

라테라이트광의 처리기술 현황

김 완 태 · 김 상 배

한국지질자원연구원 광물자원연구본부

국내 라테라이트광은 매우 소량이 부존되어 있는 것으로만 확인되고 있을 뿐 열악한 부존 여건과 낮은 품위 등으로 인하여 개발이 전무한 상태이다. 따라서 국내에서 소비되는 니켈 관련제품은 니켈 지금 및 가공품의 형태로 전량 수입에 의존하고 있다. 특히, 우리나라는 니켈, 코발트 등 희유금속과 금, 은 등 귀금속 자원의 매장량이 적으며, 전 세계적으로도 일부 국가에 편재되어 있으므로 산업발전의 근간이 되는 각종 원료소재의 안정적 공급에 큰 어려움을 겪고 있다. 이를 극복하기 위한 일환으로 최근에는 국가적 차원에서 해외에 부존하는 금속광 및 에너지 자원의 확보를 위해 현지 지질 조사를 비롯한 개발, 선광 및 제련, 산업원료화 등과 같은 해외 광물 자원의 전주기 활용기술을 개발하기 위한 노력이 진행되고 있다.

니켈은 페로니켈의 형태로 생산되어 그림 1과 같이 대부분 스테인리스강의 주원료로 사용

되며, 뛰어난 물리화학적 특성을 이용하여 주물(cast iron), 고온 합금강(high-temperature alloy), 자석(magnetic), 도금(electroplating), 촉매(catalysis), 동전(coin) 등에 사용되기도 한다. 특히, 니켈 도금은 좋은 광택과 내식성을 지니고 있어 각종 도금 중에서도 가장 중요한 위치를 차지하고 있다.

세계 니켈광 매장량은 약 6,700만 톤으로 알려져 있다. 경제적으로 채굴 가능한 니켈광은 크게 황화광(sulphide ore)과 라테라이트광(laterite ore)으로 분류된다. 그림 2는 세계 육상 니켈자원의 부존량과 니켈 생산량을 나타낸 것으로 니켈의 육상 부존량 중 황화광이 28%, 라테라이트광이 72%를 점유하고 있다. 그러나 광석으로부터 니켈의 생산량을 기준으로 보면 황화광이 58%, 라테라이트광이 42%를 점유한다(USGS, 2009). 황화광은 펜틀란드이트(pentlandite)가 주 함니켈 광물로 부유선별(flotation)을 통해 품위향상이 가능한 것으로 알려져 있다. 그러나 산화광인 라테라이트광은 전통적인 물리적 품위향상 방법으로는 선광이 어려운 것으로 알려져 있으며 대부분 건식 또는 습식 제련을 통해 니켈을 회수하고 있다. 규산염광 또한 선광을 거치지 않고 주로 습식 제련을 통해 니켈을 회수하고 있다. 이는 광석 내부의 함니켈 광물이 매우 미세하게 존재하며 광석에 미립으로 분산되

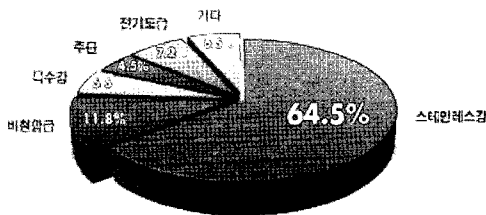


그림 1. 니켈의 용도

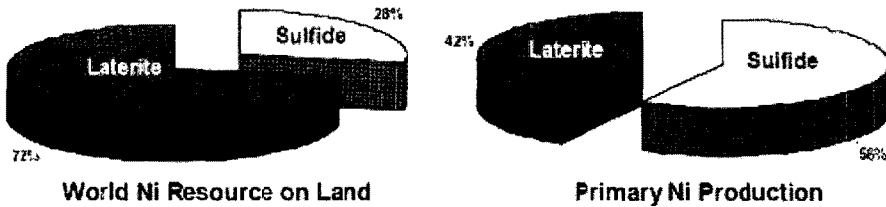


그림 2. 전세계 육상 니켈자원 매장량 및 니켈 생산량.

어 존재하기 때문이다. 라테라이트광의 주 함니켈 광물은 가니아라이트(ganierite, $(NiMg)_6Si_4O_{10}(OH)_8$)이며 규산염광은 리모나이트(nickeliferous limonite, $(Fe,Ni)O(OH)nH_2O$)로 알려져 있다. 니켈광의 처리기술을 개발하거나 개발된 공정의 원활한 운용을 위해서는 우선 원광석의 물리화학적 특성을 파악하는 것이 매우 중요하다. 특히 물리적인 기술을 적용하는 경우에는 원광석의 화학 조성보다 원광석을 구성하는 각각의 광물의 조암특성이 매우 중요한 인자로 작용한다. 니켈광의 광물학적 또는 광상학적 특성에 대해서는 다음 장에서 보다 상세히 살펴보고자 한다.

우리나라는 최근 뉴칼레도니아로부터 라테라이트광을 수입하여 광양제철소 내 포스코 페로니켈제조 법인인 SNNC(Societe Nickel de Nouvelle Calédonie et Corée)에서 페로니켈을 생산하고 있다. 현재 국내에 수입되고 있는 뉴칼레도니아산 라테라이트 원광석의 니켈 함량은 약 1.8~2.0% 전후로 비교적 고품위로 알려져 있다. 이웃 일본의 경우는 이미 1960년대부터 저품위 라테라이트광을 수입하여 페로니켈을 생산하기 시작하였으며 이후 니켈의 품위가 점차 낮아지는 등 제련공정의 경제성을 감안하여 제련에 앞서 원광석의 품위향상 기술 개발을 시도한바 있다. 원광석의 품위향상 기술이 개발된다면 광석의 운송비는 물론 제련 비용의 저감에도 커다란 기여가 예상되기 때문이다(Onodera et al., 1987).

