

## 화성 암권의 진화해석을 위한 예비연구: 3가철 산화물의 자화특성

### Magnetism of Ferric Iron Oxide and Its Significance in Martian Lithosphere

정 두 희(Doohee Jeong) · 유 용 재(Yongjae Yu)\*

충남대학교 지질환경과학과  
(Department of Geology and Earth Environmental Sciences, Chungnam National University,  
Daejeon 305-764, Korea)

**요약** : 화성의 암권 진화 연구에서 최근 각광받는 광물은 적철석으로 대표되는 3가철 산화물이다. 물리적 방법의 하나인 잔류자화기억도 실험은 비파괴적이고, 지구 기원이 아닌 고체 시료의 자화특성 규명에 유용하게 사용된다. 금번 연구에서는 알루미늄 농도를 조절하며 열수반응과 탈수반응을 통해 총 8개 성분의 3가철 산화물을 합성하였다. 이들 시료에 대해 잔류자화기억도와 자화상실온도( $T_N$ )를 측정하였다. 3가철 산화물의 격자상수는 알루미늄의 3가철 함량이 증가하며 감소한다. 3가철 산화물의 자화상실 온도 역시 알루미늄의 몰농도가 증가하며 감소한다. 알루미늄이 거의 첨가되지 않은 적철석의  $T_N$ 은 광물의 합성방법과 무관하게 대략 690°C로 수렴한다. 탈수반응으로 합성된 3가철 산화물의 잔류자화기억도는 알루미늄의 함량에 거의 무관하게 매우 높지만, 열수반응으로 합성된 3가철 산화물의 잔류자화기억도는 알루미늄 함량이 증가하며 동반 상승한다. 상대적으로 쉽고 측정이 간단하며 비파괴적인 잔류자화기억도를 이용하면 추후 암석 내 3가철 산화물 입자의 성인 유추가 가능하며, 특히 화성의 암권 진화 규명에도 일조하리라 예상된다.

**주요어** : 3가철 산화물, 적철석, 화성, 잔류자화기억도, 모린변환온도

**ABSTRACT** : Martian satellite missions indicate that Martian equatorial plains are covered by ferric iron oxide. As a non-destructive technique, low-temperature treatment of remanent magnetization is effective in identifying magnetic minerals in rocks. In the present study, four sets of ferric iron oxides were prepared by aqueous alteration of ferrihydrite at warm conditions and four others by dehydration of goethite. As the amount of aluminous trivalent cations increases, crystallographic lattice parameters and Néel temperatures decrease. Such declines originate from lattice distortion as the smaller aluminous trivalent cations substitute the larger ferric irons. Whilst high remanence memory was observed for aqueously produced ferric iron oxide, low remanence memory was observed for dehydrated ferric iron oxide. In the future, magnetic remanence memory would be powerful in diagnosing the origin of ferric iron oxide.

**Key words** : Ferric iron oxide, hematite, mars, remanence memory, morin transition

\*교신저자: yongjaeyu@cnu.ac.kr

## 서 론

3가철 산화물로 알려진 적철석( $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ )은 지구의 지표에서 2가철 산화물인 자철석( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) 다음으로 중요한 자성광물이다. 지구의 지표에서 적철석은 유산소 환경의 퇴적물이나 토양에 다량으로 분포하며 일반적으로 온난습윤한 생성 환경을 지시한다(Walker, 1967; Christensen *et al.*, 2001). 특히 적철석이 다량으로 함유된 퇴적물이나 퇴적암은 붉은색을 띠기 때문에 적색층(red beds)이라 명명된다. 지구의 암권에서 적색층은 산화작용의 결과물로 해석되며, 적색층을 대변하는 적철석은 고환경 연구에서 중요한 지시광물로 활용되고 있다.

