

## 잔류자화비를 이용한 운석의 자성광물 판별

### Magnetic Mineral Identification in Meteorites

김 인 호(Inho Kim) · 유 용 재(Yongjae Yu)\*

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

**요약** : 운석은 모암인 소행성(asteroid)이나 미세소행성(planetesimal)에서 충돌에 의해 분리된 후, 태양계 내의 공간을 배회하다가 지구의 중력에 이끌려 지표에 떨어진 후 수집된 돌덩이다. 따라서 생성 초기의 지구를 포함하는 태양계 내 지구형 행성의 생성 초기와 진화과정을 규명하려면 원시 태양계의 정보를 간직하고 있는 운석의 물리/화학적 분석이 반드시 필요하다. 특히 열잔류자화(thermoremanent magnetization, TRM) 대비 포화등온잔류자화(saturation isothermal remanent magnetization, SIRM)의 비율과 자화를 유도하는 자기장 강도의 상관관계를 이용하면 운석이 함유하는 자성광물을 판별할 수 있다. TRM/SIRM 비를 이용하여 2종류의 미분화운석(H5 Richardton, LL6 St. Severin)과 2종류의 화성기원 분화운석(ALH84001, DaG476)에 대해 자성광물 판별을 시도하였다. 실험 결과 H5 Richardton, LL6 St. Severin, ALH84001, DaG476의 주 자성광물이 각각 카마사이트, 테트라테나이트, 자철석, 크롬티탄함유철석임을 판별하였다.

**주요어** : 운석, 자성광물, 자기적 특성, 열잔류자화, 포화등온잔류자화

**ABSTRACT** : Meteorites are extraterrestrial solid rock fragments that fell from the outer space. Investigating mineral magnetic properties of the Meteorites is essential in understanding the evolution of planets and asteroids in the Solar System. In particular, magnetic characterization of magnetic mineral can provide constraints on the progress of differentiation in ancient planetary bodies. In the present study, ratio of thermoremanent magnetization (TRM) over saturation isothermal remanent magnetization (SIRM) was applied to diagnose the magnetic minerals in meteorites and igneous rocks. Distinctive classification of TRM/SIRM suggests that kamacite, tetrataenite, magnetite, and (Cr,Ti)-rich iron oxide are responsible for the magnetization of H5 Richardton, LL6 St. Severin, ALH84001, and DaG476, respectively. The TRM/SIRM ratio could be an efficient tool in identifying magnetic minerals especially when rocks or meteorites contain unstable material under heating.

**Key words** : Meteorite, magnetic minerals, magnetic properties, thermoremanent magnetization, saturation isothermal remanent magnetization

#### 서 론

태양계 형성 초기 지구형 행성의 진화를 심도 있

게 규명하려면, 태양계 전반에 걸쳐 행성의 발달사를 유기적으로 고찰할 필요가 있다. 현재까지 보고된 지표상의 가장 오래된 지층( $4031 \pm 3$  Ma) (Bowring and Williams, 1999; Wilde *et al.*, 2001)과 지

\*교신저자: yongjaeyu@cnu.ac.kr

**Table 1.** 암석 및 운석에 존재하는 자성광물의 특성

광물명	성분	포화자화(kA/m)	큐리온도(°C)
철	$\alpha$ Fe	1715	765
자철석	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	480	580
티탄철석	Fe <sub>2.4</sub> Ti <sub>0.6</sub> O <sub>4</sub>	125	150
적철석	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≈2.5	680
자류철석	Fe <sub>7</sub> S <sub>8</sub>	≈80	320
크롬티탄함유철석	(Cr, Fe, Ti)Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	n.a.	≈250
카마사이트	Fe <sub>95</sub> Ni <sub>5</sub>	n.a.	≈700
테트라테나이트	Ordered Fe <sub>50-75</sub> Ni <sub>25-50</sub>	n.a.	≈550
테나이트	Disordered Fe <sub>50-75</sub> Ni <sub>25-50</sub>	n.a.	≈550

n.a.: not available.

구 탄생( $4567.2 \pm 0.2$  Ma) (Amelin *et al.*, 2002) 사이에는 대략 5억년의(암석의 형태로 지구 초기 지층 기록이 현재까지 보존되지 못한) 시간차가 존재한다. 다행스럽게도 지구상에는 오만 여 점의 운석이 보고되어 있고, 이중 일부 개인소장품을 제외한 대다수가 연구용으로 활용되고 있다.

