

저품위 우라늄 광석의 세균침출에 관한 연구(I) —침출세균의 분리·동정과 우라늄 원광으로부터 우라늄 침출—

이용훈 · 이현섭 · 김 철

아주대학교 화학공학과
(1991년 10월 23일 접수, 1992년 2월 25일 채택)

A Study on the Bacterial Leaching of Low-grade Uranium Ore(I) —Identification and Isolation of Leaching Bacteria and Bacterial Leaching of Uranium Ore—

Yong-Hun Rhee, Hyeon-Sup Lee and Chul Kim

Department of Chemical Engineering, Ajou University, Suwon 441-749, Korea
(Received 23 October 1991; accepted 25 February 1992)

요 약

세균침출에 의한 저품위 우라늄광으로부터 우라늄 회수를 목적으로 침출에 관여하는 균주의 분리·동정실험과 우라늄 침출에 대하여 연구하였다. 우라늄 침출에 관여하는 균주를 분리·동정하기 위하여 보성 탄광, 달성 동광산 및 일광 동광산의 갱내수를 채취하여 균을 분리, 배양하여 달성과 일광 동광산으로부터 Fe^{2+} , 황화물 및 thiosulfate를 산화하여 우라늄 침출에 적용할 수 있는 침출 세균인 *Thiobacillus ferrooxidans*를 분리·동정하였으며, 균주의 최적 생장조건은 30°C와 pH 2.5이다. 철산화세균에 의해 우라늄 원광석으로부터 10일 만에 약 34-38%의 우라늄을 침출하였다.

Abstract—In order to leach the aqueous uranium from the low-grade uranium ore, the studies on the identification of the iron-oxidizing bacterium associated with uranium leaching and, subsequently, the leaching of uranium were made. Slime samples were collected from Bosung, Dalsung, and Ilkwang mines to isolate and identify the iron-oxidizing bacteria. *Thiobacillus ferrooxidans* oxidizing the ferrous iron, sulfides, and thiosulfate was then isolated successfully along with the optimal growth conditions(30°C and pH 2.5). In the presence of this iron-oxidizing bacterium 34% to 38% of the aqueous uranium could be leached out from the low-grade uranium ore within 10 days.

1. 서 론

현재 우리나라 대전과 옥천지방에는 평균 우라늄 함량이 250-350 ppm인 저품위 우라늄이 널리 분포되어 있으므로, 이 우라늄을 사용하여 핵에너지 원료인 산화우라늄(U_3O_8 , yellow-cake)을 효율적으로 생산하는

방법을 개발하는 것은 증가하는 핵에너지 원료의 안정된 공급을 위한 국내 자원개발이란 측면에서도 매우 중요한 연구과제이다. 현재 사용하고 있는 화학적인 추출 방법에 의한 우라늄 회수공정은 우라늄 함량이 1000 ppm 이상인 고품위 광석의 우라늄 추출시에는 경제성이 있으나 저품위 우라늄 추출시에는 경제성이 매우 희박하

Table 1. Composition of various culture media(grams)

Constitution media		(NH ₄) ₂ SO ₄	FeSO ₄ · 7H ₂ O	KCl	CaCl ₂	K ₂ HPO ₄	KH ₂ PO ₄	Ca(NO ₃) ₂	MgSO ₄ · 7H ₂ O	Na ₂ S ₂ O ₃ · 5H ₂ O	10 N H ₂ SO ₄	D. W.
9 K	A	3.0		0.1		0.5		0.01	0.5			700
	B		44.3									300
Leathen	A	0.15		0.05		0.05		0.01	0.5			1000
	B		1.0									10
M	A	0.8					0.4		0.16			800
	B		19.46								1%(v)	200
S.T.S.		0.2			0.2		3.0		0.1	5.0		1000

므로 저품위 우라늄 회수를 위한 세균침출 방법에 대한 연구가 요구된다.

