

라테라이트광의 건식분쇄가 니켈 및 코발트의 침출에 미치는 영향

Effect of Dry Grinding of Laterite on the Extraction of Nickel and Cobalt

김 완 태(Wantae Kim)¹ · 최 도 영(Doyoung Choi)² · 김 상 배(Sang Bae Kim)^{1,*}

¹한국지질자원연구원 광물자원연구본부

(Mineral Resources Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea)

²전남대학교 에너지자원공학과

(Energy and Resources Engineering, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea)

요약 : 본 연구에서는 라테라이트광의 건식 분쇄가 니켈 및 코발트의 침출에 미치는 영향을 조사하였다. 시료로 사용한 라테라이트광은 주로 SiO₂, Fe₂O₃, MgO로 이루어져 있으며, 니켈과 코발트의 함량은 0.81% Ni, 0.02% Co이었다. 주 구성 광물은 리자다이트와 석영이며, 미량의 포스터라이트와 엔스타타이트를 함유하고 있었다. 분쇄가 진행됨에 따라 시료의 평균입도, 비표면적, 밀도는 감소하는 경향을 보였으며, X-선 회절분석을 통해 리자다이트의 비정질화가 진행됨을 확인하였다. 분쇄에 의한 석영의 물성변화는 나타나지 않았으나, 리자다이트의 Mg-OH 결합이 파괴됨으로써 니켈 및 코발트의 침출율이 향상됨을 알 수 있었다. 분쇄가 진행됨에 따라 니켈과 코발트의 침출율은 증가하였으며, 60분 분쇄한 시료의 경우, 사용한 무기산의 종류에 관계없이 니켈과 코발트의 침출율은 약 80%로 나타났다.

주요어 : 라테라이트, 니켈, 코발트, 분쇄, 침출

ABSTRACT : We investigated the effect of dry grinding of laterite on the extraction of nickel and cobalt. The major chemical compositions of the sample for this work were SiO₂, Fe₂O₃ and MgO. The sample contained 0.81% Ni and 0.02% Co. The major minerals of the sample were lizardite and quartz with minor amounts of forsterite and enstatite. The mean particle size, specific surface area and density of the ground sample decreased with increasing grinding time, while the amorphization of lizardite increased as identified by XRD analysis. The grinding enabled the extraction ratio of Ni and Co to increase by the breakdown of Mg-OH bonding in the lizardite structure. However, physical properties of quartz were not changed by grinding. The extraction ratio of Ni and Co increased with increasing grinding time. Approximately 80% of Ni and Co were extracted regardless of the kind of acid solutions when the sample was ground for 60 minutes.

Key words : Laterite, nickel, cobalt, grinding, extraction

*교신저자: sbkim@kigam.re.kr

서 론

전 세계 니켈의 총 매장량은 약 6,700만톤으로 알려져 있으며, 그 중 경제적으로 채굴 가능한 니켈광은 황화광(sulphide ore)과 라테라이트광(laterite ore)으로 분류된다. 황화광은 주 함니켈 광물인 펜틀란드이트(pentlandite, $(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$)이며, 라테라이트광은 규산염광과 산화광으로 다시 구분되어 규산염광은 가니어라이트(garnierite, $(\text{Ni}, \text{Mg})_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$), 산화광의 경우는 리모나이트(limonite, $(\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O})$)가 주요 함니켈 광석을 이루고 있다(Dalvi *et al.*, 2004). 또한 라테라이트광은 니켈 이외에도 미량의 코발트를 함유하고 있어 코발트의 중요한 공급원으로도 인식되고 있다. 일반적으로 황화광은 부유선별(flotation)을 통해 니켈의 회수가 가능하지만 라테라이트광의 경우는 전통적인 선광 방법으로는 니켈과 코발트의 회수가 어려워 대부분 건식 또는 습식 제련을 통해 니켈과 코발트를 회수하고 있다(Valix and Cheung, 2002; Whittington *et al.*, 2003a; Whittington *et al.*, 2003b; McDonald and Whittington, 2008).

라테라이트광의 건식 제련은 건조, 하소, 환원, 전기로 용융 등의 과정을 통해 페로니켈(ferro-nickel)을 제조하는 것이다. 주로 마그네슘 함량이 높고 철분의 함량이 낮은 가니어라이트질 라테라이트광을 처리하는데 적합한 공정으로 활용되고 있다. 습식 제련은 철분의 함량이 많은 리모나이트질 라테라이트광을 주요 처리대상으로 한다. 대표적으로는 Caron 공정과 HPAL (high pressure acid leaching) 공정을 들 수 있다. Caron 공정은 고온에서 니켈과 코발트를 선택적으로 환원시켜 금속으로 변환시키는 방식이며, HPAL 공정은 고온고압에서 주로 니켈을 용출시키는 방식이다(Dalvi *et al.*, 2004).

