

암모늄염의 열분해 반응을 이용한 Chalcopyrite로부터의 Copper의 추출

김재용* · 유영홍

고려대학교 화학공학과
(1990년 11월 22일 접수, 1991년 5월 15일 채택)

Extraction of Cu from Chalcopyrite by Thermal Decomposition with Ammonium Salt

Jae Yong Kim* and Young Hong Yoo

Dept. of Chem. Eng., Korea Univ.
(Received 22 November 1990; accepted 15 May 1991)

요 약

암모늄염의 열분해 반응을 이용하여 chalcopyrite로부터 Cu성분의 추출을 위한 새로운 공정을 시도하였다. 이 공정은 NH_4Cl 에 의한 chalcopyrite의 염소화 반응과 그 결과 얻어진 인공 CuS의 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 에 의한 황산화 반응으로 이루어져 있다. 이 공정을 통하여 Cu성분의 99.55%가 chalcopyrite로부터 추출되어 진다.

Abstract—A new process for the extraction of Cu component from the chalcopyrite was attempted by thermal decomposition method of ammonium salts such as ammonium chloride or ammonium sulfate. This process consists of chlorination of chalcopyrite with NH_4Cl and sulfation of Synthetic CuS which was obtained from the chlorination of chalcopyrite with $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Through this process, overall 99.55% Cu component was extracted from the chalcopyrite.

1. 서 론

Chalcopyrite는 구리자원의 대표적인 광물로서 세계 구리자원의 70%를 이루고 있으며 세계 구리생산원료의 80% 이상을 이 chalcopyrite가 차지하고 있다[1, 2]. 이 chalcopyrite로부터의 Cu의 추출방법은 건식법(pyrometallurgical process)[3] 및 습식법(hydrometallurgical process)[4]으로 크게 대별되어 진다. 이 중 건식 제련법의 경우 각 제련소마다 공정 및 반응장치에 따라 약간의 차이는 있지만 고온 배소처리하여 slag와 matte를 분리해 내고 이 중 matte로부터 Cu를 제조한다는 점에선 거의 동일하다. 하지만 이 경우 고온 배소시

다량의 SO_2 의 생성으로 공해 문제를 야기시키기 때문에 습식법을 이용하여 보다 경제적이며 효과적인 추출방식을 모색하고자 하는 경향이 현재 세계적인 추세이며 이에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다[5, 6]. 습식법에 대한 몇 가지 예를 들면, 암모니아용액에서 산소를 산화제로 써서 침출한 후 정제, 전해 환원하는 방법(Arbitrator process)[7], 염화제이철 및 제이동용액으로 chalcopyrite를 침출한 후 염화제이철동으로 석출시켜 수소환원하여 금속 Cu를 얻는 방법(Cymet process)[8], 제이철 또는 나트륨 등의 포화염화수용액에서 Cu를 산화추출시키는 방법(Clear process)[9], 일부 유황을 배소하여 제거시킨 후 Cu를 산용출시키는 방법(Sheritt Gorden process)[10] 및 용매를 사용하여 직접 Cu를 침출시키는 방법(direct leaching process)[11, 12] 등

*원주소 : 충북대학교 환경공학과

여러 가지 방법이 제안되고 있다. 그러나 이들 방식은 Cu회수율이 낮고 처리를 위한 에너지 소요량이 전식법에 비해 높으며 공정상 문제점 등의 결함으로 인해 아직 널리 보급되지는 않고 한 두 곳에서 시험조업단계에 있으며 부분적으로 결함을 개선해 나가고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 이제까지 언급한 바와 같은 여러 가지 문제점 해결을 위한 하나의 방안으로 기존의 습식 및 화학적 처리방법과는 달리 chalcopyrite를 저온에서 염화암모늄으로 염소화하여 Fe분만을 고순도 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 제조원료인 철염화물(iron chloride)의 형태로 선택적으로 분리추출한 다음 반응잔사인 synthetic CuS를 황산암모늄과 반응시켜 Cu성분을 추출하는 새로운 공정개발을 시도하고자 한다.

