

산성치오요소법에 의한 금정광으로부터 금, 은의 침출에 관한 연구

金成奎 · 李華榮 · 吳鐘基

한국과학기술연구원 금속연구부

A Study on the Leaching of Gold and Silver from Concentrate by Acidothioureation

Sung Gyu Kim, Hwa Young Lee and Jong Kee Oh

Korea Institute of Science and Technology, Division of Metals

요 약

국내의 금정광으로부터 산성치오요소법에 의해 금, 은을 회수하기 위한 침출실험을 행하였다. 실험결과에 따르면 금, 은의 침출은 치오요소 및 산화제의 농도, 광액농도 등에 의해 크게 영향을 받고 있으며 특히 3가철과 같은 산화제는 금, 은의 침출속도를 상당히 증가시킨다. 그러나 3가철의 농도가 너무 높으면 황화광을 용해시켜 광석입자 표면에 부동태층을 형성하기 때문에 금, 은의 침출을 저해하기도 한다. 한편 침출반응시 SO₂를 첨가하면 치오요소의 소모량은 어느정도 절감시킬 수 있으나 금, 은의 침출율이 저하하여 귀금속의 회수에는 그리 효과적이지 못하다. 금정광으로부터 금과 은은 적정조건하에서 각각 90% 및 80%의 침출율을 보이며 이때 치오요소 소모량은 초기 농도의 약 10% 정도이다.

ABSTRACT

The dissolution of gold and silver from concentrate was studied with acidic thiourea solution. The results showed that the gold and silver extraction was severely affected by concentration of thiourea and oxidant, pulp density, etc. Especially, oxidant such as ferric ions enhanced the leaching rate of gold and silver. High concentration of ferric ions, however, dissolved the sulfide ore to form electrochemically passive layer on the surface of ore particles, which caused the precious metal not to be leached out from the ore. The use of SO₂ could not effectively enhance the recovery of precious metal but reduce to some extent the consumption of thiourea. The leaching of gold and silver was achieved with recovery more than 90% and 80%, respectively, under the following conditions; • Thiourea conc.: 0.4M • Oxidant: None • H₂SO₄ conc.: 0.5M • Pulp density: <10% • Leaching time: 4 Hrs • Potential: 250 mV The Thiourea was consumed about 10% in comparison with its initial concentration.

1. 서 론

치오요소가 산성용액에서 금이나 은과 안정한 착이온을 형성한다는 사실이 20세기 초에 알려진 후 Plaskin과 Kozhukhova¹⁾가 처음으로 산화성분위기의 치오요소 수용액에서 금속상태의 금이나 은이 치오요소와 안정한 착이온으로 침출됨을 보고하면서부터 독극물인 청산을 사용하는 청화법의 대체방법²⁻⁴⁾으로 관심이 높아지고 있다. 일반적으로 금은 2분자의 치오요소와 그리고 은은

3분자의 치오요소와 착이온을 형성하며 침출되는데 이때의 표준전위⁵⁻⁹⁾는 금이 -0.38 V이고 은은 0.025 V로 금은 열역학적으로 비자발적인 반응이므로 치오요소만으로는 금속상태의 금을 침출하기가 곤란하나 은의 경우는 열역학적으로 자발적인 반응이기 때문에 치오요소만으로도 침출이 가능하다. 이에 반하여 침출반응시 산화제(3가철)가 존재하면 금, 은의 표준전위가 0.39 V 및 0.79 V로 되어 열역학적으로 침출반응이 가능해진다. 한편 치오요소는 산화반응에 의해 formamidine disulfide가

Table 1. Chemical composition of the gold concentrate. (wt.%)

Fe	Si	Pb	Au	Ag	As	Cu	Zn	Al	K	S
32.4	9.05	1.04	0.049	0.28	3.4	0.65	1.43	1.51	0.66	18

