

화성운석에 대한(U-Th)/He 연령 측정: 기존 연구 및 전망

민경원^{1*} · 이승렬²

¹미국 플로리다대학 지구과학과, ²한국지질자원연구원 국토지질연구본부

(U-Th)/He Dating on Martian Meteorites: Reviews and Perspectives

Kyoungwon Min^{1*} and Seung Ryeol Lee²

¹Department of Geological Sciences, University of Florida, Gainesville, Florida, 32608, USA

²Geological Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

요약: 최근 많은 발전을 이룬 (U-Th)/He 온도-연령 측정법은 광물내의 빠른 He 확산 특성을 이용해 지각 천부의 열역사 혹은 매우 짧은 열적 교란 등을 규명하는데 널리 쓰이고 있다. 이번 논평에서는 이 방법이 어떻게 화성운석의 열역사, 특히 화성(Mars)에서 방출시의 열적교란을 규명하는데 이용될수 있는지에 대한 기존 연구 및 전망에 대해 기술하였다. 모든 화성운석은 화성에서 방출될 당시 충격변성작용을 겪은 것으로 알려져 있는데, 이러한 작용의 온도조건을 규명하기 위해 충격실험을 통한 암석 조직 비교, 고지자기학적 연구, ⁴⁰Ar/³⁹Ar 및 (U-Th)/He 온도-연령측정법 등이 이용되었다. 각각의 방법은 장단점이 있으며 열역사를 밝히는데 단편적인 정보만을 제공하지만, 이러한 다양한 방법들이 동시에 적용되었을때 보다 신빙성있는 열역사를 알 수 있다. ALH84001 화성운석의 경우 화성에서 방출될 당시의 조건에 대해 논란이 많은데 이는 위에 언급한 방법들로부터 서로 상반된 결론이 도출되었기 때문이다. 최근 단입자 (U-Th)/He 및 ⁴⁰Ar/³⁹Ar결과를 동시에 만족하는 열역사를 규명한 연구가 ALH84001 화성운석에 대해 이루어 졌는데, 이는 앞으로의 운석 연구에 좋은 방법론을 제시할 수 있으리라 본다.

핵심어: 화성운석, (U-Th)/He 온도-연령 측정법, 열역사, 충격변성작용, 인산염

Abstract: The primary utilization of recently improved (U-Th)/He thermochronometry is to reveal the low-T thermal histories of shallow crustal sections or transient episodes (such as wildfires or meteorite impacts) because of the high sensitivity of He diffusion to temperature in host minerals. In this contribution, we present reviews and perspectives regarding how this method can be used to characterize the ejection-related shock metamorphism of Martian meteorites. The temperature conditions of shock metamorphism can be constrained through shock recovery experiments, paleomagnetism, and ⁴⁰Ar/³⁹Ar and (U-Th)/He dating. The most reliable constraints can be deduced when these independent approaches are combined. However, the thermal history of the ALH84001 Martian meteorite has been under serious debate because the different methods have yielded contrasting results. Recent work has shown how single-grain (U-Th)/He and ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating, two noble-gas based thermochronometries with different T sensitivities, can be used to resolve this issue, providing a good example for future research on other meteorites.

Keywords: Martian meteorite, (U-Th)/He dating, Thermochronology, Shock metamorphism, Phosphate

서론

운석의 열역사는 운석 자체뿐만 아니라 그 운석이

본래 속해있던 모체(parent body)의 여러가지 지질학적, 행성학적 현상을 밝히는데 매우 중요한 단서를 제공한다. 화성운석은 화성 진화를 이해하기 위한 중

*Corresponding author
Tel: 1-352-392-2720
E-mail: kmin@ufl.edu

요한 연구 재료로서 다양한 분야에서 연구가 진행되어 왔다. 예를 들면 화성내부의 핵 및 맨틀의 형성과정 (Harper Jr. et al., 1995), 화성대기의 진화 (Mathew and Marti, 2001), 마그마의 조성 (Stolper and McSween, 1979), 지각의 진화 (Nyquist et al., 2001), 충격변성작용 (Stöffler et al., 1986; Treiman, 1998), 지각 표면에서의 풍화작용 (Bridges et al., 2001), 생명체의 존재 가능성 (McKay et al., 1996), 운석의 방출과정 (Fritz et al., 2005) 등이 이들 화성운석을 통해 이루어 졌다.

화성 운석(Martian meteorites)은 발견될 당시 SNC 군으로 구분되었다가 나중에 화성기원으로 밝혀진 종류이다. SNC는 3개 운석군의 첫글자를 따라 이름을 붙인 것으로 이들은 각각 셔고타이트(Shergottite), 나클라이트(Nakhlite), 채시그나이트(Chassignite)이다. 이후 ALH84001 정방휘석암(Orthopyroxenite) 또한 화성기원으로 밝혀져 이를 포함해 SNCO 군으로 불리운다. SNCO 운석들은 다른 운석들에 비해 독특한 지화학적 특징을 가진다(McSween, 1985; McSween and Treiman, 1998). 첫째, 이들 운석에서 구한 방사성 동위원소 연령이 매우 젊다. 대부분의 셔고타이트는 165-500 Ma, 나클라이트 및 카시그나이트는 1270-1340 Ma (Nyquist et al., 2001) 의 방사성 동위원소 연령을 가지는데, 이러한 연령은 결정화 연령(crystallization age), 강력한 충격변성작용 연령(shock metamorphic age), 혹은 변질작용 연령(alteration age) 등을 지시하는 것으로 추정된다. 이들 운석들이 보여주는 젊은 연령은 이들 운석들의 모체가 비교적 최근까지 높은 온도의 지질학적 과정을 겪었거나, 상당량의 유체(fluid)가 지각 내에 존재하는 환경에 있었음을 지시한다. SNCO 운석을 제외한 대부분의 운석들이 기원한 것으로 생각되는 소행성들은 수백m에서 수십km에 해당하는 작은 크기이기 때문에 이미 오래전 내부 열이 소멸되어 최근까지 지질활동 및 유체가 존재할 가능성이 없다. 따라서 SNCO 운석은 소행성에서 기원한 것이라 추정할 수 없으며, 비교적 최근까지 지질활동 및 유체가 존재했던 행성에서 유래한 것이 분명함을 지시한다. 화성은 최근까지 지질활동이 있었던 대표적인 행성으로서, SNCO 운석의 젊은 연령을 잘 설명할 수 있다. ALH84001은 예외적인 경우로서, 결정화 연령은 4.5 Ga이지만 (Jagoutz et al., 1994), 약 4 Ga에 일어난 강력한 충격변성작용에 의해 대부분의 동위원소계가 초기화 되었다고 알려져 있다

(Ash et al., 1996; Turner et al., 1997). 이 운석의 연령은 다른 화성운석에 비해 오래된 연령을 갖기 때문에, 강력한 충격변성작용 이후 약 40억년 동안 화성지각의 진화과정을 밝히는데 중요한 정보를 제공한다. 둘째, 이들 운석들간의 산소동위원소는 매우 유사하며 다른 운석들에 비해 특징적인 분포를 보인다 (Clayton and Mayeda, 1996). 이러한 분포는 이들 운석들이 동일한 모체에서 기원했을 가능성이 높다는 것을 시사한다. 셋째, 셔고타이트에 해당하는 EETA 79001의 유리질 부분에서 추출한 기체종의 상대적 함량이 실제 화성 표면에서 바이킹착륙선 (Viking lander)이 측정한 화성 대기의 조성과 매우 유사하다는 것이 밝혀졌다(Bogard and Johnson, 1983; Becker and Pepin, 1984; Swindle et al., 1986). 이는 EETA79001이 화성지각에서 충돌시 화성대기의 일부가 주입되어 화성에서 방출된후 지구에 도달할 때까지 이 성분을 보존하고 있었음을 시사한다. 이러한 일련의 특징들로부터 SNCO 운석은 화성기원임이 정설화 되었다.

화성암석의 충격변성작용

화성 지각의 일부가 외부 충돌체(impactor)에 의한 강한 충격으로 지각에서 떨어져 나와 탈출속도(escape velocity) 이상의 속도에 이르면, 화성의 중력권을 벗어나 우주공간으로 방출된다. 충돌에 의해 고온으로 가열된 암석은 우주공간으로 방출되면서 식게 되는데, 이때 그 냉각속도는 초기 충격 온도, 암체의 크기, 암체 내의 위치에 따라 다르다. 모든 화성운석은 방출시 이러한 충격변성작용을 겪은 것으로 추정된다. 운석이 그 모체로부터 떨어져 나가는 현상에 대해서는 많은 연구가 이루어 졌다. 특히 그 모체가 행성, 비교적 큰 소행성 혹은 위성일 경우, 운석이 그 모체의 중력권을 벗어나기 위해서는 탈출속도 (화성의 경우 5 km/sec)가 커야 하기 때문에 대개 강한 충돌에 의해 모체의 일부가 파괴되어 모체로부터 떨어져 나온 파편이 운석이 된다는 가설이 가장 유력하게 받아들여지고 있다 (Shoemaker et al., 1963). 이러한 충돌시의 온도·압력 조건은 매우 높으며 대부분의 파편 역시 고온·고압의 충격변성작용을 겪었을 것이라는 것이 전통적인 가설이었다.