본 연구자들은 이러한 연구를 위해 chalcopyrite를 NH_4Cl 로 염소화시켜 철분을 선택적으로 분리 제거시키고 인공 CuS를 얻은 바 있으며[13], 이 CuS로부터 Cu분의 추출을 위한 기초연구로서 시약용 CuS와 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 의 열분해 반응을 시도하여 이에 따르는 반응기구 및 반응생성물의 형태를 조사한 바 있다[14]. 그러므로 본 연구는 이제 그 최종 연구로서 chalcopyrite 중의 Fe분을 제거하고 얻어진 인공의 CuS를 대상으로 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 에 의한 황산화에 의해 Cu성분을 추출하는 공정의 전반적인 과정을 검토하였다.

2. 시료 및 실험

2-1. 시료

본 일련의 연구[13, 14]에서 사용된 최초의 원료는 Papua New Guinea의 Bougainville광산에서 채굴된 chalcopyrite(Cu 29.87%, Fe 26.36%, S 30.92%)이며 본 실험에서 직접 사용된 시료는 이 Papua New Guinea 산의 chalcopyrite를 NH_4Cl 로서 염소화시켜 비교적 저온인 300-400°C의 반응온도영역에서 chalcopyrite중의 FeS분만을 선택적으로 분리 제거하므로써 얻어지는 인공의 CuS이며 이에 대한 화학적 성분분석 및 X-선 회절분석은 전보[13]에 제시한 바와 같다.

2-1-1. 시료의 준비

Chalcopyrite의 염소화에서 얻어진 인공의 CuS를 AgNO_3 용액으로 Cl^- 이온이 검출되지 않을 때까지 증류수로 충분히 세척한 후 air bath에서 105°C로 12 h 건조시킨 다음 dessicator 중에서 냉각 후 시료병에 넣고 dessicator속에 보관하여 이후의 실험에 사용하였으며 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 는 reagent CuS의 황산화 반응[14]에서 사용된 것과 같은 시약을 사용하였다.

2-2. 실험

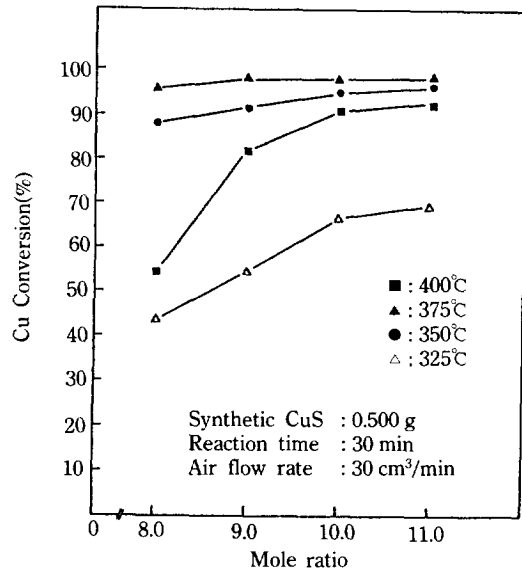


Fig. 1. Effect of mole ratio $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4/\text{synthetic CuS}]$ and reaction temperature on the reaction of synthetic CuS with $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$.

실험장치, 실험방법 등 인공 CuS의 황산화에 대한 제반사항은 반응분위기가 다른 점을 제외하고는 전보[14]에 소개된 바와 동일하다. 본 실험에서의 반응분위기는 전보[14]에서 N_2 기류를 사용하였던 것과는 달리 전보[14]의 실험결과 반응에 O_2 의 영향이 없으므로 공업적 측면을 고려하여 불활성 분위기를 조성하지 않고 공기를 직접 carrier gas로 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 전체적인 경향성

Fig. 1은 air기류 중에서 시약 CuS의 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 에 의한 전보[14]의 결과에 따라 황산화 반응의 전체적인 경향을 살펴보고자 반응시간 40 min을 기준으로 반응온도 325°C에서 400°C까지 변화시키고 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 의 양은 CuS에 대한 mole비로 8.0에서 11.0까지 변화시키며 인공 CuS의 황산화 전화율을 조사하였다. 여기서 전화율은 전보[14]에서 결정된 바와 동일하다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 온도가 높아짐에 따라 그리고 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 의 양이 증가됨에 따라 전화율 역시 증가하는 경향을 보이지만 400°C에서의 전화율이 350°C와 375°C의 경우보다 낮은 것으로 나타나므로 일정온도 이상에서는 오히려 전화율이 감소함을 알 수 있다. 이러한 전체적인 경향성은 시약 CuS의 경우인 전보[14]의 경우와 전체적으로 동일한 경향성이다. 그러나 본 실험에서 사용한

