

콘드라이트 내 자화가능 광물의 분포

김하늘 · 유용재[‡]
충남대학교 지질환경과학과

요 약

콘드라이트는 지구를 포함하는 진화 초기의 태양계 연구에 견인차 역할을 할 수 있는 유일한 암석시료이다. 콘드라이트에 존재 가능한 다섯 종류의 자성광물을 모두 포함하는 운석 H5 Richardton과 LL6 St. Séverin에 대해 전자현미경관찰 및 미세탐침성분분석을 수행하였다. H5 Richardton과 LL6 St. Séverin에서 카마사이트(Kamacite), 태나이트(Taenite), 테트라태나이트(Tetrataenite), 크롬티탄함유철석(Cr-Fe-Ti-bearing Oxide), 트로이라이트(Troilite)를 모두 관찰하였다. 카마사이트와 트로이라이트는 시편에 우세하게 발달한 규산염 광물의 경계를 따라 분포하며 일차자화를 보유할 가능성이 없다고 판단된다. 크롬티탄함유철석은 대형 카마사이트의 산화물로 해석되며 일차 자화가 아닌 변질 자화만 기록 가능하다. 태나이트는 감람석과 사장석의 경계에만 분포하므로 안정된 일차자화를 기록할 가능성이 없다. 반면 테트라태나이트는 감람석 내부에 포획광물의 형태로 존재하여 콘드라이트의 안정된 자화를 설명하기에 가장 적합하다.

주요어: 콘드라이트, 테트라태나이트, 카마사이트, 트로이라이트, 태나이트

Hanul Kim and Yongjae Yu, 2014, Distribution of potential magnetic minerals in chondrites. Journal of the Geological Society of Korea. v. 50, no. 3, p. 365-372

ABSTRACT: Magnetic investigation of Chondrites provides a first-order constraint on the formation and evolution of planets and asteroids in the Solar System. A suite of scanning electron microscopy, energy dispersive analysis, and electron-probe microprobe analyses were employed on H5 Richardton and LL6 St. Séverin. We identified Cr-Fe-Ti-bearing oxide, kamacite, taenite, tetrataenite, and troilite as candidates for the stable remanent magnetization carriers. Massive kamacite and troilite were present along the boundaries of silicates (mostly olivine), unlikely to carry the stable primary remanent magnetization. Cr-Fe-Ti-bearing oxide occurs as the outermost altered region of kamacite, possibly responsible for the overprinted magnetization. Taenite exists along the boundaries between olivine and plagioclase, inadequate to be considered as a stable remanent magnetization carrier. Tetrataenite is ideally suited for recording ancient planetary magnetic field as it is encapsulated within olivine grains which is extremely effective in preventing alteration on later metamorphic or shock events.

Key words: Chondrite, Tetrataenite, Kamacite, Troilite, Taenite

(Hanul Kim and Yongjae Yu, Department of Geological Sciences, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Republic of Korea)

1. 서 론

최근의 지구과학은 전 세계적으로 지구를 포함하는 태양계의 근원과 초기진화에 대한 연구에 많은 관심이 집중되어 있다. 특히 지구를 포함하는 태양계의 초기 진화를 심도 있게 규명하기 위해서는 태양계 전반에 걸쳐 행성의 진화를 유기적으로 고찰할 필요가 있다. 이를 위해 지구를 포함하는 태양계 내

모든 행성과 그 위성들에 관한 종합적인 자료의 취득이 요구되나, 이는 먼 미래에나 가능한 희망사항일 것이다. 이러한 미래의 행성/위성 탐사가 실현되더라도, 이들 행성/위성의 진화를 완벽히 규명하기엔 어려움이 남을 것이다. 실례로, 현재까지 보고된 지구상의 가장 오래된 암체는 캐나다 북서부의 Acasta 편마암복합체로 대략 40억 년 전에 형성되었다(4031±3 Ma, Bowring and Williams, 1999).

[‡] Corresponding author: +82-42-821-6424, E-mail: yongjaeyu@cnu.ac.kr

반면 고기의 암층에 포함된 지구상의 가장 오래된 쇄암질(detrital)의 zircon은 대략 44억 년 전에 생성되었다(4404±8 Ma, Wilde, 2001). 최근 지구생성 초기에 존재했던 마그마바다(magma ocean)가 냉각되며 지각의 균질화 과정에서 고화된 zircon의 최대 연령은 43억7천6백만 년 전으로 보고되었다(Valley *et al.*, 2014). 결국 태양계의 생성연대인 45억6천8백만 년 전(Bouvier and Wadhwa, 2010)을 기준으로 대략 수억 년의 진화 초기 기록을 암석의 형태로 현재까지 보존하지 못한 시간 간격이 지구상에 존재한다. 그러나 다행스럽게도 오만 여점 이상의 운석이 발견되어 수집되고 있으며, 이들 운석은 지구를 포함하는 태양계 생성 초기의 원시 태양계에 관한 정보를 간직하고 있다.