광산과 같은 특수환경에 서식하며 유용금속 침출에 주로 관여하는 세균으로는 *Ferrobacillus*, *Thiobacillus* 속의 세균들이 있으며[3], 이들 중 *F. ferrooxidans*, *F. sulfoxidans* 및 *T. ferrooxidans* 등 3종의 철 산화 세균이 주로 유용금속 침출에 관여한다고 보고하고 있다. 이들 황 및 철의 산화 세균들은 광석이나 광물 중에 함유되어 있는 무기의 철, 유황 또는 유황 화합물을 산화하여 이때 생기는 생활에너지로 질소원과 공기 중의 탄산가스를 이용하여 군체가 성장하는 진성무기영양성세균[1]들이다. 또한 이들 세균에 의한 유용금속의 침출기작은 아직 연구대상이 되고 있지만 세균의 성장으로 인하여 생성되는 황산 및 황산제이철들인 대사산물이 직접 광석의 용제로 작용한 화학반응 결과, 유용금속이 침출된다고 알려져 있다[4].

천연 지하 자원이 빈약한 우리나라에 있어서는 광산에 버려지는 폐광석, 갱내 잔광 및 저품위 광산으로부터 유용금속을 세균침출법으로 회수하는 연구개발이 필요하지만 지금까지 이루어진 연구는 동광석의 침출에 관한 연구가 최초이다[5]. 본 연구에서는 국내의 저품위 우라늄광에 이용할 수 있는 세균침출에 관여하는 균주의 분리 및 동정실험을 하였으며, 분리 동정한 균주를 이용하여 우라늄 침출실험을 수행하였다.

2. 실험재료 및 방법

2-1. 갱내수와 우라늄 원광

우라늄 광석이 함유되어 있는 충북 괴산군 청천면 덕평리 소재 보성탄광의 2개 갱구로부터 원광석과 갱내수를 2차에 걸쳐 채취하였으며, 이[5]에 의해 철 산화세균의 존재가 인정된 경남 양산군 철마면 좌천리 소재 일광 동광산과 경북 달성군 가창군 용계리 소재 달성 동광산으로부터 유출된 갱내수를 채취하여 4℃ 냉장고에 보관하여 사용하였다.

2-2. 예비배양과 균주의 분리 및 동정

본 실험에서는 철이온의 열에 의한 산화를 방지하기 위하여 Membrane filter(Millipore Co., 0.45 μm)로 여과 멸균한 자가 영양성 세균의 증식배양액인 9 K[6], Leathen[7], S.T.S.(sodium thiosulfate)[13] 및 M[8] 배양액 250 ml/씩을 멸균된 500 ml 플라스크에 넣고, 광산에서 채취한 갱내수를 10 ml/씩 무균적으로 각각 접종한 후 30℃ 항온 진탕배양실에서 168-240시간 진탕 배양(120 rpm)하여 배양일수에 따른 pH변화와 군체수 및 Fe²⁺ 산화량을 측정하였다. 세균증식이 인정되는 갱내수는 군체의 순수분리를 위해 Fe agar 및 S.T.S.(sodium thiosulfate) agar 배지[2, 13]에 적당히 희석한 배양액 1 ml/씩을 무균적으로 접종하여 30℃ 항온 배양실에서 배양했으며[17], 각 배양액 성분은 Table 1에 나타내었다. 순수분리된 colony들을 Sutton과 Corrick의 동정배양액[9] 200 ml/씩에 무균적으로 접종한 후 3회 연속배양하여 균주를 동정하였으며, 각 동정배양액(I, II, III, IV, V, VI와 VII)의 성분들은 Table 2와 같다.

2-3. 우라늄 침출 실험

분리 동정한 침출세균의 우라늄 침출능을 알아보기 위하여 150℃ 건조오븐에서 3시간 멸균한 분말 UO₂시약 0.25 g을 멸균한 500 ml 플라스크에 넣고, 조제멸균한 9 K배양액 250 ml를 넣은 후, 일광 동광산으로부터 분리 동정한 *T. ferrooxidans*를 9 K배양액에 5일간 연속 배양한 세균용액 5 ml를 접종하여 황산으로 초기 pH 2.5로 맞추고 온도 30℃로 진탕침출(120 rpm)하여, 일정한 시간 간격으로 pH, 군체수 측정, 총 Fe, Fe³⁺ 및 우라늄 농도를 측정하였다. 우라늄 원광석으로부터 우라늄 침출을 알아보기 위하여 Ball mill을 이용, 200 mesh 이하로 분쇄한 분말 원광 10 g을 500 ml 플라스크에 넣고 위와 같은 방법으로 실험하였으며, 교반침출장치(Fig. 1)를 이용하여 진탕침출과 우라늄 침출을 비교하였다.

