

## 제 1, 2, 3차 대한민국 남극운석의 분류와 암석학적, 지구화학적 특징

최변각<sup>1,\*</sup> · 박창근<sup>1</sup> · 안인수<sup>1,2</sup> · 이종익<sup>2</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 지구과학교육과

<sup>2</sup>한국해양연구원 부설 극지연구소

### 요 약

암석학적 특징 및 산소동위원소 조성을 이용하여 서남극 티엘 산맥(Thiel Mountains) 부근에서 발견된 29개의 대한민국 남극운석을 분류하고 암석학적 연구를 수행하였다. 총 20개의 운석이 O(ordinary)-콘드라이트에 속하며 H 그룹과 L 그룹이 각각 11개와 9개이다. LL 그룹은 발견되지 않았다. 이들은 모두 암석학적 유형 4 이상의 열변성작용을 경험한 화학적으로 평형화된 콘드라이트이다. C(carbonaceous)-콘드라이트로는 CV3가 2개, CM2가 2개 발견되었으며 각 그룹의 운석들은 서로 암석학적으로 동일한 특성을 보이며 발견 위치가 지리적으로 매우 가깝기 때문에 같은 운석의 파편으로 생각된다. CV3 콘드라이트, TIL 07003과 TIL 07007은 콘드룰(chondrule), CAI(Ca-Al-rich inclusion) 등이 한쪽 방향으로 길게 신장되어 나타난다. CM2 콘드라이트, TIL 07008과 TIL 08007은 수성변질작용에 의해 일차광물들의 거의 이차광물에 의해 치환되었으며, 콘드룰은 조직의 흔적이 일부 남아 있다. E(enstatite)-콘드라이트, TIL 07009는 발견된 운석 중 남극에서 가장 심하게 풍화되었다. 콘드룰 조직이 재결정 작용에 의해 거의 완전히 지워지고 알라반다이트(alabandite)가 출현하는 것으로부터 EL6로 분류되었다. TIL 07012는 아카풀코아이트-로드라나이트(acapulcoite-lodranite) 중그룹과 암석학적 특징 및 산소동위원소 조성이 일치한다. 광물 조합이 매우 불균질하고 두 그룹의 특성을 모두 보이지만 사장석 함량이 비교적 높기 때문에 아카풀코아이트로 분류하였다. TIL 07014는 현무암질 암편과 반련암질 암편이 섞여 있는 각력암질 유크라이트(eucrite)이다. TIL 07016과 TIL 08004는 팔라사이트(pallasite)이며, 암석학적 특징 및 친철원소 함량이 티엘 마운틴 팔라사이트와 거의 일치하기 때문에 세 운석은 같은 암석의 파편일 것으로 추정된다.

**주요어:** 운석, 운석의 분류, 콘드라이트, 유크라이트, 팔라사이트

**Byeon-Gak Choi, Chang Gun Park, Insoo Ahn and Jong Ik Lee, 2009, Classification and petrological and geochemical characteristics of Antarctic meteorites found by 1st, 2nd and 3rd KOREAMET. Journal of the Geological Society of Korea. v. 45, no. 6, p. 593-605**

**ABSTRACT:** Using petrological characteristics and oxygen isotopic compositions, we classified 29 Antarctic meteorites found in blue ice fields near Thiel Mountains, West Antarctica by three Korea Expedition for Antarctic Meteorites (KOREAMET) programs. Among them 20 meteorites are ordinary chondrites, 11 H-group and 9 L-group without LL and all of them are equilibrated having petrological type  $\geq 4$ . Two CV3 and two CM2 chondrites were found: both CV and CM chondrites are possibly pairs since two meteorites in each group were not only found at very close locations but also have very similar petrological characteristics. Two CV3 chondrites, TIL 07003 and TIL 07007, have elongated chondrules, CAIs, and AOIs. The CM2 chondrites, TIL 07008 and TIL 08007, experienced heavy aqueous alteration that changed most of primary phases into low temperature secondary minerals. One enstatite chondrite, TIL 07009 is heavily altered by terrestrial weathering. No clear chondrule texture survived by thermal metamorphism; it contains ferroan alabandite, thus classified as EL6. TIL 07012 has petrological and oxygen isotopic characteristics of acapulcoite-lodranite clan. The meteorite is heterogenous in mineralogy but contains abundant plagioclase, thus assigned as acapulcoite. TIL 07014 is monomict breccia of basaltic and gabbroic eucrites. Two pallasites, TIL 07016 and TIL 08004 are similar with Thiel Mountains pallasite

\* Corresponding author: +82-2-880-7778, E-mail: bchoi@snu.ac.kr

in texture and siderophile element compositions, thus likely they are pairs.

**Key words:** meteorites, classification of meteorites, chondrites, eucrite, pallasite

(Byeon-Gak Choi, Chang Gun Park and Insoo Ahn, Department of Earth Science Education, Seoul National University, Seoul, 151-748, KOREA; Insoo Ahn and Jong Ik Lee, Korea Polar Research Institute, Incheon, 406-840, Korea)

## 1. 서 론

2006/2007년 겨울부터 3차에 걸쳐 대한민국 남극운석탐사가 수행되었으며 그 결과 총 29개의 남극운석이 남위 85도 티엘 산맥(Thiel Mountains) 부근의 청빙 지역(blue ice fields)에서 발견되었다.

본 연구의 일차적인 목적은 29개의 남극운석을 그룹으로 분류하는 것이며, 아울러 가장 기본적인 암석학적, 지구화학적 특징을 규명하여 앞으로 이들 운석을 연구하기 위한 기초 자료를 제공하고자 하는 것이다. 운석 분류 등 관련된 용어들은 최변각(2009)에서 제시된 것을 사용하였다.

## 2. 연구 방법

운석은 크게 성인에 따라 크게 미분화운석(콘드라이트, chondrites), 분화운석(differentiated meteorites), 분화된 시원운석(primitive achondrites) 등으로 구분되며, 각각은 다시 암석학적 특징, 동위원소 조성 등에 의해 세분되어 총 40여개의 그룹으로 나누어진다(Weisberg *et al.*, 2006; 최변각, 2009). 남극운석은 발견된 현장에서 기본적인 분류가 이루어지기도 하지만, 정확한 분류는 실험실에서 이루어지는 광물 조합 및 조직 관찰, 광물 화학조성 분석, 전암 화학조성 및 동위원소 조성 분석 등을 필요로 한다.

### 2.1 시료 처리 과정

운석은 지구 표면과는 매우 다른 환경, 특히 상대적으로 매우 건조한 소행성, 화성, 달 등에서 유래하였기 때문에 지구표면에 낙하한 후 빠르게 풍화가 진행된다. 남극운석은 지구에 낙하한 후 비교적 오랜 기간이 지난 후 발견됨에도 불구하고 다른 지역에 낙하한 운석에 비해 풍화를 덜 받은 상태로 발견되는 경우가 많다. 이는 상대적으로 남극이 건조하고 온도가 낮기 때문이다. 하지만 남극에서 채취한

운석을 상대적으로 온도와 습도가 높은 실험실에서 방치하게 되면 매우 빠르게 풍화가 진행될 수 있다. 따라서 남극운석은 진공 포장 및 냉동된 상태에서 실험실로 운반된다. 고순도 질소 가스로 충전된 글러브 박스(glove box)내에서 진공 포장을 개봉하고 약 3일에 걸쳐 운석의 표면 및 갈라진 틈에 있을 수 있는 얼음 및 습기를 서서히 제거한다. 건조된 운석은 질소 가스를 냉매로 사용하는 건식 암석절단기를 이용하여 보관용 시료와 연구용 시료로 분리하였다. 연구용 시료로부터 연마편 및 연마박편을 제작하였으며, 일부 시료는 산소동위원소 분석, 전암 화학분석에 사용되었다.