빅뱅 이후 우주에 존재하던 물질, 초신성, 거성 등 다양한 항성에서 초신성 폭발, 항성풍 등에 의해 방출된 물질의 집합체인 성운으로부터 태양계가 탄생하였다. 운석은 초신성 폭발의 잔해인 성운가스가 중력의 영향으로 수축하면서 시작된 태양계 탄생의 비밀을 간직한 우주화석이다. 태양계 최초의 응축 물질을 포함하는 Ca-Al-rich Inclusions을 시작으로 규산염덩어리(silicate clumps)가 응집되며 미세소행성(planetesimals)으로, 미세소행성이 준행성(planetary embryo)으로, 준행성이 행성체(planetary bodies)로 진화하는 과정에서 성장과 동반된 충돌에 의해 분리된 고체 파편이 내행성 궤도를 배회하다 지구중력장에 이끌려 지구로 낙하된 후 지표에서 회수된 암편이 운석이다. 따라서 생성 초기 지구를 포함하는 태양계 내 지구형 행성의 진화를 규명하려면 원시 태양계의 정보를 간직하고 있는 운석의 물리/화학적 분석이 필요하다. 운석은 분화의 유무에 따라 분화를 겪지 않은 콘드라이트(Chondrite), 분화가 진행되었지만 태양계 초기 성분을 유지하는 원시아콘드라이트(Primitive Achondrite), 분화로 인해 태양계 초기 성분이 변한 아콘드라이트(Achondrite)로 크게 3대분 된다(Hutchison, 2004; Krot *et al.*, 2004).

대한민국의 경우 불충분한 운석 시료 확보와 실험장비 부재 등의 연구 인프라 장애에도 불구하고 운석에 대한 선행연구가 시도된 전례가 있다(Lee, S.G. *et al.*, 2004; Choi, 2008, 2009; Choi *et al.*, 2009; Han and Choi, 2009; Lee, S.R. *et al.*, 2009). 또한 국

외 연구기관의 도움을 받아 대한민국 국적의 과학자들이 주도적으로 운석에 관한 연구를 수행하는 사례가 최근 10년간 증가하고 있는 추세이다(Min *et al.*, 2004, 2013; Yu and Gee, 2005; Min and Reiners, 2007; Yu *et al.*, 2009, 2011).

단주기방사성동위원소(short-lived radioactive isotope) 분석에 의하면 태양계 형성 시점을 기준으로 대략 3000만년 이내에 소행성의 분화가 진행된다(Lee and Halladay, 1996). 금번 연구에 사용된 두 종의 콘드라이트 운석은 대략 3000만년의 분화기간 중, 분화 중기에 해당하는 분화 시작 후 1000만년 전후에 생성된 운석들로 보고되었다(Lee and Halladay, 1996). 만약 분화 중기의 행성체가 이미 완성된 용융상태의 핵을 보유했다면, 행성체 자체로 자기장을 생성하여 운석이 열간류자화를 획득하였으리라 생각된다. 반대로, 운석이 열간류자화를 획득하지 못한 경우엔, 행성체 분화 과정에서 용융상태의 핵을 형성하지 못했다는 결정적인 행성내부 진화의 정도를 지시하는 단서를 제공하게 된다.

소행성 및 지구형 행성체 가운데 지구는 상대적으로 산소가 풍부한 산화환경에서 자성광물이 형성되므로 자철석(Magnetite, Fe_3O_4), 적철석(Hematite, Fe_2O_3), 티탄철석₆₀(Titanomagnetite₆₀, $Fe_{2.4}Ti_{0.6}O_4$), 크롬티탄함유철석((Cr, Fe, Ti) Fe_2O_4), 자류철석(Pyrrhotite, Fe_7O_8)등이 생성된다. 그러나 환원 환경이 우세한 운석의 모암에서는 철-니켈 합금과 철-황 화합물이 주로 생성된다(Rochette *et al.*, 2009). 운석에 존재하는 철-니켈 합금은 비평형 상태에서 정출되는 철이 우세한 카마사이트(Kamacite, $Fe_{90-95}Ni_{5-10}$), 전이단계에서 생성되는 니켈이 우세한 태나이트(Taenite, disordered Fe-Ni, $Fe_{7-50}Ni_{50-93}$), 평형상태에서 철과 니켈이 거의 일대일로 규칙적 배열을 이루는 테트라태나이트(Tetrataenite, ordered Fe-Ni, $Fe_{43-52}Ni_{48-57}$)가 존재한다(Clarke and Scott, 1980). 운석에서 관찰되는 철-황 화합물은 자성광물로 알려진 지구 암권의 자류철석(Pyrrhotite, Fe_7S_8)보다 황의 비율이 높은 트로이라이트(Troilite, FeS)로 대부분 비자성 광물이다(Rochette *et al.*, 2001). 일부 분화 운석에서는 크롬티탄함유철석(Cr-Fe-Ti oxide)이 자성광물을 이루기도 한다(Weiss *et al.*, 2002; Yu and Gee, 2005).

