

화성기원 운석에서 분리된 크롬철티탄함유스피넬의 자화 특성

하래경 · 유용재[‡]

충남대학교 지질환경과학과

요 약

SNC (Shergotty, Nakhla, Chassigny)라 통칭되는 화성기원의 운석은 지구와 다른 환경에서 진화한 행성체를 이해하는데 견인차 역할을 할 수 있는 매우 귀중한 암석시료이다. 화성기원 운석의 자화특성 규명을 위해 크롬철티탄함유스피넬을 함유하는 8개의 운석조각암편과 4개의 분리광물시편을 사용하였다. 화성기원의 운석암편과 분리된 광물시편을 대상으로 자연잔류자화와 포화잔류자화를 측정하였다. 실온포화잔류자화기억도는 대략 94% 정도이다. 300 K 부터 150 K 구간에서 실온포화잔류자화는 약 2% 증가추세를 보이다가, 이후 150 K 부터 10 K 구간에서 1% 정도 감소한다. 그러나 10 K 냉각 이후 가열과정에서 실온포화잔류자화는 꾸준히 감소하는 경향이 나타난다. 특정 온도구간에서 실온포화잔류자화의 급격한 등락이 감지되지 않는다. 이는 특정 온도구간에서 실온포화잔류자화가 급변하는 자철석, 적철석, 티탄자철석, 자황철석과는 확연히 구분되는 크롬철티탄함유스피넬의 고유 특성이라 판단된다.

주요어: 스피넬, 화성, 화성기원운석(SNC), 자화특성, 저온

Rae-gyung Ha and Yongjae Yu, 2015, Magnetism of (Cr,Fe,Ti)-rich Spinel from the Martian Meteorites. *Journal of the Geological Society of Korea*. v. 51, no. 3, p. 273-280

ABSTRACT: At present, SNC (Shergotty, Nakhla, Chassigny) meteorites are the only available material from Mars. Natural remanent magnetization and room-temperature saturation isothermal remanent magnetization (RT-SIRM) were determined for 8 meteoric chips and 4 mineral extracts. In addition, temperature dependence of RT-SIRM at < 300 K and analysis of magnetic hysteresis were carried out to characterize magnetic properties of (Cr,Fe,Ti)-rich spinels. RT-SIRM cooling and warming curves are irreversible with high RT-SIRM memory of 94%. RT-SIRM increased slightly during cooling, but remanence decreased monotonically during warming. Unlike other remanence candidates such as magnetite, hematite, pyrrhotite, or titanomagnetite, (Cr,Fe,Ti)-rich spinels lack any significant remanence jumps during cooling-warming of SIRM. It can be proposed that the absence of remanence jumps during cooling-warming of SIRM might be used as a diagnosis for the presence of (Cr,Fe,Ti)-rich spinels in rocks.

Key words: Spinel, Mars, SNC, Magnetic properties, Low-temperature

(Rae-gyung Ha and Yongjae Yu, Department of Geological Sciences, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Republic of Korea)

1. 서 론

화성(火星, Mars)의 평균반지름(mean radius), 적도반지름(equatorial radius), 극지반지름(polar radius)은 각각 3390 km, 3396 km, 3376 km로 지구 평균반지름(6371 km), 적도반지름(6378 km), 극지반지름(6357 km)에 대해서 53% 수준이다. 화성의 항성자전주기(sidereal rotation period)는 24시간 37분 22

초로 지구의 자전주기와 매우 유사하다. 그리고 화성의 표면은 풍성작용(aeolian process)과 유수작용(fluvial process)의 흔적을 간직하고 있다. 게다가 비록 제한적이지만 생명체 유지에 필수불가결한 물과 이산화탄소의 존재가 밝혀지며, 화성은 인류의 미래 정착지로 주목받고 있다.

미항공우주국이 발사한 Viking 1 lander가 1976년 7월 20일 화성에 착륙하며, 인류의 화성탐사 시대

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

Table 1. Composition of oxides based on electron microscope analysis.

| wt. % | Spot 1 | Spot 2 | Spot 3 | Spot 4 | Spot 5 | Spot 6 |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| SiO ₂ | 0.67 | 0.52 | 0.72 | 0.63 | 0.61 | 0.38 |
| TiO ₂ | 18.90 | 16.39 | 17.92 | 16.25 | 20.29 | 18.14 |
| Al ₂ O ₃ | 5.07 | 4.96 | 5.40 | 5.12 | 4.92 | 7.46 |
| FeO + Fe ₂ O ₃ | 49.86 | 50.24 | 50.55 | 48.71 | 46.59 | 49.95 |
| MnO | 0.07 | 0.02 | 0.01 | 0.03 | 0.04 | 0.01 |
| MgO | 3.81 | 5.56 | 4.78 | 5.43 | 3.54 | 4.76 |
| CaO | 0.02 | 0.07 | 0.02 | 0.06 | 0.00 | 0.00 |
| Na ₂ O | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| K ₂ O | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 |
| P ₂ O ₅ | 0.56 | 0.48 | 0.46 | 0.44 | 0.00 | 0.00 |
| Cr ₂ O ₃ | 20.15 | 20.84 | 21.87 | 22.80 | 20.70 | 23.10 |
| NiO | 0.05 | 0.05 | 0.03 | 0.08 | 0.00 | 0.02 |
| Total | 99.18 | 99.13 | 101.76 | 99.56 | 96.69 | 103.82 |