### 2.2 암석학적 연구 및 광물화학적 연구

제작된 연마박편을 편광현미경과 주사전자현미경을 이용하여 암석학적 분류를 수행하였다. 일부 광물에 대해서는 전자현미분석기(Electron Probe Micro-Analyzer)를 이용하여 주구성원소의 화학조성을 측정하였다. 주사전자현미경은 서울대학교 지구과학교육과에 설치된 JEOL JSM-6380A를, 전자현미분석기는 서울대학교 기초과학 공동기기에 설치된 JEOL JXA-8900R을 이용하였다. 전자현미분석기의 분석조건은 전압 15kV, 전류 10nA, 빔 크기 1-10 $\mu$ m이며, 각 원소 당 분석시간은 20초이다.

### 2.3 전암 화학조성

석철질 운석인 팔라사이트(pallasite)의 철성분, 즉 철-니켈 금속의 친철원소(siderophile elements)의 함량은 UCLA(University of California, Los Angeles)에서 기기중성자활성분석법(Instrumental Neutron Activation Analysis)을 이용하여 측정하였다. 유크라이트(eucrite)의 미량원소 함량은 UCLA의 중성자활성분석법과 극지연구소(Korean Polar Research Institute)의 유도결합플라즈마 질량분석기(Inductively coupled plasma mass spectrometry:

Elan 6100)를 이용하여 분석하였다. 사용된 시료의 양은 1회 분석에 중성자활성분석법은 약 500mg, 유도결합플라즈마 질량분석기를 이용한 분석은 약 100mg이다.

### 2.3 전암 산소동위원소 조성

전암 산소동위원소 조성은 해양연구원 부설 극지연구소 및 미국 UCLA에 설치된 안정동위원소 질량분석기를 이용하여 측정하였다. 두 기기 모두 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 시료를 가열하지만, 극지연구소는 산화제로 BrF<sub>5</sub>를 UCLA에서는 F<sub>2</sub>를 사용한다. 분석에 사용된 시료는 1회 분석에 약 2mg 내외이다 (Ahn, 2009).

운석이 지구 표면에서 받은 풍화의 산물은 대부분 산화물이기 때문에 산소동위원소는 낙하한 지역의 대기나 물의 산소에 오염된다. 특히 남극의 빙하는 δ<sup>18</sup>O값이 -50‰ 내외로 매우 낮으며(e.g., Gonfiantini *et al.*, 1998) 일반적인 운석과 차이가 크기 때문에 소량의 산화물이 섞여 있는 경우에도 산소동위원소 오염의 영향이 크다. 따라서 대부분의 시료는 묽은 염산(6N HCl)과 알코올로 반복 세척하여 산화물을 가능한 제거하였다.

지구의 암석과 광물들은 산소동위원소 조성을 δ<sup>18</sup>O와 δ<sup>17</sup>O를 각각 x축과 y축으로 나타내었을 때 기울기가 약 0.52인 하나의 질량분별선에 도시되며, 이를 지구질량분별선(Terrestrial mass fractionation line)이라고 한다. 운석의 산소동위원소 조성은 지구 질량분별선 위에 놓이기도 하지만 대부분 이로부터 벗어나며, 그 정도를 Δ<sup>17</sup>O(=δ<sup>17</sup>O - 0.52 x δ<sup>18</sup>O)으로 나타낸다(Clayton, 1993; 최변각, 2008).

## 3. 결과 및 논의

각 운석을 암석학적 특징 및 광물 화학조성에 따라 그룹으로 분류하였다. 운석은 크게 콘드라이트, 분화운석, 분화된 시원운석으로 구분할 수 있으며 (Weisberg *et al.*, 2006; 최변각, 2009), 본 연구에 사용된 총 29개의 운석은 콘드라이트 25개, 분화운석은 3개, 분화된 시원운석이 1개이다. 콘드라이트는 다시 O-대그룹, C-대그룹, E-대그룹의 콘드라이트 등으로 구분하며, 각각 20개, 4개, 1개가 발견되었다. 분화운석에는 대표적인 석철질 운석인 팔라사이트

가 2개, 소행성 기원의 화산암인 유크라이트가 1개 포함되어 있다. 분화된 시원운석은 아카풀코아이트(acapulcoite)이다. 운석의 분류 체계와 그룹 운석의 일반적인 특징에 대한 개략적 설명은 최변각(2009)을 참고하기 바란다.

콘드라이트의 경우 추가적으로 열변성 및 수성변질의 정도를 지시하는 암석학적 유형, 충격변성작용의 정도, 지구 표면에서 이루어진 풍화의 정도를 구분하였다. 총 29개의 연구 시료에 대한 분류 결과, 충격변성 정도, 풍화 정도, 감람석의 Fa함량(fayalite contents) 등은 표 1에 정리하였다.

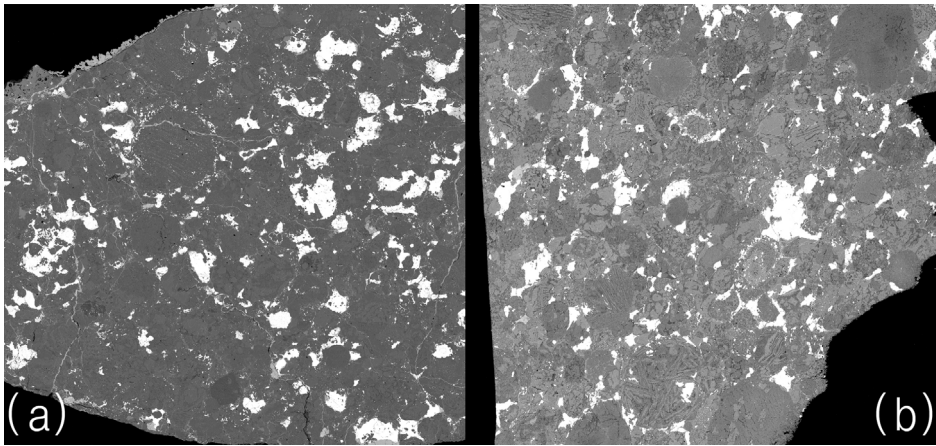
전암 산소동위원소 조성 범위는 운석 그룹에 따라 다르기 때문에 매우 유용한 분류 수단으로 사용될 수 있다(Clayton, 1993; 최변각, 2008). 본 연구에서는 암석학적으로 운석을 분류한 후 산소동위원소 조성을 통해 이를 검증하였다. 분석이 이루어진 운석에 대한 전암 산소동위원소 조성은 표 2에 정리하였다.

### 3.1 충격변성작용 및 지표면에서의 풍화작용

소행성간의 충돌에 의한 충격변성작용의 정도는 Stöffler *et al.* (1991)가 정립한 기준을 이용하면 충격단계 1(S1)에서 6(S6)까지 구분할 수 있다. 연구 시료들은 충격변성작용 정도가 충격변성작용을 인지할 수 없는 S1부터 미약한 정도의 충격변성작용의 흔적을 보여주는 S3에 속한다(표 1).

운석이 지구 환경에 노출되면 풍화가 일어나며 주로 철-산화물이 암석의 균열이나 광물의 경계를 따라 형성되거나 심하면 철-니켈 금속은 철-산화물로, 규산염 광물들은 점토 광물로 바뀌게 된다. 비교적 신선한 운석들은 용융각(fusion crust)이 잘 보존되어 있는 반면 풍화를 심하게 받은 경우 표면이 심하게 부식되어 있는 것을 관찰할 수도 있다. 박편에서 관찰되는 콘드라이트의 풍화정도는 Wlotzka (1993)이 제시한 6단계가 흔히 사용되며 풍화의 흔적을 거의 발견할 수 없는 풍화정도 1(W1)부터 대부분의 광물이 풍화를 받은 풍화정도 6(W6)으로 구분된다(표 1). 본 연구에 사용된 콘드라이트들은 TIL 07009를 제외하면 풍화정도가 1 또는 2로 비교적 보존 상태가 양호하다.

CM그룹과 같이 모체(parent body)에서 수성변질의 심하게 받은 콘드라이트와 분화운석 등에 대해서는 충격변성작용의 정도와 풍화정도는 수치화 하



**Fig. 1.** Back scattered electron images of (a) TIL 08006(H5) and (b) TIL 06004(L5). White phases are either Fe-Ni metal or troilite and gray phases are silicates (mostly olivine, pyroxene and plagioclase). Chondrule textures are still visible, however, fine-grained matrix minerals were recrystallized to form larger grains by thermal metamorphism. Average chondrule size is somewhat larger in TIL 06004(b) and metal abundance is higher in TIL 08006(a) Width of each image is 1cm.

