

지구의 나이: 재평가

권성택*

연세대학교 이과대학 지구시스템과학과

The Age of the Earth: Reappraisal

Sung-Tack Kwon*

Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

요 약: 이 논문은 지구의 나이를 알기 위한 초기의 다양한 시도를 간략히 소개하고, 운석의 납동위원소 연대측정으로 처음으로 지구의 나이가 $4,550 \pm 70$ Ma임을 밝힌 Patterson (1956)의 연구를 재조명한다. 태양계 초기의 진화과정은 성운가스가 식으면서 응축되어 만들어지는 고체입자 -> 이들 입자들이 서로 들러붙어 커지는 침합과정을 통하여 행성 크기의 물체가 생성되는 것으로 생각되고 있다. 또한 이때 생긴 원시지구가 화성 크기의 물체와 충돌하면서 그 잔해가 달을 만들었다고 생각되고 있다. 이 일련의 과정에서 지구가 생성된 시기를 꼭 짚어 말하기 힘들긴 하나, 현재 지구는 이 충돌의 직접적인 결과로 생각할 수 있기 때문에 이 충돌 시기를 지구의 나이로 정할 것을 제안한다. 기존 연구를 고려하면 충돌시기는 태양계에서 가장 먼저 만들어진 운석물질의 나이(즉, 태양계의 나이) 4567.30 ± 0.16 Ma와 지구와 달 암석에서 가장 오래된 나이 $4,456 \pm 40$ Ma 사이로 개략적으로 제한될 수 있다. 이 충돌시기는 태양계 초기 행성 크기의 물체가 만들어지는 시간간격을 밝히고, 충돌 이후 생성된 지구와 달의 마그마 바다의 열 역사를 규명하는데 매우 중요하기 때문에, 앞으로 보다 정확한 충돌시기를 추정하려는 노력이 요구된다.

핵심어: 지구의 나이, 태양계, 달, 동위원소 연대측정

Abstract: This paper presents a brief historical review of various attempts to estimate the age of the Earth, and reappraises the study of Patterson (1956) which revealed for the first time that the age of the Earth is 4550 ± 70 Ma by measuring Pb isotope ratios of several meteorites and a marine sediment. The standard model for the planetary formation of early solar system is: formation of solid particles condensed from the cooling of hot nebular gas -> formation of planet-sized bodies by accretion of those solid particles. The Moon is supposed to have formed from the accretion of the relicts produced by the collision of proto-Earth with Mars-sized body. It is not easy to pinpoint the age of the Earth, considering the series of events related to the formation of the Earth. So, I propose that the collision age as that of the Earth, since the present status of the Earth is thought to be the direct product of the collision. According to the previous studies, the collision age can be broadly constrained between the age (4567.30 ± 0.16 Ma) of the earliest condensates (CAI, calcium-aluminum rich inclusion) of the nebula gas, i.e., the age of the solar system, and the oldest age ($4,456 \pm 40$ Ma) among rocks and minerals of the Earth and the Moon. We need more precise estimation of the collision age, since it is important in estimating time scale for the formation of planet-size body and in revealing thermal evolution of magma oceans of the Earth and the Moon presumably developed right after the collision.

Keywords: Age of the Earth, Solar System, Moon, Radiometric dating

*Corresponding author
 Tel: 02-2123-2670
 E-mail: kwonst@yonsei.ac.kr

서론

우리가 사는 지구의 나이는 얼마인가? 이는 호기심이 있는 인간이라면 누구나 가질 수 있는 의문이다. 지구의 나이를 알기 위해 다양한 방법이 동원되어 다양한 추정치가 제안되었는데, 이들은 Darlymple (1991)에 잘 설명되어 있다. 방사성 동위원소 연대측정 이전에 나온 대표적인 방법들을 간단하게 요약하면 다음과 같다.

1) 종교적 신념: 기독교 성경에 있는 연대기를 이용한 지구의 나이는 약 6000년이나, 힌두경전에는 이 세상이 약 20억년 된 것으로 알려져 있다. 당연히 이들은 종교적 신념일 따름이고 과학적인 것은 아니다.