금번연구에서는 콘드라이트에 존재 가능한 자성

광물 후보인 카마사이트, 테트라태나이트, 태나이트, 크롬티탄함유철석, 트로이라이트를 모두 함유하는 2종의 콘드라이트를 대상으로 자성광물의 분포 행태를 살펴보았다. 금번 연구에 사용한 운석은 H5 Richardton (4550±2.6 Ma: Amelin *et al.*, 2005)과 LL6 St. Séverin (4554.9±0.2 Ma: Bouvier *et al.*, 2007)이다. H5 Richardton은 모행성체에서 분리되며 충격변성작용에 의해 철/마그네슘 이온치환이 발생하여 감람석과 휘석의 성분이 균질화 되었으며 재설정된 Sr 동위원소비를 나타낸다(Evensen *et al.*, 1979). 반면 LL6 St. Séverin은 Pb-Pb 절대연령(4543±19 Ma, Manhès *et al.*, 1978; 4559±15 Ma, Chen and Wasserber, 1981; 4553.6±0.7 Ma, Göpel *et al.*, 1994; 4554.9±0.2 Ma, Bouvier *et al.*, 2007), Sm-Nd 절대연령(4550±330 Ma, Jacobsen and Wasserburg, 1981), Rb-Sr 절대연령(4510±150 Ma, Dalrymple, 1991), Re-Os 절대연령(4680±150 Ma, Chen *et al.*, 1998), and Ar-Ar 절대연령(4430±40 Ma, Dalrymple, 1991) 등 다양한 방법으로 절대연령이 검증된 유일한 운석으로 H 콘드라이트에 비해 상대적으로 서서히 냉각되었다(Min *et al.*, 2013). 두 운석에는 다양한 철화합물과 황화합물이 공존하지만 자화는 각기 카마사이트(H5 Richardton)와 테트라태나이트(LL6 St. Séverin)가 지배하는 것으로 판명되었다(Yu *et al.*, 2009, 2011). 금번 연구는 두 운석에 존재하는 자화획득 가능 광물의 분포를 고찰하려한다. 특히 기존의 분석을 통해 상대적으로 자성광물의 존재가 확인된 밀리미터 규모의 감람석이 우세한 운석 입자를 선별하여 사용하였다.

2. 콘드라이트 함유 자성광물의 분포

준행성 이상의 부피를 지니는 소행성 및 지구형 행성의 탄생과 분화 과정은 대략 태양계 생성 초기 1억 년(100 Myrs) 이내에 국한된다(Klein *et al.*, 2009; Albarède, 2010). 이들 소행성 및 지구형 행성의 진화 과정을 과학적으로 규명하기 위해서 그간 다양한 연구가 서구선진국의 대형 연구기관을 중심으로 행성자기학 분야에서 수행되어 왔다(Weiss *et al.*, 2008; Gattacceca *et al.*, 2011; Tarduno *et al.*, 2012). 특히 분화가 진행되며 무거운 철질 물질이 행성체 중심부로 이동하여 금속성 핵을 형성하고 이들이 내재하는

열에 의해 용융 상태가 유지되며 자전이 지속되었다면 소행성 및 지구형 행성체 자체적으로 심부기원의 쌍극자기장(dipole field)을 형성할 수 있다. 이런 원리로 형성된 행성체의 자체유도자기장은 열잔류자화(thermoremanent magnetization)의 형태로 금속성분을 다량 함유한 행성체가 냉각될 때 운석의 모암에 기록되게 된다. 이때 획득한 운석모암의 열잔류자화는 실험실에서 운석을 대상으로 수행하는 소자(demagnetization) 실험 분석으로 과거에 획득된 자화의 특성이 규명될 수 있다(Weiss *et al.*, 2010). 상술한 자화특성을 이용한 운석의 물리적 기원 분석 자료는 소행성 및 지구형 행성체의 분화에 대한 직접적인 정보를 정량적으로 제시한다(Weiss *et al.*, 2008). 일반적으로 자체기원의 행성체 쌍극자기장은 반경이 250 km 이하인 ordinary chondrite의 모체에서 생성되기 어려우나, 열발산이 활발하고 자전속도가 적절한 모행성체의 경우 반경이 100 km 이상이면 자체기원의 행성체 쌍극자기장이 형성 가능하다(Weiss *et al.*, 2010).

