

ㅎ광상 자철광의 미량원소조성변화특성

박응호, 황남희

경애하는 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《과학연구부문에서는 주체공업, 사회주의자립경제의 위력을 강화하고 인민생활을 향상 시키는데서 나서는 과학기술적문제들을 우선적으로 해결하며 최첨단의 새로운 경지를 개척 하기 위한 연구사업을 심화시켜야 합니다.》

자철광(Fe_3O_4)은 화성암과 변성암에서 일반적으로 나타나는 부광물이며 철질규암형(BIF) 광상, 철산화물-동-금(IOC)광상, 철산화물-린회석(IOA)광상, Ag-Pb-Zn광상, 스카른광상, 반암광상과 같은 많은 광상들에서 부광물 또는 주요광석광물로 된다.

자철광은 쉽게 선별할수 있고 자성을 띠고있는것으로 하여 광물탐사에 널리 리용되고있다. 또한 자철광의 미량원소함량은 그것의 형성조건에 따라 변화된다. 따라서 현재 자철광의 미량원소조성변화특성은 화성암과 변성암, 광상의 성인을 밝히는데 적극 리용되고있다.

연구지역 광상은 스카른광상인데 기본광석광물들은 황동광과 자철광이며 그밖에 반동광, 황철광, 자류철광 등의 류화물들이 있다.

지난 시기 연구지역의 광상에서 광물학적연구는 많이 진행되었지만 자철광과 황철광의 미량원소조성변화특성은 연구되지 않았다.

본문에서는 ㅎ광상 자철광의 미량원소조성변화특성에 대하여 서술하였다.

1. 자철광의 광물학적특성과 미량원소조성

자철광은 공간군 $\text{Fd}3\text{m}$ 에 속하며 AB_2O_4 인 첨정석결정구조를 가지는 광물이다. 여기서 A는 Mg, Fe, Ni, Mn, Co, Zn과 같은 2가양이온이며 B는 Al, Fe, Cr, V, Mn, Ga와 같은 3가양이온이다. 4가티탄도 2가양이온이 치환될 때 B자리에 놓일수 있다. 자철광구조에서 8면체자리에는 거의 같은 수의 3가철과 2가철이온들이 놓이며 4면체자리에는 오직 3가철이온들만이 놓인다. 즉 $\text{Fe}^{3+}[\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}]\text{O}_4$ 이다.[1, 2]

첨정석결정구조형광물에는 자철광밖에도 첨정석, 티탄철광, 크롬철광, 철망간첨정석, 아연첨정석, 아연철첨정석, 망간철광이 있다.

Fe-Si-O계의 $\lg f_{\text{O}_2}$ -T도표와 Fe-O-S계의 f_{S_2} - f_{O_2} 도표는 그림 1과 같다.

어떤 주어진 온도에서 자철광의 안정한 최소산소도산도는 철-자철광 혹은 자철광-방철광완충구역에 해당된다. 철감람석-자철광-석영완충구역은 Fe가 대부분 자철광에 들어가는 구역이다.

자철광안정성의 상부한계는 적철광-자철광완충구역에 의하여 규정된다. 이 완충구역 밖에서는 적철광이 주되는 산화광물로 된다. 양이온치환은 일반적으로 낮은 산소도산도조건에서 일어난다.

Fe^{2+} 은 Mg, Mn, Zn, Ni에 의하여 치환될수 있으며 Fe^{3+} 은 Al, V, Cr에 의하여 치환될수 있다.

