

## 라테라이트광 활용을 위한 황산용액에서 Diphonix 수지의 니켈, 코발트, 마그네슘 흡착

### Adsorption of Ni(II), Co(II), and Mg(II) from Sulfuric Acid Solution by Diphonix Resin for the Utilization of Laterite Ore

이 만 승(Manseung Lee)<sup>1</sup> · 김 상 배(Sang Bae Kim)<sup>2,\*</sup> · 채 종 귀(Jonggwee Chae)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>목포대학교 공과대학 신소재공학과

(Department of Advanced Materials Science & Engineering, Mokpo National University, Chonnam 534-729, Korea)

<sup>2</sup>한국지질자원연구원 광물자원연구본부

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

**요약** : 니켈 라테라이트광 황산침출액에 함유된 니켈과 코발트를 마그네슘으로부터 분리하는 것은 유가금속의 회수 측면에서 중요하다. 세 금속간의 분리성을 조사하기 위해 니켈과 코발트 및 마그네슘이 단독으로 존재하는 황산용액과 혼합용액에서 Diphonix 수지에 의한 흡착거동을 조사하였다. 금속 농도는 100 ppm으로 고정시키고 황산용액의 pH를 5에서 7사이로 변화시켰다. 상온에서 Diphonix에 의한 세 금속이온의 흡착거동은 Langmuir 등온곡선과 잘 일치하였으며, 각 금속의 최대흡착량을 구했다. 세 금속이 혼합된 합성용액에서 Diphonix 농도에 따른 세 금속이온의 흡착거동은 동일하였으며 Diphonix 수지로 니켈과 코발트를 마그네슘으로부터 분리하는 것은 어렵다.

**주요어** : 니켈, 코발트, 마그네슘, 황산, 분리, Diphonix

**ABSTRACT** : It is of importance to separate Ni(II) and Co(II) from Mg(II) in solution which was leached from nickel laterite ore. In order to investigate the possibility of separating Ni(II) and Co(II) from Mg(II), adsorption behavior of the three metals from individual and mixed sulfate solutions was investigated by using Diphonix resin. The concentration of each metal in solution was fixed at 100 ppm and the pH of the sulfuric acid solution was changed from 5 to 7. At ambient temperature, the adsorption behavior of the three metal ions followed Langmuir adsorption isotherm. The loading capacity of Diphonix resin for the three metal ions was obtained from the Langmuir isotherm. Since adsorption behavior of the three metal ions from the mixed solution was similar to each other, it was found to be difficult to separate Ni(II) and Co(II) from Mg(II) by using Diphonix resin.

**Key words** : Ni(II), Co(II), Mg(II), H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, separation, Diphonix

#### 서 론

세계에 매장된 니켈의 70%는 라테라이트광(La-

terite ore)에 존재한다(이만승 외, 2010). 라테라이트광은 적도지방의 고온과 풍부한 강우량에 의해 암석이 풍화되어 생성된 산화광이다. 현재는 고품위 니켈 황화광으로부터 매트제련을 통해 니켈을 회수하고 있으나, 고품위 니켈 황화광이 고갈됨에

\*교신저자: sbkim@kigam.re.kr

따라 라테라이트광으로부터 니켈과 코발트를 회수하기 위한 연구가 전세계적으로 활발히 진행되고 있다(박경호와 남철우, 2008; 채종귀 외, 2010). 라테라이트광은 지표면의 깊이에 따라 limonite, saprolite, garnierite광으로 구분된다(이만승 외, 2010). 지표면의 깊이가 증가함에 따라 라테라이트광에서 니켈과 마그네슘 함량은 증가하나 철의 함량은 감소한다.

고온고압 조건에서 철의 함량이 높은 limonite광을 황산침출(High Pressure Acid Leaching, HPAL)하면 철이온의 수화반응에 의해 수소이온이 생성되는 동시에 철이 제거되므로 산 소비량이 줄고 후속공정이 단순해지는 장점이 있다(Papangelakis and Blakey, 1996; Papangelakis and Baghalha, 1998). 그러나 garnierite광의 경우에는 철 함량은 낮고 마그네슘 함량이 높으며, HPAL공정으로 이 광석을 처리하면 경제성이 떨어진다. 침출온도 80°C에서 garnierite광을 100 g/L의 황산으로 침출한 연구결과에 의하면 광석에 함유된 니켈과 마그네슘의 대부분은 용해되는데 반해 철과 코발트는 절반 정도만 용해되었다(이만승 외, 2010).