생성되는데 이때의 표준전위는 0.42 V로 이반응 역시 자발적인 반응으로 산화성분위기가 증대되면 산화분해 반응이 촉진된다. 이때 치오요소의 산화반응과 금의 침출반응에 대한 전위가 비슷하여 귀금속의 침출속도를 증대시키기 위해 과량의 산화제를 사용하면 부가적으로 치오요소의 분해반응이 촉진되며 이로 인한 2차 분해산물인 유리황이 금속표면에 흡착되어 금, 은의 침출이 저하된다.^{10,11)} 한편 이상과 같은 치오요소법은 청산에 비하여 독성이 적고 선택적인 침출이 가능하고 침출속도가 빠른 반면에 산화분해반응에 따른 치오요소의 소모량이 다소 많아 실용화에 제약이 뒤따르고 있어 이에 대해서 연구가 집중되어 아황산가스에 의한 전위조절¹²⁾ 또는 황화광을 미리 산세척¹³⁾한다거나 NaHSO₃의 사용에 관한 연구가 보고되고 있으나 아직까지 치오요소의 효과적인 절감방법이 확립되지 못하고 실험실적인 연구에 그치고 있다.

본 연구에서는 순금 원판(Disk)을 사용한 기초연구¹⁴⁾에 이어 국내의 금정광을 사용하여 치오요소에 의한 침출 반응시 회전속도, 치오요소 및 산화제의 농도, 광액농도 등이 침출반응에 미치는 영향을 조사하여 금, 은의 적정침출조건을 검토함과 아울러 치오요소의 소모량절감을 위해 침출반응의 전위조절에 따른 효과를 검토하였다.

2. 시료 및 실험방법

2.1. 시료 및 시약

본 실험에서 금, 은을 침출회수하기 위한 대상원료로는 무극광산의 금정광을 사용하였으며 이의 화학분석치는 Table 1에서 보는 것과 같이 금은 490 PPM 그리고 은은 2800 PPM정도이고 이외에 Fe, Si, As 및 S 등이 주로 함유되어 있음을 알 수 있다. 또한 이 정광은 X-ray 결과를 나타낸 Fig.1에서 보는 바와 같이 주구성광물이 황철광(FeS), 석영(SiO₂), 황비철광(FeAsS₂) 등이고 그외에 황동광(CuFeS₂), 섬아연광(ZnS) 등이 함유되어 있음을 알 수 있다. 한편 정광은 Ball Mill에서 마광하여 침출 실험에 사용하였으며 이때 마광한 정광의 평균입도는 34 μm이고 99%이상이 149 μm이하로 나타났다.

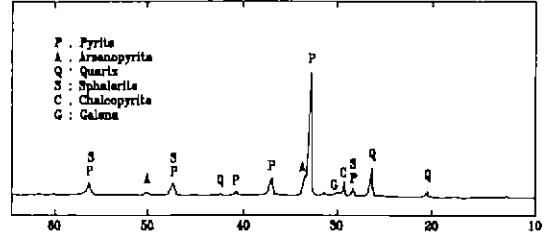
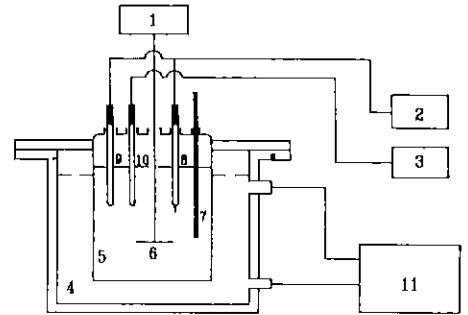


Fig. 1. X-ray diffraction pattern of cocentrate.



- 1 Speed Controller
- 2 Volt meter
- 3 pH meter
- 4 Water bath
- 5 Reactor
- 6 Impeller
- 7 Thermocouple
- 8 Pt-electrode
- 9 Reference electrode
- 10 Combination electrode
- 11 Circulator

Fig. 2. Schematic Diagram of Experimental Apparatus.

2.2. 실험방법

금정광의 침출실험은 Fig.2와 같은 항온조에서 실시하였다. 즉 반응용기에 황산용액을 500 ml정도 넣고 일정온도로 유지한 다음 소정의 광액농도가 되도록 입도가 조절된 정광을 넣어 2~3분간 혼합하고 여기에 치오요소와 산화제 등을 첨가하여 침출시험을 실시하였다. 이때 용기내의 slurry는 유리교반기를 사용하여 일정하게 교반하면서 적정시간 간격으로 침출액을 채취하여 금속농도 등을 분석하였으며 또한 침출실험중 침출액의 pH와 전위변화도 함께 측정하였다. 분석방법으로는 금, 은은 A.A. Spectrometry(Model : IL Video 11)을 사용하여 분석하였으며 철의 경우는 3가철과 2가철을 각각 분석하기 위하여 A.A. Spectrometry와 Spectrophotometer(Model : Varian DMS 200)을 이용한 비색법을 병행하였다. 이와 함께 침출액중의 치오요소는 Spectrophotometer를 이용한 UV범위(235 nm)에서 비색법으로 분석하였다. 한편 치오요소의 절감을 위한 실험에서는 조절제로 SO₂를 첨가하여 침출실험을 행하였다.

