≫ 연구논문 ≪

마그네슘이 함유된 황산용액에서 Versatic acid-10에 의한 코발트와 니켈의 선택적 추출

조연철* · §안재우* · 이재영**

*대전대학교 신소재공학과, **POSTECH

Selective Extraction of Cobalt and Nickel in the Presence of Magnesium from Sulphate Solutions by Versatic Acid 10

Yeon chul Cho*, §Jae woo Ahn* and Jae young Lee**

*Dept. of Advanced Materials Sci. & Eng. Daejin University, Korea

**Pohang University of Science & Technology, Pohang, Korea

요 약

황산용액에서 코발트와 니켈을 마그네슘으로부터 분리하기 위해 추출제로 Cyanex272, PC88A 그리고 Versatic acid 10를 사용하여 추출실험을 실시하였다. 코발트, 니켈 및 마그네슘의 추출거동을 비교 실험한 결과, Versatic acid 10이 가장 우수하다는 것을 알 수 있었다. 평형 pH 7.0에서 Versatic acid 10을 사용하여 약 98%의 코발트와 니켈이 추출되고, 5% 이하의 마그네슘이 공추출되었다. McCabe-Thiele 도표 분석으로부터 pH 7.0, 상비(A/O) 2.0에서 10% Versatic acid 10에 의해 코발트와 니켈을 추출하기 위해서는 2단이 필요하였다. 유기상에 추출된 코발트 및 니켈은 70g/L H₂SO₄ 이상인 경우 효과적으로 탈거가 가능하였고, 이때 코발트는 99.78%, 니켈은 98.42% 탈거되었다.

주제어 : 용매추출, 코발트, 니켈, 마그네슘, 분리

Abstract

Separation of Co and Ni over Mg from the sulfuric acid solutions using Cyanex272, PC88A and Versatic acid 10 as an extractant was carried out. From the comparative studies about the extraction behavior of Co, Ni and Mg, Versatic acid 10 was superior to Cyanex272 and PC88A for the selective extraction of cobalt and nickel from the mixed solutions. About 98% of Ni and Co were extracted at equilibrium pH 7.0 and less than 5% of Mg was co-extracted by Versatic acid 10. McCabe-Thiele diagram indicated two stages requirement for Co and Ni extraction by 10% Versatic acid 10 at pH 7.0 and phase ratio (A/O) of 2.0. The loaded Co and Ni in organic phase was stripped effectively the sulfuric acid concentration above 70 g/L. 99.78% of cobalt and 98.42% of nickel were stripped.

Key words : Solvent extraction, cobalt, nickel, magnesium, separation

· Received : June 8, 2020 · Revised : June 29, 2020 · Accepted : July 8, 2020

§ Corresponding Author : Jae woo Ahn (E-mail : jwahn@daejin.ac.kr)

Advanced Materials Science & Engineering, Daejin University, 1007 Hoguk-ro, Pocheon-si, Gyeonggi-do 11159, Korea