지 않았다. 유크라이트인 TIL 07014는 풍화의 흔적을 거의 발견할 수 없으며 낙하운석(find)에 가까운 정도로 보존 상태가 양호하다. 반면 팔라사이트인 TIL 07016과 TIL 08004는 노출된 표면에 가까운 철-니켈 금속의 일부가 산화철로 풍화를 받았다.

### 3.2 콘드라이트의 분류 및 특징

대표적인 콘드라이트 대그룹(Class)인 O-콘드라이트, C-콘드라이트, E-콘드라이트 등은 연마편에서 콘드룰의 크기와 함량비, CAI(Ca-Al-rich inclusion)의 존재 유무와 함량비, 금속철의 함량 등에 의해 구분할 수 있다(e.g., Weisberg *et al.*, 2006). 전자현미경으로 규산염 광물 내 철의 함량을 정량 또는 정성 분석하는 것도 매우 간편한 방법 중 하나이다. O-대그룹, C-대그룹, E-대그룹의 콘드라이트는 전암 화학조성에서도 뚜렷한 차이를 보이지만(e.g., Weisberg *et al.*, 2006), 본 연구에서 콘드라이트의 전암 화학조성은 측정하지 않았다.

#### 3.2.1 O-콘드라이트

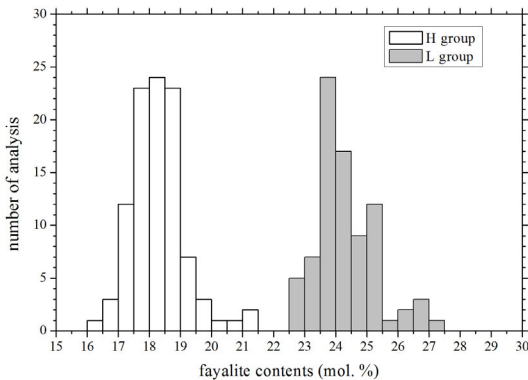
O-콘드라이트는 콘드룰 함량이 70 vol.% 내외로 매우 높아 C-콘드라이트와 쉽게 구분된다. E-콘드라이트는 O-콘드라이트와 유사한 콘드룰 함량을 보이지만 거의 대부분의 철(Fe)이 금속철(Fe-Ni metal)

이나 황화물인 트로일라이트(troilite, FeS)로 산출되며 산화물이나 규산화물에는 포함되지 않기 때문에 구별이 가능하다.

총 29개의 운석 중 20개가 O-콘드라이트에 속한다. 이들 운석은 주로 감람석, 휘석, 철-니켈 금속, 트로일라이트, 사장석 등으로 이루어져 있으며, 모두 열변성 작용을 받아 일부 또는 대부분이 재결정화되었다(그림 1). 열변성 작용에 대해서는 뒤에 다시 논의한다.

O-대그룹의 콘드라이트는 다시 H, L, LL그룹으로 세분되는데, 각 그룹은 콘드룰의 평균 크기, 감람석 및 휘석의 FeO/(MgO+FeO)비가 서로 다르며, 산소동위원소 조성에 의해서도 구분이 가능하다. H, L, LL그룹으로 가면서 산화도(oxidation state)가 증가하므로 감람석의 Fa함량이 증가한다. Rubin (2005)에 의하면 Fa함량의 평균값은 H = 18.8 mol.%, L = 24.7 mol.%, LL = 29.4 mol.%이며, 콘드룰의 평균크기는 H = 200 $\mu$ m, L = 500 $\mu$ m, LL = 570 $\mu$ m이다.

20개의 O-콘드라이트 중 11개가 H그룹에 9개가 L그룹에 속하며, LL그룹은 발견되지 않았다. 그림 1은 H그룹인 TIL 08006과 L그룹인 TIL 06004의 후방산란전자 영상을 비교한 것이다. TIL 08006이 상대적으로 콘드룰의 평균 크기가 조금 작고 철-니켈 금속 광물의 함량은 높은 것을 볼 수 있다. 그림 2는



**Fig. 2.** Fayalite contents of olivine grains in 11 H- and 9 L-group ordinary chondrites among Thiel Mountains meteorites found between 2006 and 2010. Note that H and L group are well separated from each other by fayalite contents. There are no LL group chondrites in this study.

20개의 O-콘드라이트 감람석의 Fa함량을 도시한 것으로 H그룹과 L그룹이 뚜렷하게 구분된다.

### 3.2.2 C-콘드라이트

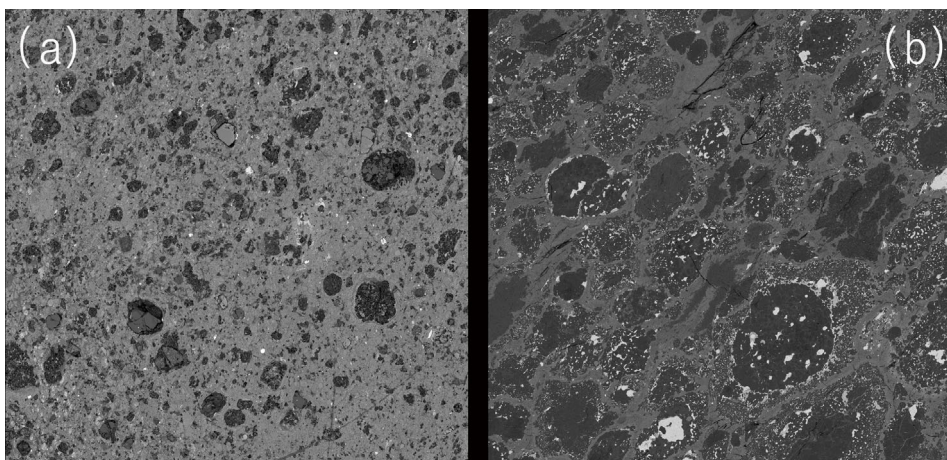
C-콘드라이트는 CI, CM, CO, CV, CK, CR그룹 등으로 세분되는데, 각각은 콘드룰의 크기와 함량비, CAI의 함량비 등 암석학적으로 뚜렷하게 구분된다(e.g., Weisberg *et al.*, 2006). C-콘드라이트 중

에는 CM그룹과 CV그룹이 각각 두 개씩 발견되었다. 각 그룹의 운석들, 즉 CV3인 TIL 07003과 TIL 07007, 그리고 CM2인 TIL 07008과 TIL 08007은 발견 위치가 서로 가까우며 암석학적 특징이 매우 유사한 것으로 보아 동일한 운석의 서로 다른 조각일 가능성이 높다.

CM콘드라이트는 수성변질작용을 받아 기존의 콘드룰, CAI, 기질을 이루고 있던 광물들이 대부분 함수광물로 대체되어 있다(그림 3a). CV콘드라이트는 열변성이나 수성변질을 거의 받지 않았으며, 직경 1mm 내외의 비교적 큰 콘드룰과, CAI, 감람석 포획체(ameboidal olivine inclusions) 등이 세립질 기질 광물과 함께 산출된다. 이들은 모두 한 쪽 방향으로 길게 신장되어 나타나며, 신장률이 알려진 어떤 콘드라이트 보다 크다(그림 3b). 서로 다른 생성 환경 및 시기에 생성된 것으로 생각되는 콘드룰, CAI 등이 모두 유사한 정도로 신장되어 있으며 같은 방향으로 배열하고 있다는 것은 변형 작용이 운석의 모체 내에서 일어났음을 지시한다.