가 개막되었다. 이후 성공적으로 임무를 수행한 10여개의 화성탐사선은 화성의 지형과 지표에 관한 과학적인 자료를 제공하고 있다. 예를들어 그동안 화성에서 얻어진 중력자료를 분석한 결과, 화성의 지각 대부분은 평균 40억년 전후에 형성되었고 생성이후 암권평형을 유지해온 것으로 해석된다(Rogers and Christensen, 2003; Rogers *et al.*, 2005). 화성 지각의 평균두께는 대략 90 km로 지구 대륙의 평균두께보다도 약 2.5-3배 가량 두껍다(Turcott *et al.*, 2002). 화성의 남반구는 43-40억년전에 형성된 상대적으로 두꺼운 지각을 보유하며, 현재 지표는 현무암질 암석으로 덮여있다(Zuber *et al.*, 2000). 반면 화성의 북반구는 대략 40억년전에 형성된 상대적으로 얇은 지각을 보유하며, 현재 지표는 안산암질 암석으로 덮여있다(Zuber, 2001).

화성은 고대 인류의 역사 기록에도 자주 등장하며 인류문화사에 많은 영향을 끼쳤다. 예를들어 화성은 주역(周易)에서 불의 기운을 상징하고, 로마신화의 죽음의 신에 해당하며, 점성술에서는 전쟁을 의미한다. 이런 화성에 대한 정열적인 해석은 일차적으로 육안으로 관찰되는 화성의 붉은 색채 때문이다. 화성이 우리 눈에 붉게 보이는 이유는 화성의 토양에 존재하는 직경 1-10 nm 크기의 미세함철산화물(npOx, nanophase ferric oxides) 때문이다(Ferguson *et al.*, 2006). 화성의 토양에 존재하는 npOx의 절반 정

도가 부피비를 기준으로 적철석(hematite, α -Fe₂O₃)이며, 화성의 토양은 자철석(magnetite, Fe₃O₄)과 함철산화광물(Fe-bearing oxide)도 함유한다고 해석된다. 실례로 2003년 유럽우주국이 발사한 OMEGA/Mars Express탐사체의 분석에 의하면, 화성의 지표 토양에서 적철석, 자철석, 함철산화광물의 특성을 보여주는 열방출스펙트럼(thermal emission spectrum)이 관찰되었다(Bibring *et al.*, 2005). 또한 2003년 미항공우주국이 발사한 두 개의 화성지표탐사선(Mars Exploration Rovers) Spirit과 Opportunity도 화성의 지표 토양에서 적철석, 자철석, 함철산화광물에 해당하는 열방출스펙트럼 자료를 획득하였다(http://www.nasa.gov/mission_pages/mars/main/index.html). 미항공우주국은 Mars Global Surveyor (MGS) 화성탐사선에 탑재된 3차원플럭스벡터자력계(three-dimensional flux vector magnetometer)를 이용하여, 화성지표의 자성광물 분포도를 제시하였다(Purucker *et al.*, 2000; Schubert *et al.*, 2000). 동일 고도의 자기 이상(magnetic anomalies)으로 역산하여 비교한 결과 화성 지표의 최대자화는 지구해양지각 최대자화의 15배 이상으로 계산된다(Langlais *et al.*, 2004). 그러나 화성은 지구와 달리 내부 기원의 자기장이 현존하지 않기에, 화성의 최대자화는 전적으로 과거 암권 형성 당시 생성된 화성지표잔류자화로 해석된다. 이는 화성의 암권이 지구의 암권보다 두껍고 차가

Table 2. Mass, natural remanent magnetization (NRM), and saturation isothermal remanent magnetization (SIRM) of eight bulk chips and four mineral separates.

