지질과학의 새로운 패러다임 "판구조론(Plate Tectonics)"과 지질현상

지진, 화산활동, 조산운동, 광상형성 및 기후변화 등 지구상에서 일어나는 모든 지질현상에 대한 이해의 해답을 제공하는 키(key)이며, 새로운 패러다임으로서 판구조론의 발전모델을 대륙이동설의 태동과 몰락, 맨틀대류설에 기초한 해저확장설의 등장을 거쳐 현재에 이르는 과정을 소개하고, 아울러 광상(ore deposit) 형성과의 상관성을 제시하고자 한다.

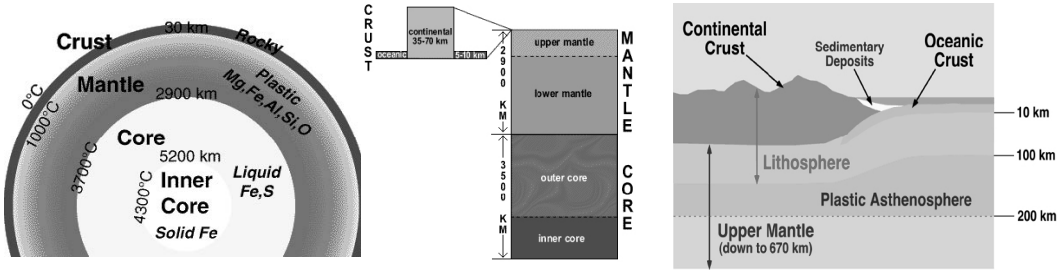
김성식 | 해외조사처

지구의 표층(껍질)인 지각은 대륙지각(continental crust)과 해양지각(oceanic crust)으로 이루어지며, 대륙지각은 35km, 해양지각은 5 10km의 평균 두께를 가진다. 이들은 6개의 큰 판(유라시아판, 아프리카판, 인도판, 태평양판, 아메리카판, 남극판)과 몇 개의 작은 판(필리핀판, 카리브판, 코코스판, 나스카판 등)으로 구성되어 있으며, 이들이 지구 내부에서 작용하는 힘에 의하여 연간 수 cm 정도의 속도로 서로 움직이고, 이에 따라 화산(volcano)작용, 지진(earthquake)현상, 마그마의 형성 및 습곡산맥 형성 등 각종 지각변동(diastrophism)을 일으킨다는 학설이 판구조론(板構造論)이다.

우리들은 근래 "지구가 살아있다"라는 얘기를 여러 매체를 통하여 흔히 들을 수 있으며, 이에 대한 구체적인 사실과 증거를 화산이나 지진활동에서 찾을 수 있다.

지금 이 순간에도 크고 작은 지진 및 화산활동이 전 세계 어디에선가 발생되고 있다. 그리고 우리 인간에게 때로는 해(害)로, 어떤 때는 자원으로서 다가오고 있는 것이다. 이러한 지질활동 및 결과적인 현상들은 판의 경계부에서는 끊임없이 발생하고 있으며, 직접 육안으로 혹은 전 세계에 설치된 관측소의 기록으로 확인가능하다. 특히 지진은 종종 우리 인간에게 크나 큰 재해로 다가오기 때문에 공포스러운 존재이며 같이하고 싶지 않은 존재로 인식되고 있는 게 사실이다.

화산성 지진이 일어나면 지면이 갈라지거나 해일(海溢)이 일어나고 폭풍이 부는 등의 피해를 주기도 한다. 또한 화산에서 나오는 분출물로 인하여 화재가 발생하여 많은 재산과 인명 피해가 따르기도 한다. 분출할 때 나오는 분출물이 건물이나 농경지를 뒤덮게 되기도 하며, 화산가스가 하늘을 덮어 햇빛을 차단하여 기후를 변하게 하는 요인이 되기도 한다. 반면에 최근엔 화산을 이용한 관광자원이 등장하였고, 땅의 열을 이용하



여 지열발전을 하기도하며, 건축에 쓰이는 여러 가지 석재, 황 등의 자원을 얻는 원천으로서의 이로운 점도 많다.

우리가 생활하는데 필요한 금속 및 비금속 원소와 각종 화합물은 대부분 광물의 형태로 지구 내부에 존재하고 있다. 지구구조 중에서 지각은 부피가 매우 적은 지구의 껍질에 지나지 않지만, 인간이 접근할 수 있는 곳은 지각뿐이다. 앞서 언급한 바와 같이 지각은 대륙지각과 해양지각으로 구분되어 있다.

이러한 지각에는 약 100여 종의 원소가 분포하며, 원소는 광물 및 화합물의 종류에 따라 함량이 각각 다르게 존재하고 있다. 이러한 원소 중에서 인간에게 유용하다고 판단되는 원소들이 극단적으로 불균질하게 농집되어 있거나 유용성분들이 다른 원소들과 화합물을 이루어 광물의 집합체를 이루고 있기도 한데 이러한 유용광물의 집합체를 광상(鑛床, ore deposit)이라 부르는 것이다.

지질 및 자원 전문가들은 우리 산업발전에 필수적인 원료광물을 찾기 위하여 이러한 광상을 효율적으로 탐사하여 부존상태를 알아내고 광상의 경제적 가치를 판단하며 아울러 효과적인 광산개발 방법을 결정하게 된다. 우리가 야외에서 찾고자하는 광상은 복잡한 지질영역(geologic process)을 거쳐 현재의 위치에 현상적으로 부존되어 있는 산물이며, 이들이 만들어진 원인(성인)과 과정을 지질현상(geological phenomena)을 고찰함으로서 간접적으로 찾을 수 있는 것이다. 현대에 들어와서 자원탐사 분야에도 괄목할 만한 획기적인 이론들이 발전되고 재정립되면서 보다 과학적이고 체계적인 해석들이 가능하게 되었다.

지구의 껍질인 지각의 거동에 대한 지질학적인 지식이 증가하고 판구조론(plate tectonics)에 의한 지구의 지체구조가 밝혀짐에 따라 광상의 성인(genesis)도 판구조론과 관련하여 해석되고 있다. 뒷부분에서 상술하겠지만 판(plate)의 수렴(convergent)경계에서는 해양판이 대륙판 밑으로 섭입(subduction)함에 따라 해양판이 재용융(partial melting)되어 생성된 마그마가 분출하거나 관입할 때 대규모 광상이 생성되기도 하고, 심해저의 확장(divergent)경계에서는 검은 열수(black smoker)가 엄청난 양의 황화광물(sulfides)을 분출하고 있으며, 판이 이동함에 따라 육지에 부가되어 생성되는 새로운 형태의 광상이 주목을 받기 시작하였다.

그동안 지질과학의 여러 현상들에 대한 해석에

있어서 보다 설득력이 있고 과학적이고 체계적인 이론들의 발전이 거듭되어 왔다. 따라서 이러한 이론들의 발전과정을 소개하면서 이들 이론들이 자원분야와 어떠한 상관성을 가지고 영향을 미치는가에 대한 이해를 판구조론의 모델로서 도움을 드리고자 한다.

베게너의 대륙이동설(Continental Drift)과 헤스와 디츠의 해저확장설(Sea-floor Spreading)에 이어진 지구자체 구조를 설명하려는 여러 학자들의 연구결과는 최종적으로 '판구조론(Plate Tectonics)'이라는 지구과학의 새로운 패러다임(paradigm)을 만들게 되었다.

대서양을 사이에 두고 있는 아프리카의 서해안과 남아메리카의 동해안의 윤곽이 잘 일치하고 있는데 착안하여 독일의 베게너(Alfred Wegener, 1915)가 대륙이동설을 제창한 후, 영국의 홈스(A. Holmes, 1928)는 맨틀 내의 열대류설(heat convection)을 제창하여 대륙을 움직이는 힘의 근원을 밝히는 데 성공하였다.

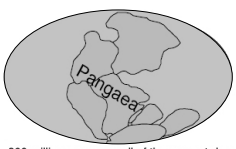
제2차 세계대전 이후 해령과 해구 등의 해양저 지형과 그 특징이 밝혀지고, 특히 여러 가지 현상으로 나타나는 지구자기의 연구 결과에 의해서 해령(oceanic ridge)을 중심으로 하여 해양저가 양쪽으로 확장하고 있다는 해양저확장설이 성립되었고, 이에 근거하여 판구조론이 정립되기에 이르렀다.