운석은 외계에서 지구로 유입된 고체 물질로 소행성(asteroid)의 진화 과정에서 충돌에 의해 분리된 고체 파편이다. 현재까지 지구상에서 발견된 대부분의 운석은 모암인 소행성이나 미세소행성(planetesimal)에서 분리된 후 태양계 내의 공간을 배회하다가, 지구의 중력에 이끌려 지표에 떨어진 후 수집된 것이다. 따라서 생성 초기 지구를 포함하는 태양계 내 지구형 행성의 진화를 규명하려면 원시 태양계의 정보를 간직하고 있는 운석의 물리/화학적 분석이 반드시 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 구분된다(Hutchison, 2004; Krot *et al.*, 2004).

지구의 화성암이나 일부 저변성암과 마찬가지로 최근의 운석 연구는 동위원소 분석을 포함하는 지구화학적 접근이 가장 각광을 받고 있다. 그러나 화학적인 분석 방법은 암석에 존재하는 일부 원소의 극 미세함량에 전적으로 의존하며, 오차를 줄이기 위해서는 다량의 시료 분석이 요구된다. 결국 고가의 실험기기가 구비되고 연구 대상 시료가 풍부한 경우가 아니면 연구 수행에 상당한 제약이 따른다. 반면 물리적인 방법의 하나인 암석자기(rock

magnetism) 연구는 운석의 자기적 특성을 이용하는 데 두 가지 큰 장점이 있다. 첫째, 운석의 극 미세 성분이 아닌 실험에 사용되는 시료 전체가 대상이 된다는 점에서 다량의 시료 분석이 반드시 필요치 않다. 둘째, 자기특성 실험은 대부분 비파괴적이라 암석자기 연구에 사용된 시료를 다른 분야의 연구에서 재사용 가능하다.

금번 연구에서는 자기적 특성을 이용하여 운석의 자성광물을 판독하려 한다. 우선 기본적인 비교를 위해 표 1에 제시된 광물의 자기적 특성을 이용하여 표준자료를 예측하고 실측자료와 비교하려 한다. 이후 예측/실측 자료를 바탕으로 실제 운석 함유 자성광물을 판독하려 한다.

### 자성광물

지구의 암석과 운석에는 여러 가지 자성광물이 함유되어 있다. 지구의 암권에서 의미 있는 자기적 특성의 99% 이상은 자철석(magnetite, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), 적철석(hematite, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 티탄철석<sub>60</sub>(titanomagnetite<sub>60</sub>, Fe<sub>2.4</sub>Ti<sub>0.6</sub>O<sub>4</sub>), 크롬티탄함유철석((Cr,Fe,Ti)Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)으로 설명 가능하다. 물론 지구의 암권에는 자류철석(pyrrhotite, Fe<sub>7</sub>O<sub>8</sub>)이 자성광물인 예외적인 지역도 일부 존재한다. 지구에서 산화철 화합물 형태의 자성광물이 주를 이루는 이유는 환원환경에서 생성되는 운석과 달리 산소가 풍부한 산화환경에서 지구의 암권이 진화하기 때문이다.

지구형 행성과 달리 환원 환경에서 진화한 운석의 자성광물은 철-니켈 합금이다. 현재까지 미분화 운석에서 보고된 철-니켈 합금은 카마사이트(kama-

cite,  $Fe_{95}Ni_5$ ), 테트라테나이트(tetrataenite, ordered  $Fe_{50-75}Ni_{25-50}$ ), 테나이트(taenite, disordered  $Fe_{50-75}Ni_{25-50}$ ) 세 종류가 있다(Clarke and Scott, 1980). 암석과 운석 모두 철-황 화합물은 황/철의 비율이 88% 이하인 경우에만 자성을 지니며, 운석에 존재하는 황/철의 비율이 100%인 troilite는 자성을 보유하지 않는다(Rochette *et al.*, 2001). 암석과 운석에 존재하는 다양한 자성광물은 각기 다른 큐리온도(Curie point)와 포화자화(saturation magnetization)의 값을 보여준다(표 1). 큐리온도란 자성광물이 자하를 상실하는 온도를 지칭한다. 포화자화(saturation magnetization)란 자성광물이 획득할 수 있는 자화획득의 최대 능력치를 표현한다.