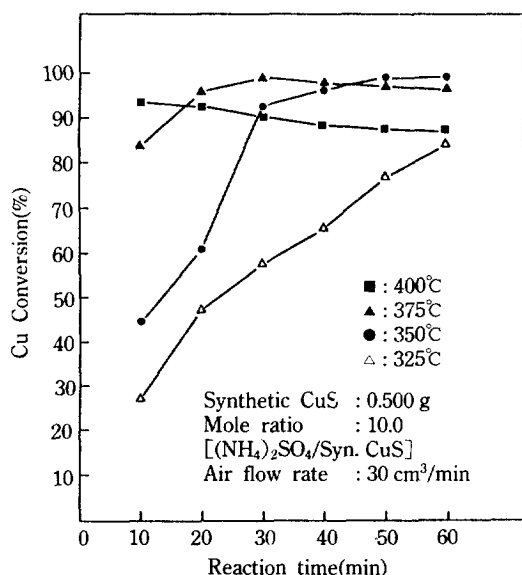


Fig. 2. Effect of reaction time and temperature on the reaction of synthetic CuS with $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$.

인공 CuS의 경우 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 의 양을 각각 달리한 조건하에서 최고 전화율이 나타나는 반응온도조건은 375°C로서 시약 CuS의 경우인 375-400°C의 조건에 비해 조금 낮은 온도이며 또한 400°C의 온도조건에서 다소 전화율이 감소되는 경향을 나타내었다. 반면 황산암모늄의 소요량은 오히려 인공 CuS의 경우가 시약 CuS의 경우보다 더 많은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 에 대한 인공 CuS와 시약 CuS의 반응성에 기인하는 것을 의미하며 그 원인에 대해서는 3-3절에서 검토하고자 한다.

3-2. 반응온도와 반응시간의 영향

3-2-1. 반응전화율

Fig. 2는 반응온도 및 반응시간이 인공 CuS의 황산화에 미치는 영향을 조사하기 위해 air의 유량 30 cm^3

/min, 황산암모늄의 mole ratio 10.0의 조건하에서 반응온도를 325°C에서 400°C까지 변화시키면서 반응시간 변화에 따른 반응전화율을 조사한 것이다.

반응온도 및 반응시간변화에 따른 전체적인 경향은 시약 CuS의 황산화의 경우에서 예측될 수 있는 바와 같이 비슷한 결과를 나타내었다. 그러나 최고 전화율이 얻어지는 온도조건은 375°C이며 400°C의 경우는 시약 CuS의 경우와는 달리 오히려 전화율이 감소된 결과를 나타내었다. 그리고 최고 전화율에 도달하는 반응시간의 경우도 시약 CuS의 경우 반응시간 40 min인 반면 인공 CuS는 30 min 이하에서 얻어지고 있다. 그러므로 이 같은 결과는 인공 CuS의 황산화 반응속도가 시약 CuS 경우보다 빠름을 의미한다. 이에 대한 원인은 본 실험의 인공 CuS의 경우가 시약 CuS의 경우보다 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 의 mole ratio가 크다는 점과 아울러 인공 CuS가 chalcopyrite로부터 NH_4Cl 의 염소화를 통해 제조된 까닭에 시약 CuS에 비해 황산화에 용이해져 있는 때문으로 사려된다.

3-2-2. SEM 분석

Fig. 3은 앞서 인공 CuS가 시약 CuS의 경우에 비해 반응성 및 반응속도가 빨랐던 점을 조사하기 위해 시료인 chalcopyrite(a), 시약 CuS(b) 그리고 인공 CuS(c)의 입자들을 2,000배로 확대하여 찍은 전자현미경사진이다.