이와 같은 지질과학의 발전은 1960년대 초에 시작되어 70년대 중반에 이르러 이루어졌으며, 이 시기를 지질과학의 혁명기라고까지 말하고 있다. 판구조론에 의하면 대륙이 해양지각 위에 떠서 함께 움직이고 있다고 보고 있으므로 이같은 관점에서 본다면 이 이론은 새로운 대륙이동설이라고 볼 수 있는 것이다.

대륙이동설(大陸移動說, Continental Drift) 이란 ?

독일의 기상학자이자 탐험가인 베게너는 1912년 유사한 해안선들을 맞추어 세계의 여러 대륙이 하나의 거대한 초대륙(supercontinent)을 이루고 있다고 발표하였다. 베게너는 그의 생각을 뒷받침하기 위하여 수많은 여행을 통하여 증거를 수집하였다. 대서양 양쪽 대륙의 해안을 조사하여 그 곳에 분포하는 암석들이 동일한 시기에 생성되었으며, 같은 종류의 생물들이 서식하는 것을 알게 되었을 때, 그의 생각에 대한 확신을 가졌다. 그 후, 그 결과를 1912년 프랑크푸르트 암마인 학회에서 발표하고 1915년 소책자인 "대륙과 해양의 기원"(The Origin of Continent and Ocean) 초판본에서 수억 년에 걸쳐 감추어진 지구의 진실을 세상에 공개하였는데 이는 20세기 들어와 가장 격렬한 논쟁을 불러 일으켰다.

베게너는 수집한 증거들로부터 대륙이 이동하였음을 확신하게 되었고, 수차례 수정을 가한 그의 저서에서 대담하고 단순하게 지도에 표시된 모든 대륙들을 하나로 뭉쳐 이를 하나의 대륙이라는 의미의 팡게아(Pangaea), 즉 초대륙(supercontinent)이라 불렀으며, 현재의 대륙은 팡게아에서 분리되어 이동하였다고 주장하였다. 그는 '대륙과 해양의 기원'에서 초대륙 팡게아가 분열해서 오늘날과 같은 대륙의 분포가 형성되어 가는 과정을 그림으로 설명하였다.



200 million years ago all of the present-day continents combined to form a single supercontinent called Pangaea.



The distribution of glacial features can be best explained if the continents were part of Pangaea.

대체적인 분리의 모습을 살펴보면 약 2억 2,500만년 전에 대륙들은 하나의 거대한 대륙 팡게아를 이루고 있었다. 팡게아는 약 1억 8,000만년 전부터 분리되기 시작하여 로라시아라 불리는 북쪽 절반은 북으로 움직이고, 남쪽의 곤드와나 대륙은 떨어져 나오게 된다. 약 1억 3,500만년 전에는 인도판이 북쪽으로 움직이고 대서양과 인도양이 열리기 시작한다. 약 6,500만년전 부터는 대서양이 더욱 넓어지지만 오스트레일리아 대륙은 아직 남극 대륙에 붙어있다.

그 후 인도가 아시아에 충돌하게 되고, 오스트레일리아 대륙이 남극으로부터 분리된다. 북아메리카 대륙이 유라시아로부터 분리되고 남아메리카 대륙과 연결된다. 이와 같은 대륙의 분리에 대한 복원은 이 지구의 과거사를 보다 명백히 해주는 주요한 자료인 동시에 미래 지구의 모습을 추정하는 기초자료로 활용된다.

베게너는 지형학적인 증거, 지질학적인 증거, 기후학적인 증거, 고생물학적인 증거 등을 제시하여 대륙이 이동하였다는 것을 설명하였다. 여기에 지구물리학적(고지자기) 증거를 포함하여 오늘날 이들을 대륙의 이동을 지지하는 5가지의 간접 증거들로서 제시되고 있는 것이다.

- **지형학적 증거** : 북미, 남미, 유럽 및 아프리카가 하나의 대륙으로 잘 합쳐진다.
- **지질학적 증거** : 대륙을 합치면 같은 시대를 나타내는 암석들이 잘 연결된다. 즉 아프리카와 남아메리카의 중생대 퇴적층이 연속적으로 발견되는 것은 과거 한 덩어리의 대륙에서 함께 형성된 것을 의미한다.
- **기후학적 증거** : 현재 적도 바로 아래에서 남반구 쪽으로 분포하는 빙하의 흔적은 현재의 대륙 위치로는 설명이 되지 않으며, 과거에는 현재의 대륙이 남극 가까이 있었음을 나타낸다.
- **고생물학적 증거** : 남반구의 여러대륙에 분포하는 같은 종류의 고생물들은 대륙이 분리되어 있었다면 이동이 어려웠을 것이다.
- **지구물리학적 증거** : 고지자기로 측정된 두개의 극이동의 궤도가 대서양과 아프리카를 지나고 있다. 극(북극)이 두개일 수는 없으며, 이들 궤도를 합치면 대륙도 잘 일치한다.

그러면 당시 베게너의 대륙이동설이 인정을 받지 못한 이유는 무엇이얼까? 베게너가 제시한 대륙이동에 관한 이론은 당시 과학의 발전 단계 및 수준과 연구 패러다임(paradigm)에서 지나치게 획기적인 성격을 지녔고, 대륙이동의 최대 약점인 이동 메카니즘으로 제시한 지구 자전과 중력에너지에 대하여 전혀 불가능하다는 것이었다. 당시 지질학계의 이론은 지구수축설(Cotraction Theory)에 근거한 지질작용이 지배하던 시대이므로 판의 수평적인 이동은 불가능하다는 것(상하운동만 가능)이었다. 뿐만 아니라 베게너는 지질학자도 아니고 고생물학자도 아닐 뿐만 아니라 그의 생각은 오랫동안 쌓아놓은 모든 지구과학의 기초를 뒤흔드는 것이었기 때문이기도 했다. 또한 어떤 학자는 베게너가 지질학자들의 모임의 회원이 아니었던 것을 이유 중의 하나로 지적하였으며, 그가 독창적인 착상을 하게 된 것은 기존의 지질학적 관념을 제대로 배울 수 있는 정규 교육을 받지 못하였기 때문이라고 혹평을 하기도 하였다.

아뭏든 결과적으로 베게너는 대륙을 움직일만한 거대한 힘의 기구(mechanism)를 설명할 수

없었고, 그러한 약점이 당시 그를 비웃던 많은 사람들에게는 치명적인 것이었다. 비평가들은 그가 기상학자이지 결코 지질학자는 아니며, 그의 이론을 한낱 몽상가에 의한 공상 소설로 격하하였다.

다만 영국의 홈즈(A. Holmes) 교수는 1928년 맨틀 대류에 관한 이론을 발표하고, 베게너가 설명에 실패한 대륙 이동의 기구를 맨틀 대류로서 명쾌하게 설명하면서 베게너를 지지하였지만, 대부분의 지질학자들이 베게너를 믿지 않았듯이 홈즈의 맨틀대류설 또한 받아들이지 않았다

1950후반에 암석에 대한 고지자기 연구를 하던 중 잊혀진 베게너의 대륙이동설이 옳다는 극적이고 명확한 증거가 발견되어 오늘날 베게너가 옳았다는 것이 밝혀졌다. 진실은 언젠가는 드러나게 마련이고 다만 때를 기다릴 뿐이다라는 말이 생각나는 대목이다.

해저확장설(海底擴張說, Sea-Floor Spreading) 이란?

해저확장설 등장의 배경은 1920년대 음향측심법 개발로 방대한 양의 해저지형 자료의 취득이 가능하였으며, 1925년 대서양의 중앙 해저산맥(해령) 발견, 1940년 불의 고리(Ring of Fire)인 태평양 주변의 화산 및 지진 집중지역 그리고 1953년 대서양 중앙해령의 중심부에서의 열곡대 발견 등을 들 수 있다.

베게너는 누구인가?

베게너는 그린란드(Greenland)에서의 기상학 연구결과를 정리해서『대기권의 열역학』이라는 책으로 학계의 호평을 받았다. 그러던 중 1912년 독일 마르부르크 대학의 기상학 강사인 베게너는 프랑크푸르트에서 열린 독일 지질학회에서『대륙이동설』을 논문으로 발표한다. 하나의 초대륙(pangaea)이 분열하여 오랫동안 이동한 결과 오늘날과 같은 대륙이 이루어 졌다는 학설이었으나 당시 지질학자들로부터 '전문가도 아닌 기상학자가 무슨 뚱딴지 같은 소리를 하는가' 하고 격렬한 비판만 받게 된다.