운석 시편 내 존재 가능한 자성광물의 개략적인 화학조성을 알기위해 두 종류의 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope)을 사용하여 후면산란영상(back-scattered imaging)촬영과 비정량원소분석(Energy Dispersive Analysis)을 우선적으로 실시하였다. 이후 선별된 시편을 대상으로 미세탐침 성분분석(Electron Probing Microscopic Analysis)을 세부적으로 수행하였다. 금번 연구에 사용된 주사전자현미경은 FEI Quanta 600 Environmental SEM과 JEOL JXA-8600 SEM이고, 미세탐침성분분석기는 Cameca Camebax Microbeam Electron Microprobe이다.

우선 두 운석 모두 육안 상으로 판별 가능한 비현정질 초염기성 암석의 광물조성을 보인다. 현미경 관찰을 통해 운석의 주요 규산염광물은 감람석(Olivine)으로 이루어져 있으며, 일부 시편에서는 휘석(Pyroxene)과 사장석(Plagioclase)이 농집된 부분을 확인할 수 있다. 관찰한 6개 시편의 개략적인 광물 분포 면적비는 감람석 75±20%, 휘석 <5%, 사장석 15±5%, 자성가능광물 <5%이다. 일반적인 Ordinary chondrites는 감람석과 휘석이 거의 유사한 모드 함량을 보이지만, 금번 연구에 사용된 운석 입자는 휘석의 양이 매우 빈약하다. 이는 금번 연구에서 상대적으로 자

성광물의 존재가 확인된 감람석 위주의 밀리미터 규모 운석 입자를 선별하여 사용하였기 때문이다. 휘석은 주로 사방휘석(Orthopyroxene)이며 단사휘석(Clinopyroxene)이 간혹 관찰되나 부피비로 1% 미만이다. 사장석의 성분은 Albite(Albite₉₅Anorthite₅)에서 Andesine(Albite₆₀Anorthite₄₀)에 이르나, 금번 연구에서는 편의상 Na₂O 화합물의 존재를 부각하기 위해 모든 그림에 Albite로 표시하였다.

운석의 생성과 전이에 수반되는 충돌의 영향에 의해 깨짐이 발달된 부분은 운석의 생성 당시 형성된 일차잔류자화(primary magnetization)와 무관한 부가재자화(overprinted remagnetization)를 생성한다. 이런 경우 충격에 의해 금속이온이 재배치되며 비평형 상태에서 비교적 큰 자성광물이 농집된다(그림 1). 따라서 0.2 mm를 상회하는 카마사이트가 규산염광물의 쪼개진 틈을 따라 성장하게 된다. 이렇게 생성되는 대형 카마사이트는 금속함유량을 나타내는 대자율(Magnetic Susceptibility)을 높이는 데 기여하지만 다자기구역(Multidomain)에 해당되어 잔류자화(Remnant Magnetization)에는 거의 기여하지 못한다(그림 1). 또한 선명히 발달한 카마사이트의 주변부를 따라서 금속함유산화물인 크롬티탄함유철석(Cr-Fe-Ti Oxide)가 관찰된다(그림 1).

또한 깨짐이 상대적으로 미약하게 발달한 부분을 따라 0.05 mm 내외의 트로이라이트가 관찰된다(그림 1). 크롬티탄함유철석이 생성되기 위해서는 철보다는 크롬, 티탄, 산소가 필요하다. 따라서 카마사이트가의 주변부가 충격변성작용의 영향으로 크롬티탄함유철석으로 변질되었다고 판단된다(그림 1). 감람석 내부에 소량으로 존재하는 카마사이트의 자화기여도는 현재의 기기해상도로 분석이 불가하며, 향후 후속연구에서 감람석 내부에 존재하는 카마사이트 포획물의 자화를 분리해내는 추가 연구가 필요하다.

상대적으로 깨짐이 덜 발달한 운석 입자의 경우 규산염광물의 미약한 깨짐 사이로 트로이라이트가 우세하게 분포한다(그림 2, 3, 4). 사장석의 방향성은 엽리와 무관해 보이며, 화성조직(igneous texture)인 barred olivine 콘드룰(chondrule) 조직이 관찰된다(그림 2). 콘드라이트 내 철-니켈 금속과 트로이라이트의 생성은, 성운가스에서의 condensation, 콘드룰 생성과 관련된 부분용융과 결정작용, 열변성작용에 따른 재결정, 충격변성작용에 의한 재결정 또는 용융과 결정작용 등에 의해 가능하다. 트로이라이트나 카마사이트의 분포는 감람석의 경계부와 일치하므로, 트로이라이트나 카마사이트가 운석의 지구충돌 과정에서 발생한 2차적인 충격이기보다는