| Chips | Bulk chips | | | Separates | Mineral separates | |
|----------------|------------|--------------------------------------|---------------------------------------|----------------|----------------------------------|---------------------------------------|
| | Mass (mg) | NRM (10^{-7} Am ² /kg) | SIRM (10^{-4} Am ² /kg) | | Mass (mg) | SIRM (10^{-2} Am ² /kg) |
| a | 2098 | 6.24 | 8.65 | A | 28.6 | 1.25 |
| b | 1943 | 5.82 | 9.89 | B | 24.8 | 1.30 |
| c | 1566 | 9.96 | 16.0 | C | 22.1 | 1.53 |
| d | 1208 | 18.5 | 16.1 | D | 20.9 | 1.49 |
| e | 1170 | 19.4 | 13.7 | m ¹ | 1.39±0.14 | |
| f | 1152 | 5.56 | 14.5 | m ² | 1.39 | |
| g | 1043 | 8.92 | 10.1 | | | |
| h | 950 | 12.7 | 14.9 | | m ¹ : arithmetic mean | |
| m ¹ | | 10.9±5.53 | 13.0±2.97 | | m ² : geometric mean | |
| m ² | | 9.75 | 12.6 | | | |

우며, 암권을 구성하는 암석의 평균 자성광물 함량이 지구의 중앙해령현무암(mid-ocean ridge basalt)보다 자화가 강한 광물로 구성되어 있음을 지시한다. 직접적인 화성탐사와는 별도로 화성의 운석이 함유하는 자성광물 분석을 통한 미시적관점의 화성암권 진화 연구도 시도되었다(Cisowski, 1986; Kirschvink *et al.*, 1997; Weiss *et al.*, 2000).

물론 화성 연구를 위해 유인우주탐사선이 가까운 장래에 사용되겠지만, 현단계에서 화성의 지표에 관한 가장 정확한 정보를 제공하는 물질은 화성 기원의 운석이다. 화성기원의 운석은 처음 발견된 화성운석 3개의 약자인 SNC(Shergotty, Nakhla, Chassigny)라 통칭되며 최근 휘석암(pyroxenite)이 추가로 분류되고 있다. SNC 내에 포함된 기포의 화학 성분이 Viking lander로부터 직접 측정된 화성 대기 성분과 일치하므로, SNC가 화성에서 유래되었다고 해석된다. 2014년을 기준으로 최근까지 총 132개의 화성기원 운석이 판별되었다. 현재까지 SNC에서 발견된 자성광물은 자철석(Weiss *et al.*, 2002; Antretter *et al.*, 2003), 티탄자철석(titanomagnetite, Fe_{3-x}Ti_xO₄; Bezaeva *et al.*, 2007), 자류철석(pyrrhotite, Fe₇S₈; Rochette *et al.*, 2001), 크롬철티탄함유스피넬(Cr-Fe-Ti-bearing spinel; Yu and Gee, 2005) 총 4종류이다. 이 가운데 크롬철티탄함유스피넬의 자화특성은 자철석, 티탄자철석, 자류철석에 비해 상대적으로

연구가 미진하다. 이에 금번 연구는 크롬철티탄함유스피넬을 함유하는 화성기원 운석의 자화특성 규명을 시도하는 예비 연구로 기획되었다. 특히 사용료가 부담되는 국외 실험기기를 이용해야만 하여, 운석이 함유하는 크롬철티탄함유스피넬의 자화 특성 측정 가능 여부를 타진함에 그 의의를 두었다.

2. 실험

금번 연구에 사용된 운석은 지구의 현무암에 해당하는 Shergottite 계열의 화성 기원 운석으로 기존의 연구에서 크롬철티탄함유스피넬을 포함하는 것으로 보고된 Sayh al Uhaymir이다(Yu and Gee, 2005). 장경을 기준으로 2-5 mm의 크기인 운석조각 암편(bulk meteorite chips) 8개와 분리광물시편(mineral extracts) 4개를 대영박물관으로부터 기증 받았다(표 1, 2). 분리광물시편을 추출하기 위해 가장 큰 두 개의 운석조각암편을 막자사발에서 파쇄하였다. 파쇄된 암편분말을 투명한 사알레에 펼쳐 놓고, 8면체 형태를 보이는 불투명 광물시편(mineral extracts)을 실체현미경 하에서 선별하였다. 선별된 광물시편 4개는 한 번의 길이가 대략 500 μm 정도인 8면체이다.

분리된 네 개의 광물시편 가운데 세 시편은 성분화인을 위해 EPMA (Electron probe micro-analyzer)

미세탐침성분분석(모델: JXA8800R)에 사용되었다(그림 1a). 각 광물시편별로 두 지점, 총 6지점에서 정량 자료가 회수되었다. 성분분석 자료회수는 1분간 배경회수(background countings)이후 각 지점별로 2분간 20 kV에서 시전되었다. Fe의 EPMA 분석치를 FeO에 대해 계산한 다음, 편의상 FeO와 Fe₂O₃의 합으로 표기하였다(표 1).