2) 지구의 냉각 속도: 이 방법은 지구가 초기에 썩썩 수천 도의 아주 뜨거운 상태에서 현재의 상태로 냉각되기 까지 걸리는 시간을 계산하는 것이다. 그 결과는 이용된 변수에 따라 약 2천만년에서 4억년으로 계산되었다. 그러나, 물리학적으로 그럴듯해 보이는 이 방법은 지구 내부에서 열을 방출하는 방사성동위원소의 존재가 알려지기 이전의 것이라 최소한의 연대만 말할 뿐이다.

3) 바닷물의 원소 농도: 바닷물에는 소금의 주성분인 Na, Cl 등의 원소가 농집되어 있다. 바닷물에 녹아있는 원소들의 기원은 대륙에서 강물이 암석과 반응하여 녹여낸 성분들이 바다로 흘러 들어간 것으로 단순하게 생각될 수 있다. 현재 바닷물의 어떤 원소의 총량을 알고 그 원소가 강물을 통하여 매년 바다로 흘러 들어가는 양을 알면 바닷물의 나이를 계산할 수 있다. 지구의 바다가 지구가 생성되면서 같이 생겼다고 가정하면 지구의 나이를 아는 셈이다. 이와 같은 가정하에 Na와 Cl에 대하여 계산된 나이는 사용된 변수에 따라 1-3억년 내외이다. 그러나, 이 가정은 어떤 원소가 바닷물로 들어가 농축되는 것만 고려한 것인데 바닷물에서 빠져 나오는 다양한 방법이 알려져 지구의 나이로서는 의미가 거의 없고 실제로는 어떤 원소가 바다에서 제거되기 전까지 얼마나 얼마나 오랫동안 머무르는가를 나타내는 평균체류시간을 의미하는 것이다.

4) 퇴적물의 퇴적 속도: 이 방법은 지구의 생성 이후 지구표면에서 만들어진 퇴적암의 총 두께와 퇴적물의 퇴적속도를 알면 지구의 나이에 계산할 수 있다는 생각이다. 그 추정치는 수 억년에서 수십 억년에 이르는데, 이 방법은 2가지 중요한 문제점을 가지고

있다. 1) 만들어진 퇴적암이 풍화·침식으로 없어지는 현상과 높은 온도·압력의 변성작용을 받아 없어지는 현상을 고려하면 퇴적암의 실제 총 두께를 알기 힘들다. 2) 퇴적암의 퇴적 속도는 암석의 종류와 퇴적환경의 유형에 따라 아주 다양하기 때문에 타당성 있는 퇴적 속도를 유추하기 힘들다.

요약하면 위의 시도들은 잠재적인 문제점 때문에 지구의 나이를 지시하기는 힘들다. 이러한 문제는 방사성 동위원소의 발견 및 이를 이용한 동위원소 연대측정으로 해결되었다. 그 원리는 어떤 방사성 동위원소의 붕괴 속도가 일정하고 일반적인 조건의 화학적 혹은 물리적 변화에 영향을 받지 않는다는 데에 있다. 동위원소 연대측정은 다양한 지구의 암석에 적용되어 지구의 역사를 밝히는데 중요한 역할을 해왔다. 지구의 나이와 관련된 운석과 달 시료에 대한 연대측정 자료는 방대하다. 아래에서는 가장 결정적이라 생각되는 자료들을 이용하여 지구의 나이에 대한 토의를 하고자 한다.

Patterson (1956)의 지구의 나이

방사능의 발견과 더불어 개발된 방사성 동위원소 연대측정은 다양한 지구의 암석에 적용되었으나 지구의 나이에 대한 뚜렷한 해답을 주지 못했다(Darlymple 1991). Patterson (1956)은 운석의 Pb 동위원소비 측정하였는데 그 자료가 정의하는 Pb-Pb 등시선 연대인 약 $4,550 \pm 70$ Ma을 운석이 만들어진 태양계 시작의 나이로 해석하였다. 이 연대는 나중에 알려진 보다 정확한 ^{238}U 과 ^{235}U 의 붕괴상수와 같은 시료에 대한 보다 정확한 Pb 동위원소 자료에 의해 재확인되었다(Allegre *et al.*, 1995). 또한, 지구의 해저 퇴적물 Pb 동위원소비가 이 등시선에 놓이는 것을 보고 지구의 기원이 운석의 기원과 같으며 지구의 나이 역시 운석이 지시하는 태양계의 나이와 같은 것으로 해석하였다. 이러한 해석은 동일 기원물질이 동일 시기에 만들어져야만 정의되는 직선인 등시선의 특징을 이용한 것이다.