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

최근 고품위 니켈 황화광이 고갈됨에 따라 라테라이트 광으로 부터 니켈과 코발트를 회수하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 라테라이트광은 limonite, saprolite 및 garnierite광으로 구분되며, 지표면의 깊이가 증가함에 따라 니켈과 마그네슘 함량은 증가하나 철의 함량은 감소한다. 이러한 라테라이트광에서 니켈 및 코발트 등을 회수하기 주로 황산을 사용하여 침출을 하는데 이 경우 침출용액에는 니켈, 코발트, 철 및 마그네슘 등이 함유되어 있다¹⁻³⁾. 특히 garnierite광의 경우 마그네슘 함유량이 9~15%로 1.8~3.5%의 니켈 함유량보다도 훨씬 높기 때문에 침출용액에는 니켈 및 코발트 외에 마그네슘이 상당량 불순물로 혼입되기 쉽다. 황산침출용액 중에 니켈과 코발트만이 존재할 경우에는 추출제로 PC88A나 Cyanex272를 사용하여 이들 성분을 효과적으로 분리·회수하는 기술은 이미 많이 연구되고 상용화되었다⁴⁾. 그러나 마그네슘이 불순물로 고농도로 함유된 용액에서는 코발트와 니켈을 바로 분리하기에는 어려움이 많다. 이러한 마그네슘이 함유된 침출용액에서 코발트와 니켈을 회수하는 공정으로는 먼저 Cyanex272를 사용하여 코발트와 마그네슘을 니켈과 분리한 후에 코발트 용액에서 마그네슘을 황화물 침전법이나 Cyanex302를 사용하여 마그네슘을 분리하는 방법⁵⁾이 제시되었다. 또한 Ritcey 등은⁶⁾ 먼저 Cyanex272를 사용하여 코발트와 망간을 추출하고, 추출여액에서 니켈과 마그네슘을 Versatic acid 10으로 분리하는 공정을 제시하였다.

한편, 이러한 침출액에서 마그네슘만을 용액에 남기고 코발트와 니켈을 함께 추출·분리하고자 하는 연구도 일부 발표되어 있다. Mihaylov 등⁷⁾은 Goro laterite광으로 부터 pH 2.0이하에서 Cyanex301을 사용하여 니켈 및 코발트를 동시 추출하기 위한 연구를 실시하였고, Tsakiridis 등⁸⁻¹⁰⁾은 마그네슘 및 칼슘이 존재하는 니켈 및 코발트 용액에서 Versatic acid 10과 Cyanex272, Cyanex302를 사용하여 니켈 및 코발트 회수에 관한 연구를 발표하였다. Lee 등¹¹⁾은 laterite광에서 황산으로 침출한 후에 침출액에서 D2EHPA를 사용하여 니켈과 코발트를 회수하기 위한 기초 용매추출 실험을 실시하였다. 그러나 이러한 연구에서 사용된 Cyanex301 등의 경우 고가이고 또한 구입에 어려움이 있고, D2EHPA나 Cyanex272의 경우는 니

켈 추출시 마그네슘이 공추출 되는 문제가 있기 때문에 코발트 및 니켈을 마그네슘함유 용액에서 선택적으로 분리하는 것은 불가능하다. 이 외에 Lee 등은 양이온교환수지의 일종인 Diphonix resin을 사용하여 이들 원소들의 분리 가능성에 대해 기초 연구를 실시하였으나 역시 니켈과 코발트만을 마그네슘과 분리하는 것은 불가능하다고 보고하였다¹⁾.

따라서 본 연구에서는 코발트 및 니켈을 먼저 마그네슘으로부터 선택적으로 추출하여 농축한 후에 후속공정에서 코발트와 니켈을 분리하고자 이에 대한 기초 연구를 실시하였다. 추출제로 Versatic acid 10을 사용하여 이들 세 성분들의 추출거동을 조사하여 코발트와 니켈을 선택적으로 추출·분리할 수 있는 최적 조건을 조사하고자 하였고, 또한 추출 및 탈거 상비 변화 실험을 통해 마그네슘과 분리된 코발트와 니켈의 농축 효과를 고찰하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1. 실험 재료

코발트 및 니켈을 마그네슘과 분리 추출과 그리고 농축을 위해서 사용한 추출제로는 Cyanex272(di-2,4,4-trimethyl pentyl phosphinic acid : Cyatec Inc.), PC88A(2-ethylhexyl phosphonic acid mono-2-ethylhexyl ester : Daihachi Chemical.) 그리고 카르복실산의 일종인 Versatic acid 10 (2-methyl-2-ethyl-heptanoic acid : Shell Chemical)을 사용하였으며 희석제로는 Exxol D80(Exxon mobil Corp.)을 사용하였다. 한편, 침출 용액으로는 Table 1과 같은 조성으로 시약급 황산코발트 및 황산니켈, 황산마그네슘 등의 염류를 사용하여 모의용액을 제조하여 사용하였다.