최근 연속적인 화성(火星, Mars) 우주선 탐사에 의해 적철석의 존재가 화성의 암권 특성을 밝히는데 매우 중요한 역할을 하는 것으로 인식되고 있다. 미항공우주국이 1996년 11월 7일 발사한 화성 궤도위성(Mars Global Surveyor, MGS)은 총 6기의 부대 장비를 탑재하였는데, 이 가운데 열방출분광계(熱放出分光計, thermal emission spectrometer, TES)와 3차원벡터자력계(three-dimensional vector magnetometer)가 지질학적으로 매우 의미있는 자료를 양산하였다. 우선 3차원벡터자력계 자료는 지구 궤도위성이 지구 궤도에서 측정한 자료보다 자력이상 최대치를 기준으로 무려 15배에 달하는 강력한 화성지표자기장을 감지하였다. 현재 화성은 지구와 같이 내부 기원의 자기장이 부재하므로, 화성의 자력이상은 전적으로 과거의 암석이 기록하는 화성지표잔류자화에 의해 형성된다. 이는 화성의 암권이 지구의 암권보다 두껍고 차가우며, 암권을 구성하는 암석의 평균 자성광물 함량이 지구의 중앙해령현무암(mid-ocean ridge basalt)보다 높은 것으로 일차적으로 해석되었다(Purucker *et al.*, 2000; Schubert *et al.*, 2000). 그러나 지구의 중앙해령현무암보다 자성광물 함량이 높은 화성의 퇴적암 존재가 현실적으로 불가능하고, 강한 화성의 지표자화가 지구 암권 수준의 적철석 함량으로도 설명될 수 있다는 과학적 진보를 유도하였다(Dunlop and Kletetschka, 2001; Kletetschka *et al.*, 2004). 실제로 다자기구역에 해당하는 적철석은 작은 포화자화로 인해 적도를 기준으로 지구지표자기장의 1/3 수준인 10  $\mu\text{T}$  정도의 외부자기장에서도 포화잔류자화에 도달한다(Dunlop and Kletetschka, 2001). 결국 화성의 암권에서 풍부한 적철석의 존재만 증명된다면, 화성의 자력이상은 쉽게 설명될 수 있다.

MGS가 탑재한 열방출분광계는 암석이나 토양의 열분광을 적외선 영역에서 측정하는 기구로, 측정 대상인 고체 물질의 화학성분 분석에 사용된다(<http://nssdc.gsfc.nasa.gov>). 1998년 일반에 공개된 자료에 의하면 화성의 적도 부근 평원(Sinus Meridiani) 지역에서 광범위하게 적철석이 분포한다. 이 평원은 약 450 km 길이와 180 km의 폭으로 존재하며, 고도차가 거의 없는 평탄한 지형을 이룬다. 이러한 발견의 추가 연구 차원에서 2001년 4월 7일에 발사된 화성궤도위성 Mars Odyssey는 총 3기의 부대 장비를 탑재하였는데 이중 한기가 TES를 발전시킨 thermal emission imaging system (THEMIS)이다. THEMIS를 이용하여 보다 정밀한 화성 표면의 고체성분 자료가 제공되었으며, 특히 Sinus Meridiani 지역에 대한 고해상도 적철석 분포도가 완성되었다(Christensen *et al.*, 2005). 또한 2003년 7월 7일 발사되어 2004년 1월 25일에 도착한 화성지표탐사체 Mar Exploration Rover B - Opportunity는 지표에 바니시(varnish) 형태로 노출된 암체와 구형의 소구체(spherule) 사진 촬영에 성공하였고, 이들 자료는 적철석이 함유된 퇴적암으로 해석되고 있다.

현재 단계에서 화성의 암권진화를 해석하는데 가장 중요한 부분은 적철석의 기원에 관한 부분이다. 현재까지 정설로 인정되고 있는 최선의 가설은 퇴적암내에 포함된 자성광물들의 산화에 의한 수성기원 적철석 생성설이다. 이러한 수성기원 적철석을 완벽히 검증하기 위해서는 화성의 실제 암석을 회수하여 지구로 귀환하는 작업이 요구되나, 이런 임무는 현재의 기술로 불가능하며 가까운 미래에나 가능한 이상적인 기대이다. 반면 화성 암권진화 규명의 예비 연구 차원에서 성인이 다른 적철석을 분석하여 암석자기학적 특성을 대비한다면 향후 화성 지표에 존재하는 적철석의 성인을 해석하는데 일조하리라 예상된다.