이 사진에 나타난 바와 같이 시약 CuS(b)는 그 입자의 표면에 다공성이 보이지 않으나 chalcopyrite를 염소화시키고 Fe분을 제거하여 얻어진 인공의 CuS인 (c)의 경우는 시약 CuS(b)에 비해 그 다공성이 매우 큼을 볼 수 있다.

3-2-3. XRD 분석

Fig. 4는 인공 CuS의 경우 생성되는 반응생성물의 형태 및 앞서 전화율의 경향성을 비교해 보기 위해 반응시간 30 min, 유량 $30 \text{ cm}^3/\text{min}$, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ mole ratio 10.0의 조건하에서 각각 온도별로 반응시킨 반응생성물을 X-선 회절분석한 결과이다. 인공 CuS의 반응에서도 주된 황산화생성물은 시약의 경우와 마찬가지로

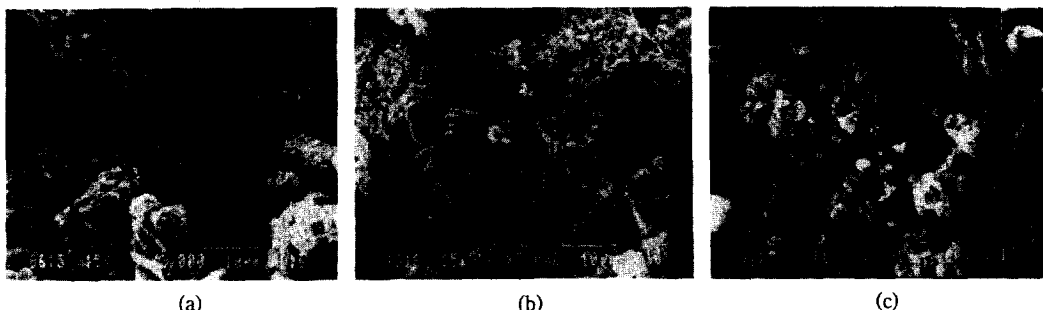


Fig. 3. SEM micrographs of the chalcopyrite(a), reagent CuS(b) and synthetic CuS(c).

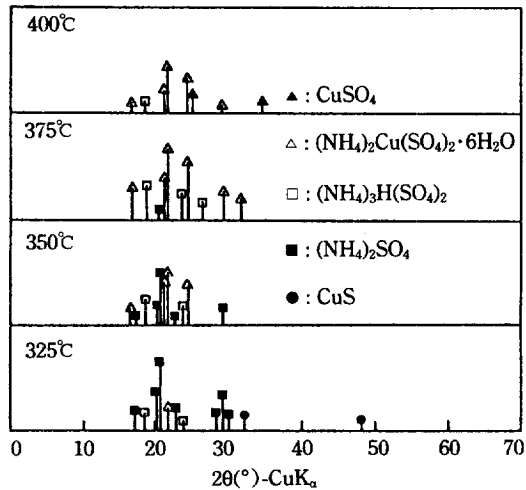


Fig. 4. X-ray diffraction diagrams of the sulfated synthetic CuS at various temperatures.

$(\text{NH}_4)_2\text{Cu}(\text{SO}_4)_2$ 및 CuSO_4 로 나타났으며 온도의 변화에 따른 반응생성물의 변화도 시약 CuS의 경우와 비슷하게 나타남을 알 수 있었다. 따라서 이상의 결과를 통해서 인공 CuS의 경우 반응온도는 375°C 가 적당하며 반응시간은 30 min이면 충분할 것으로 사려된다.

3-3. $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 의 양의 영향

Fig. 5는 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 의 양이 인공 CuS의 황산화에 미치는 영향을 조사하고자 air유량 $30\text{ cm}^3/\text{min}$, 반응온도 375°C 의 조건하에서 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 의 mole ratio를 8.0에서 11.0까지 변화시키면서 반응시간에 따른 전화율을 조사한 결과이다.

