

## 미분화운석 내 콘드룰의 이심률 및 배열 경향성 분석

Analysis of Eccentricity and Preferential Orientation of Chondrules in Chondrites

김효임, 최정은, 한장미\*, 최변각

서울대학교 지구과학교육과 (hjmkg74@snu.ac.kr)

### 1. 서론

미분화운석(primitive meteorites)인 콘드라이트(chondrites)는 태양계 성운에서 형성된 콘드룰(chondrules), CAIs(Ca-Al-rich inclusions), 세립질의 기질(matrix) 등이 집적되어 만들어진 암석이다. 이 중 콘드룰은 지름이 1mm 내외인 구형 또는 타원체형 암석 구슬로서 주로 감람석, 휘석 등 규산염 광물과 사장석 성분의 유리질 물질 및 철-니켈 금속 광물, 트로일라이트(troilite, FeS) 등으로 이루어져 있다. 대부분의 콘드룰은 용융체에서 급랭되어 형성되었다는 증거를 보인다(Wasson, 1993). 성운에서 형성된 1mm 내외의 액체 방울(liquid droplet)은 표면장력에 의해 거의 완벽한 구형을 보일 것으로 기대되지만 실제 콘드룰은 구형, 타원체형, 불규칙한 모양 등 다양한 형태로 산출되며(e.g., Zanda, 2004), 일부 콘드라이트에서는 타원체형의 콘드룰이 특정한 방향으로 배열되어 있는 것으로 알려져 있다(Dodd, 1965; Cain et al., 1986; Sneyd et al., 1988).

본 연구에서는 콘드라이트의 연마박편에서 관찰되는 콘드룰의 면적, 장축, 단축을 측정하여 콘드라이트 종류에 따른 콘드룰의 평균 이심률을 알아보고, 신장되어 있는 콘드룰에 대해서는 장축이 임의의 방향에 대해 놓이는 각도를 측정하여 배열 경향성을 분석하고자 하였다.

### 2. 분석 시료 및 방법

콘드룰의 이심률과 배열 경향성 분석을 위해 5개의 O-콘드라이트, 3개의 C-콘드라이트, 1개의 E-콘드라이트를 분석하였다(표 1). 기존에 제작된 연마박편을 이용하였기 때문에 연마박편의 잘린 면은 콘드룰의 구조적인 방향성과는 무관한 임의의 방향이다.

서울대학교 지구과학교육과의 주사전자현미경(JEOL JSM-6380A)을 이용하여 각 콘드라이트의 후방산란전자영상(Back-Scattered Electron Images, BSE images)을 얻고 그래픽 프로그램을 이용하여 각 시료 내 콘드룰의 경계를 구분하였다. 또한 Java 기반 프로그램인 Image J를 이용하여 경계가 구분되어진 콘드룰을 타원 또는 원으로 근사하여 콘드라이트의 단면에서 보이는 콘드룰의 면적, 장축, 단축, 그리고 각 콘드룰의 배열 각도 등의 정보를 구하였다. 단, 콘드룰의 경계가 불명확한 경우와 콘드룰의 파편은 분석 대상에서 제외하였다.

Table 1. List of chondrites studied.

name	find/fall	class		shock stage	weathering grade	area (mm <sup>2</sup> )
<b>Dhofar212</b>	find	OC	H3.9	S2	W3	57
<b>Ghubara</b>	find		L5	S4	W2	170
<b>TIL07006</b>	find		L5	S3	W1	201
<b>TIL07010</b>	find		L5	S3	W1	219
<b>NWA539</b>	find		LL3.5	S2	W1	143
<b>Allende</b>	fall	CC	CV3.9	S1	-	335
<b>TIL07007</b>	find		CV3	S2	W1	266
<b>Kainsaz</b>	fall		CO3.2	S1	-	136
<b>Yamato691</b>	find	EC	EH3	-	-	231

### 3. 결과 및 논의

#### 3.1. 콘드룰의 크기

콘드룰의 평균 크기는 그룹에 따라 다르다(Rubin, 2000; Scott and Krot, 2003; Zanda, 2004). 본 연구에서도 이런 사실을 관찰할 수 있는데, 콘드룰의 평균 크기는 CV 그룹인 Allende와 TIL07007에서 가장 커 각각 장축(major axis) 직경이 0.79mm와 1.13mm이며, CO 그룹에 속하는 Kainsaz에서 0.17mm로 가장 작았다(평균 크기에 따른 비교: Kainsaz < Yamato691 < Dhofar212 < Ghubara, TIL07006, TIL07010, NWA539 < Allende, TIL07007). 이는 기존에 보고된 그룹에 따른 콘드룰의 크기와 대체로 일치한다. O-콘드라이트 내에서는 H-L-LL 그룹 순으로 콘드룰의 크기가 커지는 것으로 알려져 있는데(Weisberg et al., 2006), 본 연구에서 사용한 운석은 H 그룹과 L-LL 그룹 간의 콘드룰 크기 차이는 명확히 구분되나 L 그룹과 LL 그룹 간의 콘드룰 크기는 비교적 비슷하게 나타났다(표 2).