### 시료 및 실험 방법

광물판독에 미분화운석 2종류와 분화운석 2종류를 사용하였다. 미분화운석으로는 H5 Richardton과 LL6 St. Severin을 사용하였다. H5 Richardton은 1919년 6월 21일에 미국 중부에서 회수된 낙하운석으로 남-남 동위원소법으로 측정된 연대가 45억 5천만년이다( $4550 \pm 2.6$  Ma: Amelin *et al.*, 2005). LL6 St. Severin은 1966년 6월 27일에 북부 프랑스에서 회수되었고, 동위원소 연대가 45억 5천 4백 9 십만 년이다( $4554.9 \pm 0.2$  Ma: Bouvier *et al.*, 2007). 실험에 사용된 2종류의 분화운석은 모두가 화성(火星, Mars) 기원으로, Orthopyroxenite로 알려진 ALH-84001 ( $4.04 \pm 0.1$  Ga: Borg *et al.*, 1999)과 현무암질(basaltic)의 DaG476 ( $474 \pm 11$  Ma: Borg *et al.*, 2003)을 사용하였다.

자화 특성 실험을 위해 운석 시료를 고온 실험이 가능한 표준 시편의 형태로 준비한다. 이를 위해서, 자성이 없으며 고온 가열에도 녹지 않는 약 15 cm 길이의 석영 유리관을 사용한다. 또한, 무자성 솜으로 시료의 외벽을 단단히 감싸고 무자성 접착제를 사용하여 석영 유리관의 바닥에 감싼 시료를 고정시킨다. 운석은 지표상의 암석과 아주 다른 환경에서 생성되었으며 특히 운석 생성 당시 자성광물의 형성에 결정적인 역할을 하는 용융 당시의 산소 분압(oxygen fugacity)이 일반 가열 실험과는 상이하므로 지구와 다른 산소 분압에서 생성된 자성광물을 실험실에서 재가열할 경우, 광물이 쉽게 산화/변질되기 쉽다. 이를 방지하기 위하여 시료를 포함하는 석영 유리관을 진공 상태에서 이중으로 고온 밀봉 처리하였다(Taylor, 1979).

지구의 화성암은 액체 상태의 마그마가 고체 결정으로 냉각되는 과정에서 당시의 지구자기장 방향으로 열잔류자화(TRM)를 획득한다. 분화운석의 자성광물도 지구 화성암과 유사한 방식으로 당시의 운석 주변부에 존재하던 외부자기장 방향으로 열잔류자화를 획득한다. 반면 미분화운석의 경우 운석 입자(Chondrules)의 초기 냉각 과정에서 운석입자 주변부의 자기장 방향으로 열잔류자화를 획득한다. 포화등온잔류자화(SIRM)는 연구 대상 시료를 지구 평균자기장의 10,000배를 상회하는 1 T 이상의 강한 유도자기장에 짧은 시간동안 노출시켜 획득한 잔류자화이다. 포화등온잔류자화는 유도자기장에 평행한 방향으로 시료 내의 자성광물을 최대한 배열시킨 등온포화자화(isothermal saturation magnetization)의 효율성을 나타내며, 일반적으로 시료의 자성광물 함량에 비례한다. 세립질의 자성광물에 대해 열잔류자화와 등온포화잔류자화의 비는  $TRM(B)/SIRM = \tanh[VM_S(T_B)B_0/kT_B]$ 로 노벨물리학 수상자 Louis Néel에 의해 정의되었다(Néel, 1949). 위 식에서  $M_S$ 는 포화자화(saturation magnetization),  $V$ 는 자성광물 입자의 부피,  $T_B$ 는 개별 광물 입자의 자화고착온도(magnetic blocking temperature),  $k$ 는 Boltzmann 상수,  $B$ 는 벡터 외부자기장이다. 물리학이나 공학에서 고려하는 1 mT 정도 이상의 외부자기장 조건에서  $TRM(B)/SIRM$ 은 1차함수가 아니다. 그러나, 지구형 행성의 지표자기장 최대치인 0.1 mT 이하에서는 1차 선형으로 간단하게 근사된다(그림 1). 증가하는 외부자기장  $B$ 에 비례하여 TRM의 값은 증가하나 SIRM은 불변이므로,  $TRM/SIRM$ 은 0.1 mT 이하의 외부자기장 환경에서  $B$ 에 정비례하는 특징을 보인다(그림 1). 이 경우 개별 자성광물의 경향성은 서로 일정하게 떨어진 평행선 형태로 서로 중첩되지 아니한다(Yu, 2010). 적철석만 예외적으로 외부자기장  $B$ 가 커지며 비선형 특징을 보이는데, 이는 유난히도 작은 포화자화로 인해 10  $\mu T$  정도의 외부자기장에서도 적철석은 포화잔류자화에 도달하기 때문이다(Dunlop and Kletetschka, 2001). 행성지질학에서 고려하는 적철석은 다자기구역(multidomain)으로 자체소자(self-demagnetization) 현상으로 인해 10  $\mu T$  정도의 약한 외부자기장에서도 포화잔류자화를 기록하는데, 이는 지표상의 단자기구역(single-domain) 세립 적철석의 포화잔류자화에 필요한  $> 2$  T의 강한 자기장과 상당한 차이가 난다(Dunlop and Kletetschka, 2001).