라테라이트광은 조암 특성상 별도의 선광 과정을 거치지 않고 대부분 건식 또는 습식 제련을 통해 처리되므로 광석에 포함된 유용 성분의 함량에 비해 광석의 단위 무게당 처리비가 증가하고 에너지 소비량 또한 증가하게 된다. 따라서 라테라이트광의 제련에 앞서 유용 성분만을 우선 농축시켜 광석의 전체 처리량을 줄이려는 품위향상 연구가 이루어져 왔다(Lesic, 1963; Taniuchi, 1964; Imaizumi *et al.*, 1974; Onodera *et al.*, 1987). 그러나 많은 노력에도 불구하고 라테라이트광의 물리화학적 품위향상과 관련한 연구는 특별한 성과 없이 현재에 이르고 있다.

상기한 고온고압 침출과는 달리 라테라이트광의 상압침출은 무기산의 농도 및 침출 온도에 의존하는 경향이 매우 크다. 따라서 라테라이트광과 같이 니켈과 코발트의 함량이 비교적 낮은 경우는 주로 고농도의 산을 사용하거나 침출 온도를 높이는 조작을 통해 니켈 및 코발트의 침출율을 향상시키는 것이 일반적이다. 그러나 침출 과정에서 요구되는 조건은 니켈 및 코발트의 침출율을 고려할 때 경제적이기 못하며, 상압침출 후 침출 용액에 포함된 각종 불용성분의 상호분리 또한 기술적 또는 경제적 한계가 있는 것으로 평가되고 있다(McDonald and Whittington, 2008). 본 연구에서는 라테라이트광에 적용 가능한 물리화학적 처리기술로서 라테라이트광의 건식 분쇄 과정에서 일어나는 물성변화를 분석하고, 분쇄 조작이 라테라이트광의 니켈과 코발트 침출에 미치는 영향을 조사하였다. 일반적으로 분쇄 과정에서 일어나는 물질의 다양한 물리화학적 변화를 메카노케미칼 효과(mechanochemical effect)라 하며 대표적으로 결정 구조의 변화, 비정질화 또는 물질 상호간의 화학반응 등을 야기하는 것으로 알려져 있다(Lin and Navid, 1979; Boldyrew 1987; Delogu *et al.*, 2003).

본 연구에서는 건식 분쇄에 따른 라테라이트광의 결정상, 입도, 비표면적 및 결정 구조의 변화 등을 조사하였다. 또한 분쇄 시간 및 무기산 용액의 농도에 따른 구성 성분의 상온에서의 침출 거동을 고찰함으로써 니켈 및 코발트의 침출에 미치는 건식 분쇄 효과와 관련한 실험적 정보를 제공하고자 한다.

시료 및 실험방법

본 연구에서 사용한 시료는 뉴칼레도니아(New Caledonia)로부터 국내로 수입되어 페로니켈 제조용 원료로 사용되고 있는 라테라이트광으로 X-선 회절분석(XRD) 및 화학조성 분석(ICP-AES)을 통해 구분하면 마그네슘을 다량 함유하고 있는 라테라이트광에 해당한다. 시료는 자연 건조한 후 조크러셔, 콘크러셔, 펄버라이저 등을 이용해 단계적으로 파분쇄한 후 체질하고 0.5 mm 이하의 크기로 제조하여 본 연구의 출발시료로 사용하였다.

시료의 분쇄는 유성볼밀(planetary ball mill, Fritsch Pulverisset-7, Germany)을 사용하였다. 분쇄는 시료 5.5 g을 내부 용적 45 mL의 스테인리스 용기에 직경 15 mm의 스테인리스 볼 7개와 함께 장입한 후