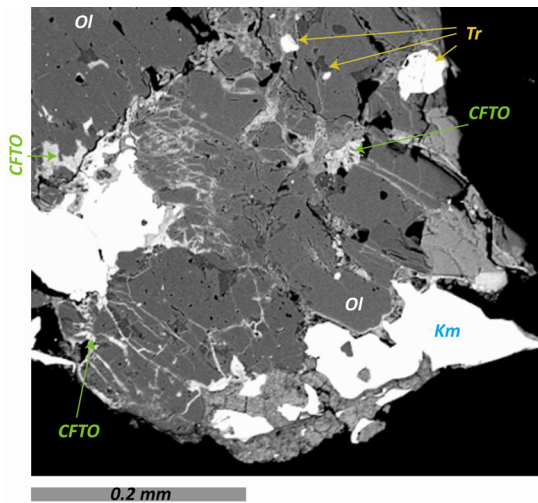


Fig. 1. Back-scattered images of H5 Richardton showing Cr-Fe-Ti oxide (CFTO), Kamacite (Km), Olivine (Ol), and Troilite (Tr). CFTO distributes near the edges of kamacite, possibly indicating a shock-induced alteration origin.

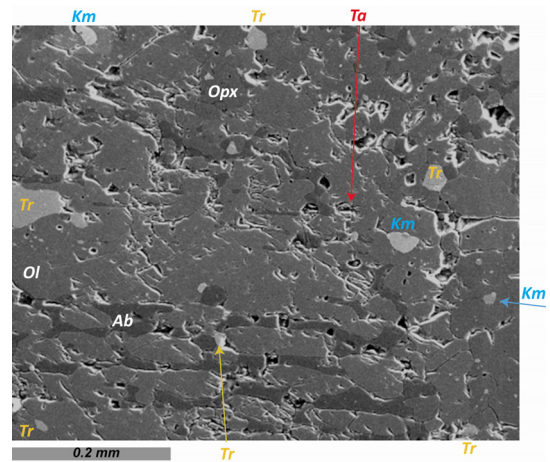


Fig. 2. Back-scattered images of LL6 St. Séverin showing Na-rich plagioclase (Ab), Kamacite (Km), Olivine (Ol), Orthopyroxene (Opx), Taenite (Ta), and Troilite (Tr). Kamacite and troilite were identified along the silicate (mostly olivine) boundaries.

운석이 모암체에서 분리될 때 발생한 1차적인 충격 변성작용의 증거로 해석될 수 있다.

태나이트는 항상 규산염광물인 감람석과 사장석의 경계부를 따라 존재하며 대체적으로 0.02 mm 정도의 크기를 보인다(그림 2, 3). 이는 금속원소가 규산염광물 사이에서 평형에 미치지 못하고 disordered 상태에서 태나이트로 결정화되기 때문으로 여겨진다. 반면 테트라태나이트는 감람석의 내부에 포획광물(Inclusion)의 형태로 존재한다(그림 3, 4). 테트라태나이트의 경우 감람석 내부에서 태나이트에 비해 상대적으로 서서히 냉각되며 평형상태의 ordered Fe-Ni 결정을 생성하기 때문이라 해석된다. 또한 테트라태나이트의 입자크기는 항상 0.01 mm 이하로 금속물질(Kneller and Luborsky, 1963)의 단자기구역(Single-domain) 혹은 위단자기구역(Pseudo-single-domain)에 해당하며 콘드라이트의 안정된 자화를 설명하기에 가장 적합하다.

3. 토의 및 제언

평형에 도달하지 못한 금속화합물인 태나이트와 달리 감람석에 포획된 테트라태나이트는 태나이트에 비해 상대적으로 서서히 냉각되며 700-830 K의

넓은 온도구간에서 열잔류자화를 획득(Pauleve *et al.*, 1962; Clarke and Scott, 1980)하고 600 K을 전후해 평형상태에 도달한다(Néel *et al.*, 1964). 테트라태나이트는 150 mT 이상의 항자기력(magnetic coercivity)을 보이며, 500 mT를 상회하는 최대 항자기력의 분석이 보고된 문헌도 존재한다(Brecher *et al.*, 1977; Sugiura, 1977; Nagata, 1979; Nagata and Funaki, 1982). 테트라태나이트의 열잔류자화는 600-640 K 구간에서 상실되며(Yu *et al.*, 2011), 자화상실 최대온도인 큐리온도는 640 K (Wasilewski, 1988)이다. 테트라태나이트는 재가열시 변질이 수반되어 자화획득보다 낮은 온도에서 큐리온도를 보이는 광물이다(Nagata and Funaki, 1982). 테트라태나이트는 재가열시 비가역 변질이 발생하므로 대규모 분화와 용융이 결여된 콘드라이트 운석에만 존재하는 특이 광물이다.