열잔류자화(TRM)를 획득하기 위해 시료를 0.1~

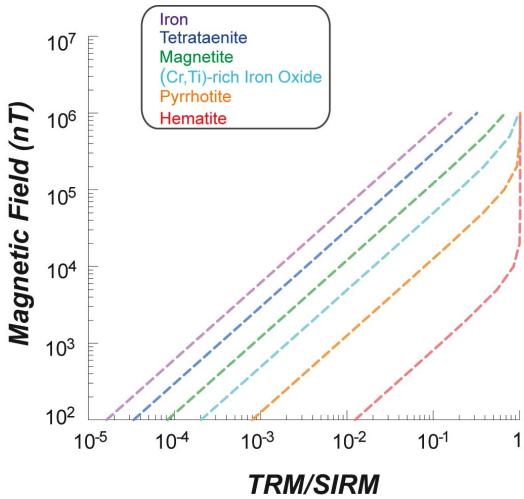


Fig. 1. Theoretical calculation of the TRM/SIRM ratio as a function of an applied field (B).

100  $\mu$ T의 다양한 외부자기장 환경에서 큐리온도 이상부터 실온까지 냉각시켰다. 상업용 열소자기는 700  $^{\circ}$ C 이상의 고온 실험이 불가하고 자기차폐 능력이 200 nT 정도여서 금번 실험에 부적합하여, 자체 제작한 열소자기를 사용하였다. 실험을 위해 제작된 열소자기는 800  $^{\circ}$ C까지 가열이 가능하고 자기차폐 능력이 50 nT 이하이며 냉수냉각방식으로 빠른 냉각이 가능하지만, 소규모 기기라 매 실험시 1개의 시료만 측정 가능하므로 고전적인 고지자기 연구에는 부적합하다. 포화등온잔류자화를(SIRM) 획득하기 위해 ASC Scientific사의 Impluse Magnetizer (모델:IM-10-30)를 사용하여 시료를 지구 자기장보다 훨씬 강한 1 T의 외부자기장에 노출시켰다. 적철석은 강한 항자기력(Coercive Force)을 고려하여, 2.5 T의 강력한 외부자기장에 노출하였다.

지구의 화성암이나 운석에 존재하리라 예상되는 대표적인 자성광물에 대해 TRM/SIRM 비를 측정하였다. 포화자화의 크기에 따라 순차적으로 평행한 TRM/SIRM 경향성이 나타나는데, 공식을 이용한 예측치와 매우 유사한 결과를 보인다(그림 2). 예측치와 실험 결과 모두 기준에 보고된 자료와 오차 범위 내에서 큰 차이가 없다(Kletetschka *et al.*, 2004, 2006).