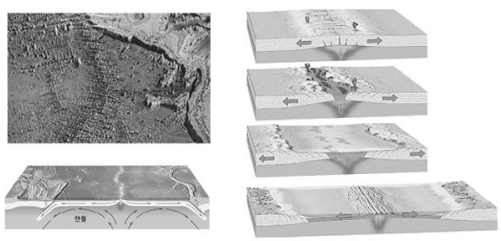
그 후 베게너는 다시 덴마크 탐험대와 동행하여 두 번째의 그린란드 탐험을 마치고 돌아와 스승인 쾨펜교수의 딸과 결혼하였다. 1914년에 일어난 제1차 세계대전에 참가하였다가 부상을 당했기 때문에 후방에 있는 측후소에서 근무하였는데 그 덕분으로 대륙이동에 대한 연구를 계속할 수 있었다. 그리하여 전쟁중인 이듬해 그의 이론은『대륙과 해양의 기원』이라는 제목으로 출판되었다.

베게너가 대륙이동설의 근거로 제시한 많은 증거는 현대과학으로 보아도 대부분이 옳은 것이지만 당시 사람들은 그의 이론을 믿지 않았다. 그러한 근본 원인은 대륙을 이동시키는 원동력을 확실히 밝히지 못했기 때문이다. 오늘날에 와서 베게너의 대륙이동설은 맨틀대류설이나 해저확장설, 판구조론 등에 의해 충분히 설명되고 있다.

대륙이동설을 확인하고 검증하기 위해 평생의 정열을 쏟은 베게너는 1930년에 그의 이론을 키워준 그린란드의 빙원에서 안타깝게도 50세의 나이로 일생을 마쳤다. 안타깝게도 그의 이론이 새로운 학문에 의해 증명되기 20여년 전의 일이었다. 베게너의 몸속에 들끓고 있던 모험의 피는 대륙이동설을 완성시키기 위해 온갖 분야의 연구에 나서게 했다. 또 미지의 그린란드를 4번씩이나 탐험하여 고공기상이나 빙하에 관한 연구에 온 정열을 바쳤으나 냉엄한 자연에 목숨을 빼앗긴 것이다.

그동안 잊혀졌던 대륙이동설은 1950년대 들어 고지자기를 측정하고 해석하는 과정에서 다시 등장하였다. 대서양 해저와 아프리카를 지나가는 2개의 극이동(polar wandering) 궤도를 합치면 잘 일치하고 있다. 이는 과거 두 대륙이 한 대륙으로 합쳐져 있었음을 보여주는데, 바로 대륙이동설을 뒷받침하는 결정적인 증거가 된 것이다. 이로써 대륙이동설은 베게너 사후 30년이 지나 극적으로 부활하게 되었다.

1960년 초 해저지질 연구에 의해 해양저 산맥의 성질이 알려지면서, 디이츠(R. Dietz)와 헤스(H. Hess)는 그것을 관찰하고 정리한 해저확장설(Sea-Floor Spreading)이라는 가설을 발표하였다. 즉, 중앙해령에서 솟아오르는 고온의 마그마가 해양저 산맥을 만들고, V자형 골짜기인 열곡(rift valley)의 양쪽에 용암이 냉각되면서 새로운 해양 지각을 형성하며 산맥 양쪽의 해양지각은 열곡을 중심선으로 하여 서로 반대 방향으로 이동하게 되는데, 이 때문에 해양지각이 확장을 일으킨다는 것이다. 새로운 지각이 생겨나므로 오래된 지각은 계속 밀려서 이동하다가 결국 맨틀 속으로 다시 침강해 들어가고, 전체로서 하나의 순환을 이루게 되는데, 해저는 이처럼 끊임없이 새로워지며 그 움직임을 타고 대륙이 이동한다고 하였다. 이러한 운동의 원인은 물론 맨틀 대류(mantle convection)라고 생각하였다. 따라서 디이츠와 헤스는 해저확장설을 주장하는데 홈즈가 내세운 대류설(convection theory)을 다시 등장시킬 수밖에 없었으며, 이 가설로서 베게너가 실패한 대륙이동에 필요한 에너지와 이동기구(mechanism)를 설명할 수 있었다.



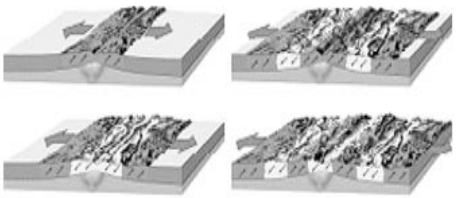
음향측심법(Echo Sounding)

영국에서 실시한 챌린저호탐사(1872. 12-1876. 5)중 전 대양의 측심을 통해 대양 한 복판에 해저산맥이 존재하는 것을 발견하여, 이 때 알게 된 대서양의 해저지형에서 해령과 해구의 발견은 맨틀대류에 의해 해양지각이 해령에서 해구방향으로 확장됨을 알려준다. 음향측심법은 해양탐사선에서 초음파를 발사하여 바다 밑에서 반사되어 되돌아오는 시간을 측정하는 방법이다. 음향측심법을 이용하여 바다의 깊이와 해저 지형을 알 수 있다.

지자기 줄무늬 대칭

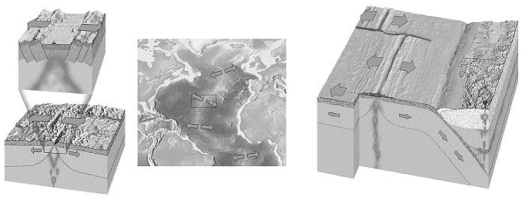
헤스의 이론이 제출되자 1963년 바인(F. Vine)과 매튜(D. Mathews)는 해양저 산맥에 대한 고지자기를 측정하였는데, 그 결과 확장축을 경계로 대칭적인 자기장의 역전이 띠 모양으로 배열하는 전혀 예측치 못했던 사실을 발견하였다. 그들은 해저확장과 고지자기의 역전이 동시에 일어난다면 지자기에 띠 모양이 생기는 것이 당연하다고 지적하였다. 즉, 계속해서 솟아 올라와 냉각, 고화되는 해저는 그 당시의 지자기의 방향으로 자화되는데 지자기의 방향 자체가 역전을 반복한다면, 고화된 암석에 기록된 자화 방향도 역전을 반복하게 되고, 결국 해저는 띠 모양으로 자화되어야만 한다고 설명하였다.

이 이론은 독일의 하이르즐러(J. Heirzler)에 의해 상세한 조사를 거쳐 증명되었는데 1967년 해저에 분포하는 지자기 띠 모양의 각 부분에 대한 절대연령을 측정해 본 결과, 해양지각은 100만년에 10~60km(1~6cm/년)씩 확장된다는 사실을 밝혔다. 그는 해양지각의 확장은 열곡의 좌우에서 대칭적으로 일어나며 확장의 크기가 극 부근에서는 작고, 적도 부근에서는 클 것이라는 생각도 하였다. 이로써 디이츠와 헤스에 의해 제창된 해저확장의 가설은 고지자기의 연구에 의해 틀림없는 사실로 받아들여지게 되었다.



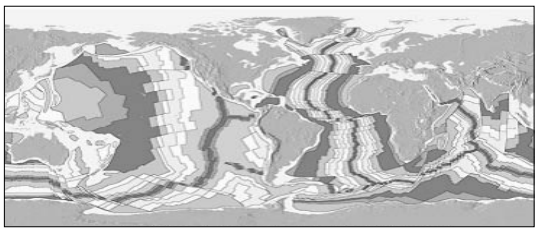
변환단층(Transform Fault)

해령을 여러 토막으로 자르고 있는 변환단층도 해저확장설의 증거이다. 그것은 해령에서 지구 내부 물질이 밀려와 양쪽으로 퍼져 나갈 때 속도 차이로 해령 사이에 천발지진이 발생하는 것도 해양지각이 반대 방향으로 이동하기 때문에 생기는 충돌로 해석되므로 해저확장의 증거가 된다.



해양지각의 나이

지구물리학자들은 육지에 있는 용암을 포함하여 해양저에 있는 자기줄무늬의 연대를 측정하여 자기층서를 근거로 고지자기 녹음기를 되돌려 봄으로써 해양이 열리는 속도, 즉 해양저가 확장하는 속도와 그 과정을 추적할 수 있었다. 실제 하이르즐러는 줄무늬 간격 측정을 통하여 해양 지각은 연간 1~6cm씩 확장하여 백만 년에 10~60km씩 바다가 열리는 것을 계산하였다. 또한 확장 속도는 각기 달라 극 부근에서는 작고 적도 부근에서는 크며, 각 해양의 확장속도 또한 서로 다른 것을 밝혀냈다.