Table 2. Averages of area, size, eccentricity, and elongation angle of chondrules in thin sections.

name	no. of chondrules	area (mm <sup>2</sup> )	size (mm)		eccentricity	elongation angle		
			major axis	minor axis		mean	SD	SE
<b>Dhofar212</b>	243	0.11	0.36	0.25	0.67	82	51	3
<b>Ghubara</b>	184	0.32	0.68	0.46	0.72	103	35	3
<b>TIL07006</b>	389	0.27	0.63	0.46	0.64	76	53	3
<b>TIL07010</b>	434	0.11	0.40	0.28	0.67	81	63	3
<b>NWA539</b>	231	0.24	0.54	0.40	0.64	93	57	4
<b>Allende</b>	164	0.49	0.79	0.61	0.59	83	50	4
<b>TIL07007</b>	170	0.75	1.13	0.67	0.75	80	30	2
<b>Kainsaz</b>	2363	0.02	0.17	0.12	0.66	89	57	1
<b>Yamato691</b>	755	0.06	0.25	0.18	0.67	101	45	2

### 3.2. 콘드룰의 이심률 및 배열 경향성

콘드룰의 이심률의 평균값은 0.59에서 0.75까지 나타난다. 즉, 대부분의 콘드룰 단면은 원형이 아닌 타원형이다. 분석된 운석 중 Ghubara (L5)와 TIL07007 (CV3)에서 평균 이심률이 각각 0.72, 0.75로 가장 크며, Allende (CV3)가 0.59로 가장 작다(표 2). 그리고 Allende, Kainsaz, Yamato691 등에는 완벽하게 원형( $e=0$ )을 이루는 콘드룰도 일부 존재한다.

콘드룰의 배열 경향성은 평균 배열 각도에 대한 표준편차 분포에서 알 수 있다. 이심률이 가장 큰 TIL07007과 Ghubara는 표준편차가 작아 콘드룰의 배열 경향성이 뚜렷함을 알 수 있다. 이 두 운석 내 콘드룰의 배열 경향성은 후방산란전자영상에서도 쉽게 확인된다. 반면 TIL07010의 경우 콘드룰의 배열 각도의 표준편차가 가장 크게 나타나는 것을 통해 TIL07010 내 콘드룰이 다른 운석에 비해 가장 무작위로 배열되고 있음을 알 수 있다. Martin and Mills (1980)는 Allende 내 콘드룰은 매우 약한 정도의 배열 경향성조차도 관찰되지 않는다고 보고하였으나, Allende를 포함한 본 연구에서 사용된 모든 운석은 콘드룰이 특정 방향을 향해 배열되어 있는 것으로 보인다. 이 연구에서 측정된 각도는 연마박편 내에서 나타나는 임의의 방향이며 3차원이 아닌 평면을 대상으로 했으므로, 실제 콘드룰의 배열 경향성과는 다소 다를 수 있다.

이러한 콘드룰의 변형구조는 콘드룰이 집적되는 동안에 퇴적작용에 의해 남아있는 구조로 해석되거나(Dodd, 1965), 콘드라이트 모체가 형성되는 동안 상부 퇴적물의 하중에 의한 다짐 작용으로 해석되기도 한다(Martin and Mills, 1980). 또는 콘드룰 기원물질이 아직 액체 상태 일 때, 충격파에 의해 발생한 빠른 속도의 기체 흐름이 기원물질을 기체 흐름에 대해 수직적으로 회전하게 만들었고 이로 인해 콘드룰이 길게 신장하였다고 해석한다(Tsuchiyama et al., 2003; Miura et al., 2008).

그림, 열변성정도, 충격변성정도 등이 서로 다른 모든 콘드라이트에서 콘드룰이 신장되어 있으며 동시에 특정한 방향으로 배열되어 있는 경향성을 관찰할 수 있다는 것은 이런 구조적인 변형을 일으킨 과정이 특정 콘드라이트에 국한된 현상이 아닌 모든 콘드라이트 모체에서 폭넓게 일어난 현상임을 지시한다.

### 참고문헌

- Cain, P.M., McSween Jr., H.Y. and Woodward, N.B. (1986) *Earth Planet. Sci. Lett.* 77, 165-175.
- Dodd Jr., R.T. (1965) *Icarus*. 4, 308-316.
- Martin, P.M. and Mills, A.A. (1980) *Earth Planet. Sci. Lett.* 51, 18-25.
- Miura, H., Nakamoto, T. and Doi, M. (2008) *Icarus*. 197, 269-281.
- Rubin, A.E. (2000) *Earth-Science Reviews*. 50, 3-27.
- Scott, E.R.D. and Krot, A.N. (2003) In: Holland, H.D. and Turekian, K.K. (Eds), *Treatise on Geochemistry - Vol. 1. Meteorites, Comets and Planets*. Elsevier. 143-200.
- Sneyd, D.S., McSween Jr., H.Y., Sugiura, N., Strangway, D.W. and Nord Jr., G.L. (1988) *Meteoritics*. 23, 139-149.
- Tsuchiyama, A., Shigeyoshi, R., Kawabata, T., Nakano, T., Uesugi, K. and Shirono, S. (2003)

Lunar Planet. Sci. 34, 1271-1272.

Wasson, J.T. (1993) *Meteoritics*. 28, 14-28.

Weisberg, M.K., McCoy, T.J. and Krot, A.N. (2006) In: Lauretta, D.S. and McSween Jr., H.Y. (Eds), *Meteorites and the Earth Solar System II*. University of Arizona Press, 19-52.

Zanda, B. (2004) *Earth Planet. Sci. Lett.* 224, 1-17.