하지만 일부 달 운석 혹은 화성 운석에서 비교적 약한 변성작용의 증거만 관찰되는 경우가 발견되었으

며, 지구동력학적 시뮬레이션을 통해 소량의 과편은 고압의 변성조건을 겪지 않고 모체로부터 떨어져 나올 수 있을 가능성이 제시되었다 (Melosh, 1984, 1985, 1988, 1993; Artemieva and Ivanov, 2004). 만약 이런 현상이 실제로 일어날수 있다면, 이는 과편에 포함되어 있을수 있는 생명체가 모체를 벗어나 우주공간으로, 더 나아가 다른 행성으로 이동 (panspermia) 할수 있는 가능성이 있다는 것을 의미하기 때문에 우주생물학(astrobiolgy)적으로 매우 중요한 의미를 갖는다. 실제로 박테리아가 충격변성조건을 겪은 후 우주로 방출되어 다른 행성에 도달하기까지의 생존확률에 대한 정량적인 연구가 실험 및 시뮬레이션을 통해 이루어 지고 있으며 (Mileikowsky et al., 2000; Horneck et al., 2001; Stöffler et al., 2007), 이러한 관점에서 달 혹은 화성 운석의 충격변성작용의 조건을 정량화 하는 연구가 중요하다고 할 수 있다.

운석이 겪었던 충격변성작용의 압력조건을 추정하기 위해 다양한 방법이 사용되었다. 가장 전통적인 방법은 운석에 흔히 산출하는 광물(사장석, 감람석, 휘석 등)과, 운석과 유사한 조성을 가지는 암석(현무암, 반력암, 휘암, 두나이트 등)에 대해 충격실험 (shock recovery experiment)을 시행한 후 관찰되는 여러가지 조직 및 화학 조성 상의 특징을 실제 운석과 비교하는 방법이다(Ahrens et al., 1969; Reimold and Stöffler, 1978; Ostertag, 1983; Stöffler et al., 1986, 1988, 1991; Schmitt, 2000). 다양한 종류의 광물에서 보여지는 많은 특징들이 사용되는데, 특히 사장석과 석영의 굴절률(refractive index), 복굴절(birefringence) 및 재결정화 조직상의 특징들이 정량적 압력 추정에 주로 쓰인다. 이때 주의해야 할 점은, 암석 전반에 걸쳐 평형을 이룬 충격 압력 (equilibrated shock pressure)과 매우 한정된 부분에서 비평형 효과에 의한 국부적인 압력 상승 (disequilibrated shock pressure)을 구분하여야 한다는 것이다. 비평형 충격압력은 운석 내 광물 및 빈공간 (pore or fissure)의 분포 및 용융포켓/용융맥(melt pocket/vein)의 형성과 관계가 있고, 매우 불균질하게 분포하며, 그 지속시간은 밀리초(milliseconds) 단위로 매우 짧다. 평형 충격 압력 조건은 운석 내 대부분의 광물로부터 구할수 있으며, 운석 내 불활성 기체의 분포에 보다 직접적인 관계가 있는것으로 추정 된다(Schwenzer et al., 2004). 앞으로 본문에서 사용되는 “충격 압력”은 이러한 평형 충격 압력을 지칭한다. 화성운석에 대한

충격 압력 및 온도증가 조건은 Fritz et al. (2005)의 논문에 잘 정리되어 있으며, 압력에 따른 온도증가를 대체로 약 ~30 GPa까지는 완만하며, 30 GPa 이후에 급격히 증가하는 것으로 알려져 있다.

충격 후 온도 증가 (post-shock temperature)는 위의 방법으로 충격 압력을 구한 후, 충격파(shock wave)의 상태방정식 (Equation of State)을 통해 추정하는 방법이 주로 사용되었으나 (Artemieva and Ivanov, 2004; Fritz et al., 2005; Stöffler et al., 1988), 이 방법은 여러 가정이 필요하고 실제 암석시료는 그 내부구조가 복잡하기 때문에 (heterogeneous, polycrystalline, porous) 불확실성이 비교적 크다고 할 수 있다. 더욱 중요한 사실은, 충격 후 온도증가는 충격 전후의 온도변화이기 때문에 절대 충격 온도 (absolute shock T) 를 구하기 위해서는 충격 직전의 온도를 알아야 한다는 단점이 있다. 화성의 경우 위도에 따른 표면온도의 연중변화는 약 -130°C (극지방, 겨울)에서 +20°C(적도지방, 여름)까지 그 변화폭이 상당히 크기 때문에 운석방출 직전의 주변온도를 정확하게 추정할 수 없다. 따라서 위의 방법으로 구한 충격온도는 그 오차가 매우 크다 (최소 150°C).

충격변성의 온도를 직접적으로 추정하기 위해서는 원소의 확산현상을 이용하는 방법이 현재로서는 유일하다. 방사성 동위원소 붕괴로 형성된 ⁴He과 ⁴⁰Ar 같은 불활성 기체는 (1) 그 확산이 충격변성시 충분히 일어날수 있고, (2) 충격 이전의 초기치를 암석의 형성시기 및 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 연령 스펙트라를 통해 추정할수 있기 때문에, 온도 뿐 아니라 충격시기의 추정에도 효과적으로 이용될수 있다 (Bogard, 1995; Weiss et al., 2002; Min et al., 2004). 또한, 불활성 기체의 확산은 화성표면의 온도진화의 추정에도 쓰일수 있다는 장점이 있다 (Shuster and Weiss, 2005). 이러한 이유로 (U-Th)/He 및 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 방법을 통해 충돌 당시의 충격온도 및 그 모체의 열역사를 보다 정확히 추정하는 것이 최근의 연구 추세이다 (Bogard, 2009; Min, 2005)

⁴⁰Ar/³⁹Ar 온도-연령 측정계

화성 지각의 천부에서 일어난 여러가지 현상들 중 에서 고온의 열적 공급을 수반하는 현상으로는 외부 충돌체와의 충격에 의한 변성작용이나, 마그마의 분출 혹은 지각 천부 관입에 의한 화성활동을 예로 들

수 있다. 이러한 작용들은 지질학적 관점에서 매우 짧은 시간 내에 고온에 이르고, 열적 최고점 이후 냉각 속도 역시 빠르다는 특성을 가지고 있다. 따라서 비교적 높은 폐쇄온도 (closure temperature)를 가진 동위원소계(예, Rb/Sr, Sm/Nd, U/Pb)는 이러한 과정에 의해 영향을 거의 받지 않으며, 충격변성작용을 밝히는데 이용될 수 없다. 따라서 화성 지각의 천부에서 일어난 열역사는 온도에 민감한 온도-연령 측정계를 이용하여 효과적으로 밝힐 수 있다. 불활성 기체인 Ar의 확산을 이용한 방법인 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 온도-연령 측정계가 이러한 연구에 주로 이용되어 왔다 (Weiss et al., 2002). 이는 화성운석 내의 주요 K 포함 광물인 마스크엘리나이트(maskelynite)가 빠른 Ar 확산의 특성을 가지고 있기 때문이다. 하지만 지금까지 연구된 모든 화성 운석의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연령은 그 결정화 연령에 매우 근접한 값을 보이며, 운석의 방출시기를 지시하는 우주선 노출 연령(cosmic-ray exposure age)에 비해 매우 오래된 것으로 알려져 있다. 이는 화성운석의 방출과 관련된 충격변성작용에 의한 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 계의 교란이 비교적 작았으며, 결정화 이후 누적된 방사성 ^{40}Ar 을 거의 모두 유지하고 있다는 사실을 시사한다. 다시 말하면 충격변성작용을 비롯한 대부분의 지각 천부의 열적 작용이 비록 최고온도는 높지만, 그 기간이 너무 짧아 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 계의 반응이 미미하다고 할 수 있다. 단, ALH84001의 경우 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연령은 약 4.0 Ga에 해당하는데, 이는 화성내에서 극심한 충격변성작용의 결과로 해석된다 (Ash et al., 1996; Turner et al., 1997). 따라서 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 계는 운석의 결정화 과정, 혹은 화성에서의 충격변성작용을 밝히는데 유용하게 쓰일수 있는 반면, 방출과 연관된 충격변성작용을 연구하는데에는 매우 제한적으로만 쓰일수 있다.