해령을 중심으로 작성된 해양지각의 연령

열점의 분포

지구 내부의 엄청난 에너지는 끊임없이 외부로 전달되어 발산된다. 주로 중앙 해령에서처럼 분출된 마그마에 의해 해양지각이 새롭게 생성되면서 지각판을 양쪽으로 이동시키기도 하지만, 한편으로는 지각판의 이동과는 무관하게 고정된 지점에서 마그마를 분출하여 연속적인 일련의 해산군(seamounts)을 만들기도 한다. 이와 같이 고정된 위치에서 마그마를 분출하는 곳을 열점(熱點, hot spot)이라고 한다. 현재 전 세계적으로 확인된 20개의 열점들은 일부 판의 경계부에 존재하는 것들을 제외하면, 미국의 옐로스톤(Yellowstone)과 같이 대륙판의 내부나 하와이 섬의

킬라우에아(Kilauea) 화산처럼 해양판의 내부에서 분출된다는 것이다. 특히 해양판의 내부에 존재하는 열점은 지자기의 줄무늬와 더불어 판 이동 방향과 속도 등에 관하여 직접적인 증거를 제공하는 중요한 역할을 한다.

• 열점에 의한 화산섬의 생성 : 하와이 섬은 열점 위에 생긴 화산섬의 전형이다. 1960 70년대에 미국의 윌슨과 모건에 의해 제기된 이론이다. 이 가설의 중요한 점은 판구조론에서 열점이 맨틀 심부에 고정된 좌표계를 주어, 판의 절대운동을 정하는 데 있다. 이 가설에 의하면 하와이 제도와 대서양의 와르비스 해령과 같이 지진활동이 없는 해령은, 맨틀 심부에 생긴 마그마 위를 해저의 확대에 따른 판이 운동했기 때문에 생긴 화산군(火山群)이다. 판이 이동함에 따라 그 위에 실린 화산도 같이 따라 가지만 판보다 깊숙한 곳에 있는 열점은 그대로 그 자리에 있는 것이다. 오랜 세월 후에 열점에 마그마가 가득 고이면 또 다시 분출하여 새로운 화산섬이 만들어진다. 이렇게 반복하다가 보면 화산섬들이 일정한 방향으로 줄지어 생겨나게 되는 것이다. 하와이의 여러 개의 섬들이 그러하며 열점 바로 위에 위치한 화산섬이 생긴지 얼마 되지 않았기 때문에 가장 나이가 어리고 열점에서 멀어질수록 화산섬의 나이가 많아진다. 섬들의 배열 방향을 보면 판의 이동방향도 알 수 있습니다.

판구조론(板構造論, Plate Tectonics)이란 ?

독일의 베게너(1915)가 대륙이동설을 제창한 후 영국의 홈스(1928)는 맨틀 내의 열대류설을 제창하여 대륙을 움직이는 힘의 근원을 밝히는데 성공하여 해령을 중심으로 해양저가 양쪽으로 확장하고 있다는 해양저확장설이 성립되었고, 또한 이러한 이론들에 근거하여 판구조론이 정립되기에 이르렀다. 이와 같은 지질과학의 발전은 1960년대 초에 시작되어 70년대 중반에 이르러 이루어졌으며, 이 시기를 지구과학의 혁명기라고까지 말하고 있다.

미국의 워싱턴에서 개최된(1967. 1) 미국 지구물리학회에는 해저확장설에 관한 70여편의 논문이 발표되었으며 이것들은 지구물리연구학회지(Journal of Geophysical Research, 1968)에 출판되었다. 베게너의 대륙이동설과 헤스와 디이츠의 해저확장설에 이어진 지구 자체구조를 설명하려는 여러 학자들의 연구 결과는 '판구조론(Plate Tectonics)'이라는 지질과학의 새로운 패러다임(paradigm)을 만들게 된 것이다.

지구의 표층인 지각은 대륙지각과 해양지각으로 이루어지며 이들은 6개의 큰 판(유라시아판 · 아프리카판 · 인도판 · 태평양판 · 아메리카판 · 남극판)과 몇 개의 작은 판(필리핀판 · 카리브판 · 코코스판 · 나스카판 등)으로 구성되어 있으며, 이들이 지구 내부에서 작용하는 힘에 의하여 연간 수 cm 정도의 속도로 서로 움직이고, 이에 따라 화산작용 지진현상 마그마의 형성 습곡산맥 형성 등 각종 지각변동을 일으킨다는 학설이 『판구조론』이다.

각 판을 움직이는 힘의 근원은 맨틀 내에서 일어나는 대류이며, 이 대류가 상승하여 새로운 판을 성장시키는 곳이 해령이다. 판이 움직여 다른 판 밑으로 침강하는 곳이 베니오프대(Benioff zone) 또는 침강대이며, 침강이 시작되는 부분이 해구(trench)에 해당한다. 해령(oceanic ridge)

은 세계의 모든 해양 중에 발달하며 서로 연결되어 그 연장이 6만km에 달하고, 해구는 태평양 연변부에 특히 잘 발달하고 있다.

판이 움직일 때 위에서 언급한 각 판은 전체가 하나로 움직이는 것이 아니라 단열대로서 서로 분리된 각 부분이 속도를 달리하여 움직인다. 이와 같은 단열대를 변환단층(transform fault)이라고 한다.

판과 판이 움직여 서로 만나는 방식은 크게 두 가지로 구분되는데, 하나는 한 판이 다른 판 밑으로 침강하는 경우이고, 다른 하나는 판과 판이 서로 부딪히는 경우이다. 이와 같이 판과 판이 만나는 곳에 습곡산맥이 형성되고, 화산작용과 지진현상이 일어나게 되는 것이다.

환태평양 조산대는 태평양판이 아메리카판 유라시아판 및 인도판과 부딪혀 밑으로 침강하는 부위에 형성된 것으로 침강대에 따라 지진이 일어나고 마그마가 형성되어 그 상부에 화산작용이 나타난다. 이와는 달리 히말라야-알프스산맥은 인도판 아프리카판이 유라시아판과 충돌함으로써 이루어진 것이므로 여기에도 지진과 화산작용이 수반되고 있다.

일본이나 미국처럼 지진이 많은 나라에서는 지질과학 분야에서 판구조론이 제일 중요한 연구과제로 다루어지고 있으나, 우리나라는 지진이 상대적으로 적어 관심이 적은 게 사실이다. 판의 두께는 약 30~100km이며, 이 부분을 암석권(lithosphere)이라고 한다. 암권 바로 아래 부분은 반쯤 녹아 있는 끈적거리는 엿과 같은 상태로서 이 부분을 연약권(asthenosphere)이라고 하고 결국 연약권 위에서 암권이 슬슬 흘러 다니는 셈이다. 좀 과장을 하면 물위에 여러 개의 나무판자들이 이리저리로 움직이는 것이라고 생각해도 무방하다.

그럼 여기서 판구조론을 효과적으로 설명하기 위하여 판구조론의 기본개념과 용어에 대하여 간단히 소개하고자 한다.

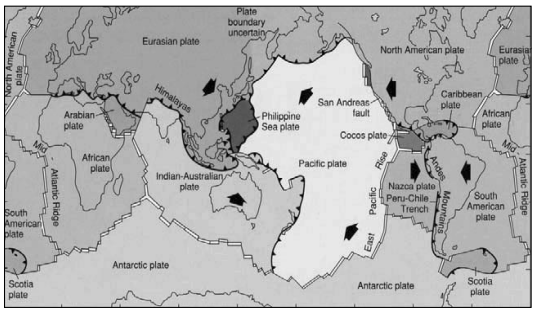
판의 두께

지각 근처의 정밀한 지진파 탐사에 의하면 지각으로부터 약 100km 하부에 지진파의 속도가 급격히 느려지는 부분이 존재하고 있는 것으로 알려져 있다. 지진파의 전파속도 감소는 부분적 용융에 의한 것으로, 우리는 이 부분을 저속도층 또는 연약권이라고 부른다. 지각으로부터 연약권 상부까지 즉, 지각과 맨틀의 상부를 포함하는 부분은 암석권이라고 불리는데 통상 우리는 이곳을 판(plate)이라고 칭한다.

판의 종류

지구상에는 크고 작은 암판이 10여개가 있다. 중요한 판으로는 태평양판, 인도판, 아프리카판, 유라시아판, 북아메리카판, 남아메리카판, 남극판이 있고 작은 암판으로는 필리핀판, 나즈카판, 코코스판, 카라비아판, 아라비아판이 있으며 더 작은 것으로는 이란판, 터키판, 헬렌판 등이 있다.