자성광물이 40억년 이상 된 자화 기록을 보존하기 위해서는 두 가지 조건을 만족해야 한다. 첫째, 물리적으로 미세자성광물의 입자크기가 단자기구역이나 신장된 위단자기구역에 해당되어야 한다. 물론 자성광물별로 단자기구역과 위단자기구역의 편차가 크지만 대부분 자성광물에서 10^{-8} 에서 10^{-5} m의 입자크기에 해당된다. 둘째, 자화기록이 충격이나

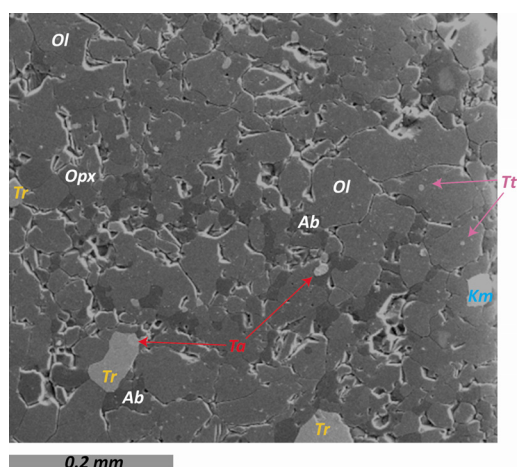


Fig. 3. Back-scattered images of LL6 St. Séverin showing Na-rich plagioclase (Ab), Kamacite (Km), Olivine (Ol), Orthopyroxene (Opx), Taenite (Ta), Tetrataenite (Tt), and Troilite (Tr). Kamacite and trolite were identified along the silicate (mostly olivine) boundaries. Silicate armored tetrataenite was observed within olivine.

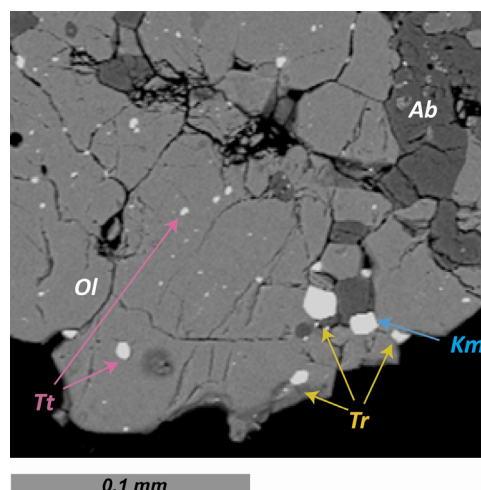


Fig. 4. Back-scattered images of H5 Richardton showing Na-rich plagioclase (Ab), Kamacite (Km), Olivine (Ol), Tetrataenite (Tt), and Troilite (Tr). Kamacite and trolite were identified along the silicate (mostly olivine) boundaries. Silicate armored tetrataenite was observed within olivine.

열에 의해 왜곡되지 않도록 규산염광물 내부에 포획 광물의 형태로 존재해야 한다. 콘드라이트의 자성광물 연구에서 최근 인정받는 정설은 콘드라이트의 안정된 자화특성이 감람석 내부에 포획광물로 존재하는 테트라태나이트에 기인한다는 연구결과이다. 이는 콘드라이트만의 고유한 자화특성으로 여타 암석의 자화 특성과 차별화된다. 실례로 지구의 암석에서는 자철석(Magnetite, Fe_3O_4)이 사장석이나 단사휘석 내부에 포획광물로 존재(Tarduno *et al.*, 2006)하고, 화성의 운석에서는 자철석(Weiss *et al.*, 2000, 2002; Antretter *et al.*, 2003)이나 크롬티탄함유철석(Yu and Gee, 2005)이 사방휘석 내에 포획광물의 형태로 존재하며 자화특성을 좌우한다. 포획광물의 중요성이 밝혀지기 이전 세대의 연구(Rochette *et al.*, 2001)에서 내리진 자류철석 자성광물론이 비전문가들 사이에서 인용되는 안타까운 사실도 시정되기를 바란다.

금속광물인 카마사이트, 태나이트, 테트라태나이트에 대한 자성광물학적 연구는 현재까지 전 세계적으로 미미하며, 향후 합성 및 자연산출 Fe-Ni System에 대한 추가 연구가 요망된다. 운석이 함유하는 금속 및 황 함유 자성가능광물에 관한 연구 분야는 장비 부분에 대한 현실적인 지원이 뒷받침된다면, 10여년 안에 세계적인 저명 연구가 가능한 유망 분야이다.

사 사

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(NRF-2013R1A2A1A01004418)입니다. 창의적인 제안을 해 주신 최변각 교수님, 박용희 교수님께 감사의 말씀을 드립니다.