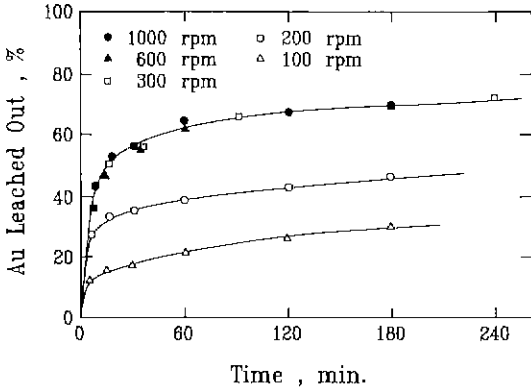


Fig. 3. Effect of stirring speed on the leaching of gold from concentrate. (25°C, S.D. 20%, 0.03M Fe³⁺, 0.4M CS(NH₂)₂, 0.05M H₂SO₄)

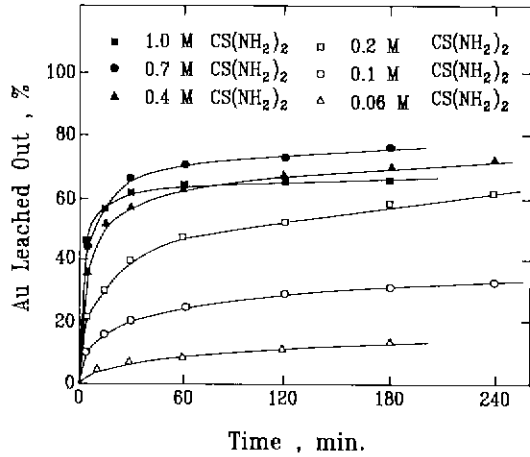


Fig. 5. Effect of thiourea concentration on the leaching of gold from concentrate. (25°C, 400 rpm, S.D. 20%, 0.03M Fe³⁺, 0.05M H₂SO₄)

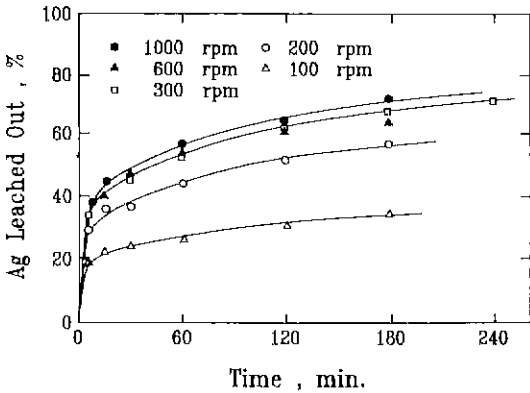


Fig. 4. Effect of stirring speed on the leaching of silver from concentrate.

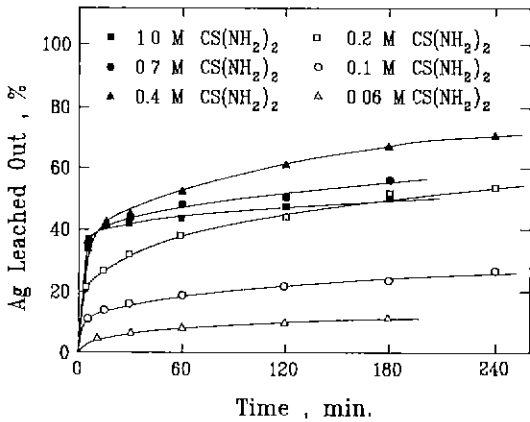


Fig. 6. Effect of thiourea concentration on the leaching of silver from concentrate.

