

[해설]

20세기에 이룩된 지질과학 업적과 이것이 지질과학 사고방식에 끼친 영향

장순근* · 이상목

한국해양연구소, 경기도 안산시 우체국 사서함 29호, 425-600

Geological Achievements of the 20th Century and Their Influence on Geological Thinking

Soon-Keun Chang* · Sang-Mook Lee

Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P. O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Abstract: Geological achievements of the 20th century revolutionized our views about geological understanding and concept. A good example is the concept of continental drift suggested early in the 20th century and later explained in terms of seafloor spreading and plate tectonics. Our understanding of the compositions of materials forming earth has also improved during the 20th century. Radio and stable isotopes together with biostratigraphy and sequence stratigraphy allow us to interpret the evolution of sedimentary basins in terms of plate movement and sedimentation processes. The Deep Sea Drilling Project initiated in 1960s and continued as the Ocean Drilling Project in 1980s is one of the most successful international research efforts combining diverse disciplines of geological sciences including stratigraphy, paleontology, geophysics, geochemistry, and other fields of earth sciences. Compilation of geophysical measurements including seismic tomography and geomagnetic observations, and new developments in computational techniques have provided a wholly new view about the interior of the earth. Most of the geological features and phenomena observed in deep sea and around continental margins are now explained in terms of global tectonic processes such as superplumes flowing up from the interior of our planet and interacting with plates above. Using geomagnetic information and other geological constraints, we are able to reconstruct the supercontinents such as Rodinia, Pannotia and Nena back in the Precambrian time. The space explorations which began in the late 1950s opened up a new path to astrogeology, astrobiology, and astropaleontology. The impact theory rooted in the discovery of iridium and associated phenomena in 1980s revived Cuvier's catastrophism as a possible explanation for the extinctions of biotas found in the geological record of this planet. Due to the geological achievements made in the 20th century, we now have a better understanding of geologic times and processes that were too long to be grasped by human records.

Key words: plate tectonics, impact theory, geological timescale and processes, astrogeology

요약: 20세기에 이룩된 지질학 업적들이 옛부터 인정되어 온 지질학에 관한 우리의 이해와 개념에 혁명을 일으켰다. 그 대표가 된 예가 20세기 초에 제안된 대륙이동설을 1960년대부터 발달한 해저확장설과 판구조론으로 설명한 것이다. 20세기가 지구내부구조뿐만 아니라 지각과 해양과 대기를 구성하는 물질의 성분과 거동에 관한 이해가 깊어진 시기였다. 방사성 동위원소와 안정 동위원소를 이용한 지구화학의 발달과 생물층서학과 순차층서학이 퇴적분지와 어떤 지역의 지질을 판구조론과 퇴적과정의 관점에서 설명할 수 있게 했다. 지진 토모그래피(seismic tomography)와 지자기측정과 컴퓨터의 발달로 지구의 내부를 완전히 새로이 알게 되었다. 심해저와 대륙연변부에서 관찰되는 지질학관점에서 본 대부분의 특징과 현상들이 지구 내부에서 솟아나는 슈퍼플룸(superplume)과 지판의 상대 운동으로 설명된다. 고지자기와 기타자료를 모아 선캠브리아기에 발달되었던 로디니아(Rodinia)와 판노시아(Pannotia)와 네나(Nena)초대륙을 복원하기에 이르렀다. 1950년대에 시작된 우주연구가 천체지질학과 천체생물학과 천체고생물학의 새로운 가능성을 열고 있다. 1960년대에 시작된 심해굴착연구(Deep Sea Drilling Project)와 1980년에 계속된 대양굴착연구(Ocean Drilling Project)가 고생물학과 지구물리학과 지구화학 같은 지질학과 관련된 분야가 복합된 연구활동을 가능하게 했다. 1980년대에 이리듐과 기타 현상의 발견에 바탕을 둔 외계 천체의 충돌론이 퀴버의 격변설을 다시 일으켜 지구역사상 기록된 생물체의 멸종에 대한 새로운 설명이 되고 있다. 너무나 길어 인간

* E-mail: skchang@kordi.re.kr

의 눈으로는 이해하기 힘든 지질시간과 지질과정을 이해하게 된 것이 주로 20세기에 이룩된 지질과학의 발달 덕분이다.

주요어: 판구조론, 외계물체 충돌론, 지질시간과 지질과정, 천체지질학

서론

20세기에 접어들어 여러 분야의 과학과 기술이 발달하면서 지질과학도 예외가 아니었다. 지질과학의 발달이 그 가운데서도 지구내부 탐사기술과 극미소물체 관찰기술에 힘입은 바 크다. 또한 극미량을 분석하고 측정할 수 있는 각종 분석장비의 발달로 지구를 구성하는 물질연구를 가능케 했다. 예를 들면, 20세기 초에는 광물의 격자에 따라 생기는 X-선 회절상(X-ray diffractive pattern)을 이용하여 광물의 종류를 추정했으며 후반에는 분광분석학(chromatography)이 발달되면서 더욱 자세한 양을 알 수 있는 각종 분광분석기기가 개발되었다. 또 지질과학이 지질과학 이외의 자연과학분야의 발달에도 큰 영향을 받았다. 이런 분야의 학문들이 발달하게 된 바탕에는 수학을 바탕으로 한 물리학과 화학과 생물학 같은 기초과학의 발달과 컴퓨터과학과 컴퓨터의 발달을 가능케 한 과학기술의 발달을 무시할 수 없다. 또 각종 분석장비가 발달되어 지구를 구성하는 물질을 더 잘 알게 되었다.

1960년대부터 시작된 인공위성개발이 지구를 우주공간에서 관측할 수 있다는 점에서 새로운 연구방법을 제공했다. 또 전자공학과 컴퓨터공학의 발달로 이루어진 고감도 센서는 지면이나 해수면의 미세한 운동이나 환경변화와 해저지형 측정과 지구자원 탐사를 포함해 거의 모든 분야에 활용이 가능한 첨단기술이다. 원격탐사가 수많은 정보를 기록해 송신할 수 있다는 점에서 단순한 지면관측 연구를 넘어 우주 공간에서 지구의 크기와 모양을 더 정밀하게 측정할 수 있는 측지학(測地學 Geodesy)분야를 크게 발달시켰다. 예컨대 과거의 천문 라디오안테나를 이용한 극대 기선 전파의 위상차(Verly-Long-Baseline Interferometry, VLBI)를 응용해 이제는 수천 km 떨어진 두 지점 사이의 작은 위치변화를 알 수 있어 대륙간의 이동을 규명할 수 있을 정도가 되었다. 나아가 지금은 인공위성을 이용한 정밀위치 측정계(Global Positioning System, GPS)의 발달로 아주 정확한 위치를 알 수 있다.

지질과학이 발달하면서 지질과학의 연구대상도 눈에

보이는 지표를 넘어 심해저와 지구내부와 지구중심에 이르며 연구시간도 지질시대에 걸친다. 또한 지구를 넘어 달과 행성과 태양계에 이르며 우주공간까지 확대되고 있다. 과거에는 전연 생각하지도 못했던 지질시대를 이해할 수 있게 되었고 지질과학에 관련된 현상들을 지구전체를 통하여 설명할 수 있게 되었다. 나아가 옛날부터 받아들여지던 지질학에 관한 사고방식이 공격받기에 이르렀다. Fig. 1이 지질과학의 발달에 관련된 학문과 지질과학 자체의 발달과 그 영향을 간단하게 표시한 것이다. 이 연구의 목적이 20세기에 이룩된 뚜렷한 지질과학 발달사항을 간단히 논의하고 그러한 현상들이 지질과학에 관련된 사고방식에 끼친 영향을 알아보는 데에 있다.