실제로 방출과 관련된 충격변성 작용의 온도-시간 조건을 규명하기 위해서는 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연령 스펙트라의 미세한 저온가열 단계의 결과에 대한 해석이 매우 중요하게 된다. 하지만 만일 시료 내에 잉여 Ar(excess Ar)이 존재할 경우 열역사 추정에 어려움이 있을 수 있다. 잉여 Ar은 모암이 결정화될 당시 유입될수 있기 때문에 주의가 요구된다. 또한 화성 대기중의 Ar 함량이 높고 (Owen et al., 1977), 충격 작용시 화성 대기의 일부가 화성운석에 주입된다는 사실이 밝혀져 (Bogard and Johnson, 1983; Pepin, 1985; Bogard et al., 1986; Wiens and Pepin, 1988), 연령측정시

이 효과를 고려해야 한다. 특히 젊은 화성운석인 셔고타이트의 경우 방사성 붕괴로부터 형성된 $^{40}\text{Ar}_{\text{rad}}$ (radiogenic ^{40}Ar)의 양이 작아, 잉여 Ar에 대한 연구가 보다 효과적으로 이루어질수 있으나 (Bogard and Park, 2008), $^{40}\text{Ar}_{\text{rad}}$ 을 이용해 충격변성작용을 규명하는데에는 매우 제한적으로 이용되고 있다 (Bogard et al., 2009). 반대로 ALH84001과 같이 오래된 화성 운석의 경우는 최근의 충격변성작용을 규명하는데 보다 수월하게 쓰일수 있다 (Weiss et al., 2002; Shuster and Weiss, 2005).

또다른 문제점은, 만일 마스크엘리나이트가 K이 연관된 변질작용을 겪었다면, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연령 스펙트라는 부피확산(volume diffusion) 뿐 아니라 이러한 변질작용에 의해서 큰 영향을 받게 된다. 위에서 언급한 바와같이 충격변성작용의 특성을 밝히기 위해서는 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연령 스펙트라의 저온가열 단계의 결과가 중요한데, 이러한 변질작용은 해석에 큰 걸림돌이 될 수 있다. 이러한 문제점들 때문에 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 온도-연령 측정계를 이용해 운석의 결정화 이후의 열역사를 밝히는데 어려움이 있다. 이러한 문제점에도 불구하고 몇몇 연구들은 좋은 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 방법 적용 예를 보여준다 (Weiss et al., 2002; Shuster and Weiss, 2005; Bogard, 2009; Cassata et al., 2010).

(U-Th)/He온도-연령 측정계

자연상의 암석 및 광물 내에 존재하는 ^{238}U , ^{235}U 및 ^{232}Th 는 일련의 방사성 붕괴를 거쳐 안정동위원소인 ^{206}Pb , ^{207}Pb 및 ^{208}Pb 로 변하게 되는데, 이때 ^4He 원자 핵(알파 입자)이 형성되게 된다. 따라서, 시료 내의 U, Th 및 ^4He 의 양을 측정함으로써, 연령을 계산할수 있는 데 이러한 방법을 (U-Th)/He 방법이라 한다. $^{147}\text{Sm} \rightarrow ^{143}\text{Nd}$ 알파붕괴에 의해 형성되는 ^4He 의 양도 고려되어야 하지만, 대부분의 지질학적 시료는 Sm 함량이 작고, 붕괴당 1개의 ^4He 원자만을 형성하며(U 및 Th는 각각 15개, 6개의 ^4He 원자형성), 반감기가 비교적 길기 때문에 Sm 효과는 대부분의 지질학적 시료에서 미미하다. 그러나 시료내에 U-Th 함량이 작은 경우, 혹은 Sm 함량이 많은 경우 이를 측정하여 연령계산시 반영하여야 한다.

알파붕괴에 의해 형성된 ^4He 입자 및 딸원자(daughter isotope)는 붕괴 당시의 강한 에너지로 인해 서로 반대방향으로 이동하게 되는데, 이러한 현상

을 되튀김 (recoil) 현상이라 한다. 알파 입자는 딸원자에 비해 매우 가볍고, 결정 내에 결합되어있지 않기 때문에 모원자의 위치로부터 보다 멀리 이동하게 된다. 이러한 되튀김 이동거리(recoil distance)는 U, Th 붕괴과정의 각 단계에 의해 형성된 알파입자에 대해 모두 다르고, 또한 매질(U, Th을 함유하고 있는 광물 종류 및 조성)에 의해서도 영향을 받게된다. 따라서 주변에 분포하는 상(phase)들에 비해 많은 U, Th을 함유하고 있는 대상입자는 되튀김 현상에 의해 알파 입자를 주변 상들에 전달하게 되며, 대상입자의 (U-Th)/He 연령은 실제 연령보다 젊어지게 된다. 이러한 효과를 보정하기 위해 흔히 입자의 모양 및 크기로 부터 얼마만큼의 알파입자가 대상입자로부터 손실되었는지 추정한다(Farley et al., 1996).

이 연령측정법은 1905년 알파입자가 최초로 발견된 이후 지구 암석 및 운석에 대해 적용되었으나 (Strutt, 1908, 1909, 1910; Paneth et al., 1930; Arrol et al., 1942) 측정된 연령이 매우 불규칙적이어서 오랫동안 쓰이지 않았다. 그러나 이후 다음과 같은 사실들이 밝혀졌다. (1) ${}^4\text{He}$ 가 방사성 붕괴 뿐 아니라 cosmic ray와의 반응에 의해서도 형성될 수 있으며 (Bauer, 1947), (2) 대부분의 광물 내에서 He의 확산속도가 크기 때문에 다른 연령측정법에 비해 저온에서 He의 확산이 이루어지고 (Zeitler et al., 1987; Farley, 2000), (3) 방사성 붕괴에 의해 형성된 ${}^4\text{He}$ 는 운동에너지가 크기 때문에 형성시 대부분의 광물 내에서 약 20 μm 가량 이동할 수 있다 (Farley et al., 1996). 따라서 이러한 과정에 대한 보정이 이루어져야만 그 연령이 지질학적 의미를 갖게 되며, 보정된 (U-Th)/He 연령은 다른 방법으로 측정된 연령과 조화를 보인다.

(U-Th)/He 연대측정에 이용되는 주 대상 광물은 U, Th을 함유하고 있는 저어콘(zircon), 인회석(apatite), 티탄석(titanite), 모나자이트(monazite), 인산이트륨 석(xenotime), 버델리아이트 (baddeleyite), 적철광(hematite), 석류석(garnet) 등이며, 운석의 경우 인회석(Min et al., 2003)과 메릴라이트(merrillite: Min et al., 2004; Min and Reiners, 2007)가 쓰일 수 있다. He의 확산특성은 각각의 광물에 대해 다르기 때문에, 동일한 암석 내에 다양한 광물중에 대해 연령이 측정된다면 온도시간 변화를 추정할 수 있다. 이는 ${}^{40}\text{Ar}/{}^{39}\text{Ar}$ 방법을 여러종의 광물에 적용함으로써 보다 자세한 열역사를 구할 수 있는 것과 동일한 원리이다.

(U-Th)/He 방법은 1987년 이후 본격적인 정립이 이루어졌으며, ${}^{40}\text{Ar}/{}^{39}\text{Ar}$ 방법과 함께 불활성 기체를 이용한 대표적인 연령측정법으로 자리잡아가고 있다 (Reiners, 2002). (U-Th)/He 방법은 기존의 여러 연령측정법에 비해 폐쇄온도가 낮기 때문에, 저온의 열역사 혹은 지각 천부에서의 암석이동에 대한 연구, 지형학적 연구등에 적용될 수 있는 장점이 있다 (Ehlers and Farley, 2003). 또한 He의 확산이 온도에 매우 민감하기 때문에 지질학적으로 매우 짧은 열적 현상도 (U-Th)/He계에 적용될 수 있다는 장점이 있다. 예를 들면 과거에 일어난 산불에 암석이나 광물이 노출된 경우 (Mitchell and Reiners, 2003), 단층면에서의 급속한 전이현상, 운석의 충돌현상 (Min, 2005) 등은 그 열적교란의 기간이 불과 수 시간 혹은 수일 미만으로 지질학적 관점에서 매우 짧지만, (U-Th)/He계를 이용하면 이러한 열적현상의 여러 특징들을 연구할 수 있다.

이러한 He 확산상의 특징외에도, (U-Th)/He 방법을 화성운석에 적용하는 데에는 다음과 같은 장점이 있다. (1) U 및 Th을 함유하고 있는 광물이 미량이지만 모든 화성운석에서 발견되고, (2) 그 측정가능한 연대 범위가 태양계 형성초기(4.5 Ga; Min et al., 2003)부터 최근 (~2000yr; Aciego et al., 2003)까지 넓으며 (3) Ar과는 달리 화성대기의 He양이 매우 작아 화성표면에서의 충격시 화성운석으로의 He 주입 효과가 미미하다.

화성운석의 전암 (U-Th)/He 연령

전통적인 (U-Th)/He 연령측정은 전암에 대해 이루어졌다. 동일한 운석의 다른 암편, 혹은 동일한 종류의 서로 다른 운석에 대해 He을 포함한 불활성 기체의 조성 및 U, Th을 포함한 희토류 원소의 분석결과가 여러 논문에 발표되었다. 예를 들면 Schulz and Franke (2004)은 20개의 화성운석을 포함한 2000여 개의 운석에 대한 He 조성을, Lodders (1998)은 U-Th 조성을 잘 정리했다. 이러한 화학조성이 해당 운석에 균질하게 분포한다는 가정하에, 발표된 분석 결과를 이용하거나 혹은 새로운 분석을 통해 (U-Th)/He 연령이 계산할 수 있다.