분리광물시편에 관한 자화분석은 현재 국내에 설치된 자화측정기기로는 측정이 불가하여, 미국 미네소타대학 지질지구물리학과 부설 암석자기연구소의 MPMS (Qunatum Designs MPMS2 Cryogenic Susceptometer)를 이용하였다. 참고로 분리광물시편의 자화가 측정되기 위해서는 최대자화를 기준으로 10^{-9} Am² 해상도의 자화변화 감지가 가능해야 하는데, 현재 미국, 일본, 중국의 일부 대학과 연구소에 서만 분리광물시편에 대한 고해상도 자화측정이 가능하다.

총 8개의 조각암편과 4개의 분리광물시편에 대해 우선 자연잔류자화(natural remanent magnetization, NRM)를 측정하였다. 이후 2 T의 강한 유도자기장에 시료를 노출시켜 실온포화잔류자화(room temperature-saturation isothermal remanent magnetization, RT-SIRM)를 생성시켰다. 실온포화잔류자화의 물리적 의미는 가해진 유도자기장의 방향에 평행한 방향

으로 해당 시료가 획득하는 자성의 최대치이며, 실온포화잔류자화는 시료 내의 자성광물 함량 및 광물 배열에 비례한다.

생성된 실온포화잔류자화를 300 K 부터 10 K 온도구간에서 냉각, 이후 가열하였으며, 5 K 간격으로 잔류자화의 변화를 측정하였다. 실험의 신뢰도를 향상시키기 위하여 자기차폐환경은 지표자기장 강도의 약 0.5%인 250 nT 이하로 항시 유지하였으며, 완전한 온도 증감을 위해 가열/냉각시 온도 증가/감소율은 4.5 K/min로 제어하였다.

저온자화특성을 측정할 분리광물시편에 대해 대표 온도별 자기이력곡선(magnetic hysteresis loops)을 측정하였다. 자기이력곡선은 +1.0 T 부터 -1.0 T 까지 0.01 T 간격으로 평균기회수시간(signal average time) 1초를 적용하여 측정하였다. 극저온에서 측정되는 자기이력곡선은 포화되지 않으므로, 자기이력곡선에 Kosterov (2002)가 제시한 부분보정 방법을 적용하였다. 이를 토대로 포화자화(Ms, saturation magnetization), 포화잔류자화(Mr, saturation remanent magnetization), 항자기력(Bc, magnetic coercivity)을 계산하였다. 자기이력곡선과는 별도로 포화자화 상태에서 자화를 단계적으로 소멸(back-field measurements)시키며 잔류항자기력(Bcr, magnetic remanent coercivity)을 측정하였다.

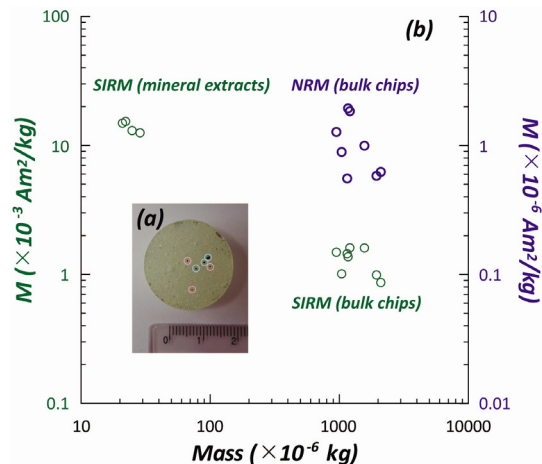


Fig. 1. (a) Individual bulk meteorite chips (blue colors) and mineral extracts (green colors). Ruler scale is in mm. (b) Natural remanent magnetization (NRM) and saturation isothermal remanent magnetization (SIRM) of bulk chips and SIRM of mineral extracts with respect to mass in milligrams.

3. 결 과

8개 조각암편(950-2098 mg)의 자연잔류자화는 $1.09 \pm 0.55 \times 10^{-6}$ Am²/kg (그림 1b, 오른쪽 축 사용)이며 실온포화잔류자화는 $1.30 \pm 0.30 \times 10^{-3}$ Am²/kg 이다(그림 1b, 왼쪽 축 사용). 분리광물시편(20.9-28.6 mg) 4개의 자연잔류자화는 기기해상도의 범위 안에서 측정불가이고, 실온포화잔류자화는 $1.39 \pm 0.14 \times 10^{-2}$ Am²/kg 이다(그림 1b, 왼쪽 축 사용). 운석조각암편의 자화는 상대적으로 비균일하여 자화값의 조각암편간 편차가 최대 4배 정도이며, 자연잔류자화를 기준으로 자화의 산술평균이 기하평균보다 약 10% 작다(표 2). 반면 분리광물시편들의 실온포화잔류자화는 상대적으로 균일하여 자화의 산술평균과 기하평균이 일치한다(표 1). 따라서 이후의 실험에서는 분리광물시편 가운데 최대중량시편 한 개를 사용하여 저온자화특성 측정을 시도하였다.