### 3.2.3 E-콘드라이트

E-콘드라이트는 매우 환원적인 환경에서 생성된 주로 완화휘석(enstatite), 철-니켈 금속, 트로일라이트 등으로 구성된 운석이며(Keil, 1968), 철의 함량



**Fig. 3.** Back scattered electron images of (a) TIL 08007(CM2) and (b) TIL 07007(CV3). Except a few relic olivine grains, most of original minerals in TIL 08007 have been replaced by secondary clay minerals (a). Large chondrules, abundant Ca-Al-rich inclusions and ameboidal olivine inclusions are typical characteristics of CV chondrites (b). Chondrules and inclusions are elongated and oriented to the same direction in TIL 07007, implying that they have deformed in the parent body. Widths of images are 0.5 cm (a) and 1cm (b).

**Table 1.** Antarctic meteorites found by the 1st, 2nd and 3rd KOREAMET.

Name <sup>1</sup>	mass (gram)	group (+type)	Shock stage	Weathering Grade	fayalite contents <sup>2</sup>	
					av.	stderr.
TIL 06001	193	H5	S2	W1	18.8	0.1
TIL 06002	224	L6	S3	W1	25.4	0.2
TIL 06003	266	L6	S3	W1	25.8	0.4
TIL 06004	280	L5	S2	W1	25.1	0.4
TIL 06005	432	H4	S2	W1	18.5	0.1
TIL 07001	1865	H6	S1	W1	18.3	0.3
TIL 07002	222	L5	S3	W1	24.2	0.2
TIL 07003	18	CV3	S2	W1		
TIL 07004	32	H6	S2	W1	17.3	0.1
TIL 07005	152	H6	S2	W1	18.1	0.2
TIL 07006	370	L5	S3	W1	23.7	0.3
TIL 07007	18	CV3	S2	W1	0.3 - 6.4	
TIL 07008	0.7	CM2				
TIL 07009	109	EL6	S2	W5	0.5	
TIL 07010	119	L5	S3	W1	24.1	0.2
TIL 07011	19	H6	S2	W1	18.1	0.2
TIL 07012	20	acapulcoite			9.8	0.1
TIL 07013	396	L5	S2	W1	24.4	0.2
TIL 07014	3666	eucrite				
TIL 07015	96	H6	S1	W1	18.8	0.3
TIL 07016	3490	pallasite			12.1	0.0
TIL 08001	44	L6	S3	W1	23.9	0.1
TIL 08002	44	H5	S1	W2	18.0	0.1
TIL 08003	65	L6	S3	W1	24.2	0.1
TIL 08004	5008	pallasite				
TIL 08005	511	H5	S1	W2	17.5	0.1
TIL 08006	115	H5	S3	W2	17.8	0.1
TIL 08007	47	CM2				
TIL 08008	24	H6	S3	W1	18.1	0.2

<sup>1</sup> TIL is the abbreviation of Thiel Mountains

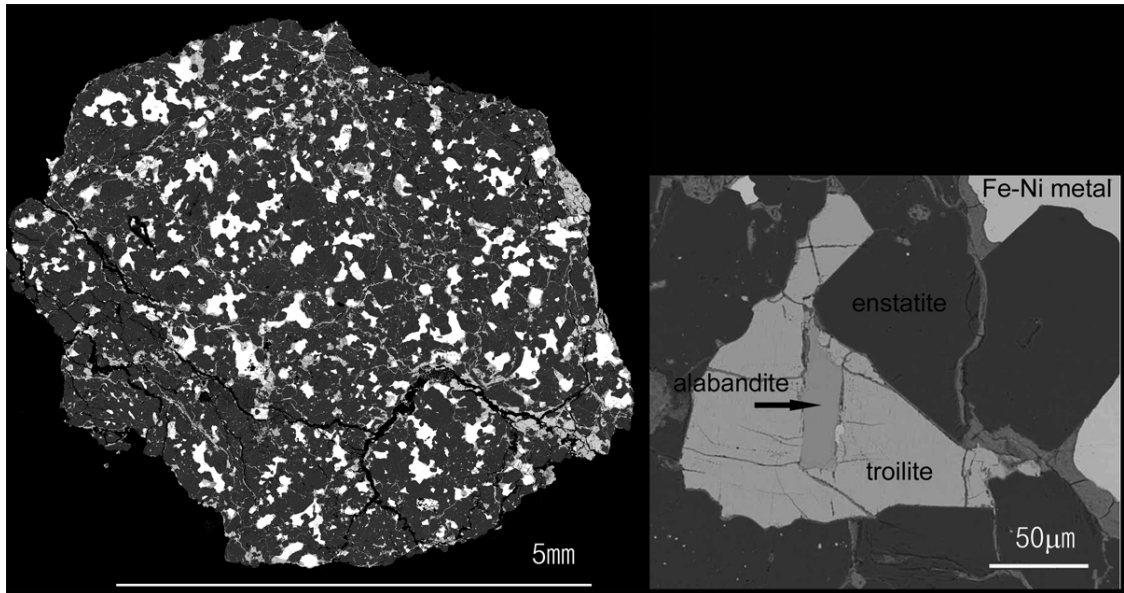
<sup>2</sup> Fayalite contents in olivine grains as averages (av.) and standard error of mean (stderr.) except unequilibrated CV3 chondrite, TIL 07007 as range.

에 따라 EH-그룹과 EL-그룹으로 세분된다(Sears *et al.*, 1982). TIL 07009는 29개의 운석 중 유일한 E-콘드라이트이며, 가장 심하게 풍화를 받아 풍화단계는 W5로 분류되었다(표 1).

알라반다이트(alabandite, (Mn,Fe)S)는 EL-그룹의 특징적인 광물이며, EH-콘드라이트에서는 산출되지 않는 것으로 알려져 있다(e.g., Keil, 1968; Patzer *et al.*, 2004). TIL 07009에서는 알라반다이트가 트로일라이트와 함께 산출되기 때문에 EL그룹으로 분류하였다(그림 4).

### 3.2.4 콘드라이트의 암석학적 유형

콘드라이트는 모체 내에서의 열변성, 수성변질의 정도에 따라 암석학적 유형(petrological types) 1부터 6으로 구분한다(Van Schmus and Wood, 1967). 유형-3은 변성이나 변질의 정도가 가장 미약하여 태양계 성운에서 형성된 원래의 조성, 광물 조합, 조직 등이 보존된 것이며, 유형-4에서 6으로 갈수록 열변성 정도가 커지고, 유형-2에서 1로 갈수록 수성변질의 정도가 높아진다. 일반적으로 열변성 작용을 받은 콘드라이트는 O-대그룹과 E-대그룹에서 발견되며, C-대그룹의 콘드라이트는 열변성 작용을 받은



**Fig. 4.** Back scattered electron images of enstatite chondrite, TIL 07009. (a) Dark gray phases are mostly enstatite, white phases are Fe-Ni metal grains. (b) Alabandite occurs with troilite. Dark gray phases along grain boundaries are Fe-oxides that formed by terrestrial weathering.

경우가 드물며 오히려 수성변질 작용을 받아 유형-1 또는 2로 분류되는 것들이 많다. 콘드라이트의 분류 표기는 일반적으로 그룹명+암석학적 유형으로 나타낸다. 예를 들어 H그룹이며 유형-4에 해당하는 열변성작용을 받은 TIL 06005의 경우 H4로 표기한다.

유형-3에 속하는 콘드라이트는 콘드롤, CAI의 경계가 매우 뚜렷하며, 기질은 1µm 내외의 세립질의 광물(주로 감람석, 휘석, 철-니켈 금속 등)로 이루어져 있다. 광물의 조성은 화학적으로 비평형상태로 매우 불균질하다. 연구시료 중 CV3 콘드라이트인 TIL 07003과 TIL 07007이 이에 속한다(그림 3b).

콘드라이트가 수성변질을 받게 되면 감람석, 휘석 등이 점차 함수광물로 변질되거나 이차 저온 광물들이 생성된다. 철-니켈 금속은 자철석 등 산화광물로 치환되거나 새로 산화광물이 생성된다. 수성변질을 받았으나 콘드롤 등 원래의 구조가 남아 있는 경우는 암석학적 유형-2로 분류되며, CI 콘드라이트의 경우와 같이 콘드롤 구조가 완전히 파괴된 경우에는 유형-1로 분류된다. TIL 07008과 TIL 08007은 변질의 정도가 심하여 부분적으로 감람석, 철-니켈 금속 등이 보존되어 있지만 콘드롤 구조의 흔적이 남아 있기 때문에 유형-2로 분류하였다(그림 3a).