화성운석에 대해 Schwenger et al. (2004, 2007, 2008)은 U-Th-He 분석을 실시하여 ${}^4\text{He}$ 손실을 (fractional loss of ${}^4\text{He} = f_{\text{He}}$)을 계산하여 얼마만큼

의 방사성 ^4He 이 자연적으로 시료로부터 방출되었는지 추정하였다. 이 연구에서는 ^4He 손실율이 충격변성 작용의 압력조건 추정치와 좋은 상관관계를 보여주는 사실을 밝힘으로써, 대부분의 ^4He 손실이 운석 방출시의 충격에 의해 이루어 졌을 가능성을 제시하였다. 이러한 결과는 ^4He 손실이 다른 여러 열적작용, 예를 들면 우주로의 방출후 태양열에 의한 가열, cosmic-ray에 의한 반응, 우주공간에서의 풍화작용, 지구 대기 통과시의 마찰열 등에 의한 영향은 매우 미미하다는 사실을 반증한다. 이러한 사실은 아카폴코 (Acapulco) 운석에서 얻어진 4.5 Ga의 연령 (Min et al., 2003), 세인트 세베린 (St. Severin) 콘트라이트에서 구한 약 4.3 Ga의 연령 (Min et al., 2010), ALH 84001에서 얻은 여러 오래된 연령 (Min and Reiners, 2007)으로부터 제시된 결론과 일치한다. Min and

Reiners (2007)는 ALH84001의 Ar 및 He 결과를 통해 이 운석이 약 15 Ma에 화성에서 방출된 후 우주공간에서의 ^4He 손실은 0.1% 이하였을 것으로 추정한다. 대부분의 셔고타이트는 우주선 노출 연령이 5 Ma 이하이므로 (Dhofar019는 예외적으로 ~20 Ma) ALH84001과 유사한 방법으로 우주 공간에서의 ^4He 손실을 계산할 수 있을 것이다.

Schwenzer et al. (2008)을 포함한 여러 논문에 기재된 ^4He 손실율로부터 계산된 전암 (U-Th)/He 연령이 표 1에 정리되어있다. 흥미로운 사실은, 비교적 작은 오차를 가지는 ^4He 손실율로부터 계산된 전암연령이라 할지라도 매우 큰 오차를 가지고 있으며, 어떤 경우에는 100%이상의 오차를 갖기도 한다는 점이다. ^4He 손실율이 증가할수록 (U-Th)/He 연령은 감소하며, 따라서 이러한 젊은 연령의 상대적인 오차는 커지게

Table 1. U, Th data, phosphate mode, crystallization ages, fractional loss of radiogenic ^4He and calculated whole rock (U-Th)/He ages. The whole rock (U-Th)/He ages were calculated based on the given fractional loss data and crystallization ages

Meteorite	Previous Study					Calculated from Schwenzer et al. (2008)
	U ^(a) [ppm]	Th ^(a) [ppm]	Phosphate Mode [%]	Crystallization Age ^(a) [Ma]	Loss ^(a) [%]	Whole Rock (U-Th)/He Age [Ma]
<i>Basaltic Shergottites</i>						
EETA79001 Lith A	0.016	0.067	tr-0.4 ^(b) , 2 ^(c)	173	56 ± 9	76
EETA79001 Lith B	0.037	0.145	0.2-0.7 ^(b)	173		
Los Angeles	0.12	0.57	1-3 ^(d)	165		
NWA480/1460	0.064	0.215	1 ^(e)	336		
QUE94201	0.0125	0.05	4-6 ^(f)	327	90 ± 29	33
Shergotty	0.089	0.37	1 ^(g)	165	71 ± 1	48
Zagami NZ	0.102	0.34	0.5-1.3 ^(h)	177	36 ± 6	113
Zagami DN			11 ⁽ⁱ⁾			
<i>Lherzolithic Shergottites</i>						
ALHA77005	0.0062	0.024	0.4 ^(j)	179	100 ± 30	0
LEW88516	0.011	0.04	0.9-1.7 ^(k)	178	88 ± 20	21
Y-793605	0.0036	0.013		212		
<i>Olivine-phyric Shergottites</i>						
DaG476	0.019	0.012	1 ^(l)	474	100 ± 50	0
Dhofar019	0.11	0.04	1 ^(m)	525		
SaU 005/008/094	0.05	0.012	<0.01 ⁽ⁿ⁾	800	99 ± 4	8
Y-980459	0.006	0.0213	tr ^(o)	472		

(a) summarized in Schwenzer et al. (2008), (b) McSween and Jarosewich (1983), (c) Schwandt, (2001), (d) Rubin et al. (2000), Xirouchakis et al. (2002), (e) Barrat et al. (2002), (f) McSween and Eisenhour (1996), Harvey et al., (1996), Mikouchi et al. (1996), (g) Stöffler et al. (1986), (h) McCoy et al. (1992), (i) McCoy et al. (1993), (j) Treiman et al. (1994), (k) Treiman et al., (1994), Wadhwa et al. (1994), (l) Wadhwa et al. (2001), Mikouchi et al. (2001), (m) Mikouchi and Miyamoto (2001), (n) Gnos et al. (2002), (o) Greshake et al. (2004)

된다. 대부분의 화성 운석은 젊은 연령을 가지고 있기 때문에, 계산된 연령의 오차도 크다고 할 수 있다. 이렇게 계산된 연령의 오차가 실제 오차에 어느 정도 근접하는지는 가늠하기 어렵지만, 계산 연령의 오차가 상당히 크다는 사실은 부인할 수 없다. ⁴He 손실율의 오차가 어디에서 기원하는지는 원래 논문에 잘 기술되어 있지 않지만, 아마도 U, Th, ⁴He의 분석 오차 (>50%)와 자료보정과정(<50%)이 대부분의 오차를 설명할 수 있을 것으로 생각된다. 향후 오차에 대한 보다 자세한 연구가 필요하다고 할 수 있다.

전암 (U-Th)/He 연령측정법은 분석절차 또는 연령 계산이 용이한 반면 몇가지 단점을 가지고 있다. 우선 위에 언급한 대로 U-Th 및 ⁴He의 조성이 서로 다른 시료에서 얻어지기 때문에 시료의 불균질성이 문제가 될 수 있다. 이러한 문제점은 시료를 분말로 만들어 골고루 섞은 후, 이의 일부를 취해 U-Th 및 ⁴He 분석을 시행함으로써 부분적으로 해결될 수 있다. 하지만 이러한 경우에도 얼마만큼의 오차가 시료의 불균질성으로부터 기인하는지 추정이 어렵다. 두번째 문제는, 대부분 운석 전암 내의 U, Th 양이 매우 작기 때문에 (서고타이트의 경우 <0.03 ppm), 기존에 실시한 많은 방법들 (예를 들면, ICP-MS를 이용한 전통적인 추정(extrapolation) 방법)로 정확한 분석이 쉽지 않다는 점이다. 따라서 그 분석오차도 크다(흔히 >50%). 서로 다른 연구에서 매우 큰 오차가 흔히 발견되는데, NASA Compendium에 종합되어있는 몇몇 서고타이트의 결과를 살펴보면, (1) 서고티: U = 0.099 - 0.171 ppm, Th = 0.35 - 0.465 ppm; (2) 자가미(Zagami): U = 0.091 - 0.154 ppm, Th = 0.27 - 0.367 ppm; (3) LEW 88516: U = 0.011 - 0.0243 ppm, Th = 0.04 - 0.08 ppm 등이다. Lodders (1998)에 의해 선별된 자료만을 보더라도 그 오차는 흔히 10-20% 보다 크다. 하지만 이러한 큰 오차가 위에서 언급한 시료의 불균질성에 기인하는지, 아니면 분석상의 문제인지는 확실치 않다. 최근의 ICP-MS 방법과 double-spiking 방법을 이용하면 대부분의 지구 인회석에 대해 2-3%보다 작은 오차내에서 그 U-Th양을 측정할 수 있으며 (Reiners and Nicolescu, 2006), 운석시료에 대해서도 이와 유사한 오차를 기대할 수 있다. 세번째 문제점은, 전암연령측정의 경우 분석에 필요한 시료의 양이 많다는 사실이다. 화성운석의 경우 그 양이 매우 작으며, 따라서 효율적인 시료의 이용이 다른 지구시료에 비해 보다 중요하다 할 수 있다. 이러한 여러가지

이유 등으로 화성운석에 대한 단입자 (U-Th)/He 연령측정이 필요하다.