2-4. 분석방법

Table 2. Composition of identification media(grams)

Media	I	II		III			IV	V				VI	VII
Solution		A	B	A	B	C		A	B	C	D		
(NH ₄) ₂ SO ₄	0.2	0.15				0.1	0.1	6.0					
MgSO ₄	0.5			0.1								0.5	0.5
CaCl ₂ ·2H ₂ O	0.25			0.1			0.1					0.25	0.25
FeSO ₄	T			T			0.02					T	T
KH ₂ PO ₄	3.0			2.0			2.0					3.0	3.0
Precipitated sulfur	10.0											10.0	10.0
KCl		0.05						0.05					
MgSO ₄ ·7H ₂ O		0.5					0.10	0.5					
K ₂ HPO ₄		0.05							13.5				
Ca(NO ₃) ₂		0.01						0.01					
FeSO ₄ ·7H ₂ O			10.0							10.0			
NaNO ₃												0.2	
MnSO ₄				T			0.02						
NaNO ₂													0.2
Na ₂ S ₂ O ₃					10.0								
Na ₂ S ₂ O ₃ ·5H ₂ O							10.0						
Na ₂ S ₂ O ₃ ·meta											15.0		
Agar							15.0						
Tap water	1000			900	50	50						1000	1000
D. W.		900	100				1000	250	100	100	100		

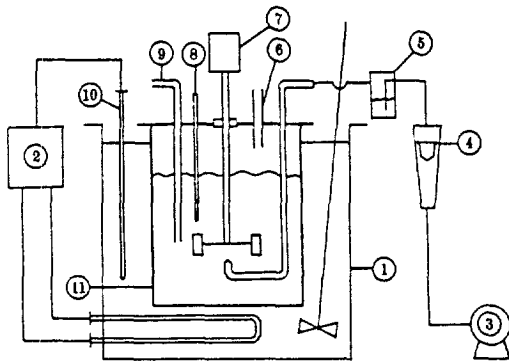


Fig. 1. Schematic diagram of agitated reactor.

- | | |
|---------------------|--------------------|
| 1. Water bath | 7. Stirrer |
| 2. Temp. controller | 8. Thermometer |
| 3. Air compressor | 9. Sampling port |
| 4. Air flowmeter | 10. Thermocouple |
| 5. Humidifier | 11. Reactor vessel |
| 6. Vent | |

본 실험에 있어서 pH 측정은 pH meter(Chemocadet model 5984-50)을 사용하여 측정하였고, Fe³⁺의 측정 및 총 Fe의 측정은 배양액을 5 ml씩 채취하여 Beck방법 [8]에 의한 비색법을 이용하여 spectrophotometer(Spec-

tronic-20)로 측정하였다. 균체수와 균주의 크기는 Thoma계산반(Haemocytometer)을 이용하여 현미경(Leitz, DIALUX 22)하에서 측정하였고, 우라늄 분석은 Arsenazo III[10, 16] 방법을 이용하여 UV(HITACHI Model 220-20)로 655 nm에서 측정하였다.

3. 결과 및 검토

3-1. 갱내수와 원광석의 성상

채취된 보성탄광 갱내수의 pH는 4.8-6.9로 산도가 낮으며 함유된 Fe²⁺나 Fe³⁺의 함량도 극히 미량으로 나타났으며, 달성 동광산 갱내수의 pH는 4.2-4.5정도이고 Fe함량도 미량으로 나타났다. 일광 동광산의 경우 pH는 2.8로 강산성을 보여주며 Fe²⁺와 Fe³⁺의 함량도 높아 자가 영양성 철산화 세균의 존재 가능성을 보여주었다. 각 광산 갱내수의 자세한 성상은 Table 3과 같다. 보성 탄광의 원광석을 분석한 결과는 Table 4에서와 같이 우라늄의 평균 함량이 350 ppm정도이며 Fe는 4.6%, SO₄와 황은 각각 4.4%, 0.18%정도 포함되어 있다[16, 17].