Fig. 5에 나타난 바와 같이 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 의 영향은 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 의 양이 증가함에 따라 전화율이 증가하며 일정량 이상의 황산암모늄이 들어가는 경우 전화율이 오히려 감소하는 등 전체적 경향성은 시약 CuS의 경우와 비슷하다. 그러나 최고 전화율을 나타내는 황산암모늄의 양은 시약 CuS의 경우 mole ratio 6.0인 점에 비해 인공 CuS의 경우는 mole ratio 10.0으로 다소 높게 나타났다. 인공 CuS의 경우 시약 CuS에 비해 일정 전화율을 얻는데 더 많은 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 의 양이 소요되는 것은 인공 CuS는 전보[13]에서 밝힌 바와 같이 순수한 CuS 시약에 비해 많은 종류의 불순물이 함유되어 있으며 이로 인해 CuS 성분의 황산화시 Fe를 비롯한 타성분들이 함께 황산화되어 지기 때문으로 사려된다. 따라서 인공 CuS의 황산화에 있어 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 의 소요량은 CuS에 대한 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 의 mole ratio 10.0이 가장 적당하다. 이상의 결과와 앞서 검토한 결과를 종합하면 인공

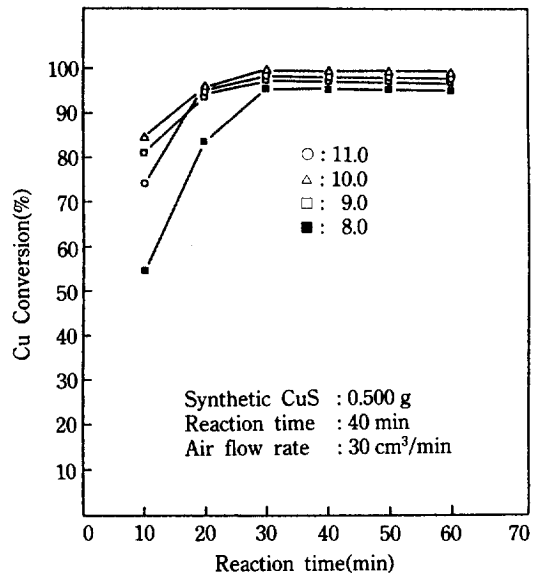


Fig. 5. Effect of reaction time and mole ratio $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4/\text{synthetic CuS}]$ on the reaction of synthetic CuS with $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$.

CuS의 황산화는 시약 CuS의 경우와 그 경향성의 유사성으로 볼 때 반응제내에서의 부반응 및 반응기구 역시 유사할 것으로 보인다. 그리고 제시한 적정조건 하에서 99.55%의 Cu가 추출되었으며 이는 원광 chalcopyrite 중 함유되어 있는 Cu성분의 거의 전부를 추출할 수 있음을 의미한다.

4. 공정의 검토

기존의 Cu추출공정은, 세계각국에서 거의 대부분 제련법을 이용하는 방식을 채택하고 있다. 그러나 장치설비 및 유지에 따르는 경비가 상당히 크며 건식제련공정에서 필연적으로 야기되는 SO_2 로 인한 공해문제와 아울러 더욱이 slag에 포함되어 있는 Cu와 Fe의 처리문제가 용이하지 않기 때문에 습식법을 이용하여 보다 경제적이고 효과적인 추출방법을 모색하고자 하는 경향이 현재 세계적인 추세이다. 한편 Cu제조원료로서 가장 많이 사용되고 있는 chalcopyrite의 경우, Fe와 Cu분의 함유량은 공히 30% 내외로서 매우 높은 함량이나 주로 Cu제조를 위한 원료로서만 사용되고 있으며 Fe의 경우는 철의 추출을 위한 원료로는 사용되어 지지 않고 오히려 Cu제조에 방해요소가 되는 불순물 정도로 취급되어 지고 있는 실정이다. 따라서 chalcopyrite로부터 Fe 및 Cu분의 효과적 분리추출에 대한 공정개발은 경제적인 차원에서 뿐만 아니라 유효금속에 대한 자원관