본 고에서는 우선 현재 통용되고 있는 라테라이트광의 건식 및 습식 제련기술을 간략히 소개하고자 한다. 이어서 현재까지는 라테라이트광의 특성상 물리적인 선광기술의 적용이 곤란한 것으로 알려져 있으나 향후 기술개발을 위한 노력 또는 새로운 처리기술의 출현가능성을 염두에 두고 그동안 진행되어 온 물리적 처리기술의 적용가능성을 기술별 사례를 들어 소개하고자 한다. 본 고의 말미에는 새로운 처리기술의 하나로 현재 연구가 진행되고 있는 기계화학적(mechanochemical) 방법을 이용한 니켈 회수기술의 내용을 일부 소개하고자 한다.

니켈광의 광물학적 및 광상학적 특성

경제적으로 채굴 가능한 니켈광은 황화광과 라테라이트광으로 분류된다. 황화광은 지표 밑 수천 미터 지하에서 니켈을 함유하고 있는 암석과 황이 반응하여 형성된 것이며, 라테라이트광은 니켈을 함유한 암석이 오랜 기간 풍화에 노출됨으로써 형성된 것이다. 황화광은 대륙안정 지괴 지역에서 발견되며 주요 부존지역은 캐나다, 러시아, 호주 및 남아공 등이며, 라테라이트광은 지표 부근에서 발견되며 쿠바, 뉴칼레도니아, 인도네시아, 필리핀, 호주 등 주로 열대 및 아열대 지역에 부존된다(한국자원정보서비스, 2009).

황화광

황화광은 지구 맨틀 내부에서 유황과 용융된 니켈함유 암석(대부분 감람암)의 반응에 의하여 형성되고 뒤이어 마그마가 관입되고 황화물이 풍부한 층으로 분리된다. 유황은 반려암과 감람암 같은 용융 화강암 내에서 금속원소를 모으는 역할을 한다. 황화물을 함유한 용융마그마가 지구의 맨틀 내부로부터 상부로 관입될 때 황화물은 마치 금속을 함유한 황화물 매트가 니켈 정광의 제련시에 분리되는 것처럼 생각되면서 용융체 하부로 분리된다. 펜틀란다이트는 경제성이 있는 니켈의 주광석이다. 보통 자류철석 및 황동석을 수반하여 산출되며 때로는 자철석을 수반하여 산출된다. 니켈, 철, 동뿐만 아니라 코발트, 셀레늄, 텔루륨, 금 및 백금족 원소까지 다양하게 포함한다.

거의 모든 경제성 있는 광상은 관입암 내 또는 주변암석 내에서 교대광상, 광염광상 및 열극충전광상 형태로 부존한다. 대부분의 광석은 관입암 기저부에 부존되고 판상, 렌즈상 등의 형태를 나타낸다. 세계적으로 유통되는 니켈 광석의 품위는 경제상황에 따라 좌우된다. 실질적으로 모든 황화광은 회수가능한 동을 함유하고 있기 때문에 낮은 니켈 품위에 대한 보상을 받

을 수 있다. 예를 들면 남아공에서는 0.19%의 니켈을 함유하고 있는 광석을 백금족 금속을 대상으로 채광하며 니켈은 부산물로 회수된다. 물론 니켈을 대상으로 채광하는 캐나다, 러시아, 호주 등의 니켈 품위는 이보다 훨씬 높다.

라테라이트광

라테라이트광은 니켈을 많이 함유한 암석이 지표에서 풍화되고 니켈함유 용액이 지표하부로 분리, 침출되어 형성된다. 라테라이트광은 산화물이 지표 부근에 부존된 광상으로서 감람암 및 사문석화된 감람암과 같은 초염기성암의 풍화나 홍토화 작용에 의하여 합니켈 산화철, 점토 및 규산망간의 혼합물들로 구성되어 있다. 라테라이트광은 풍화과정 중에 이산화탄소를 방출하는 유기물질이 부패하면서 빗물의 작용으로 형성된 산성 지표수의 작용에 의하여 시간이 지남에 따라 분해된다. 풍화과정에서 마그네시아, 실리카 및 니켈 등은 용해되고 지표하부로 내려간다. 이들은 여러 지역에서 농축되고 다양한 심도에서 침전된다. 니켈은 용액이 염기성으로 변할 때 침전되는데 이때 모암의 5~20배 정도로 농축된다.

그림 3은 뉴칼레도니아 고로(Goro plateau)

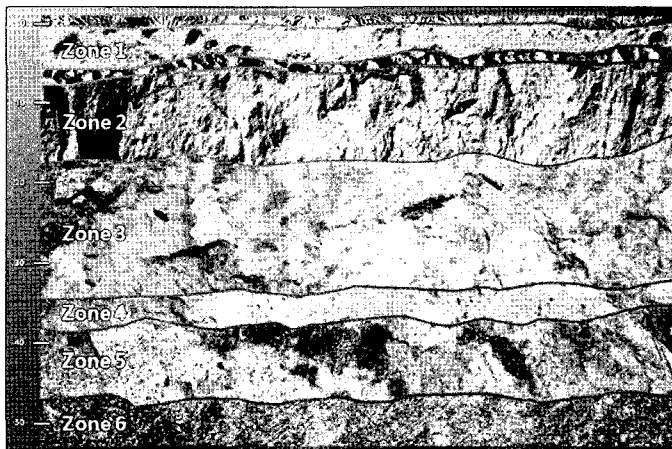


그림 3. 뉴칼레도니아 고로 라테라이트 광상의 단면도.

라테라이트 광상의 단면을 나타낸 것으로 심도가 증가에 따라 다음과 같은 구역으로 나누어진다.

- Zone 1 : 철, 알루미늄, 크롬과 같은 불용성 원소가 많은 잔류표토 층
- Zone 2 : 갈철석질(red laterite)층, 니켈 및 코발트 품위는 경제성이 낮음
- Zone 3 : 리모나이트(yellow laterite)층, Ni 0.8%~1.7%, Co 0.1%~0.5%
- Zone 4 : 전이층, Ni 1.2%~1.5%, Co 0.1%~0.5%
- Zone 5 : 사프로라이트(saprolite)층, Ni 0.9%~2.5%
- Zone 6 : 페리도타이트(peridotite) 모암층, Ni 0.3~0.5%

리모나이트질과 가니어라이트질 라테라이트 광은 품위가 비교적 균일하고 지표 가까이 부존되어 노천개발이 용이하다. 리모나이트질 광석이 라테라이트광의 가장 일반적인 형태로 나타나며 도미니카공화국, 쿠바, 인도네시아 및

필리핀 등에서 생산된다. 또한 1.1% 정도의 니켈 품위를 갖는 대규모 리모나이트질 광상이 마다가스카르에 부존되어 있다.