20세기에 이룬 지질과학 기초업적

대륙이동의 증명

20세기 초에 제안되었던 대륙이동이 1960년대에 들어와 사실로 인정되기에 이르렀다. 1912년 독일의 알프레드 베게너(A. Wegener, 1880-1930)가 독일 지질학회에서 그 내용을 발표했을 때 영국과 미국의 대부분의 지질학자들이 그 주장을 격렬하게 공격했으며 그런 태도가 계속되었다. 그러나 남아프리카의 지질학자 제임스 뒤 트와(J.A.L. du Toit, 1878-1948)와 영국의 지질학자 아서 홈즈(A. Holmes, 1890-1965)가 대륙이동의 가능성을 인정했다. 홈즈가 대륙이동의 원동력으로 베게너와는 달리, 맨틀의 열대류(熱對流)를 상정하기 시작했다는 점이 현대의 사고와 같다. 베게너가 대륙이동의 힘으로 지구자전과 조석운동을 상정해 공격을 받았던 것에 견주면 홈즈의 생각이 크게 발전한 것이라고 말할 수 있다.

1950년대 들어 음파탐지기가 발달되어 해저지형이 밝혀지고 고지자기가 측정되기 시작하면서 해저가 확장되고 대륙이 이동한다는 현상이 사실로 받아들여지고 있다(Heezen *et al.*, 1959; Wilson, 1963). 나아가서 지구는 지각과 상부 맨틀로 이루어진 판(plate)으로 덮여있다는 판구조론(plate tectonics)이 제안되었다(Wilson, 1965; Morgan, 1968).

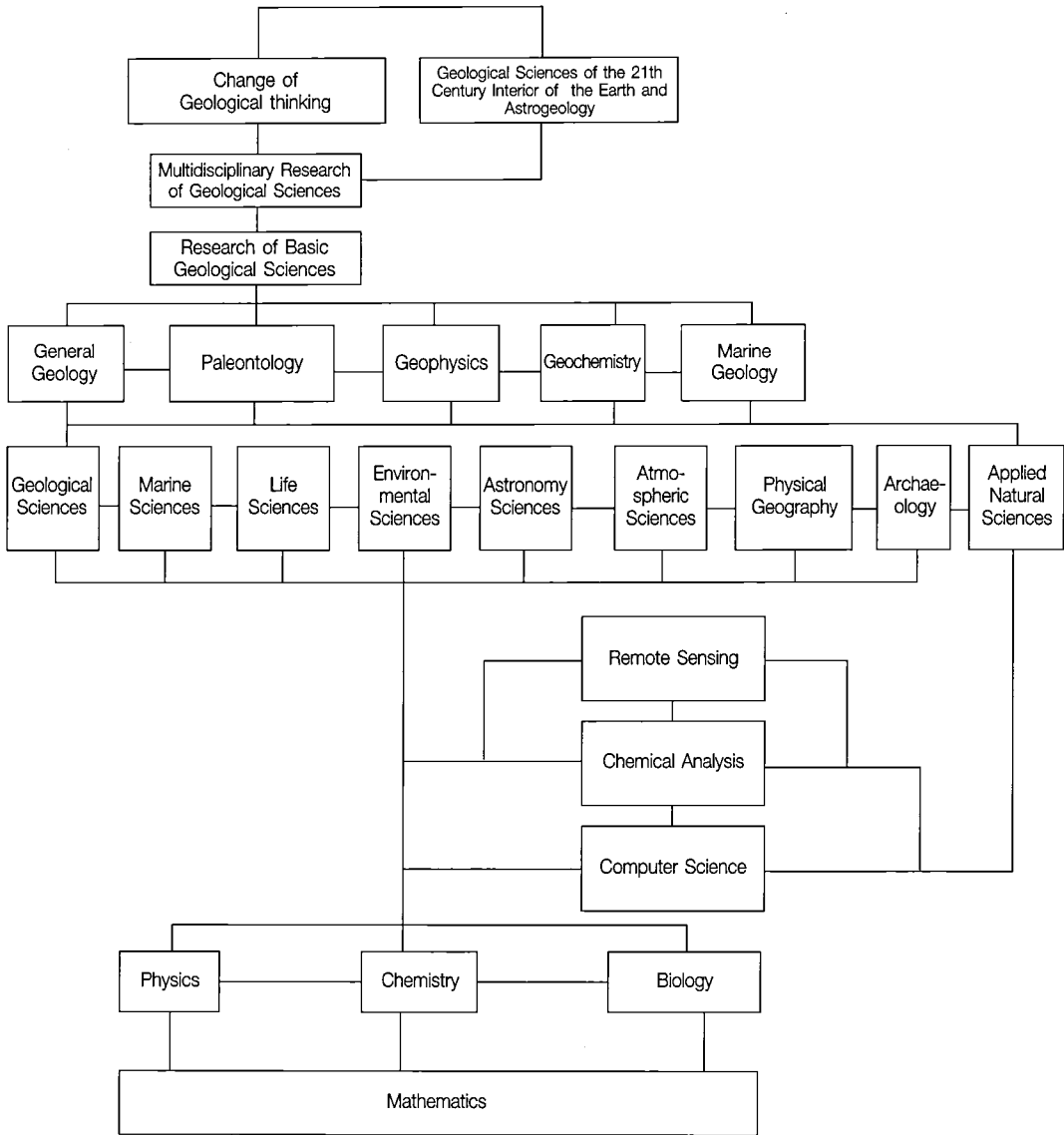


Fig. 1. Schematic diagram showing the development of geological sciences in relationship with other fields.

판구조론이 지구에서 관찰된 현상들, 그 가운데에서도 지진대와 활화산과 해저지형들을 적절히 설명했다. 맨틀에서는 서서히 상승하는 거대한 열대류가 지체운동의 원동력을 제공하고 있으며 그에 부수되는 현상들이 지면에서 관찰된다(Morgan, 1971). 맨틀 열대류가 단순한 대륙이동을 넘어 해저확장과 판구조론의 주요한 동력원으로 받아들여진다.

전통 판구조론에서는 맨틀상부를 강한 암석권과 그 아래의 유체와 같이 움직이는 약한 연약권으로 구분했다. 그러나 최근 대륙에서 행해진 정밀위치 측정계

(GPS)로 측정된 결과가 지각의 상부가 그렇게 간단하지 않다는 것을 시사한다. 실제 대륙지각의 변형을 자세히 살펴보면 강한 상부지각 아래에 약한 하부지각과 다시 강한 상부맨틀로 되어있다고 밖에 설명할 수 없는 구조를 보인다(The MARGINS Initiative, 1996). 그러므로 우리가 흔히 받아들였던 판구조론 또한 새로이 생각해야 한다.

절대연대의 측정

절대연대측정이 방사성 동위원소들의 발견과 연구에

힘입은 바 크다. 방사능연구가 1896년 프랑스 물리학자 앙리 베크렐(H. Becquerel, 1852-1908)이 우라늄의 방사능을 발견하고 1898년 퀴리부인(M. Curie 1867-1934)이 우라늄에서 라듐을 분리하면서 제대로 연구되기 시작했다. 그 후 영국 물리학자 어니스트 러더포드(E. Rutherford, 1871-1937)가 1903년 방사능 붕괴현상을 설명했고, 1905년 우라늄의 연령측정 가능성을 제안했다. 미국 화학자 베트람 볼트우드(B. B. Boltwood, 1870-1927)가 1907년 납의 우라늄에 대한 비율로 미국에서 채집된 우라니아이트 네 점의 나이를 4억 1천만 년에서 5억 3,500만 년 사이라고 발표했다. 또 실론(Ceylon)에서 채집한 토리아나이트의 나이를 22억 년으로 발표해 수억 년을 넘어선 더욱 오래 된 나이의 암석이 있다는 것이 알려지기 시작했다. 1910년이 지나서 방사능물질의 붕괴가 확인되었으며 반감기라는 용어가 쓰이기 시작했다.

앞에서 이야기한 흐름이 1913년 캐나다 시생대 변성암의 나이를 13억 년에서 최고 17억 년 정도로 발표했다(Faure, 1986). 이어서 1933년과 1947년에는 우라늄-납을 이용한 지질시대, 그 가운데서도 고생대 캄브리아기부터 플라이스토세까지 절대연대가 소개되기 시작했다. 당시 고생대 캄브리아기 하한이 7억 년 전(Barrell, 1917) 또는 5억 1천만 년 전(Holmes, 1933)으로 측정되어 발표되었다. 한편 현재 캄브리아기를 연구하는 학자들이 선험캄브리아와 고생대 캄브리아기의 경계를 흔적 화석 파이크테스 페둠(*Phycodes pedum*)이 나오기 시작하는 층준(層準)으로 하기로 투표로 결정했으며, 이는 지금부터 5억 4,400만 년 전이다(Landing, 1994).