리면에서 볼 때 매우 중요하다고 사려된다. 한편 저자는 이에 관한 일련의 기초연구로써 다음의 연구를 진행한 바 있다[13]. 비교적 저온인 325-425°C의 반응온도영역에서 NH_4Cl 에 의한 chalcopyrite(Cu 29.87%, Fe 26.36%, S 30.92%)의 열분해 반응을 수행한 결과 chalcopyrite로부터 Fe분만을 선택적으로 염소화시킬 수 있었으며 chalcopyrite 0.500 g, 반응온도 375°C, 반응시간 30 min, weight ratio(NH_4Cl /chalcopyrite) 11.0, 시료입도 -325 mesh의 적정조건에서 Fe분의 최고 전환율은 92.94%였다. 또한 Fe분을 분리추출한 다음 남은 잔사분의 형태는 Cu 55.89%의 함량을 지닌 covellite 구조의 CuS 였다. 앞서 언급한 바 있듯이 chalcopyrite의 처리방안에 있어 chalcopyrite가 주로 Cu 제조원료로만 이용되어 지고 Fe분은 slag형태로 방치되며 또한 slag로부터 Fe분 및 Cu 분의 회수에 대해 별도로 연구가 진행되어 짐을 감안할 때, chalcopyrite로부터 저가의 염소원인 NH_4Cl 에 의한 선택적 염소법에 의해 Fe분만을 직접적으로 고순도 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 제조원료가 되는 FeCl_2 의 형태로 제조할 수 있음은 물론 반응후 처리에 있어서도 FeCl_2 가 물로 쉽게 침출되어져 결과적으로 X-선 회절 분석에서 확인한 바 있듯이 잔존분인 synthetic CuS 와 쉽게 분리추출이 가능하기 때문에 이는 매우 효과적인 공정이라 사려된다. 더욱이 기존의 metal sulfides를 대상으로 하는 제련방법이 대부분 S분의 산화로 인한 $\text{SO}_{2(g)}$ 발생으로 심각한 대기공해문제를 야기시키는데 반해 본 공정의 경우 NH_4Cl 에 의한 chalcopyrite의 열분해 반응이 진행되는 동안 elemental S를 제조하기 쉬운 $\text{H}_2\text{S}_{(g)}$ 를 생성하므로 metal sulfides에 대한 염소법을 시도하고자 하는 현재의 세계적인 추세에 비추어 볼 때 이는 더욱 유용한 공정이라 할 수 있다.

한편 Cu 분의 경우를 살펴보면, 이제까지의 실험결과에 따라 위의 최적조건에서 반응을 수행하여 시료 chalcopyrite중 Fe분만을 선택적으로 염소화시킨 다음 FeCl_2 의 형태로 분리추출하고 남은 잔사분에 대한 화학분석 및 X-선 회절분석 결과 CuS 형태임을 확인하였으며 이의 조성은 Cu 55.89%, S 29.98%, SiO_2 7.48% 및 Fe 3.62%로서 Cu 의 함량은 55.89%로 크게 향상되었다. 또한 이 인공 CuS 에 대해 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 에 의한 열분해 반응을 수행한 결과 최적조건에서 Cu 분의 추출율은 99.55%였다.

따라서 이제까지의 실험결과에 따라 chalcopyrite로부터 Cu 제조공정에 있어 본 공정을 활용할 경우 다음 몇 가지 사항의 유리한 점이 있다고 사려된다.

4-1. 자원면

(1) Fe : 국내의 L급속(주)의 온산제련소 및 장항

제련소에서 산출되는 slag중 Fe 의 품위는 약 29-35%로서 매우 높은 함량이 함유되어 있으며 각각의 연간 생산량은 15,000 및 5,000 t으로서 약 20,000 t정도이다. 세계적으로 따진다면, slag로 방치되는 막대한 양의 Fe 분을 고순도 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 의 형태로 회수할 수 있다.

(2) Cu : 국내의에서 현재 조업중 생산되는 matte의 Cu 함유량(29-52%)보다 고품위의 Cu ore(synthetic CuS)를 제조할 수 있다.

4-2. 경제적 측면

Chalcopyrite로부터 Cu 제조에 대한 최근 연구동향에 관한 이제까지의 결과를 종합해 보면 세계적으로 대부분 습식법에 의한 Cu 추출공정을 시도하고 있으나 solvent extraction의 경우 처리량이 작은 관계로 실제공정에 적용함에 있어 조업상 많은 문제점 등을 안고 있으며 FeCl_3 등에 의한 침출법 등은 가압, 침출조건 및 산화환원 등에 따르는 제반조건 등의 설정과 특히 침출액 중 녹아있는 Fe 및 Cu 분의 분리회수에 있어 Fe 분의 손실과 Cu metal을 제조할 때 적용되어 지고 있는 공정인 수소환원법 등에 따르는 막대한 양의 에너지 소요로 인하여 건식법의 경우보다 오히려 장치설비 및 유지에 따르는 경비가 더 많이 드는 난점 등을 안고 있다. 이와 같은 상황을 고려해 볼 때 본 공정을 활용할 경우 경제적인 면에서 다소 경비를 절감시킬 수 있을 것으로 사료된다.

