

오래된 지구를 보는 새로운 눈

‘판구조론’ III

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

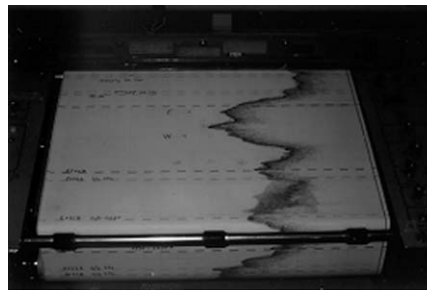
1968년 7월 20일 해저 퇴적물과 해양지각을 뚫을 수 있는 특별시추장비를 갖춘 연구선 글로머 챌린저호가 미국 텍사스를 출발하여 남대서양을 향한 역사적인 처녀항해를 시작하였다. 몇 년 전 영국 케임브리지대학의 매튜스와 바인이 제안한 엄청난 ‘해저확장설’을 검증하는 중요한 항해였다. 이 배경을 이해하기 위해 해저탐사로 이야기를 시작해보자.

바다 밑에 감추어진 해저의 모습

19세기 이전까지도 지표면 70% 이상을 차지하는 바닷속은 알려진 것이 거의 없는 상상의 영역이었다. 바닷물을 다 증발시키면 해저는 어떤 모습을 드러낼까? 이런 궁금증을 풀어줄 유일한 방법은 바다 곳곳의 수심을 재어 보는 것이다.

처음 이용된 방법은 무거운 추를 단 줄을 바닥에까지 내리고 내린 줄의 길이를 재는 것이었다. 당연히 수심이 얇은 곳에 제한될 수밖에 없었으며, 엉키지 않게 줄을 바닥까지 내렸다가 잡아올리는 것이 결코 쉬운 일이 아니었다. 또한 내리는 줄 자체의 무게 때문에 추가 언제 바닥에 닿았는지를 알아차리는 것도 결코 쉽지 않았다.

심해에도 이런 방법이 응용될 수 있게 된 것은 강한 피아노 줄을 추를 내리는데 이용할 수 있게 되면서부터이다. 그러나 이런 특수 시설을 갖춘 최초의 수심측량선 투스카로라로서도 1874년 6월 17일 관측보고서를 보면 약 7천970m(4천356 패팀)에 이르는 수심 측정에 2시간 40여 분이나 노력을 들인 것을 보면 수심을 재는 것이 쉽지 않았던 것임을 잘 보여준다. 이런 힘든 작업을 마다하지 않



PDR(정밀측심기록계) 기록. 굴곡이 있는 지형을 지나 가고 있는 모습을 잘 보여주고 있다.

은 이유는 물론 당시 상업성이 결린 유럽과 미국을 잇는 대서양 해저 통신망 설치에 수심 자료가 절대로 필요했기 때문이다. 이런 지루한 상황에 결정적인 변화를

주는 사건이 1912년 발생하였다. 바로 타이태닉호 사건이다.

이 사건이 배 주변에 있는 빙산과 같은 물체 탐지 기술의 상업적 필요성을 증대시켰음은 물론이다. 사건 발생 2년 후 페센덴(1866~1932)이 음파를 이용한 감지장치 개발에 성공하는데, 바로 잠수함 영화 등을 통해서 우리에게도 익숙한 음향표정장비인 소나(SONAR)이다. 수중의 음속은 이미 1826년 스위스의 콜라돈(1802~93)이 제네바 호수에서 측정한 자료가 있었다. 약 16km 떨어진 곳에서 플래시가 터지며 동시에 만들어낸 종소리가 물속을 통하여 자신에게 도달되어 들릴 때까지 약 10초가 걸린 측정결과를 이용하여 8°C의 물에서 초속 1천435m의 음속을 가짐을 알아냈는데, 오늘날의 값과 비교할 때 약 3m의 오차밖에 나지 않는 정확한 값이다.

그런데 음파를 수평이 아니라 수직방향으로 보내 평균 초속 1천 500m 정도의 음파가 해저에 부딪힌 후 다시 배로 돌아올 때까지의



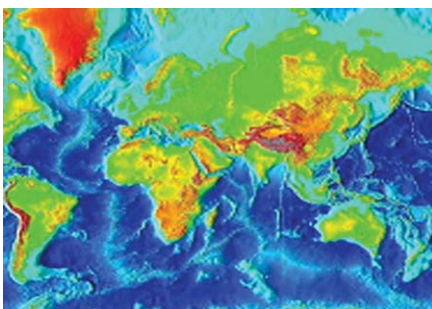
1960년대가 되면서 만들어진 해저지형도. 지도제작자들의 상상이 들어있기는 하지만 대서양에서 인도양-태평양으로 이어지는 해저산맥의 모습이 매우 인상적이다.