세계에서 가장 큰 가니어라이트질 라테라이트 광은 뉴칼레도니아에서 발견되는데 평균심도는 20m 정도이다. 이는 습한 열대기후, 모암의 사문석화 정도, 풍화를 촉진하는 단층 및 절리 등의 지질구조 및 이상적인 배수환경 등이 복합적으로 이루어져 생성된 결과이다. 뉴칼레도니아와 브라질은 가니어라이트 광석이 라테라이트 생산량의 대부분을 차지하는 국가이며 그 외에 브룬디와 아이보리코스트에서 대규모의 가니어라이트 광상이 부존되어 있다. 소규모 광상들은 콜롬비아, 구 유고슬라비아, 미국 및 독립국가연합에도 부존되어 있다.

라테라이트광의 건식 및 습식 제련기술

라테라이트광의 제련기술은 크게 건식 및 습식 공정으로 구분할 수 있다. 각각의 공정별 특성 및 운용상의 장단점은 모두 거론하기 어려

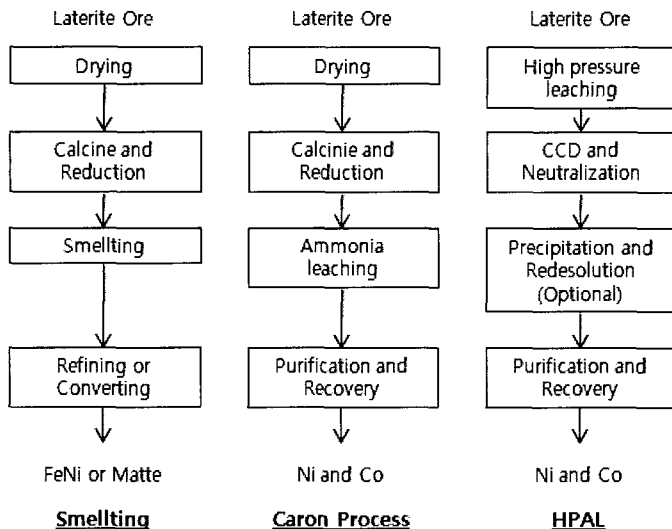


그림 4. 라테라이트광의 건식 및 습식 제련공정.

을 정도로 공정 및 운용자의 조작에 따라 매우 다양한 변화를 보인다. 건식 제련의 주된 공정은 건조, 하소 및 환원, 전기로 용융 등을 포함한다. Caron 방식과 HPAL 방식은 대표적인 습식 제련공정으로 그림 4에 각각의 제련공정을 도식화 하였다(Dalvi et al., 2004).

건식 제련기술

건식 공정으로 처리하는 라테라이트광은 가니어라이트질 광석인 사프롤라이트를 주로 포함하고 있는 광석이다. 사프롤라이트는 리모나이트질 광석에 비해 비교적 낮은 철분과 코발트 품위를 갖는 특징이 있다. 건식 공정에서는 용융로에 투입되는 원광석의 니켈/코발트 비율이 대략 40 정도이면 적당한 것으로 알려져 있다. 건식공정에서는 원광석으로부터 페로니켈 또는 매트르를 생산한다.

일반적인 건식 공정은 원광석을 로타리 킬른을 통해 건조, 하소(또는 환원)한 후 전기로에서 카본과 함께 용융한다. 매트를 생산하기 위해서는 킬른에 황을 첨가한다. 제조된 금속 또는 매트는 정련과정을 거쳐 최종 제품으로 생산된다. 건식 공정은 에너지 소비가 많은 공정으로 이는 제조 과정에서 원광석에 들어있는 모든 수분을 제거한 후 하소하여야 하며 약 1600°C의 전기로에서 슬래그 형태로 모두 용융하여야 하기 때문이다. 이 과정에서 다량의 석탄, 오일, 나프타 등과 같은 연료가 필요하며 전기 또한 다량 소모된다.

습식 제련기술

Caron 공정

Caron 공정은 주로 리모나이트질 라테라이트

또는 리모나이트질과 가니어라이트질 라테라이트의 혼합광을 대상으로 한다. 원광석을 건조한 후 700°C 근처에서 니켈을 선택적으로 환원시켜 금속 니켈로 변환시키는데 이때 코발트와 일부 철분이 동시에 환원된다. 환원된 금속은 암모니아 용액에서 침출시키는데 원광석에 사프롤라이트를 많이 포함되어 있는 경우는 니켈과 코발트의 회수율이 저하되기도 한다. 이는 니켈과 코발트가 사프롤라이트의 규산염 매트릭스에 포획되어 있어 700°C에서 금속으로 환원되기 어렵기 때문이다.

한편으로 Caron 공정은 몇 가지 단점을 지니고 있다. 우선 공정의 시작 단계에서는 건식공정의 건조, 하소, 환원 과정이 필요하므로 전체적인 에너지 소비를 증가시킨다. 또한 공정의 말미에는 다양한 용출 시약이 필요하며 니켈과 코발트의 회수율이 건식 공정과 HPAL 공정에 비해 낮은 단점이 있다.

HPAL 공정

HPAL(High Pressure Acid Leaching) 공정은 대부분 리모나이트질 라테라이트를 대상으로 한다. 이 공정에 투입되는 원광석은 약간의 가니어라이트질 라테라이트를 포함하여도 무방하나 시약의 소모량이 증가하는 이유로 전체 마그네슘의 함량이 4% 미만이어야 하며 점토질의 혼입이 적어 낮은 알루미늄 함량을 가져야 하는 등의 요건을 만족하여야 한다.

