

## 주사전자 현미경으로 관찰한 열변성, 충격변성 및 풍화작용에 따른 오디너리 콘드라이트 조직의 변화

Variation of ordinary chondrite textures by thermal/shock metamorphisms and  
weathering ; a study using scanning electron microscopy

박권태\*, 최변각

서울대학교 지구과학교육과

### 요약

본 연구에서는 미분화 운석 중 오디너리 콘드라이트를 주사전자 현미경으로 관찰하여 열변성, 충격 변성 정도, 지구상에서의 풍화 정도에 따라서 그 구성 성분과 조직이 어떤 변화를 보이는지 알아보았다. 이를 위해 15개의 오디너리 콘드라이트에 대해 각각 연마편 및 연마박편을 준비하였으며, 주사전자 현미경 사진을 이용하여 열변성 단계별로 콘드룰과 기질의 경계를 비교하였다. 열변성이 증가할수록 콘드룰과 기질의 경계는 점차 모호해 진다. 충격변성을 받았는지의 유무는 감람석을 관찰하여 비교적 쉽게 인지할 수 있다. 충격변성을 받지 않은 콘드룰 내의 감람석은 완전 소광과 불규칙적인 깨짐을 보이지만 충격변성을 받은 경우 파동소광과 규칙적인 깨짐을 보인다. 지구상에서 풍화를 받은 경우 철-니켈 금속의 산화가 가장 먼저 진행된다. 풍화에 의한 철산화물은 맥상으로 나타나거나 기존의 철-니켈 금속을 치환하여 나타난다. 철산화물에 의해 풍화를 받은 콘드라이트는 전체적으로 갈색을 띄게 된다.

**주요어** : 콘드라이트, 주사전자 현미경, 운석

### 1. 서론

운석이란 지구 밖 우주 공간을 떠돌던 고체 물질이 지구의 대기권을 뚫고 떨어진 것을 의미한다. 운석은 그 성분에 따라 철-니켈이 주성분인 철운석, 규산염 암석이 주성분인 석질 운석, 그리고 그 두 성분이 비슷한 비율로 섞여 있는 석철질 운석으로 분류 한다. 콘드라이트(Chondrite)는 석질 운석에 해당하며 콘드룰(Chondrule)이라 부르는 직경이 밀리미터 내외인 구형의 입자들이 포함되어 있는 암석이란 뜻으로 붙인 이름이다. 지각, 맨

들, 핵으로 분화된 지구와는 달리 콘드라이트는 분화를 경험하지 않은 운석이다. 따라서 콘드라이트는 태양계가 형성될 당시의 45억년 이전의 정보를 간직한 채 지구에 떨어진 암석이란 의미를 갖는다. 콘드라이트는 모체인 소행성에서 다양한 정도의 열 변성을 겪은 것으로 알려져 있다. 열변성을 가장 받지 않은 것을 타입3 으로 하고 열변성 정도가 증가할수록 타입4, 5, 6 으로 분류한다(Wasson, 1984).

태양계 형성 초기에는 지금보다 많은 수의 소행성들이 존재하였으며 소행성들은 서로 간에 많은 충돌을 겪어왔다. 콘드라이트에는 충돌의 흔적이 남아 있으며 충격변성의 단계에 따라 충격을 거의 받지 않은 것을 S0로 하고 충격변성 단계가 올라갈 수록 S1, S2, S3 등으로 분류한다(Stoffler, 1991). 운석이 지구에 떨어진 직후 발견하여 적절한 시설에서 보관한다면 지구상의 풍화를 받지 않겠지만 떨어진지 오래된 후 발견된 운석은 지구에서의 풍화를 고려해야 한다. 본 연구에 사용된 시료들은 대부분 사막에서 발견된 운석으로 지구에서의 풍화가 진행된 운석들이다. 콘드라이트의 풍화 단계는 포함된 철의 산화정도에 의해 쉽게 구별할 수 있다. 풍화받지 않은 것을 W0으로 하고 풍화가 진행될 수록 W1, W2, W3, W4로 분류한다(Bischoff, 1995).