니켈 라테라이트광에는 니켈과 함께 희유금속의 일종인 코발트가 함유되어 있으므로 두 금속을 회수하는 것이 중요하다. 니켈과 코발트는 화학적 성질이 비슷하므로 침출용액에서 두 금속의 분리에 대한 연구가 많이 행해졌다. 특히 니켈 또는 코발트에 선택성이 있는 추출제가 개발되어 용매추출에 의한 두 금속의 분리공정이 가동 중이다(박경호 외, 2004; Nayl, 2010). Garnierite광의 니켈 함유량은 1.8~3.5%인데 반해 마그네슘의 함량은 9~15% 정도이다. 따라서 garnierite광의 황산 침출액에서 니켈과 코발트의 농도에 비해 마그네슘의 농도가 매우 높다. 이와 같이 마그네슘의 농도가 니켈과 코발트의 농도보다 매우 높은 조건에서 니켈과 코발트의 추출은 질량효과에 의해 마그네슘에 큰 영향을 받는다. 니켈, 코발트와 함께 마그네슘 역시 희유금속이고 경량소재로 각광받고 있다. 따라서 garnierite광으로부터 니켈, 코발트와 함께 마그네슘을 분리 회수하는 기술을 개발하는 것은 기초 소재의 확보 측면에서 의미가 있다.

마그네슘 농도가 높은 용액에서 니켈과 코발트의 분리에 대해서는 용매추출을 이용한 연구가 일부 발표되었다(Tsakiridis and Agatzini, 2004a, 2004b, 2005a, 2005b). 그러나 이러한 연구에서 사용된 Cyanex301 등의 추출제는 상온에서 불안정하고 시

판되지 않으므로 상용화하기에는 어려움이 따른다. 이온교환은 공정의 단순성과 scale up의 용이성 및 불순물이 적은 최종 용액을 얻을 수 있는 장점으로 인해 용매추출과 함께 금속의 분리공정에 널리 이용되고 있다. Diphonix수지는 양이온 교환수지의 일종으로 주로 금속이온의 분리에 사용되고 있으며, 비교적 넓은 범위의 pH에서 특정 금속에 대한 흡착력이 강하다고 알려져 있다(Chiarizia *et al.*, 1993; Lee and Nicol, 2007). 본 논문에서는 니켈 라테라이트광을 황산으로 침출한 용액에서 니켈, 코발트, 마그네슘을 분리하기 위한 공정 개발의 일환으로 Diphonix 수지를 사용하여 세 금속의 흡착 거동을 조사하였다. 또한 상온에서 Diphonix에 의한 세 금속이온의 흡착등온곡선을 구하고 혼합용액에서 세 금속의 분리가능성을 조사하였다.

## 실험재료 및 방법

본 실험에서 사용한 시약은 모두 일급시약으로 NiSO<sub>4</sub>, CoSO<sub>4</sub>, MgSO<sub>4</sub>를 초순수 증류수에 용해시켜 용액을 제조하였다. 단독용액 또는 혼합용액의 pH는 묽은 황산과 수산화나트륨용액을 첨가하여 조절하였다. 이온교환수지로 사용된 Diphonix는 Eichrom사에서 제조된 수지로 100~200 mesh 범위의 크기를 지닌 수지를 흡착실험에 사용하였다. Diphonix의 화학구조를 그림 1에, 물리적 특성을 표 1에 나타냈다.

금속이온이 함유된 단독용액 또는 합성용액 50 ml를 schott병에 넣은 다음 일정량의 Diphonix수지를 첨가하고 shaking incubator의 온도를 25°C로 조절한 다음 250 rpm의 속도로 24시간 동안 교반시켰다. 1시간 동안 정지후 용액과 수지를 분리하여 수상에 존재하는 금속농도를 ICP-AES (Spectro-flame EOP)로 측정하였다. 본 논문에서 흡착율은 다음과 같이 정의되었다.