REFERENCES

- Albarède, F., 2010, Volatile accretion history of the terrestrial planets and dynamic implications. *Nature*, 461, 1227-1233, doi: 10.1038/nature08477.
- Amelin, Y., Ghosh, A. and Rotenbun, E., 2005, Unraveling the evolution of chondrite parent asteroids by precise U-Pb dating and thermal modeling. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69, 505-518.
- Antretter, M., Fuller, M., Scott, E., Jackson, M., Moskowitz, B. and Solheid, P., 2003, Paleomagnetic record of Martian meteorite ALH84001. *Journal of Geophysical Research*, 108(E6), 5049, doi:10.1029/2002JE001979.
- Bouvier, A., Blichert-Toft, J., Moynier, F., Vervoort, J.D. and Albarède, F., 2007, Pb-Pb dating constraints on the accretion and cooling history of chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71, 1583-1604.
- Bouvier, A. and Wadhwa, M., 2010, The age of the Solar System redefined by the oldest Pb-Pb age of a meteoritic inclusion. *Nature Geoscience*, 3, 637-641.
- 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.
- Brecher, A., Stein, J. and Fuhrman, M., 1977, The magnetic effects of brecciation and shock in meteorites: 1. The LL-chondrites. *The Moon*, 17, 205-216.
- Chen, J.H. and Wasserburg, G.J., 1981, The isotopic composition of uranium and lead in Allende inclusions and meteoritic phosphates. *Earth and Planetary Science Letters*, 52, 1-15.
- Chen, J.H., Papanastassiou, D.A. and Wasserburg, G.J., 1998, Re-Os systematics in ordinary chondrites and Acapulco. *Proceedings of Annual Lunar and Planetary Science*, 29, 1663.
- Choi, B.G., 2008, Oxygen isotopes of the Solar System materials. *Journal of the Geological Society of Korea*, 44(4), 541-556 (in Korean with English abstract).
- Choi, B.G., 2009, Classification and petrological and geochemical characteristics of meteorites. *Journal of the Geological Society of Korea*, 45(2), 173-186 (in Korean with English abstract).
- Choi, B.G., Park, C.G., Ahn, I. and Lee, J.I., 2009, Classification and petrological and geochemical characteristics of Antarctic meteorites found by 1st, 2nd, and 3rd KOREAMET. *Journal of the Geological Society of Korea*, 45(6), 593-605 (in Korean with English abstract).
- Clarke, R.S. and Scott, E.R.D., 1980, Tetraenaite-ordered Fe-Ni, a new mineral in meteorites. *American Mineralogist*, 65, 624-630.
- Dalrymple, G.B., 1991, *The Age of the Earth*, Stanford University Press, California, 474 pp.
- Evensen, N.M., Carter, S.R., Hamilton, P.J., O'Nions, R.K. and Ridley, W.I., 1979, A combined chemical-petrological study of separated chondrules from the Richardton meteorite. *Earth and Planetary Science Letters*, 12, 223-236.
- Gattacceca, J., Rochette, P., Lagroix, F., Mathe, P.E. and Zanda, B., 2011, Low temperature magnetic transition of