화성운석의 단입자 (U-Th)/He 연령

운석에 대한 단입자(single grain) 방법은 위에 언급한 바와 같은 전암 연령측정법이 가지고 있는 시료의 불균질성 문제를 해결하고, 대상 시료의 양을 줄임으로써 보다 신빙성 있는 연령을 다량 생산할 수 있게 되었다. 단입자 (U-Th)/He 연령측정은 기술적인 문제가 많이 해소되어 소량의 시료에 대한 ⁴He-U-Th의 분석이 모두 가능해진 최근에는 이루어 졌다 (Min et al., 2003, 2004; Min 2005; Min and Reiners, 2007; Min et al., 2010). 성공적인 첫번째 적용은 아카폴코 운석에 대해 이루어 졌는데 (Min et al., 2003), 이는 이 운석이 (1) 큰 인회석을 다량 포함하고 있으며, (2) 충격변성작용을 받지 않아 결정화 (~4.55Ga) 이후 대부분의 ⁴He가 보존되어, ⁴He-U-Th의 분석이 비교적 용이했기 때문이다. 또한 아카폴코의 열역사는 다양한 동위원소분석법을 통해 자세히 알려져 있어 (U-Th)/He 연령과의 비교가 가능하였다. 두 개의 큰 인회석 입자로부터 확산실험이 이루어져 운석 내 인회석의 확산계수가 최초로 규명되었다. 아카폴코에서 측정된 많은 (U-Th)/He 연령은 결정화 시기인 4.55 Ga에 집중적으로 분포하는데, 이는 운석의 냉각이 폐쇄온도 이하까지 매우 빠른속도로 일어났음을 시사한다.

단입자 방법은 이후 화성운석인 Los Angeles 서고타이트에 대해 적용되었다 (Min et al., 2004). 이 운석은 아카폴코에 비해 연령측정이 어려웠는데, 그 이유는 (1) Los Angeles가 약 3 Ma 전에 충격변성작용을 받아 이전에 형성되었던 대부분의 ⁴He_{rad}가 시료로부터 유실되었으며, (2) 운석 내의 인산염인 메릴라이트의 크기가 작아, 단입자 내의 ⁴He 양이 작아 분석상의 어려움이 있었기 때문이다. 이 연구를 통해 단입자 (U-Th)/He 연령은 그 오차 내에서 우주선 노출연령과 동일하다는 것이 밝혀졌으며, 이는 충격변성작용의 온도조건이 높아 당시 시료 내에 존재했던 ⁴He이 확산에 의해 모두 유실 되었음을 지시한다. 저자들은 이러한 조건을 만족시키기 위한 열 모델을 통해, 그 최고변성온도가 약 450°C 이상임을 주장하였다 (Min et al., 2004).

또 다른 예는 ALH84001 화성운석에 대한 연구이

다 (Min and Reiners, 2007). 이 운석은 화성 화석의 존재 가능성으로 인해 학계 및 일반인의 많은 주목을 받은 바 있다. 또한 그 결정화 연령이 약 4.5 Ga로 다른 화성운석(1.3 Ga-170 Ma)에 비해 매우 높아 화성 지각 내에서 오랜 동안 존재했음을 지시하는데, 이는 화성지각의 진화 연구에 결정적 증거를 제시할수 있기 때문에 암석 조직, 화학조성, 방사성 동위원소, 안정동위원소, 고지자기 등에 대해 많은 연구가 진행된 바 있다(Nyquist et al., 2001). 하지만 이러한 노력에도 불구하고, 충격변성작용의 온도-압력 조건에 대해서는 아직까지 큰 이견이 있다. 암석학적 연구는 주로 고온, 고압의 충격변성도를 지시하는 반면에(Greenwood and McSween, 2001), 고지자기학적 연구는 운석의 화성방출이 저온에서 일어났음을 지시하고 있다(Kirschvink et al., 1997; Weiss et al., 2000). 이러한 두가지 상반된 가설을 검증하기 위해 Min and Reiners (2007)은 메릴라이트에 대해

단입자 (U-Th)/He 연령 측정을 실시하였다. 이렇게 얻은 연령과 기존의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 자료를 이용하여 이 운석이 매우 짧은, 고온의 열적 작용을 겪었음이 밝혀졌으며, 이러한 열적교란은 운석의 화성방출과 연관이 있으리라고 추정하였다(Min and Reiners, 2007). 이 연구의 중요성은 He과 Ar이 서로 다른 확산의 특징을 가지고 있기 때문에, (U-Th)/He 및 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 방법은 $1/T\text{-}\log(t)$ 그림에서 기울기가 다른 두개의 단변화 곡선(univariant curve)을 정의하게 되며, 이 때 그 교차점이 변성작용의 온도-시간 조건을 규제할수 있다는 사실이다. 즉, 기존의 Ar 자료는 짧은 기간의 고온 확산뿐 아니라 오랜 기간의 저온 확산으로도 설명될 수 있기 때문에 명확한 해석이 어려웠다고 할 수 있다(그림 1의 Ar 확산 곡선). 하지만, 새로운 He 자료(그림 1의 He 확산 곡선) 및 기존의 Ar 자료를 동시에 만족시키는 위해서는 이 운석이 고온의 짧은 열적 교란을 겪었어야 한다. 이러한 결과는 열적 조

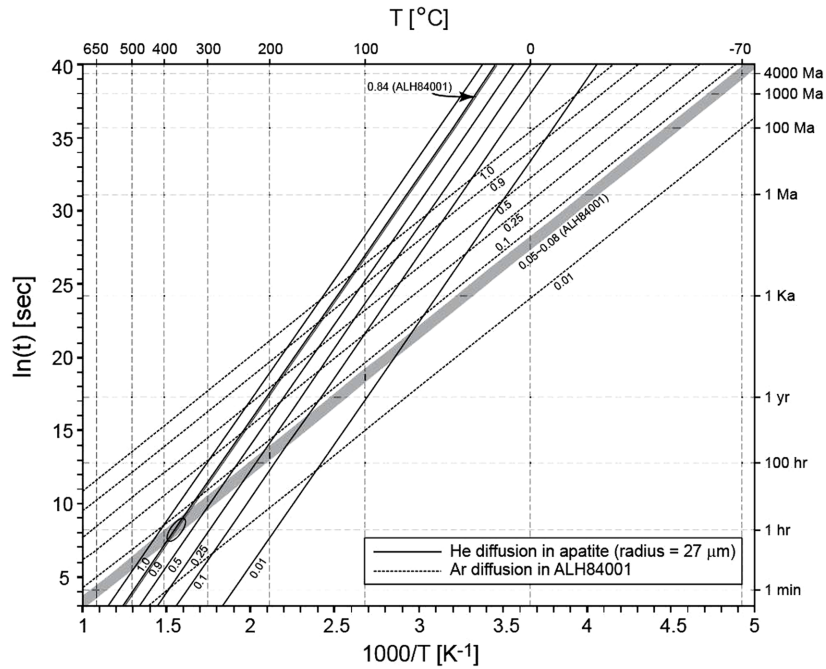


Fig. 1. Contours of fractional loss of He in phosphate (solid curves) and Ar in maskelynite (dotted curves), for thermal events of different temperature and time. He diffusion parameters are for Durango apatite (Farley, 2000) and Ar for bulk ALH84001 samples (Weiss et al., 2002). The slopes for He fractional loss contours are steeper than those for Ar, because of the relatively low activation energy of Ar diffusion in maskelynite. This means that the maskelynite Ar system is sensitive to the sample's long-term, low-temperature history, whereas the phosphate He system is sensitive to short-duration, high-temperature events. Only short-duration, high-temperature events can cause phosphate (U-Th)/He ages to be younger than maskelynite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages. The curves corresponding to the observed fractional losses for He (0.84) and Ar (0.05~0.08) intersect at $T \sim 350\text{-}400^\circ\text{C}$ and $t \sim 1$ hour, as marked with an ellipse. After Min and Reiners (2007).

건과 잘 부합하는 충돌현상이 비교적 최근에 일어났음을 지시한다.

운석의 단입자 (U-Th)/He 연령측정 과정

암편은 밀폐된 공간에서 조심스럽게 부순 후, 체(sieve)를 이용하여 적당한 크기로 분리한다. 분리된 시료에 대해, 주사식 전자현미경 (Scanning Electron Microscope; SEM)을 이용해 화학조성 분포도(chemical map)를 구한다. 이를 통하여 수십~수백의 인산염 입자 (보다 정확히는 인산염을 포함하는 입자)를 확인한 후, 각 인산염 입자에 대해 고배율의 자세한 화학조성 분포도 및 SE (Secondary Electron) 영상을 구한다. 이를 통해 각 입자 내의 (1) 주성분 원소의 분포, (2) 입자를 이루는 광물종 감정, (3) 다양한 광물종 간의 대략적 공간적 분포 및 그 상대적 양에 대한 정보를 구할수 있다. 이들 입자는 인산염 이외에도 정방휘석(orthopyroxene)과 같은 규산염 광물 등을 포함한다. EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) 또는 WDS (Wavelength Dispersive Spectroscopy) 방법을 통해 이러한 인산염 입자에 대한 반정량 혹은 정량 분석을 시행한다. 이는 인산염의 광물을 감정하는데 필수적이며, 확인된 모든 인산염 입자들은 Mg, Fe 및 Na를 함유하는 메틸라이트와 Cl을 함유하는 인회석 으로 구분된다. 확인된 인산염 입자들 중 인산염의 크기가 약 50 μm 이상이고 (이보다 작은 인산염 입자는 그 U, Th, He의 함량이 너무 작아 신빙성 있는 연령을 구하기가 어렵다), 모양이 연령측정에 적합한 입자들을 선별한 후, 이들을 입체현미경 하에서 3차원적 모양 복원을 위해 여러 각도에서 디지털 화상을 구한다. (U-Th)/He 연령측정을 위해서는 시료를 얇은 금속성 박피로 썬 후 분석을 시행해야 한다. 따라서 인산염 입자들은 특별히 제작된 Pt 혹은 Nb 관(tube)에 하나씩 분리되어 넣어진 후, 봉해진다. 이러한 시료 관은 플란켓(planchette)에 옮겨진후, 레이저 가열, ³He 스파이크(spike) 첨가, 정화 과정을 거쳐 사중극 질량분석기(Quadrupole Mass Spectrometer)로 ⁴He의 정량이 실시된다. ⁴He의 정량이 완료된 시료관은 강산(strong acid)으로 용해한 후 ICP-MS(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer)를 이용하여 U, Th 및 Sm의 양을 측정한다.