2.2. 실험 방법

일정조성 및 상비를 조절한 유기상과 수상을 분액여두를 사용하여 약 20분간 교반하고 약 30분간 정지하여 상분리를 한 후에 수용액상을 여과하여 ICP-AES(Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrophotometer : Perkin Elmer, Optima-4300 DV)를 이용하여 분석한 후

Table 1. Chemical composition of simulated solution

Component	Co	Ni	Al	Mg
Concentration (g/L)	0.92	0.334	0.01	0.329

다음식에 의거하여 추출율 및 탈거율을 구하였다.

- 추출율(Extraction percentage : %) =

$$\frac{\text{Equilibrium Metal mass in the organic phase}}{\text{Initial Metal mass in the aqueous phase}} \times 100$$

- 탈거율(Stripping percentage : %) =

$$\frac{\text{Equilibrium Metal mass in the aqueous phase}}{\text{Initial Metal mass in the organic phase}} \times 100$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 추출제별 추출 거동 고찰

3.1.1. PC88A에 코발트, 니켈 및 마그네슘 추출 거동

일반적으로 황산침출 용액 중에는 금속이온이 Co^{2+} , Ni^{2+} , Mg^{2+} 등의 양이온 상태로 존재한다. 이러한 성분들을 분리하기 위해서 일반적으로 산성추출제를 사용하며, 추출 메커니즘을 다음과 같은 반응식으로 나타낼 수 있다.

상기 식에서 알 수 있듯이 금속이온과 추출제가 반응하여 산(H^+)을 생성하기 때문에 수용액상의 pH가 금속이온의 추출에 매우 민감하다는 것을 알 수 있다. 따라서 산성 추출제인 Cyanex272, PC88A, Versatic acid 10을 사용하

여 수용액상의 pH를 변화에 따라 각 금속의 추출 거동을 고찰 하였다.

Fig. 1은 0.3M PC88A를 이용하여 25°C, 추출상비(O/A) = 1.0에서 평형 pH 변화에 따라 각 금속의 추출 거동을 고찰한 결과이다. 그림으로부터 코발트는 평형 pH 3.5에서부터 추출율이 증가하여 pH 4.2 이상에서는 99% 이상의 추출율을 나타내었다. 그러나 니켈의 경우는 pH 4.3까지는 20% 이하의 추출율을 보였으나 pH가 증가함에 따라 추출율이 증가하여 pH 5.5 부근에서는 약 50% 내외의 추출율을 보였다. 한편, 마그네슘의 경우는 코발트 보다는 추출율이 낮으나 비슷한 추출 거동을 보이고 있고, 니켈 보다는 추출율이 높아 코발트 추출 시 불순물로 혼입될 가능성이 있다. 따라서 PC88A는 마그네슘과 코발트 및 니켈을 분리하는데 적합하지 않다.

3.1.2. Cyanex272에 의한 코발트, 니켈 및 마그네슘 추출 거동

Fig. 2에 0.3M Cyanex272를 이용하여 25°C, 추출상비(O/A) = 1.0에서 평형 pH 변화에 따라 각 금속의 추출율을 비교하였다. 이 경우 상 분리를 원활히 하기 위해 유기상에 5vol.%의 TBP(Tri-butyl-phosphate)를 조질제로 첨가하였다. 그림으로부터 코발트의 경우 평형 pH 5.0 이상에서는 90% 이상의 추출율을 나타내었다. 그러나 니켈의 경우는 pH 5.5이상에서 급격히 증가하는 경향을 보였다. 또한 Cyanex 272를 사용한 경우에도 PC88A를 사용한 추출결과와 유사하게 마그네슘의 추출율이 코발트와 니

Fig. 1. Effect of equilibrium pH on the extraction of Co, Ni and Mg by PC88A from sulfate solution (0.3M PC88A, O/A:1.0, 25°C).