3. 결과 및 검토

3.1. 교반속도의 영향

Fig. 3과 4는 0.4M CS(NH₂)₂, 0.05M H₂SO₄ 및 0.03M Fe³⁺ 용액에서 광액농도를 20%로 하여 정광을 침출할 경우 금, 은의 침출반응에 대한 교반속도의 영향을 나타낸 것이다. 이들 그림에 의하면 금, 은 모두 300 rpm까지는 교반속도가 증가할 수록 침출속도 및 침출율이 증가하다가 300 rpm 이상에서는 교반속도의 증가에 관계없이 침출속도와 침출율이 거의 일정하게 나타나고 있어 금, 은의 침출반응은 300 rpm까지는 물질전달에 의해 지배되는 것으로 사려되고 그 이상의 교반속도에서는 광석과 수용액사이의 확산층 두께가 일정한 것으로

사려된다. 이에 따라 이후의 침출실험에서는 교반속도를 400 rpm으로 고정하였다.

3.2. 치오요소농도의 영향

Fig. 5와 6은 0.05M H₂SO₄ 및 0.03M Fe³⁺ 용액중에서 광액농도를 20%로 하고 교반속도를 400 rpm으로 하였을 때 치오요소의 농도변화에 따른 금, 은의 침출율 변화를 나타낸 것이다. 정광중 금은 치오요소의 농도가 0.7M까지는 치오요소의 농도 증가에 따라 초기의 침출속도 및 침출율이 증가하고 있으나, 그 이상으로 치오요소의

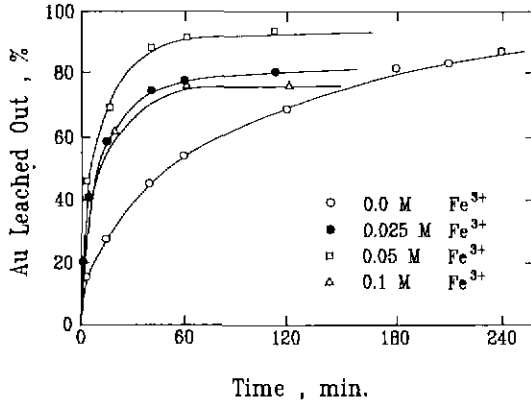
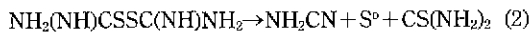
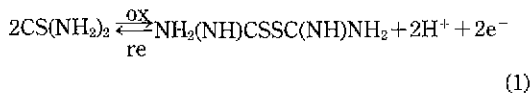


Fig. 7. Effect of Fe³⁺ concentration on the leaching of gold from concentrate. (25°C, 400 rpm, S.D. 10%, 0.4M CS(NH₂)₂, 0.5M H₂SO₄)

농도가 증가하게 되면 초기의 침출속도는 이에 따라 지속적으로 증가하고 있는 반면 금의 침출율은 시간이 경과함에 따라 오히려 감소하고 있는 것으로 나타나고 있다. 한편 은의 경우도 치오요소 농도 증가에 따라 초기의 침출속도는 증가하고 있으나 0.4M CS(NH₂)₂ 이상에서는 은의 침출율이 감소하고 있다. 이것은 용액중 치오요소 농도가 너무 크면 치오요소의 분해가 촉진되어 (1)식에 의해 생성된 formamidine disulfide^{2,10)}가 다시 (2)식에 의해 비가역적으로 분해되며 이때 생성된 유리 황이 입자의 표면에 흡착될 경우 부동태층이 형성되어 금, 은의 침출율이 저하되는 것으로 설명할 수 있다. 따라서 치오요소에 의해 정광을 침출할 경우 효과적으로 금, 은을 회수하기 위해서는 치오요소의 농도를 0.4M로 하는 것이 적정한 것으로 사려된다. 이 경우 금, 은은 약 70% 정도가 침출되고 있는데 이같이 산도(0.05M H₂SO₄)가 낮으면 산화성이 강하여 초기의 침출속도는 증대되지만 침출율은 비교적 낮게 나타나고 있어 이후의 실험은 황산농도 0.5M에서 행하였다.



