

오래된 지구를 보는 새로운 눈

‘판구조론’ II

글 | 김경렬 _ 서울대학교 지구환경과학부 교수 krkim@snu.ac.kr

1735년 프랑스 과학원은 실로 이상해 보이는 지구탐사 작업을 적도에 가까운 남아메리카 안데스 지역에서 시작하였다. 탐사의 주요 목적은 이상하게 들릴지 모르지만, 지구 둘레의 1/360에 해당하는 자오선 1도의 길이를 측정하여 지구가 적도로 가면서 과연 불룩한지를 확인하는 것이었다.

당시까지도 많은 과학자들은 신의 창조물인 지구는 완벽한 공이라고 믿고 있었다. 사실 ‘믿고 싶었다’는 표현이 더 적절할지 모른다. 그런데 뉴턴이 ‘프린키피아’에서 지구가 불룩한 공 모양이라는 주장을 편 것이다. 이를 오류라고 믿었던 프랑스 과학자들의 염원을 담은 이 탐사는 프랑스가 북부 스칸디나비아에 파견한 두 번째 탐사대가 먼저 뉴턴의 손을 들어주는 결과를 얻으면서 그 의미를 잃게 되었지만, 안데스의 탐사는 지구의 내부를 살피는 중요한 전기를 마련해 주었다.

지구의 밀도를 측정하라

과학자들이 지표면의 관찰이나 시추를 통하여 직접 접근할 수 있는 지구의 깊이는 기껏 해봐야 20여km로서 반경이 6천400km나 되는 지구의 아주 얇은 표면에 지나지 않는다. 그러나 실제 이를 보거나 만지지 않고서도 우리들은 지구내부의 많은 것을 알 수 있다.

지구내부의 비밀을 알기 위해 과학자들이 사용한 첫 번째 도구는 바로 지구의 밀도였다. 기원전 3세기 에라토스테네스는 이미 지구의 크기를 꽤 정확하게 측정하였다. 문제는 지구와 같은 거대한 물체를 재는 모기를 가진 저울이 없다는 것이었다.

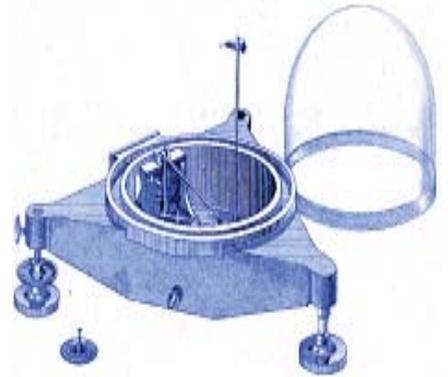
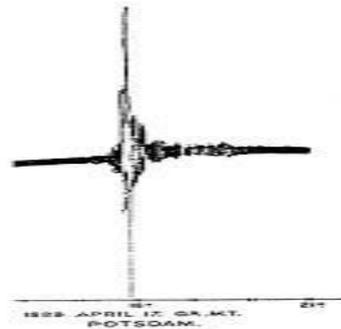


밀른(John Milne, 1850~1913). 지진파가 지구내부를 통해 이동하여 먼 곳까지 전달될 수 있음을 예언하여 지진학의 새 지평을 연 영국의 지진학자

안데스 탐사대의 두 번째 목적 또한 뉴턴과 관련되어 있었다. “산 부근에 추를 매달아두면 산의 중력이 지구와 함께 작용하므로 추가 산 쪽으로 조금 기울어진다”는 뉴턴의 예측은 엄청난 의미를 가진다. 기울어진 정도와 산의 질량을 알아낼 수 있다면, “두 물체가 서로 끌어당기는 정도는 각각의 질량에 비례하고, 둘 사이의 거리의 제곱에 반비례한다”는 뉴턴의 아름다운 만유인력의 법칙에 따라 보편적 중력상수와 함께

지구의 질량을 알아낼 수 있게 되는 것이다.