유형-4에서 6으로 변성도가 증가하면서 점차 기질과 콘드롤의 경계가 재결정작용에 의해 모호해지며 화학적 평형이 진행되어 감람석의 Fa함량 등이 점차 균질해진다. 연구시료 중 O-콘드라이트의 경우 모두 암석학적 유형4이상의 열변성작용을 받았다. 연구 시료 중 1차 및 2차 탐사에 의해 발견된 O-콘드라이트의 변성온도는 한장미와 최변각(2009)에 의해 보고된 바 있다. EL 그룹인 TIL 07009는 재결정 작용에 의해 콘드롤 조직이 완전히 지워졌기 때문에 유형-6으로 분류하였다.

### 3.2.5 콘드라이트의 산소동위원소 조성

세 콘드라이트 대그룹은 산소동위원소 전암 조성에서도 뚜렷한 차이를 보인다.  $\Delta^{17}\text{O}$ 값이 O-대그룹은 양의 값을 C-대그룹은 음의 값을(CI그룹 예외) 가지며, E-대그룹은 "0" 또는 이에 매우 가까운 값을 가진다(Clayton *et al.*, 1984, 1991; Clayton and Mayeda, 1999; 최변각, 2008). 연구 시료 중 O-콘드라이트로 분류된 운석들은  $\Delta^{17}\text{O}$ 값이 +0.52%에서 +1.17%이며, C-콘드라이트로 분류된 운석들은 -2.07%(CM 그룹) 또는 -4.35%(CV그룹)로 기존 연구 결과와 잘 일치하며, 유일한 E-콘드라이트인 TIL 07009(EL6)

**Table 2.** Bulk oxygen isotopic compositions in ‰ (relative to SMOW) of the Antarctic meteorites in this study.

Class or Clan	Name <sup>1</sup>	group (+type)	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{17}\text{O}$	$\Delta^{17}\text{O}$	Institute <sup>2</sup>
ordinary chondrite	TIL 06005	H4	3.84	2.73	0.74	KOPRI
	TIL 06001	H5	3.76	2.77	0.81	KOPRI
	TIL 08002	H5	3.02	2.33	0.76	KOPRI
	TIL 08005	H5	4.23	2.94	0.71	KOPRI
	TIL 08006	H5	4.37	3.11	0.81	KOPRI
	TIL 07001	H6	3.72	2.66	0.70	KOPRI
	TIL 07015	H6	4.11	2.83	0.66	KOPRI
	TIL 07005	H6	3.82	2.59	0.58	KOPRI
	TIL 07004	H6	3.48	2.35	0.52	KOPRI
	TIL 07011	H6	3.91	2.58	0.55	KOPRI
	TIL 08008	H6	3.28	2.47	0.74	KOPRI
	TIL 07002	L5	4.57	3.40	0.99	KOPRI
	TIL 06004	L5	4.66	3.55	1.12	KOPRI
	TIL 07010	L5	4.96	3.67	1.09	KOPRI
	TIL 07006	L5	4.50	3.32	0.95	KOPRI
	TIL 07013	L5	4.84	3.38	0.86	KOPRI
	TIL 06003	L6	4.52	3.47	1.12	KOPRI
	TIL 06002	L6	5.67	4.12	1.17	KOPRI
	TIL 08001	L6	4.67	3.66	1.20	KOPRI
	TIL 08003	L6	4.60	3.63	1.20	KOPRI
carbonaceous chondrite	TIL 07008	CM2	9.66	1.79	-2.14	UCLA
	TIL 07007	CV3	-0.14	-4.42	-4.35	UCLA
Enstatite chondrite	TIL 07009	EL6	4.21	2.21	0.00	KOPRI
HED	TIL 07014	eucrite	5.27	2.51	-0.22	UCLA
			4.27	2.05	-0.20	UCLA
pallasite	TIL 07016	pallasite	3.31	1.57	-0.18	UCLA
acapulcoite-lodranite	TIL 07012	acapulcoite	4.20	0.98	-1.20	UCLA

는  $\Delta^{17}\text{O}$ 값이 0.00‰로 정확히 지구분별선 위에 도시된다(표 2, 그림 5).

Clayton *et al.* (1991)에 의해 분석된 평형화된 O-콘드라이트 즉, 암석학적 유형-4 이상인 H, L, LL 콘드라이트의  $\Delta^{17}\text{O}$  평균값은 각각 0.73‰, 1.07‰, 1.26‰이며, Ahn(2009)에 의해 레이저 불화방식으로 얻어진 평균값은 각각 0.82‰, 1.19‰, 1.33‰이다. 산소동위원소 조성의 경우 연구 시료 중 H그룹은  $\Delta^{17}\text{O}$ 값이 +0.52‰~+0.81‰이며, L 그룹은 +0.86‰~+1.17‰의 범위를 갖는다(표 2). 연구결과는 기존에 측정된 H와 L 그룹과 대체적으로 잘 일치하지만(그림 5b), TIL 06002(L6)의 경우  $\delta^{18}\text{O}$ 값이 상대적으로 커서 추가적인 분석을 요구한다. TIL 08002(H5)는  $\delta^{18}\text{O}$ 값이 다소 낮게 측정되었는데, 이는 남극에서 형성된 산화물이 산처리 과정에서 완전히 제

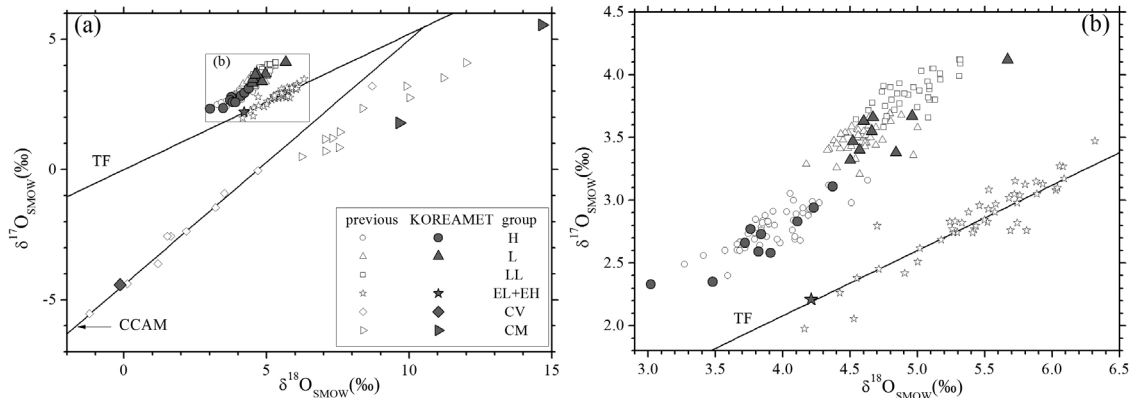
거되지 않았기 때문으로 추정된다.

CM 콘드라이트인 TIL 07008과 CV 콘드라이트인 TIL 07007의 산소동위원소 조성은 알려진 CM 그룹과 CV 그룹의 조성 범위와 잘 일치한다(그림 5a). TIL 07008에 대한 두 번의 분석 결과 중  $\delta^{18}\text{O}$ 값이 낮은 것은 분석에 앞서  $\text{F}_2$ 로 표면 오염을 제거한 경우이며, 높은 것은 전처리 과정 없이 분석한 것이다.  $\text{F}_2$  또는  $\text{BrF}_5$ 는 상온에서 무수광물과는 반응하지 않지만 함수광물과는 반응하는 것으로 알려져 있다. 두 시료의 값의 차이는 이를 반영하는 것으로 생각된다.