시간을 재면 바로 수심을 측정하는 장치가 됨은 말할 것도 없다. 수심 측정의 획기적 혁신이 이루어진 것이다.

정밀측심기록계(PDR)는 항해 중의 배에서 음파를 주기적으로 해저로 발사하고 이들이 해저에 도달한 후 반사되어 배까지 돌아오는데 걸리는 시간을 연속적으로 측정, 기록하는 장치인데, 이 시간이 수심에 비례하므로 이 기록은 항로상의 연속적 해저 단면의 모습을 나타내게 된다.

지구가 들려주는 시

이런 장비를 응용한 해저탐사를 통해 서서히 드러난 해저의 모습은 평평할 것으로 생각했던 종래의 생각과는 판이하게 육지보다 오히려 더 굴곡이 심한 모습이였다. 1960년대쯤에 서서히 전지구적 해저지형도가 완성되기 시작하는데 대서양 중앙에 남북을 가로지르며 해저 산맥이 형성되어 있고, 남극 주변을 돌아 인도양-태평양에 이르기까지 길게 연결되어 있는 것이 특히 인상적이다. 태평양



최근 인공위성의 자료, 수심측정자료를 종합하여 만들어진 해저지형도. 가장 사실에 가까운 모습으로 생각되며 해저산맥, 해구 등의 복잡한 해저지형의 모습이 잘 드러나 있다.

의 해저는 그 모습이 더욱 복잡하여 칠레의 대륙주변에 깊은 해구가 발달되어 있으며, 서태평양에도 마리아나 해구와 같이 남북으로 형성된 깊은 해구와 주변의 해저산맥, 그리고 많은 해

저의 산들이 있는 모습을 보이고 있다. 오늘날은 인공위성을 통하여 해저의 모습을 밝혀내면서 더욱 정확한 해저지형도가 만들어져 해저의 복잡한 모습을 확인시켜주고 있다. 왜 해저는 이런 복잡한 모양을 하고 있을까?

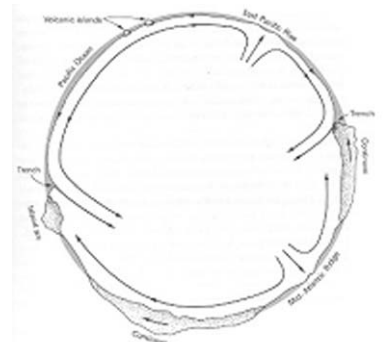
1962년은 왓슨(1928~)과 크릭(1916~2004)이 생리의학부문 노벨상을 수상하며 분자생명과화학의 지평을 여는 분수령이 된 해였다. 바로 이해 지구과학분야에서도 판구조론으로 더욱 다가가는 중요한 전기가 마련되며, 프린스턴 대학의 헤스(1906~1969)가 판구조론 확립 과정에서 가장 중요한 연구의 하나로 꼽히는 논문 '해양지의 역사'를 발표한 것이다. 헤스는 제2차 세계대전 중군 중 책임지고 있던 수송선의 수심측정장치를 통해 바다에 깊은 계곡과 산맥이 존재하며 화산섬들이 널려있는 매우 복잡한 지형을 하고 있음을 발견한 장본인이었다.

이 논문에서 헤스는 "해저산맥은 지구내부로부터 용암이 올라와 식으면서 새로운 해양지각이 만들어지는 곳이며, 이 해양지각은 마치 컨베이어벨트와 같이 시간에 따라 해저산맥의 정상에서 계속해서 멀어져 수 백만년이 지나면 결국은 깊은 해구에 도달하여 지구내부로 다시 가라 앉는다"는 놀라운 이론을 제시하였다. 이런 일이 과연 일어날 수 있는 것일까? 전혀 다른 방면의 연구에서 이에 대한 힌트가 얻어진다.

얼룩말 자기줄무늬의 비밀

1950년대에 새로 시작된 해양 연구 중에 해저암석들의 자기장에 관한 연구가 있었다. 탐사에 이용된 자력계는 2차 세계대전 중 비행기에서 잠수함을 탐지하기 위해서 개발된 장비를 개조한 것이었다. 해양지를 가로지르며 해양조사를 할 때면 으레 자기장이 측정되었는데, 모습이 밝혀지기 시작하는 해저산맥의 주위에서 자기장이 이상하게 변화하는 것을 발견하기 시작한 것이다.

이런 변화를 예측했던 것은 물론 아니지만 한편 그리 놀랄 일은 아니었다. 이미 해양 지각을 이루는 현무암에는 강자성의 광물(자철광)이 포함되어 있으며 이들이 나침반의 방향



1962년 헤스가 제안했던 해저산맥과 해구의 형성과정을 보여주는 모식도



자력계(중앙에 보이는 검은색 장비)를 배에서 내리고 있는 연구자들. 저자의 지도교수였던 크렝 교수가 왼쪽에 보인다.