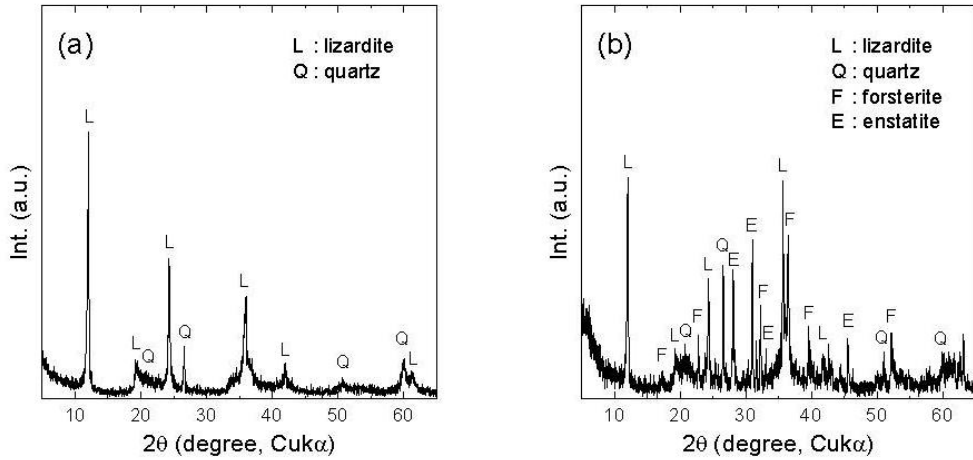


Fig. 1. XRD patterns of the raw sample.

건식으로 행하였다. 분쇄 시간은 60분 이내에서 변화시켰으며 분쇄기의 회전속도는 모든 실험에서 650 rpm으로 고정하였다. 고속으로 회전하는 분쇄기의 특성 상 분쇄 시간이 5분을 경과하는 경우는 일정 시간 분쇄를 멈춘 후 재분쇄하는 과정을 반복함으로써 분쇄 과정에서 용기 내부에 과도한 열이 발생하는 것을 방지하고자 하였다. 일정 시간 분쇄한 시료는 용기에서 수거하여 밀봉한 후 보관하였다. 분쇄한 시료는 X-선 회절분석(XRD, RINT-2000, Rigaku, Japan)과 적외선분광분석(FT-IR, Nicolet 380, ThermoFisher Scientific, USA)을 통해 결정상 및 결정 내부구조의 변화를 파악하였다. 또한 입도 (Mastersizer 2000, Malvern, England), 비표면적 (BET, ASAP-2010, Micromeritics, USA) 주사전자현미경(SEM, JSM-4100, Jeol, Japan) 분석 등을 통해 시료의 물리화학적 변화를 관찰하였다.

분쇄한 시료의 침출 실험은 염산과 황산용액을 사용하여 행하였다. 염산 및 황산용액 200 mL에 시료 5 g을 투입하고 약 250 rpm으로 교반하면서 60분 동안 침출하였다. 침출 온도는 상온(18 ± 0.5 °C)을 유지하였다. 무기산의 농도는 0.1~2 N로 변화시켰으며, 침출 후 고-액 분리한 용액을 분석(ICP-AES, JY38+, Jobinyvon, France)하여 분쇄한 시료의 침출 특성을 평가하였다.

결과 및 고찰

본 연구에서 사용한 시료의 주성분은 36.84% SiO₂, 18.92% Fe₂O₃, 24.02% MgO로 전체의 약

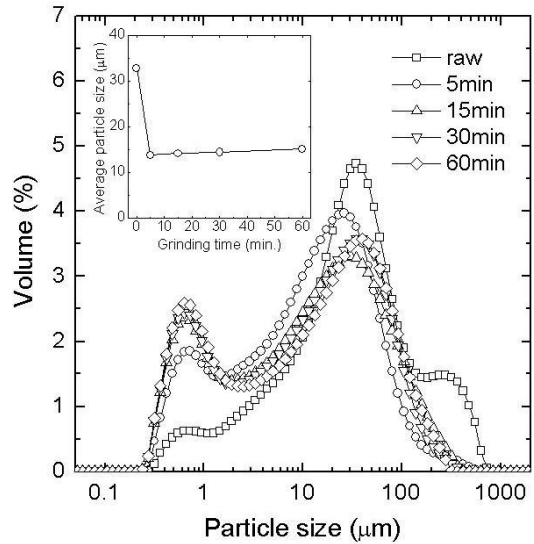


Fig. 2. Particle size distribution of raw and ground samples.

79.8%를 차지하였다. 주요 성분 이외에 0.75% Cr, 0.04% Co, 0.02% Zn, 0.81% Ni를 함유하고 있었다(표 1). X-선 회절분석을 통해 구성 광물을 조사한 결과 주 구성 광물은 리자다이트(lizardite, Mg₃Si₂O₅(OH)₄)와 석영으로 나타났으며(그림 1a), 시료 중 유색입자만을 별도로 분리하여 분석한 결과 포스터라이트(forsterite, Mg₂SiO₄)와 엔스타이트(enstatite, (Mg,Fe)SiO₃) 등이 검출되었다(그림 1b). 시료의 풍화 정도가 심하여 X-선 회절분석만으로는 여타의 구성 광물의 존재 여부를 판단하기는 곤란하였다.