탐사대의 수문학자 부대는 산맥들이 자신의 측연을 끌어당겨, 측연선이 본래(산맥이 존재하지 않는 경우)의 연직방향으로부터 어긋나게 하고 있음을 알아차렸다. 그러나 이로부터 30여 년이 지난 후 지구의 질량 결정에까지 이를 이어가 지구의 밀도가 4.5g/cm³가 된다는 계산에 성공한 사람은 영국의 매스켈린이었다. 소벨의 베스트셀러 ‘경도’에서 시계공 해리슨을 그렇게도 괴롭혔던 바로 그 사람이다. 이어 1798년 케빈디시는 케임브리지 지질학 교수 미셀이 고안했던 158kg의 납덩이 공 두개와 작은 공 두개, 비틀림줄 등으로 구성된 비틀림저울을 이용한 정밀 실험을 통하여 지구의 밀도가 5.45g/cm³이 됨을 발견하는데, 이는 오늘날 받아들여지는 5.25g/cm³



1889년 독일의 레비르-파슈비츠(E. von Rebeur-Paschwitz, 1861~95)의 지진계에 기록된 최초의 원지진기록(Nature, 40, 1889, p. 295)과 이를 기록한 레비르의 정교한 지진계

에 근사한 값이다.

그런데 지표면에서 통상 발견되는 암석들의 밀도는 $2.5\sim 3\text{g/cm}^3$ 정도밖에 되지 않는다. 따라서 지구내부는 밀도가 $7.8\sim 10\text{g/cm}^3$ 정도로 표면의 암석들보다 훨씬 '무거운 성분'을 포함하는 핵이 존재해야만 했다.

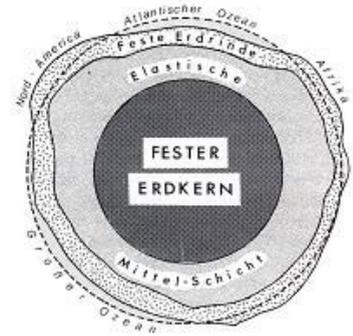
관성능률에 숨어있는 수수께끼

19세기가 거의 끝날 무렵이 되면 이 가설은 회전하는 물체의 성질에 기초하여 더욱 강화된다. 뉴턴이 이미 예측했던 대로 한 구체가 축을 따라 회전할 때 적도 근처의 지점들은 극 쪽에 위치한 지점들에 비하여 더욱 먼 거리를 움직여야 한다. 따라서 상대적으로 더욱 빠른 선속력으로 회전하며, 원심력이 더욱 커진다. 따라서 구체는 전체적으로 볼 때 적도지역이 '부푼' 모습을 띤다. 그런데 구체의 밀도가 균일하게 분포되어 있다면 이 부풀음이 눈에 띌 정도가 되지만, 질량이 핵 쪽에 밀집되어 있다면 그리 중요하지 않게 되며,

이런 성질을 '관성능률'이라고 부른다.

지구의 실제 모습을 살펴보면 적도지방이 약간 부풀어 있기는 하지만 적도지방의 반경이 극과 비교하여 차이가 약 1/300정도 밖에 되지 않는다. 따라서

물리학자들은 관성능률과 지구의 평균밀도 자료를 사용하여 지구 중심에 밀도는 약 11g/cm^3 , 크기는 지구 반경의 약 1/2 정도가 되는 핵이 있다는 결론을 내릴 수 있었다. 이렇게 비교적 간단한 역학 계산을 통하여 19세기 말 무렵 과학자들은 지구의 내부 구조에 대한 꽤 정교한 모형을 만들어 낼 수 있었다. 그러나 이런 모형이 널리 받아들여진 것은 20세기에 들어오면서 등장한 지진학의 연구결과이다.