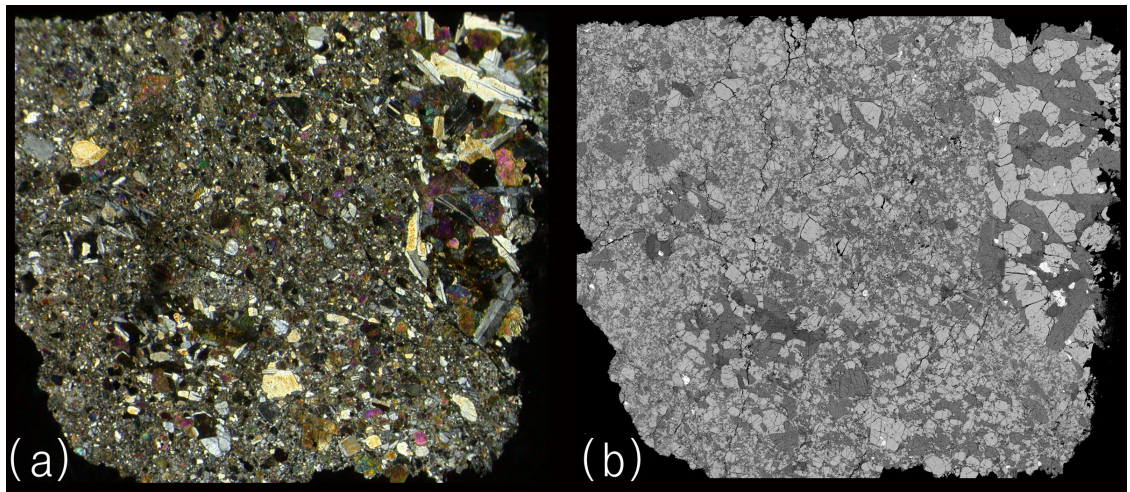
### 3.3 분화운석 및 분화된 시원운석의 분류 및 특징

분화운석에는 소행성 기원의 분화된 석질운석, 소행성 기원의 석철질 운석, 소행성 기원인 철운석,





**Fig. 5.** Oxygen isotopic compositions of chondrites. Previous data are shown as open symbols and KOREAMET chondrites as closed symbols. Among previous data only falls and acid-treated finds are plotted. Terrestrial mass fractionation (TF) line and carbonaceous chondrites anhydrous mineral (CCAM) line are shown as reference. See text for the sources of data.



**Fig. 6.** Cross polar image (a) and back scattered electron image (b) of the eucrite, TIL 07014 showing polymictic breccia texture. Relatively coarse-grained part at the upper right corner is a gabbroic clast consists with pyroxene (light gray) and plagioclase (dark gray). Width of each image is ~ 1 cm.

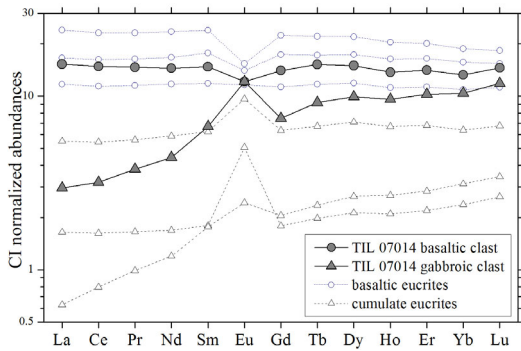
행성 기원인 화성운석(martian meteorites), 달운석 (lunar meteorites) 등이 포함되며, 본 연구에서는 소행성 기원의 분화된 석질운석 중 유크라이트, 소행성 기원의 석철질 운석인 팔라사이트가 발견되었다.

### 3.3.1 유크라이트

유크라이트는 피저나이트(pigeonite)와 사장석으로 이루어져 있으며 소량의 실리카, 티탄철석, 크롬철석 등을 포함하고 있다. 유크라이트는 주로 사방회석으로 구성된 디오제나이트(diogenite)와 성

인적으로 관련이 있는 것으로 알려져 있으며, 유크라이트와 디오제나이트가 섞여 있는 각력암인 하워드다이트(hawardite)와 함께 HED-중그룹으로 묶여 있다(최변각, 2009).

TIL 07014는 주로 휘석과 장석이 각각 거의 50% 씩 산출되며, 부성분 광물로는 소량의 실리카(SiO<sub>2</sub>)와 티탄철석 그리고 매우 드물게 철-니켈 금속과 저어콘 및 바델리아이트(baddeleyite) 등이 발견된다(박창근, 2009). 유크라이트는 비교적 세립질이며 오피틱 조직(ophtic texture)을 보이는 현무암과 비교



**Fig. 7.** CI normalized REE patterns of the eucrite, TIL 07014 along with selected previous data from known cumulate eucrites (Binda, Moore County, and Serra de Mage) and basaltic eucrites (Stannern, Nuevo Laredo and Juvinas). Note that the basaltic clast of TIL 07014 has similar REE pattern with the previously studied basaltic eucrites, while the gabbroic clast of TIL 07014 has similar pattern with the cumulate eucrites. The data are from Park (2009) for TIL 07014 and Barrat *et al.* (2000, 2007) and Lodders (2003) for the others.

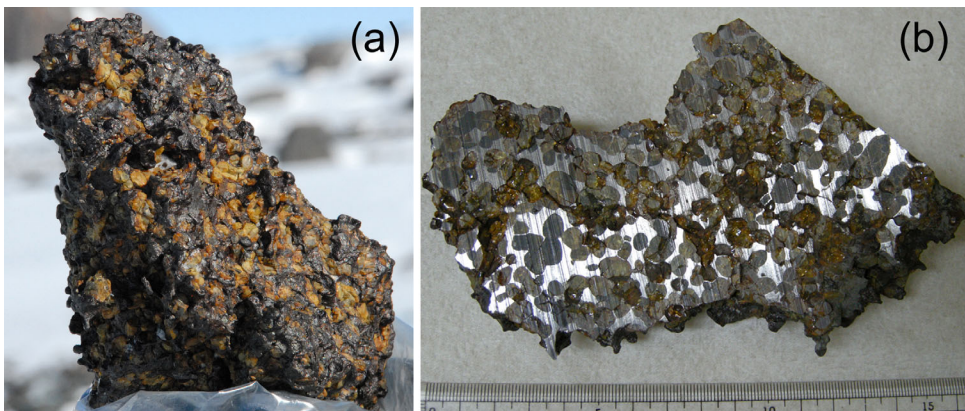
적 조립질이며 집적암 조직(cumulate texture)를 보이는 반러암으로 구분된다. TIL 07014는 이들 두 종류 암석이 섞여 있는 각력암이다(그림 5). 현무암질 유크라이트와 반러암질 유크라이트는 미량원소 함량에 있어서 서로 다른 것으로 알려져 있다(e.g. Barrat *et al.*, 2000, 2007). TIL 07014에서 현무암질 암편과 반러암질 암편을 따로 분리하여 유도결합플라즈마 질량분석기로 미량원소 함량을 측정하였다.

현무암질 암편은 기존의 현무암질 유크라이트와 반러암질 암편은 기존의 반러암질 유크라이트와 희토류원소 함량분포가 일치한다(그림 6).

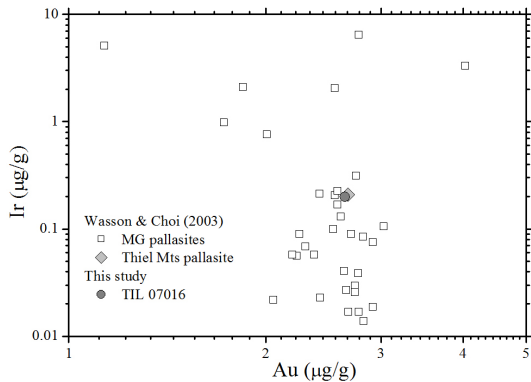
### 3.3.2 팔라사이트

감람석과 철-니켈 금속이 비슷한 비율로 섞여 있는 운석인 팔라사이트는 MG-팔라사이트(main group pallasites), ES-팔라사이트(Eagle Station pallasites)로 구분되며, 서로 산소동위원소 조성 및 철-니켈 금속 내 친철원소의 함량 범위가 다르다(Wasson and Choi, 2003).