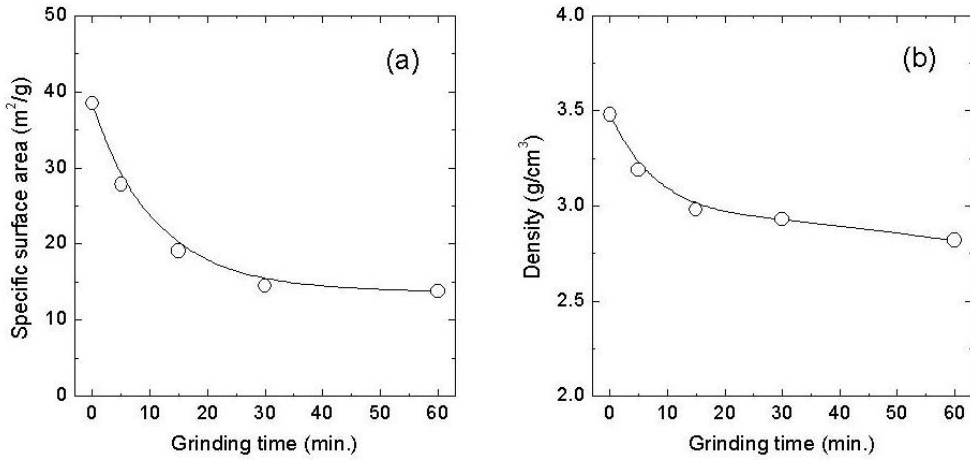


Fig. 3. Specific surface area (a) and density (b) of raw and ground samples.

일반적으로 자철석(magnetite, Fe₃O₄) 또는 침철석(goethite, FeO(OH)) 등이 일부 포함되어 있는 것으로 알려져 있다(Luo *et al.*, 2010).

분쇄 시간에 따른 시료의 입도, 비표면적, 밀도의 변화를 통해 건식 분쇄에 의한 시료의 물성 변화를 관찰하였다. 시료의 평균 입도는 분쇄 시간 5분 이내에서 급격히 감소하며, 이후 미세하게 증가하는 경향을 보이나 거의 일정한 값을 나타내는 결과를 보였다(그림 2). 평균 입도의 미세한 증가는 분쇄된 입자의 응집(agglomeration) 현상으로 이해할 수 있으며, 분쇄 시간 5분 이후에는 응집된 1차 입자들의 해체와 재응집이 반복됨으로써 겉보기 입도에는 변화가 없는 분쇄 한계에 이른 것으로 판단되었다. 그러나 미세 입자의 양은 분쇄가 진행됨에 따라 증가하는 결과를 보였다(그림 2). 비표면적의 경우는 분쇄 시간이 증가함에 따라 감소하였으나, 분쇄 시간 30분 이후에서 그 변화량은 매우 작게 나타나는 결과를 보였다(그림 3a). 비표면적의 감소는 분쇄력에 의한 입자의 응집 또는 미세 기공의 감소에 의한 것으로, 분쇄 과정에서 일어나는 비표면적의 감소는 일반적으로 함수광물을 분쇄하는 경우에서 보다 뚜렷하게 관찰되는 것으로 보고되고 있다(Filio *et al.*, 1993; Zhang *et al.*, 1996; Kim *et al.*, 2000). 또한, 분쇄 시간에 따른 시료의 밀도 변화는 분쇄 시간이 증가함에 따라 점차 감소하는 결과를 보였으며(그림 3b), 이는 분쇄에 의한 시료의 비정질화에 기인하는 것으로 판단되었다(Filio *et al.*, 1993).