## 적철석

적철석( $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ )은 육방정계에 속하며 자철석보다 산화환경에서 생성된다. 특히 자연 상의 적철석은 아래와 같이 두 가지 경로를 통해 형성된다. 첫 번째 반응은 페리하이드라이트(ferrihydrite)의 열수변환(hydrothermal transformation)에 의해 적철석과 페록시하이트(feroxyhite,  $\delta\text{FeOOH}$ )가 형성되는 경우이다(Spencer and Percival, 1952). 다

시 말해 철이온이 풍부한 유체의 퇴적이 가능한 지질조건에 놓이거나 열수변환이 가능한 유체가 존재하는 환경에서 적철석의 형성이 가능하다( $2(\text{Fe}^{3+})_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} \rightarrow \alpha\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2(\delta\text{FeOOH})$ ). 열수변환으로 형성되는 적철석 결정은 열수 변환에 필요한 액체 상태의 물이 지표 근처에 존재함을 암시하여, 행성의 암권 진화 및 지표 온도 변화를 결정하는데 있어 중요한 의의를 지닌다.

자연에서 적철석이 형성되는 두 번째 방법은 침철석(針鐵石, goethite,  $\alpha\text{FeOOH}$ )의 탈수반응이다 (de Boer *et al.*, 2001) ( $2(\alpha\text{FeOOH}) \rightarrow \alpha\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$ ). 실제 지구의 지표에서, 퇴적물과 토양에 가장 흔하게 분포하는 산화물이 다름 아닌 침철석이다. 침철석을 함유한 암석이나 토양이 건조한 사막 환경에 장기간 노출되거나 화성암류에 의해 접촉변성을 받으면 탈수 현상이 발생하여 적철석이 형성된다(Diakonov *et al.*, 1994).

강자성(ferromagnetism) 광물의 자화 획득과 자화 상실은 1903년 노벨물리학상을 수상한 Pierre Curie에 의해 정립되었다. 반면 반강자성(antiferromagnetism) 광물의 자화 획득과 자화 상실은 1970년 노벨물리학상을 수상한 Louis Néel에 의해 규명되었다. 이후 강자성 광물과 반강자성 광물의 자화 상실 온도는 각각 큐리온도(Curie temperature,  $T_C$ )와 넬온도(Néel temperature,  $T_N$ )로 구별하여 사용한다. 적철석은 반강자성 광물로  $T_N$ 이 사용되며,  $T_N = 675 \sim 680^\circ\text{C}$ 이 실험적으로 제시되었다(Dunlop, 1971). 적철석은 모린변환온도( $T_M$ : Morin transition temperature)인 260 K를 기준으로 자화획득의 결정축이 변화한다(Muench *et al.*, 1985). 모린변환온도 이상에서는 자화가 c-축에 수직인 면상에 형성되지만, 모린변환온도 이하에서는 자화가 c-축에 평행해진다(Liebermann and Banerjee, 1971). 모린변환온도는 입자의 크기가 100 nm 이하이거나(Bando *et al.*, 1965), 철 이외의 양전자 함유량이 ~15%를 초과하면 나타나지 않는다(Özdemir *et al.*, 2008).

### 3가철 산화물 합성

자연 상의 적철석 형성과 동일한 반응식이 구현되는 실험 환경을 조성하여 적철석을 합성하였다. 우선 열수반응을 유발하기 위하여 0.4몰의 철-알루미늄질산과 1몰의 염화수산을 수소이온농도 9에서 침전시킨다. 침철석의 형성을 방지하기 위해 0.0008

몰의 L-주석산염을 추가하고, 페리하이드라이트를 분산시킨다. 이후 시료를 21일간  $95^\circ\text{C}$ 에서 보관한다. 합성된 열수반응 3가철 산화물 4종류는  $\text{Hem}_0^{\text{열수}}$ ,  $\text{Hem}_2^{\text{열수}}$ ,  $\text{Hem}_5^{\text{열수}}$ ,  $\text{Hem}_9^{\text{열수}}$ 이며, 위치자와 아래침자는 각기 반응방법과 실험에 사용된 철-알루미늄질산의 알루미늄 몰농도를 나타낸다.

탈수 반응 실험을 위해서는 우선  $60^\circ\text{C}$ 에서 0.6몰의 철-알루미늄질산과 5몰의 염화수산을 섞어 침철석을 형성한다. 침철석이 형성되면 무자성 오븐을 사용하여  $800^\circ\text{C}$ 의 고온에서 4시간 가열하여 탈수반응 적철석을 형성한다. 합성된 탈수반응 3가철 산화물 4종류는  $\text{Hem}_0^{\text{탈수}}$ ,  $\text{Hem}_2^{\text{탈수}}$ ,  $\text{Hem}_5^{\text{탈수}}$ ,  $\text{Hem}_9^{\text{탈수}}$ 이며, 위치자와 아래침자는 각기 반응방법과 실험에 사용된 철-알루미늄질산의 알루미늄 몰농도를 나타낸다.