현재 HPAL 공정은 대부분 티타늄 라이닝 오토클레이브 내에서 이루어진다. 용출 온도는 공정 운용에 따라 다르지만 보통 245~270°C 근처에서 이루어지고 있으며 고-액 분리는 향류 경사법(CCD, counter current decantation)이 사용된다. 니켈을 포함하는 용액으로부터 니켈과 코발트를 회수하는 방식은 다양하지만 현재 세계적으로 통용되는 방식은 주로 용매추출법(SX, Solvent Extraction)이다. 최종 제품은

주로 전해니켈(electro-nickel), 산화니켈 또는 니켈브라켓 형태로 제조된다.

라테라이트광의 물리적 처리기술

라테라이트광 특히, 사프롤라이트는 마그네슘의 함량이 높은 광석의 특성상 습식 제련이 곤란하고 주로 건식 제련에 의해 페로니켈 또는 매트를 제조하는데 이용되고 있다. 전술한 바와 같이 사프롤라이트는 물리적 선광기술의 적용이 곤란한 것으로 알려져 있어 광석에 포함된 유용 성분인 니켈과 코발트의 함량에 비해 단위 무게당 처리비가 많고 에너지 소모량 또한 많은 단점을 지니고 있다. 따라서 사프롤라이트의 건식 제련에 앞서 유용 성분의 함량을 높이고 처리량을 줄이는 물리적 품위향상 기술 개발에 관심을 가지게 되었다.

이와 같은 기술개발의 시도는 1960년대부터 이루어져 왔으며 대표적으로 Lesic (1963), Fushimi, Imaizumi et al. (1974), Taniuchi (1964), Onodera et al. (1987) 등의 논문을 통해 점차 소개되기 시작하였다. 특히, 일본의 경우 대부분 수입에 의존하고 있는 실정으로 자국으로

수입되는 라테라이트광의 점차 낮아지는 니켈 및 코발트의 품위를 고려하여 물리적 품위향상 기술의 개발을 적극적으로 고려한 바 있다. 그러나 여러 가지의 시도에도 불구하고 라테라이트광의 물리적 품위향상과 관련한 기술 개발의 노력은 괄목할만한 성과 없이 현재에 이르고 있다.

물리적 품위향상과 관련된 대표적인 선광기술은 선택적 파분쇄를 이용한 입자분리, 비중선별, 자력선별, 정전선별, 부유선별 등이 있다. 이러한 기술을 적용하여 당 연구팀에서 수행한 연구결과를 간략하게 소개하고자 한다.

선택적 파분쇄에 의한 입자분리

선택적 파분쇄는 조암광물의 광물학적 특성 또는 물리적 특성차를 이용한 것으로 조암광물 상호간의 깨어짐 강도나 깨어짐 경향의 차이에 따라 적절한 분쇄 방식을 선정함으로써 파분쇄 후 회수하고자 하는 광물만을 선택적으로 농축시키는 기술이다. 표 1은 뉴칼레도니아 라테라이트광의 파쇄 후 입자 크기에 따른 화학조성을 나타낸 것으로 입자 크기가 감소할수록 철분의 함량은 증가하고 마그네슘의 함량은 다소

표 1. 라테라이트광의 입자크기에 따른 화학조성

Size (mesh)	Yield (wt.%)	Chemical composition(wt.%)								
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	Cr	Co	Zn	Ni
+48	16.89	39.32	0.77	14.26	25.58	0.27	0.62	0.028	0.013	1.91
48/65	10.22	40.01	0.93	14.25	26.30	0.30	0.99	0.031	0.014	1.81
65/100	5.64	39.89	0.96	13.90	25.94	0.34	1.05	0.035	0.014	1.89
100/150	5.22	39.99	1.15	14.20	25.68	0.41	1.36	0.039	0.016	1.79
150/200	5.30	39.09	0.90	15.17	25.23	0.44	0.82	0.042	0.014	1.84
200/250	2.52	38.64	1.01	15.92	24.85	0.49	1.08	0.044	0.017	1.77
250/325	5.01	36.95	0.87	17.13	24.05	0.47	0.86	0.043	0.016	1.84
-325	49.20	34.29	0.94	23.3	22.44	0.44	0.61	0.043	0.023	1.77
Total	100.00	36.84	0.92	18.92	24.02	0.39	0.75	0.039	0.019	1.81

감소하는 경향을 보이고 있으나 니켈 및 코발트 함량은 입자 크기에 크게 영향을 받지 않을 수 있다. 이는 니켈 및 코발트가 광석내에 가늘게 분산되어 존재하기 때문으로 판단되며 따라서 파분쇄에 의한 입자 분리 효과를 기대하기는 어려울 것으로 보인다.

비중선별

테트라클로라이드-아세틸렌테트라브로마이드계 증액을 이용하여 행한 Onodera의 부침 실험(sink-and-float test) 결과에 의하면(Onodera et al., 1987) 니켈은 비중 2.65~2.96g/cm³ 범위에서 가장 높은 품위를 나타내었으며 비중 2.96g/cm³ 이상에서는 낮은 품위를 보였다. 비중 2.96g/cm³ 이상에서는 크롬철석이 주로 나타나며, 비중 2.45g/cm³ 미만에서는 사문석, 비중 2.65g/cm³ 근처에서는 석영이 분포하였다. 이상의 결과를 종합하면 라테라이트광의 조암광물을 비중차를 이용해 분리하면 크롬 정광과 니켈 정광을 각각 회수할 수 있으나 상용화 공정을 운용하기에는 경제적인 측면에서 실현 가능성은 매우 낮다.

자력선별

자력선별은 자기장내에서 각 광물 입자들이 자장에 작용하는 거동의 차이를 이용하는 방법으로 그림 5와 같이 (1) 광물 입자 표면에 자기장이 형성 되었을 때 광물 입자들이 자기장 영역으로 이끌리는 반응, (2) 광물 입자들이 자기장에 의해 튕겨나가는 반응, (3) 자기장내에서 특별한 반응이 일어나지 않고 자기장 영역을 통과하는 반응 등 세가지 반응에 의해 자성 입자가 분리되는 것을 기본 이론으로 한다.