300 K 부터 150 K 까지의 실온포화잔류자화는 약 2% 증가추세를 보이다가 이후 150 K 부터 10 K 구간에서 1% 정도 감소한다(그림 2, 윗부분 기호 그림, 오른쪽 축 사용). 그러나 10 K 냉각 이후 가열과정에서 실온포화잔류자화가 꾸준히 감소하는 경향이 나타난다(그림 2, 윗부분 기호 그림, 오른쪽 축 사용).

온도 변화에 따른 자화특성을 기술하기 위하여 (그림 3) 일반적으로 사용되는 잔류자화비(=포화잔류자화/포화자화)와 항자기력비(=잔류항자기력/항자기력)의 상관관계를 Day plot (Day *et al.*, 1977)에 도시하였다(그림 4). 일반적으로 Day plot은 자철석을 잔류자화로 간직한 암석 내 자성광물의 입자크기나 미세한 자화결정방향성에 관한 정보를 지시한다 (Dunlop, 2002). 상대적으로 자화강도가 약한 크롬철티탄함유스피넬의 자화 특성을 자철석의 잔류자화비 혹은 항자기력비와 직접 비교하는 것은 무리가 있다. 그러나 실온에서 획득한 잔류자화비와 항자기력비를 기준으로 저온에서 획득한 잔류자화비와 항자기력비의 변화 양상을 추적하는 방법은 온도변화에 수반된 광물 내 자기구역(magnetic domains)의 상대적 변화 해석에 활용이 가능하다. 자철석의 경우, 단자기구역화(more single-domain-like)는 잔류자화비의 증가와 항자기력비의 감소를 의미하며, 다자기구역화(more multidomain-like)와는 반대되

는 의미이다. 초상자성화(more multidomain-like)는 단자기구역($M_r/M_s=0.50$, $B_{cr}/B_c=1.25$)과 다자기구역($M_r/M_s=0.02$, $B_{cr}/B_c=5.00$)의 극한점을 연결하는 곡선을 기준으로 상대적으로 잔류자화비와 항자기력비가 증가하는 경우이다.

4. 토 의

외계기원의 암체들이 알려주는 태양계 행성체 표면의 정보를 해독하면, 적어도 이들 행성체 표면의 일부가 크롬철티탄함유스피넬을 함유하고 있다고

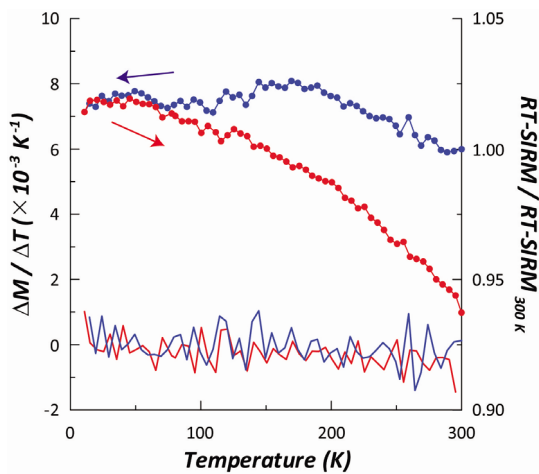


Fig. 2. Cooling-warming of room-temperature saturation isothermal remanent magnetization (RT-SIRM) of mineral extracts during zero-field cooling from 300 K to 10 K and zero-field warming back to 300 K and its derivatives. RT-SIRM was produced in a field of 2 T.

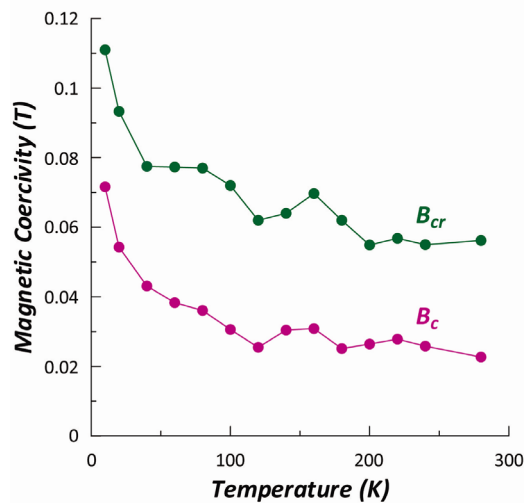
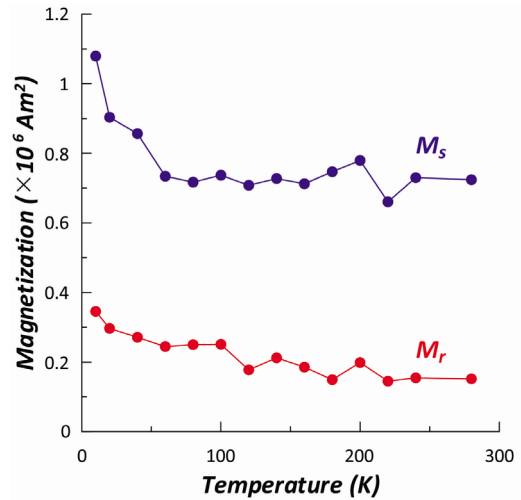


Fig. 3. Temperature dependence of saturation magnetization (M_s), saturation remaining magnetization (M_r), magnetic coercivity (B_c), and magnetic remanent coercivity (B_{cr}).