화성 운석 내의 메틸라이트, 인회석 단입자는 그 크

기가 작고, 충격변성의 시기가 젊으며 (15 Ma 미만), 매우 소량의 U, Th, Sm 만을 포함하고 있기 때문에, ⁴He_{rad}의 양이 작다. 이러한 경우 단입자 정량분석이 쉽지 않다. 예를 들어, 최근 플로리다대학(University of Florida) 및 아리조나대학(University of Arizona)에서 시행한 분석에 따르면 자가미 화성운석의 경우 대부분의 메틸라이트 단입자의 He 양은 바닥값(blank)의 2배에도 미치지 못하기 때문에, 이로부터 의미있는 연령을 구하기가 불가능하다. 따라서 5, 10, 혹은 20 입자를 동시에 분석하여 보다 정확한 ⁴He 양을 구하였다. 즉, 의미있는 U-Th-Sm-⁴He 정량을 위해서는 불가피하게 여러 입자를 동시에 분석해야 하는 경우가 있다.

(U-Th)/He 온도-연령 측정계 응용의 문제점과 전망

1. 주 대상 광물인 메틸라이트내의 He 확산특성이 전혀 알려져 있지않기 때문에 (U-Th)/He 연령을 이용하여 열역사를 밝히고자 할 때 확산계수에 대한 가정이 필요하다. 기존의 연구에서는 메틸라이트 내의 He확산이 듀랑고 혹은 아카폴코 인회석 내의 그것과 동일하다고 가정하였는데 (Min et al., 2004; Min and Reiners, 2007), 이는 메틸라이트와 인회석이 유사한 화학조성을 가지고 있는 인산염이기 때문이다. 하지만 이러한 가정은 보다 정밀한 검증이 필요하다. 현재 이에 대한 연구가 진행중이며, 지금까지의 예비 연구에 따르면, 콘드라이트(chondrite)운석에서 추출한 메틸라이트내의 He 확산은 동일한 운석에서 추출한 인회석에 비해 다소 느린 것으로 추정된다(Min et al., 2010). 이 연구는 ³He/⁴He 방법을 이용하였으며 (Shuster and Farley, 2005), 메틸라이트의 ³He 확산계수는 $E_a = 147.6 \pm 1.8 \text{ kJ/mol}$ 와 $\ln(D_0/a^2) = 7.11 \pm 0.27 \ln(s^{-1})$ 로 추정되었다. 이러한 계수와 냉각속도 = 10°C/Ma, 확산영역반경(diffusion domain radius) = 100 μm 을 이용하여 폐쇄온도를 계산하면 117°C가 되는데, 이는 듀랑고 인회석으로부터 동일한 조건에서 계산된 72°C나 아카폴코 운석 내 인회석으로 부터의 101°C 보다 다소 높다. 따라서 기존의 열역사 추정은 이러한 새로운 확산계수를 이용하여 수정되어야 한다. 보다 자세한 확산 특성을 밝히기 위해서는, 화성암석과 유사한 정도의 충격을 받은 메틸라이트 시료로부터 이러한 확산계수를 추정하는 연구가 필요하다.

2. He 확산 모델을 적용하기 위해서는 확산영역에 대한 규제가 필요하다. 지구상의 많은 인회석이나 저어콘에 대해서는 입자 크기에 따른 (U-Th)/He 연령의 체계적인 변화로부터, 입자 자체가 확산범위에 해당한다는 결론이 도출되었다 (Reiners and Farley, 2001). 하지만 강한 충격을 받은 화성운석의 경우, 입자 내부에 균열(fracture)이 쉽게 형성되며, 이러한 균열을 통해 He의 이동이 빠르게 일어나 시료로부터 쉽게 방출될 수 있다. Min and Reiners (2007)은 박편상의 인회석 및 메틸라이트의 조직을 관찰하여, 한 입자 내에 균열이 보이지 않는 영역의 분포로 확산 영역을 간접적으로 규제하였다. 하지만 관찰되지 않는 미세한 균열이 존재할 가능성이 있기 때문에, 보다 체계적인 He 확산 실험으로부터 확산영역을 규제하는 연구가 필요하다. 충격변성작용을 받은 운석에 대한 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 방법이 메틸라이트의 He 확산 연구에 적용될 수 있기를 기대한다.

3. 지구상의 시료와 달리 운석 내의 인산염은 매우 타형(anhydral)으로 산출하며 흔히 균열이 존재하기 때문에 본래의 결정모양을 유지한채 분리하기가 불가능하다. 따라서 분리된 인산염의 모양(morphology)으로부터의 알파 되튀김 보정(Farley et al., 1996)이 불가능하다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 몇가지 방법이 쓰일 수 있다. (1) 우선 시료가 빠른 냉각을 겪어, 확산에 의한 ^4He 유실이 크지 않을 경우, 시료의 주변부 약 20 μm 이상을 물리적으로 제거함으로써 알파 되튀김효과를 해결할 수 있다(Min et al., 2010). 하지만 운석시료의 경우 그 크기가 작고, 내부에 균열이 많아 시료의 주변부만을 제거하는 것이 매우 어렵다. (2) 두번째 방법은 특정한 파동을 갖는 레이저 (예를들면, eximer laser)를 이용해 제자리(*in-situ*) (U-Th)/He 연령측정을 실시하는 것이다 (Boyce et al., 2006; Tripathy et al., 2010). 이러한 경우, 시료의 경계로부터 20 μm 이상 떨어진 중심부에 대한 연령측정을 시행함으로써 알파되튀김 현상에 기인한 복잡한 보정과정을 피할수 있다. 또한 비교적 천천히 식은 시료에 대해서도 적용할수 있다는 장점이 있다. 하지만 대부분의 화성운석의 경우 그 U-Th 양이 작고, 연령도 낮기 때문에 현재의 분석기술로는 수십 μm 의 삭박공(ablation pit) 시료로부터 추출된 ^4He 의 양을 정량하기 힘들다. (3) 마지막으로 만일 인산염이 다른 상에 대부분 둘러싸인 채로 분리된다면, 인산염으로부터 되튀겨 나온 ^4He 원자들이 주변

의 상에 머물러 있을 가능성이 크다. 이러한 경우 전체 인산염 및 주변 상을 함께 분석한다면 알파 되튀김 효과를 최소화 시킬수 있다 (Min, 2005). 하지만 실제 분리된 입자가 이러한 조건을 충족시키는데에 대한 검증이 필요하다.

앞으로 이러한 문제들에 대한 심도있는 연구가 이루어 진다면 운석에 대한 보다 신빙성있는 (U-Th)/He 연령 측정 및 해석이 가능하리라 본다.

결 언

운석에 대한 단입자 혹은 다입자 (U-Th)/He 연령 측정은 아직 초보적 수준이라 할 수 있다. 그러나 (U-Th)/He 방법은 운석의 지은 열역사 및 충격변성 열역사 추정에 효과적으로 쓰일수 있는 거의 유일한 방법이기 때문에 그 전망이 밝다고 할 수 있겠다. 이 방법은 화성 운석뿐 아니라, 콘드라이트 및 달 운석 등에도 효과적으로 적용될 수 있다. 또한 이 방법은 지구 시료의 열역사 및 지형학 연구에 매우 중요한 단서를 제공할 수 있기 때문에 다양한 응용이 가능하며, 앞으로 많은 연구가 기대되는 분야이다.