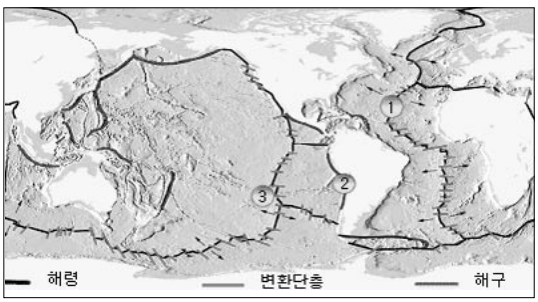


판의 경계

대양저 산맥에서 새로 생겨나는 대양지각은 산맥의 정선에서 좌우로 갈라져 퍼져 나간다. 그러므로 대양저산맥의 정선, 즉 열곡이 판의 경계가 되며 이를 발산경계라고 한다. 발산경계는 대서양저산맥, 인도양저산맥, 동태평양저산맥 및 기타의 대양저산맥으로 총연장 약 6만 km의 연결된 체계를 형성한다.

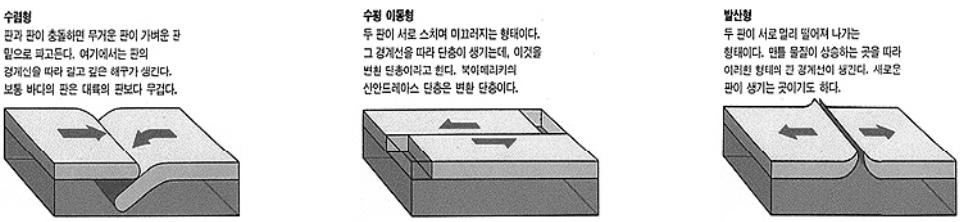
새로 생겨난 대양지각은 상부맨틀과 함께 이동하여 대륙판 아래로 들어가거나 대양에 있는 도호(island arc) 아래로 들어간다. 이렇게 들어가는 경계를 수렴경계라고 한다. 수렴경계에서 대양지각을 실은 판이 다른 판 아래로 비스듬히 들어가는 것을 섭입이라고 한다. 세계의 대부분의 수렴경계에서는 섭입이 일어나면서 대양저산맥에서 만들어진 대양판을 흡수하여 이들은 맨틀로 돌려보내고 극히 일부만을 화산활동의 형식으로 지표에 환원시킨다. 그리고 판이 생성되거나 소멸되지 않고 두 판이 수평적으로 미끄러지면서 어긋나는 곳으로서 보존경계 혹은 변환단층 경계(transform boundary)라고도 한다.

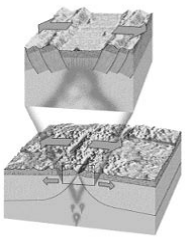
대부분의 지진은 이러한 판의 경계부에서 발생하고 있다. 한편 화산활동의 대부분도 해령과 섭입대(수렴대)에 집중되어 나타나며 판의 경계부에서 나타나는 여러 지질 현상들은 판들의 상대운동의 결과로 나타나는 것이다.

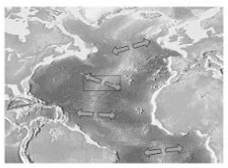


• **발산경계 :** 발산경계(divergent boundary)는 해령과 같이 새로운 판이 생성되면서 양쪽 방향으로 확장해 나가는 곳으로서 확장경계라고도 한다. 대서양 중앙해령이나 동아프리카 열곡대가 그 좋은 예이다. 발산경계에서는 맨틀대류가 상승하여 마그마가 생성되므로 화산활동이 일어나

〈판 경계의 세가지 형태〉

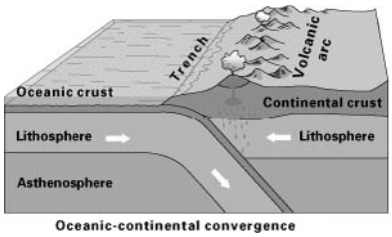




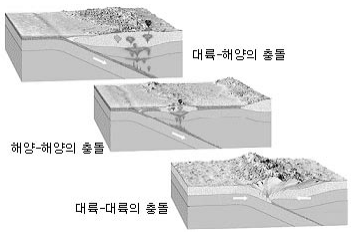


고 마그마의 움직임으로 천발지진도 자주 발생한다. 발산경계는 해령과 같이 주로 해양판에 존재하지만 동아프리카 열곡대와 같이 대륙판 내부에 존재하는 경우도 있다.

• **수렴경계 :** 수렴경계(convergent boundary)는 두 판이 만나 충돌하거나 섭입하는 곳으로서 소멸경계라고도 한다. 마리아나 해구나 일본해구, 알프스-히말라야 산맥이 그 좋은 예이다. 수렴경계에서는 두 판이 부딪치는 과정에서 많은 지진이 발생하며 경우에 따라서는 화산폭발과 조산운동도 일어난다. 수렴경계의 지질학적 특징은 수렴하는 두 판의 성격에 따라서 다른데 아래와 같이 3가지 경우가 있다.



Oceanic-continental convergence



• **보존경계 :** 보존경계는 판이 생성되거나 소멸되지 않고 두 판이 수평적으로 미끄러지면서 어긋나는 곳으로서 변환단층 경계(transform boundary)라고도 한다. 미국 캘리포니아의 산안드레아스 단층이 그 좋은 예이다. 보존경계에서는 화산활동은 일어나지 않지만 두 판이 반대방향으로 어긋나므로 접촉면을 따라서 천발지진이 자주 발생한다. 대서양 중앙해령이나 동태평양 해령 중간 중간을 끊어놓고 있는 수많은 변환단층이 바로 보존경계에 해당한다.

판 이동의 메카니즘(mechanism)

베게너의 '대륙이동설'이 현재의 판구조론과 비교하여 근본적으로 개념은 같으나 학설로 실패한 이유는 베게너는 거대한 대륙을 움직이게 한 힘 또는 기구(mechanism)를 설명하지 못했기 때문이다.

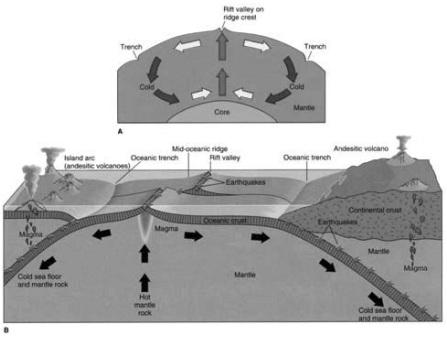
판 운동의 직접적인 원인에 대해 대부분의 학자들은 맨틀대류에 의한 것으로 추정하고 있다. 근래에까지 판을 움직이는 원동력을 연약권에서 일어나는 맨틀 대류만으로 설명하려고 했으나, 최근 들어 여러 가지 다른 힘을 생각하게 되었다.

그 중 하나는 침강하는 판 자체의 무게와 중력에 의한 힘이다. 이는 해구에서 침강하는 판은 냉각되어 밀도가 커지고 두께가 두꺼워지므로 무거운 상태로 침강하면서 판을 해구 쪽으로 잡아당기는 힘(slab-pull force)이 작용한다는 것이다. 또 하나는 해령에서 고온 저밀도의 물질이 부력에 의해 상승하면서 판을 분리시키며 인접한 두 판을 밀어내면서 작용하는 힘(ridge-push force)이 작용한다는 것이다.

최근의 연구에 의하면 암석권 밑에서 일어나는 맨틀대류에 의해 판을 끄는 힘은 연약권의 낮은

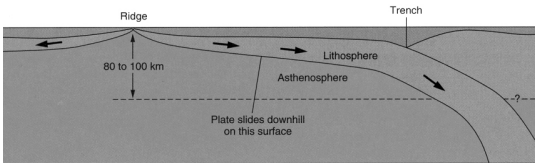
점성과 맨틀 내에서 여러 방향으로 일어나는 작은 대류 세포의 힘의 상쇄 효과로 인해 예상한 것보다 약하며, 오히려 판의 끝부분에서 형성되는 이러한 힘이 판을 움직이는 보다 큰 원동력으로 작용할 수 있다는 주장이 제기되고 있다.

• **맨틀 대류설 :** 맨틀물질이 열대류에 의해 움직이고, 이 움직임에 따라 수동적으로 지판이 이동한다는 설이다.