(1) 장치설비 및 유지비: 기존의 제련법에서 사용중인 장치설비 및 유지에 따른 경비를 줄일 수 있으며 이제까지 발표된 습식법보다 유리하다.

(2) 용재(flux) 및 용매(solvent): 용재가 필요없고 용매는 가장 구하기 쉬운 물로써 효과적인 침출이 가능하다.

(3) 염소원: 고가의 $\text{Cl}_{2(g)}$ 및 $\text{HCl}_{(g)}$ 대신에 공업화학 분야에서 부산물로 다량 생산되고 있으나 처리방법이 없어 새로운 용도개발이 절실한 NH_4Cl 을 염소원으로 이용하였으며 염소화제로서의 가능성을 입증하였다.

(4) 황산화제: $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 를 새로운 황산화제로 사용하였으며 그 가능성을 확인하고 새로운 용도개발에 대한 해결방안을 제시함으로써 그 분야 관련산업에 이용되어 질 수 있다.

4-3. 공해면

Metal sulfides를 대상으로 하는 건식제련방법이 대부분 $\text{SO}_{2(g)}$ 의 발생으로 심각한 대기공해문제를 야기시키는데 반해 chalcopyrite와 NH_4Cl 을 반응시킬 경우 elemental S를 제조하기 쉬운 $\text{H}_2\text{S}_{(g)}$ 를 생성한다.

