

## *Acidithiobacillus ferrooxidans*에 의한 류화광에서 우라늄침출의 운동학

류지수, 현덕호

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《과학연구기관들과 과학자, 기술자들은 우리 나라의 실정에 맞고 나라의 경제발전에 이바지할수 있는 과학기술적문제를 더 많이 풀어야 하겠습니다.》(《김정일선집》 증보판 제13권 173페이지)

미생물에 의한 우라늄침출기술은 저품위우라늄광석의 처리에 널리 도입되고있지만[3, 4] 류화광을 대상으로 한 구체적인 연구결과는 적게 발표되였다.

본문에서는 *Acidithiobacillus ferrooxidans*에 의한 류화광에서의 우라늄침출에 미치는 몇가지 인자들의 영향을 고찰하고 침출운동학을 논의하였다.

### 실험 방법

우라늄광석시료로는 립도가  $53 \sim 74 \mu\text{m}$ 인 7지구 류화광을 리용하였으며 침출균주인 *A. ferrooxidans*는 선행연구[2]에서와 같은것을 리용하였다. 접종액의 균밀도는  $10^8$  개/mL이고 pH는 1.5이다.

우라늄광석의 미생물침출 *A. ferrooxidans*접종액에 증류수를 첨가하여 10배로 희석하면서 98% 류산으로 용액의 pH를 1.5로 조절하였다. 이 용액 1L와 우라늄광석시료 200g을 주어진 온도의 항온조속에 설치된 교반탱크에 넣고 공기를 주입하여 통기량을 1vvm으로 보장하면서 주어진 교반속도에서 침출하였다. 그리고 침출과정의 pH변화를 보정하기 위하여 일정한 시간간격으로 98% 류산을 첨가하였다.

우라늄광석의 산침출 우라늄광석의 산침출은 선행연구[1]의 방법대로 하였다.

특성량들의 결정 침출액의 pH는 pH미터(《Metrohm 827 pH lab》)로, 침출액속의 우라늄농도는 바나디움산암모니움적정법으로 결정하였다. 그리고 우라늄침출률은 광석시료속의 우라늄량에 대한 침출된 우라늄량의 백분율로 결정하였다.

### 실험결과 및 해석

1) *A. ferrooxidans*에 의한 우라늄침출에 미치는 몇가지 인자들의 영향

교반속도의 영향 교반속도와 침출시간에 따르는 우라늄침출률의 변화는 그림 1과 같다.

그림 1로부터 교반속도가 200r/min이상일 때에는 침출속도가 거의나 같으므로 미생물침출을 운동학적구역에서 진행하자면 교반속도가 200r/min이상이어야 한다는것을 알수 있다.

접종량의 영향 접종량과 침출시간에 따르는 우라늄침출률의 변화는 그림 2와 같다.

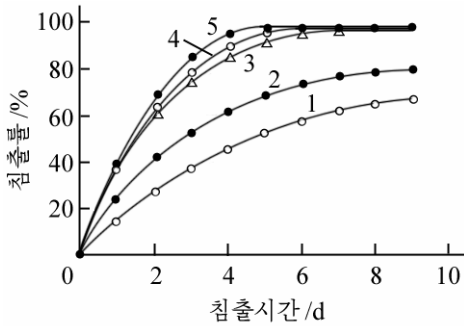


그림 1. 교반속도와 침출시간에 따르는 우라늄침출률의 변화

1-5는 교반속도가 각각 100, 150, 200, 250, 300r/min  
인 경우, 침출온도 30℃, 접종량 10<sup>7</sup> 개/mL

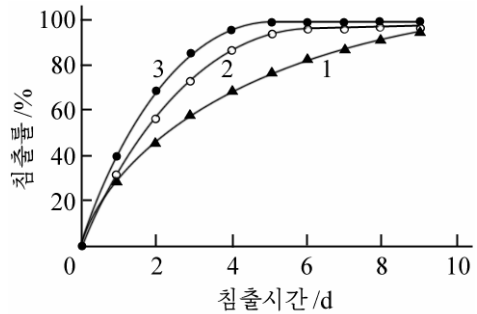


그림 2. 접종량과 침출시간에 따르는 우라늄침출률의 변화

1-3은 접종량이 각각 5·10<sup>6</sup>, 10<sup>7</sup>, 2·10<sup>7</sup> 개/mL  
인 경우, 교반속도 200r/min, 침출온도 30℃

그림 2에서 보는바와 같이 평형상태에서의 침출률은 접종량에 의존하지 않지만 접종량이 많을수록 침출평형에 도달하는 시간이 짧아진다. 이로부터 접종량이 많을수록 침출속도가 빨라진다는 것을 알 수 있다.

