

# ‘제주 발자국화석’, 연대측정법 고대 역사를 과학으로 푼다

암석·원소의 방사성 붕괴속도로 산출  
5만년 안된 유기물은 탄소측정법 활용

글\_ 정창식 한국기초과학지원연구원 책임연구원 ccs@kbsi.re.kr

5만년인가, 4천년인가. 문화재청은 지난 2월 6일 제주도 남제주군 대정읍 상모리와 안덕면 사계리 해안에서 사람 발자국 화석 100여 점과 동식물 화석 수천 점을 발견했다고 발표했다. 화석 발견 지층의 생성 시기는 구석기 중기인 5만년 전으로 추정되며 선사인류 발자국 화석은 한국교원대 김정률 교수팀이 지난해 10월 처음 발견했다. 경북대 양승영 명예교수는 “사람 발자국 화석은 재주도를 포함한 한반도와 중국 대륙이 육로로 연결됐다는 가설을 뒷받침해주는 증거물”이라는 견해를 밝혔다.

선사시대 인류발자국의 발견은 세계에서 7번째이며 함께 발견된 코끼리와 말 발자국은 당시 한반도가 온대 지역이 아닌 아열대 지역이었을 가능성을 제기했고, 말의 기원이 몽골에서 유래되었다는 기존 주장을 바꾸는 계기가 될 것으로 보인다. 그러나, 화석 발자국 발표 이후, 관련학자들간에 이견이 생겼다. 일부 학자들이 연대측정에 의문을 제기하고, 제주도 지층은 4천년 전에 생성된 것이며 ‘5만년 전 추정’에는 무리가 있다는 지적이었다. 한 인류의 이동을 추정하는 데는 5만년 전과 4천년 전은 엄청난 역사적 차이가 있다. 아프리카 대륙에서 시작된 인류의 조상이 중국과 북방육로를 통해 한반도까지 이동해왔다는 지금까지 학계의 통설은 뒤집힐 것인가. 제주도의 사람 발자국 화석은 그 절대 연대가 정확히 측정된다면 한반도 인류의 일부가 중국 남방의 육로나 해로를 통해서 이동해왔을 가능성이 있다는 새로운 사실을 밝혀줄 것이다.

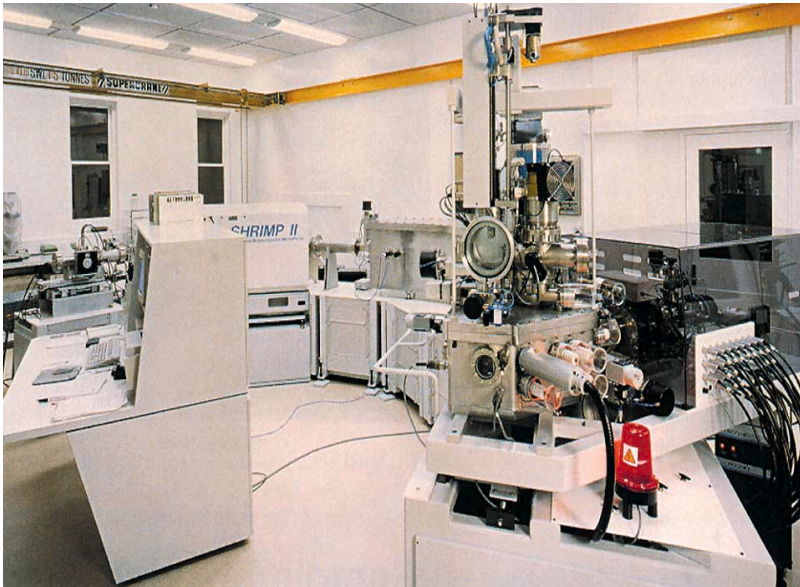
현대 과학이 연대측정기술을 발달시켜서 역사를 풀어나가기 시작한 것은 겨우 50여년 전으로 일천하기만 하다. 그러나, 그 학문의 깊이는 지구 나이 45억년을 밝혀냈고, 35만년 전 유기물의 생성을 추정해내는 등 심오한 경지에 이르고 있다. 현대과학의 연대측정방법론을 소개한다.