자기장 영역으로 끌리는 입자들을 자화광물이라 하며 자화광물은 두 가지로 구분할 수 있다.

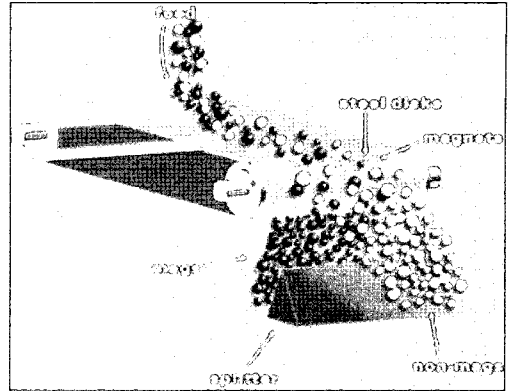


그림 5. 자력선별의 원리.

철과 자철석(magnetite) 등과 같은 강자성(ferromagnetics) 광물과 금홍석(rutile), 티탄철석(ilmenite), 크롬철광(chromite) 등과 같은 상자성(para-magnetics) 광물로 구별된다. 강자성 광물들은 약 400~600gauss범위의 낮은 자기장 영역에서 쉽게 분리가 가능하고 상자성 광물들을 분리하기 위해서는 6,000~20,000 gauss 범위의 보다 강한 자기장 세기가 필요하다. 이에 반해 자기장에 의해 튕겨 나가는 입자들은 비자성(non-magnetics) 광물로 구별한다. 금, 은, 석영 또는 황철석 등과 같은 비자성 광물들은 자기장의 영향을 거의 받지 않는다.

자력선별은 고강도 자력선별기가 필요한 경우가 아닌 이상 일반적으로 저비용으로 목적 광물을 회수할 수 있는 물리적 선별방법이다. 최근에는 자력선별의 효율을 높이기 위해 고구배 자력선별기(HGMS, High Gradient Magnetic Separator)가 개발되고 있고 약자성 산물을 분리하기 위해 10,000gauss(1Tesla) 이상 올릴 수 있는 초전도체 자력선별기가 개발되어 미립의 약자성 산물을 분리하는데 이용되고 있다.

라테라이트광을 대상으로 하는 자력선별 공정은 그림 6과 같다. 원광석은 건조한 후 죠크러셔(jaw crusher), 콘크러셔(gyratory cone crusher)를 이용하여 파쇄한 후 로드밀(rod mill)로 굵은 입자만을 분쇄하여 자력선별에 용

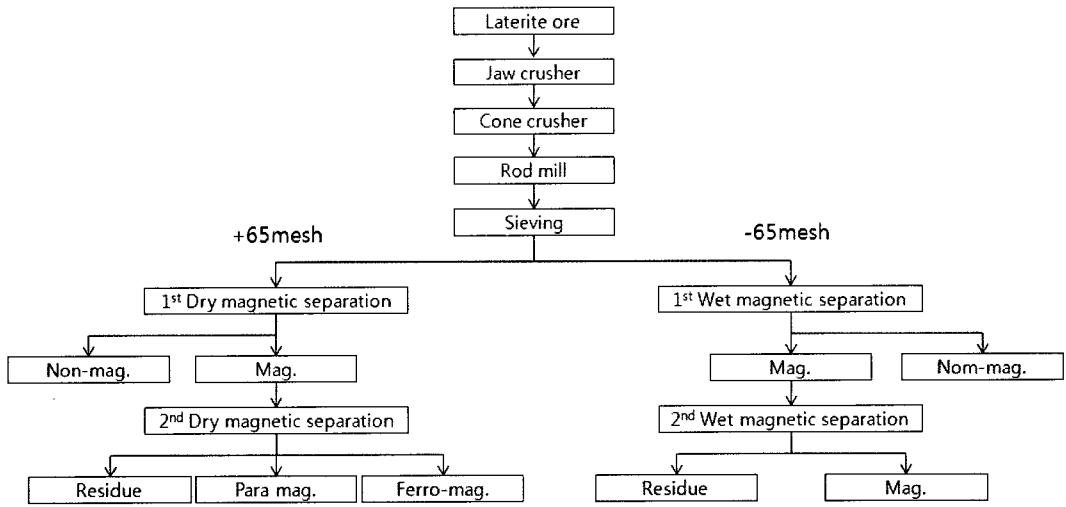


그림 6. 라테라이트광의 자력선별 공정도.

이한 입자 크기를 갖는 시료를 제조한다. 분쇄한 시료는 체가름하여 나누어 굵은 입자는 건식 자력선별을 통해 자성 및 비자성 입자를 분리하고 가는 입자는 습식 자력선별을 통해 자성 및 비자성 입자를 각각 분리한다. 분리된 산물의 화학조성과 조암광물 분석은 X-선 형광분석법(XRF)과 X-선 회절분석법(XRD)을 이용하였으며 각각의 자력선별의 결과는 다음과 같다.

건식 자력선별

건식 자력선별에 사용된 라테라이트 시료는

65mesh 이상의 굵은 입자로 지속밀도 12,000gauss 인 자력선별기를 사용하여 1차 자성 및 비자성 산물을 분리하였다. 분리된 자성산물은 자력의 세기를 달리하여 자성 입자의 자력감응력에 따라 2차 분리하였다. 표 2는 건식 자력선별을 통해 분리된 비자성 및 자성 산물의 화학조성이며 그림 7은 각산물의 X-선 회절분석 결과이다. 비자성 산물을 대부분 석영이었으며 함철 광물은 리자다이트(lizardite), 자철석(magnetite), 침철석(geothite) 등으로 확인되었다. 이러한 광물들은 약자성 광물로 알려져 있으나 적절하게 조절된 자력선별기에 의해 회수 가능하다(최도영 외, 2009).