Loading Percentage of metal =

$$\left(1 - \frac{\text{equilibrium concentration of metal in solution}}{\text{initial concentration of metal in solution}}\right) \times 100 \quad (1)$$

## 결과 및 고찰

Diphonix는 양이온교환수지로 2가 금속이온의 흡착반응을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

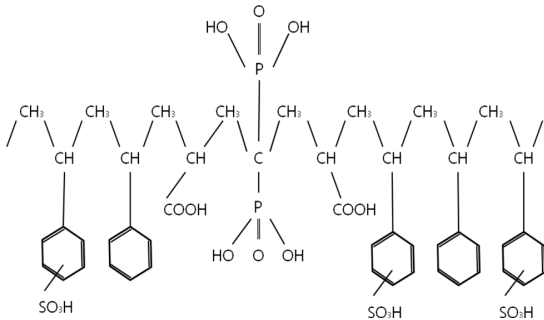
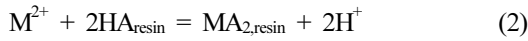


Fig. 1. Chemical structure of Diphonix resin.



상기식에서  $M^{2+}$ 는 금속 2가 이온을, HA는 Diphonix수지를 각각 나타낸다.

흡착반응식 (2)를 보면 수지에 있던 수소이온과 용액에 존재하던 2가 금속이온이 교환된다. 흡착반응결과 수소이온이 교환되므로 흡착량은 용액의 pH에 의존한다. 일반적으로 용매추출의 경우 금속 이온의 석출이 일어나기 시작하는 pH에서 추출율이 최대값을 나타낸다. 용매추출과 이온교환반응에서 반응평형은 서로 비슷하므로, 이온교환반응의 경우에도 용액의 pH가 증가할수록 수소이온의 농도가 감소하면서 흡착량이 증가할 것으로 예상된다.

80°C에서 gamierite광을 100 g/L의 황산으로 침출한 용액에서 니켈, 코발트와 마그네슘의 농도는 각각 0.08, 0.001, 1.28 M (mole/L)이었다(이만승 외, 2010). 상기 조성에서 니켈, 코발트, 마그네슘 이온이 침전되기 시작하는 pH를 조사하기 위해 25°C에서 세 금속 이온의 Eh-pH도를 그림 2에 같이 나타냈다(Pourbaix, 1966). 니켈은 pH 6.5, 코발트는 pH 7.5, 마그네슘은 pH 8.5에서 수산화물로 침전되는 것을 그림 2에서 알 수 있다. Eh-pH도는 침전반응의 열역학만을 고려하여 구한 그림으로 속도론적인 측면은 고려되지 않았으므로 실제 석출이 일어나기 시작하는 pH와는 다를 수 있다. 따라서 상기 조성의 혼합용액에 NaOH 용액을 서서히 첨가하여 용액의 pH를 조절하면서 실제 석출량을 측정된 결과를 그림 3에 나타냈다. 합성용액에서 NaOH 용액에 의한 니켈과 코발트의 침전거동은 서로 비슷하며 합성용액의 pH 8.5 이상에서 99% 이상 침전되었다. 마그네슘의 경우 용액의 pH 9.5에서 약 30% 정도만이 침전되어 Eh-pH도에서 예측한 침전 pH 8.5와는 다르다.

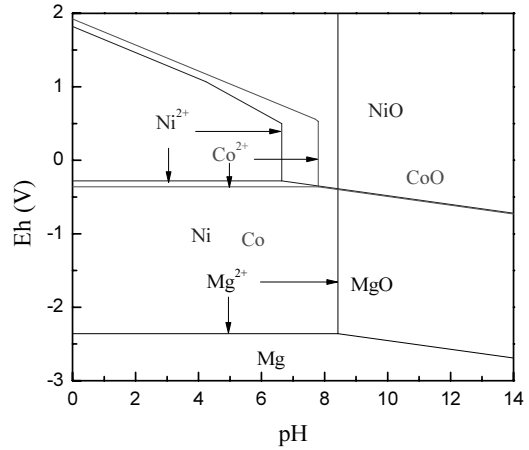


Fig. 2. Eh-pH diagram of Ni, Co and Mg in  $H_2O$  solution at 25°C ( $[Ni^{2+}] = 0.08$  M,  $[Co^{2+}] = 0.001$  M,  $[Mg^{2+}] = 1.28$  M).