19세기 후반 역학연구를 통하여 과학자들이 얻어낸 지구내부의 모형



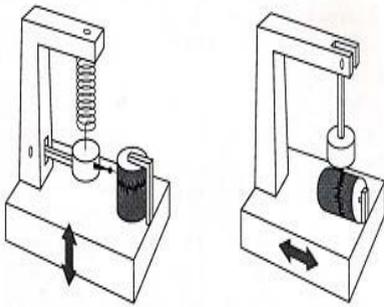
지구의 내부구조를 밝히는 연구에 큰 기여를 한 모호로비치 1857~1936)와 레만 (1888~1993)



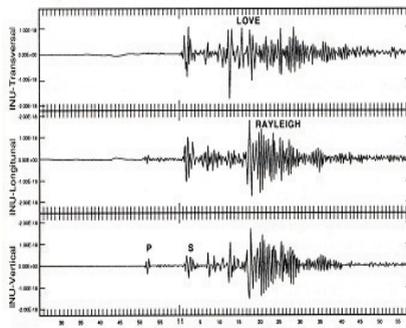
지진학이 확인한 지구의 내부 구조

지진학은 지진이 만들어내는 파동이 지구 내에서 전파되는 모습을 연구하여 지구내부의 구조에 관한 정보를 얻어내는 학문으로 의학으로 보면 X-레이 혹은 초음파가 사람의 몸 속을 통하여 이동하는 것을 이용해 몸 속을 살피는 방사선과에 해당되는 분야이다.

지진학의 발달 초기에는 지진이 물질이나 사람에게 끼치는 파괴력의 정도에 따라 지진을 분류하고 또한 이들의 분포도를 만들고 기록하는 것이 주된 연구 내용이었다. 그러나 1883년 영국의 밀른

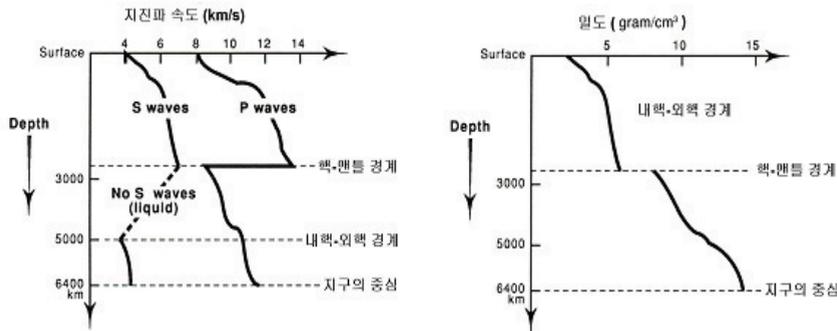


수평방향과 수직방향의 지진파를 기록하는 지진계의 모형과 이런 지진계를 통해서 얻은 지진기록. 1990년 5월 30일 일본 이누야마의 지진계에 기록된 루마니아 지진의 3차원 기록이다.



정확히 분석하여 이들은 지구내부를 통해 이동하는 내부파이며, 반면 이어 도달하는 큰 파들은 지표를 통하여 이동하는 표면파임을 보였다.

지진파의 전달속도를 측정하고 해석하는 방법은 매우 사용하기 쉬우면서도 엄청난 효과 및 영향력을 가지고 있었으며, 이런 지진파들이 지나가는 각각의 궤적을 확인할 수 있게 된 것은 지구의 내부 구조를 연구하는 지진학의 주요 시발점이 되었다. 밀른과 올덤의 연구는 지구과학자들의 열광적 호응을 얻어 전 세계적으로 지진관측소가 갑자기 늘어나며, 이 새로운 연구분야에 종사하는 과학자들이 증가하였다. 지진파가 전달되는 속도분포의 불연속면이나 그 외의 이상현상을 발견하고 이를 통하여 지구의 내부 구조를 발견하려는 노력이 급증한 것은 물론이다.



지구내부의 깊이에 따른 지진파 속도 및 밀도의 분포도

이 일본에 머물면서 일본 내에 큰 영향을 미친 몇 개의 지진을 조사하다가 그 엄청난 에너지에 놀라며, “큰 지진이 방출하는 엄청난 양의 에너지를 고려해볼 때 이런 지진이 만들어내는 진동이 지구상의 다른 곳에서 관측될 수 있다는 것이 전혀 놀라운 일이 아닐 것 같다”는 엄청난 예측을 하면서 새로운 학문으로 등장한다.