Patterson (1956)이 얻은 나이는 그 이후 보다 정밀하게 측정된 다양한 운석의 Pb-Pb 등시선 연대들과 거의 유사하다(Allegre *et al.*, 1995). 이는 Pb-Pb 연대가 오래될수록 보다 정밀해지는 특징과 유관하다. 최근에 측정된 운석의 나이 중 가장 오래되고 정확한 것은 콘드라이트 내 CAI (calcium-aluminum rich

inclusion)에 대한 Pb-Pb 연대인데, Allende 운석에서 얻은 $4,567.18 \pm 0.50$ Ma (Amelin *et al.*, 2010)는 나중에 Efremovka 운석에서 얻은 4567.30 ± 0.16 Ma (Connelly *et al.*, 2012)로 재확인 되었다. 이들 CAI 연대는 태양계의 나이로 해석될 수 있다. 그러나 초기 지구의 진화에 관한 지식 및 연대측정 기술이 발전함에 따라 지구의 나이를 단순하게 정의하는 것은 그리 쉽지 않다.

지구 및 달의 기원에 관한 표준 모델

태양계의 기원에 표준 모델은 다음과 같다 (Chambers and Halliday, 2007). 즉 우리 태양계의 모체로 생각되는 성운 가스가 어떤 요인에 의해 수축하기 시작하면서 중력과 각운동량 보존 때문에 디스크 모양을 이루게 된다. 그 중심부는 태양이 되고 그 주변부는 식으면서 가스의 응축작용으로 만들어진 고체입자가 모이면서 서로 붙어 보다 큰 덩어리로 되는 침합과정을 거쳐 직경 1 km 내외의 미행성이 만들어지고 이들 미행성이 다시 침합되어 행성이 된다. 앞에서 언급한 CAI는 성운가스에서 가장 초기에 응축된 고체로 생각되고 있다. 지구는 태양계 행성의 하나이므로 그 기원은 위와같이 생각될 수 있으나, 달의 기원과 관련되어 또 하나의 과정이 요구된다.

최근 가장 유행하고 있는 달의 기원에 관한 모델은 충돌설이다(Hartmann and Davis, 1975). 즉, 지금 크기의 지구와 유사한 원시지구(proto-Earth)가 형성되었을 때 화성 크기의 물체가 충돌하면서 그 잔해들이 모여 달이 되었다고 하는 가설이다. 이 충돌설은 달의 회장암질 지각을 설명하는 달의 마그마 바다 가설을 뒷받침하고 있어 더욱 환영받고 있다. 달의 충돌기록을 고려하면 현재의 지구는 달 생성과 관련된 큰 충돌후에도 다양한 크기의 소행성과 충돌하면서 약 39억년전까지 조금씩 성장을 계속한 것으로 생각할 수 있다.

이러한 일련의 지구 초기의 진화과정은 지구의 나이를 정의하는 것을 어렵게 한다. 문제를 보다 단순화하기 위해, 나는 현재 지구의 시작으로 생각할 수 있는 달 생성과 관련된 대충돌이 일어난 시기를 지구의 나이로 제안하고자 한다. 이 관점에서, 지구의 나이는 달의 나이와 같다. 그러나 대충돌의 시기를 직접 측정하는 것은 쉽지않을 것으로 보인다. 현재로서

는 지구와 달의 가장 오래된 나이를 이용하여 제한하는 것이 최선이라 할 수 있을 것이다.

지구에서 가장 오래된 암석 및 광물

캐나다 북쪽에 있는 Acasta 편마암은 약 40억년의 SHRIMP U-Pb 저콘 연대를 가지고 있어(Bowring and Williams, 1999), 한동안 지구에서 가장 오래된 암석으로 알려져 있었으나, 최근 캐나다 퀘벡 북쪽의 Nuvvuagittuq 녹암대(Greenstone Belt)에서 얻은 $^{146}\text{Sm}-^{142}\text{Nd}$ 전암 연대 $4,406 \pm 14 - 17$ Ma가 그 기록을 갱신했다(O'Neil *et al.* 2012).

