

열수교대광체형성의 수학적모형과 그 적용경험

김해룡, 고남혁

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《땅속에 묻혀있는 자원을 캐내자면 먼저 어디에 어떤 자원이 얼마나 매장되어있는가 하는것을 정확히 알아야 합니다.》(《김정일선집》 증보판 제14권 500페이지)

열수교대광체의 품위가 심부에서 어떻게 변하며 광체가 얼마만한 깊이까지 연장되겠는가를 결정하는것은 중요한 지질학적문제들중의 하나이다.[2-4]

본문에서는 열수교대광체형성의 수학적모형을 제안하고 그것을 γ 광상과 \circ 광상에 적용한 경험을 소개하였다.

1. 열수교대광체형성의 수학적모형

선행문헌[1]에서는 심부방향에서 광화매질이 균일하며 광석물질의 침전반응이 1차반응이고 모형의 깊이가 작다는 전제에 기초하여 깊이에 따르는 열수교대광체의 품위변화공식을 내놓았다. 그러나 이 공식은 우리가 연구한 γ 광상과 \circ 광상 맥상열수교대광체들에 대해서는 잘 맞지 않았다. 특히 심부연장깊이가 긴 Mo광체들의 심부방향에서 Mo함량곡선은 최대부광수준아래로 길게 늘어지다가 점차적으로 첨멸되는데 모형의 이론곡선은 반대로 최대부광수준에서 급격히 첨멸되는 정반대의 경향성을 나타낸다.

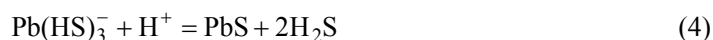
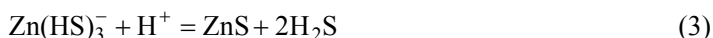
이로부터 우리는 지구화학실험과 반응속도방정식에 기초한 열수교대광체형성의 수학적모형을 제안하였으며 그것을 γ 광상과 \circ 광상에 적용하여 보았다.

우리는 함광구조를 따라 삼입되어 올라오는 열수용액에 의한 광체형성과정을 수학적으로 모형화하기 위하여 다음과 같은 전제를 세웠다.

첫째로, 광화작용매질이 균일하다는것이다.

둘째로, 열수조광용액은 알카리성이며 광화용액에서 착화합물형태로 운반된 조광성분은 매질의 산도가 증가함에 따라 n 차반응이 일어나 침전된다는것이다.

이때 광석광물의 침전반응식은 다음과 같다.



반응식 (1)에 의하여 침전된 MoS_3 은 $350\sim 500^\circ\text{C}$ 의 온도에서 MoS_2 로 넘어간다는 실험자료가 알려져있다.[1, 2]

이제 함몰리브덴열수조광용액이 함광구조를 따라 삼입되어 올라온다고 하자. 이때 반응속도방정식에 기초하면 반응식 (1)에서 반응속도는 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{dC_l}{dt} = -kC_l^n [\text{H}^+]^2 \quad (5)$$

여기서 k 는 비례결수, C_l 은 열수용액에서 조광원소의 농도, n 은 반응차수, $[H^+]$ 은 수소이온의 농도이다.

dt 시간동안에 열수용액은 속도 v 로 dx 만큼 삼입되어 올라오므로 $dt = \frac{dx}{v}$ 이고 따라서 식 (5)는 다음과 같이 표시할수 있다.

$$dC_l = -\frac{k}{v} C_l^n [H^+]^2 dx \quad (6)$$

그런데 층간구조 또는 암맥구조를 따르는 열수용액의 삼입상승과정은 산소함량이 보다 많은 지표부근으로 넘어가는 과정이며 온도의 감소과정이다. 이러한 두가지 산도증가요인이 겹쳐작용하는 결과 함광구조를 따르는 열수용액의 삼입상승과정에 용액의 산도는 급격히 높아지게 된다. 이제 열수광화작용이 시작되는 수준의 해발높이를 x_0 (km), 광화작용이 진행되는 임의의 수준의 해발높이를 x (km)라고 하면 함광구조를 따라 삼입상승하는 열수조광용액의 산도는 $(x-x_0)$ 에 비례한다고 할수 있다.

$$[H^+] = b(x-x_0) \quad (7)$$

여기서 b 는 비례결수이다.