6년 후인 1889년 독일의 레베르-파슈비츠는 자신이 만든 정교한 지진계를 통해 밀른의 예언을 확인하였다. 자신의 지진계에 이상한 파형이 기록된 4월 18일 도쿄에서 매우 큰 지진이 발생하였다는 것을 알게 된 것이다.

이 발견에 충격을 받은 인도지질연구소의 올덤은 지진계를 제작하고 지구의 여러 곳에서 일어나는 큰 지진이 만들어내는 일련의 파형들을 기록하는 연구를 시작하였다. 이를 통하여 1900년에 그동안 획득한 지진기록에는 그가 P 및 S로 명명한 작은 진폭을 가진 두 그룹의 파가 먼저 도착하며, 이후 큰 지진파들(발견자의 이름을 따 러브파와 레일레이파라고 부름)이 이를 뒤따라 도착하는 것을 확인하였다. 또한 관측점에 처음으로 도착하는 작은 파들의 시간을

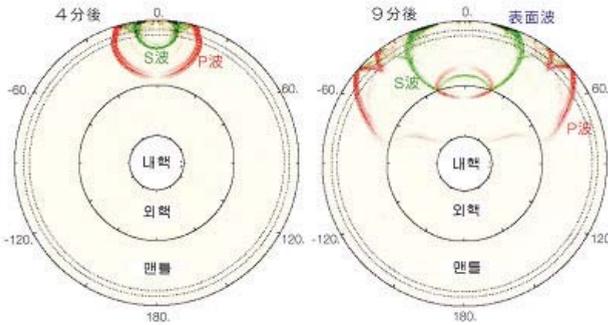
지구의 내부구조가 밝혀지다

1906년 올덤은 압축파인 P파가 지구 반지름의 약 0.4배의 반경(2천550km)에서 그 아래로 내려갈 때 속력이 갑자기 느려지고 더 이상 전파가 되지 않을 것을 관측하여 이 아래의 깊이에 액체상태의 핵이 존재한다는 강한 증거를 얻었다.

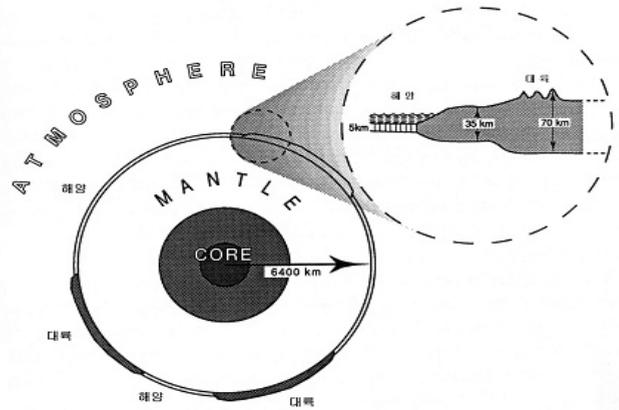
3년 뒤 1909년 유고슬라비아 자그레브의 관측소에서 연구를 하던 모호로비치는 지각과 맨틀 경계 부근 30~40km 깊이에서 지진파 속도가 7.2km/s에서 8.0km/s로 급격하게 증가하는 불연속면이 있음을 발견하였다. 이어 전 세계 곳곳의 지진학자들이 이 불연속면을 확인하였으며, 이를 모호로비치 불연속면, 더 친숙히는 모호라고 부른다.

1914년 구텐베르크는 이전 올덤이 발견한 핵과 맨틀 경계를 더욱 정밀하게 측정하여 핵의 반경이 지구 반경의 0.545(2천900km 깊이)가 됨을 계산하였으며, 이 값은 지금까지도 과학자들에게 받아들여지고 있다.

1929년 코펜하겐 연구소의 레만이 뉴질랜드 근처에서 발생한 큰 지진이 만들어낸 지진파를 조사하면서 파선이 빗나가 도저히 도달될 수 없다고 생각한 몇 개의 P파가 예상 밖으로 관측됨을 발



지진이 일어난 후 4분, 9분 뒤 S파와 P파가 지구내부를 전파해 간 모습을 보여주는 모식도. 내핵에서 S파의 전파가 사라진 것을 볼 수 있다.