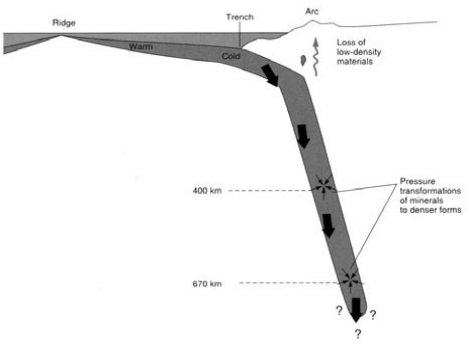


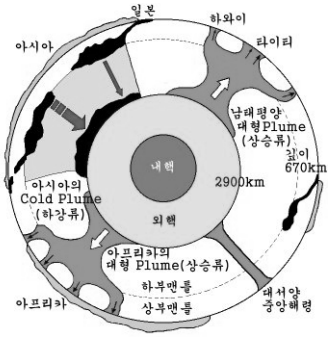
• **판의 밀도 및 고도 차이 :** 대양저 산맥으로부터 확장하는 판은 시간이 지남에 따라 점차 냉각되고, 맨틀물질의 지속적인 부착으로 두꺼워져 밀도가 증가하여 지판의 하중이 연령이 증가함에 따라 커져서, 해구에서 섭입하는 판은 자체의 무게 때문에 스스로 침강하며, 뒤따르는 판을 끌어당기게 되는 것이다.

• **지판의 고도 차이 :** 일반적으로 지각이 생성되는 발산경계부의 지판 높이가, 지판이 소멸되는 수렴경계부에서 보다 높게 위치하므로 중력의 영향으로 높은 발산경계부에서 낮은 수렴경계부 쪽으로 판의 이동이 일어난다.



• **열주구조론(플룸구조론) :** 외핵과 지표를 연결하는 뜨거운 플룸(plume)과 차가운 플룸을 통하여 암석물질이 순환하여 판은 차가운 플룸의 하강에 끌려 이동한다는 것이다. 지구 내부에는 아시아 지역 아래에서 집중적으로 발생하는 섭입에 기인한 대규모 체류 슬랩이 낙하됨에 따라 하나의 거대한 차가운 플룸이 하강하고 있고, 반면에 역작용으로 발생하는 아프리카형의 뜨거운 플룸이 상승함으로써 맨틀 전반에 걸친 원통상의 대류운동이 지구조운동을 지배하고 있다. 이와





같이 원통상의 대류운동에 의한 구조운동론을 플룸구조론이라 한다. 먼저 하강하는 차가운 플룸의 생성은 해양판의 섭입으로부터 시작된다. 섭입하는 슬랩은 상하부 맨틀의 경계면인 670KM 부근에서 체류하기 시작하여 체류슬랩이 형성된다. 시간이 지남에 따라 체류 슬랩은 지속적으로 축적되며 한편으로 중앙해령에서 판 운동의 생성속도 및 확대속도는 점차 감소하게 된다. 결국 한계를 넘어선 체류슬랩은 붕락하여 차가운 플룸이 되는 것이다. 이러한 변화는 해수면 변동의 기록에 의거하여 대략 4억년의 주기를 갖는 것으로 추정되고 있다.

판구조론의 의의와 문제점

대륙이동설로부터 출발하여 해저확장설을 거쳐 발전된 판구조론은 분산된 지질학적 현상을 종합시키고, 지금까지 얻어진 것보다 지구 진화의 양상을 더욱 밀착되고 쉬운 모양으로 보게 공헌하는데 크게 기여하였다. 19세기 초에 허턴(James Hutton)의 동일과정설(Uniformitarianism)이라는 규범을 받아들이고, 스미스(Smith)에의 화석에 위한 층서 대비가 지질학을 참된 과학으로 성립하게 한 이래 판구조론은 지질과학에 있어 가장 큰 진보로서의 위치를 굳히게 되었다. 이를 출발시킨 사람으로서 베게너는 금세기 가장 중요한 과학의 선구자 중의 한 사람으로서 인정받을 만하다.

그러나 지금까지의 판구조론은 완성이 아니며 오히려 앞으로 지질과학에서 해결해야 될 많은 문제점을 남기게 되었다. 예를 들어, 대륙판과 충돌하는 해양판은 대륙판 밑으로 침강해 들어가는데, 이 때 어느 정도 깊이까지 들어가는지? 그리고 그 후는 어떻게 되는지? 전혀 밝혀지지 않고 있으며, 대륙이동의 힘을 맨틀대류로 설명하고 있으나 맨틀대류가 전 맨틀에 걸쳐 일어나는지? 아니면 상부 맨틀과 하부 맨틀이 따로 대류 하는지? 그리고 맨틀 대류 세포의 규모 등에 관해서는 아직 많은 논란이 일고 있다. 따라서 21세기 중반까지의 수십 년간, 보다 더 많은 탐사와 연구를 통하여 지구의 참 모습이 제대로 밝혀질 때, 비로소 우리들은 판구조론의 종착점을 보게 될 것이다.

판구조론과 지질현상

화산대와 지진대

우리들은"지구가 살아있다"라는 사실을 화산이나 지진의 활동에서 찾을 수 있다. 지금 이 순간에도 크고 작은 화산 활동이 전 세계 어디에선가 발생되고 있으며 판의 경계부에서는 끊임없이 지진이 발생하고 있으며, 전 세계의 관측소에서 기록이 되고 있다.

화산이라는 용어인 volcano는 '불의 신'이라는 이름인 'vulcan'에서 유래되었다. 분출된 물질은 분출되는 구멍, 즉 화구 주위에 모일 것이므로 자연히 화산을 둘러싼 산체가 이루어진다. 엄밀히는 이 산체를 화산체(volcano edifice)라고 하여 화산과 구별하나 보통 화산체는 화산을 합하여 넓은 의미에서 화산이라고 호칭된다.

마그마는 생성 위치에 따라 지각의 약한 부분을 뚫고 올라와 지하 수 Km 수 십Km 깊이에 모여 있는 마그마 굄(마그마 챔버)을 만든다. 이 마그마 굄에서 마그마가 냉각되면서 휘발성 성분이 증가한다. 그 결과, 마그마 굄의 압력이 점점 높아져서 그 위의 약한 부분을 뚫고 화산활동을 일으킨다.

화산 및 지진의 분포는 거의 판과 판의 경계지역에 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서 지진 및 화산 활동은 판구조론에서 판의 운동과 밀접한 관련이 있는 것으로 생각된다.

환태평양 지진대는 두 판이 서로 부딪치면서 생성되었으며, 지진의 빈도가 가장 많고 진원의 깊이도 다양해서 천발 지진의 약 75%와 대부분의 중발 및 심발 지진이 이 지역에 분포한다. 알프스-히말라야 지진대는 아프리카판과 유라시아판의 충돌로 형성된 것이며 천발지진의 약 23%가 이 지역에서 발생한다.

중앙해령 지진대는 해양판이 서로 분리되는 지역에서 발생하는데 특히 대서양과 인도양, 남극해의 중앙 부분 및 동태평양 지역에 잘 나타난다. 이들 지역에서의 지진은 다른 지진대에 비해 약하고 천발 지진만 관측된다.

우리나라 주변에서의 지진 및 화산활동

한반도는 지진대에서 어느 정도 비켜나 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 사람이 느낄 수 없는 미진이기는 하지만 매년 상당한 회수의 지진이 탐지되고 있다. 일본은 태평양판과 유라시아판의 경계 또는 이들 판과 필리핀판이 만나는 곳에 위치하고 있어서 지각이 매우 불안정한 상태이다. 따라서 일본은 호상열도로서 알류산열도 등과 함께 환태평양 조산대를 이루고 있기 때문에 지진 및 화산이 자주 발생한다.

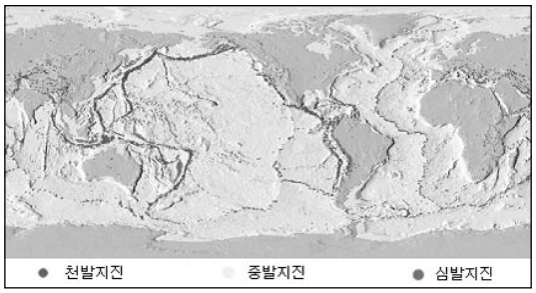
우리나라 최초의 역사지진 자료는 1912년 와다(和田雄治)가 삼국사기, 고려사, 조선왕조실록 등 7,188권의 역사자료로부터 서기 2년부터 1855년까지의 역사지진자료를 정리한 것이다. 그 후 여러 국내외 학자들에 의해 수정 및 보완이 이루어져 왔지만, 평가자에 따라 지진발생 위치와 진도 등을 다르게 해석하여 차이를 보이고 있다.

