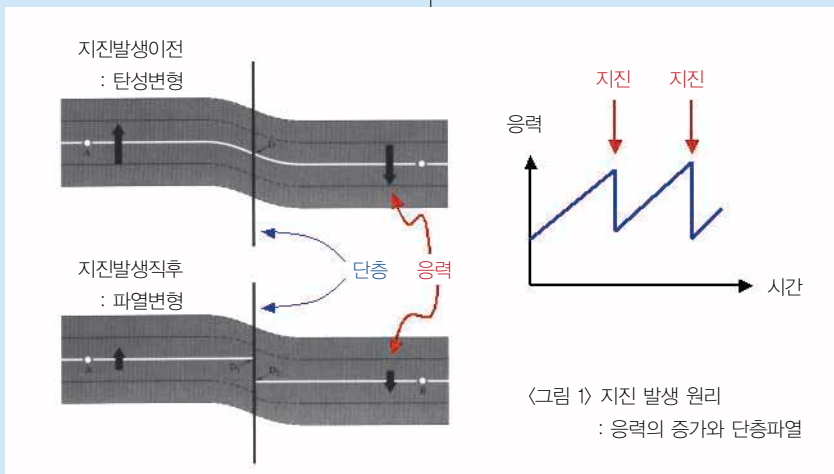
지진을 일으키는 힘 '응력'과 '변형'

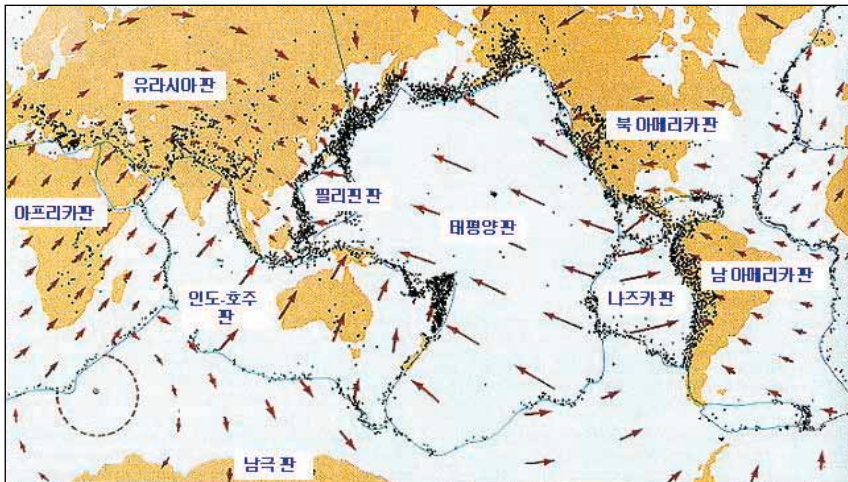
01

글_ 박창엽 서울대학교 지구환경과학부 교수 baagce@snu.ac.kr

건물 밖 넓은 정원에서 정원사가 나뭇가지를 다듬는 소리만 들리는 조용한 어느날, 갑자기 책상 위에 놓여 있는 찻잔이 떨고, 앉아있는 의자가 흔들리기 시작한다. 곧 집 전체가 흔들리면서 방안의 물건들이 넘어지거나 떨어지고, 가구들이 움직여서 이리저리 부딪친다. 앉아있음에도 불구하고 균형을 잡을 수가 없다. 유리창이 깨지고 창문틀이 부서져 바깥으로 떨어져 나간다. 그 뚫어진 창밖으로 바라보니 넓은 잔디밭의 땅이 마치 파도치는 것처럼 느껴진다. 건너편 집이 무너져 내린다. 잠시 후 정신을 차려보니 진동이 멎었다. 그러나 온 사방에서 사람들이 소리치며 뛰어나오고, 저 멀리 조밀하게 모여 있는 집들 중 몇 채의 집에서 화재가 발생한다. 그 연기는 바람을 타고 널리 퍼지고, 독한 냄새에 사람들이 숨을 쉬기 어렵다. 라디오 방송을 통해 지진 발생과, 여기

저기의 지진 피해 소식이 들려온다. 도시에서는 수많은 집들과 고가도로가 무너지고 누전과 가스관 파열로 화재 피해가 심각하다고 한다. 그로부터 수 시간 뒤에는 먹구름이 몰려와 검은 비가 쏟아진다. 그 후 며칠 동안 여진이 발생하여 사람들을 공포에 휩싸이게 한다. 모든 것이 파괴된 후 전염병이 나돌고, 사회의 무질서를 틈타 도둑들이 들끓고 폭력이 난무하게 된다. 이와 같이 큰 지진은 자주 일어나는 것은 아니지만 일단 발생하면 자연재해 중에서도 가장 무서운 존재이다.