대서양 아이슬란드 근처의 중앙해령에서 발견된 얼룩말 줄무늬모양의 지구자기 기록

지며 조사결과가 모아지면서 해저가 마치 얼룩말의 줄무늬 모습을 보이고 있었다. 더욱이 이 무늬는 해저산맥을 가운데 두고 양쪽으로 정상자기를 가진 암석과 역전자기를 가진 암석이 서로 반복되어 줄무늬의 띠 모양으로 정렬되어 있는 것임이 발견된 것이다. 이런 규칙적인 줄무늬의 의미는 과연 무엇일까?

1962년 케임브리지 대학의 볼러드경(1907~80)팀에 방금 대학원 과정을 시작한 바인(1939~) 과 1961년 학위를 받고 대학 연구원의 일원으로 합류한 매튜스(1931~97)가 인도양 탐사에 참가하고 있었다.

이 탐사의 주요 연구부문은 물론 해저 암석들의 자기 성질을 관측하는 것이었으며, 여기서도 이미 대서양 등에서 관측되었던 얼룩말 줄무늬 모습이 관측되고 있었다. 특히 바인의 주목을 한 것은 이 지역에서도 줄무늬의 방향이 알려지기 시작한 해저산맥의 방향과 나란하며, 또한 줄무늬 패턴이 산맥의 정상을 기준 축으로 하여 양쪽으로 서로 대칭의 모습을 보이는 것이었다.

을 국지적으로 변화시킬 수 있음이 잘 알려져 있었기 때문이다. 그런데 육상에서의 이상자기 현상은 암석 내에 자성을 띠고 있는 광물이 국지적으로 모여 있기 때문에 나타나는 현상으로서 그 분포가 매우 불규칙했으며, 이런 조사는 사실 철광상을 찾을 때 통상적으로 이용되어 온 방법이었다.

그런데 해양지각의 현무암들이 측정 가능할 정도의 자성을 띠 만큼 충분한 자철광을 함유하고 있으며, 그리고 더욱이 이들의 분포가 무질서하지 않고 어떤 규칙성을 가진 것처럼 나타나는 것이었다. 탐사지역이 넓혀

이들이 금과옥조로 여기던 지침서가 하나 있었다. 바로 헤스가 얼마 전 발표한 해양저의 역사에 관한 논문이었다. 또한 이들은 이미 지구물리학계에 매우 큰 논란을 일으키던 두 가지 가설에 대해서 잘 알고 있었다. 그 하나는 육상 암석들의 지구자기연구를 통하여 지난 수천만 년 동안에 지구의 자기가 남북의 방향을 계속 바꾸어 왔다는 것이며, 또 하나는 이미 많은 과학자들이 폐기처분한 베게너의 대륙이동설로서 바로 대륙이 갈라져 서로 멀어지면서 그 사이에 바다가 생겼다는 것이다. 그런데 바로 이 둘을 하나로 합치면 자신들이 지금 관측하고 있는 자기자료를 잘 설명할 수 있음을 알게 된 것이다.

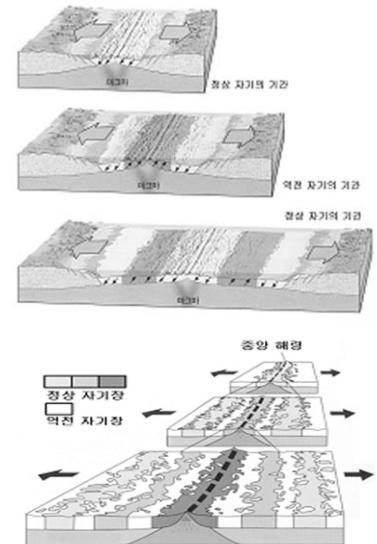
바다가 확장되고 있다

“대륙이 갈라지면서 만 들어지는 바다 중앙의 해저산맥에서 용암이 밀어올라와 식으면서 새로운 암석들이 만들어질 때 이들은 당시의 지구의 방향에 따라 자화될 것이다. 어느 정도의 시간이 지난 후 지구의 자기가 바뀌면 이때부터 새롭게 만들어지는 해양지각은 반대방향의 자성을 가지게 될 것이다. 이렇게 해저산맥에서 새로운 해양지각이 계속 만들어지면 이들 암석의 자기성질은 반복적으로 바뀌게 되며, 바로 얼룩말 줄무늬를 보이는 해양지각의 자기적 성질을 잘 설명할 수 있다.”