판단된다. 특히 크롬철티탄함유스피넬은 컴퓨터 하드 드라이브부터 행성탐사에 이르기까지 그 용도가 매우 다양하지만, 국내외적으로 크롬철티탄함유스피넬의 자화특성 연구는 전례를 찾아보기 힘들다. 실제 크롬철티탄함유스피넬의 6개 끝성분(end-members) 가운데 자철석을 제외한 5개 끝성분광물(chromite, FeCr_2O_4 ; hercynite, FeAl_2O_4 ; magnesiochromite, MgCr_2O_4 ; magnesioferrite, MgFe_2O_4 ; magnetite, Fe_3O_4 ; spinel, MgAl_2O_4)의 자화 특성 연구는 거의 전무한 실정이다. 체계적인 크롬철티탄함유스피넬의 자화특성 표준자료가 상대적으로 빈약한 이유는 크롬철티탄함유스피넬의 합성이 자철석, 티탄자철석, 자류철석에 비해 매우 난해하기 때문이다(Francombe, 1957; Robbins *et al.*, 1971). 이런 연유로 크롬철티탄

Table 3. Variation of saturation remanent magnetization (M_r), magnetic coercivity (B_c), and remanent magnetic coercivity (B_{cr}) with saturation magnetization (M_s).

| Magnetic properties | $\propto (M_s)^n$ |
|---|---------------------|
| Saturation remanent magnetization (M_r) | $n = 2.33 \pm 0.30$ |
| Magnetic coercivity (B_c) | $n = 2.90 \pm 0.20$ |
| Remanent magnetic coercivity (B_{cr}) | $n = 1.84 \pm 0.14$ |

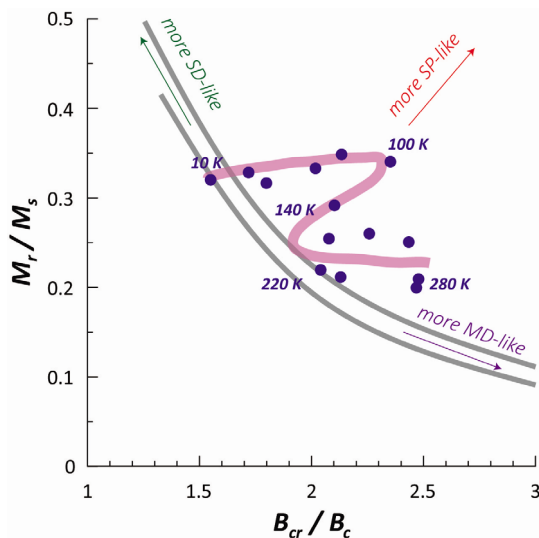


Fig. 4. Temperature dependence of magnetic hysteresis displayed on Day (1977) plot. Results match well with the single-domain (SD) and multidomain (MD) mixing curves (grey colors) and contribution of superparamagnetic (SP) fractions (Dunlop, 2002).

함유스피넬을 함유하는 분리광물을 사용한 금번 연구 자료의 해석이 매우 제한적일 수밖에 없다.

실온포화잔류자화기억도(RT-SIRM memory)란 냉각(300 K 부터 10 K까지)과-가열(10 K 부터 300 K까지) 실험 후에 측정된 실온포화잔류자화와 초기 실온포화잔류자화의 비율로 정의되는데, 금번 실험에 사용된 분리광물시편은 94%의 실온포화잔류자화기억도를 보여준다(그림 2). 이는 나노단위의 자철석에서나 기록되는 매우 높은 실온포화잔류자화기억도이다(Özdemir *et al.*, 2002). 특히 온도 변화 대비 실온포화잔류자화 변화가 모든 온도구간에서 거의 10^{-3} K^{-1} 내외로 유지되며, 특정 온도구간에서 실온포화잔류자화의 급격한 등락이 전혀 감지되지 않는다(그림 2, 아래부분 선 그림, 왼쪽 축 사용). 따라서 실험에 사용된 분리광물시편이 실온포화잔류자화가 특정 온도구간에서 급변하는 자철석(Verwey, 1939), 적철석(Morin, 1950), 티탄자철석(Moskowitz *et al.*, 1998), 자류철석(Rochette *et al.*, 1990)을 전혀 함유하지 않음을 물리적으로 증명하고 있다.