〈그림 2〉 지진과 판의 분포. 검은 점은 지진의 위치, 녹색 선은 판의 경계선, 그리고 화살표는 판의 이동 방향을 나타낸다.

일본·미국서부·동남아시아·터키 등에 큰 지진 집중

지구표면 가까이 대륙지각은 약 30km, 해양지각은 약 5km로 얇은 두께의 지각이 있고, 그 아래에 지구반경의 약 1/2에 해당하는 2천900km 깊이의 맨틀이 있다. 지각과 맨틀은 모두 고체상태의 암석으로 이루어져 있다. 그러나 구성성분이 달라서 상대적으로 지각은 가벼운 물질로, 맨틀은 무거운 물질로 이루어져 있다. 딱딱한 암석으로 구성된 지각이 오랜 세월 동안 응력을 받으면 변형에너지가 축적된다. 지각의 어느 약한 부분이 탄성한계를 넘어서 순간적인 단층운동을 일으키며 움직일 때 주위에 그 진동 에너지를 방출하는 현상이 나타난다. 이것이 바로 지진이다(그림 1 참조).

지진 다발지역에서 지질학적인 응력은 지속적으로 가해지기 때문에 지진은 반복적으로 발생한다. 즉, 가해진 응력이 당시의 조건에 맞는 어떤 상한계에 이르게 되면 큰 지진이 발생하게 되고, 이 때 응력 상태는 어느 하한계의 응력으로 떨어지게 된다. 그 뒤 장구한 세월이 흐르는 동안 응력이 점점 증가하고 그로 인해 탄성변형이 축적된다. 응력이 당시의 조건에 맞는 상한계에 이르면 다시 큰 지진이 발생하고 응력이 떨어지게 된다. 이러한 과정을 거쳐서 지진이 간헐적으로 발생하게 되는 것이다.

평소에 마스크를 통해서 수개월 또는 수년 만에 한번씩 지진발생과 피해에 대해서 소식을 듣게 된다. 즉 큰 지진은 지속적으로 일어나는 것이 아니고 예기치 않은 때에 일어난다. 또한 발표되는 발생 지역도 전세계에 고르게 분포하지 않고 일본, 미국서부 지역, 동남아시아, 터키 등의 일부 지역에 집중된다. 지구상에서 발생한 지진의 분포를 보면(그림 2 참조), 대부분의 지진은 태평양을 둘러싼 환태평양 지진대와, 지중해-이란-티베트고원-수마트라-자바섬을 연결하는 지진대에서 발생한다. 14만 명이 사망한 1923년도의 일본 간토 대지진, 2만3천 명의 희생자를 낸 1939년 터키지진, 1만4천 명의 사

망자를 낸 1962년 북서 이란 지진, 6만6천 명이 사망한 1970년 페루지진, 2만5천 명이 사망한 1988년 아르메니아 지진, 1995년도 미국 LA 지진과 일본 고베지진, 23만 명의 희생자를 낸 2004년도의 수마트라 지진 등이 이 지진대에서 발생했다.

이들 지진대에 속하지 않으면서도 큰 지진이 일어나는 곳도 무시할 수 없을 정도로 많다. 1811년의 미국 뉴마드리드 지진, 25만 명이 사망한 1976년 중국 당산 지진 등이다. 이들 지진들도 그 지역 내에서 발생위치가 무작위로 분포하는 것이 아니고, 집중과 분산된 현상을 보인다. 그 외에도 바다에서 일어나는 지진으로 태평양 대서양 인도양 등의 대양을 가로지르는 띠 모양의 지진대가 있다. 이들 지진은 사람이 사는 육지와 멀리 떨어져 있어서 일반적으로 큰 위협이 되지는 않는다.