3-2. 예비배양 실험

Table 3에 나타난 것과 같이 보성 탄광 갱내수로부터

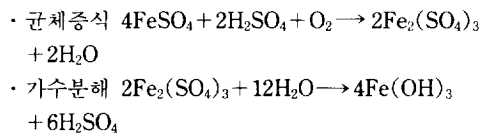
Table 3. Chemical analysis and preliminary culture of mine waters

Mine		Chemical analysis(mg/ml)			Preliminary culture			
		pH	Fe ²⁺	Fe ³⁺	9 K	Leathen	M	S.T.S.
Bosung	1	6.93	1.54×10^{-3}	2.14×10^{-5}	—	—	—	—
	2	5.15	1.03×10^{-3}	4.28×10^{-5}	—	—	—	—
	3	4.80	1.07×10^{-3}	3.64×10^{-5}	—	—	—	±
Ilkwang	1	2.84	8.50×10^{-2}	9.00×10^{-2}	+	+	+	±
	2	2.83	8.40×10^{-2}	7.80×10^{-2}	+	+	+	±
Dalsung	1	4.22	2.00×10^{-4}	2.00×10^{-4}	+	+	+	+
	2	4.53	9.00×10^{-4}	5.00×10^{-4}	±	±	±	+

Table 4. Composition of uranium ore(g/g)

Components	Content
UO ₂	350 ppm
Molybdenum	0.09 %
Vanadium	0.7 %
SiO ₂	48.0 %
P ₂ O ₅	0.7 %
Fe	4.6 %
SO ₄	4.4 %
Sulfur	0.18 %
CO ₃	0.2 %
Composition H ₂ O	1.6 %
Carbon	about 40.0 %

유용금속 침출에 관여하는 자가 영양성 세균의 존재를 인정할 수 없었으므로 달성 및 일광 동광산 갱내수를 채취하여 갱내수에 서식하는 세균 중 유용금속 침출에 작용하는 세균의 존재여부를 규명하기 위해 예비배양 실험을 실시하였다. 갱내수의 각 배양액에 대한 예비 배양 실험결과로부터 9 K, Leathen 및 M 배양액에 대한 균체의 증식을 인정할 수 있었으며, Fig. 2에서 보듯이 배양 2-3일에 급격히 증가하여 4-6일째 균체수가 최고 10^9 - 10^{10} cells/ml에 도달하고 일정함을 볼 때 Fe²⁺가 4-5일만에 거의 산화됨을 알 수 있다. 배양일수에 따른 배양액의 pH 변화는 배양일수에 따라서 pH가 감소하는데 이는 다음과 같은 반응의 생성물인 황산의 영향으로 볼 수 있다.



배양이 진행됨에 따라 총 철이온농도가 감소하는 경향을 보이는데 이는 Jarosite[H{Fe(SO₄)₂·Fe(OH)₃}]로 추정되는 Fe³⁺의 침전현상[18]에 기인하는 것으로 배양 2-3일부터 육안으로 적갈색 침전을 확인할 수 있

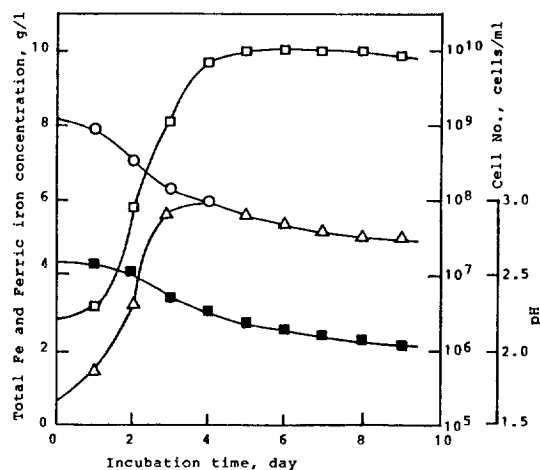
Fig. 2. Changes in total Fe(○), Fe³⁺(△), cell number(□) and pH(■) in 9 K medium during incubation.