1946년부터 1949년까지 방사성탄소의 동위원소를 이용한 짧은 절대연령 측정방법이 활발히 연구되었다. 1950년대에 Rb-Sr 방법과 K-Ar 방법이 제대로 연구되어 오래 된 지층의 절대연대를 연구하는 데 널리 쓰이기 시작했다. 이후 K-Ca 방법과 U-Th-Pb 방법으로 오래 된 지르콘의 절대나이를 알게 되었으며 다른 원소들의 붕괴를 이용한 방법이 연구되었다.

방사능붕괴를 이용한 절대연령의 측정이 그 전까지 막연하게 또는 불충분하게 상상되던 지구의 연령을 과학이론에 맞게 $4.55 \pm 0.07 \times 10^9$ 년으로 확장시켰다. 패터슨(C. C. Patterson)이 1956년 이 값을 북아메리카와 오스트레일리아에서 얻은 운석 5개의 납 동위원소 ^{204}Pb 와 ^{206}Pb 과 ^{207}Pb 과 ^{208}Pb 과 우라늄 동위원소 ^{238}U 과

^{235}U 의 비율을 바탕으로 독립된 세 가지 방사능방법으로 얻었다(Patterson, 1956).

광물과 암석의 형성과정

마그마가 식어 화성암이 되고 퇴적물이 고화되어 퇴적암이 되고 기존암석이 열과 압력의 영향을 받아 변성암이 된다는 것은 옛부터 알려졌다. 그러나 20세기 들어 더욱 자세히 연구되어 화성암 조암광물의 정출순서가 밝혀져 화성암의 형성원인이 제대로 알려지기 시작했다. 1928년에는 캐나다에서 태어나 미국에서 활동한 실험과 이론에 밝은 암석학자 노만 보웬(N. L. Bowen, 1887-1956)이 화성암의 성인에 반응원리를 도입한 새로운 체계의 화성암 암석성인론을 수립했다.

그 후 분석기기의 발달에 따라 광물과 동위원소의 성분을 아주 정확하게 분석할 수 있게 되었고 광물조성을 압력과 열에 따른 상률(相律, phase rule)로 설명했으며 변성상의 변화를 이해하기에 이르렀다. 나아가 고온고압의 실험시설이 개발되어 압력과 온도변화에 따른 변성광물의 안정관계를 합성실험으로 연구하게 되었다. 또 현무암질 마그마가 지구심부에 있는 물질이 고온-고압환경에서 용융되어 생긴다는 사실을 이해하게 되었다.

최근에는 다이아몬드를 비롯한 고압-고온광물을 합성하게 되었다. 나아가 지구내부를 통과한 지진파를 처리한 자료와 다이아몬드 모루(anvil)에서 추정된 다이아몬드의 변화상태를 비교해, 지구내부를 구성한 물질들과 광물들의 종류와 성분과 배열상태를 유추할 수 있게 되었다.

거대한 해저화성암체 발견

관구론을 따르면 맨틀의 열대류현상으로 중앙해령에서 올라온 용암이 분화되고 식어 새로운 지각이 형성된다. 그러므로 우리가 모든 해저지각이 이런 과정으로 생긴 것으로 생각하기 쉽다. 그러나 최근 현재 대양지각에는 그렇게 생긴 지각도 있으나 마그마가 거대한 해저화산처럼 해양판에서 상당히 빨리 올라와 굳어진 화산암체가 있다는 것이 밝혀졌다. 예를 들면, 온통자바 심해대지(Ontong Java Plateau), 마니히키 심해대지(Manihiki Plateau), 헤스 심해용기지(Hess Rise), 샤츠키 심해용기지(Shatsky Rise), 케르겔렌 심해대지(Kerguelen Plateau)가 해양지각에서 갑자기 솟아나 생

긴 해양지각이다(Cox, 1991; Coffin and Eldholm, 1993). 이런 암체의 기원은 백악기 전기인 1억 2천만 년 전부터 4천만 년 동안 상당히 짧은 시간에 하부맨틀에서 아주 빨리 올라와 생겼다는 것이 알려졌다(Larson, 1991, 1995). 이런 분출을 슈퍼플룸(superplume)이라고 한다.

이런 슈퍼플룸들이 솟아올라왔을 때 뿜어낸 이산화탄소와 수증기의 양이 중앙해령을 통해 나오는 양의 수백 배에서 수천 배에 달했을 것이므로 지구환경에 미친 영향이 아주 컸을 것이다(Caldeira and Rampino, 1991; Fuller and Weeks, 1992). 나아가 이런 현상이 단 순히 해저화성암의 분출에 국한되지 않고 동일과정설이 우세하다고 생각해왔던 지질학사에서 격변설이 있을 수 있다는 가능성을 생각하게 한다는 점에서 가치가 있다고 생각된다. 실제 6,500만 년 전 인도에서 데칸 고원을 만든 현무암이 갑자기 솟아나면서 그 영향이 공룡을 포함하여 중생대 생물이 멸종된 이유 가운데 하나라는 주장이 있다(Archibald, 1996).

지진 토모그래피

20세기에는 지진학이 발달하면서 지구내부를 연구하려는 노력이 있었다. 1909년에는 안드리야 모홀로비치치(A. Moholovicic, 1857-1936)가 지각과 맨틀의 경계면, 즉 모호면을 제안했다. 지진파의 전달에 관한 수식이 완성되었으며 지진계가 발달되고 전세계에 걸친 지진조사가 인정되어 1920년에는 120 곳이 넘는 곳에 지진계가 설치되었다. 지구의 내부 층상구조가 발견되기 시작해 1936년에는 내핵의 존재가 발견되었으며(Lehman, 1936) 1940년 지구내부의 층상구조가 대략 알려지게 되었다.

지진파의 전달모습으로 지구내부를 알려는 노력이 2차 세계대전 후 생긴 미소간 냉전으로 그 속도가 더욱 빨라졌다. 지진파연구만이 상대방의 핵능력을 정확하게 알 수 있었기 때문이었다. 또 공식으로 1957년 7월 1일부터 1958년 12월 31일까지 계속된 국제 지구물리 관측년사업(IGY)으로 지진학이 또 한 번 크게 발전하게 되었다.

또한 20세기 후반에 개발된 정밀한 지진파 수신장치와 고성능 컴퓨터의 발달이 지하 수 천 km를 지나오는 지진파를 3차원으로 기록하고 해석해 지진 토모그래피를 만들 정도로 발달했다. 그 정밀도가 핵-맨틀 경계부

(Core-Mantle Boundary, CMB)에서 수 %의 속도차이를 감지할 수 있을 정도이다(Grand *et al.*, 1997; Lay *et al.*, 1998). 나아가 지진 토모그래피의 자료가 지구내부를 만든 물질의 성분과 물리상태, 예컨대 유동상태를 시사해 지자기와 관련이 있는 정보를 제공한다. 또한 이 자료들이 지구내부의 열에너지 분포를 보여주며(Wolfe *et al.*, 1997) 지자기자료와 함께 현재 뿐 아니고 지질시대에 있었던 맨틀에서 솟아오르는 슈퍼플룸의 존재를 지시한다.

지자기연구

칼 가우스(K. F. Gauss, 1777-1855)가 지자기를 기록한 이래 지자기연구는 줄곧 연구대상이 되어 왔다. 마침내 20세기 초부터 제대로 연구되기 시작한 지자기연구가 지구과학발달에 크게 이바지 했다. 바로 1960년대에 들어와 해저확장의 증거가 된 지자기의 대칭현상을 발견했기 때문이다(Vine and Matthews, 1963). 또한 외핵에서 생기는 지자기의 자극(磁極)이 지질시대를 거치는 동안 움직이고 반전(反轉)된다는 현상이 밝혀진 다음 지자기 연구가 대륙이동과 지층대비에 커다란 기여를 했다(Cox, 1969). 나아가 지자기 반전현상을 대비한 자기층서학(magnetostratigraphy)의 발달이 중생대 초기까지 자기층서(磁氣層序)를 수립할 수 있을 정도로 발전했으며 반전 과정을 연구하기에 이르렀다(Laj *et al.*, 1991).