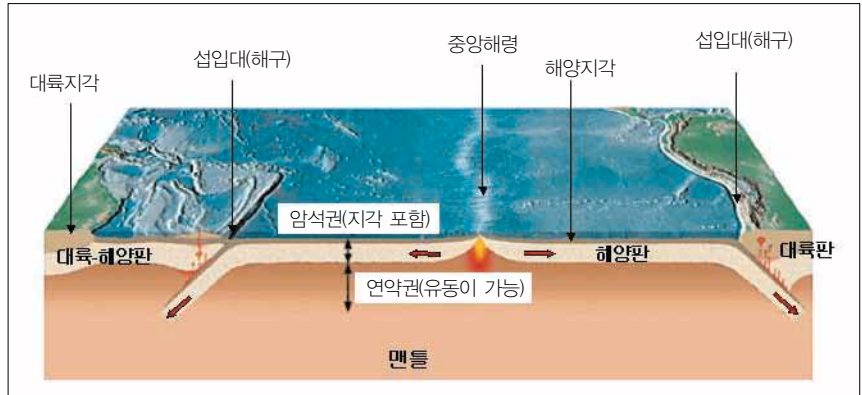
'맨틀의 대류'로 해양판·대륙판 만들어져

딱딱한 암석으로 구성된 지각에 지진을 유발하는 응력과 변형이 생기는 이유는 지구 내부의 고온의 열이 지구 밖으로 방출되는 과정에서 기인한다. 지구는 46억 년 전 생성 당시부터 내부에 고온의 열을 가지고 있는데, 내부와 표면 사이에 커다란 온도 차이가 있어서 내부에서부터 바깥으로 열의 이동이 일어난다. 지구 내부를 구성하는 암석 물질은 열전도도가 매우 낮아서 이러한 에너지 이동은 주로 내부 물질의 순환에 의해 일어난다. 지구 자체의 중력장 속에서 온도가 높아 밀도가 작아진 물질은 위로 뜨고, 온도가 낮아지면 다시 가라앉는다. 이와 같이 지구내부의 맨틀물질의 상하이동 현상을 맨틀의 사

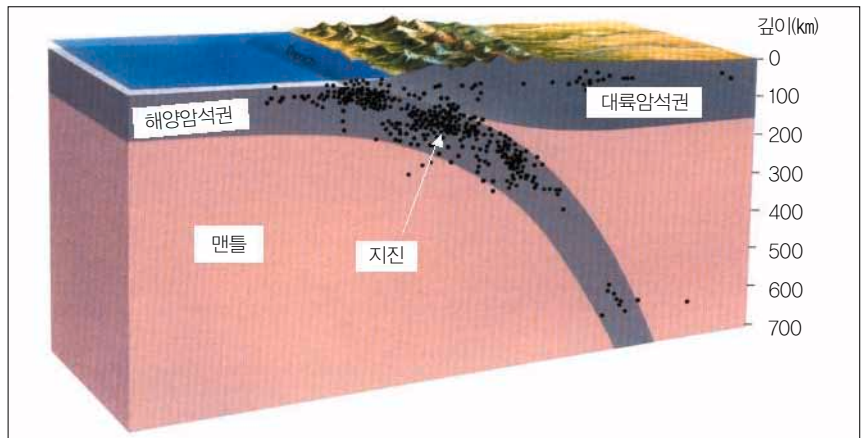
대륙이라 한다(그림 3 참조). 맨틀 물질은 지표로 올라와서 지구 내부의 열을 발산하고 식으면 다시 지구 내부로 들어가게 되고, 그 후 지하 깊은 곳에서 온도가 올라가면 다시 상승하는 순환 운동을 지속하고 있다.

대륙운동에 의해 맨틀물질이 중앙해령에서 상승한 후 지구 표면을 따라서 수평으로 움직이는 동안에 온도가 낮아지기 때문에 지구표면 부근에는 100km 정도의 두께로 딱딱한 암석권이 형성된다(그림3 참조). 이와 같이 맨틀물질의 상승으로 형성된 암석권은 주위보다 밀도가 상대적으로 크기 때문에 무거워서 그 표면의 고도가 지구표면의 다른 곳보다 낮고, 그 위에는 물이 괴어서 해양이 형성된다. 이러한 암석권은 해양암석권으로 분류된다. 대륙 쪽에는 상대적으로 밀도가 작고 가벼워서 지구내부로 침강하지 않는 대륙암석권이 있다. 이들 해양 및 대륙암석권의 대부분의 물질은 맨틀물질로 구성되어 있지만, 그 최상부는 얇은 지각으로 이루어져 있다. 그리고 그 암석권 아래에는 상대적으로 덜 딱딱하고 유동성이 강한 연약권이 있다.