유성밀과 같은 고에너지 밀을 사용하는 분쇄에서 결정상의 고체는 주로 강한 충격력과 압축력을

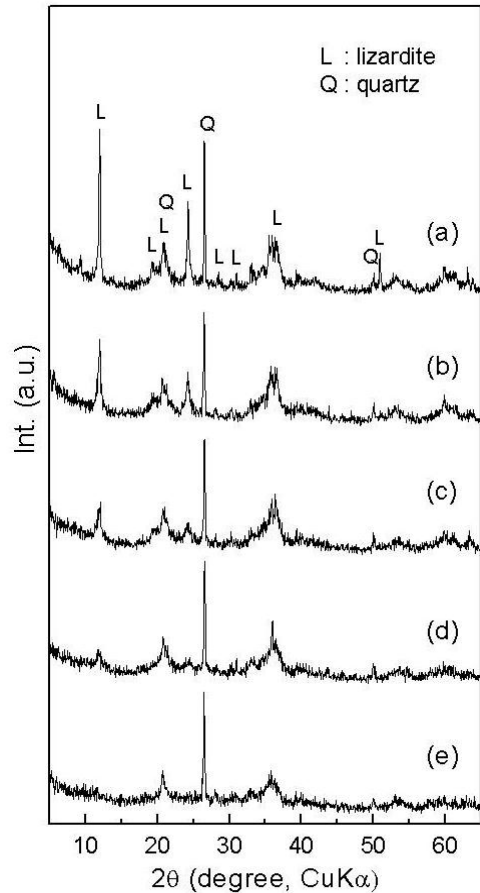


Fig. 4. XRD patterns of the sample ground for different period of time. (a) Raw, (b) 5 min, (c) 15 min, (d) 30 min, and (e) 60 min grinding.

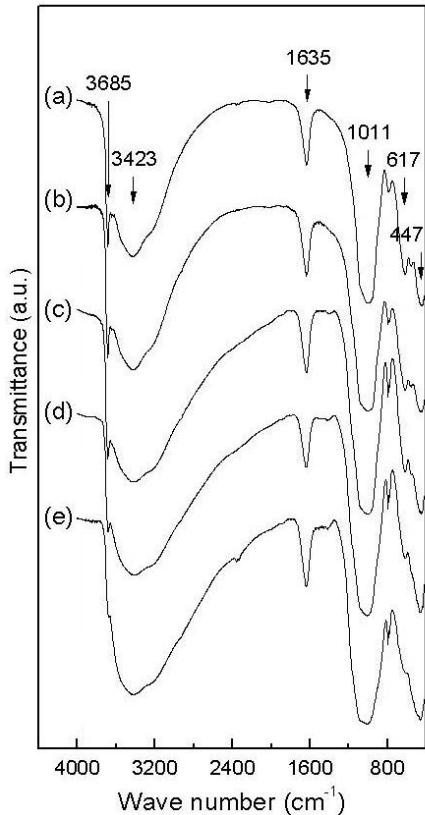


Fig. 5. FT-IR spectra of the sample ground for different period of time. (a) Raw, (b) 5 min, (c) 15 min, (d) 30 min, and (e) 60 min grinding.

받게 되며, 분쇄 시간이 경과함에 따라 점차 비정 질화가 진행된다. 일반적으로 건식 분쇄의 경우가 습식 분쇄에 비해 비정질화가 빠르게 진행되며, 수화물의 비정질화가 비수화물의 경우보다 빠른 것으로 알려져 있다(Avvakumov *et al.*, 1994). 본 연구에서는 분쇄 시간에 따른 시료의 X-선 회절분석 결과를 통해 구성 광물의 결정성의 변화를 관찰하였다. 석영의 경우 분쇄 시간에 따른 특성 피크의 강도 변화는 관찰되지 않았으나 리자다이트의 경우는 분쇄 시간이 증가함에 따라 특성 피크 강도가 급격히 감소하였다. 분쇄 시간 60분 이내에서 대부분의 피크가 사라지는 것을 확인할 수 있었다(그림 4). 이는 분쇄 과정에서 강한 충격력과 압축력에 의해 리자다이트 결정의 규칙성이 점차 파괴됨을 의미하며, 분쇄 시간이 증가함에 따라 비정질화가 진행되고 있음을 보여주는 결과로 이해할 수 있다. 라테라이트광에 포함된 니켈은 라테라이트광의 특정 광

물, 즉 리자다이트의 결정을 구성하는 마그네슘의 일부를 치환하는 것으로 알려져 있다(Luo *et al.*, 2009). 강한 분쇄력을 이용한 결정 입자의 파괴는 입자의 활성을 점진적으로 증가시켜 니켈과 코발트의 침출율을 향상시키는데 기여할 수 있을 것으로 판단되었다.