원심분리기를 사용하여 적철석으로부터 침전된 염화나트륨과 상청액을 제거하고, 전기전도도가 0.01 dS/m 이하로 내려가는 시점까지 탈이온수에 여과 시키기를 반복한다. 최종적으로 모든 시료는  $60^\circ\text{C}$ 에서 재건조시킨다. 합성된 시료를 용해시킨 후 원자흡수분광법을 적용하여 정확한 알루미늄 몰농도를 결정하였다. 모든 합성 시료에 대해 Siemens사의 D5000을 이용하여 x선 회절분석을 수행하였고 기기작동 컴퓨터에 내재된 사용 프로그램에서 기준 자료와의 최소오차근사법을 적용하여 광물의 격자상수를 결정하였다. 입자크기 결정을 위해 JEOL사의 JEM2010을 이용하여 투사전자현미경 분석을 수행하였다. 아쉽게도 x선 회절분석과 투사전자현미경 분석 자료는 국외학술지와 저작권문제 예방 차원에서 금번 논문에서 배제하였다.

### 실 험

두 가지 기본적인 자화특성 규명 실험이 수행되었다. 첫째, AGICO사가 제작한 KLY-3을 이용하여  $T_N$ 을 결정하였다. 실온부터  $700^\circ\text{C}$ 까지 온도를 증가시키며 대자율 변화를 측정 한 후, 다시 실온까지 냉각시키며 대자율 변화를 측정하였다.

측정된 대자율 자료의 역수 증감률을 이용해  $T_N$ 을 결정하였다(Petrovsky and Kapicka, 2006).

포화등온잔류자화(saturation isothermal remanent magnetization, SIRM)는 연구 대상 시료를 지구평균자기장의 10,000배를 상회하는 1 T 이상의 강한 유도자기장에 짧은 시간동안 노출시킨 후 획득된 잔류자화이다. SIRM은 외부 자기장에 평행한 방

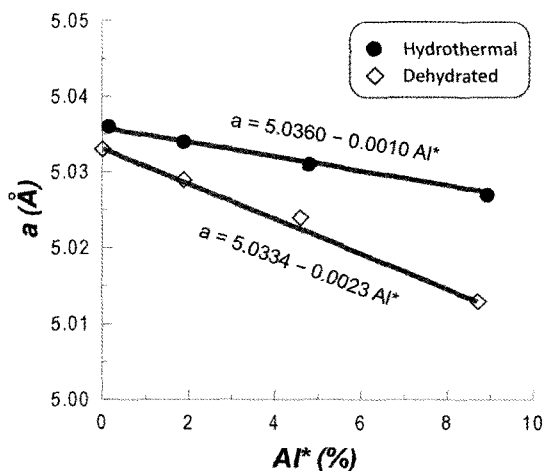


Fig. 1. Variation of lattice constant  $a$  as a function of  $Al^*$ .  $Al^*$  is a molar aluminium content with respect to the entire trivalent cations.

향으로 시료 내의 자성광물을 최대한 배열시킬 수 있는 정도를 나타내며, 시료 내의 자성광물 함량에 비례한다. 포화등온잔류자화를(SIRM) 획득하기 위해 impulse magnetizer를 사용하여 시료를 2.5 T의 강력한 외부자기장에 노출하였다. 이후 밀봉한 시료를 액체질소에 5 min간 노출시킨 후, 자기차폐 환경에서 가열하여 실온에 도달한 후 잔류자화를 측정하였다. 이런 일련의 과정은 흔히 저온소자법(low-temperature demagnetization)으로 통용되며, 자성광물을 함유한 암석의 소자에 널리 사용된다. 저온소자이후( $M_{LTM}$ )와 이전( $M_0$ )의 비율을 잔류자화기억도(remanence memory)라 정의한다.

실험 결과의 신뢰도를 높이기 위해 합성 당시에 사용한 Al 몰농도 자료가 아닌 실제 합성 광물에서 재측정한 실측 Al 몰농도를 사용하였다. 이를 위해 합성된 분말을 염산에 섞은 후 원자흡수분광계(atomic absorption spectrometry)를 이용하여 Al 몰농도를 결정하였다. 예를 들면 합성을 위해 사용한 5%의 알루미늄질산 몰농도가 실제 합성 후에는 4.8%로 측정되었다.