—편집자—

## 지구나이 45억년은 납 동위원소 측정

지질연대측정학(geochronology)은 지진이나 화산 폭발, 단층 운동, 운석의 충돌, 해수면의 상승, 퇴적 작용 등 과거에 지구환경의 변화를 초래시켰던 사건들이 언제, 어떤 속도로 일어났었는가를 밝히는 학문 분야를 말한다. 현대 지질학의 궁극적인 연구 목표는 결국 지구환경이 언제 어떻게 변화해 왔는가를 해석하는 것이라고 할 수 있는데 연대측정 자료는 당연히 그에 대한 가장 기본적인 고도 핵심적인 정보를 제공한다.

우선 지구는 언제 만들어졌을까? 이 질문은 인간이 사고하게 된 이후 던지는 가장 근원적인 문제 중 하나일 것이다. 지구의 탄생 연대는 1950년대에 패터슨에 의한 납 동위원소 연구에서 약 45억 5천만년으로 밝혀진 이후 여러 동위원소 시스템에 의해 확인되었다. 현대 지질학이 태동하기 전에는 과거 지구의 변



초고분해능이차이온질량분석기(호주국립대학 SHRIMP II 모델)

한국기초과학지원연구원 동위원소분석팀에 설치된 열이온화질량분석기 (VG54-30 모델)



화가 오늘날과는 달리 일시적이고 급격하게 일어났었다고 생각하고(천변지이설) 성경의 기록에 근거하여 지구의 나이를 6천년 전후의 시단위까지 제시한 성직자도 있었다. 그러나 영국의 자연과학자 제임스 허턴(Hutton 1726~97)은 면밀한 지질조사과정을 통해 오늘날 일상적으로 일어나고 있는 자연의 변화는 과거에도 같은 방식으로 일어났었다는 사실을 밝히고 그를 동일과정의 법칙(uniformitarianism)으로 천명하였다. 즉 지금 지구상에서 일어나는 지진, 해일, 유수에 의한 퇴적물의 운반, 풍화에 의한 암석의 침식, 화산의 폭발 등은 일견 무질서하고 갑자기 일어나는 것처럼 보이지만, 사실은 같은 자연법칙의 지배를 받아 과거에도 일어났었고 미래에도 일어날 것이라고 예측할 수 있다는 것이다. 지질학이 자연과학인 이유도 사실 여기에 있는데, 지구의 변화가 전혀

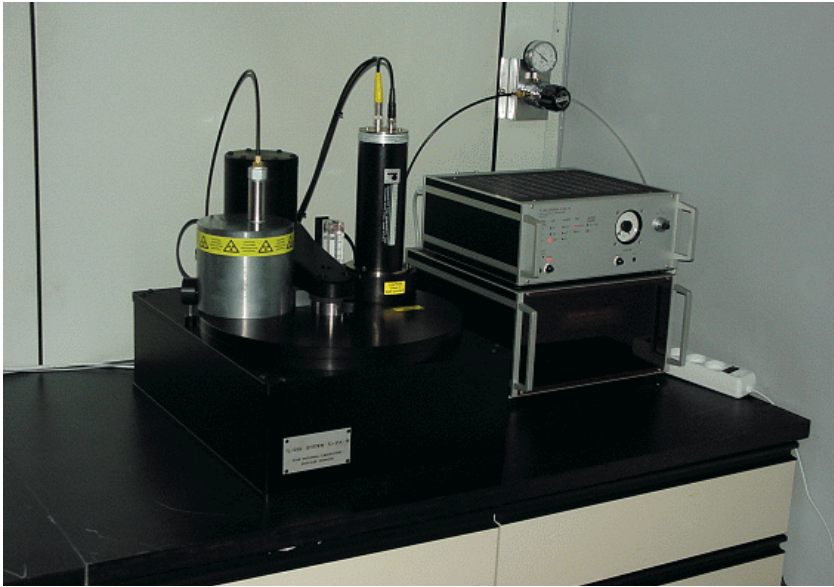
무질서하게 일어난다면 과학의 잣대로 연구할 필요가 없기 때문이다.