3.3. 산화제의 영향

정광중 금, 은의 침출반응에 대한 산화제로 3가철의 영향을 광액농도 10%, 0.4M CS(NH₂)₂ 및 0.5M H₂SO₄ 용액에서 실험하였으며 그 결과를 Fig. 7과 8에 나타내

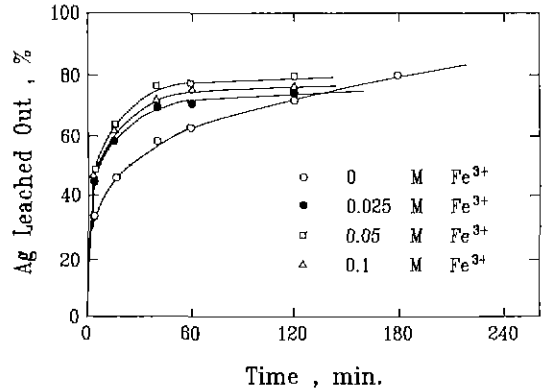


Fig. 8. Effect of Fe³⁺ concentration on the leaching of silver from concentrate.

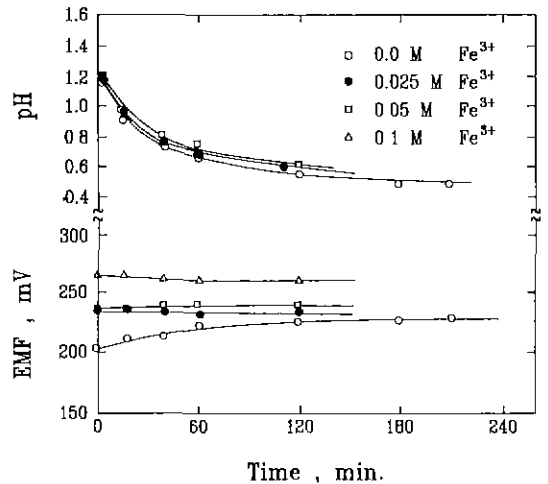


Fig. 9. Variation of pH and potential during the leaching of gold and silver from concentrate.

었다. 이들 그림에 의하면 3가철을 별도로 첨가하지 않고 정광중에서 용해되는 철분만을 산화제로 이용한 경우에 초기의 침출속도는 다소 떨어지나 침출율은 반응시간이 경과함에 따라 증가하여 4시간 침출시에 금은 약 90% 그리고 은은 80% 정도의 침출율을 보이고 있다. 한편 3가철을 반응초기에 첨가한 경우에는 침출반응은 1시간 만에 모두 이뤄지고 있으며 3가철의 농도가 증가할 수록 초기의 침출속도 및 침출율이 향상되어 0.05M Fe³⁺에서 침출율은 금, 은이 각각 94% 및 80% 정도로 가장 높다가 그 이상의 3가철 농도에서는 금, 은의 침출속도 및 침출율이 감소하고 있다. 이러한 현상은 3가철은 적정농도에서는 치오요소와 반응하여 FeSO₄[CS(NH₂)₂]⁺

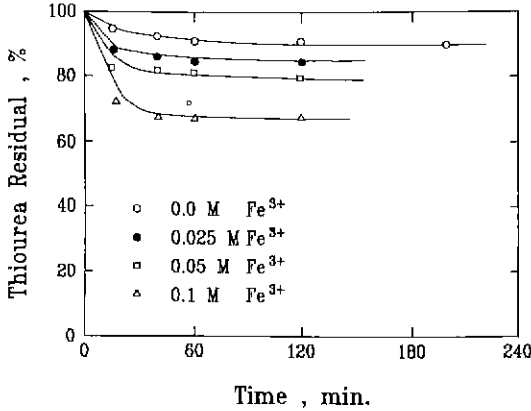


Fig. 10. Thiourea consumption during the leaching of gold and silver from concentrate.