식 (7)을 식 (6)에 넣고 적분하면

$$C_l = C_0 \left[1 + \frac{kb^2(n-1)}{3v} C_0^{n-1} (x-x_0)^3 \right]^{1/(1-n)} \quad (8)$$

여기서 C_0 은 열수용액에서 조광원소의 초기농도이다.

그런데 열수계의 어떤 수준상에서 dt 시간동안에 침전된 광석물질의 량 dC_s 는 같은 시간동안에 열수용액에서 조광원소의 감소량 ($-dC_l$)과 같다. 즉

$$dC_s = -dC_l \quad (9)$$

식 (9)를 고려하여 식 (6)에 식 (7), (8)을 넣고 적분하면 침전된 광석물질의 량 C_s 에 대한 식을 얻을수 있다.

$$C_s = \frac{kb^2 C_0^n t (x-x_0)^2}{\left[1 + \frac{kb^2(n-1)}{3v} C_0^{n-1} (x-x_0)^3 \right]^{n/(1-n)}} \quad (10)$$

이 식을 간단히 표시하면

$$C_s = \frac{A(x-x_0)^2}{[1+B(x-x_0)^3]^{n/(1-n)}} \quad (11)$$

여기서 $A = kb^2 C_0^n t$, $B = \frac{kb^2(n-1)}{3v} C_0^{n-1}$ 이다.

$n=1$ 인 특수한 경우에는

$$C_s = A_1(x-x_0)^2 e^{-B_1(x-x_0)^3} \quad (12)$$

여기서 $A_1 = kb^2 C_0 t$, $B_1 = kb^2 / 3v$ 이다.

식 (11), (12)에서 반응차수 n 과 결수 A , B 또는 A_1 , B_1 은 실제 수준별 원소함량자료에 의하여 추정한다.

2. 적용 경험

Γ광상에서 맥상물리브덴광체의 해발수준 x 에 따르는 Mo평균함량은 $n=1/3$ 일 때의 모형식

$$C_s = A(x - x_0)^2 \sqrt{1 + B(x - x_0)^3} \quad (13)$$

으로 얻은 이론함량과 잘 일치한다.(그림 1)

한편 ○광상에서 동광체의 해발수준 x 에 따르는 Cu평균함량은 $n=1$ 일 때의 모형식 (12)로 얻은 이론함량과 잘 일치한다.(그림 2)

우리는 모형식의 믿음성을 검증하기 위하여 Γ광상의 Mo광체와 ○광상의 Cu광체에 대하여 식 (13), (12)의 결수들을 추정하고 해당한 상관비 η_{yy}^2 를 계산하였다.