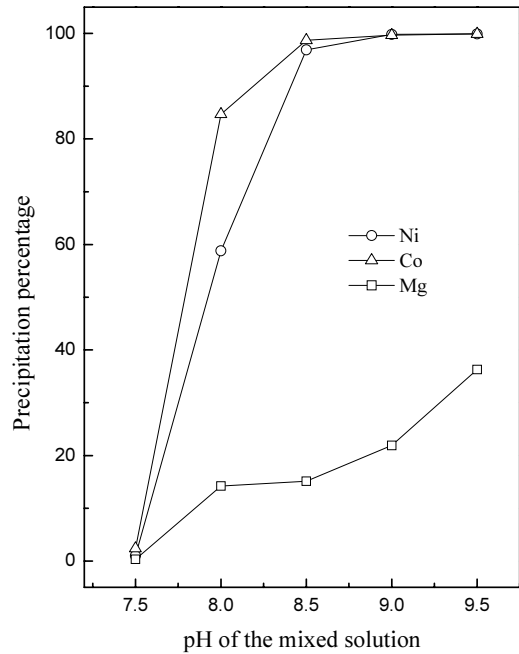
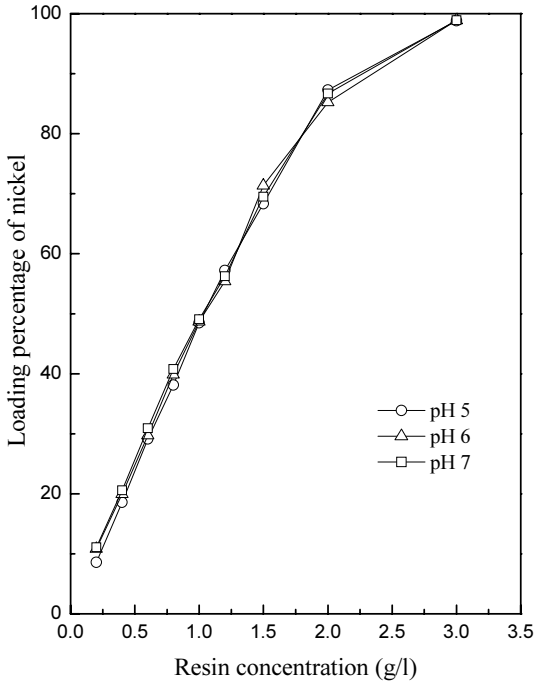


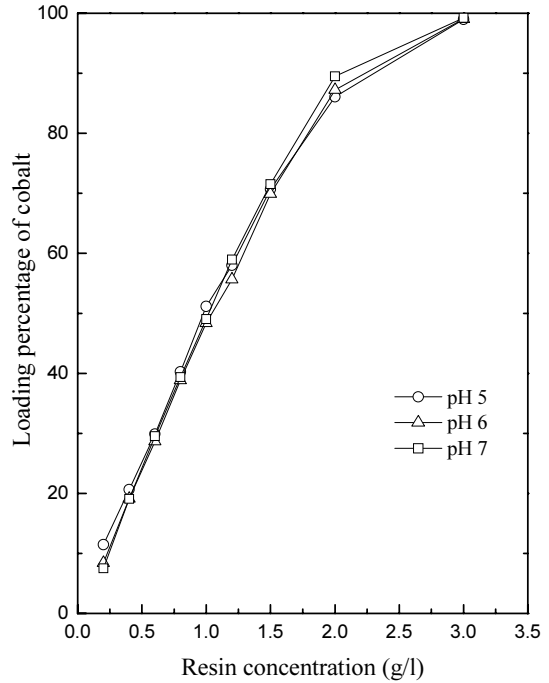
Fig. 3. Variation of the precipitation percentage of Ni, Co and Mg with the pH of the synthetic solution. ( $[Ni(II)] = 0.08$  M,  $[Co(II)] = 0.001$  M,  $[Mg(II)] = 1.28$  M).

단독용액에서 Diphonix에 의한 니켈, 코발트와 마그네슘의 흡착

마그네슘 함량이 높은 gamierite광을 80°C에서 100



**Fig. 4.** Effect of Diphonix concentration on the loading of Ni(II) at several pH values. Solution initially contained 100 mg/L of Ni(II).



**Fig. 5.** Effect of Diphonix concentration on the loading of Co(II) at several pH values. Solution initially contained 100 mg/L of Co(II).