의 복합물을 형성하여 치오요소의 분해반응을 저지하기 때문에 금, 은의 침출율이 향상되지만, 과량으로 사용되면 이 복합물의 형성에 따른 치오요소의 소모가 많고 동시에 산화전위가 높아져 치오요소의 분해반응이 촉진되기 때문에 사려된다⁹⁾. 이때 용액의 pH는 Fig. 9에서 보는 바와 같이 치오요소의 분해반응으로 수소이온이 생성되어 시간이 지남에 따라 낮아지고 있을 뿐, 산도가 0.5M H₂SO₄로 비교적 큰 경우에는 3가철의 농도변화에 거의 영향이 없으나, 용액의 전위는 3가철의 농도가 클수록 높게 나타나고 있으며 이에 따라 치오요소의 소모율도 증대되어 3가철의 농도가 0.1M인 경우에는 소모율이 30% 이상에 이르고 있다(Fig. 10). Deschenes¹⁵⁾는 황동광을 침출한 실험에서 침출시 적정전위는 250 mV 내외라고 하였는데 본 실험에서 3가철을 첨가하지 않은 경우에 4시간 침출 후 용액의 전위는 235 mV 정도이며 치오요소의 소모율은 10% 정도로 상당히 낮게 나타나고 있다. 한편 이상과 같이 용액중에 첨가된 3가철은 금과 은의 침출반응과 치오요소의 분해반응에 관여하는 것 이외에 (3)식과 같은 황화광의 침출반응에도 참여하게 되어 유리황을 생성시키기 때문에 과량의 산화제는 치오요소의 소모율을 증가시킬 뿐만 아니라 유리황에 의한 부동태현상으로 금, 은의 침출을 저해하는 요인이 된다. 따라서 산성치오요소 용액으로 금, 은정광을 침출할 경우 3가철의 사용은 초기의 침출속도만 증대시킬 뿐 침출율의 향상이나 치오요소 절감에는 크게 기여하지 못하므로 3가철의 첨가없이 광석중에서 용해되는 철분만을 이용하는 것이 별도의 조절제가 없는 한 유리하다 하겠다.

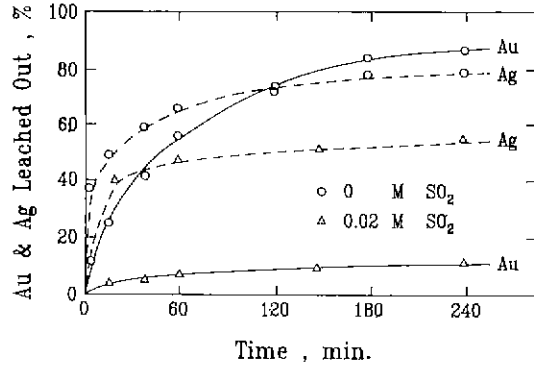
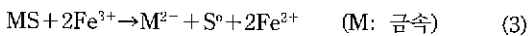


Fig. 11. Effect of SO₂ addition on the leaching of gold and silver from concentrate in absence of Fe³⁺. (25°C, 400 rpm, S.D. 10%, 0.4M CS(NH₂)₂, 0.5M H₂SO₄)

한편 광액농도 변화에 따른 금, 은의 침출율을 비교하여 보면 광액농도 20%인 경우(Fig. 5와 6 참조)가 광액농도 10%인 경우(Fig. 7과 8 참조)에 비하여 침출율에 있어 금은 10% 정도 그리고 은은 7~8% 정도가 낮게 나타나고 있어 정광의 침출반응시 광액농도는 10%로 하는 것이 효과적인 것으로 판단된다.

3.4. 조절제의 영향

Schulze¹¹⁾는 금침출에 있어 SO₂의 첨가는 부동태를 방지하고 침출효과를 증대시킨다고 보고하였고 순금원판을 사용한 기초연구¹⁴⁾에서도 이를 확인한 바 있으나, 실제 금정광의 경우 SO₂에 의한 치오요소의 절감효과를 알아보기 위하여 0.4M CS(NH₂)₂ 및 0.5M H₂SO₄ 용액에서 3가철을 첨가하지 않고 광액농도를 10%로 하여 금, 은의 침출율을 조사하였으며 그 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 이 그림에 의하면 산화제인 3가철을 첨가하지 않은 경우 SO₂의 존재여부에 따라 금, 은의 침출율은 현저한 차이를 보이고 있다. 즉 SO₂가 존재하면 금과 은의 경우 모두 SO₂가 없을 때보다 침출속도의 감소는 물론 침출율도 상당히 감소하고 있다. 대체로 금의 경우 SO₂가 없을 때는 4시간 침출시 침출율이 약 90%에 이르고 있으나 SO₂가 0.02M 정도 첨가되면 3~4시간 침출로도 침출율이 약 10% 정도에 그치고 있다. 또한 은의 경우도 SO₂의 사용으로 침출율이 75%에서 50%로 감소하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 산화제인 3가철을 첨가하지 않고 정광을 침출할 경우 SO₂를 사용하지 않으면 SO₂에 의해 용액의 전위가 낮아져 환원성이 강해지고 또 SO₂의 용해에 따른 아황산의 영향으로 용액의 pH가 낮아지게 된다. 따라서 정광으로부터 용해되는 철분은