지자기연구가 지구내부의 지자기활동을 지도로 그리거나 핵의 상태를 알 수 있을 정도가 되었다(Jeanloz, 1990). 최근에는 내핵이 맨틀보다 3°정도(Su *et al.*, 1996) 또는 내핵이 지면보다 연 1~3°정도(Jeanloz and Romanowicz, 1997) 빨리 회전한다는 사실이 발견되었다. 이 발견이 지자기의 성인이 되며 자극의 이동이나 반전 같은 지자기와 관련된 변화현상을 설명하는 기초가 될 것으로 보인다. 또 지자기를 연구해 외핵표면 가까운 곳에서 일어나는 유체의 흐름을 파악하거나 핵과 맨틀 경계부의 지구자장을 해석하기에 이르렀다(Bloxham and Jackson, 1991; Bloxham, 1993).

고기후 연구

원소에 따라 존재하는 안정동위원소들 가운데 같은 원소라도 원자량이 큰 원소가 원자량이 작은 원소에 견주어 약간 더 무겁고 그만큼 증발되기 어렵다. 그러

므로 무거운 원소가 대기 속에는 적을 수 있다는 가정에서 출발한 산소 안정동위원소를 이용한 연구가 과거의 절대온도를 추정하기에 이르렀다. 또 상당수 생물체의 껍데기를 만드는 탄산칼슘에 함유된 산소의 안정동위원소의 비율이 그 생물이 살았던 환경의 온도와 관계된다는 사실이 밝혀지면서 고기후 연구가 한 층 더 활발하게 연구되기 시작했다. 이는 퇴적물이나 화석에서 상대연령을 유추하던 과거의 성분 해석에서 정량 측정할 수 있는 한 크게 진보된 방법이다.

최근 식물플랑크톤에 함유된 유기탄소 합성물의 하나인 C_{37} 알케논을 분석한 U^{K}_{37} 로 해수면의 고온도를 구할 수 있는 새로운 가능성이 연구되는 중이다 (Brassell *et al.*, 1986; Sikes and Keigwin, 1994). 한편 고온도연구는 아니지만 탄소의 안정동위원소를 이용하여 고생물의 생산성을 측정할 수 있는 지구화학 방법이 연구되어 고해양연구에 쓰인다.

극미량을 측정하고 분석할 수 있는 아주 정밀한 지구화학 분석기기가 발달하면서 절대고온도나 고생물의 생산성 연구가 가능해졌다.

심해굴착 연구

20세기 후반에 접어들어 과학장비와 굴착장비가 발달하면서 이제는 깊은 바다에서도 시굴할 수 있게 되었다. 처음에는 깊은 바다만을 선택해 시굴했으나 다음에는 대륙사면처럼 상당히 얇은 곳도 시굴지역이 되고 있다. 심해굴착연구(Deep Sea Drilling Project, DSDP)가 수십 수 천 m 깊이의 심해저에 보존된 지질과학 자료를 얻는다는 점에서 과거에는 상상도 하지 못하던 놀라운 연구사업이다.

여기에는 모든 첨단장비와 분석장비와 지질과학의 거의 모든 분야가 참여한다. 예를 들면, 퇴적분지 자체의 지질학연구와 고생물학 특징 연구, 곧 고해양과 고온도와 고기후 같은 고환경 전체와 퇴적분지의 조구조 진화를 연구한다. 또 시굴심 속에서 측정하고 분석할 수 있는 고도로 정밀한 지구화학 성분들과 지구물리 자료들이 측정되고 분석된다.

심해시굴연구는 대양굴착연구(Ocean Drilling Project, ODP)로 계속되어 21세기 초에는 일본이 종합대양굴착연구(Integrated Ocean Drilling Program, IODP)라는 프로그램의 일환으로 새로운 굴착선을 건조할 예정이다 (JOI, 1996).

외계물체 충돌론

1980년에 등장한 외계물체 충돌론(外界物體 衝突論)이 생물이 지구환경의 변화에 적응하지 못해서가 아니라 순수한 외부의 충격으로 멸종될 수 있다는 현상을 시사했다(Alvarez *et al.*, 1980). 지질학사상 처음 제기된 이 주장이 처음 많은 논란을 불러일으켰다(Raup, 1991). 이 주장이 처음 제기되었을 때는 중생대 말 지구에 충돌한 외계의 물체를 지름 10 ± 4 km 정도의 소행성으로 추정했다. 그러나 지금은 여러 개의 혜성이 지구에 충돌했던 것으로 보는 의견도 있다(Carlisle, 1995). 실제 멕시코 유카탄 반도에서 6,500만 년 전에 만들어진 충돌구인 칩쭈룹(Chicxulub)이 발견되었고, 플라이오세에 남방양 해저에서도 충돌 증거들이 발견되었다(Gersonde *et al.*, 1997). 또한 외계물체의 충돌과 대규모 해퇴현상과 서식지분산과 화산폭발 같은 지구 자체에서 생긴 복합요인으로 중생대 말 대멸종이 일어났다고 설명한다(Archibald, 1996).

외계물체 충돌론이 현재 주로 6,500만 년 전의 중생대/신생대 경계연구에 치중하나 그보다 더 오래된 시대의 멸종현상의 설명에도 같은 연구방법을 적용할 수 있다고 믿는다.

생명의 기원과 발견

구소련의 알렉산더 오파린(A.I. Oparin, 1894-1980)이 1920년대에 시작한 생명의 발생연구가 스탠리 밀러(S.L. Miller, 1930-)와 그의 지도교수인 해롤드 유레이(H.C. Urey, 1893-1981)가 1953년 원시대기라고 생각되는 성분의 공기에서 단백질이 생성될 수 있다는 실험결과로 큰 전기를 마련했다. 그후 생명체가 원시지구에서 탄생되었다고 생각하게 되었다. 그러나 운석에서 단백질 성분이 발견되면서 생명체가 외계에서 탄생돼 지구로 왔다는 주장도 만만치 않다. 반면 1970년대말 동태평양 해저산맥 열곡에서 발견된 심해열수공(深海熱水孔) 생태계가 과거에는 상상하지 못했던 새로운 발견이다. 이 발견으로 심해열수공이 생명체의 발생장소로 관심이 커지고 있다.

한편 1946년 남부 오스트레일리아 에디아카라에서 생물군화석이 발견되면서 선포브리아 시대에 생물이 없다는 과거의 생각이 틀렸음이 밝혀졌다. 이후 원생대와 시생대지층에서도 생명체가 발견되었다. 지금까지

가장 오래 된 것으로 생각되는 생명체가 서부 그린랜드에서 발견된 생물기원의 탄소덩어리로 38억 7천만 년 정도 되었다(Mojzsis *et al.*, 1996).

한편 오스월드 애버리(O. T. Avery, 1877-1955), 맥레오드(C. MacLeod), 맥카티(M. McCarty)가 1944년 생물의 형질을 유전시킬 수 있는 유전자(DNA)를 발견했다. 또 제임스 왓슨(J. Watson 1928-)과 프란시스 크릭(F. Crick, 1916-)이 1953년 유전자의 이중나선구조와 복제 기술을 연구해 1960년대에는 유전자를 해독하기에 이르렀다. 그에 따라 발달한 분자생물학(molecular biology)이 지질과학, 그 가운데서도 고생물학에 크게 이바지하기 시작해, 최근에는 화석에서 고생물의 유전자를 추출해서 고생물을 복원하려는 분자고생물학(molecular paleontology)이 연구되기에 이르렀다(Cano and Borucki, 1995; Poinar *et al.*, 1998). 이런 아이디어가 “쥐라기 공원”과 “잃어버린 세계”라는 공상과학영화에서 공룡을 복제해서 살려내는데 이용되었다는 것은 우리가 잘 알고 있는 사실이다.