분쇄에 의한 광물 결정의 비정질화 이외에도 분쇄 과정에서 일어나는 함수광물의 물성 변화는 다양하며 대표적으로 분쇄에 의한 탈수반응을 들 수 있다(Kano *et al.*, 2000; Kim and Saito, 2000; Senna, 2007). 적외선 분광기(FT-IR)를 이용한 시료의 분석 결과, 분쇄가 진행됨에 따라 리자다이트 내부의 이온간 결합 상태가 일부 변화하고 있음을 확인할 수 있었다(그림 5). 3,423 cm^{-1} 및 1,635 cm^{-1} 부근의 피크는 수소결합을 하고 있는 O-H의 신축 및 굽힘 진동을 나타내는 것(Madejov *et al.*, 2002)으로 시료에 포함된 수분에 의한 것으로 판단된다. 3,685 cm^{-1} 의 피크는 리자다이트의 Mg-OH 결합의 신축 진동이며, 617 cm^{-1} 의 피크는 Mg-OH의 굽힘 진동에 의한 것으로 판단된다(Madejov *et al.*, 2002). 이 두 스펙트럼은 분쇄 시간이 증가함에 따라 점차 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, Si-O 결합을 나타내는 1,000 및 447 cm^{-1} 의 피크는 큰 변화를 보이지 않았으며, 석영의 주요 특성 피크로 알려진 795 cm^{-1} 부근의 이중 피크 또한 변화 없음을 보여 분쇄 시료의 X-선 회절분석 결과(그림 4)와 일치함을 알 수 있었다.

상압침출의 경우, 침출율은 주로 무기산의 농도, 침출 시간, 침출 온도에 영향을 받으므로 라테라이트광과 같이 니켈과 코발트의 함량이 비교적 낮은 경우는 고농도의 산을 사용하거나 침출 온도를 높이는 조작을 통해 니켈과 코발트의 침출율을 향상시키는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 대표적인 무기산인 황산과 염산을 사용하여 분쇄 시료의 침출 실험을 행하였다. 침출 실험은 먼저 분쇄 시간에 따른 침출율의 변화를 조사하였다. 각 무기산의 농도 0.5 N, 침출 시간 60분으로 고정하여 상온에서 행하였으며, 침출 용액의 교반 속도(250 rpm) 및 고액비(w/v = 0.025)는 일정하게 유지하였다. 분쇄 전 시료(출발 시료)의 침출율은 염산 용액에 비해 황산 용액에서 다소 높게 나타났으나 대부분 10~20% 정도의 낮은 침출율을 보였다(그림 6). 분쇄 시료의 침출율은 분쇄가 진행됨에 따라 증가하였으며 특히, 마그네슘, 니켈, 코발트는 다른 성분들에 비해 높은 침출율을 보였다(그림 6). 이는 분쇄에

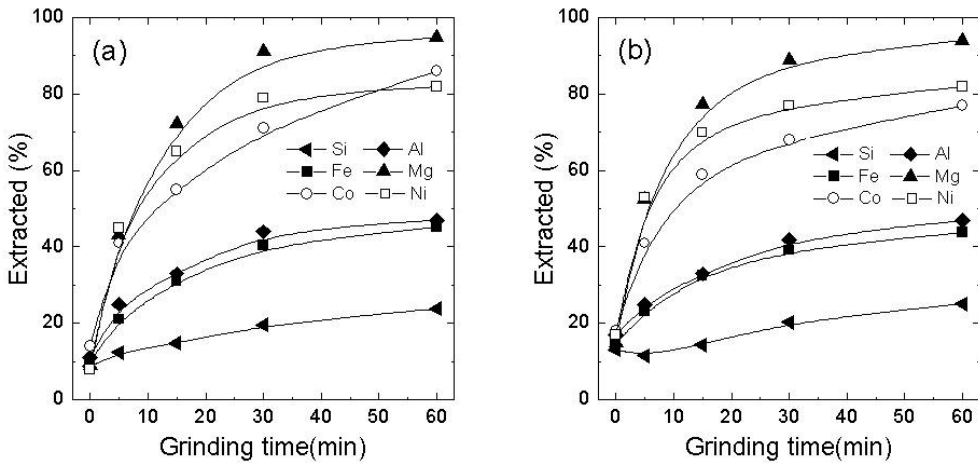


Fig. 6. Extraction of metal ions from raw and ground samples with HCl (a) and H₂SO₄ (b) as a function of grinding time.