우리가 발을 딛고 생활하고 있는 지구의 표면, 즉 지각과 하부의 맨틀 암석권은 크고 작은 십수개의 지판으로 나뉘어져 있다. 탄생 이후 지구의 모습은 이들 판들의 상호운동에 따라 거대한 대륙이 끌리거나 밀리면서 끊임없이 변화하여 왔다. 이러한 판 운동은 지금 현재에도 일어나고 있으며 그 확실한 증거로 보여주는 자연 현상이 바로 지진이나 화산활동이다. 우리가 야외에서 쉽게 볼 수 있는 화강암이나 편마암과 같은 화성암이나 변성암들은 판 운동의 직간접적인 산물인데 우리 나라에는 약 20억년 전에 만들어진 변성암과 약 1억 8천만년 전에 만들어진 화강암이 가장 많은 것으로 밝혀져 있다. 많은 학자들이 암석이나 광물에 대한 연대측정 자료로부터 아득히 먼 옛날부터 한반도가 어떻게 진화해 왔

는지를 연구하고 있는데, 특히 약 2억 3천만년 전에 남북 중국대륙이 충돌한 사건의 흔적을 한반도에서 찾은 것이 초미의 관심사가 되고 있다.

#### 한반도에는 20억년 전 변성암 많아

인류의 활동무대가 된 시기는 제4기(quaternary)라고 부르는 대략 200만년 전으로부터 현재까지의 지질학적으로 가장 짧은 시간단위이다. 지구의 나이를 하루라고 가정한다면 제4기는 불과 최후 수십초에 지나지 않는다. 제4기는 장구한 지구의 역사를 돌이켜 볼 때에도 드물게 빙하기와 간빙기가 반복된 특징을 가지며 지속가능한 성장이라는 개념에서 매우 큰 주목을 받고 있는 시기이기도 하다. 제4기에 대한 연대측정 결과가 학문적으로 사용되는 분야는 지질학 외에도 인류학, 고고학, 해양학, 지반공학 등 다양한데, 이들 분야는 시간



한국기초과학지원연구원 동위원소분석팀에 설치된 광여기발광분광기(덴마크 Risø TL/OSL-DA-15A 모델)

기록을 떠나서는 연구가 무의미하다는 공통점을 가진다. 예를 들어 유골이나 문화재가 발굴되었다 해도 이들이 언제 매몰된 것인지를 모른다면 더 이상의 논의가 진행되기 어려울 것이다. 1993년 10월에 북한에서 단군의 유해를 발굴했다고 주장한 바 있는데 그 주장의 근거도 바로 5011년이라는 전자자기공명 연대측정결과이다(여담이지만 대부분의 학자들은 그 연대측정 결과를 별로 믿지 않는다). 최근 언론에 보도된 바와 같이 제주도에서 구석기 시대 사람과 동물의 발자국 화석이 발견되었는데 보다 정교한 해석을 위해서는 연대측정 작업이 추가로 필요할 것이다. 향후 지구 기온이 어떻게 변할 것인가에 대한 연구에도 과거 기록에 대한 연대측정 결과가 중요한 역할을 담당한다. 예를 들어 지금이 과연 빙기와 빙기 사이의 간빙기인지 아니면 빙기 중 다소 온난한 시기인지에 대

해 우리는 사실 잘 모른다. 이 문제를 해결하기 위해서는 연대측정을 통해 과거 기록을 정확하게 재현하는 것이 매우 중요하다. 왜냐 하면 세르비아의 물리학자 밀라코비치가 밝힌 바와 같이 제4기 동안 지구의 기온은 주기적으로 변해왔고 그 변화는 앞으로도 반복될 것이기 때문이다.