사 사

정량 분석에 도움을 준 Peter Reiners, Stefan Nicolescu, Annette Farah, 초고에 대한 발전적인 조언을 해 준 이종익, 최변각 박사에게 감사한다. 본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업(10-3611)의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

- NASA Compendium, <http://www-curator.jsc.nasa.gov/antmet/mmc/>.
- Aciego, S., Kennedy, B.M., DePaolo, D.J., Christensen, J. N. and Hutcheon, I., 2003, U-Th/He age of phenocrystic garnet from the 79 AD eruption of Mt. Vesuvius. *Earth and Planetary Science Letters*, 216, 209-219.
- Ahrens, T.J., Paterson, C.F. and Rosenberg, J.T., 1969, Shock compression of feldspars. *Journal of Geophysical Research*, 74, 2727-2746.
- Arrol, W.J., Jacobi, R.B. and Paneth, F.A., 1942, Meteorites and the age of the solar system. *Nature*, 149, 235-238.
- Artemieva, N. and Ivanov, B.A., 2004, Launch of Martian meteorites in oblique impacts. *Icarus*, 171, 84-101.
- Ash, R.D., Knott, S.F. and Turnet, G., 1996, A 4-Gyr shock

- age for a Martian meteorite and implications for the cratering history of Mars. *Nature*, 380, 57-59.
- Barrat, J.A., Gillet, P., Sautter, V., Jambon, A., Javoy, M., Göpel, C., Lesourd, M., Keller, F. and Petit, E., 2002, Petrology and chemistry of the basaltic shergottite North West Africa 480. *Meteoritics and Planetary Science*, 37, 487-499.
- Bauer, C.A., 1947, Production of helium in meteorites by cosmic radiation. *Physical Review*, 72, 354-355.
- Becker, R.H. and Pepin, R.O., 1984, The case for a martian origin of the shergottites: Nitrogen and noble gases in EETA79001. *Earth and Planetary Science Letters*, 69, 225-242.
- Bogard, D.D., Horz, F. and Johnson, P., 1986, Shock-implanted noble gases: An experimental study with implications for the origin of Martian gases in shergottite meteorites. *Journal of Geophysical Research*, 91, E99-E114.
- Bogard, D.D., 1995, Impact ages of meteorites: A synthesis. *Meteoritics* 30, 244-268.
- Bogard, D.D., 2009, K-Ar dating of rocks on Mars: Requirements from Martian meteorite analyses and isochron modeling. *Meteoritics and Planetary Science*, 44, 3-14.
- Bogard, D.D. and Johnson, P., 1983, Martian ages in an Antarctic meteorite. *Science*, 221, 651-654.
- Bogard, D.D. and Park, J., 2008, ^{39}Ar - ^{40}Ar dating of the Zagami martian shergottite and implications from magma origin of excess ^{40}Ar . *Meteoritics and Planetary Science*, 43, 1113-1126.
- Bogard, D.D., Park, J. and Garrison, D., 2009, ^{39}Ar - ^{40}Ar "ages" and origin of excess ^{40}Ar in Martian shergottites. *Meteoritics and Planetary Science*, 44, 905-923.
- Boyce, J.W., Hodges, K.V., Olszewski, W.J., Jercinovic, M.J., Carpenter, B.D. and Reiners, P.W., 2006, Laser microprobe (U-Th)/He geochronology. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, 3031-3039.
- Bridges, J.C., Catling, D.C., Saxton, J.M., Swindle, T.D., Lyon, I.C. and Grady, M.M., 2001, Alteration assemblages in Martian meteorites: Implications for near-surface processes. *Space Science Reviews*, 96, 365-392.
- Cassata, W.S., Shuster, D.L., Renne, P.R., and Weiss, B.P., 2010, Evidence for shock heating and constraints on Martian surface temperatures revealed by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronometry of Martian meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 74, 6900-6920.
- Clayton, R.N. and Mayeda, T.K., 1996, Oxygen isotope studies of achondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60, 1999-2017.
- Ehlers, T.A. and Farley, K.A., 2003, Apatite (U-Th)/He thermochronometry: methods and applications to problems in tectonic and surface processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 206, 1-14.
- Farley, K.A., 2000, Helium diffusion from apatite: General behavior as illustrated by Durango fluorapatite. *Journal of Geophysical Research*, 105, 2903-2914.
- Farley, K.A., Wolf, R.A. and Silver, L.T., 1996, The effects of long alpha-stopping distances on (U-Th)/He dates. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60, 4223-4229.
- Fritz, J., Artemieva, N. and Greshake, A., 2005, Ejection of Martian meteorites. *Meteoritics and Planetary Science*, 40, 1393-1411.
- Gnos, E., Hofmann, B., Franchi, I.A., Al-Kathiri, A., Hauser, M. and Moser, L., 2002, Sayh al Uhaymir 094: A new martian meteorite from the Oman desert. *Meteoritics and Planetary Science*, 37, 835-854.
- Greenwood, J.P. and McSween Jr., H.Y., 2001, Petrogenesis of Allan Hills 84001: constraints from impact melted feldspathic and silica glasses. *Meteoritics and Planetary Science*, 36, 43-61.
- Greshake, A., Fritz, J. and Stöffler, D., 2004, Petrology and shock metamorphism of the olivine-phyric shergottite Yamato 980459 - Evidence for a two-stage cooling and a single-stage ejection history. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68, 2359-2377.
- Harper Jr, C.L., Nyquist, L.E., Bansal, B., Wiesmann, H. and Shih, C.-Y., 1995, Rapid accretion and early differentiation of Mars indicated by $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ in SNC meteorites. *Science*, 267, 213-217.
- Harvey, R.P., McCoy, T.J. and Leshin, L.A., 1996, Shergottite QUE 94201: Texture, mineral composition, and comparison with other basaltic shergottites. *Lunar and Planetary Science*, XXVII, 497-498.
- Horneck, G., Stöffler, D., Eschweiler, U. and Hornemann, U., 2001, Bacterial spores survive simulated meteorite impact. *Icarus*, 149, 285-290.
- Jagoutz, E., Sorowka, A., Vogel, J.D. and Wänke, H., 1994, ALH84001: Alien or Progenitor of the SNC Family? *Meteoritics*, 29, 478-479.
- Kirschvink, J.L., Maine, A.T. and Vali, H., 1997, Paleomagnetic evidence of a low-temperature origin of carbonate in the martian meteorite ALH84001. *Science*, 275, 1629-1633.
- Lodders, K., 1998, A survey of SNC meteorite whole-rock compositions. *Meteoritics and Planetary Science* 33, A183-A190.
- Mathew, K.J. and Marti, K., 2001, Early evolution of Martian volatiles: Nitrogen and noble gas components in ALH84001 and Chassigny. *Journal of Geophysical Research*, 106, 1401-1422.
- McCoy, T.J., Taylor, G.J. and Keil, K., 1992, Zagami - Product of a two-stage magmatic history. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56, 3571-3582.
- McCoy, T.J., Keil, K. and Taylor, G.J., 1993, The dregs of crystallization in Zagami. *Lunar and Planetary Science* XXIV, 947-948.