### 운석의 자성광물 판독

운석 내에 분포하는 자성광물의 종류를 판독하

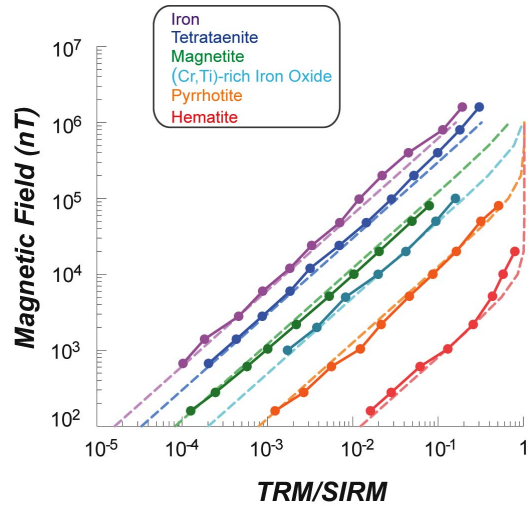


Fig. 2. A linear field dependence of TRM/SIRM for iron, iron-nickel alloy, magnetite, (Cr,Ti)-rich iron oxide, pyrrhotite, and hematite.

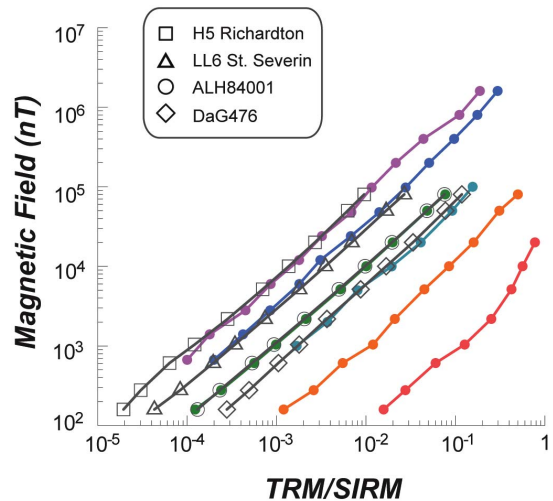


Fig. 3. Identification of magnetic minerals in meteorites.

기 위하여 TRM/SIRM 비를 분석하였다. 본 실험에 사용된 운석의 TRM/SIRM 비는 서로 전혀 중첩되지 않는 독자적인 경향성을 보이는데(그림 3), 이는 각 운석이 상이한 자성광물을 함유함을 지시한다. 각 운석별 자성광물 판독결과는 다음과 같다.

미분화운석인 H5 Richardton과 LL6 St. Severin은 각기 철과 테트라테나이트의 자료와 매우 유사한 결과를 보여 준다(그림 3). 실제 H5 Richardton의 자화는 카마사이트에 의해 지배되는데(Yu *et al.*,

2009), 카마사이트는 포화자화와 큐리온도가 철과 거의 유사하다고 보고되어 있다(Garrick-Bethell and Weiss, 2010). 아쉽게도 현 단계에서 TRM/SIRM 비는 철과 카마사이트의 미세한 차이까지는 구분하는데 실패했다(그림 3). LL6 St. Severin의 TRM/SIRM 비는 테트라테나이트와 거의 동일한데, 실제 St. Severin에 함유된 자성광물은 tetrataenite로 최근 확인되었다(Yu *et al.*, 2011).

분화운석인 ALH84001은 자철석과 유사한 경향성을 보이는데, 실제 ALH84001의 자기적 특성은 사방회석에 포획광물(inclusion)의 형태로 존재하는 자철석에 의해 지배된다(Weiss *et al.*, 2000, 2002; Antreter *et al.*, 2003). 반면 DaG476의 경우 크롬티탄함유철석의 경향성을 보여준다. 이는 DaG476의 자기적 특성을 자류철석으로 해석한 기존의 연구(Rochette *et al.*, 2001)가 재검증되어야 함을 강력하게 시사한다.

## 결 론

운석은 태양계의 형성 및 진화에 관한 근본적인 정보를 내재하고 있는 암석과편이다. 금번 연구는 자화특성인 열잔류자화(TRM) 대비 포화등온잔류자화(SIRM)의 비율을 이용하여, 운석의 자성광물 판별을 시도하였다. TRM/SIRM 비를 이용하여 2종류의 미분화운석(H5 Richardton, LL6 St. Severin)과 2종류의 화성기원 분화운석(ALH84001, DaG476)을 분석하였다. 실험 결과, H5 Richardton, LL6 St. Severin, ALH84001, DaG476의 주 자성광물이 각각 카마사이트, 테트라테나이트, 자철석, 크롬티탄함유철석임을 판별하였다.