Table 5. Comparison of the maximum specific growth rate and the maximum cell numbers for 9 K, M, and Leathen media

Media	Maximum specific growth rate(hr ⁻¹)	Maximum cell number(×10 ⁸)
9 K	0.03796	102.0
M	0.01724	35.2
Leathen	0.00838	10.1

었다. pH 변화로는 균체의 증식여부를 쉽게 확인할 수 없었으며, Fe³⁺의 산화능력과 균체수의 측정으로 균체의 증식을 확인할 수 있었다. Table 5는 적절한 배양액 선정을 위해 9 K, M 및 Leathen배양액에서의 최대 비성장율(μ_{max})을 비교한 결과로써 배양액의 함유된 Fe²⁺농도가 높은 배양액일수록 균체의 증식이 크게 나타남을 보여주고 있으며, 따라서 이후의 모든 실험은 9 K배양액을 이용하였다.

Table 6. Physiological characteristics of isolated bacteria

Media	Specific and mine water	Identification media				
		I	II	III	IV	V
F. ferrooxidans		-	+	-	-	+
F. sulfooxidans		+	+	+	+	+
T. ferrooxidans		-	+	+	+	+
T. thiooxidans		-	-	+	+	-
Ilkwang	1	-	+	+	+	+
	2	-	+	+	+	+
Dalsung	1-A	-	+	+	+	+
	1-B	+	-	+	+	-

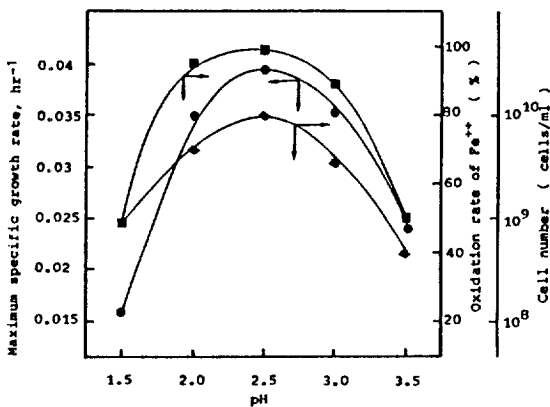


Fig. 3. Effect of pH on the maximum specific growth rate, cell number(◆), and the oxidation of ferrous iron.

3-3. 침출세균의 분리·동정과 성장

세균의 분리 및 동정을 위하여 9K 배양액에 수대, 계대배양한 후 Fe agar과 S.T.S. agar 배지에 접종한 결과 일광 갱내수 경우는 Fe agar에 집락을 형성하였으나 S.T.S. agar 배지에서는 집락 형성이 잘 되지 않았으며 달성 갱내수는 반대로 Fe agar보다는 S.T.S. agar배지 경우 육안으로 두 종류의 colony를 볼 수 있었다. 순수분리된 colony들을 Bergey's manual의 방법에 따라 Corrick 동정배양액[9]에 3회 연속 배양한 결과, 0.6-1.0×1.0-1.5 μ 정도인 간상균으로 Table 6에서 보는 바와 같이 일광 동광 갱내수에서 분리한 균주는 Corrick 동정 배양액 II, III, IV 및 V에서 증식하였고, I에서는 생장하지 않는 것으로 보아 Fe^{2+} 와 황화물 혹은 thiosulfate의 산화능이 있는 *Thiobacillus ferrooxidans*를 동정할 수 있었고, 달성 갱내수의 경우는 일광 동광 갱내수와 동일한 균주인 *Thiobacillus ferrooxidans*(달성 1-A)와 동정 배양액 I, III과 IV에서만 증식하고 II와 V에서는 생장하지 않고 황 및 thiosulfate만을 산화하는 *Thiobacillus thiooxidans*(달성 1-B)을 동정할 수 있었다.