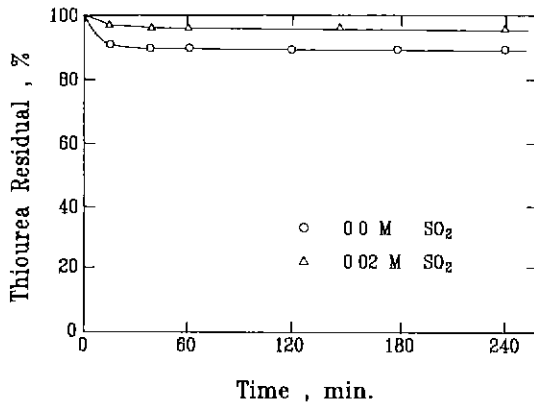


Fig. 12. Thiourea consumption during the leaching of gold and silver from concentrate with SO_2 additon.

SO_2 가 없는 경우에 비해 다소 많아지게 되나 이 철분은 SO_2 에 의해 곧바로 2가철로 환원되어 금, 은의 침출율이 낮아지게 된다. 그러나 SO_2 를 첨가하게 되면 용액의 환원성이 강해지기 때문에 치오요소의 소모량은 다소 절감시킬 수 있다. 즉 Fig. 12에 나타난 바와 같이 SO_2 가 없는 경우에는 치오요소가 약 10% 정도 소모되었으나 SO_2 가 첨가되면 그 소모율은 약 5% 이내로 감소하고 있다.

이상의 결과에서 보면 치오요소의 절감을 위한 SO_2 의 사용은 순금과 같이 불순물이 없는 경우에는 매우 효과적이었지만¹⁴⁾ 금, 은 이외에 기타 금속을 함유한 황화광이 존재할 경우에는 치오요소의 소모율은 다소 감소시킬 수 있으나 이들의 복잡한 거동에 의해 금, 은의 침출율을 저하시키므로, 실용상에는 문제가 뒤따른다. 따라서 황화광을 주성분으로 하는 정광의 경우에 치오요소로 효과적인 침출을 위해서는 산화제나 조절제(SO_2) 등을 별도로 첨가하지 않고 4시간 정도 침출한 후 곧바로 고-액 분리하는 것이 치오요소의 소모량 절감을 도모하면서 금, 은의 침출율을 증대시킬 수 있을 것이다.

한편 치오요소용액으로 정광을 침출할 경우 금, 은 이외에 기타 금속들의 침출율은 Table 2에 나타난 바와 같이 매우 낮음을 알 수 있다. 즉 산화제나 조절제 등을 사용하지 않은 경우에 비소와 납은 1% 정도 그리고 아연과 철은 2~3% 정도, 동은 0.2% 이하만이 정광으로부터 용해되고 있어 치오요소의 장점중의 하나인 선택적인 침출이 가능함을 보이고 있다. 또한 산화제로 3가철을 0.05M 정도 첨가한 경우에는 납은 6% 정도 그리고 동은 13.7% 정도가 용해되는 등 기타 금속성분들이

Table 2. Dissolution of base metal by thiourea. (wt.%)

Element	Dissolution	
	No Addition of Fe^{3+}	Addition of Fe^{3+}
As	1.08	0.9
Pb	1.13	6.0
Zn	2.97	2.77
Fe	2.22	3.79*
Cu	0.14	13.7

*정광으로부터 침출된 철분

약간 더 용해되고 있어 3가철이 황화광의 침출에 관여하고 있음을 알 수 있다(3식 참조).