천체지질학

1957년 10월 4일 구소련의 스푸트니크(Sputnik) 1호 인공위성의 발사가 인류의 우주공간 연구의 시발점이 되었다. 이후 미국과 구소련이 달연구 경쟁에 뛰어들었고 사람이 인류역사상 처음으로 1969년 7월 달에 착륙하면서 행성의 연구는 20세기에 이룬 인류의 가장 위대한 업적 가운데 하나가 되었다. 우주 연구가 1980년대에도 계속되어 이제는 우주공간에 허블(Hubble) 망원경을 건설했으며 미국과 러시아와 일본이 공동으로 우주정거장을 건설하는 단계에 이르렀다. 행성연구가 계속되어 1997년에는 로봇의 힘으로 화성의 표면자료를 얻기에 이르렀다(Smith *et al.*, 1997). 이런 행성연구에 힘입어 달표면의 암석연구로 시작된 달지질학이 이제는 지구가 아닌 화성과 금성 같은 행성의 지질학, 곧 천체지질학(astrogeology)으로 발전했다.

천체지질학이 위성과 행성의 암석, 광물, 지형, 토양, 화산, 지질구조, 층서, 기후변화 같은 행성과 위성의 표면 가까운 곳의 물리상태와 그 변화와 내부구조를 연구한다(Bullock and Grinspoon, 1996; Pappalardo *et al.*, 1998; Zuber *et al.*, 2000). 또 있을 수 있는 천체고생물과 천체미생물 같은 생물부분을 연구하는 부분이 있어 지질과학의 모든 분야를 망라한다고 말할 수 있

다(Pappalardo *et al.*, 1999). 예를 들면, 목성의 위성인 오이로파(Europa)가 평균두께 150km 정도의 얼음으로 덮여 있고 그 아래에 바다가 있는 것으로 알려졌다(Carr *et al.*, 1998). 이러한 사실을 바탕으로 미국 국립과학재단(NSF)에서는 극한환경에 서식하는 생명체연구(Life in Extreme Environments, LExEn)를 통해 그 진실을 밝히려 하고 있다. 그 전단계로 핵잠수함으로 해저지형이 잘 알려진 북빙양(Arctic Ocean) 해저를 연구할 준비를 하고 있는 것으로 알려졌다. 이런 연구가 지구자체의 생명체발생뿐만 아니라 지구 외에서 생명체가 발생할 수 있다는 가설에 대한 해명도 되리라고 생각된다.

20세기에 이룩된 지질과학 복합업적

앞에서 이야기한 20세기에 이룩된 지질과학 기초업적들이 복합되어 더욱 큰 업적으로 발달했다.

지질현상의 입체 해석

20세기에 이룩한 지질학 업적 가운데 가장 큰 것의 하나가 아마도 지질학에 관련된 현상을 단순히 눈에 보이는 일차원 현상이 아닌 입체현상에 시간개념까지 도입된 4차원으로 생각하게 된 것이라고 할 수 있다. 이러한 접근방법이 1960년대 들어 해저확장설과 판구조론이 대두되고 이어서 지구내부의 역동현상이 밝혀지면서 더욱 분명해졌다. 예컨대 맨틀의 열대류(熱對流)현상으로 약권이 움직이고 그에 따라 해저가 확장되고 대륙이 이동한다. 또 중앙해령이나 열점의 활동도 시간에 따라 변하는 데 그 결과는 대양지각의 변화로 나타난다. 여기서 중요한 점이 마그마 작용, 화산작용, 지각에 가해지는 힘, 곧 응력(stress)이 시간에 따라 변하면서 판이 확장됨으로 공간에 따라 변화하는 모습으로 나타난다는 것이다.

이러한 개념에 따라 환태평양 지진대와 트란스히말라야 지진대와 화산대와 해구와 해연(海淵) 같은 특이한 해저지형과 호상열도와 특징있는 해안이 이치에 맞게 설명될 수 있다. 또 히말라야산맥과 안데스산맥 같은 거대한 산맥들의 형성과 동아프리카의 대열곡(Great Rift Valley)이 설명된다. 그리고 이른 바 열점(hotspot)인 하와이군도나 타히티 섬이나 아이슬랜드 같은 대양에 흩어진 섬에 흔한 화산과 지진현상이 무리없이 설명된다.

중앙 해령이나 열점의 활동도 시간에 따라 변하므로 그 변화에 따른 공간의 변화가 앞으로 연구해야 할 분야의 하나이다.

또 자극의 움직임이 핵에서 배출되는 열의 총량, 나아가 맨틀 열대류와 관계된다. 맨틀에서 간혹 갑자기 솟아나는 급격하고 아주 큰 열대류가 중생대 백악기/신생대 제3기와 고생대 페름기/중생대 트라이아스기의 멸종현상의 한 원인이 된 것으로 보인다(Courtillot and Besse, 1987).

지체구조 해석이 현재 눈에 보이는 구조해석 단계를 넘어 지질시대의 초대륙(超大陸)들을 복원(復原)하는 단계에 이르렀다. 베게너가 제안했던 곤드와나랜드(Gondwanaland)가 이제는 옛날에 그린 대륙이 되었으며 대륙이 이동하는 단계에 따른 고지리(古地理)가 어느 정도 윤곽을 들어내게 되었다. 예컨대 암석에 잔류된 고지자기 해석과 암상과 화석과 지질구조를 바탕으로 더 오래 된 원생대 후기의 로디니아(Rodinia) 초대륙과 판노시아(Pannotia) 초대륙과 원생대 전기의 네나(Nena) 초대륙이 복원되었다(Dalziel, 1995; Rogers, 1996). 해저확장의 이동방향과 속도가 연구되면서 5천만 년 후의 지구모습이 예측되었으며 2억 5천만 년 후에 새로운 초대륙이 생기리라는 예측을 하기에 이르렀다(丸山 · 磯崎, 1999).

한편 지체구조 연구가 지층에서 산출되는 화석의 고환경연구를 추가하므로 연구내용을 한 단계 끌어올렸다. 예컨대 화석의 단순한 생태에서 유추한 초기단계의 고환경 복원을 지나 지구화학생분 분석으로 고온도와 절대연대를 구해 실제에 더 가까운 고환경을 복원하기 시작했다. 또한 1970년대에 발전했던 역동퇴적학(dynamic sedimentology)과 순차층서학(sequence stratigraphy)의 발달로 퇴적환경과 그 과정에 관한 지식이 쌓이면서 실제에 더 가깝게 고환경을 해석하고 복원하기 시작했다. 고환경복원에는 부유유공충, 저서유공충, 난노플라크톤, 규조, 방산충, 외편모충류, 산호와 해면동물(sponges), 개형충, 포자와 화분, 익족류(翼足類) 같은 모든 분야의 미고생물이 쓰인다. 또 미고생물을 재료로 하여 안정동위원소나 유기탄소 화합물을 분석한 절대고온도자료에 고해류, 고수심, 고염분, 고수륙분포, 고기후를 종합한 고해양학 해석이 가능하게 되었다. 여기에 가능하다면 고지자기의 결과를 추가하여 조구조(造構造) 해석을 할 수 있도록 한다.

해저가 확장하고 대륙이 이동하는 것에 따라 고지리가 달라지고 고해류와 풍계와 고기후 같은 고환경이 달라졌다. 이와 같이 변하는 고환경에 적응한 생물들은 발전했고, 적응하지 못한 생물들은 멸종했다. 1980년 5월까지만 해도 고생물이 지질시대 고환경에 적응하지 못해 멸종되었다고 설명되었다. 그러나 6월 9일 외계물체 충돌론이 대두되어 지상의 생물들이 지구자체의 변화나 생물자신이 아닌 순수한 지구외부의 원인으로도 멸종될 수 있다는 새로운 사실이 밝혀지기 시작했다(Alvarez *et al.*, 1980).