1963년 바인과 매튜스가 이런 획기적인 생각을 발표하였을 때 별 지지를 받지 못하였음은 물론이다. 그러나 1966년 바인이 이미 육상의 고지자기 연구를 통하여 규명된 지자기의 반전시기들을 이용하여 매년 수cm 정도



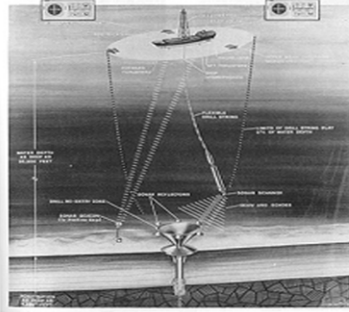
해저확장설의 확립에 결정적인 기여를 한 매튜스(왼쪽)와 바인



매튜스와 바인이 해저확장개념을 도입하면서 생각한 지구자기기록 방법 및 이를 통해서 만들어지는 얼룩말 줄무늬의 모습



해저확장설의 증명에 중요한 기여를 한 DSDO 계획의 탐사선 글로머 챌린저 호



챌린저호가 갖추고 있었던 Dynamic positioning system 개념도



연구선에 탑승하여 채취된 시추자료를 살피는 과학자들



Leg 3의 연구 정점을 보여주는 지도

의 일정한 속도로 해저가 확장하는 것을 가정할 때 해양지가 보여 줄 자기성질을 이론적으로 계산하고 이를 실측치와 비교하여 이들이 잘 일치하고 있음을 미국지질학회에 발표하면서, 해저확장설은 본격적으로 과학자들 사이에 논의의 대상으로 자리를 잡는다.

해저확장의 가설이 맞는지 아닌지를 확실히 검증할 수 있는 방법이 있었다. 해저산맥을 가로지르며 해양지 시료들을 채취하여 이들의 연령을 측정하고 과연 해저산맥에서 멀어지면서 점점 오래된 연령을 보이고 있는지, 또한 이 지자기가 반전되는 줄무늬의 폭과 지구자기의 반전의 역사가 시간적으로 과연 일치하는지를 확인하는 것이다. 이를 완성시켜준 것이 바로 1968년 수행된 DSDP 계획이었다.

모호를 뚫어라

모호(모호로비치불연속대)란 지각과 맨틀을 경계 짓는 면으로 해저는 약 5km, 육상은 지하 수십 km 정도의 깊이에 위치하고 있다. 1950년대가 되면서 해양지를 뚫으면 비교적 쉽게 모호에 도달할 수 있으며, 모호의 특성과 맨틀 구성 암석의 성질에 대한 중요한 정보를 얻을 수 있으리라 생각한 몇몇 미국 과학자들이 있었다. ‘모

홀’이라 명명된 계획의 현실성에 많은 의심이 있었지만, 당시 예산 조정부문의 실력자 토머스의 적극적인 후원으로 실행에 옮겨진다. 그러나 결국 몇 개의 구멍을 수백m 정도까지 뚫은 것으로 이 계획은 중도 하차한다. 소요되는 막대한 예산이나 인력을 뒷받침할 이론적인 당위성이 제시되지 못한 때문이었다. 그러나 이 때 닷을 내리지 않고도 일정한 위치를 유지하며 한 곳에 구멍을 계속 뚫을 수 있는 기술이 개발되었다.

1960년대 들어 해양지 시추 계획이 다시 논의되었을 때 과학자들은 앞서의 ‘모홀’ 계획보다는 좀 더 적절한 규모의 계획을 수립하며, 이 때 당시 석유회사들이 해저석유개발을 목적으로 제작하기 시작한 석유탐사선과 기본적으로 같은 개념의 글로머 챌린저호가 탄생했다. 이 계획은 결국 JOIDES 프로그램으로 승인이 되고, DSDP란 이름으로 마침내 1968년 7월 20일 역사적인 첫 항해를 시작하게 된다. 이 첫 항해의 목적이 해저산맥을 가로지르며 해저의 시료를 채취하고 이들의 연대를 측정함으로써 해저확장설을 입증할 수 있는 결정적인 증거를 얻으려고 한 것은 당시의 정

황으로 너무나 당연한 일이었다.

글로머 챌린저호가 찍어준 마지막 도장

이 처녀항해의 Leg 3에서 해저산맥을 가로지르며 10개의 시추 시료가 채취되었다. 배에 탑승하고 있던 고생물학자들은 즉시 채취된 퇴적물들에 포함되어 있는 화석들을 조사하여 각 정점들의 해양지각의 연대를 추정하였다. 이 결과 해저 산맥의 정점에서부터 떨어진 거리에 비례하여 그 정점의 연대가 직선적으로 증가하고 있음을 분명히 보여주었다. 바인과 매튜스의 주장대로 해저가 분명히 확장되고 있었다!

이제 판구조론으로 들어가는 문턱에서 마지막 걸음을 단계 해 준 것은 바로 베게너의 생각에 그렇게 강한 반대를 했던 지구물리학자들이었다. 다음 글에서는 새로운 자료로 무장되어 판구조론 확립의 결정적 도장을 찍어준 이들 지구물리학자들의 연구를 살펴본다. ㉔



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