## 사 사

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

## 참고문헌

Amelin, Y., Krot, A.N., Hutcheon, I.D., and Ulyanov, A.A. (2002) Lead isotopic ages of chondrules and calcium-aluminum-rich inclusions. *Science*, 297, 1678-1683.  
Amelin, Y., Ghosh, A., and Rotenburg, E. (2005) Unrav-

veling the evolution of chondrite parent asteroids by precise U-Pb dating and thermal modeling. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 69, 505-518.  
Antreter, M., Fuller, M., Scott, E., Jackson, M., Moskowitz, B., and Solheid, P. (2003) Paleomagnetic record of Martian meteorite ALH84001. *Jour. Geophys. Res.*, 108(E6), 5049, doi:10.1029/2002JE001979.  
Borg, L.E., Connelly, J.N., Nyquist, L.E., Shih, C.Y., Wiesmann, H., and Reese, Y. (1999) The age of the carbonates in martian meteorite ALH84001. *Science*, 286, 90-94.  
Borg, L.E., Nyquist, L.E., Wiesmann, H., Shih, C.Y., and Reese, Y. (2003) The age of Dar al Gani 476 and the differentiation history of the Martian meteorites inferred from their radiogenic isotopic systematics. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 67, 3519-3536.  
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. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 71, 1583-1604.  
Bowring, S.A., and Williams, I.S. (1999) Priscoan (4.00 ~ 4.03 Ga) orthogneisses from northwestern Canada. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 134, 3-16.  
Clarke, R.S. and Scott, E.R.D. (1980) Tetraenaite-ordered Fe-Ni, a new mineral in meteorites. *Am. Mineral.*, 65, 624-630.  
Dunlop, D.J. and Kletetschka, G. (2001) Multidomain hematite: A source of planetary magnetic anomalies? *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3345-3348.  
Garrick-Bethell, I. and Weiss, B.P. (2010) Kamacite blocking temperatures and applications to lunar magnetism. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 294, 1-7.  
Hutchison, R. (2004) *Meteorites: A petrologic, chemical, and isotopic synthesis*. Cambridge University Press, Cambridge. 506p.  
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 Planet. Sci. Lett.*, 226, 521-528.  
Kletetschka, G., Fuller, M.D., Kohout, T., Wasilewski, P.J., Herrero-Bervera, E., Ness, N.F. and Acuna, M.H. (2006) TRM in low magnetic fields: A minimum field that can be recorded by large multidomain grains. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 154, 290-298.  
Krot, A.N., Keil, K., Goodrich, C.A., Scott, E.R.D., and Weisberg, M.K. (2004) Classification of Meteorites. In: Davis, A.M. (ed.), *Treatise on Geochemistry*, Vol. 1, Meteorites, Comets, and Planets, Elsevier, Oxford, 83-128.  
Néel, L. (1949) Théorie du traînage magnétique des

- ferromagnétiques en grains fins avec applications aux terres cuites. *Ann. Géophys.*, 5, 99-136.
- 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 Planet. Sci. Lett.*, 190, 1-12.
- Taylor, L.A. (1979) Paleointensity determinations at elevated temperatures: Sample preparation technique, *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.*, 10, 2183-2187.
- Weiss, B.P., Kirschvink, J.L., Baudenbacher, F.J., Vali, H., Peters, N.T., MacDonald, F.A., and Wikswo, 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 Planet. Sci. Lett.*, 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., Doh, S.-J., Kim, W., and Min, K. (2009) Ancient stable magnetism of the Richardton H5 chondrite, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 177, 12-18.
- Yu, Y. (2010) Paleointensity determination using anhysteretic remanence and saturation isothermal remanence, *Geochem. Geophys. Geosys.*, 11, Q02Z12, doi:10.1029/2009GC002804.
- Yu, Y., Doh, S.-J., Kim, W., and Min, K. (2011) Origin of stable remanent magnetization in the LL6 Chondrite, St. Severin. *Phys. Earth Planet. Inter.*, submitted.
- 
- 접수일(2011년 3월 9일), 수정일(1차 : 2011년 3월 15일),  
게재확정일(2011년 3월 23일)