지구내부 투시

지구물리학자들이 20세기 후반기 지구의 내부를 들여다보게 되었다. 이런 연구가 큰 지진이나 핵폭발을 감지할 수 있는 감지기와 그를 기록할 수 있는 기록계와 방대한 자료를 처리할 수 있는 컴퓨터의 덕분이다. 그 결과 탄생된 분야가 바로 지진 토모그래피(tomography)이다. 지진 토모그래피를 발전시킨 사람은 많으나 그 가운데서도 폴란드 출신 미국인인 아담 드지원스키(A. M. Dziewonski)의 업적을 빼어 놓을 수 없다. 그가 만든 토모그래피 모델인 지구예비 참고모델(Preliminary Reference Earth Model, PREM)이 그 후 모든 토모그래피 연구의 기준이 되고 있다(Dziewonski and Anderson, 1981). 또 앞에서 이야기한 다이아몬드 모투의 발명이 고압과 고온에서 일어나는 물질의 상태 변화를 알 수 있게 했으며 지구내부를 구성하는 물질의 성질과 변화를 유추하게 했다.

그 결과 추정만 해오던 지각-상부 맨틀-하부 맨틀-외핵-내핵으로 된 지구내부의 층상구조와 거대한 슈퍼플립의 상승과 하강을 확인했으며 외핵표면의 상태와 물질의 분포를 설명하기에 이르렀다. 예를 들면, 외핵표면의 D''층과 초저속층(Ultra Low Velocity Layer, ULVL)의 존재와 분포와 외핵이 철로 되었으며 물리상태가 물 정도의 유동성이 있는 액체이며 내핵이 고체라는 사실도 분명히 알게 되었다. 나아가서 방향에 따라 내핵에서도 생기는 지진파의 속도차이를 발견했으며 지구내부에서 전달되는 파동의 더욱 세밀한 경로와 속도를 알게 되었다. 또한 지구내부에 있는 물질의 결정형이나 배열 같은 물리상태와 화학성분 변화를 유추할 수 있게 되었다(van der Hilst *et al.*, 1997; Lay *et al.*, 1998). 지구내부에 대한 지식들이 지구내부에 대한 이해를 넘어 지

체구조의 해석을 가능하게 하고 지표에서 관찰되는 현상을 지구내부의 활동과 연결시켜 해석할 수 있게 만들었다(Caldeira and Rampino, 1991; Duncan and Richards, 1991; Thompson, 1998).

한편 앞에서 언급한 내핵과 맨틀-지표의 회전차이가 1950년대에 가설로 제기된 지자기 형성원인인 지구 다이나모(dynamo) 가설을 설명하는 데 이바지 할 것이라 생각은 놀라운 발견이었다(Glatzmaier and Roberts, 1996; Fuller *et al.*, 1996). 최근에는 멀리 떨어진 곳에서 관측된 지진기록에서 내핵이 맨틀보다 연간 0.15° 빨리 돈다는 것이 알려졌다(Vidale *et al.*, 2000). 이 값이 앞에서 이야기한 지자기관측으로 구한 값보다 상당히 작다. 이런 문제는 앞으로 해결될 것이다.

지질과학에 관한 사고방식의 변화

지질시간과 지질과정의 이해

20세기에 이룩된 지질과학 업적들이 우리의 지질학에 관련된 사고방식에 큰 영향을 끼쳤다. 그 가운데 하나가 지질시간이 과거에 이야기하던 것과는 비교가 되지 않을 정도로 길다는 사실이다. 예컨대 지구의 나이가 윌리엄 톰슨 켈빈(W. T. Kelvin, 1824-1907)경이 19세기 말에 생각했듯이 2천만 년에서 4천만 년 정도가 아니라 그의 200~100배가 넘는 46억 년이다.

지질시간이 인간의 일생이나 역사시대에 전주면 대단히 긴 시간이다. 그러므로 흔히 인류의 문자기록에 바탕을 둔 역사시대에 익숙한 대부분의 사람들에게는 이해되지 못할 시간이다. 지질시간이 그야말로 영국의 박물학자 찰스 다윈(C. Darwin, 1809-1882)의 “비글호 항해기”에서 볼 수 있는 표현대로 “정신이 아득할” 정도의 시간이다(Doubleday and Company, 1962, p. 172). 이런 지질시간이 지질학자 외에는 이해하기 힘들다. 지질학 외에 상당히 긴 시간을 다루는 고고학이 인류조상의 생활과 그들이 살았던 환경을 고찰한다는 점에서 지질학의 영역에 들어온다고 생각할 수 있다. 그러나 인류의 먼 조상이 불과 400~500만 년 전에 출현했으므로 고고학이 지질시대로서는 아주 짧은 시대를 다룬다고 말할 수 있다. 지질시대를 1년으로 한다면 인류가 12월 31일 오후 5시 경 나타난 격이 된다. 여기에 부연하면 긴 지질시간이 이해되면서 과거에 믿었던 지구의 나이가 자연스레 사라졌다.

지질 시간이 우리의 상상을 넘어서는 긴 시간이므로 우리가 지질 과정을 무리 없이 이해할 수 있게 되었다. 예컨대 지판과 지판이 모이는 경계부에서는 지하증온(地下增溫) 현상이 불안정해져 기존암석들이 평형을 되찾으려는 작용으로 변성암이 만들어진다. 또 조건에 따라 확장압질 마그마가 만들어져 주위에 관입하거나 현무암질 마그마가 만들어져 지각의 얇은 부분을 뚫고 분출한다. 한편 땅 위에 있던 바위가 비와 바람으로 풍화되고 침식되어 생긴 쇄설물인 자갈과 모래와 진흙이 빗물이나 유수로 씻겨내려가 호수나 바다의 바닥에 쌓인다. 그런 퇴적분지에 수 천만 년 동안 계속하여 퇴적물이 쌓이게 되면 퇴적층이 점점 두꺼워지고 무거워져 아래에서는 퇴적물의 알갱이들이 교결물질로 교결(膠結)되는 이른바 속성(續成)작용이 진행되어 단단한 퇴적암이 된다. 그 동안 주변에서는 지질 조건에 따라 압력이 생길 수 있고 지층이 그 영향으로 휘거나 잘라져 소위 습곡되고 단층이 생긴다. 이런 일련의 지질과정이 지질학자뿐만 아니라 지구과학을 배우는 고등학교 학생에게도 쉽사리 이해되나 이런 생각을 할 수 있는 것은 지질시간이 대단히 길다는 것을 이해한 다음부터이다.

우리 눈에 보이는 지형이 다 그렇게 될 원인과 이유가 있다. 단지 인간의 생애가 그런 과정에 전주면 너무나 짧아 지형이 만들어지는 과정을 못 볼 따름이다. 그러므로 높은 산맥이나 험준한 지형이나 사막은 시간이 흐르면서 그 모습이 조금씩 바뀐다. 또한 고정된 것처럼 보이는 해저와 지각도 서서히 확장되고 그에 따라 대륙들도 이동한다.

지질현상에 관한 전통사고의 수정

1980년 제시된 외계물체 충돌론이 그 전까지 우리가 과거부터 비판 없이 받아들였던 지질학에 관한 사고방식을 바꾼 지질학에서 뜻있는 사건이었다. 적어도 그 전까지는 지질학자들이 지상의 생물들이 변하는 지구 자체의 환경에 적응하지 못해 멸종한다고 생각해왔지 어느 날 지구가 소행성이나 혜성에 부딪혀 생물들이 멸종하리라고는 생각하지 못했기 때문이다. 외계물체 충돌론이 대두되자 환경에 적응한 생물이 살아남는다는 다윈의 주장이 공격당하기에 이르렀다(Hsü, 1986; Gould, 1989; Raup, 1991).

외계물체 충돌론이 지질학에서 다루는 현상들이 생기는 과정에 관한 우리의 사고방식을 바꾸었다는 점에

서 특별한 의의가 있다고 생각된다. 우리는 그 전까지 우리 눈에 보이는 지질학과 관련된 현상에서는 제임스 허튼(J. Hutton, 1726-1797)과 찰스 라이엘(C. Lyell, 1797-1875)이 주장했던 동일과정설(Uniformitarianism)이, 허점도 많았으나(Gould, 1965; 이민성, 1999 미발간 개인자료), 절대 유효한 것으로 인정되어 왔다. 그러므로 조르주 퀴비에(G. Cuvier, 1769-1832)가 주장했던 격변설(catastrophism)은 거의 완전히 무시당했다고도 말할 수 있다. 그러나 외계물체의 충돌론이 대두되면서 격변설이 지구의 역사를 해명하는 데 상당한 기여를 한다고 생각할 계기를 마련했다는 점에서 충돌론의 큰 의의가 있다.