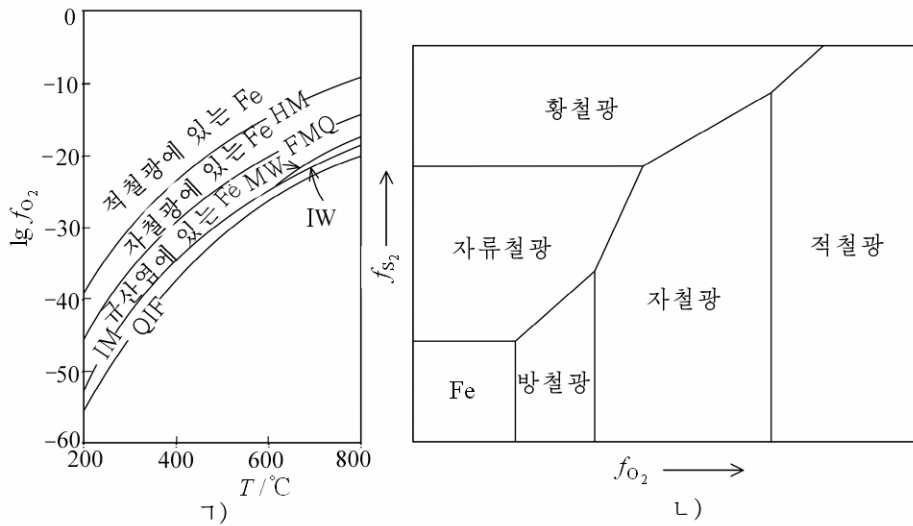


그림 1. Fe-Si-O계의 $\lg f_{O_2}$ - T 도표(㉠)와 Fe-O-S계의 f_{S_2} - f_{O_2} 도표(㉡)

HM-적철광-자철광, FMQ-철감람석-자철광-석영, MW-자철광-방철광,
IW-철-방철광, IM-철-자철광, QIF-석영-철-철감람석

보통 산소도산도조건에서 바나듐은 티탄자철광에 주로 V^{3+} 상태로 존재하지만 적은 량의 V^{4+} 도 있을수 있다. 산소도산도가 높을 때 바나듐은 5가양이온상태로 존재하므로 자철광에 들어갈수 없다.

자철광은 대륙지각에 가장 많은 산화광물이며 다른 광물들보다 잘 풍화되지도, 운반되지도 않기때문에 20세기초부터 화성암의 성인과 광화작용의 지구화학적연구에서 중요한 지시광물로 되고있다. 자철광은 조성변화가 심한 화성암, 퇴적암, 변성암에서 쉽게 구별할수 있는 부광물이며 많은 미량원소들을 포함한다.

자철광에서 미량원소들의 함량변화를 리용하여 온도와 압력, 산소도산도, 류황도산도와 같은 인자들을 복원할수 있다.

자철광에 있는 미량원소들은 알카리금속, 알카리토류금속, REE를 포함하는 과도금속, 비금속원소들이다. 그러나 자철광에서 Mg와 Al, Ti, V, Co, Ni, Zn, Cr, Mn, Ga, Sn을 제외한 기타 다른 원소들의 분석값이 전자람침분석기의 검출아래한계에 있으므로 이 원소들을 자철광의 성인해명에 리용할수 있다.

자철광에서 미량원소들의 함량은 많은 인자들에 의하여 규정된다. 실례로 화성암에 있는 자철광에서 미량원소들의 함량은 원암 또는 암장의 조성, 온도, 압력, 팽각속도, 산소도산도, 류황도산도, 규소와 류화물의 활동도에 따라 변한다. 또한 치환되는 원소들의 이온반경과 충전하와 같은 결정학적인자들에 따라서도 미량원소들의 함량이 변한다.

변성암에 있는 자철광의 미량원소조성은 주로 온도와 산소도산도, 변성정도에 의존한다. 낮은 변성상에 있는 자철광은 조성상 균질하며 열수성인의 자철광에 비하여 미량원소들을 적게 포함하는데 이것은 온도에 따르는 미량원소들의 가동성과 관련된다. 티탄, 알루미늄과 같은 원소들은 낮은 온도에서 비가동원소들이다.

규산염을 포함하는 변성성인의 침정석광물에서 Al함량은 압력, 온도, 도산도에 따라 변화된다. 화성암의 자철광에서 V와 Mn함량은 많고 Cu, Zn, Pb함량은 적다. 암장열수광상의 자철광에서 미량원소들의 함량은 규칙적으로 변화된다.[2, 3]

2. 연구지역 자철광의 미량원소조성

연구지역의 광체는 주로 황동광과 자철광으로 이루어져있으며 그밖에 2차적인 광물들인 황철광과 반동광들이 적은 량으로 들어있다. 또한 석류석과 휘석광물들이 있다.