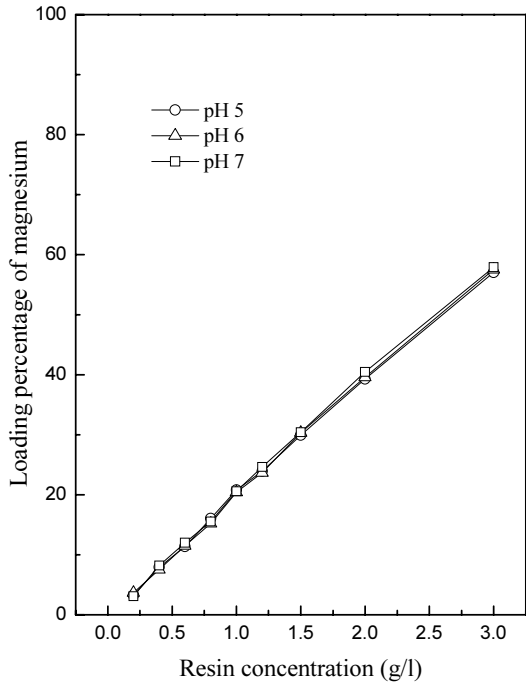
g/L의 황산으로 침출한 용액에서 니켈, 코발트와 마그네슘의 농도는 각각 4.42, 0.08, 32.2 g/L이었다 (이만승 외, 2010). 마그네슘의 농도가 32.2 g/L로 매우 높은 용액을 대상으로 흡착실험을 하는 경우 희석효과로 인해 마그네슘의 농도를 정확하게 측정하는 것이 어렵다. 따라서 이러한 조건에서는 흡착 후 수지를 적당한 산용액으로 세척시켜 세출액에서 마그네슘의 농도를 측정하는 것이 바람직하다. 본 논문에서는 Diphonix에 의한 각 금속의 흡착거동을 조사하기 위해 먼저 각 금속의 농도가 100 ppm인 용액을 대상으로 흡착실험을 수행했다. 각 금속이 함유된 용액의 pH를 5, 6, 7로 변화시켜 여러 Diphonix농도에서 흡착실험한 결과를 그림 4, 5, 6에 나타냈다. 이때 흡착실험에서 Diphonix의 농도는 3.0 g/L까지 변화시켰다. 그림을 보면 Diphonix농도가 증가할수록 니켈, 코발트와 마그네슘의 흡착량이 직선적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 본 논문의 실험범위인 pH 5~7에서 Diphonix의 농도에 따른 각 금속의 흡착율의 변화는 pH에 무관하게 동일하였다. 용매추출의 경우 용액의 pH 5~7 사이의 범위에서 니켈과 코발트의 추출율이 용액의

pH에 크게 의존하는 것과는 달리 Diphonix수지에 의한 흡착시에는 용액의 pH 영향이 매우 적었다. 한편 Diphonix농도 3.0 g/L에서 니켈과 코발트는 99% 이상 흡착되는데 반해, 동일한 조건에서 마그네슘의 흡착율은 60% 미만이었다.

실제 이온교환수지를 사용한 금속이온 분리와 같은 작업에서는 액체와 수지의 접촉단계에서 물질 전달 효과로 인해 이온교환수지의 최대용량을 완전히 이용할 수 없다. 이온교환수지를 이용한 분리공정을 설계하기 위해서는 먼저 이온교환수지의 최대흡착량에 대한 자료의 확보가 필요하다. 수지의 최대흡착량은 일반적으로 흡착등온곡선으로부터 얻을 수 있다. 흡착등온곡선에는 Langmuir와 Freundlich 등온곡선이 있으며, Langmuir 등온곡선을 다음에 나타냈다(Wanakat, 1990).

$$q = \frac{q_{\max} Kc}{1 + Kc} \tag{3}$$

상기식에서 q와  $q_{\max}$ 는 흡착제 단위질량에 흡착



**Fig. 6.** Effect of Diphonix concentration on the loading of Mg(II) at several pH values. Solution initially contained 100 mg/L of Mg(II).

된 용질과 최대흡착량을,  $K$ 는 흡착반응의 평형상수를,  $c$ 는 용액에서 용질의 농도를 각각 나타낸다. 먼저 용질 농도가 낮은 조건에서 Langmuir 등온곡선은 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$1 + Kc \cong 1 \quad (4)$$