또한 최근 대두된 슈퍼 플룸의 중요성이 우리가 지금까지 너무 판구조론에 집착하여 모든 현상을 해석해 오던 관습에 대한 이견(異見)이라는 데 더 큰 의미가 있다고 생각된다. 만약 판구조론에 바탕을 두어 중앙해령에서 매년 조금씩 생기는 현무암 지각, 화산작용, 지질운동을 동일과정설로 본다면 슈퍼 플룸으로 지면에 갑자기 많은 양의 화성암이 올라오는 경우가 격변설이라고 볼 수 있다. 이러한 슈퍼 플룸의 예로 육상에는, 앞에서 이야기한, 인도 데칸고원, 미국서부 콜롬비아 강 부근에 널리 분포한 현무암이 있으며 해저의 예로는 온통자바 심해대지(Ontong Java Plateau), 케르겔렌 심해대지(Kerguelen Plateau), 샤츠키 심해융기지(Shatsky Rise)와 다른 심해 융기지들이 있다. 이들 대부분이 앞에서 보았듯이 4천만 년이라는 지질학에서는 상당히 짧은 시간에 형성된 것으로 생각된다. 그렇다면 이들이 만들어지는 과정에서 분출된 수증기와 이산화탄소의 양이 아마도 현재 중앙해령을 통해 대기로 유입되는 양보다 엄청나게 많으리라 생각된다. 그렇다면 과연 현재의 대기와 기후가 오랜 기간에 걸쳐 만들어진 것인가, 아니면 짧은 기간에 갑자기 만들어졌는가 하는 문제를 생각해 보지 않을 수 없다. 그러므로 최근 지질학계에서 재평가하기 시작한 슈퍼 플룸에서 생긴 커다란 화성암체가, 중앙해령에서 솟아나는 화성암과 달리, 격변설에 부합된다는 점에서 격변설의 중요성이 점점 더 높아진다고 생각된다.

이런 현상의 의의가 동일과정설 또는 격변설 가운데 어느 한 주장이 지질학에서 다루는 현상을 이치에 더 맞게 설명하느냐 그렇지 못하느냐에 있지 않다고 생각된다. 그보다는 과학이 발달하고 시간이 가면서 과거에는 생각하지도 못했고 보지도 못했던 현상을 보고 생각

하게 되었다는 점에서 더 큰 의의가 있다고 믿는다. 바로 동일과정설이 일반지질현상의 대부분을 설명할 수 있는 반면 격변설이 지구역사상 흔하지는 않으나 분명히 있는 현상을 설명했다는 점에서 격변설의 가치가 있다고 생각된다. 이런 점에서 두 주장이 서로 배타 관계가 아니라 보완 관계에 있다고 말할 수 있다.

결론

20세기에 기초과학과 전자공학과 컴퓨터공학 같은 분야의 분석기술이 크게 발달하면서 지질학도 크게 발달했다. 그 가운데서도 지구의 나이가 대단히 길다는 것이 밝혀져 지질시대에 대한 올바른 개념을 정립하는데 큰 구실을 했다. 나아가 지질학자들이 침식과 퇴적-조산운동에 이르는 일련의 일반지질학 현상들을 바르게 이해하게 되었다. 또 생물의 진화를 인정할 충분한 시간을 찾기에 이르렀다. 또 대륙이동과 지체구조를 종합해서 설명할 수 있게 되었으며, 지구의 내부를 상당히 자세하게 알 수 있게 되었다.

이번 세기에는 지구내부를 구성하는 물질과 그 물질들의 활동에 따른 지구내외부로 나타나는 현상들을 더욱 분명하게 이해하고 이치에 맞게 해석할 수 있을 것이다. 물론 그런 이해와 해석이 단지 현재의 지구와 지질현상에 국한되지 않고 지질시대로 거슬러 올라가 오래된 지질현상을 해석하고 이해하는 데에도 적용될 것이다. 나아가 생명체 발생 과정과 천체지질학이 크게 발달할 것이다.

감사하는 글

서울대학교 사범대학을 1999년 2월에 은퇴한 이민성 교수가 이 연구를 위하여 지질학사에 관한 미발간된 원고를 보내주었다. 한국해양연구소 이종익 박사와 허순도박사와 김현철 박사와 이윤호 박사와 이름을 밝히지 않은 심사자들이 이 논문을 위하여 좋은 비판과 제안을 했다. 또 한국해양연구소가 이 연구를 지원했다. 위의 사람들과 기관에 깊이 감사드린다.

참고문헌

Alvarez, L.W., Alvarez, W., Asaro, F., and Michel, H.V., 1980,

- Extraterrestrial Cause for the Cretaceous-Tertiary Extinction. *Science*, 208, 1095-1108.
- Archibald, J.D., 1996, Dinosaur Extinction and the End of an Era: What the fossils say. Columbia University Press, 237 p.
- Barrell, J., 1917, Rhythms and the Measurements of Geologic Time. *Geological Society of America Bulletin*, 28; 745-904.
- Bloxham, J., 1993, Mapping the Magnetic Field at the Core-Mantle Boundary: Constraints on the Geodynamo. *GSA Today*, 3, 221, 224-225, 249-250.
- Bloxham, J. and Jackson, A., 1991, Fluid flow near the surface of the Earth's Outer Core. *Reviews of Geophysics*, 29, 97-120.
- Boltwood, B.B., 1907, On the ultimate disintegration products of the radio-active elements. Part II. The disintegration products of uranium. *American Journal of Science*, 4, 23, 77-88.
- Brassell, S.C., Elington, G., Marlowe, I.T., Pflaumann, U., and Samthein, M., 1986, Molecular stratigraphy: A new tool for climatic assessment. *Nature*, 320, 120-133.
- Bullock, M.A. and Grinspoon, D.H., 1996, The stability of climate on Venus. *Journal of Geophysical Research*, 101, E3, 7521-7530.
- Caldeira, K. and Rampino, M.R., 1991, The Mid-Cretaceous Super Plume, Carbon Dioxide, and Global Warming. *Geophysical Research Letters*, 18, 987-990.
- Cano, R.L. and Borucki, M.K., 1995, Revival and identification of bacterial spores in 25 to 40 million year old Dominican amber. *Science*, 268, 1060-1064.
- Carlisle, D.V., 1995, *Dinosaurs, Diamonds, and Things from Outer Space*. Stanford University Press, 241 p.
- Carr, M.H., Belton, M.J.S., Chapman, C.R., Davies, M.E., Geissler, P., Greenberg, R., McEwen, A.S., Tufts, B.R., Greeley, R., Sullivan, R., Head, J.W., Pappalardo, R.T., Klassen, K.P., Johnson, T.V., Kaufman, J., Senske, D., Moore, J.A., Neukum, G., Schubert, G., Burns, J.A., Thomas, P., Veverka, J., 1998, Evidence for a subsurface ocean on Europa. *Nature*, 391, 363-365.
- Coffin, M.F. and Eldholm, O., 1993, Large Igneous Province. *Scientific American*, 269, 26-33.
- Courillot, V. and Besse, J., 1987, Magnetic Field Reversals, Polar Wander, and Core-Mantle Coupling. *Science*, 237, 1140-1147.
- Cox, A., 1969, Geomagnetic Reversals. *Science*, 163, 237-245.
- Cox, K.G., 1991, A superplume in the mantle. *Nature*, 352, 564-565.
- Dalziel, I.W., 1995, Earth before Pangea. *Scientific American*, 272, 58-63.
- Doubleday and Company, 1962, *The Voyage of the Beagle* Charles Darwin annotated and with an introduction by Leonardo Engel, 524 p.
- Duncan, R.A., and Richards, M.A., 1991, Hotspots, mantle plumes, flood basalts, and true polar wander. *Review of Geophysics*, 29, 31-50.
- Dziewonski, A.M. and Anderson, D.L., 1981, Preliminary reference Earth model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 25, 297-356.
- Faure, G., 1986, *Principles of Isotope Geology*. John Wiley and Sons, New York, 589 p.
- Fuller, M., Laj, C., and Herrero-Bervera, E., 1996, The reversal of the Earth's Magnetic Field. *American Scientist*, 84, 552-561.
- Fuller, M. and Weeks, R., 1992, Superplumes and superchrons. *Nature*, 356, 16-17.
- Gersonde, R., Kyte, F.T., Bleil, U., Diekmann, B., Flores, J. A., Gohl, K., Grahl, G., Hagen, R., Kuhn, G., Siero, F. J., Voelker, D., Abelmann, A., Bostwick, J.A., 1997, Geological record and reconstruction of the late Pliocene impact of the Eltanin asteroid in the Southern Ocean. *Nature*, 390, 357-363.
- Glatzmaier, G.A. and Roberts, P.H., 1996, Rotation and magnetism of earth's inner core. *Science*, 274, 1887-1890.
- Goldich, S.G., 1972, Geologic time scale. In R.W. Fairbridge (ed.), *The Encyclopedia of Geochemistry and Environmental Sciences*, Encyclopedia of Earth Sciences Series, IV A, 453-456.
- Gould, S.J., 1965, Is Uniformitarianism necessary? *American Journal of Science*, 263, 223-226.
- Gould, S.J. 1989, *Wonderful Life, The Burgess Shale and the Nature of History*. Norton, New York, 347 p.
- Grand, S.P., van der Hilst, R.D., and Widiyantoro, S., 1997, Global seismic tomography. *GSA Today*, 7, 1-7.
- Heezen, B. C., Tharp, M., and Ewing, M., 1959, The floor of the oceans, 1. The North Atlantic. *Geological Society of America Special Paper* 65, 1-122.
- Holmes, A., 1913, *The age of the earth*. Harper and Brothers, London, 194 p.
- Holmes, A. 1933, The thermal history of the earth. *Washington Academy of Science Journal*, 23, 169-195.
- Holmes, A., 1947, The construction of a geological time-scale. *Transactions of the Geological Society of Glasgow*, 21, 117-152.
- Hsi, K.J., 1986, *The Great Dying*. Ballantine Books, 288 p.
- Jeanloz, R., 1990, The nature of the earth's core. *Reviews of*