표 2. 건식 자력선별 산물의 화학조성

Size (mesh)	Yield (wt.%)	Chemical composition(wt.%)								
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	Cr	Co	Zn	Ni
Non-mag.	5.16	82.63	0.44	2.38	5.75	0.06	0.01	0.006	0.006	0.44
Ferro-mag.	5.80	36.15	0.99	18.91	25.79	0.35	0.74	0.034	0.014	1.72
Para-mag.	24.45	37.66	1.04	13.28	31.02	0.28	1.47	0.027	0.015	2.20
Residue	64.58	41.62	0.70	10.69	31.40	0.19	0.56	0.019	0.009	2.05
Total	100.00	38.19	0.76	11.25	29.36	0.21	0.76	0.021	0.010	1.96

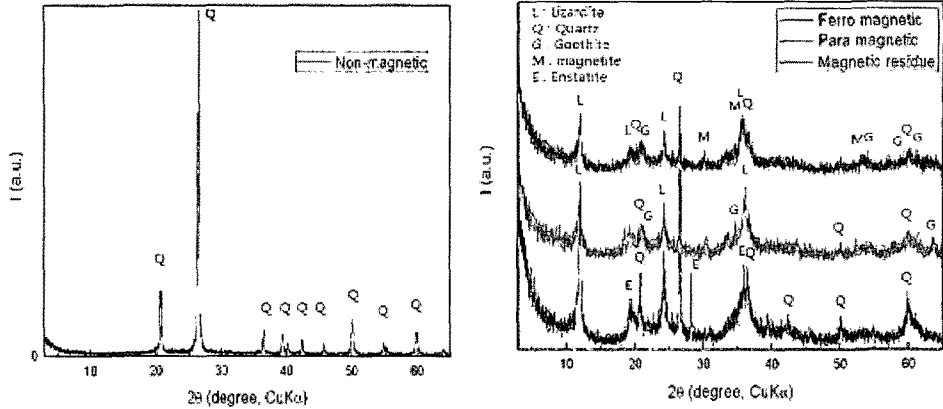


그림 7. 건식 자력선별 산물의 X-선 회절 패턴.

자성산물의 자력감응력에 따른 분리결과 강자성 산물(3,000gauss 자성산물)에서는 자철석이 확인되었으며 자력의 세기가 높아질수록 침철석이 분리됨을 알 수 있다. 또한 9,000gauss에서 비자성으로 분리된 산물(residue)의 주 구성광물은 석영과 리자다이트로 확인되어 단체 분리된 석영 입자는 자력선별에 의해 일부 분리 가능함을 알 수 있다.

산물의 화학조성을 나타낸 것으로 강자성 산물에서 철분의 함량이 다소 증가할 뿐 자력 세기의 영향은 거의 없는 것으로 나타나 가는 입자일수록 니켈의 품위향상을 위한 자력선별의 효과는 미미함을 알 수 있다. 이상과 같은 결과를 종합하면 자력선별에 의한 라테라이트광의 물리적 품위향상은 광석의 조암특성상 기대하기 어려운 것으로 판단할 수 있다.

습식 자력선별

습식 자력선별은 65mesh 이하의 가는 입자를 대상으로 볼밀을 이용해 325mesh 이하로 분쇄한 후 행하였다. 자성의 세기를 2,000~8,000gauss로 조절하여 자력세기에 따라 자성 및 비자성 산물을 분리하였다. 표 3은 분리한

메카노케미칼 효과를 이용한 라테라이트광의 처리기술

메카노케미스트리와 메케노케미칼 효과

넓은 의미에서 메카노케미스트리는 분쇄에

표 3. 습식 자력선별 산물의 화학조성

Size (mesh)	Yield (wt.%)	Chemical composition(wt.%)								
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	Cr	Co	Zn	Ni
Non-mag.	10.96	36.82	0.90	16.50	23.18	0.37	0.59	0.037	0.016	1.90
Ferro-mag.	6.75	30.08	1.16	21.85	18.80	0.73	1.61	0.073	0.027	1.39
Para-mag.	82.29	33.08	1.09	19.02	20.90	0.57	1.01	0.054	0.026	1.69
Total	100.00	38.19	0.76	11.25	29.36	0.21	0.76	0.021	0.010	1.96

의한 기계적인 힘이 물질에 작용하고 그 과정에서 일어나는 물질의 물리화학적 변화를 다루는 화학의 한 분야이다. 물질에 작용하는 메카노케미칼 현상은 1900년대 초반부터 연구되어 지기 시작하였으며 현재는 물질을 다루는 다양한 분야로 영역을 확대하고 있다. 메카노케미칼 효과를 다루는 분야는 다음과 같다.

- (1) 결정구조 변화(polymorphic transformations and alteration)
- (2) 기계적 활성화(mechanical activation and change in solid surface properties)
- (3) 재결정 및 비정질화(recrystallization, decrystallization and amorphization)
- (4) 기계화학적 고상반응(mechanochemical solid phase reaction)

그림 8은 분쇄과정에서 일어나는 물질의 거시적 또는 미시적 변화를 도식화한 것으로 메카노케미칼 효과는 주로 물질의 미시적인 변화를 다룬다. 메카노케미칼 효과는 고상, 액상, 기상 또는 이들의 혼합상에서 모두 일어나는 것으로 알려져 있으나 주로 고상 반응을 주 대상으로 한다.

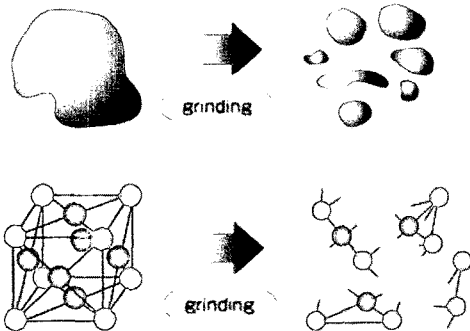


그림 8. 분쇄에 의한 물질의 거시적 변화(위)와 미시적 변화(아래).