자철광을 립도가 0.5~1mm 되게 분쇄한 다음 립체현미경에서 단광물을 골라내고 다시 자력선별을 하였다. 시료를 2차증류수로 초음파세척하고 건조시킨 다음 X선형광분석기(《Shimadzu XRH-1800》)로 미량원소조성을 분석하였다.

연구지역 자철광의 미량원소조성은 표와 같다.

표. 연구지역 자철광의 미량원소조성(질량%)

원소	시료번호						평균
	1	2	3	4	5	6	
O	19.93	19.72	19.58	18.92	19.99	19.18	19.55
Mg	0.53	0.62	0.58	0.43	0.68	0.55	0.57
Al	0.04	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02
Si	0.09	0.15	0.13	0.18	0.21	0.16	0.15
Ti	0.03	0.03	0.03	0.01	0.01	0.03	0.02
V	0.03	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
Cr	0.01	0.03	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02
Mn	0.33	0.32	0.33	0.36	0.41	0.39	0.36
Fe	76.88	78.85	76.53	78.19	78.11	76.93	77.58
Co	0.22	-	0.18	0.19	0.24	0.21	0.17
Ni	0.01	0.02	0.03	0.08	0.05	0.05	0.09
Cu	0.16	0.14	0.19	0.17	0.26	0.29	0.2
Zn	-	0.02	-	-	0.01	-	0.01
Ag	0.05	-	0.05	0.02	0.01	0.03	0.03
Ce	1.42	-	-	0.05	0.01	-	0.25
Au	0.12	0.05	0.07	0.02	0.08	0.02	0.06
Al+Mn	0.37	0.33	0.35	0.38	0.42	0.41	0.38
Ti+V	0.06	0.04	0.04	0.02	0.03	0.05	0.04
Ni/(Cr+Mn)	0.03	0.06	0.09	0.21	0.12	0.12	0.24
Ti+V/Al+Mn	0.16	0.12	0.11	0.05	0.07	0.12	0.11
Ni/Cr	1.00	0.67	3.00	4.00	5.00	2.00	4.50
Ti/V	1.00	3.00	3.00	1.00	0.50	1.50	1.00

표에서 보는바와 같이 자철광에서 철함량은 평균 77.58질량%이고 산소함량은 평균 19.55질량%이다.

Ti/V값은 자철광의 성인에 따라 심히 변화된다. 암장성인의 자철광에서 Ti/V값은 일반적으로 5이상이지만 일부 광상들에서는 0.1이하이다. 암장성인과 열수성인의 자철광에서 Ti/V값은 비슷한데 각각 0.9와 2.1이다.

한편 BIF광상과 Ag-Pb-Zn광상의 자철광에서 Ti/V값은 평균 3.5와 5.9이며 열수스카른광상의 자철광에서 Ti/V값은 평균 4.3이다. Ti+V/Al+Mn값은 반암과 암장광상의 자철광에서 약 1로서 비슷하지만 석회질 및 고회질스카른, BIF, Ag-Pb-Zn광상에서는 0.01~0.5로서 매우 낮다.[2] 연구지역의 자철광에서 Ti/V값은 0.5~3으로서 세계적으로 알려져있는 스카른 및 열수성인의 자철광과 비슷하다. Ti+V/Al+Mn값은 0.05~0.16으로서 매우 낮다. 이것은 스카른광상의 자철광과 잘 일치된다