본 연구에서는 미분화 운석인 콘드라이트를 주사전자 현미경으로 관찰하여 열변성, 충격변성, 지구상에서의 풍화정도에 따라서 그 구성 성분과 조직이 어떤 차이를 보이는가를 알아보았다.

## 2. 본론

### 2.1 시료 및 실험 방법

콘드라이트 중에서 가장 많이 발견되고 있는 오디너리 콘드라이트 중 15개에 대해 연마편과 연마 박편을 제작하였다. 표1은 연구에 사용된 시료 중 운석명이 확인된 13개의 시료에 대한 기존 연구를 통해 알려진 일반적인 정보를 정리한 것이다.

준비된 콘드라이트는 1×2×0.5cm 정도 크기로 잘라내어 에폭시에 담가 굳힌 후 두 개로 분리하여 각각 연마편과 연마박편을 제작하였다. 제작된 시료를 편광 현미경과 반사 현미경, 그리고 주사전자 현미경을 이용하여 광물조성 및 조직을 관찰하였다. 연구에 이용된 주사전자 현미경은 서울대학교 지구과학 교육과에 설치된 JEOL 6380A 모델이며 표면을 관찰하기 위한 이차전자 검출기 뿐 아니라 광물 성분 및 준정량 분석을 위한 후방 산란 전자 검출기와 X-선 검출기(EX-54175 JMU)도 부착되어 있다. 실험은 우선 후방 산란 영상을 이용하여 배율 50배 정도에서 전체적인 지도를 만들고 일부분씩 확대하여 관

찰하며 X-선을 이용한 성분 분석을 실시하였다.

Name	From	Whole Wt.(g)	Found date	Group	Type	Shock stage	Weathering	Fa (mol%)	Fs (mol%)	Wo (mol%)
S al U 066	Desert (Oman)	4670	4/30 /2000	LL	5	S2	W3	30.8	26.5	2.1
Dhofar231	Desert (Oman)	1780	1/15 /2001	H	4	S2	W3	17.9	17.1	
Dhofar212	Desert (Oman)	1456	4/27 /2000	H	3.9	S2	W3	17.0 (11.4-18.3)	16.7 (14.9-19.1)	
Dhofar010	Desert (Oman)	3527.6	12/5 /1999	H	6	S3	W3	18.7	17.7	
Dhofar273	Desert (Oman)	2085	4/4 /2001	L	5	S4	W3	23.1	20.5	1.5
Dhofar283	Desert (Oman)	1788	4/10 /2001	H	6	S3	W3/4	18.9	18.6	1.7
Dhofar316	Desert (Oman)	3215	12/12 /2001	L	6	S1	W1	24.8	21.2	1.6
Dhofar317	Desert (Oman)	2897	12/14 /2001	L	5	S4	W1	24.3	21.6	1.6
J al H003	Desert (Oman)	10830	8/2 /1999	L	5	S3	W4	24.6	22.2	
DaG 353	Libya	210	//1997	H	3-5	S3	W3	17.2 (6.6-22.5)	13.8 (7.9-16.1)	
Dhofar269	Desert (Oman)	2006	1/26 /2000	H	5	S4	W3	17.8	17	0.8
Dalgety Downs	Australia		//1941	L	4					
Dhofar274	Desert (Oman)	2475	4/7 /2001	L	6	S3	W0/1	24.1	21.7	1.5

표 1. (Data sources: Grady(2000), Grossman(1998), Russell(2002) and Meteoritical Bulletin, 87)

## 2.2 관찰 결과

콘드라이트는 타입이 증가할수록 즉, 높은 온도에서 열변성을 받을수록 콘드롤과 기질의 경계가 흐려지는 것으로 알려져 있다. 본 연구에 사용된 주사전자 현미경은 영상을 빠르게 고배율로 얻을 수 있으므로 콘드롤의 타입에 따른 경계를 관찰하였다. 오디너리 콘드라이트는 다시 H, L, LL 그룹으로 세분 할 수 있다. H, L 그룹에서 타입에 따른 콘드롤의 모양을 관찰 하였으며 그 모양은 그림 1 과 같다.