Γ광상의 Mo광체에서

$$C_s = 1.1677(x + 0.56)^2 \sqrt{1 - 5.7091(x + 0.56)^3}$$

$$\eta_{yy}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} = 0.8361$$

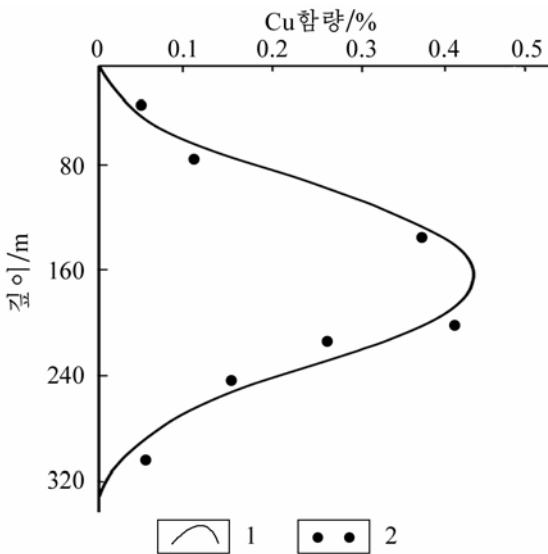


그림 2. ○광상 Cu광체의 수준별 Cu평균함량과 모형식으로 얻은 이론함량

1-모형식으로 얻은 이론함량,

2-Cu광체의 수준별 Cu평균함량

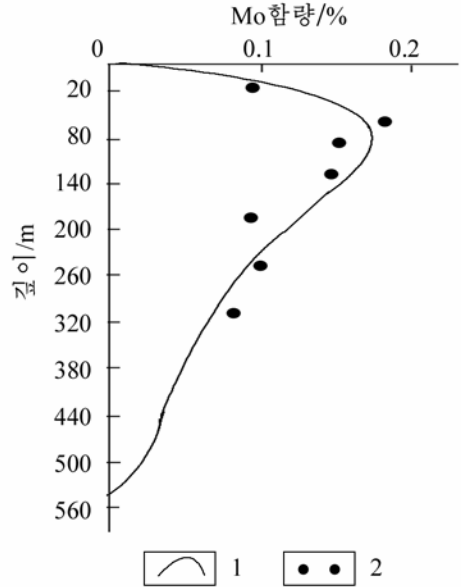


그림 1. Γ광상 Mo광체의 수준별 Mo평균함량과 모형식으로 얻은 이론함량

1-모형식으로 얻은 이론함량,

2-Mo광체의 수준별 Mo평균함량

○광상의 Cu광체에서

$$C_s = 32.509(x - 0.007)^2 e^{-154.65(x - 0.007)^3}$$

$$\eta_{yy}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} = 0.7965$$

여기서 y_i 는 i 째 수준에서 원소평균함량, \hat{y}_i 는 i 째 수준에서 모형식으로 얻은 이론함량, \bar{y} 는 원소의 총평균함량이다.

이처럼 Γ광상과 ○광상의 광체들에서 상관비가 큰것은 Mo의 침전반응식 (1)의 반응차수는 $n=1/3$ 이고 Cu의 침전반응식 (2)의 반응차수는 $n=1$ 이라는것을 확증해준다.

모형식 (11)로부터 얻어지는 최대부광수준은 다음과 같다.

$$x_{\text{최}} = x_0 + 3\sqrt{\frac{(n-1)2}{(n+2)B}}$$

합광열수용액의 삼입상승과정에 최대부광수준의 공극과 틈들이 광석광물에 의하여 모두 메워지면 열수계는 닫히게 되며 따라서 열수용액의 삼입상승과정은 중단되게 된다.

그러나 최대부광수준아래의 심부에서는 광석광물이 합광층의 공극과 틈을 다 메우지 못한 상태로 남아있게 된다. 여기서는 정체된 열수용액에서 확산과 대류에 의한 광석물질의 느린 운반이 진행되게 된다. 그리하여 최대부광수준아래의 심부에서는 리론모형식으로 계산된 조광원소의 함량보다 함량이 약간 많아지는 경향성이 나타난다.

맺 는 말

열수교대광체의 모형식 (11), (12)는 합광구조를 따라 삼입상승하는 알카리성열수용액에서 산도변화에 의한 광석침전현상을 잘 반영한다.

삼입상승하는 열수용액에 의하여 형성된 열수교대광체의 광화시작수준 x_0 은 광화매질이 균일한 경우에만 광체의 심부침멸수준을 가리킨다.

참 고 문 헌

- [1] 김해룡 등; 지질탐사, 1, 18, 주체102(2013).
- [2] 조창희; 외국과학기술통보(광업, 지질), 6, 2, 주체99(2010).
- [3] L. Timothy; Computers & Geosciences, 39, 42, 2012.
- [4] Henrique Rennó de Azeredo Freitas et al.; Computers & Geosciences, 92, 21, 2016.

주체108(2019)년 10월 5일 원고접수

Mathematical Model of Orebody Formation by Hydrometasomation and its Application Experience

Kim Hae Ryong, Ko Nam Hyok

In this paper, we made the mathematical model of orebody formation by hydrometasomation. This mathematical model can be effectively applied to exploration of ore deposits formed by hydrometasomation.

Keywords: hydrometasomation, orebody formation