## 결과 및 토의

3가철 산화물의 격자상수  $a$  (그림 1)와  $c$  (그림 2) 모두 알루미늄의 몰농도가 증가하며 감소한다. 이런 감소추세는  $Al^{3+}$ 의 크기가 0.53 Å로 0.65 Å인  $Fe^{3+}$ 보다 근본적으로 작기 때문이다. 열수반응

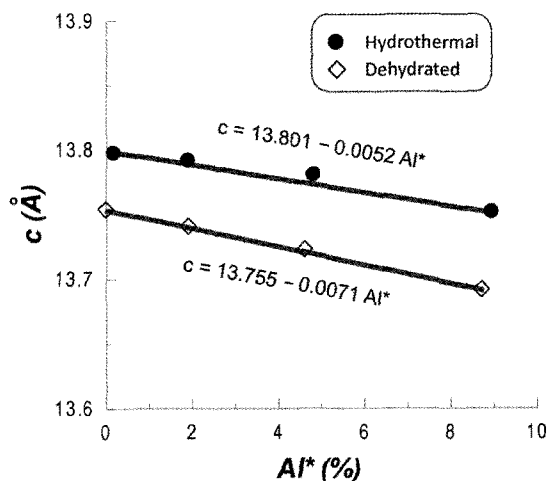


Fig. 2. Variation of lattice constant  $c$  as a function of  $Al^*$ .  $Al^*$  is a molar aluminium content with respect to the entire trivalent cations.

보다 탈수반응 시료에서 알루미늄의 몰농도 증가 대비 격자상수의 감소양이 크게 관찰되는데, 이는 탈수반응이 열수반응에 비해 이온 치환이 보다 효과적이며 격자규모에서 정돈된 형태로 발생함을 암시한다(그림 1, 2). 향후 상술한 경향성의 일반화를 위해 알루미늄의 몰농도 대비 격자상수 변화를 추가적으로 다양한 성분 변화에 대해 심층적으로 탐구할 필요가 있다(그림 1, 2).

$T_N$  역시 알루미늄의 몰농도가 증가하며 감소한다(그림 3). 이는 자화를 유발하는 3가철이 비자성 원소인  $Al^{3+}$ 로 대체되며 나타나는 당연한 결과로, 비자성광물인  $Al_2O_3$ 의 함량이 증가한다고 해석하여도 무방하다. 다만  $T_N$ 을 감소시키는 근본적인 원인인 격자결함(lattice defect)의 증가가 왜 열수반응에서 더 효과적인지는 향후 보강 실험이 필요한 부분이다. 알루미늄이 거의 첨가되지 않은 적철석의  $T_N$ 은 열수반응과 탈수반응에 상관없이 대략 690°C로 수렴하는데(그림 3), 일반적으로 통용되는 적철석의  $T_N$ 인 675~680°C를 10°C 정도 상회한다. 이는 기존에 보고된 적철석의  $T_N$ 값이 저평가 되었거나, 20세기에 통용되던 곡률분석에 의존한 자료 처리상의 오차로 의심된다. 실제 1970~1980년대  $T_N$ 값 결정에 사용된 적철석은 모두 고체 자철석으로부터 변환된 산화물임을 감안하면, 이전의  $T_N$ 값이 자철석이나 산화철석( $\gamma-Fe_2O_3$ )의 기여에 의해 약간 낮게 제시되었을 수도 있다.

탈수반응으로 제작된 시료는 잔류자화기억도가

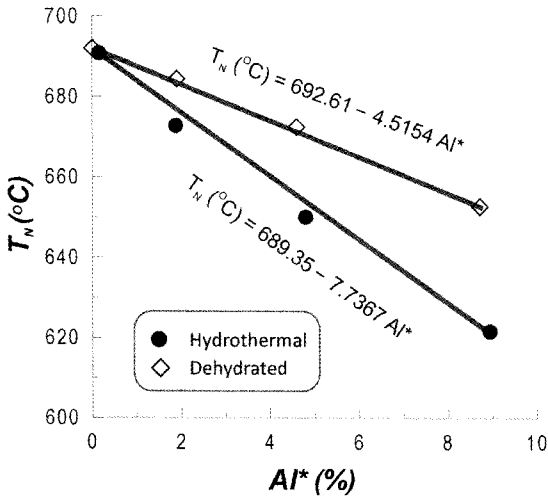


Fig. 3. Néel temperatures decrease as the amount of Al increases.