온도의 영향 침출온도와 침출시간에 따르는 우라늄침출률의 변화는 그림 3과 같다.

그림 3에서 보는바와 같이 침출초기에는 침출온도가 30℃일 때의 우라늄침출률이 20℃일 때보다 높지만 평형상태에서의 침출률은 거의나 같다. 그러나 침출온도가 10℃일 때에는 평형상태에서도 침출률이 훨씬 낮다.

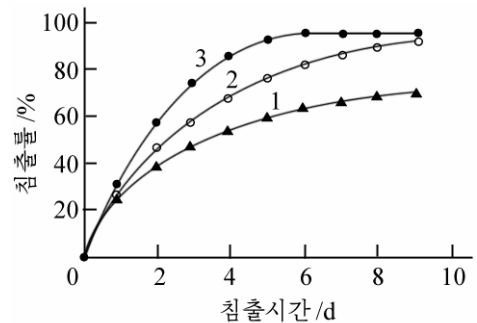


그림 3 침출온도와 침출시간에 따르는 우라늄침출률의 변화

1-3은 침출온도가 각각 10, 20, 30℃인 경우,  
교반속도 200r/min, 접종량 10<sup>7</sup> 개/mL

표 1. 산침출법과 미생물침출법에서의 침출률(%)

침출방법	침출온도/℃		
	10	20	30
산침출법[1]	64.7	70.6	75.6
미생물침출법	70.5	92.5	97.3

침출시간 9d, 기타 조건은 그림 3과 같음

한편 표 1에서 보는바와 같이 침출온도가 20 및 30℃일 때에는 미생물침출법에 의한 침출률의 증가가 명백히 나타나지만 침출온도가 10℃일 때에는 산침출법인 경우보다 침출률에서 큰 차이가 나타나지 않는다. 그것은 이 온도조건에서 미생물의 생장이 억제되는 결과로 미생물침출이 거의나 진행되지 못하기 때문이다.

## 2) *A. ferrooxidans*에 의한 우라늄침출의 운동학

운동학모형의 확정 *A. ferrooxidans*에 의한 우라늄침출의 운동학모형을 확정하기 위하여 선행연구[1]에서와 마찬가지로 다음과 같이 2개의 확산률속모형(식 (1)과 (2))과 2개의 반응률속모형(식 (3)과 (4))을 선정하였다.

$$[1 - (1 - R)^{1/3}]^2 = k_1 t \quad (\text{확산률속1모형}) \quad (1)$$

$$1 - \frac{2}{3}R - (1 - R)^{2/3} = k_2 t \quad (\text{확산률속2모형}) \quad (2)$$

$$3[1-(1-R)^{1/3}] = k_3 t \quad (\text{압축핵모형}) \quad (3)$$

$$[-\ln(1-R)]^{1/2} = k_4 t \quad (\text{핵의 생성 및 성장모형}) \quad (4)$$

여기서  $R$ 는 시간에 따르는 반응물의 변화율로서 침출률의 1/100과 같은 값을 가지며  $k_i (i=1, 2, 3, 4)$ 는 우라늄침출반응의 겉보기속도상수이다.

*A. ferrooxidans*에 의한 우라늄침출에서 운동학모형들의 적용결과는 그림 4와 같다.