- chromite in ordinary chondrites. *Geophysical Research Letters*, 38, L10203, doi: 10.1029/2011GL047173.
- Göpel, C., Manhès, G. and Allègre, C.J., 1994, U-Pb systematics of phosphates from equilibrated ordinary chondrites. *Earth and Planetary Science Letters*, 121, 153-171.
- Han, J.M. and Choi, B.G., 2009, Metamorphic temperatures of equilibrated Ordinary Chondrites recovered by the 1st and 2nd Korea Expedition for Antarctic meteorites. *Journal of the Geological Society of Korea*, 45(2), 157-171 (in Korean with English abstract).
- Hutchison, R., 2004, *Meteorites: A petrologic, chemical, and isotopic synthesis*, Cambridge University Press, Cambridge. pp. 506.
- Jacobsen, S.B. and Wasserburg, G.J., 1981, Sm-Nd isotopic evolution of chondrites and achondrites. *Earth and Planetary Science Letters*, 67, 137-150.
- Klein, T., Touboul, M., Bourdon, B., Nimmo, F., Mezger, K., Palme, H., Jacobsen, S.B., Yin, Q.-Z. and Halliday, A.N., 2009, Hf-W chronology of the accretion and early evolution of asteroids and terrestrial planets. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73, 5150-5188.
- Kneller, E.F. and Luborsky, F.E., 1963, Particle size dependence of coercivity and remanence of single-domain particles. *Journal of Applied Physics*, 34, 656-658.
- Krot, A.N., Keil, K., Goodrich, C.A., Scott, E.R.D. and Weisberg, M.K., 2004, Classification of Meteorites, In *Treatise on Geochemistry*, Vol. 1: Meteorites, Comets, and Planets ed. By Davis, A.M., pp. 83-128. Elsevier, Oxford.
- Lee, D.-C. and Halliday, A.N., 1991, Hf-W isotopic evidence for rapid accretion and differentiation in the early solar system. *Science*, 274, 1876-1879.
- Lee, S.G., Kim, K.H. and Choi, B.G., 2004, Abundance of rare element in Duwon meteorite and its geochemical significance. *Journal of Petrological Society of Korea*, 13(4), 238-243 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.R., Choi, B.G. and Lee, J.I., 2009, The current status of planetary geology researchers in Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 45(6), 591-592 (in Korean with English abstract).
- Manhès, G., Minster, J.F. and Allègre, C.J., 1978, Comparative uranium-thorium-lead and rubidium-strontium study of the Saint Séverin amphoterite: consequences for early solar system chronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 39, 14-24.
- 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(8), 677-680.
- Min, K., Reiners, P.W. and Shuster, D.L., 2013, (U-Th)/He ages of phosphates from St. Séverin LL6 chondrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 100, 282-296.
- Nagata, T., 1979, Meteorite magnetism and the early Solar System magnetic field. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 20, 324-341.
- Nagata, T. and Funaki, M., 1982, Magnetic properties of tetrataenite-rich stony meteorites. In: *Proceedings of the Seventh Symposium on Antarctic Meteorites*. *Memoirs of National Institute of Polar Research*, 25, 222-250.
- Néel, L., Pauleve, J., Pauthenet, R., Laugier, J. and Dautreppe, D., 1964, Magnetic properties of an iron-nickel single crystal ordered by neutron bombardment. *Journal of Applied Physics*, 35, 873-876.
- Pauleve, J., Dautreppe, D., Laugier, J. and Néel, L., 1962, Etablissement d'une structure ordonnée FeNi par irradiation aux neutrons. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, 254, 365-368.
- Rochette, P., Lorand, J.-P., Fillion, G. and Sautter, V., 2001, Pyrrhotite and the remanent magnetization on SNC meteorites: a changing perspective on Martian magnetism. *Earth and Planetary Science Letters*, 190, 1-12.
- Rochette, P., Weiss, B.P. and Gattacceca, J., 2009, Magnetism of extraterrestrial materials. *Elements*, 5, 223-228.
- Sugiura, N., 1977, Magnetic properties and remanent magnetization of stony meteorites. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 29, 519-539.
- Tarduno, J.A., Cottrell, R.D. and Smirnov, A.V., 2006, The paleomagnetism of single silicate crystals: Recording geomagnetic field strength during mixed polarity intervals, superchrons, and inner core growth. *Reviews of Geophysics*, 44(1), RG1002, doi:10.1029/2005RG000189.
- Tarduno, J.A., Cottrell, R.D., Nimmo, F., Hopkins, J., Voronov, J., Erickson, A., Blackman, E., Scott, E.R.D. and McKinley, R., 2012, Evidence for a dynamo in the main group Pallasite parent body. *Science*, 338, 939-942.
- Valley, J.W., Cavosie, A.J., Ushikubo, T., Reinhard, D.A., Lawrence, D.F., Larson, D.J., Clifton, P.H., Kelly, T.F., Wilde, S.A., Moser, D.E. and Spicuzza, M.J., 2014, Hadean age for a post-magma-ocean zircon confirmed by atom-probe tomography. *Nature Geoscience*, doi:10.1038/ngeo2075.
- Wasilewski, P., 1988, A new class of natural magnetic materials: the ordering alloys. *Geophysical Research Letters*, 15, 534-537.
- Weiss, B.P., Berdahl, S., Elkins-Tanton, L.T., Stanley, S.,

- Lima, E.A. and Carporzen, L., 2008, Magnetism on the angrite parent body and the early differentiation of planetesimals. *Science*, 322, 713-716.
- Weiss, B.P., Gattacceca, J., Stanley, S., Rochette, P. and Christensen, U.R., 2010, Paleomagnetic records of meteorites and early planetesimal differentiation. *Space Science Review*, 152, 341-390.
- Weiss, B.P., Kirschvink, J.L., Baudenbacher, F.J., Vali, H., Peters, N.T., MacDonald, F.A. and Wiksw, J.P., 2000, A low temperature transfer of ALH84001 from Mars to Earth. *Science*, 290, 791-795.
- Weiss, B.P., Vali, H., Baudenbacher, F.J., Kirschvink, J.L., Stewart, S.T. and Shuster, D.L., 2002, Records of an ancient Martian magnetic field in ALH84001. *Earth and Planetary Science Letters*, 200, 449-463.
- 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 Earth 4.4 Gyr ago. *Nature*, 409, 175-178.
- Yu, Y. and Gee, J.S., 2005, Spinel in Martian meteorite SaU 008: Implications for Martian magnetism. *Earth and Planetary Science Letters*, 232, 287-294.
- Yu, Y., Doh, S.-J., Kim, W. and Min, K., 2009, Ancient stable magnetism of the Richardton H5 chondrite. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 177, 12-18.
- Yu, Y., Doh, S.-J., Kim, W. and Min, K., 2011, Origin of stable remanent magnetization in LL6 Chondrite, St. Séverin. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 187, 292-300.

투 고 일 : 2014년 3월 5일
 심 사 일 : 2014년 3월 7일
 심사완료일 : 2014년 4월 30일