**수십억년 단위는 질량분석기로 산출**

구체적으로 연대측정의 과정을 살펴보자. 간단하게 예를 들어 본다면 암석 부스러기가 쌓여 만들어진 퇴적암의 경우 물론 하부지층이 상부지층보다 오래 되었을 것이다. 또 화강암을 만든 마그마가 관입한 증거를 야외에서 찾았다면 당연히 화강암이 관입당한 암석에 비해 젊을 것이다. 과거 수만년 내지 수십만년 전의 해변이 융기하여 만들어진 해안 단구의 경우 상대적으로 오래된 단구가

더 높은 고도에 분포한다.

하지만 이와 같은 방법으로 암석 상호간의 연대 순서는 알 수 있지만 절대연대, 즉 구체적으로 언제 만들어졌는지는 알 수 없다. 암석의 절대연대 측정을 위해서는 연구 기재를 이용한 분석이 필요하다. 이제는 우리나라에도 한국기초과학지원연구원의 동위원소분석팀을 중심으로 최첨단의 연대측정 장비들이 설치되어 국내 학자들의 연구에 큰 도움을 주고 있다.

암석이나 광물의 절대연대 측정법은 매우 다양하지만 그 중 방사성 붕괴를 이용한 방법이 가장 광범위하게 이용되고 있다. 우라늄, 토륨 등의 자연 방사성 원소는 스스로 불안정하여 알파, 베타, 감마선을 방출하면서 안정한 딸핵종으로 붕괴하게 되는데 이들의 붕괴속도는 일정하다. 이 성질을 이용하여 시료의 동위원소(화학적 성질이 같은 동일한 원소이지만 질량수가 서로 다른 핵종을 말함)비를 측정함으로써 연대측정 결과를 얻을 수 있다.

암석과 광물의 동위원소비는 질량분석기를 이용하여 측정하는데 경우에 따라서는 소수점 아래 다섯째 자리 정도의 변화도 측정할 수 있을 정도로 현재 분석기술이 발달해 있다. 대표적인 분석방법으로는 수십억년이나 수천만년 단위의 연대를 주로 측정하는 Rb-Sr, K-Ar, U-Th-Pb, Sm-Nd법 등이 있다. 고전적인 연대측정장비인 열이온화질량분석기(Thermal Ionization Mass Spectrometer, TIMS)로 분석할 경우



야외에서 채취된 암석이나 광물을 실험실로 운반하여 고순도 산으로 녹인 후 칼럼 크로마토그래피로 필요한 원소를 분리해야 한다. 분리된 원소는 금속(주로 Re이나 Ta) 필라멘트에 올려서 분석하게 되는데 경우에 따라서는 분리된 원소의 양이  $pg(10^{-12} g)$ 이나  $ng(10^{-9} g)$  단위로 매우 적기 때문에 실험의 전과정에 걸쳐 실험의 바탕값(blank)에 대한 세심한 주의가 요망된다. 따라서 청정실험실에서 모든 화학적 처리를 하는 것이 좋다. 이러한 방법은 실험 시간이 오래 걸리고 매우 숙달된 전문인력이 필요하며 무엇보다도 in-situ 분석이 아니라는 한계점을 가진다. 최근 연구에 의하면 하나의 저어콘 광물 입자에도 대단히 복잡한 역사가 기록된 경우가 흔하며 따라서 그런 저어콘을 고전적인 열이온화질량분석법으로 분석할 경우 무의미한 평균 연대를 얻을 수밖에 없다. 이런 문제점을 해결하기 위하여 최근 가장 활발하게 이용되는 연대측정 장비는 초고분해능이차이온질량분석기(High Resolution Secondary Ionization Mass Spectrometer)이다.