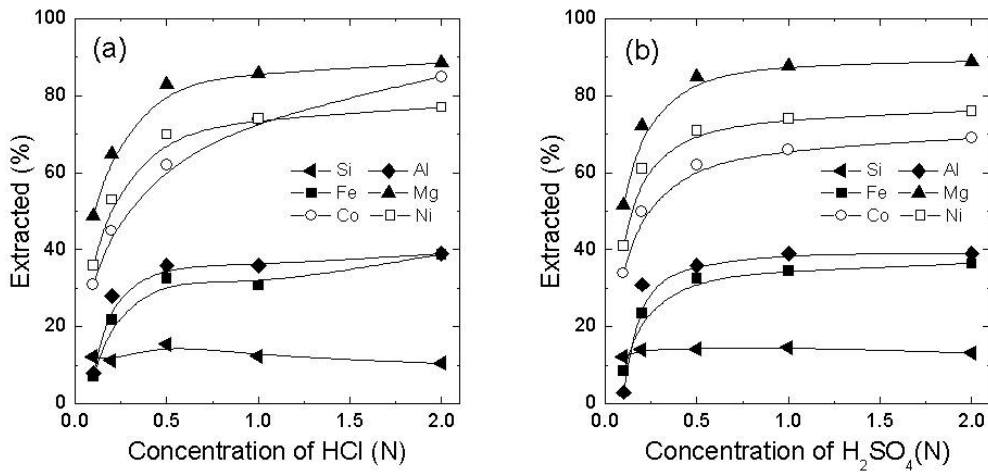


Fig. 7. Extraction of metal ions from 60-min ground sample with HCl (a) and H₂SO₄ (b) as a function of acid concentration.

의한 리자다이트의 비정질화 경향(그림 4)과 유사한 양상을 보이는 것으로, 리자다이트 결정의 파괴 정도와 이들 성분의 침출율은 매우 밀접한 관련이 있음을 알 수 있었다. 침출율은 분쇄 시간 30분까지 크게 증가하였으나, 이후 분쇄 시간이 증가하여도 침출율의 변화는 크지 않았다. 60분 분쇄한 시료의 경우, 무기산의 종류에 관계없이 마그네슘의 침출율은 약 95%, 니켈과 코발트의 침출율은 약 80% 정도로 나타나 저농도의 산 용액에서도 니켈과 코발트가 용이하게 침출됨을 확인할 수 있었다. 특히 마그네슘이 높은 침출율을 나타내는데, 이는

리자다이트 결정의 마그네슘 팔면체 구조가 분쇄에 의해 점차 파괴된다는 적외선 분광분석 결과와 부합한다. 사용한 무기산의 농도가 침출율에 미치는 영향을 조사하기 위해 30분 분쇄한 시료를 대상으로 무기산의 농도에 따른 침출율의 변화를 살펴보았다(그림 7). 무기산의 농도가 증가함에 따라 침출율이 증가하였으나 0.5 N 이상에서 침출율의 변화는 미미한 것으로 나타났다. 이는 분쇄에 의해 라테라이트광의 활성이 증가함으로써 저농도의 산용액으로도 상온에서 니켈 및 코발트의 침출이 가능함을 알 수 있는 결과이다.

Table 1. Chemical composition of the sample (wt%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	Cr	Co	Zn	Ni	LOI
36.84	0.92	18.92	24.02	0.39	0.75	0.039	0.019	1.81	11.56

결 론

본 연구에서는 마그네슘을 다량 함유하고 있는 뉴칼레도니아 라테라이트광을 대상으로 건식 분쇄에 의한 라테라이트광의 물성 변화가 니켈 및 코발트의 상온상압 침출에 미치는 영향을 조사하였다. 시료는 마그네슘의 함량이 높은 라테라이트광으로 니켈과 코발트의 함량은 각각 0.81% Ni와 0.02% Co이었으며 리자다이트와 석영이 주 구성 광물을 이루고 있었다. 시료의 평균 입도, 비표면적, 밀도는 분쇄 시간이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. X-선 회절분석 결과 분쇄가 진행됨에 따라 리자다이트의 비정질화가 진행되었으며 분쇄 시간 60분 이내에서 대부분의 피크가 사라지는 것을 확인할 수 있었다. 주 구성광물인 석영의 경우는 분쇄에 의한 물성 변화가 나타나지 않았으나, 리자다이트의 Mg-OH 결합은 분쇄에 의해 약해지거나 소멸되는 현상을 보였다. 분쇄에 의한 리자다이트 결정의 파괴 정도와 마그네슘, 니켈, 코발트의 침출율은 매우 밀접한 관련이 있음을 알 수 있었다. 분쇄 시간이 증가함에 따라 침출율이 증가하였으며, 60분 분쇄한 시료의 경우 무기산의 종류에 관계없이 마그네슘의 침출율은 약 95%, 니켈과 코발트의 침출율은 약 80%로 나타났다.

참고문헌

Avvakumov, E.G., Devyatkina, E.T., and Kosova, N.V. (1994) Mechanochemical reaction of hydrated oxides. *J. Solid State Chem.*, 113, 379-383.