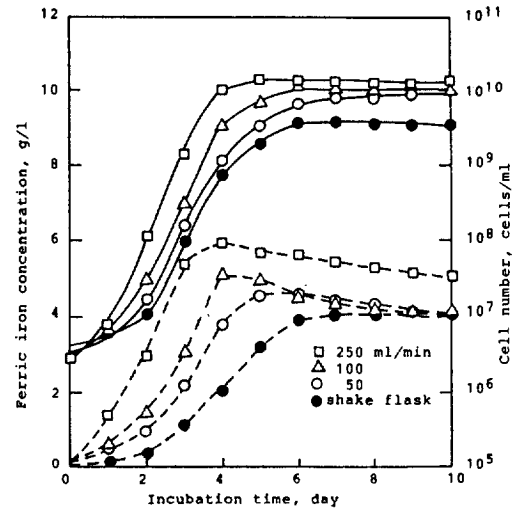
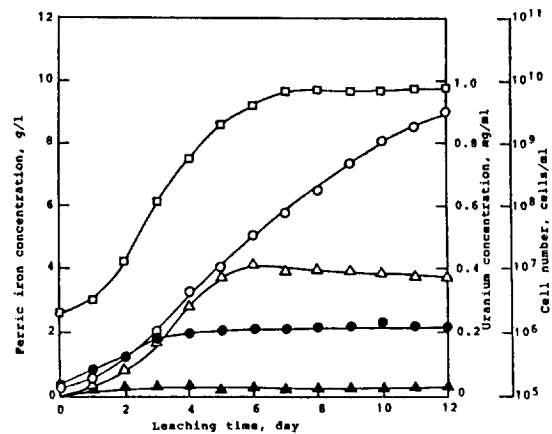


Fig. 4. Effect of air flow rate on the cell growth(—) and the oxidation of ferrous iron(---) in agitated reactor.

Fig. 5. Changes in Fe^{3+} (△), cell number(□) and uranium leached(○) for UO_2 reagent in shake flask leaching, Fe^{3+} (▲) and UO_2 (●) in blank.

분리·동정한 *T. ferrooxidans*세균의 pH 변화에 따라 세균의 증식을 알아보기 위해 1N 황산용액으로 배양액의 pH를 1.5-3.5 범위 내에서 5구분하여 조절한 후 배양한 결과, Fig. 3에서 보는 바와 같이 pH 2.3-2.6 범위 내에서 세균증식과 Fe^{2+} 의 산화율이 높음을 알 수 있었다. Tomizuka와 Yagisawa[12]는 철산화 세균의 최적 pH가 2.3-2.7로 보고했으며 Bruynesteyn과 Duncan[14]은 pH 2.0으로 보고하였다.

*T. ferrooxidans*는 호기성 박테리아로써 진탕배양기로는 통기량에 따른 영향을 알아보기 위해 적절한 통

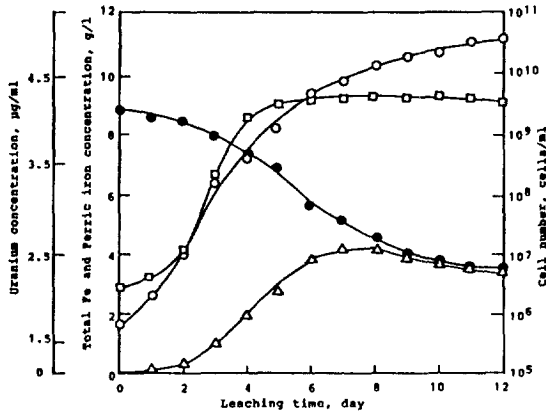


Fig. 6. Changes in total Fe(●), Fe³⁺(△), cell number(□) and uranium leached(○) for uranium ore in shake flask leaching.

기량 변화를 줄 수 없었기 때문에 교반침출장치를 이용하여 실험을 수행하였다. 통기량을 변화시키면서 균체수와 Fe²⁺의 농도변화를 측정된 결과, Fig. 4에서와 같이 통기량이 증가함에 따라 균체수와 Fe³⁺ 농도가 증가함을 알 수 있었다.

3-4. 우라늄 침출 실험

3-4-1. 진탕침출(Shake flask leaching)

분말 UO₂시약 0.25 g을 500 ml 플라스크에 넣고 9 K 배양액에 순수 배양한 세균용액 5 ml를 접종한 다음 침출한 결과를 균을 접종하지 않은 대조군과 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. 초기 우라늄 농도가 16-20 µg/ml로 나타나는데 이는 pH조절을 위해 배양액에 첨가된 황산에 의한 우라늄이 용출된 것이며, 미량의 Fe³⁺가 나타나는 것은 첨가된 황산 및 온도에 의한 자연산화에 기인하는 것으로 추정된다[17]. 따라서 대조군에서도 12일 경과후 우라늄이 0.21 mg/ml 정도 용출되며, *T. ferrooxidans*에 의해서는 10일만에 약 80%의 UO₂가 침출되고, 12일 후에는 약 85%의 UO₂가 침출되는 것으로 보아 *T. ferrooxidans* 세균은 우라늄 침출에 적용할 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 Fig. 6은 -200 mesh 우라늄 원광으로부터 침출 실험의 결과로서 10일만에 약 34%의 우라늄을 회수할 수 있었으며 이는 Brierley[11]의 실험결과와 비슷한 결과를 보여준다. 우라늄 침출 실험시 균체증식과 Fe²⁺ 산화율이 순수배지에 비해 낮는데 이는 Tuovinen과 Kelly[12] 등이 보고한 바와 같이 분말 원광석에 의한 물질전달의 감소와 황산제이 철과 황산 등 용제들에 의해 생성된 우라늄에 의한 억제효과로 추측된다.