중앙해령에서 생성된 해양암석권은 연약권 위를 미끄러지듯이 수평으로 이동하는 동안 열을 발산해 시간이 흐를수록 온도가 낮아지고 그 두께도 두꺼워지며 밀도도 커진다. 장구한 세월이 흐르면 더욱 무거워져서 가장 오래된 부분이 해구에서 대륙암석권 또는 다른 해양암석권 아래로 비스듬하게 섭입해 깊은 맨틀 속으로 들어가 그 존재가 없어지게 된다. 이와 같이 중앙해령에서부터 해구에 있는 섭입지역까지 뻗어 있는 판 모양의 해양암석권을



〈그림 3〉 판구조운동 : 해양판의 생성, 확장 및 소멸



〈그림 4〉 해양판 섭입 지역의 지진발생

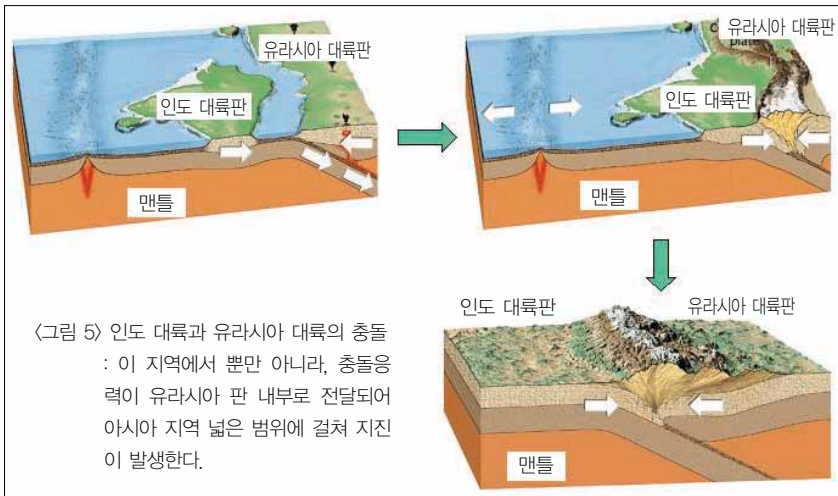
해양판이라 하고, 대륙암석권으로 이루어진 판을 대륙판이라 한다.

지구표면의 암석권은 여러 개로 나누어져서 그 폭이 수백 km에서부터 수만 km에 이르는 수십 개의 판으로 이루어져 있다(그림 2 참조). 이들 중에서 큰 것으로는 유라시아판, 북미판, 남미판, 아프리카판, 태평양판, 인도-호주판, 남극판, 아라비아판, 필리핀판, 나스카판 등이 있다. 태평양판, 필리핀판 및 나스카판은 해양암석권으로만 이루어져 있지만, 그 외 대부분의 큰 판들은 대륙 및 해양암석권으로 구성되어 있다. 대륙암석권은 두께가 약 100km 정도가 되지만 해양암석권은 그 연령에 따라 보통 60~70km 정도가 된다. 이들 판이 수평으로 움직이면서 소위 판구조 운동이 일어난다.

판과 판 사이의 경계는 중앙해령, 섭입대(해구), 그리고 변환단층의 3가지가 있다. 판이 생성되는 곳이 중앙해령, 소멸되는 곳이 해구이다(그림 3 참조). 이에 비해 판이 생성되거나 소멸되지 않고 두 개의 판이 서로 스쳐지나가는 곳이 변환단층이다.