이 장비를 이용하게 되면 복잡한 시료 전처리 없이 연대측정을 원하는 부분을  $\mu m$  규모에서 측정할 수 있으며 자료의 정확도와 정밀도가 고전적인 방법에 별로 뒤지지 않는다. 이러한 장점은 원래 이 장비를 만든 목적이 운석이나 월석과 같이 매우 귀한 시료의 분석이라는 점에 기인된다. 초고분해능이차이온질량분석기는 전세계적으로 20여대가 설치되어

있고 이웃 일본만 하더라도 5대가 가동 중이지만 우리 나라에는 불행하게도 1대도 설치되어 있지 않다. 따라서 국내의 많은 학자들이 호주나 일본의 실험실에서 이 장비를 이용하여 일부 연구를 수행해 왔지만 역시 마음껏 분석하면서 연구 역량을 극대화시키기 위해서는 국내에 이 장비가 시급하게 설치되어야 할 것이다.

### 국내에도 최첨단 연대측정장치 설치

한편 제4기 연대측정에 적용될 수 있는 대표적인 방법은 방사성 탄소법이나 우라늄계열 비평형법, 루미네선스법 등이다. 방사성 탄소연대측정을 위한 가속질량분석기는 현재 서울대학교 기초과학교육연구공동기기에 설치되어 활발하게 이용되고 있다. 방사성 탄소법은 매우 좋은 연대측정법이지만 일반적으로 연대측정의 대상물질이 유기물에 한정되며 연대측정 가능 상한이 대략 5만년 정도라는 문제점을 가진다. 따라서 유기물이 아니거나 시료의 연대가 5만년을 초과할 경우 다른 방법을 강구해야 한다. 연대측정의 상한이 35만년 이상인 우라늄계열 비평형법은 매우 고전적인 방법으로서 특히 산호와 같은 탄산염 화석의 연대측정에 유용하고 많은 경우 분석의 신뢰도가 매우 높다. 또 최근 국내에 도입된 멀티콜렉터유도결합플라즈마질량분석기를 이용하게 되면 비교적 쉽고 빠르게 자료를 얻을 수 있으나 이 연대측정법의 가장 좋은 대상물질인 산호가 우리 나라에서는 잘 산출되지 않는

다. 연대측정의 대상물질을 야외에서 쉽게 구할 수 있고 연대측정의 상한이 방사성탄소법보다 높아 최근 학자들의 관심을 많이 끌고 있는 방법이 광여기발광분광법(Optically Stimulated Luminescence; OSL)이다. 한국기초과학지원연구원 동위원소분석팀에 OSL 분광기가 설치되어 있는데 연대측정 대상물질은 야외에서 흔하게 볼 수 있는 모래층이다.

이상에서 살펴본 바와 같이 연대측정은 다양한 원리의 적용에 의해 발달해 온 하나의 학문분야로서 단순하게 시료의 조성을 분석하는 작업과는 그 성격이 다르다. 핵심적인 연대측정 자료는 대형프로젝트의 성과를 좌지우지할 수도 있는데 대표적으로 활성단층 문제나 핵폐기물처분장 건설, 인공간척사업과 같은 대형국책사업에서 그 중요성이 매우 높다. 활성단층을 정의하기 위해서는 최후단층운동시기를 알아야 하며 핵폐기물 처분장 건설을 위한 지질구조 해석에는 연대측정 결과가 기초 자료로서 요구되는 경우가 많다. 또 새만금호 사업과 같은 인공간척 사업의 환경영향평가를 위해서는 역시 연대측정 자료가 반드시 필요하다. 따라서 연대측정학 분야에 대한 정부의 지속적인 관심과 투자가 꼭 필요하다는 점을 끝으로 강조하고자 한다. 



글쓴이는 1963년 부산생으로 서울대학교 지질과학과를 졸업, 동대학원에서 박사학위를 취득했으며 현재 대한지질학회 총무이사도 맡고 있다.