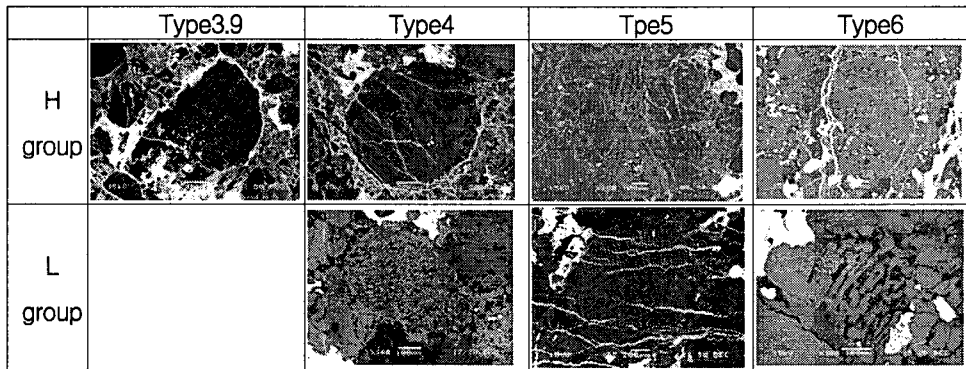


그림 1. 타입에 따른 콘드롤의 비교. (H3.9:Dhofar212, H4:Dhofar231, H5:Dhofar269 H6:Dhofar283, L4:Dalgety Downs, L5:Dhofar273, L6:Dhofar274)

콘드라이트는 소행성간의 충돌의 흔적을 간직하고 있고 그 증거는 편광현미경을 이용한 감람석 관찰을 통해 비교적 쉽게 확인할 수 있다. 그림 2의 A에서 충격변성을 받지 않은 감람석은 불규칙적인 깨짐과 완전소광을 보인다. 하지만 B의 충격변성을 받은 감람석은 규칙적인 모자이크 모양의 깨짐과 파동소광을 보인다.

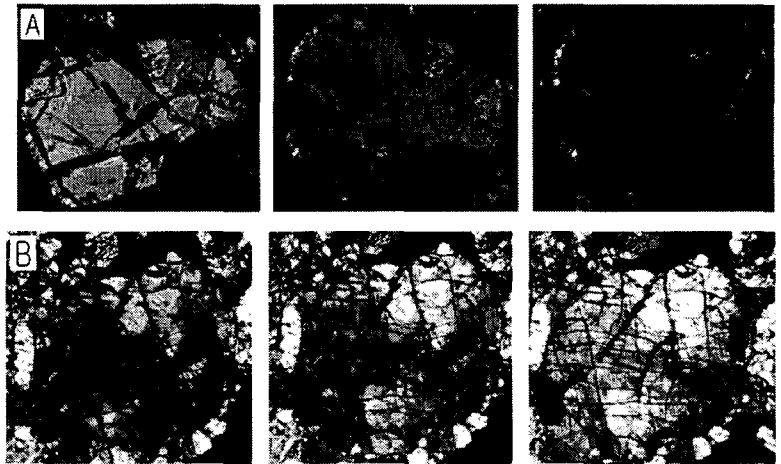


그림 2. 충격변성에 따른 감람석의 소광과 깨짐의 비교.

본 연구에 사용된 시료들은 상당수가 사막에서 발견된 것이다. 따라서 이런 시료들은 지구상에서의 풍화가 비교적 많이 진행 되었다. 풍화가 진행되면 콘드라이트내의 금속 철, 트로일라이트(FeS)은 철산화물(Fe-oxide)로 변한다. 그림 3에 풍화 단계별로 금속 철 주변의 철산화물양을 비교해 보았다. 풍화를 받은 콘드라이트는 많은 경우 깨진 면을 따라 철 산화물이 충전해 있었으며 콘드를 주변에도 철산화물이 테두리를 이루고 있었다 (그림 4).