한편 가장 오래된 나이를 가진 광물은 호주 서부 Narryer Gneiss Terrane의 변성퇴적암에 들어있는 쇠설성 저콘인데 SHRIMP U-Pb 연대 $4,404 \pm 6 - 8$ Ma를 가지고 있다(Wilde *et al.*, 2001).

지구 암석에 40억년 이상된 암석이 거의 없는 것은 지구의 활발한 지질활동으로 1) 오래된 지각물질이 맨틀로 되돌아가거나 2) 방사성 동위원소 시계가 다시 시작하면서 오래된 나이가 지워지기 때문으로 생각할 수 있다.

달에서 가장 오래된 암석 및 광물

전반적으로 달암석은 지구암석에 비해 훨씬 나이가 많다. 이는 달이 지구보다 훨씬 작아 빨리 식어 그 지질활동이 초기에 국한되었기 때문으로 생각된다.

Nemchin *et al.* (2009)은 아폴로 17호가 가져온 각력암의 기질에 들어있는 저콘의 SHRIMP U-Pb 연대 $4,417 \pm 6$ Ma를 보고 하였는데 이는 달 저콘 연대 중 가장 오래된 것이다. 달 암석으로 충분한 정확도를 가진 가장 오래된 연대는 노라이트질 회장암 내 감람석과 휘석 광물에 대한 $^{147}\text{Sm}-^{144}\text{Nd}$ 등시선 연대로 $4,456 \pm 40$ Ma이다(Norman *et al.*, 2003)

정의하기 쉽지 않은 지구의 나이

앞에서 토의된 연대 자료를 고려하면 지구의 나이는 태양계의 시작 연대인 4567.30 ± 0.16 Ma 와 지구와 달에서 가장 오래된 나이인 약 $4,456 \pm 40$ Ma 사이로 생각할 수 있다(Table 1 요약 참조). 태양계 시초에서 원시지구가 형성될 때까지 어느 정도 걸렸는지 그리고 대충돌과 동시에 생성된 마그마 바다가 식

Table 1. The oldest ages reported for meteorites, Earth and Moon

Material	Method	Age (Ma)	References
<i>Meteorite</i>			
Calcium-aluminum rich inclusion in Allende	Pb-Pb isochron	4,567.18±0.50	Amelin <i>et al.</i> (2010)
Calcium-aluminum rich inclusion in Efremovka	Pb-Pb isochron	4567.30±0.16	Connelly <i>et al.</i> (2012)
<i>Earth</i>			
Clastic zircon in metasedimentary rock in Narryer Gneiss Terrane	SHRIMP U-Pb	4,404+6/-8	Wilde <i>et al.</i> (2001)
Meta- mafic and ultramafic rocks in Nuvvuagittuq Greenstone Belt	¹⁴⁶ Sm- ¹⁴² Nd whole rock isochron	4,406+14/-17	O'Neil <i>et al.</i> (2012)
<i>Moon</i>			
Matrix zircon in Apollo 17 breccia	SHRIMP U-Pb	4,417±6	Nemchin <i>et al.</i> (2009)
Noritic anorthosite	¹⁴⁷ Sm- ¹⁴⁴ Nd mineral isochron	4,456±40	Norman <i>et al.</i> (2003)

어 지각이 형성되는데 어느 정도 시간이 걸렸는지는 지구와 달의 초기 진화를 이해하는데 중요한 정보이다. 이 정보에 대한 결정적 사건은 바로 달을 형성한 대충돌인 썬이다.

비록 모델의존적이기는 하나 대충돌 시기를 직접 측정하고자 하는 노력도 있었다. 짧은 반감기를 가진 ¹⁸²Hf-¹⁸²W 동위원소계를 달암석에 적용하여 추정된 시기는 태양계 형성 후 52 Myr 이후로(Touboul *et al.*, 2007) 위에서 고려한 시기 내에 포함된다. 그러나 이 추정치는 오차가 클 뿐 아니라 모델의존도가 높은 것이 흠이다.