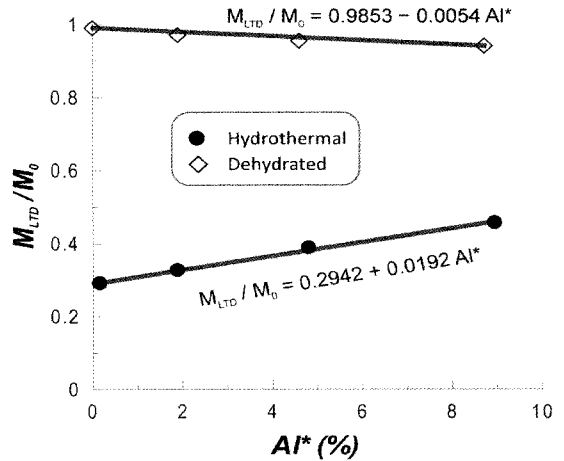


Fig. 4. Ratio of remanent magnetization with/without low-temperature demagnetization (LTD). Huge contrast in the ratio of  $M_{LTD}/M_0$  indicates that the LTD can diagnose the origin of ferric iron oxide.

알루미늄의 함량에 거의 영향을 받지 않고 95% 이상으로 매우 높게 나타난다(그림 4). 반면 열수반응으로 제작된 시료의 잔류자화기억도는 알루미늄 함량이 증가하며 동반 상승한다(그림 4). 이런 단순한 경향성 비교만으로도 암석 내 3가철 산화물 입자의 성인 유추가 가능하리라 예상된다. 특히 탈수반응으로 제작된 시료는 일차 형성물인 침철석의 특성상 입자의 길이/폭 비율이 큰 신장형(acicular) 적철석이 단자기구역(single-domain)으로 반응하여 높은 잔류자화기억도가 나타난다고 여겨진다. 반면 열수반응으로 제작된 시료는 모광물인 페리하이드라이트에서 침전되므로 편원형(oblate)으로 다자기구역(multidomain)처럼 반응하고 외부의 작은 조건(온도, 압력, 외부자기장의 크기 및 방향)에도 자화의 벡터 정보가 쉽게 변하게 된다.

정확한  $T_N$  결정이 국내의 장비로 측정하기 어려운 반면 잔류자화기억도는 매우 간단하게 수행 가능한 실험이다. 열수반응과 탈수반응에 의해 합성된 3가철 산화물의 잔류자화기억도는 비율과 알루미늄대비 변화경향성에서 상당한 차이를 보이는데, 이는 장래에 암석 내 3가철 산화물 입자의 성인 유추에 사용되리라 기대한다. 금번 예비연구는 향후 보다 광범위한 알루미늄 치환 범위까지 연구가 확대될 필요가 있고, 추가적인 자화 안정도 검사가 요구된다. 또한 현재까지 지구에서 회수된 화성의 운석 24점에서 자철석(Weiss *et al.*, 2000, 2002; Anretter *et al.*, 2003), 황철석(Rochette *et al.*, 2001),

크롬철석(Yu and Gee, 2005) 이외 적철석이 자성 광물로 존재하는 경우가 검증된 적이 없는 약점도 극복해야 한다.

## 결론

다가오는 우주 개발 시대의 화성 암권진화 규명의 예비 연구 차원에서 성인이 다른 3가철 산화물에 대한 암석자기학적 특성 규명을 시도하였다. 이를 위해 알루미늄 농도를 조절하며 열수반응 처리로 4종류 탈수반응 처리로 4종류의 3가철 산화물을 각각 합성하였다. 3가철 산화물의 격자상수는 알루미늄의 3가철 치환율이 증가하며 감소한다. 3가철 산화물의 자화상실 온도 역시 3가철 산화물 내 알루미늄의 몰농도가 증가하며 감소한다. 알루미늄이 거의 첨가되지 않은 적철석의  $T_N$ 은 광물의 합성 방법과 무관하게 대략 690°C로 측정된다. 탈수반응으로 합성된 3가철 산화물의 잔류자화기억도는 알루미늄의 함량에 거의 영향을 받지 않는다. 반면 열수반응으로 합성된 3가철 산화물의 잔류자화기억도는 알루미늄 함량이 증가하며 동반 상승한다. 잔류자화기억도를 이용하면 추후 암석 내 3가철 산화물 입자의 성인 유추가 가능하리라 예상된다.