한반도 지진은 판 내부 지진

지구 표면에 분포된 여러 개의 판이 수평으로 움직이면서 판과 판 사이의 상호작용으



로 판 경계부에서는 많은 지진이 발생한다. 해양판이 해구에서 다른 판 아래로 비스듬히 하강(섭입)할 때는 딱딱한 양쪽의 판이 서로 부딪쳐서 마찰이 일어난다. 이 마찰 때문에 오랜 세월 동안 움직이지 못하고 서로 버티고 있다가, 어느 한 순간에 탄성한계를 넘어 순간적인 단층운동을 일으키며 지진이 발생한다(그림 4 참조). 환태평양지진대의 지진들 중에서 알류산해구, 쿠릴해구, 일본해구, 이주-보닌해구, 페루-칠레해구 등에서 일어나는 대부분의 지진은 이와 같은 섭입대에서 발생한다(그림 2 참조). 인도양의 수마트라-자바 해구에서도 같은 원인으로 지진이 발생한다. 히말라야 산맥을 경계로 남쪽의 인도-호주 판이 북쪽의 유라시아 판 아래로 섭입하여, 현재 인도 대륙과 티베트고원이 서로 충돌상태에 있다. 그러므로 이 지역 역시 지진이 많이 발생한다.

또 하나의 판 경계로서 변환단층을 사이에 두고 두 개의 판이 서로 반대 방향으로 움직이며 마찰을 일으켜 지진이 발생한다. 미국 서부지역에서 큰 지진을 자주 일으키는 산안드레아 단층과 터키 북부에 동서로 놓여 있는 아나톨리아 단층이 그 예다. 그 외에 중앙해령에서도 지진이 발생한다. 전세계적으로 일어나는 지진을 지도상에 표시해 보면 지진의 위치가 지도상에 고르게 분포하지 않고 곡선의 띠 모양으로 분포를 하게 되는데, 이것이 판의 경계이다(그림 2 참조).

판의 경계부에서 판 상호간에 작용하는 응력은 그 자리에서 지진으로 모두 소비해 버리는 것이 아니라 일부는 판의 내부로 전달된다. 그 응력은 판 내부의 지각에서 전단강도가 약한 부분에 단층을 형성시키고 지진을 유발한다. 단층의 양측면에 작용하는 응력의 크기가 어느 탄성한계내에 있을 경우에는 탄성변형을 일으키고, 응력이 증가하여 한계 이상이 되는 순간 단층이 움직이면서 지진이 발생한다. 1811년 미국 뉴마드리드 지진, 1976년 중국 당산 지진은 판 내부 지진이며 한반도에서 일어나는 지진은 모두 판 내부 지진이다. 한반도 지진은 태평양판과 필리핀판에 가까이 있으면서도 멀리 히말라야 산맥 부근의 인도대륙-유라시아 대륙의 충돌대의 영향을 크게 받는다(그림 5 참조). 즉 인도 대륙의 북상으로 인해 북쪽에 있는 유라시아판에 응력이 가해진다. 그 응력은 티베

트고원을 거쳐서 멀리 한반도에까지 전달돼 지진을 일으키는 것이다.

리히터 등급별 32배 방출 에너지 차이 보여

지진의 규모는 진원에서 발생한 지진의 세기로 즉, 발생한 지진에너지의 크기를 나타내는 척도이다. 일반적으로 지진을 발생시킨 단층의 면적이 넓거나 단층변위 거리가 크면 방출되는 에너지의 양도 많으며 지진의 규모도 커진다.

지진규모의 등급은 1935년 미국의 리히터에 의해 처음으로 사용이 되었으며, 진앙거리 100km에 있는 우드 앤더슨 지진계에 기록된 지진파의 진폭을 기준으로 정해졌다. 이렇게 산정된 지진의 규모를 지진의 지역규모, 또는 리히터 규모라고 한다. 지역규모 1의 차이는 약 32배의 방출에너지 차이가 된다. 현재까지 발생한 지진 규모의 범위는 대략 1.0 이하에서부터 9.0까지이다.

진도는 지진이 일어난 부근의 지역(지표면)에서 지진의 진동으로 받은 영향, 또는 피해의 정도를 나타내는 양으로 진앙까지의 거리, 진원의 깊이 및 관측지점의 지반상태에 따라 값이 달라진다. 진도계급은 서구의 MMI(Modified Mercalli Intensity) 등급을 많이 쓴다. MMI 등급은 유감 및 피해 정도에 따라 1에서부터 12등급까지 나눈다. ㉔



글쓴이는 한국지진공학회 회장을 지냈다.