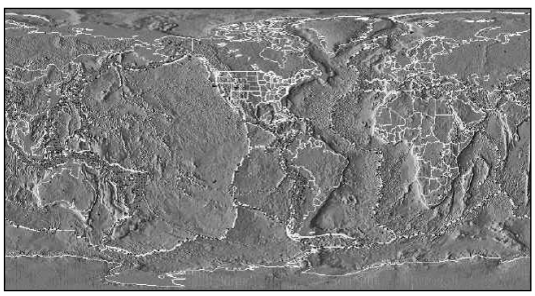
계기지진의 경우 20세기 전반의 지진자료는 최근의 자료와는 그 정확도와 신빙도의 차이가 매우 크다. 20세기 전반의 초기 계기지진자료는 기술방식이 역사지진과 유사하여 진앙의 위치 및 규모를 결정하는 것이 매우 중요하다. 한반도에서 비교적 자세한 지진자료는 1978년 이후 기상청에서 발표한 것으로 약 20년 동안의 기록뿐이다.

한반도는 지진이 발생하는 조산대와 떨어져 있기 때문에 그동안 지진 안전지대처럼 여겨져 왔다. 그러나 지진학자들은 서울에서 2010년 안에 지진규모 6이 넘는 강진이 발생할 확률이 57%가 넘는다고 한다. 문헌자료에 나타난 우리나라 지진 발생횟수는 서기 원년부터 1900년대 초까지 총 1,890여 회나 된다. 한반도 최대 지진은 1643년 7월 24일 경주 근처에서 발생한 것으로 그 규모가 무려 10 정도로 추정된다.

한반도에는 백두산과 한라산 두개의 화산이 있다. 백두산은 2,300년을 주기로 폭발하는 휴화산이고 한라산은 화산활동이 정지된 사화산으로 분류된다. 화산활동은 신생대 제3기에서 제4기로 접어들면서 급격히 증가하였으며, 그 이유는 한국을 포함하는 일본 화산대와 중국 그리고 러시아 일대가 해양판의 섭입 및 열점과 관련된 화산활동이 일어나는 곳이기 때문이다(환태평양 화산대).

제주도, 울릉도, 독도, 백두산과 일본 화산대에서는 유문암 및 조면암질 마그마의 폭발적인 화산활동이 신생대에서부터 현재까지도 진행되고 있으며, 울릉도의 화산활동은 기원전 약 1만 6천5백년, 약 9천3백년과 5천 6백년에 대폭발이 일어나 편서풍에 의해서 화산재들이 동쪽으로 500km까지 이동하기도 하였다.





조산대(orogenic belt)

일반적으로 산지를 형성하는 운동을 조산운동(造山運動)이라고 하는데 과거에 조산운동이 활발했거나 현재에도 그 가능성이 큰 지역을 조산대라고 한다.

이러한 곳은 보통 화산대와 지진대가 일치하여 지각이 매우 불안정하다. 지구상의 대표적인 조산대로는 환태평양 조산대, 알프스-히말라야 조산대 등이 있다.

환태평양 조산대는 남아메리카 남단에서부터 태평양 주위를 한 바퀴 돌아 뉴질랜드까지 계속된다. 안데스, 로키산맥, 알류산 열도, 일본, 필리핀 등을 포함한다.

알프스-히말라야 조산대는 아틀라스, 알프스 산맥 등의 지중해를 둘러싼 여러 산맥과 이란 고원, 히말라야 산맥, 아라칸 산맥과 말레이 반도에서 인도네시아에 이른다. 이들은 모두 판의 경계와 밀접한 관련이 있다.

광상형성

지구가 진화하면서 지각은 수없이 많은 지질작용에 의해 변화를 겪어오고 있으며 이러한 지질작용의 결과 지각의 구성물질들은 변화하는 환경

경계부의 두판	특징적 형태	판의 경계		
		발산형 경계	수렴형 경계	보존형 경계
해양판과 해양판	지형	해령과 중앙열곡	해구	해령과 열곡
	지진	얕은 지진	0-700km사이	100km의 지진
	화산활동	현무암의 베게용암	호상열도의 안산암질	드물다
	사례	대서양 중앙해령	알류산 해구	케인단열대
해양판과 대륙판	지형		해구	
	지진		0-700km의 지진	
	화산활동		안산암질	
	사례	예가 없음	남아메리카서해안	예가 없음
대륙판과 대륙판	지형	열곡	습곡된 지각이 나타나는 조산대	단층대
	지진	얕은 지진	300km의 지진	100km의 지진
	화산활동	현무암질 및 유문암질	화강암의 관입	없음
	사례	동아프리카열곡대	히말라야, 알프스	산안드레아스

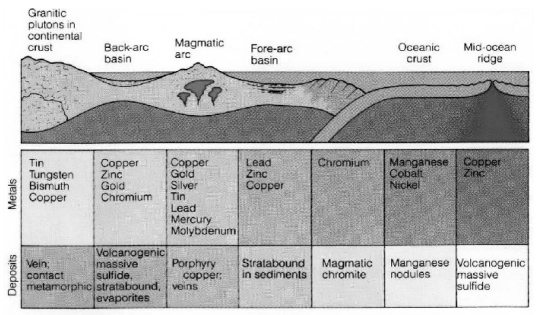
에 적응하면서 새로운 화합물인 각종 광물을 생성하기도 하고 변질되기도 하면서 특정성분을 농집시키거나 또는 분해시키는 과정을 거치게 되는데 이러한 과정을 광상성인(genesis)이라 한다. 대륙지각과 해양지각에 대한 지질학적인 지식이 증가하고 판구조론에 의한 지구의 지체구조가 밝혀짐에 따라 광상의 성인도 판구조론과 관련하여 해석되고 있다. 특히, 수렴경계에서는 해양판이 대륙판 밑으로 섭입함에 따라 해양판이 재용융되어 생성된 마그마가 분출하거나 관입할 때 대규모 광상이 생성되기도 하고, 심해저의 확장경계에서는 검은 열수(black smoker)가 엄청난 양의 황화광물을 분출하고 있으며 판이 이동함에 따라 육지에 부가되어 생성되는 새로운 형태의 광상이 주목을 받기 시작하였다.

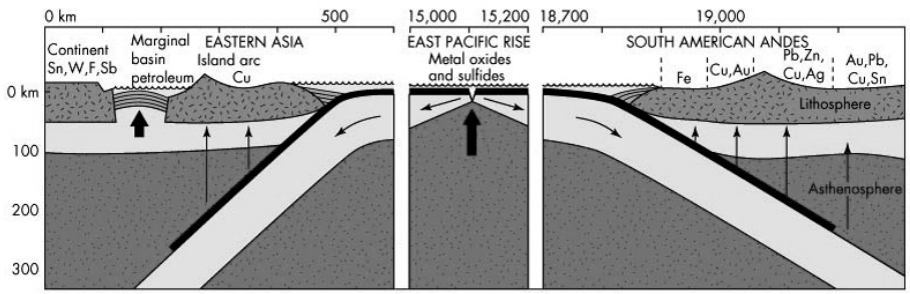
현대 지질과학 현상의 해석에 있어서 가장 획기적이고 설득력을 가지는 과학적인 이론이 판구조론임에 이의를 제기하는 사람은 별로 없을 줄 안다. 특히 많은 금속광상의 생성 원인과 해석을 판구조론적 입장에서 찾고 있다. 지구상에 지질운동의 결과산물인 지질현상으로 분포하고 있는 많은 동, 금, 아연, 크롬 등의 광상들은 판구조운동과 밀접한 상관성을 보여준다.

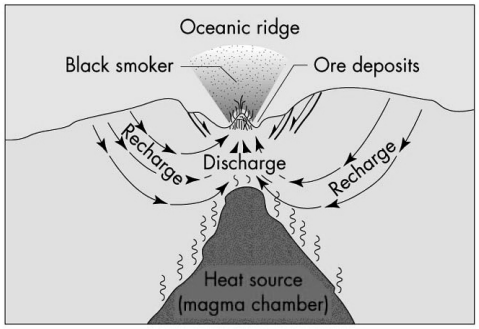
상기 그림에서와 같이 판의 침강 혹은 확장경계에서 생성되는 특징적인 광상이 있는가하면, 반면에 호상열도, 배호분지 등에서 생성되는 특징적인 광상이 있기도 하다. 결과론적인 얘기지만 현재 지구상에 분포하고 있는 많은 광상들 특히 동(copper), 금(gold) 광상의 분포특성은 판의 수렴경계인 화산대 및 지진대와 일치하는 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다.