라테라이트광의 메카노케미칼 처리

라테라이트 광의 분쇄를 위해 유성밀(Fritsch, Pulverisette-7)을 사용하였으며 대기압하에서 건식으로 분쇄하였다. 분쇄에 의한 시료의 물성 변화 또는 활성화 정도는 사용하는 분쇄기의 종류, 크기 및 다양한 분쇄조건에 따라 다르므로 분쇄 조건에 따른 물질의 변화를 정형화하여 표현하기는 어렵다. 여기에 소개하는 결과는 상기한 분쇄기에 시료 4.5g과 직경 15mm인 스테인레스 볼 7개를 45ml 용량의 스테인레스 용기에 넣고 650rpm에서 5~60분 분쇄한 산물을 대상으로 한 것으로 한 것이다. 분쇄한 산물은 상온에서 염산과 황산용액을 사용하여 용출 특성을 조사하였다.

그림 9는 분쇄시간에 따른 라테라이트광의 X-선 회절분석 및 FT-IR 분석결과를 나타낸 것이다. 분쇄시간이 길어짐에 따라 리자다이트의 회절 피크가 줄어들어 60분 분쇄한 후에는 거의 사라지고 석영과 침철석의 피크만 확인됨을 알 수 있다. 이는 분쇄에 의해 리자다이트의 결정구조가 파괴되어 비정질화 된 것을 의미한다(김완태 외, 2009).

$3,423\text{cm}^{-1}$ 과 $1,635\text{cm}^{-1}$ 피크는 수소결합을 하고 있는 O-H의 신축 및 굽힘 진동으로 시료에 포함된 물을 나타낸다. $3,685\text{cm}^{-1}$ 의 피크는 결정내 Mg-OH 결합의 신축 진동을 나타내며 617cm^{-1} 은 Mg-OH의 굽힘 진동을 나타낸다. 이 두 피크는 분쇄시간에 따라 감소함을 확인할 수 있다. Si-O결합을 나타내는 $1,000\text{cm}^{-1}$, 447cm^{-1} 피크는 변화가 없으며 석영의 특성피크인 795cm^{-1} 의 이중 피크는 뚜렷해지는 경향을 보였다. 이를 종합하면 리자다이트는 Si 사면체와 Mg 팔면체가 분쇄에 의해 Mg 팔면체 구조의 Mg-O와 Mg-OH 결합이 붕괴되었음을 의미한다. 그림 10은 전자현미경으로 관찰한 분쇄산물의 미세구조를 나타냈다.

그림 11은 산용액에 의한 분쇄산물의 상온에

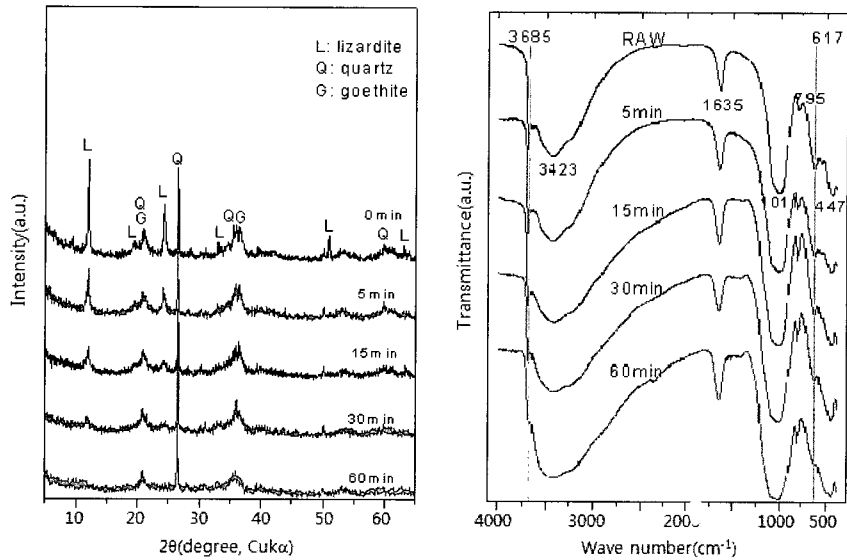


그림 9. 분쇄시간에 따른 시료의 X-선 회절 패턴(좌) 및 FT-IR 패턴(우).

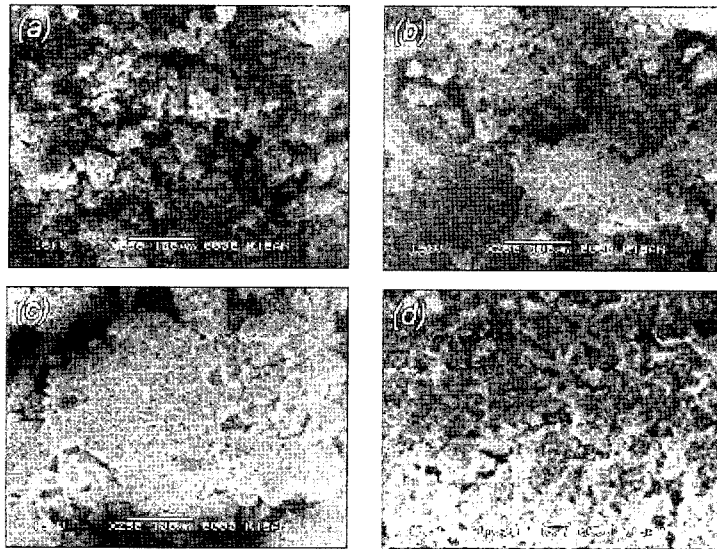


그림 10. 분쇄산물의 전자현미경 사진. (a) 원광, (b) 15분, (c) 30분, (d) 60분 분쇄.