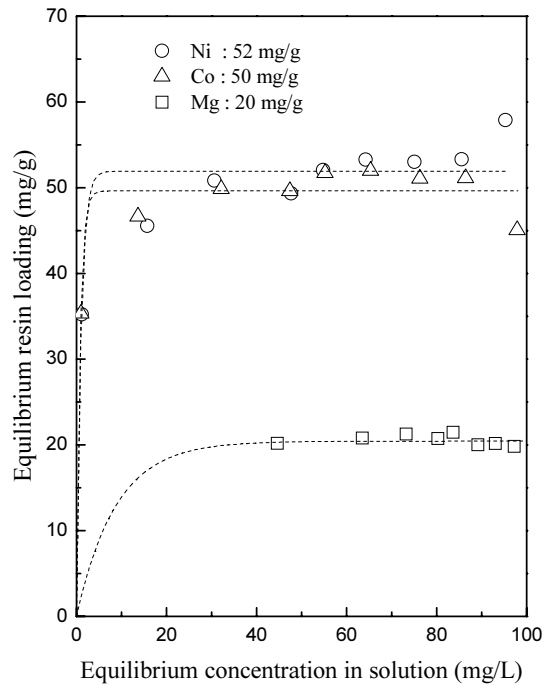
$$q = q_{\max} Kc \quad (5)$$

한편 용질농도가 높은 조건에서는 다음과 같게 된다.

$$1 + Kc \cong Kc \quad (6)$$

$$q = \frac{q_{\max} Kc}{1 + Kc} \cong \frac{q_{\max} Kc}{Kc} = q_{\max} \quad (7)$$

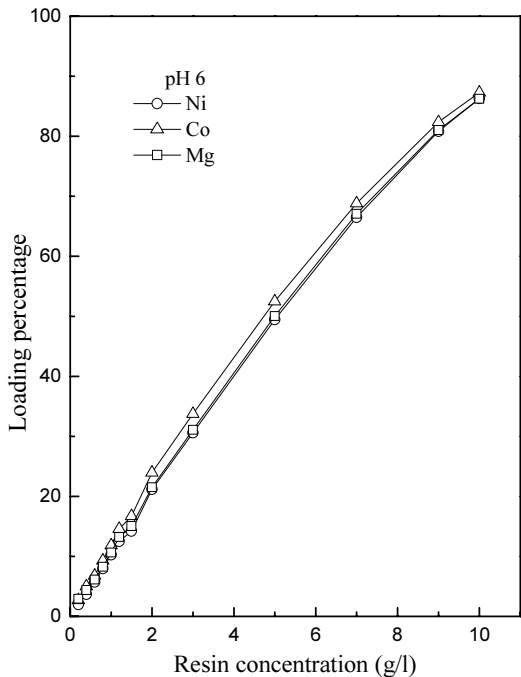
니켈, 코발트와 마그네슘이 단독으로 함유된 용액의 pH가 6인 조건에서 흡착실험결과를 이용하여 각 금속이온의 평형농도를 x축으로, Diphonix 단위 질량당 흡착된 금속의 양을 y축으로 삼아 도해한 결과를 그림 7에 나타냈다. 니켈, 코발트와 마그네



**Fig. 7.** Comparison of the equilibrium loading of Ni(II), Co(II) and Mg(II) from the solution of pH 6. Metal concentration in each solution was 100 mg/L.

슘 모두 Diphonix에 의한 흡착반응이 Langmuir 흡착등온곡선과 잘 일치하였다. 식 (7)을 보면 용질의 농도가 높은 조건에서 그림 7의 y값은 Diphonix가 최대 흡착할 수 있는 금속의 양을 나타낸다. 용액의 pH가 6인 조건에서 Diphonix는 니켈을 최대 52 mg/g, 코발트는 50 mg/g, 그리고 마그네슘을 20 mg/g 흡착할 수 있다.

이온교환에서 선별계수에 영향을 주는 인자는 교환되는 이온의 원자가와 그 특성이다. 일반적으로 하전량이 높은 이온일수록 이온교환수지와 강한 흡착력을 가진다. 또한 하전량이 같은 이온의 경우에는 수화된 이온의 크기가 작을수록 우선적으로 흡착된다. 이는 수화이온의 크기가 큰 이온의 경우 과도한 부풀음이 발생하여 탄성적인 수지가 이완되려는 경향이 있기 때문이다. 니켈과 코발트이온의 반경은 0.078 nm이고, 마그네슘 이온의 반경은 0.065 nm이다. 마그네슘 이온의 반경이 니켈과 코발트 이온의 반경보다 작으므로 마그네슘 이온이 Diphonix수지에 더 강하게 정전기적 인력으로 흡착될 것으로 예상되나, 본 실험결과 마그네슘의 최대 흡착량이 니켈과 코발트의 최대흡착량보다 작았다.