아래 그림에서 보듯이 남미 안데스 지역에서 판의 침강(수렴경계)에 따른 동, 금, 아연 광상의 분포특성과 동태평양 해령(발산경계)에서의 산화 및 황화광물 광상의 분포, 그리고 동아시아의 수렴경계 부근에서의 동 광상의 분포특성을 보여주고 있다.

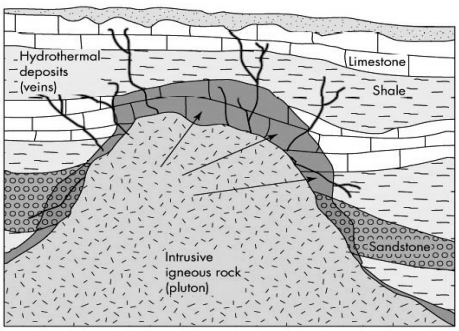
우리가 찾고자하는 경제성을 가지면서 개발할 수 있는 유용광물의 집합체인 광상은 앞서 설명한 바와 같이 거시적으로 판구조운동과 관련되어 형성되며, 아울러 판의 운동에 기인되어 일어나는 화산활동, 변성작용, 마그마 활동과 관련하여







중앙해령으로 부터의 광물생성
(괴상 황화물 광체)



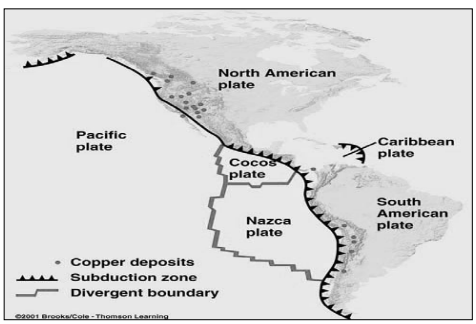
후기 마그마 및 열수용액에 의한 광상
(접촉변성작용 포함)

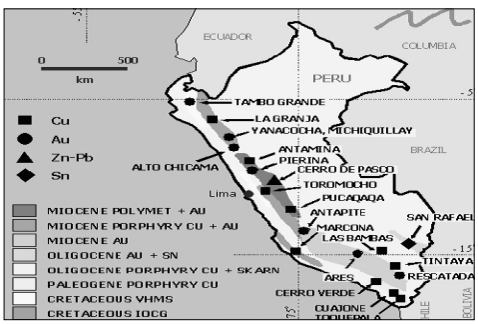
발생하는 후기 마그마 및 열수용액이 기존의 암석의 틈을 따라 이동하면서 주위 암석(모암)과 반응하여 주위에 유용광물이 침전된 것이다.

우리는 흔히 광상(鑛床)의 정의를 지각 중에 광물이 경제적으로 이익을 내면서 채굴할 수 있을 만큼 또는 현재는 채굴가치가 없으나 미래에 이익을 내면서 채굴할 수 있을 만큼 모여 있는 장소로 국한하여 사용한다. 그리고 광상의 형성은 판구조운동에 기인한 화산활동, 변성작용, 마그마 활동과 관련하여 발생하는 열수용액이 이동하기 쉬운 틈을 따라 이동하면서 기존의 암석(모암, wall rock)과 반응하면서 수용액(또는 마그마)으로 부터 금속이 침전되는 작용의 결과물인 것이다. 이러한 광상의 생성에 영향을 주는 인자로서는 온도, 압력, pH, Eh, PO2 등을 들 수 있으나, 금번에는 이러한 세부적인 형성과정 보다는 광상형성에 대한 거시적인 관점으로 판구조운동이 광상형성과 어떠한 상관성을 가지고 있는지에 대하여 국한하여 소개하는 것이다.

우리가 광상의 분포특성과 판구조론을 연관지어 얘기할 때 흔히 예로 드는 것이 인도-호주판과 태평양판의 운동 결과의 산물로 많은 금속광상을 가지고 있는 동남아지역(인도네시아, 필리핀 일대)과 태평양판과, 나즈카판이 남아메리카판 하부로 침강하는 해구 상부인 페루-칠레 동, 금 광화대이다.

인도네시아는 25,000여개의 섬으로 이루어진 도서국가로서 판의 침강운동과 관련하여 수마트라-자바-플로레스섬을 잇는 해구 및 이와 수반된 상부에 다수의 금, 동 광상이 분포하고 있으며,





또한 남미 및 북미 서부해안을 따라서도 많은 동, 금광상이 분포하고 있다.

광역 변성작용

판구조론 학설에 의하여 성취된 지질과학 분야의 획기적인 변화들 중에서 손꼽을 수 있는 성과의 하나는 광역 변성작용을 받은 암석의 분포에 관한 설명이 가능하게 되었다는 점을 들 수 있다. 광역 변성작용은 판의 섭입대(subduction zone) 주변에서 일어난다.

매몰 변성작용은 대륙붕과 대륙사면에 쌓인 퇴적물들의 하부에서 일어나며 현재에도 미시시피강 하구의 멕시코만에 쌓이는 두터운 퇴적물에서 일어나고 있는 것으로 알려져 있다.

청색편암(bluschist)상과 애클로자이트(eclogite)상 변성작용에 해당하는 온도와 압력 조건은 암석들이 빠른 속도로 섭입하는 판과 함께 하강하는 경우 얻어질 수 있다. 이러한 환경에서는 온도에 비하여 압력이 보다 급격하게 증가하게 되고, 결국 암석은 높은 압력과 비교적 낮은 온도의 영향을 받게 된다. 청색편암상 변성작용은 오늘날에도 태평양판이 알래스카 해안과 알류샨 열도 밑으로 하강하는 태평양판의 섭입대 주변부에서 일어나는 것으로 추측된다.

녹색편암(green schist)이나 각섬석암에 해당하는 변성조건은 지각이 대륙의 충돌에 의하여 두꺼워지거나 상승하는 마그마에 의하여 가열되는 지역에서 일어난다. 광역 변성작용이 일어나는 지역으로는 대륙의 충돌이 일어나는 곳이 가장 흔한 경우로서, 이러한 변성암은 애팔레치아 산맥과 알프스 산맥에서 발견된다. 대륙 지각이 충돌에 의하여 두꺼워지는 히말라야 산맥 하부와 안데스 산맥처럼 두꺼워지며 상승하는 마그마에 의하여 가열되는 곳에서는 이러한 변성작용이 현재도 일어나고 있다. 지각이 충분히 두꺼워지면 암석들은 각섬암상에 해당하는 변성 작용을 받거나 함수 부분용융이 시작하는 온도에 도달하게 되며, 결국 변성작용은 혼성암과 마그마를 형성하는 화성작용으로 변한다.

광상을 형성시키는 열수용액의 기원에는 지표수 및 지하수에 기원을 두는 천수(meteoric water), 해수(sea water) 그리고 변성작용의 결과 산물인 변성수(metamorphic water) 등이 있다.

변성 교대작용을 유발시키는 대부분의 용액들은 H_2O가 풍부하며 온도가 250℃ 이상으로 높은 편이다. 이러한 용액을 열수용액(hydrothermal solution)이라 부른다. 열수용액은 암석의 갈라진 틈을 따라 이동하다가 석영이나 방해석과 같이 용해되어 있는 성분을 침전시킴으로써 광상을 형성하기도 한다.

변성 교대작용은 광역 변성작용과 마그마의 활동과 관련이 있으므로 변성교대작용과 열수 용액의 생성은 판구조론과 관련될 수 있다. 주목할 만한 예로서 열수용액에 의하여 생성된 황동석을 포함한 동(구리) 광상들이 남아메리카와 북아메리카 섭입대 주변부에 평행한 방향으로 잘 발달된 띠 형태로 나타난다. 성층화산을 형성시킨 마그마는 섭입된 해양지각이 함수 부분용융 작용을 받아서 생성된 것이다. 이러한 마그마는 용액이 이동하는 경로의 주변지역에서 광물조합을 변화시키는 열수 용액을 생성하는 열의 근원으로 작용하며, 이러한 지역에서 용액에 의한 광상이 형성된다. 지구상에서 우리가 사용하도 있는 광물자원의 풍요로움은 판구조운동 때문에 일어나는 화성작용, 변성작용 그리고 변성 교대작용의 종합적인 영향 때문이라 해도 과언이 아니다.