서의 용출율의 변화를 나타낸 것이다. 분쇄하지 않은 시료의 경우 0.5N의 염산 및 황산용액에서 약 10~20%의 용출율을 보이는 반면 분쇄 시간이 늘어남에 따라 용출율이 크게 증가하는

경향을 보인다. 니켈 및 코발트의 용출율은 분쇄시간에 따라 증가하여 60분 분쇄한 경우 80% 이상에 이른다. 특히 마그네슘의 용출율이 매우 높게 나타나는데 이는 리자다이트 결정의

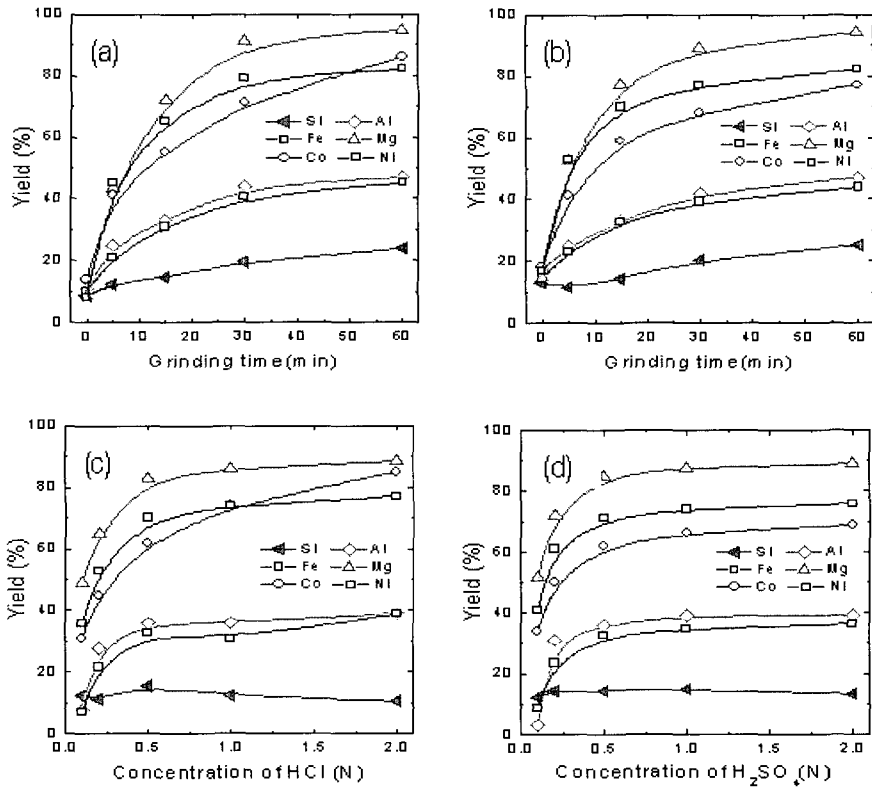


그림 11. 분쇄시간 및 산농도에 따른 용출율의 변화 (a) 0.5N HCl, (b) 0.5N H₂SO₄, (c) HCl 30분 분쇄, (d) H₂SO₄, 30분 분쇄.

Mg 팔면체 구조가 분쇄에 의하여 쉽게 깨어진다는 사실과 부합한다. 산용액의 농도와 용출율의 관계를 보면 0.5N 이상의 농도에서 평형을 유지함을 알 수 있는데 이는 시료의 메카노케미칼 활성에 의해 상온에서 저농도의 산용액으로 유용 성분의 용출이 가능함을 의미한다.

결 언

현재 전 세계적으로 생산되는 니켈의 약 58%는 황화광으로부터 회수되고 있으나 황화광의 점차적인 고갈로 인해 산화광으로부터 니켈을 효과적으로 회수하려는 노력이 진행되고 있다.

산화광인 라테라이트광은 전세계 니켈 매장량의 70% 이상을 차지하는 니켈의 주요 광석으로 라테라이트광으로부터 환경 친화적이며 효율적인 유가금속 회수기술의 개발에 대한 관심이 집중되고 있다. 우리나라의 경우는 니켈의 부존량이 거의 없어 대부분 수입에 의존하고 있는 실정이므로 해외 금속광물의 선광기술 개발은 국가 기간산업의 발전을 위한 원료소재의 안정적인 확보는 물론 국가 원천기술의 확보를 통한 국가 산업의 선진화를 위한 교두보 역할을 할 것으로 판단된다.

현재 라테라이트광은 대부분 건식 및 습식 제련을 통해 니켈, 코발트와 같은 유가금속을 회수하고 있을 뿐 물리적 품위향상 기술은 이

미 발표된 다수의 논문에서도 언급한 바와 같이 광석의 조암특성상 괄목할만한 결과를 얻지 못하고 현재에 이르고 있다. 향후 라테라이트광은 철강 및 소재산업 분야의 근간이 되는 니켈과 코발트를 공급할 수 있는 유일한 육상 광물 자원이 될 것이며, 이를 효과적으로 이용하기 위해서는 라테라이트광의 친환경 처리기술 개발이 시급히 풀어야 할 당면과제라 할 수 있다. 지구에 부존되어 있는 자원의 효율적인 이용과 에너지 절약, 환경의 안정적 보존 그리고 철강 및 소재 산업의 근간이 되는 희유금속의 안정적 확보를 위해서 다양한 분야의 광물 처리기술 개발이 요구된다.

참고문헌

- 김완태, 최도영, 박성욱, 김상배 (2009) 고네너지 밀에 의한 산화니켈광의 분쇄 거동 및 물성변화, 추계지질과학연합학술발표회.
- 최도영, 김완태, 김상배 (2009) 산화니켈광의 품위향상을 위한 물리적 선별 특성, 한국광물학회-한국암석학회 공동학술발표회.
- USGS (2009) Bureau of Mines Yearly Statistics, <http://www.usgs.gov>
- Onodera, J., Inoue, T., and Imaizumi, T. (1987) Attempts at the beneficiation of lateritic nickel ore, *Int. J. Miner. Proc.*, 19, 25- 42.
- 한국자원정보서비스(KOMIS) (2009) <http://www.komis.net>.
- Dalvi, A.D., Bacon, W.G., and Osborne, R. C. (2004) The past and the future of nickel laterite, PDAC Int. Convention, Trade Show & Investors Exchange, Mar. 7-10.
- Lestic, D. (1963) Beneficiation of a low-grade serpentinitic iron-nickel-chromium - cobalt ore in a dense liquid, *Proc. 6th Int. Miner. Proc. Congr., Cannes, June 1963*, Pergamon Press, 323-331.
- 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.
- Taniuchi, K. (1964) Studies on the nickel extraction-Mineralogical composition of ganierite ore, *J. Min. Met. Inst. Japan*, 80, 683-688.