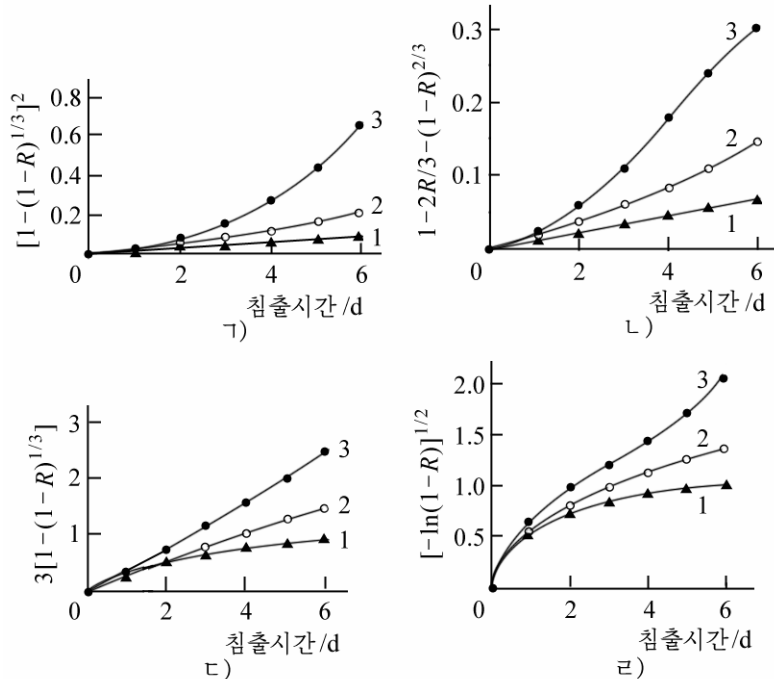


그림 4. *A. ferrooxidans*에 의한 우라늄침출에서 운동학모형들의 적용결과

㉠) 확산속1모형, ㉡) 확산속2모형, ㉢) 압축핵모형, ㉣) 핵의 생성 및 성장모형, 1-3은 침출온도가 각각 10, 20, 30°C인 경우

그림 4에서 보는바와 같이 압축핵모형에서 선형성이 비교적 잘 만족된다. 이로부터 *A. ferrooxidans*에 의한 우라늄침출이 압축핵모형에 따르는 반응물속과정이라는것을 알수 있다.

표 2. 압축핵모형과 아레니우스방정식에 기초하여 결정한 우라늄침출반응의 겉보기속도상수와 활성화에너지

침출온도/°C	$k_{\text{겉}}/\text{d}^{-1}$	$\Delta E^*/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$
30	0.414 5	43.1
20	0.219 6	
10	0.123 6	

압축핵모형과 아레니우스방정식에 기초하여 결정한 우라늄침출반응의 활성화에너지는 43.1kJ/mol로서(표 2) 화학반응과정의 활성화에너지범위에 있다. 그것은 미생물의 작용에 의하여 광석에서의 류화물결정과피가 촉진되는 결과로 내부확산속도가 빨라지기때문이라고 본다.

산침출과 미생물침출에서 운동학의 비교 산침출법과 미생물침출법에 의한 우라늄침출과정의 운동학적특성은 표 3과 같다.

표 3에서 보는바와 같이 산침출법에서는 내부확산과정이 물속단계로 되지만 미생물침출법에서는 화학반응과정이 물속단계로 된다.

결정한 운동학모형들에 기초하여 침출온도가 30°C일 때 침출률이 90%이상으로 되는 침출시간을 계산한 결과에 의하면 산침출과 미생물침출에서 각각 14.8, 4.7일이며 침출률이 95%

표 3. 산침출법과 미생물침출법에 의한 우라늄침출과정의 운동학적특성

	산침출법[1]	미생물침출법
운동학모형	$1 - \frac{2}{3}R - (1-R)^{2/3} = 3.72 \cdot 10^2 \exp\left(-\frac{2.34 \cdot 10^4}{RT}\right)t$	$3[1 - (1-R)^{1/3}] = 1.09 \cdot 10^7 \exp\left(-\frac{4.31 \cdot 10^4}{RT}\right)t$
률속단계	내부확산과정	화학반응과정
$\Delta E^\ddagger / (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	23.4	43.1

이상으로 되는 침출시간은 각각 18.5, 5.6일로서 미생물침출속도가 산침출속도에 비하여 매우 빠르다.

## 맺 는 말

1) *Acidithiobacillus ferrooxidans*로 류화광에서 우라늄을 침출할 때 교반속도 200r/min, 점종량  $10^7$  개/mL, 침출온도  $30^\circ\text{C}$ , 침출시간 9일인 조건에서의 침출률은 97.3%이다.

2) *Acidithiobacillus ferrooxidans*에 의한 류화광에서의 우라늄침출과정은 압축핵모형에 따르는 반응률속과정이며 침출반응의 활성화에너지는  $43.1\text{kJ/mol}$ 이다.

## 참 고 문 헌

- [1] 김일성종합대학학보(자연과학), 62, 5, 94, 주체105(2016).
- [2] 김일성종합대학학보(자연과학), 61, 2, 98, 주체104(2015).
- [3] Abhilash et al.; Energy Procedia, 7, 158, 2011.
- [4] Abhilash et al.; Bioresource Technology, 128, 619, 2013.

주체108(2019)년 1월 5일 원고접수

## Kinetics of Uranium Leaching from Sulfide Ore by *Acidithiobacillus ferrooxidans*

Ryu Ji Su, Hyon Tok Ho

The leaching process of uranium from sulfide ore by *Acidithiobacillus ferrooxidans* depends on the shrinking core model. The activation energy of leaching reaction is  $43.1\text{kJ/mol}$ .

Key words: uranium, leaching kinetics