결론

Patterson (1956)이 처음으로 지구의 나이가 4550±70 Ma를 보인 이후 연대측정 기술의 발전과 더불어 많은 노력이 있었으나 현재 추정되는 지구의 나이는 Patterson 연대의 오차범위에 크게 벗어나지 못하는 것 같다. 일견 지구의 나이에 관한 우리의 지식이 큰 발전이 없었던 것처럼 보이지만 실제로는 지구의 나이와 관련된 태양계의 진화과정으로 보다 잘 정의한 썬이다. 앞으로 달을 생성시킨 대충돌의 시기를 보다 정확히 알기 위해서는 보다 많은 노력이 요구된다.

사사

지구의 나이를 처음으로 제대로 밝힌 Patterson (1956) 논문의 환갑이 얼마 남지 않았다. 1988년 칼텍에서 Patterson 박사를 한번 뵈는 적이 있는데 천재성이 번뜩이는 학자로 느껴졌다. 이 만남은 내가 초

등학교 교과서에서 지구의 나이가 45억년이라 배운 기억이 나 더욱 감회로웠다. 최근 과학 다큐멘터리 Cosmos: A Spacetime Odyssey에서 Patterson 박사의 주된 연구(지구의 나이 및 납 환경오염)와 관련된 내용이 1편으로 만들어졌는데 한 순수한 과학자의 일생을 잘 표현하고 있다고 생각된다. 나는 이 소고를 Patterson 박사에게 바치고자 한다. 또한, 좋은 지적을 해준 익명의 두 심사자에게도 감사드린다.

References

- Allegre, C.J., Manhès, G., and Gopel C., 1995, The age of the Earth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59, 1445-1456.
- Amelin, Y., Kaltenbach, A., Iizuka, T., Stirling, C.H., Ireland, T.R., Petaev, M., and Jacobsen, S. B., 2010, U-Pb chronology of the Solar System's oldest solids with variable ²³⁸U/²³⁵U. *Earth and Planetary Science Letters*, 300, 343-350
- Bowring, S.A., and Williams, I.S., 1999. Priscoan (4.00-4.03 Ga) orthogneisses from northwestern Canada. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134, 3-16.
- Chambers, J.E. and Halliday, A.N., 2007, The Origin of the Solar System. In *Encyclopedia of the Solar System* 2nd edition, Academic Press. 29-52.
- Connelly, J.N., Bizzarro, M., Krot, A.N., Nordlund, A., Wielandt, D., Ivanova, M. A., 2012, The absolute chronology and thermal processing of solids in the solar protoplanetary disk. *Science*, 338, 651-655.
- Darymple, G.B., 1991, *The Age of the Earth*. Stanford University Press.
- Hartmann, W.K. and Davis, D.R., 1975. Satellite-sized planetesimals and lunar origin. *Icarus*, 24, 504-515.
- Nemchin, A., Timms N., Pidgeon R., Geisler T., Reddy S. and Meyer C., 2009. Timing of crystallization of the

- lunar magma ocean constrained by the oldest zircon. *Nature Geoscience* 2, 133-136.
- Norman, M.D., Borg, L.E., Nyquist, L.E. and Bogard, D.D., 2003, Chronology, geochemistry, and petrology of a ferroan noritic anorthosite from Descartes breccia 67215: Clues to the age, origin, structure and impact history of the lunar crust. *Meteoritics & Planetary Science*, 38, 645-661.
- O'Neil, J., Carlson, R. W., Paquette, J.-L., and Francisc, D., 2012, Formation age and metamorphic history of the Nuvvuagittuq Greenstone Belt. *Precambrian Research*, 220-221, 23-44.
- Patterson, C.C., 1956, Age of meteorites and the Earth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 10, 230-237.
- Touboul, M., Kleine, Bourdon, T., B., Palme, H. and Wieler, R., 2007, Late formation and prolonged differentiation of the Moon inferred from W isotopes in lunar metals. *Nature*, 450, 1206-1209.
- Wilde, S.A., Valley, J.W., Peck, W.H., and Graham, C.M., 2001. Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago. *Nature*, 409, 175-178.
-
- 2014년 7월 14일 접수
2014년 7월 15일 심사개시
2014년 9월 4일 채택