Boldyrev, V.V. (1987) Mechanochemistry of inorganic solid. *Thermo. Acta*, 110, 303-317.

Dalvi, A.D., Bacon, W.G., and Osborne, R.C. (2004) The past and the future of nickel laterite. *PDAC Int. Convent.*, 7-10.

Delogu, F., Orru, R., and Gao G. (2003) A novel macrokinetic approach for mechanochemical reactions. *Chem. Eng. Sci.*, 58, 815-821.

Filio, J.M., Sugiyama, K., Kasai, E., and Saito, F. (1993) Effect of dry mixed grinding of talc, kaolinite and gibbsite on preparation of cordierite ceramics. *J. Chem. Eng. Japan*, 26, 565-569.

Imaizumi, T., Inoue, T., and Onodera, J. (1974) Experiments for the processing of nickel ore from New Caledonia. *Proc. Ann. Mtg. Min. Met. Inst. Japan*, 213-214.

Kano, J., Saeki, S., Saito, F., Tanjo, M., and Yamajaki, S. (2000) Application of dry grinding to reduction in transformation temperature of aluminum hydroxide. *Int. J. Miner. Process.*, 60, 91-100.

Kim, W., Zhang, Q., and Saito, F. (2000) Syntheses of zeolite-A and X from kaolinite activated by mechanochemical treatment. *J. Chem. Eng. Japan*, 33, 217-221.

Kim, W. and Saito, F. (2000) Effect of grinding on synthesis of MgAl₂O₄ spinel from a powder mixture of Mg(OH)₂ and Al(OH)₃. *Powder Technol.*, 113, 109-113.

Lesic, D. (1963) Beneficiation of a low-grade serpentinitic iron-nickel-chromium-cobalt ore in a dense liquid. *Proc. 6th Int. Miner. Proc. Congr.*, 323-331.

Lin, I.J. and Navid, S. (1979) Review of the phase transformation and synthesis of inorganic solids obtained by mechanical treatment. *Mater. Sci. Eng.*, 39, 193-209.

Luo, W., Feng, Q., Ou, L., Zhang, G., and Lu, Y. (2009) Fast dissolution of nickel from a lizardite-rich saprolitic laterite by sulphuric acid at atmospheric pressure. *Hydrometallurgy*, 96, 171-175.

Luo, W., Feng, Q., Ou, L., Zhang, G., and Chen, Y. (2010) Kinetics of saprolitic laterite by sulphuric acid at atmospheric pressure. *Miner. Eng.*, 23, 458-462.

Madejov, J., Janek, M., Komadel, P., Herbert, H.J., and Moog, H.C. (2002) FTIR analyses of water in MX-80 bentonite compacted from high salinary salt solution systems. *Appl. Clay Sci.*, 20, 255-271.

McDonald, R.G. and Whittington, B.I. (2008) Atmospheric acid leaching of nickel laterites review, Part I. Sulfuric acid technologies. *Hydrometallurgy*, 91, 35-55.

Onodera, J., Inoue, T., and Imaizumi, T. (1987) Attempts at the beneficiation of lateritic nickel ore. *Int. J. Miner. Process.*, 19, 25-42.

Senna, M. (2007) Smart mechanochemistry-Charge transfer control for tailored solid-state reaction under minimum external energy. *J. Alloy Comp.*, 434-435, 768-772.

Taniuchi, K. (1964) Studies on the nickel extraction-Mineralogical composition of ganierite ore. *J. Min. Met. Inst. Japan*, 80, 683-688.

Valix, M. and Cheung, W.H. (2002) Effect of sulfur on

- the mineral phases of laterite ores at high temperature reduction. *Miner. Eng.*, 15, 523-530.
- Whittington, B.I., McDonald, R.G., Johnson, J.A., and Muir, D.M. (2003a) Pressure acid leaching of arid-region nickel laterite ore, Part I. Effect of water quality. *Hydrometallurgy*, 70, 31-46.
- Whittington, B.I., Johnson, J.A., Quan, L.P., McDonald, R.G., and Muir, D.M. (2003b) Pressure acid leaching of arid-region nickel laterite ore, Part II. Effect of ore type. *Hydrometallurgy*, 70, 47-62.
- Zhang, Q., Kasai, E., and Saito, F. (1996) Mechanochemical changes in gypsum when dry ground with hydrated minerals. *Powder Technol.*, 87, 67-71.
-
- 접수일(2010년 9월 6일), 수정일(1차 : 2010년 9월 27일),
게재확정일(2010년 9월 27일)