지구의 내부 구조를 보여주는 개요

견하였다. 1936년 레만은 핵이 고체의 핵과 이를 둘러싸고 있는 액체의 핵의 두 부분으로 되어 있다는 레만불연속면을 제안하여 이를 설명하며, 이는 후의 더욱 정밀한 지진 관측기록을 통하여 확인되었다. 이렇게 해서 지구 내부구조의 전체적인 윤곽이 알려지게 된 것이다.

지구 모형은 완속한 계란 모양

지진학이 밝혀낸 지구의 내부 구조는 일련의 구형의 층이 겹겹이 쌓여있는 모습이다. 중심에는 고체상태의 내핵과 반경 3천500km의 액체상태의 외핵으로 구성된 밀도가 높은 핵이 자리하고 있으며, 이곳은 지진파가 매우 빠르게 진행한다. 이 핵 주위를 약 2천900km 두께의 맨틀이 둘러싸고 있으며 이곳에서는 지진파의 전파 속도가 핵에 비하여 상당히 작다. 지구표면근처에는 비교적 가벼운 물질로 이루어진 고체의 얇은 껍질인 지각이 있다. 지각은 두 종류의 특성을 달리하는 지역으로 나뉘며 하나는 두께 약 5km 정도의 해양지각이며, 다른 하나는 산맥 등의 존재로 인해서 지역에 따라 변하지만 대개 평균적으로 35km 정도의 두께를 가진 대륙지각이다. 지구내부는 마치 핵은 노른자위, 맨틀은 흰자위, 그리고 지각은 껍질에 해당하는 완속한 계란의 모습과 흡사하다.

지구의 내부구조에 대한 놀라운 발견의 대부분이 거의 10년도 넘지 않는 짧은 동안에 이루어졌다는 것은 실로 놀라운 일이다. 만약 1896년 발견된 베르렐의 방사능이나 20세기 초 발견된 플랑크의 양자이론과 이를 이은 원자 및 핵물리학의 폭발적인 발전이 동일 시대에 일어나 놀라운 발전을 이룩한 지진학의 태동을 완전히 가리지 않았더라면 그 중요성이 과학자들의 세계에 더 널리 알려지고 흥미되었을 것이 분명하다.

지구내부 대부분은 고체

지진학의 2단계는 고체매체 내에서의 음파의 전파에 관한 물리적 이론을 적용하여 관측된 지진자료의 주요 특성을 설명하는 것이었다. 이 연구를 주도한 연구자의 한 사람이 바로 베게너의 대륙이동설을 강하게 반대한 영국의 응용수학자 제프리스였다. 이들의 연구는 압축파인 P파와는 달리 전단파인 S파는 액체상태를 통과할 수 없다는 기본적인 특성을 밝혀주었으며, 이로부터 레만이 핵의 내부(내핵)는 고체인 반면 외부(외핵)는 액체라는 주장을 펼 수 있었던 것이다.

또한 외핵을 제외한 다른 곳에서는 S파가 자유스럽게 전파될 수 있다는 사실은 언제라도 작열하는 마그마를 솟아오르게 하는 액체상태의 맨틀이 우리 발 밑에 존재할지도 모른다는 의구심을 일축시켰다. 즉, 지구 내부의 대부분은 ‘움직일 수 없는’ 고체상태로 되어 있는 것이다.

이런 탄탄한 이론적 배경을 가진 지진학으로 무장된 지구물리학자들이 베게너의 생각을 받아들일 수 없었던 것은 당연하였다. 그러나 수십 년이 지난 1960년대에 이르러 이를 극복할 수 있는 결정적 계기가 바다의 탐구를 통해 이루어진다. 다음 글에서 이를 계속 해보자. ㉔



글쓴이는 서울대학교 화학과 졸업 후 동 대학원에서 석사학위를 받았으며, 미국 캘리포니아대학 샌디에이고 캠퍼스에서 해양학으로 박사학위를 받았다. 현재 지구환경과학부 학부장 겸 BK21사업단장으로 있으며, 해양연구소장을 겸임하고 있다.