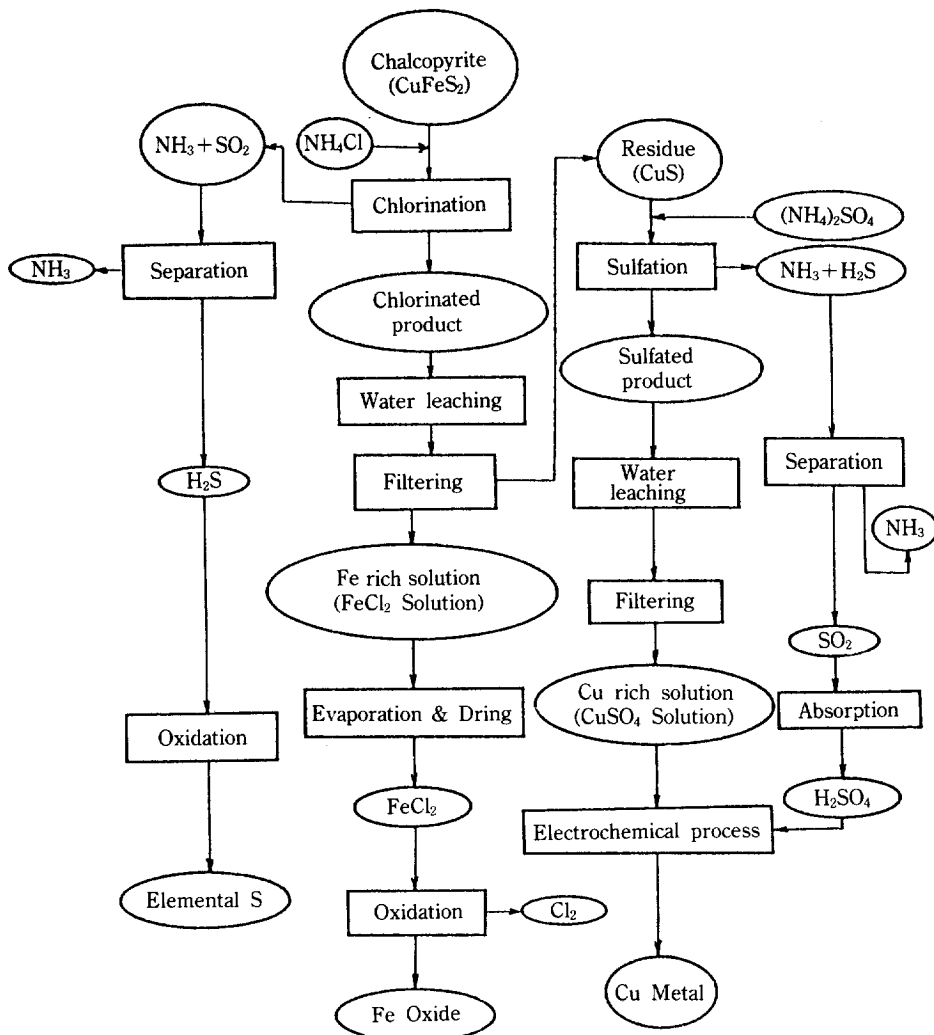


Fig. 6. A schematic flow sheet of the process for the extraction of Fe and Cu components from the chalcopyrite.

4-4. 공정면

Unit operation 및 unit process면에서 기존의 Cu 제련방식에 비해 매우 효과적이라 사려된다.

결론적으로 앞서 진행된 이제까지의 모든 실험 및 결과를 종합하여 볼 때 본 연구의 궁극적 목표인 chalcopyrite의 새로운 처리 방안에 대한 효과적인 공정개발을 모색할 수 있었으며 암모늄염들의 새로운 염소원과 황산화제로서의 가능성 역시 확인할 수 있었다. 이에 따라 NH_4Cl 과 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 를 염소화제 및 황산화제로 사용하여 chalcopyrite로부터 Fe 및 Cu분 등 유효성분의 추출에 관한 가상적 공정도를 Fig.6에 나타내었다.

5. 결 론

Air 분위기하에서 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 에 의한 인공 CuS의 열분해 반응에 대한 앞의 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 반응온도가 높을수록 반응전화율 및 초기반응속도는 증가하며 최적반응온도는 375°C 가 적당하고 그 이상의 온도는 적정치 못하다.

(2) $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 의 양이 증가함에 따라 반응전화율 역시 증가하지만 본 반응계에서 인공 CuS에 대한 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 의 mole ratio는 10.0이 적당하며 반응시간은 30 min이면 충분하다.

(3) 이상의 조건에서 Cu의 최고 전화율은 99.55%였다.

(4) 본 공정은 chalcopyrite로부터 Fe 및 Cu 성분의

추출공정으로서의 충분한 경제성을 가지며 지속적 연구가 요구된다.

REFERENCES

1. Hodel, D. P.: *Mineral Ind. Sur., U. S. Bur. of Mines.*, April, 20(1988).
2. Kumar, M. L., Kun Li and Warren, G. W.: *Can. Metall. Quart.*, **24**(4), 335(1985).
3. Toguri, J. M., Themelis, N. J. and Jemming, P. H.: *Can. Metall. Quart.*, **3**(3), 197(1964).
4. Atwood, G. E. and Curtis, C. H.: U.S. Patent, 3, 785, 944(1974).
5. Liddell, K. C. and Bautista, R. G.: *Metall. Trans.*, **14B**, 5(1983).
6. Tetsuzi, H., Hiroshi, M. and Yasuhiro, A.: *Metall. Trans.*, **18B**, 489(1987).
7. Beckstead, L. W. and Miller, J. D.: *Metall. Trans.*, **8B**, 31(1977).
8. E/MJ, Oct., 33(1977).
9. Bonan, M., Demarthe, J. M., Renon, H. and Baratin, F.: *Metall. Trans.*, **12B**, 269(1981).
10. Beckstead, L. W. and Miller, J. D.: *Metall. Trans.*, **8B**, 19(1977).
11. Peters, E.: *Metall. Trans.*, **7B**, 505(1976).
12. Lee, H. Y.: Ph. D. Dissertation, KAIST, Seoul, Korea(1987).
13. Kim, J. Y. and Yoo, Y. H.: *Hwahak Konghak*, **29**(1), 118(1991).
14. Kim, J. Y. and Yoo, Y. H.: *Hwahak Konghak*, **29**(2), 229(1991).