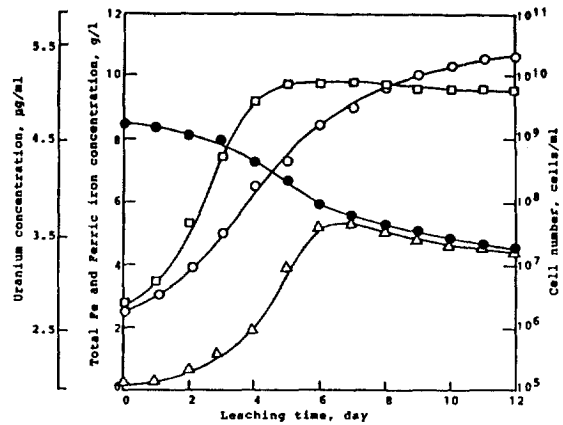


Fig. 7. Changes in total Fe(●), Fe³⁺(△), cell number(□), and uranium leached(○) for uranium ore in agitated reactor leaching.

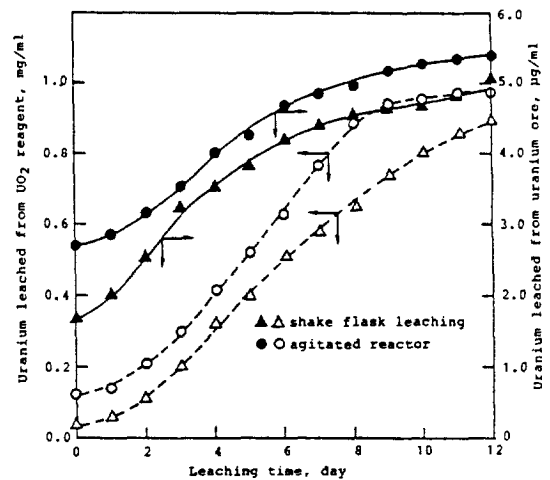


Fig. 8. Comparison of the leaching rate of uranium between shake flask and agitated reactor leaching.

3-4-2. 교반침출(agitated reactor leaching)

우라늄 침출실험을 위해 5 liter 교반침출기에 200 mesh 이하로 분쇄한 우라늄 원광 160 g을 9 K 배양액 4 liter에 넣고 5일간 연속 배양한 세균용액 80 ml를 접종하여 진탕침출과 같은 실험조건에서 통기량은 0.4 vvm이고 교반속도는 120 rpm로 침출실험을 하였다. Fig. 7에서와 같이 교반침출에서는 10일 만에 약 38%의 우라늄을 침출할 수 있었다.

진탕침출과 교반침출실험의 비교결과는 Fig. 8과 같다. UO₂시약과 원광에 대한 우라늄 침출율을 보면 교반침출에서의 우라늄 침출량이 진탕침출에 비해 높게

나타났다. 이는 교반에 의해 공기와 배양액 및 분말의 혼합과 물질전달이 원활해지기 때문에 호기성 박테리아인 *T. ferrooxidans*은 배양액의 용존산소와 용존 이산화탄소를 이용하여 증식하고 Fe^{3+} 나 UO_2 의 균체생장에 대한 억제효과도 감소시킬 수 있으며[12], 그에 따라 우라늄 침출율도 증가하는 것으로 생각된다. 교반침출실험을 통하여 충분한 공기를 공급하여 줌으로써 우라늄 회수를 보다 용이하게 할 수 있음을 알 수 있었다. 그러나 교반침출은 장치의 특성상 통기량에 한계가 있고 반응기의 dead zone에 분말 원광석의 침착 등의 문제가 있다. 이러한 결과를 기초로 하여 별도의 동력이 필요없이 단지 공기주입만을 이용하는 percolator column, air lift reactor 혹은 draught-tube reactor 등을 이용하여 충분한 통기와 혼합을 유지하면 우라늄 침출율을 높일 수 있을 것이며, 또한 공급된 산소 및 이산화탄소의 농도, 원광석과 배양액의 특성에 따른 연구도 추후 수행되어야 할 것이다.