**Fig. 8.** Effect of Diphonix concentration on the loading percentage of Ni(II), Co(II), and Mg(II) from the mixed solution of pH 6. Mixed solution contained 100 ppm of each metal.

이는 Diphonix에 의한 금속이온의 흡착반응에서 이온의 반경과 함께 침전 pH가 중요한 것을 의미한다. 즉, 마그네슘의 이온반경이 니켈과 코발트 이온의 반경보다 작지만, 마그네슘 이온의 침전 pH가 가장 높으므로 pH 6의 조건에서는 이온교환반응의 구동력이 낮다고 생각할 수 있다.

혼합용액에서 Diphonix에 의한 니켈, 코발트와 마그네슘의 흡착

Langmuir 등온곡선으로부터 용액의 pH가 6인 조건에서 Diphonix에 의한 마그네슘 최대흡착량이 니켈과 코발트보다 훨씬 낮은 것을 알았다. 이와 같이 최대흡착량에 차이가 있는 점을 이용하면 세 금속이온이 혼합된 용액으로부터 니켈과 코발트만을 Diphonix에 흡착시켜 분리할 수 있는 가능성이 있다. 따라서 이러한 가능성을 조사하기 위해 합성용액을 대상으로 흡착실험을 수행했다. 합성용액에서 니켈, 코발트와 마그네슘의 농도는 100 ppm으로, 용액의 pH를 6으로 조절한 다음 Diphonix의 농도

**Table 1.** Physical properties of Diphonix resin

Matrix	PS-DVB
Functional groups	Diphosphonic, sulphonic, carboxylic
Commercial form	H <sup>+</sup>
Total capacity	5.6 (mmol/g)
Moisture content	58.3%
Density	1.05~1.11 (g/ml)
Wet particle porosity	0.7
Maximum temperature	40°C
Operating pH range	0~12

를 변화시키며 흡착 실험한 결과를 그림 8에 나타냈다. Diphonix농도에 따른 세 금속의 흡착율의 변화는 동일하며, Diphonix농도 9 g/L에서 세 금속의 흡착율은 모두 80% 정도였다. Langmuir 등온흡착곡선에서 얻은 최대흡착량에 의하면 세 금속이온의 농도가 각각 100 ppm인 합성용액에서 세 금속이온을 모두 흡착하기 위해서는 약 9 g/L의 Diphonix농도가 필요하다. 본 실험결과에 의하면 Diphonix농도 9 g/L에서 세 금속이 모두 80% 정도씩 흡착되었으므로, 흡착효율이 80%라고 생각할 수 있다. 또한 Diphonix의 농도가 4 g/L 이하로 낮은 조건에서도 세 금속의 흡착율은 동일하였다. Diphonix의 농도가 낮은 조건에서는 니켈과 코발트가 마그네슘보다 선택적으로 Diphonix에 흡착될 것으로 예상되었으나, 실제로 세 금속의 흡착거동은 비슷하다. 마그네슘 함량이 높은 니켈 라테라이트광을 황산으로 침출한 용액에서 마그네슘의 농도는 32.2 g/L로 니켈농도의 약 8배, 코발트 농도의 400배에 해당된다. 이와 같이 농도차이가 심한 용액에서는 질량효과(mass action)로 인해 니켈과 코발트에 비해 마그네슘이 흡착되려는 경향이 강하다. 따라서 니켈 라테라이트광을 황산으로 침출한 용액에서 Diphonix를 사용하여 니켈과 코발트만을 흡착시켜 마그네슘으로부터 분리하는 것이 어렵다는 결론을 얻었다.

마그네슘 함량이 높은 용액에서 용매추출이나 이온교환수지를 사용해서 니켈과 코발트를 분리하고자 하는 경우 질량효과로 인해 상당한 양의 마그네슘이 추출 또는 흡착된다. 니켈과 코발트의 침전 pH와 마그네슘의 침전 pH간에 차이가 크고, 또한 니켈과 코발트만의 분리는 비교적 간단하다. 따라서 니켈 라테라이트광을 황산으로 침출한 용액에서 니켈과 코발트를 침전시켜 마그네슘으로부터 분리

한 다음 Cyanex272와 같은 추출제를 사용하여 니켈과 코발트를 분리하는 것이 니켈 라테라이트로부터 니켈과 코발트 회수 측면에서 바람직하다고 생각된다.