그림 8은 남극 현지에서 발견 당시 촬영한 팔라사이트 TIL 07016 외형 사진(그림 8a)과 절단면 사진(그림 8b)이다. 감람석과 철-니켈 금속이 거의 비슷한 부피비로 섞여 있다. TIL 07016과 TIL 08004은 두 운석은 지리적으로 매우 가까운 곳에서 1년의 시간 간격을 두고 발견되었으며 모두 MG-팔라사이트에 속한다. 티엘 산맥에서는 티엘 마운틴(Thiel Mountains)이라고 명명된 팔라사이트가 1962년 미국 지질학자에 의해 발견된 적이 있는데, 이들 세 팔라사이트는 모두 같은 운석의 서로 다른 파편인 것으로 보인다. 이를 검증하기 위해 TIL 07016의 철-니켈 금속 내 친철원소 함량을 측정하여 티엘 마운틴 팔라사이트와 비교하였다(그림 9). 팔라사이트의 친철원소 함량은 비교적 폭넓은 범위를 보이는데, TIL 07016과 티엘 마운틴 팔라사이트는 서로 매우 유사한 조성을 갖는 점과 암석학적 유사성, 발견 위치 등을 고려하면 같



**Fig. 8.** Photos of the pallasite, TIL 07016, taken at the sampling location (a) and after cutting (b). Olivine is the olive green to yellowish phase with round shape and Fe-Ni metal appears as black color in meteorite surface due to rusting (a) and as bright gray with metallic luster at the cutting surface (b).



**Fig. 9.** Ir and Au contents in the metallic part of the pallasite, TIL 07016 along with those in the previously studied pallasites(Wasson and Choi, 2003). Note that TIL 07016 has very similar composition with the Thiel Mountains pallasite.

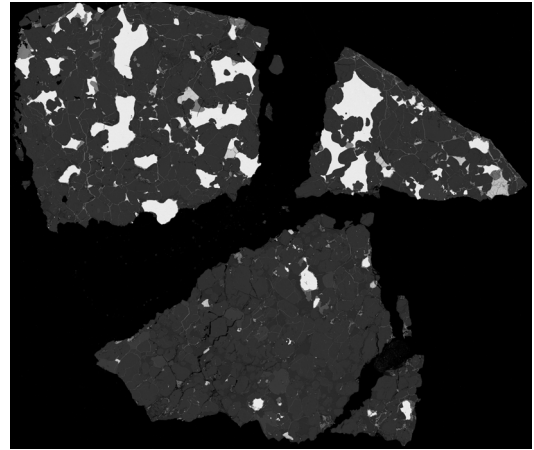
은 운석의 서로 다른 파편일 것으로 추측할 수 있다. TIL 08004에 대해서는 친철원소 함량은 측정하지 않았지만 구성 광물비, 크기, 조직이 나머지 두 팔라사이트와 매우 유사하다.

### 3.3.3 아카폴코아이트

콘드라이트의 조직이 보이지 않으나 화학적으로는 콘드라이트와 크게 다르지 않은 운석들을 분화된 시원운석으로 분류한다(Prinz *et al.*, 1983). 이들 운석은 광물 조합과 모드 조성이 콘드라이트와 유사하지만 콘드롤이 관찰되지 않으며 특징적으로 재결정 조직(recrystallized texture) 또는 등립질 조직을 보인다.

아카폴코아이트와 로드라나이트(Iodranites)는 광물조합, 화학조성, 동위원소 조성이 서로 유사하다. 아카폴코아이트는 200µm 내외의 등립질 광물(감람석, 휘석, 사장석, 철-니켈 금속, 트로일라이트)로 이루어진 암석이며, 로드라나이트는 상대적으로 조립질(600µm 내외)의 감람석과 휘석으로 주로 구성되어 있으며 사장석과 트로일라이트가 거의 산출되지 않는다.

TIL 07012는 감람석, 휘석, 사장석, 철-니켈 금속, 트로일라이트, 크롬철석 등으로 구성되어 있으며 구성광물의 크기가 약 100µm~700µm 정도로 전형적인 아카폴코아이트와 로드라나이트의 중간 정도이다. TIL 07012는 광물조합과 크기가 매우 불균질하



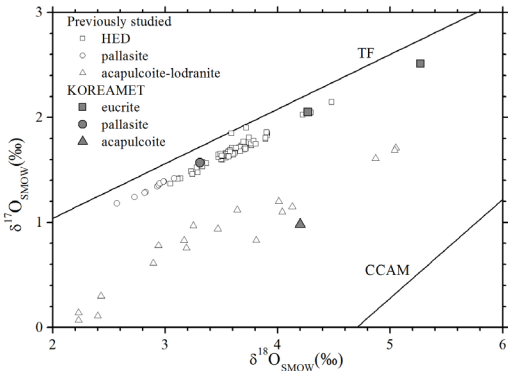
**Fig. 10.** Back scattered electron image of the acapulcoite, TIL 07012, consists of olivine, pyroxene, plagioclase, Fe-Ni metal, troilite and chromite. Widths of image is ~1.4 cm (b).

여 철-니켈 광물이 많고 사장석이 거의 산출되지 않는 부분과 철-니켈 광물의 양이 적고 사장석이 풍부하게 산출되는 부분으로 구분되며, 각각은 구성광물의 크기에서도 차이를 보인다(그림 10).

아카폴코아이트와 로드라나이트는 모두 부분용융을 경험한 것으로 해석되며, 용융 온도의 차이가 두 그룹 운석의 암석학적 특징을 다르게 만든 것으로 해석되고 있다. 아카폴코아이트는 상대적으로 낮은 온도에서 부분용융을 경험하여 트로일라이트와 사장석의 결핍이 거의 일어나지 않은 반면, 로드라나이트는 좀 더 높은 온도를 경험한 후 트로일라이트와 사장석 성분이 액상으로 분리된 것으로 해석한다(McCoy *et al.*, 1993; Rubín, 2007). 따라서 두 그룹의 암석학적 특징은 명확히 구분되는 것이 아니라 연속적으로 변하며 두 그룹 중간적인 성질을 갖거나 두 그룹의 특징을 일부씩 갖는 운석들도 존재한다(Rubín, 2007). TIL 07012(그림 10)는 아카폴코아이트와 로드라나이트의 특징을 모두 보이거나 중간적인 성격을 갖지만, 사장석 함량이 높아 아카폴코아이트로 분류하였다.

### 3.3.4 유크라이트, 팔라사이트, 아카폴코아이트의 산소동위원소 조성

유크라이트 TIL 07014, 팔라사이트 TIL 07016, 아카폴코아이트 TIL 07012의 산소동위원소 조성을 기



**Fig. 11.** Oxygen isotopic compositions of eucrite, pallasite and acapulcoite of this study along with previous reported data using Laser fluorination techniques (Greenwood *et al.*, 2006; Wiechert *et al.*, 2004; Rubin, 2007)

존에 보고된 자료 중 레이저 불화방식을 이용한 값과 함께 그림 11에 나타내었다.

유크라이트와 팔라사이트는 분화운석이므로 동위원소 평형에 도달하여  $\Delta^{17}\text{O}$  값이 그룹 내에서 상대적으로 균질한 반면, 부분용융을 경험한 아카폴코아이트의 경우 완전한 동위원소 평형에 도달하지 못하여  $\Delta^{17}\text{O}$  값이 다소 분산되어 나타난다(Greenwood *et al.*, 2006; Wiechert *et al.*, 2004; Rubin, 2007).

Greenwood *et al.* (2006)은 HED-중그룹 운석과 팔라사이트의 산소동위원소 조성을 레이저 불화방식을 이용하여 분석하였다: HED-중그룹의  $\Delta^{17}\text{O}$  값은 평균  $-0.24\%$  ( $-0.25 \sim -0.20$ )이며, 팔라사이트는 이보다 다소 높아 평균  $-0.18\%$  ( $-0.19 \sim -0.17$ )이다. 유크라이트 TIL 07014의  $\Delta^{17}\text{O}$  값은  $-0.20\%$  및  $-0.22\%$ 이며, 팔라사이트 TIL 07016은  $-0.18\%$ 로 Greenwood *et al.* (2006)의 범위와 잘 일치한다. 레이저불화방식으로 분석된 기존의 아카폴코아이트-로드라나이트의  $\Delta^{17}\text{O}$  값은 평균  $-0.95\%$  ( $-1.15 \sim -0.74$ )인 반면, TIL 07012는  $-1.20\%$ 로 다소 낮게 나타났다.