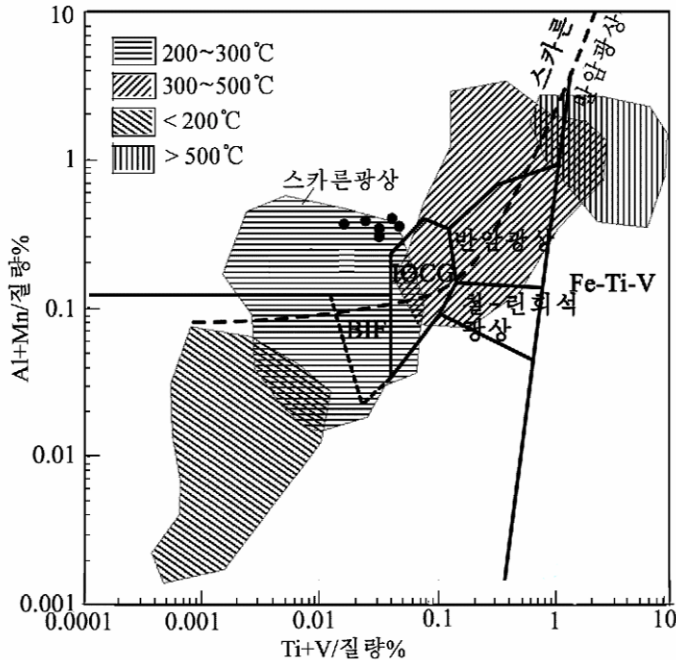


그림 2. 자철광의 성인을 보여주는 Al+Mn-Ti+V도표[2, 3]

Al+Mn-Ti+V도표와 Ni/(Cr+Mn)-Ti+V도표는 IOCG광상, IOA광상, 반암광상, BIF광상, 스카른광상, Fe-Ti-V광상에서 나는 자철광을 구분하기 위한 판별도표로 이용되고있다.

자철광의 성인을 보여주는 Al+Mn-Ti+V도표는 그림 2와 같다.

그림 2에서 보는바와 같이 Al+Mn-Ti+V도표에서 연구지역 자철광은 스카른마당에 놓이며 그 형성온도는 300°C정도이다. 자철광의 성인을 보여주는 Ni/(Cr+Mn)-Ti+V도표는 그림 3과 같다.

그림 3에서 보는바와 같이 Ni/(Cr+Mn)-Ti+V도표에서도 자철광은 대부분 스카른마당에 놓이며 한 분석값이 IOCG마당에 놓인다. 또한 두도표에서 자철광은 대부분 IOCG마당의 경계부분에 놓인다. 이것은 연구지역의 자철광이 스카른광화작용시기에 형성되었으며 형성온도도 300°C이상이었다는것을 보여준다.

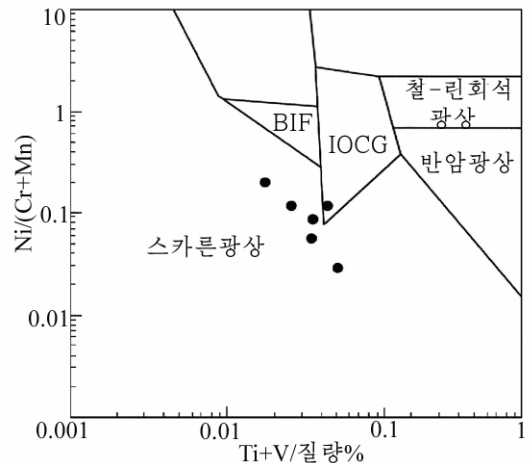


그림 3. 자철광의 성인을 보여주는 Ni/(Cr+Mn)-Ti+V도표[2, 3]

맺 는 말

자철광에서 기본미량원소들은 Mg, Al, Ti, V, Co, Ni, Zn, Cr, Mn, Ga, Sn이며 그것들의 함량은 자철광의 형성조건에 따라 변화된다.

연구지역 자철광의 미량원소조성분석결과는 이 자철광이 스카른광화작용에 의하여 형성되었다는것을 보여준다.

참 고 문 헌

- [1] A. P. Dupuis et al.; Mineral Deposita, 46, 1, 2011.
- [2] P. Nadoll et al.; Economical Geology, 107, 1275, 2012.
- [3] P. Nadoll et al.; Ore Geology Reviews, 61, 1, 2014.

주체110(2021)년 1월 5일 원고접수

The Variety of the Trace Element Composition in the Magnetite of the ⚙ Deposit

Pak Ung Ho, Hwang Nam Hui

Major trace elements in magnetite are Mg, Al, Ti, V, Co, Ni, Zn, Cr, Mn, Ga and Sn, and concentration of these elements in magnetite varies according to the its formation conditions.

The analysis shows that the magnetite was formed by skarn mineralization.

Keywords: magnetite, trace element