## 결 론

양이온교환수지의 일종인 Diphonix를 사용하여 황산용액에서 니켈, 코발트, 마그네슘의 흡착거동을 조사하였다. 25°C에서 Diphonix에 의한 세 금속 이온의 흡착거동은 Langmuir 등온곡선과 잘 일치하였다. Langmuir 등온곡선으로부터 Diphonix에 의한 세 금속이온의 최대흡착량으로 니켈 52 mg/g, 코발트 50 mg/g, 마그네슘 20 mg/g을 얻었다. 세 금속이 혼합된 합성용액을 대상으로 Diphonix에 의한 분리 실험결과 세 금속이온의 흡착거동은 동일하였다. 합성용액의 pH 5에서 7사이의 조건에서 Diphonix를 이온교환수지로 사용하여 니켈과 코발트만을 흡착시켜 마그네슘과 분리하는 것이 불가능하였다.

## 감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 일반사업인 “해외 금속 광물 개발을 위한 활용 기술 연구”과제의 일환으로 수행되었습니다. 본 논문을 심사해주신 심사위원들께도 감사드립니다.

## 참고문헌

박경호, 남철우 (2008) 니켈 자원과 제련기술의 현황과 전망. 재료마당, 21, 4-12.  
박경호, 정선희, 남철우, 신선명, 김동수 (2004) 니켈과 코발트를 함유한 황산용액으로부터 Cyanex 272에 의한 코발트의 용매추출. 대한금속재료학회지, 42, 947-951.  
이만승, 김상배, 최영운, 채종귀 (2010) 마그네슘 함량이 높은 니켈 laterite 광으로부터 습식공정에 의한 니켈과 코발트 회수. 대한금속재료학회지, 48, 62-70.  
채종귀, 김상배, 이만승 (2010) 니켈 라테라이트광으로부터 니켈 회수 기술. 재료마당, 23, 40-47.  
Chiarizia, R., Horwitz, E.P., Gatrone, R.C., Alexandratos, S.D., Trochimczuk, A.Q., and Crick, D.W. (1993) Uptake of metal ions by a new chelating ion-exchange

resin Part 2: acid dependencies of transition and post-transition metal ions. Solvent Extraction and Ion Exchange, 11, 967-985.  
Lee, M.S. and Nicol, M.J. (2007) Removal of iron from cobalt sulfate solutions by ion exchange with Diphonix resin and enhancement of iron elution with titanium(III). Hydrometallurgy, 86, 6-12.  
Nayl, A.A. (2010) Extraction and separation of Co(II) and Ni(II) from acidic sulfate solutions using Aliquat 336. Journal of Hazardous Materials, 173, 223-230.  
Papangelakis, V.G. and Blakey, B.C. (1996) A study of solid-aqueous equilibria by the speciation approach in the hydronium alunite-sulfuric acid-water system at high temperatures. Metallurgical and Materials Transactions B, 27B, 555-566.  
Papangelakis, V.G. and Baghalha, M. (1998) Pressure acid leaching of laterites at 250°C : A solution chemical model and its applications. Metallurgical and Materials Transactions B, 29B, 945-952.  
Pourbaix, M. (1966) Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions. Pergamon Press, Oxford, 140-141, 323-325, 331-333.  
Tsakiridis, P.E. and Agatzini, S.L. (2004a) Simultaneous solvent extraction of cobalt and nickel in the presence of manganese and magnesium from sulphate solutions by Cyanex 301. Hydrometallurgy, 72, 269-278.  
Tsakiridis, P.E. and Agatzini, S.L. (2004b) Process for the recovery of cobalt and nickel in the presence of magnesium and calcium from sulphate solutions by Versatic 10 and Cyanex 272. Minerals Engineering, 17, 535-543.  
Tsakiridis, P.E. and Agatzini, L. S. (2005a) Solvent extraction of aluminum in the presence of cobalt, nickel and magnesium from sulphate solutions by Cyanex 272. Hydrometallurgy, 80, 90-97.  
Tsakiridis, P.E. and Agatzini, L.S. (2005b) Process for the recovery of cobalt and nickel in the presence of magnesium from sulfate solutions by Cyanex 272 and Cyanex 302. Minerals Engineering, 17, 913-923.  
Wanakat, P.C. (1990) Rate-controlled separations. Elsevier Applied Science, NY, 229-233.

접수일(2010년 8월 26일), 수정일(1차 : 2010년 9월 8일), 게재확정일(2010년 9월 9일)