4. 결 론

1. 정광중 금, 은의 침출반응은 교반속도가 300 rpm까지는 물질전달에 의해서 지배되고 그 이상의 교반속도에서는 광석과 수용액 사이의 확산층 두께가 일정한 것으로 사려된다.
2. 금, 은의 침출시 치오요소와 산화제인 3가철의 농도가 증가할수록 침출속도와 침출율이 증가하나, 이들의 농도가 과대해지면 치오요소의 분해가 촉진되어 유리황의 생성으로 광석표면에 부동태 현상을 일으켜 귀금속의 침출율이 저하된다.
3. 정광의 침출시 3가철의 첨가는 초기의 침출속도를 증대시켜 침출시간을 단축할 수 있으나, 용액의 산화전위가 높아져 치오요소의 소모량을 증대시키고 특히 황화광을 주성분으로 하는 정광에 있어서는 3가철에 의해 황화광이 용해되면서 유리황이 생성되기 때문에 침출효과가 향상되지 못한다. 따라서 황화광이 주성분인 정광의 경우에는 별도의 산화제를 첨가하지 않고 광석중에서 용해되는 철분만을 이용하는 것이 효과적이다.
4. 정광의 침출시 SO_2 를 첨가하게 되면 용액이 강한 환원성으로 되어 치오요소의 소모량을 다소 절감할 수 있으나, 광석중에서 용해되는 철분은 SO_2 에 의해 곧바로 2가철로 환원되기 때문에 금, 은의 침출율이 상당히 저하된다.
5. 정광중 금, 은을 효과적으로 회수하기 위해서는 별도의 산화제나 조절제를 첨가하지 않고 0.4M CS (NH_2)₂ 및 0.5M H_2SO_4 용액에서 광액농도를 10%로 하여 4시간 정도 침출하여야 하며, 이때 용액의 pH는 1이하 그리고 전위는 250 mV로 유지해주어야

한다. 이 경우 금과 은의 침출율은 각각 90% 및 80% 이상을 상회하며 치오요소의 소모율은 초기 농도의 10% 정도이다.

참고문헌

1. Plaksin, I.N. and Kozhukhova, M.A. : "Dissolution of Gold and Silver in Solutions of Thiourea", Sb. Nauchn. Tr. Inst. *Tsvetn Metall.*, **33**, 107-119 (1960).
2. Panchenko, A.F. and Kakovskiy, I.A. : "Dissolution Kinetics of Gold, Silver and Their Alloys in Aqueous Thiourea", *Russ. Metal Fuels*, **6**, 25-30 (1975).
3. Lung, T.N. and Chen, C.K. : "The Chemistry of Thiourea of Gold and Silver", *Bilateral Workshop on Enrichment of Low Grade Ores, KIGAM Micellaneous Report*, **1**, 209-228 (1979).
4. Gabra, G. : "A Kinetic Study of the Leaching of Gold from Pyrite Concentrate Using Acidified Thiourea", *Precious Metals : Mining, Extraction and Processing*, Edited by V. Kudryk, D.A. Corrigan and W.W. Liang, 145-172, TMS of AIME (1984).
5. Groenewald, T. : "The Dissolution of Gold in Acidic Solutions of Thiourea", *Hydrometallurgy*, **1**, 277-290 (1976).
6. Chen, C.K., Lung, T.N. and Wan, C.C. : "A Study of the Leaching of Gold and Silver by Acidothioureation", *Hydrometallurgy*, **5**, 207-212 (1980).
7. Lin, J.C., Lin, J.T. and Wan, C.C. : "Kinetic Study of Silver Leaching by Acidothioureation", *Proceeding of ROK-ROC Bilateral Workshop*, 203-209 (1983).
8. Reddy, S.J. and Krishnam, V.R. : "Electrochemical Oxidation of Thiourea", *J. Electroanal. Chem.*, **27**, 473-476 (1970).
9. Gorbachev, S.V., Atanasyants, A.F. and Senatorov, Y. M. : "The Mechanism of the Electrochemical Oxidation of Thiourea", *Russian J Phys Chem.*, **46**(9), 1395-1396, (1972).
10. 원창완, 조통래 : "산성치오요소법에 의한 금침출에 관한 연구", *대한광산학회지*, **22**(3), 215-220 (1985).
11. Hiskey, J.B. : "Thiourea as a Lixiviant for Gold and Silver", *Proceedings from the 10th AIME Meeting*, Chapter 10, Chicago, Illinois (1981).
12. Schulze, R.G. : "New Aspect in Thiourea Leaching of Precious Metals", *J. of Metals*, June, 62-65 (1984).
13. Pyper, R.A. : "Extraction of Gold from a Carlin-Type Ore Using Thiourea", *ibid Ref.11*, , Chapter 11 (1981).
14. 김성규, 이화영, 오종기, 이동휘 : "치오요소에 의한 금의 침출에 관한 연구", *대한광산학회지*, **26**(2), 144-152 (1989).
15. Deschenes, G. : "Leaching of Gold from a Chalcopyrite Concentrate by Thiourea". *Hydrometallurgy*, **20**, 179-202 (1988).