- Earth and Planetary Science, 18, 357-386.
- Jeanloz, R. and Romanowicz, B., 1997, Geophysical Dynamics and the center of the Earth. *Physics Today*, 50, 22-27.
- Joint Oceanographic Institutions, 1996, Understanding our dynamic Earth through Ocean Drilling, 79 p.
- Laj, C., Mazaud, A., Weeks, R., Fuller, M., and Herrero-Bervera, E., 1991, Geomagnetic reversal paths. *Nature*, 351, 447.
- Landing, E., 1994, Precambrian-Cambrian boundary global stratotype ratified and a new perspective of Cambrian time. *Geology*, 22, 179-182.
- Larson, R.L., 1991, Geological consequences of Superplumes. *Geology*, 19, 963-966.
- Larson, R.L., 1995, The Mid-Cretaceous superplume episode. *Scientific American*, 272, 66-70.
- Lay, T., Williams, Q., and Garnero, E.J., 1998, The Core-mantle boundary layer and deep Earth dynamics. *Nature*, 392, 461-468.
- Lehman, I., 1936, Bureau Central Seismologique Internationale A14, 3. In Su, W.-j., Dziewonski, A.M., and Jeanloz, R., 1996, Planet within a planet: Rotation of the inner core of earth. *Science*, 274, 1883-1887.
- Mojzsis, S.J., Amthienus, G., McKeegan, K.D., Harrison, T.M., Nutman, A.P., and Friend, C.R.L., 1996, Evidence for life on Earth before 3,800 million years ago. *Nature*, 384, 55-59.
- Morgan, W.J., 1968, Rises, trenches, great faults, and crustal blocks. *Journal of Geophysical Research*, 73, 1959-1982.
- Morgan, W.J., 1971, Convection plumes in the lower mantle. *Nature*, 230, 42-43.
- Pappalardo, R.T., Head, J.W., Greeley, R., Sullivan, R.J., Pilcher, C., Schubert, G., Moore, W.B., Carr, M.H., Moore, J.M., Belton, M.J. S., and Goldsby, D.L., 1998, Geological evidence for solid-state convection in Europa's ice shell. *Nature*, 392, 365-368.
- Pappalardo, R.T., Head, J.W., and Greeley, R., 1999, The hidden ocean of Europa. *Scientific American*, 281, 34-43.
- Patterson, C.C., 1956, Age of meteorites and the earth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 10, 230-237.
- Poinar, H.N., Hofreiter, M., Spaulding, W.G., Martin, P.S., Stankiewicz, B.A., Bland, H., Evershed, R.P., Possnert, G., and Paeabo, S., 1998, Molecular coproscopy: Dung and diet of the extinct ground sloth *Nothrotheriops shastensis*. *Science*, 281, 402-406.
- Raup, D.M. 1991, Extinction: Bad genes or bad luck?. Norton, 210 p.
- Rogers, J.J.W., 1996, A history of continents in the past three billion years. *Journal of Geology*, 104, 91-107.
- Sikes, E.L. and Keigwin, L.D., 1994, Equatorial Atlantic sea surface temperature for the last 30 kyr: A comparison of U^{K}_{37} , $\delta^{18}O$ and foraminiferal assemblage temperature estimates. *Paleoceanography*, 9, 31-45.
- Smith, P.H., Bell J.F. III, Bridges, N.T., Britt, D.T., Gaddis, L., Greeley, R., Keller, H.U., Henkenoff, K.E., Jaumann, R., Johnson, J.R., Kirk, R.L., Lemmon, M., Maki, J.N., Malin, M. C., Murchie, S.L., Obserst, J., Parker, T.J., Reid, R.J., Salbrotny, R., Soderblom, L.A., Stoker, C., Sullivan, R., Thomas, N., Tomasko, M.G., Ward, W. and Wegryn, E., 1997, Results from the Mars Pathfinder. *Science*, 278, 1758-1765.
- Su, W.-j., Dziewonski, A.M., and Jeanloz, R., 1996, Planet within a planet: Rotation of the inner core of Earth. *Science*, 274, 1883-1887.
- The MARGINS Initiative, 1996, Reports of Three Thematic Workshops 1991-1993, D.S. Sawyer(ed.). Rice University.
- Thompson, G.A., 1998, Deep mantle plumes and geoscience vision. *GSA Today*, April, 17-25.
- van der Hilst, R.D., Widiyantoro, S., and Engdahl, E.R., 1997, Evidence for deep mantle circulation from global tomography. *Nature*, 386, 578.
- Vidale, J.E., Dodge, D.A., and Earle, P.S., 2000, Slow differential rotation of the Earth's inner core indicated by temporal changes in scattering. *Nature*, 405, 445-449.
- Vine, F.J. and Matthews, D.H., 1963, Magnetic anomalies over oceanic ridges. *Nature*, 199, 947-949.
- Wilson, T.J., 1963, Continental drift. *Scientific American*, 208, 86-100.
- Wilson, T.J., 1965, A new class of faults and their bearing on continental drift. *Nature*, 307, 343-347.
- Wolfe, C.J., Bjamason, I.T., VanDecar, J.C., and Solomon, S.C., 1997, Seismic structure of the Iceland mantle plume. *Nature*, 385, 245-247.
- Zuber, M.T., Solomon, S.C., Phillips, R.J., Smith, D.E., Tyler, G.L., Aharonson, O., Balmino, G., Barnerdt, W.B., Head, J.W., Johnson, C.L., Lemoine, F.G., McGovern, P.J., Neumann, G.A., Rowlands, D.D., and Zhong, S., 2000, Internal structure and early thermal evolution of Mars from Mars Global Surveyor topography and gravity. *Science*, 287, 1788-1793.
- 丸山茂徳 · 磯崎行雄, 1999, 生命と地球の歴史. 岩波新書, 275 p.

2000년 7월 12일 원고 접수

2000년 9월 6일 수정원고 접수

2000년 10월 7일 원고 채택