## 사 사

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2010-0020956). 창의적인 제안을 해주신 박용희 교수님, 김원년 박사님, 그리고 정기영 편집위원장님께 감사의 말씀을 드립니다.

## 참고문헌

- 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.
- Bando, Y., Kiyama, M., Yamamoto, N., Takada, T., Shinjo, T., and Takaki, H. (1965) Magnetic properties of  $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$  fine particles. *Journal of Physical Society of Japan*, 20, 2086.
- Christensen, P.R., Morris, R.V., Lane, M.D., Bandfield, J.L., and Malin, M.C. (2001) Global mapping of Martian hematite mineral deposits: Remnants of water-driven processes on early Mars. *Journal of Geophysical Research*, 106(E10), 23,873-23,885, doi:10.1029/2000JE001415.
- Christensen, P., McSween Jr, H.Y., Bandfield, J.L., Ruff, S.W., Rogers, A.D., Hamilton, V.E., Gorelick, N., Wyatt, M.B., Jakosky, B.M., Kieffer, H.H., Malin, M.C., and Moersch, J.E. (2005) Evidence for magmatic evolution and diversity on Mars from infrared observations. *Nature*, 436, 504-509.
- de Boer, C.B., Dekkers, M.J., and van Hoof, T.A.M. (2001) Rock-magnetic properties of TRM carrying baked and molten rocks straddling burnt coal seams. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 126, 93-108.
- Diakonov, I., Khodakovskiy, I., Schott, J., and Sergeeva, E. (1994) Thermodynamic properties of iron oxides and hydroxides. I. Surface and bulk thermodynamic properties of goethite ( $\alpha\text{FeOOH}$ ) up to 500 K. *European Journal of Mineralogy*, 6, 967-983.
- Dunlop, D.J. (1971) Magnetic properties of fine-particle hematite. *Annals de Géophysique*, 27, 269-293.
- Dunlop, D.J. and Kletetschka, G. (2001) Multidomain hematite: A source of planetary magnetic anomalies? *Geophysical Research Letters*, 28, 3345-3348.
- Kletetschka, G., Acuna, M.H., Kohout, T., Wasilewski, P.J., and Connerney, J.E.P. (2004) An empirical scaling law for acquisition of thermoremanent magnetization. *Earth and Planetary Science Letters*, 226, 521-528.
- Liebermann, R.C. and Banerjee, S.K. (1971) Magnetoelastic interactions in hematite: Implications for geophysics. *Journal of Geophysical Research*, 76, 2735-2756.
- Muench, G.J., Aarås, S., and Matijevic, E. (1985) The Morin transition in small  $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$  particles. *Physica Status Solidi A*, 92, 187-192.
- Özdemir, Ö., Dunlop, D.J., and Berquó, T.S. (2008) Morin transition in hematite: Size dependence and thermal hysteresis. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 9, Q10Z01, doi: 10.1029/2008GC002110.
- Petrovsky, E. and Kapicka, A. (2006) On determination of the Curie point from thermomagnetic curves. *Journal of Geophysical Research*, 111, B12S27, doi:10.1029/2006JB004507.
- Purucker, M., Ravat, D.T., Frey, H.V., Voorhies, C.V., Sabaka, T., and Acuna, M.H. (2000) An altitude-normalized magnetic map of Mars and its interpretation. *Geophysical Research Letters*, 27, 2449-2452.
- 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.
- Schubert, G., Russell, C.T., and Moore, W.B. (2000) Timing of the Martian dynamo. *Nature*, 408, 666-667.
- Spencer, E. and Percival, F.G. (1952) The structure and origin of the banded hematite jaspers of Singhbhum, India. *Economic Geology*, 47, 365-383.
- Walker, T.R. (1967) Formation of red beds in modern and ancient deserts. *Geological Society of America Bulletin*, 78, 353-368.
- Weiss, B.P., Kirschvink, J.L., Baudenbacher, F.J., Vali, H., Peters, N.T., MacDonald, F.A., and Wikswa, 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.
- 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.

접수일(2011년 8월 23일), 수정일(1차 : 2011년 9월 9일),  
게재확정일(2011년 9월 22일)