4. 결 론

(1) 달성 및 일광 동광산에서 채취한 광산 갱내수에서 Fe^{2+} , 황화물 및 thiosulfate를 산화하는 침출세균인 *Thiobacillus ferrooxidans* 균을 분리·동정하였으며 이 균주를 이용하여 우라늄 침출에 적용할 수 있는 침출 조건을 규명하였다.

(2) 철산화세균의 최적성장조건은 pH 2.3-2.5와 온도는 30°C이며 통기량이 증가할수록 균체수, Fe^{2+} 의 산화율이 증가하였다.

(3) -200 mesh의 보성 탄광 원광석을 이용하여 세균침출한 결과 240시간만에 진탕침출에서는 약 34%의 우라늄을 회수할 수 있었으며, 교반침출실험으로 교반 속도 120 rpm과 통기량 0.4 vvm에서 38%의 우라늄을 회수하였다.

감 사

본 연구는 한국과학재단 연구비 지원으로 수행되었으며 지원에 감사를 드립니다.

REFERENCES

1. Temple, K. L. and Colmer, A. R.: *J. Bacteriol.*, **62**,

605(1951).
 2. Kinsel, N. A.: *J. Bacteriol.*, **80**, 628(1960).
 3. Corrick, J. D. and Sutton, J. A.: "Three Chemosynthetic Autotrophic Bacteria are Important to Leaching Operations at Arizona Copper Mines", U. S. Dept. of the Interior Bureau of Mines(1961).
 4. Woodcock, J. T.: *Proc. Aust. Inst. Min. Met.*, **224**, 47(1967).
 5. 이강순: "저품위 동광석의 세균침출법에 관한 연구 II, 침전동 회수에 관한 기초 연구", 과학기술처 연구개발 사업보고서(1970).
 6. Silverman, M. P. and Lundgren, D. G.: *J. Bacteriol.*, **77**, 642(1959).
 7. Leathen, W. W., McIntyre, L. D. and Braley, S. A.: *Science*, **114**, 280(1951).
 8. Beck, J. V.: *J. Bacteriol.*, **79**, 502(1960).
 9. Sutton, J. A. and Corrick, J. D.: "Leaching Copper Sulfide Minerals with Selected Autotrophic Bacteria", U. S. Dept. of the Interior Bureau of Mines, Rept. Invest., **6423**, 1(1964).
 10. Perez-Bustamante, J. A. and Delgado, F. P.: *Analyst*, **90**, 407(1971).
 11. Brierley, C. L.: "Meta. Appl. of Bacterial Leaching and Related Microbiological Phenomena", Murr, L. E., Torma, A. E. and Brierley, J. A., ed., Academic Press, London, New York, 345(1978).
 12. Tuovinen, O. H. and Kelly, D. P.: *Int. Met. Rev.*, **19**, 21(1974).
 13. Colmer, A. R., Temple, K. L. and Hinkle, M. E.: *J. Bacteriol.*, **59**, 317(1949).
 14. Bruynesteyn, A. and Duncan, D. W.: *Can. Met. Quart.*, **10**, 57(1971).
 15. Tomizuka, N. and Yagisawa, M.: "Met. Appl. of Bacterial Leaching and Related Microbiological Phenomena", Murr, L. E., Torma, A. E. and Brierley, J. A., ed., Academic Press, London, New York, 321(1978).
 16. 천정조: "광석중 우라늄의 비색 분석법 연구", 한국에너지연구소 회보, **2**(1), 111(1982).
 17. 김 철: "저품위 우라늄 광석의 세균침출에 관한 연구", 한국과학재단 연구보고서(1987).
 18. Guay, R., Silver, M. and Torma, A. E.: *Biotechnol. Bioeng.*, **19**, 727(1977).