포화자화, 포화잔류자화, 항자기력, 잔류항자기력은 모두 온도가 증가함에 따라 지수함수 형태의 감소 경향을 보인다(그림 3). 특히 100 K 이하의 저온에서는 초상자성(superparamagnetic)이 우세하여 포화자화, 항자기력, 잔류항자기력이 온도가 증가하며 상대적으로 대폭 감소한다(그림 3). 통상적으로 자성물질의 자화특성 연구에서는 온도변화에 따른 포화잔류자화, 항자기력, 잔류항자기력 변화를 온도변화에 따른 포화자화의 멱함수(power law)로 표현한다. 만약 멱함수의 멱지수가 +1 이하라면, 자성물질의 자화특성이 결정이방성(crystalline anisotropy)이나 자화탄성이방성(magnetoelastic anisotropy)에 의해 지배된다고 해석한다(Fletcher and O'Reilly, 1974; Moskowitz, 1993). 금번 실험에서 얻어진 자료를 토대로 계산된 멱함수의 멱지수(power)를 정리하면 아래 표와 같다(표 3). 분리광물시편의 잔류자화, 항자기력, 잔류항자기력은 멱지수가 +1 이상으로 계산되므로(표 3), 자성물질의 자화특성이 형태이방성(shape anisotropy)에 의해 지배된다고 판단된다(Klapel and Shive, 1974; Moskowitz *et al.*, 1993).

분리광물시편은 280 K 부터 220 K 까지 온도가 감소하며 대체적으로 잔류자화비는 증가하고 항자기력비가 감소하는 상대적인 단자기구역 강화 경향

을 나타낸다(그림 4). 그리고 220 K부터 100 K까지의 온도 구간에서는 온도가 감소하며 잔류자화비와 항자기력비가 모두 증가하는 초상자성화가 감지된다. 온도가 100 K 이하로 냉각되며 잔류자화비는 약간 감소하고 항자기력비가 감소하는 상대적인 단자기구역 강화 경향이 다시 나타난다(그림 4). 실온에서부터 온도가 감소하며 크롬과 철을 함유하는 합성 크롬철함유스피넬의 결정구조가 등축정계(Isometric cubic)에서 정방정계(tetragonal)를 걸쳐 사방정계(orthorhombic)로 진화하는 2단 결정변화가 보고된 적 있다(Francombe, 1957).

서언에서도 언급했지만 금번 연구의 의의는 운석에서 분리한 분리광물시편에 관한 저온 자화분석 시도이다. 분리광물시편의 저온 자화특성 연구는 현재 국내에 설치된 자화측정기기로는 측정이 불가능하다. 행성탐사시 직면하는 저온환경을 감안할 때, 향후 크롬철티탄함유스피넬을 포함하는 암권을 구성하는 자성광물에 대한 저온 자화특성 연구 및 결정 성분분석이 심도있게 추가되어야 한다. 특히 크롬, 철, 티탄을 함유하는 합성 광물을 이용한 체계적인 크롬철티탄함유스피넬의 자화특성 표준자료 제시가 절실한 실정이다.

사 사

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

REFERENCES

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), 5083, doi:10.1029/2001JE001835.
 Bezaeva, N.S., Rochette, P., Gattacceca, J., Sadykov, R.A. and Trukhin, V.I., 2007, Pressure demagnetization of the Martian crust: Ground truth from SNC meteorites. *Geophysical Research Letters*, 34, L23202, doi:10.1029/2007GL031501, 2007.
 Bibring, J.-P., Langevin, Y., Gendrin, A., Gondet, B., Poulet, D., Berthe, M., Soufflot, A., Arvidson, R.E.,