- McKay, D.S., Gibson Jr. E.K., Thomas-Keptra, K.L., Vali, H., Romanek, C.S., Clemett, S.J., Chillier, X.D.F., Maechling, C.R. and Zare, R.N., 1996, Search for past life on Mars: Possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH84001. *Science*, 273, 924-930.
- McSween, H.Y., 1985, SNC meteorites - Clues to Martian petrologic evolution? *Reviews of Geophysics*, 23, 391-416.
- McSween, H.Y. and Eisenhour, D.D., 1996, QUE94201, A Noncumulate Shergottite? *Lunar and Planetary Science*, XXVII, 853-854.
- McSween, H.Y. and Jarosewich, E., 1983, Petrogenesis of the Elephant Moraine A79001 meteorite Multiple magma pulses on the shergottite parent body. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47, 1501-1513.
- McSween, H.Y. and Treiman, A.H., 1998, Martian meteorites. In: Papike, J.J. (Ed.), *Planetary Materials: Reviews in Mineralogy and Geochemistry* (ed. J. J. Papike), Mineralogical Society of America, v. 36, Chapter 6.
- Melosh, H.J., 1984, Impact ejection, spallation, and the origin of meteorites. *Icarus*, 59, 234-260.
- Melosh, H.J., 1985, Ejection of rock fragments from planetary bodies. *Geology*, 13, 144-148.
- Melosh, H.J., 1988, The rocky road to panspermia *Nature*, 332, 687-688.
- Melosh, H.J., 1993, Blasting rocks off planets. *Nature*, 363, 498-499.
- Mikouchi, T., Miyamoto, M. and McKay, G.A., 1996, Mineralogy and Petrology of New Antarctic Shergottite QUE94201: A Coarse-Grained Basalt With Unusual Pyroxene Zoning. *Lunar and Planetary Science*, 27, 879.
- Mikouchi, T. and Miyamoto, M., 2001, Dhofar 019 shergottite: Mineralogy and petrology of a new member of the basaltic Martian meteorites. *Lunar and Planetary Science XXXII*, 1644.
- Mikouchi, T., Miyamoto, M. and McKay, G.A., 2001, Mineralogy and petrology of the Dar al Gani 476 martian meteorite: Implications for its cooling history and relationship to other shergottites. *Meteoritics and Planetary Science*, 36, 531-548.
- Mileikowsky, C., Cucinotta, F.A., Wilson, J.W., Gladman, B., Horneck, G., Lindergren, L., Melosh, J., Rickman, H., Valtonen, M. and Zheng, J.Q., 2000, Natural transfer of viable microbes in space. *Icarus*, 145, 391-427.
- Min, K., 2005, Low-temperature thermochronometry of meteorites. In *Low-Temperature Thermochronology: Reviews in Mineralogy and Geochemistry* (eds. P. W. Reiners and T.A. Ehlers), Mineralogical Society of America and Geochemical Society, v. 58, Chapter 21, 567-588.
- Min, K., Farley, K.A., Renne, P.R. and Marti, K., 2003, Single grain (U-Th)/He ages from phosphates in Acapulco meteorite and implications for thermal history. *Earth and Planetary Science Letters*, 209, 323-336.
- Min, K., Reiners, P.W., Wolff, J.A., Mundil, R. and Winters, R.L., 2006, (U-Th)/He dating of volcanic phenocrysts with high-U-Th inclusions, Jemez Volcanic Field, New Mexico. *Chemical Geology*, 227, 223-235.
- Min, K. and Reiners, P.W., 2007, High-temperature Mars-to-Earth transfer of meteorite ALH84001. *Earth and Planetary Science Letters*, 260, 72-85.
- Min, K., Reiners, P.W., Nicolescu, S. and Greenwood, J.P., 2004, Age and temperature of shock metamorphism of Martian meteorite Los Angeles from (U-Th)/He thermochronometry. *Geology*, 32, 677-680.
- Min, K., Reiners, P.W. and Shuster, D., 2010, Single-grain (U-Th)/He ages of phosphates from St. Severin chondrite. *AGU Fall Meeting*, Abstract, P14C-04.
- Mitchell, S.G. and Reiners, P. W., 2003, Influence of Wildfires on Apatite and Zircon (U-Th)/He Ages. *Geology*, 31, 1025-1028.
- Nyquist, L.E., Bogard, D.D., Shih, C.-Y., Greshake, A., Stöffler, D. and Eugster, O., 2001, Ages and geologic histories of Martian meteorites. *Space Science Review*, 96, 105-164.
- Ostertag, R., 1983, Shock experiments on feldspar crystals. *Journal of Geophysical Research*, 88, B364-376.
- Owen, T., Biemann, K., Rushneck, D.R., Biller, J.E., Howarth, D.W. and Lafleur, A.L., 1977, The Composition of the Atmosphere at the Surface of Mars. *Journal of Geophysical Research*, 82, 4635-4639.
- Paneth, F.A., Urry, W.D. and Koeck, W., 1930, The age of iron meteorites. *Nature*, 125, 490-491.
- Pepin, R.O., 1985, Evidence of Martian origins. *Nature*, 317, 473-475.
- Reimold, W.U. and Stöffler, D., 1978, Experimental shock metamorphism of dunite. *Proceedings of Lunar and Planetary Science Conference*, 9, 2805-2824.
- Reiners, P.W., 2002, (U-Th)/He chronometry experiences a renaissance. *Eos*, 83, 21-27.
- Reiners, P.W. and Farley, K.A., 2001, Influence of crystal size on apatite (U-Th)/He thermochronology: an example from the Bighorn Mountains, Wyoming *Earth and Planetary Science Letters*, 188, 413-420.
- Reiners, P.W. and Nicolescu, S., 2006, Measurement of parent nuclides for (U-Th)/He chronometry by solution sector ICP-MSARHDL Report. University of Arizona, page.
- Rubin, A.E., Warren, P.H., Greenwood, J.P., Verish, R.S., Leshin, L.A., Hervig, R.L., Clayton, R.N. and Mayeda, T.K., 2000, Los Angeles: The most differentiated basaltic martian meteorite. *Geology*, 28, 1011-1014.
- Schmitt, R.T., 2000, Shock experiments with the H6 chondrite Kernouve. *Meteoritics and Planetary Science*, 35, 545-560.
- Schultz, L. and Franke, L., 2004, Helium, neon, and argon in meteorites: A data collection. *Meteoritics and Planetary Science*, 39, 1889-1890.

- Schwandt, C.S., 2001, The magma composition of EETA 79001A: The first recount. *Lunar and Planetary Science XXXII*, 1913.
- Schwenzer, S.P., Fritz, J., Greshake, A., Herrmann, S., Jochum, K.P., Ott, U., Stöffler, D. and Stoll, B., 2004, Helium loss and shock pressure in Martian meteorites - A relationship (abstract). *Meteoritics and Planetary Science*, 39, A96.
- Schwenzer, S. P., Fritz, J., Stöffler, D., Trieloff, M., Amini, M., Greshake, A., Herrmann, S., Herwig, K., Jochum, K. P., Mohapatra, R.K., Stoll, B. and Ott, U., 2008, Helium loss from Martian meteorites mainly induced by shock metamorphism: Evidence from new data and a literature compilation. *Meteoritics and Planetary Science*, 43, 1841-1859.
- Schwenzer, S.P., Herrmann, S., Mohapatra, R.K. and Ott, U., 2007, Noble gases in mineral separates from three shergottites: Shergotty, Zagami, and EETA79001. *Meteoritics and Planetary Science*, 42, 387-412.
- Shoemaker, E.M., Hackman, R.J. and Eggleton, R.E., 1963, Interplanetary correlation of geologic time. *Advances in the Astronautical Science*, 8, 70-89.
- Shuster, D.L. and Weiss, B.P., 2005, Martian surface paleotemperatures from thermochronology of meteorites. *Science*, 309, 594-597.
- Stöffler, D., Bischoff, A., Buchwald, U. and Rubin, A.E., 1988, Shock effects in meteorites. In: *Meteoritics and the Early Solar System* (eds. J. F. Kerridge and M. S. Mathews), University of Arizona Press, Tucson. page.
- Stöffler, D., Horneck, G., Sieglinde, O., Hornemann, U., Cockell, C.S., Moeller, R., Meyer, C., de Vera, J.-P., Fritz, J. and Artemieva, N., 2007, Experimental evidence for the potential impact ejection of viable microorganisms from Mars and Mars-like planets. *Icarus*, 186, 585-588.
- Stöffler, D., Keil, K. and Scott, E.R.D., 1991, Shock metamorphism or ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55, 3845-3867.
- Stöffler, D., Ostertag, R., Jammes, C., Pfannschmidt, G., Sen Gupta, P.R., Simon, S.B., Papike, J.J. and Beauchamp, R. H., 1986, Shock metamorphism and petrology of the shergotty achondrites *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50, 889-903.
- Stolper, E.M. and McSween, H.Y., 1979, Petrology and origin of the shergottite meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 43, 1475-1498.
- Strutt, R.J., 1908, On the accumulation of helium in geological time. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A* 81, 272-277.
- Strutt, R.J., 1909, The accumulation of helium in geological time. II. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A* 83, 96-99.
- Strutt, R.J., 1910, The accumulation of helium in geological time. III. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A* 83, 298-301.
- Swindle, T.D., Caffee, M.W. and Hohenberg, C.M., 1986, Xenon and other noble gases in shergottites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50, 1001-1015.
- Treiman, A.H., 1998, The history of Alan Hills 84001 revisited: Multiple shock events. *Meteoritics and Planetary Science*, 33, 753-764.
- Treiman, A.H., McKay, G.A., Bogard, D.D., Mittlefehldt, D. W., Wang, M.-S., Keller, L., Lipschutz, M.E., Lindstrom, M.M. and Garrison, D., 1994, Comparison of the LEW88516 and ALHA77005 martian meteorites: Similar but distinct. *Meteoritics* 29, 581-592.
- Tripathy, A., Monteleone, B.D., Van Soest, M.C., Hodges, K.V. and Hourigan, J.K., 2010, In situ detrital zircon (U-Th)/He thermochronology. *AGU Fall Meeting*, V34A-05.
- Turner, G., Knott, S.F., Ash, R.D., and Gilmour, J.D., 1997, Ar-Ar geochronology of the Martian meteorite ALH84001: evidence for the timing of the early bombardment of Mars. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61, 3835-3850.
- Wadhwa, M., Lentz, R.C.F., McSween, H.Y. and Crozaz, G., 2001, A Petrologic and Trace Element Study of Dar al Gani 476 and Dar al Gani 489: Twin Meteorites with Affinities to Basaltic and Lherzolithic Shergottites. *Meteoritics and Planetary Science*, 36, 195-208.
- Wadhwa, M., McSween, H.Y. and Crozaz, G., 1994, Petrogenesis of shergottite meteorites inferred from minor and trace element microdistributions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58, 4213-4229.
- Weiss, B.P., Kirschvink, J.L., Baudenbacher, F.J., Vali, H., Peters, N.T., Macdonald, F.A. and Wikswow, J.P., 2000, A low temperature transfer of ALH84001 from Mars to earth. *Science*, 290, 465-472.
- Weiss, B.P., Shuster, D.L. and Stewart, S.T., 2002, Temperature on Mars from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology of ALH84001. *Earth and Planetary Science Letters*, 201, 465-472.
- Wiens, R.C. and Pepin, R.O., 1986, Laboratory shock emplacement of noble gases, nitrogen, and carbon dioxide into basalt, and implications for trapped gases in shergottite EETA79001. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 295-307.
- Xirouchakis, D., Draper, D.S., Schwandt, C.S. and Lanzirotti, A., 2002, Crystallization conditions of Los Angeles, a basaltic Martian meteorite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66, 1867-1880.
- Zeitler, P.K., Herczeg, A.L., McDougall, I. and Honda, M., 1987, U-Th-He dating of apatite: a potential thermochronometer. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51, 2865-2868.

2010년 10월 11일 접수
 2010년 10월 12일 심사개시
 2010년 11월 23일 채택