**4. 요약 및 결론**

총 29점의 제 1,2,3차 대한민국남극운석을 암석학적 특징을 이용하여 분류하고 기본적인 암석학적, 지구화학적 특징을 살펴보았다. 콘드라이트에 대해서는 충격변성 작용의 정도, 풍화단계를 구분하였으며, 암석학적 유형에 따라 분류하였다. 전암 산소동

위원소 조성을 측정하여 분류 결과를 검증하고 기존 연구 결과와 비교하였다. 이를 요약하면 아래와 같다.

(1) 가장 흔한 운석인 O-콘드라이트가 20개 발견되었으며, C-콘드라이트 4개, E-콘드라이트 1개가 발견되어 콘드라이트는 총 25개이다.

(2) 분화운석인 유크라이트 1개와 팔라사이트 2개가 발견되었으며, 분화된 시원운석인 아카폴코아이트가 1개 발견되었다.

(3) O-콘드라이트는 11개의 H그룹과 9개의 L그룹으로 분류되며 모두 암석학적 유형-4이상의 열변성작용을 경험하였다.

(4) C-콘드라이트는 CV3와 CM2가 각각 두 개씩 발견되었으며 각 그룹의 운석은 발견 위치와 암석학적 특징의 유사성으로 미루어 같은 운석의 서로 다른 파편으로 생각된다.

(5) E-콘드라이트는 알라반다이트가 산출되며, 콘드룰 조직이 거의 남아있지 않고 광물들이 재결정화되어 EL6로 분류하였다.

(6) 유크라이트는 현무암질 유크라이트와 반려암질 유크라이트가 소행성 간의 충돌에 의해 섞인 각력암이다.

(7) 팔라사이트 TIL 07016과 08004는 티엘 산맥에서 발견된 또 다른 팔라사이트인 티엘 마운틴 팔라사이트와 암석학적 특징, 친철원소 함량이 거의 유사하므로 같은 운석의 다른 파편으로 생각된다.

(8) TIL 07012는 아카폴코아이트와 로드라나이트의 특징을 함께 갖고 있지만, 높은 사장석 함량 때문에 아카폴코아이트로 분류하였다. 아카폴코아이트와 로드라나이트를 구분하는 것은 큰 의미가 없는 것으로 생각된다.

**사 사**

이 논문을 위해 조언을 아끼지 않으신 한국지질자원연구원의 이승렬 박사와 이승렬 박사에게 깊이 감사드린다. TIL 07014 팔라사이트의 친철원소 함량을 분석해준 UCLA의 John T. Wasson 교수께 깊이 감사드린다. 연구는 2009년 한국해양연구원 부설 극지연구소 위탁연구과제(최변각), 2009년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2009-0086316, 최변각) 및 극지연구소 일반사업의 지원(PP09030, 이종익)을 받아 수행되었다.

## 참고문헌

- 박창근, 2009, 유크라이트 TIL 07014의 변성 및 각력화 작용. 서울대학교 석사학위 논문. 70 p.
- 최변각, 2008, 태양계 구성물질의 산소동위원소 조성. 지질학회지 44, 541-556.
- 최변각, 2009, 운석의 분류와 암석학적, 지구화학적 특징. 지질학회지 45, 173-186.
- 한장미, 최변각, 2009, 제 1, 2차 대한민국 남극운석 탐사에 의해 수집된 O-콘드라이트의 변성온도. 지질학회지 45, 157-171.
- Ahn, I., 2009, Oxygen isotope compositions of ordinary chondrites using CO<sub>2</sub> laser BrF<sub>3</sub> fluorination technique. Ph.D dissertation. Seoul National University. 133 p.
- Barrat, J. A., Blichert-Toft, J., Gillet, P., and Keller, F., 2000, The differentiation of eucrites: The role of in situ crystallization. *Meteoritics and Planetary Science* 35, 1087-1100.
- Barrat, J. A., Yamaguchi, A., Greenwood, R. C., Bohn, M., Cotten, J., Benoit, M., and Franch, I. A., 2007, The Stannern trend eucrites: Contamination of main group eucritic magmas by crustal partial melts. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 71, 4108-4124.
- Clayton, R. N. and Mayeda, T. K., 1999, Oxygen isotope studies of carbonaceous chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63, 2089-2104.
- Clayton, R. N., 1993, Oxygen isotopes in meteorites. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 21, 115-149.
- Clayton, R. N., Mayeda, T. K. and Rubin, A. E., 1984, Oxygen isotopic compositions of enstatite chondrites and aubrites. *Proceedings Lunar and Planetary Science Conference* 15, C245-C259.
- Clayton, R. N., Mayeda, T. K., Goswami, J. N. and Olsen, E. J., 1991, Oxygen isotope studies of ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55, 2317-2337.
- Gonfiantini, R., Stichler, W., Rozanski, K., 1998, Reporting of stable carbon, hydrogen, oxygen isotopic abundances. *Proceedings of a consultant meeting, Vienna, IAEA-TECDOC-825*, pp. 13-29.
- Greenwood, R. C., Franchi, I. A., Jambon, A., Barrat, J. A., Burbine, T. H., 2006, Oxygen isotope variation in stony-iron meteorites. *Science*, 313, 1763-1765.
- Keil, K., 1968, Mineralogical and chemical relationships among enstatite chondrites. *Journal of Geophysical Research* 73, 6945-6976.
- Lodders, K., 2003, Solar system abundances and condensation temperatures of the elements. *The Astrophysical Journal* 591, 1220-1247.
- McCoy, T. J., Keil, K., Clayton, R. N., Mayeda, T. K., 1993, Classificational parameters for acapulcoites and lodranites: The case of FRO 90011, EET 84302 and ALH A81187/84190 (abstract). *Lunar and Planetary Science Conference XXIV*, 945-946.
- Prinz, M., Nehru, C. E., Delaney, J. S. and Weisberg, M., 1983, Silicates in IAB and III CD irons, winonaites, lodranites and Brachina: a primitive and modified-primitive group (abstract). *Lunar and Planetary Science XIV*, 616-617.
- Patze, A., Hill, D. H., and Oynton, W. V., 2004, Evolution and classification of acapulcoites and lodranites from a chemical point of view. *Meteoritics and Planetary Science* 39, 61-85.
- Rubin, A. E., 2005, Relationships among intrinsic properties of ordinary chondrites: Oxidation state, bulk chemistry, oxygen-isotopic composition, petrologic type, and chondrule size. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69, 4907-4918.
- Rubin, A. E., 2007, Petrogenesis of acapulcoites and lodranites: A shock-melting model. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 71, 2383-2401.
- Sears, D. W. G., Kallemeyn, G. W., and Wasson, J. T., 1982, The compositional classification of chondrites: II. The enstatite chondrite groups. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 46, 597-608.
- Stöffler, D., Keil, K. and Scott, E. R. D., 1991, Shock metamorphism of ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55, 3845-3867.
- Van Schmus, W. R. and Wood, J. A., 1967, A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31, 747-765.
- Wasson, J. T. and Choi, B.-G., 2003, Main-group pallasties - chemical composition, relationship to IIIAB irons, origin. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67, 3079-3096.
- Weisberg, M. K., McCoy, T. J. and Krot, A. N., 2006, Systematics and evolution of meteorite classification. In: Lauretta D. S. and McSween H. Y. (eds), *Meteorites and the Early Solar System II*. University of Arizona Press, 19-52.
- Wiechert, U. H., Halliday, A. N., Palme, H., and Rumble, D., 2004, Oxygen isotope evidence for rapid mixing of the HED meteorite parent body. *Earth and Planetary Science Letters* 221, 373-382.
- Wlotzka, F., 1993, A weathering scale for the ordinary chondrites (Abstracts). *Meteoritics*, 28, 460.

---

투 고 일 : 2009년 12월 10일

심 사 일 : 2009년 12월 10일

심사완료일 : 2009년 12월 24일