Mangold, N., Mustard, J., Drossart, P. and The OMEGA team, 2005, Mars Surface Diversity as Revealed by the OMEGA/Mars Express Observations. *Science*, 307, 1576-1581, doi:10.1126/science.1108806.
 Cisowski, S.M., 1986, Magnetic studies on Shergotty and other SNC meteorites. *Geochemica and Cosmochimica Acta*, 50, 1043-1948.
 Day, R., Fuller, M. and Schmidt, V.A., 1977, Hysteresis properties of titanomagnetites: Grain-size and compositional dependence. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 13, 260-267, doi:10.1016/0031-9201(77)90108-X.
 Dunlop, D.J., 2002, Theory and application of the Day plot: 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data. *Journal of Geophysical Research*, 107(B3), 2056, doi:10.1029/2001JB000486.
 Ferguson, R.L., Christensen, P.R., Bell III, J.F., Golombek, M., Herkenhoff, K.E. and Kieffer, H.H., 2006, Physical properties of the Mars Exploration Rover landing sites as inferred from Mini-TEs-derived thermal inertia. *Journal of Geophysical Research*, 111, E02S21, doi:10.1029/2005JE002583.
 Fletcher, E.J. and O'Reilly, W., 1974, Contribution of Fe²⁺ ions to the magnetocrystalline anisotropy constant K₁ of Fe³⁺-Ti_xO₄, 0 < x < 0.1. *Journal of Physics C: Solid State Physics*, 7, 171-178.
 Francombe, M.H., 1957, Lattice changes in spinel-type iron chromites. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 3, 37-43.
 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.
 Klapel, G.D. and Shive, P.N., 1974, High-temperature magnetostriction of magnetite. *Journal of Geophysical Research*, 79, 2629-2633.
 Kosterov, A., 2002, Low-temperature magnetic hysteresis of partially oxidized magnetite. *Geophysical Journal International*, 149, 796-804.
 Langlais, B., Purucker, M.E. and Manda, M., 2004, Crustal magnetic field of Mars. *Journal of Geophysical Research*, 109, E02008, doi: 10.1029/2003JE002048.
 Morin, F.J., 1950, Magnetic susceptibility of α-Fe₂O₃ and α-Fe₂O₃ with added titanium. *Physical Review*, 78, 819-820.
 Moskowitz, B.M., 1993, High-temperature magnetostriction of magnetite and titanomagnetites. *Journal of Geophysical Research*, 98, 18,011-18,026.
 Moskowitz, B.M., Frankel, R.B. and Bazylinski, D.A., 1993, Rock magnetic criteria for the detection of biogenic magnetite. *Earth and Planetary Science Letters*, 120, 288-300.
 Moskowitz, B.M., Jackson, M. and Kissel, C., 1998,

- Low-temperature magnetic behaviour of titanomagnetites. *Earth and Planetary Science Letters*, 157, 141-149.
- Özdemir, Ö. and Dunlop, D.J., 2002, Thermoremanence and stable memory of single-domain hematites. *Geophysical Research Letters*, 29, 1877, doi:10.1029/2002GL015597.
- Purucker, M., Ravat, D.T., Frey, H.V., Voorhies, C.V., Sabaka, T. and Acuña, M.H., 2000, An altitude-normalized magnetic map of Mars and its interpretation. *Geophysical Research Letters*, 27, 2449-2452.
- Robbins, M., Wertheim, G.K., Sherwood, R.C. and Buchanan, D.N.E., 1971, Magnetic properties and site distributions in the system $\text{FeCr}_2\text{O}_4\text{-Fe}_3\text{O}_4$. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 32, 717-729.
- Rochette P., Fillion, G., Mattéi, J.-L. and Dekkers, M.J., 1990, Magnetic transition at 30-34 K in Fe_7S_8 : insight into a widespread occurrence of pyrrhotite in rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 98, 319-328.
- 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.
- Rogers, A.D. and Christensen, P.R., 2003, Age relationship of basaltic and andesitic surface compositions on Mars: Analysis of high-resolution TES observations of the northern hemisphere. *Journal of Geophysical Research*, 105(E5), 5030, doi:10.1029/2002JE001913.
- Rogers, A.D., Christensen, P.R. and Bandfield, J.L., 2005, Compositional heterogeneity of the ancient martian crust: Analysis of Ares Vallis bedrock the THEMIS and TES data. *Journal of Geophysical Research*, 110, doi:10.1029/2005JE002399.
- Schubert, G., Russell, C.T. and Moore, W.B., 2000, Timing of the Martian dynamo. *Nature*, 408, 666-667.
- Turcott, D.L., Shcherbakov, R., Malamud, B.D. and Kucinskas, A.B., 2002, Is the Martian crust also the Martian elastic lithosphere? *Journal of Geophysical Research*, 107, 5091, DOI:10.1029/2001JE001594.
- Verwey, E.J.W., 1939, Electronic conduction of magnetite and its transition point at low temperatures. *Nature*, 144, 327-328.
- 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*, 201, 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.
- Zuber, M.T., 2001, The crust and mantle of Mars. *Nature*, 412, 220-227.
- Zuber, M.T., Solomon, S.C., Phillips, R.J., Smith, D.E., Tyler, G.L., Aharonson, O., Balmino, G., Banerdt, B., Head, J.W., Johnson, C.L., Lemoine, F.G., McGovern, P.J., Neumann, G.A., Rowlands, D.D. and Zhong, S., 2000, Internal structure and early thermal evolution of Mars from Mars Global Surveyor topography and gravity. *Science*, 287, 1788-1793.

Received : March 17, 2015

Revised : April 13, 2015

Accepted : April 13, 2015