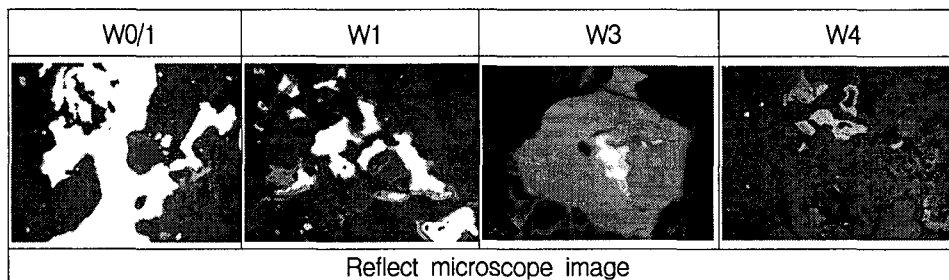


그림 3. 풍화 단계에 따른 금속 철의 철산화물로의 변화

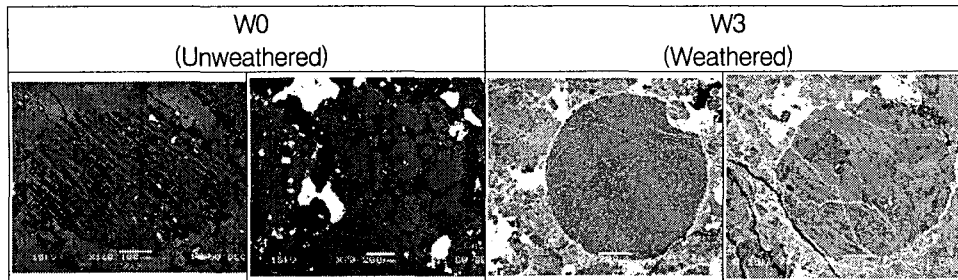


그림 4. 풍화에 따른 콘드롤의 조직 비교. W0 단계의 위쪽 두 개의 사진에 있는 흰 부분은 순수한 금속 성분이다. 풍화가 진행된 W3 단계에 있는 사진의 흰 부분은 대부분의 철산화물이며, 콘드롤 테두리에 철산화물 테두리가 있고 깨진 맥을 따라 철산화물이 충전하고 있다.

### 3. 결론

오디너리 콘드라이트는 타입이 증가함에 따라 콘드롤과 그 기질의 경계가 모호해 지는 것을 관찰하여 열변성을 받은 정도를 유추할 수 있었다. 충격변성 작용을 거치면 편광현미경 상에서 감람석의 파동소광과 평행한 쪼개짐을 관찰하여 충격변성 작용의 증거를 찾을 수 있었다. 콘드라이트가 지구상에서 풍화를 받으면 산화되어 붉어지며 철산화물 맥이 발달한다. 풍화를 받으면 철-니켈 금속이 외곽에서부터 철산화물로 바뀌게 된다. 전혀 풍화를 받지 않은 단계를 W0으로 해서 점점 풍화가 진행되면 W1, W2, W3, W4로 구분할 수 있으며 W4 단계에서는 철-니켈 금속이 거의 철산화물로 바뀌었다. 주사전자 현미경을 사용하여 오디너리 콘드라이트의 그룹, 타입, 충격 변성, 풍화에 따른 조직을 관찰하거나 성분 분석을 빠르게 할 수 있었다. 주사 전자 현미경은 새로운 운석을 발견했을 때 운석의 관찰 및 분류하는데 효율적인 수단이 될 것이다.

### 4. 참고문헌

- Grady, (2000) Natural History Museum, Catalogue of meteorites, fifth edition.  
 Grossman, J. N. (1998) Meteoritical Bulletin, Meteoritics & Planetary Science No. 82  
 Grossman, J. N. (2000) Meteoritical Bulletin, Meteoritics & Planetary Science No. 84  
 Stoffler (1991) Shock metamorphism in ordinary chondrite  
 Wasson (1984) Meteorites, W. H. Freeman, New York  
 Wlotzka (1993) A weathering scale for the ordinary chondrites  
 The Meteoritical Bulletin, No. 87 Meteoritics & Planetary Science, Vol. 39, No. 8,