Fig. 2. Effect of equilibrium pH on the extraction of Co, Ni and Mg by Cyanex272 from sulfate solution (0.3M Cyanex272, O/A:1.0, 25°C).

젤의 추출곡선 사이에 위치하고 있어 코발트 및 니켈을 마그네슘과 분리하는 추출제로는 적합하지 않다.

3.1.3. Versatic acid 10에 코발트, 니켈 및 마그네슘 추출 거동

추출제로 Versatic acid 10을 사용하여 코발트와 니켈 그리고 마그네슘이 혼합된 용액에서 평형 pH 변화에 따라 각 금속의 추출율을 조사하여 Fig. 3에 나타내었다. 실험 결과 pH 증가에 따라 니켈, 코발트 및 마그네슘의 추출율이 증가하는 경향을 보이고 있으나 PC88A나 Cyanex272의 경우는 코발트가 낮은 pH에서 니켈보다 추출이 더 잘 되나 이 경우는 오히려 니켈이 코발트 보다 추출이 잘되는 경향을 나타내었고, 두 금속 모두 pH 6.0에서 급격히 추출율이 증가하여 pH 7.0 부근에서는 96% 이상이었으며 그 이후에는 증가율이 미미하였다. 그러나 마그네슘의 경우는 pH 7.0이하에서는 거의 추출되지 않고 pH 7.0 부근을 경계로 pH 증가에 따라 급격히 추출율이 증가하는 경향을 보이고 있다. 따라서 침출액중의 평형 pH를 7.0 부근으로 유지하여 추출할 경우 니켈 및 코발트를 마그네슘과 분리 추출이 가능하다는 것을 알 수 있다. 상온에서 추출 상비(O/A) 1.0으로 추출 실험 결과, 코발트 추출율은 96.7%, 니켈은 96.97% 그리고 마그네슘의 경우는 3.03% 정도 공추출 됨을 알 수 있다. 이 경우 마그네슘의 공추출을 낮추기 위해서는 pH를 낮추는 것이 바람직하나 이 경우 코발트 및 니켈의 추출율이 약간 감소할 수 있다.

Fig. 3. Effect of equilibrium pH on the extraction of Co, Ni and Mg by Versatic acid 10 from sulfate solution (0.3M Versatic acid, O/A:1.0, 25°C).

3.2. Versatic acid 10에 의한 코발트 및 니켈의 분리 추출 및 농축

3.2.1. 상비(phase ratio) 변화에 따른 추출 실험

용매추출 기술의 장점중의 하나는 유기상과 수용액상의 상대적인 비를 유연성 있게 변화시켜가며 추출함으로써 추출된 유기상중의 금속농도를 농축시키는 기능이 있다. 이러한 수상과 유기상의 상비를 조작하는 것을 공정선(operationing line)이라 한다. 따라서 초기 침출액의 농도가 낮은 경우 이러한 공정선을 적절하게 조작하여 추출된 금속의 농축이 가능하다. 따라서 이에 대한 효과를 확인하기 위하여 10% Versatic acid-10을 사용하여 pH 7.0에서 상비 변화에 따른 추출 실험을 실시하였는데 이에 대한

Fig. 4. Effect of phase ratio (A/O) on the extraction of metals (10% Versatic acid 10, eq. pH : 7.0).

Fig. 5. Concentration of metal ions in organic phase with phase ratio (A/O) (10% Versatic acid 10, eq. pH : 7.0).

결과를 그림 Fig. 4에 나타내었다. 그림으로부터 추출 상비(A/O)를 증가시키에 따라 코발트 및 니켈의 추출율을 조금씩 감소하는 경향을 보이고 있고 초기 96% 이상의 추출율을 보였던 니켈의 경우는 89%, 코발트의 경우는 75%까지 추출율이 감소하는 경향을 보였다. 이것은 수상의 상대적인 양의 증가로 인하여 니켈 및 코발트와 반응할 수 있는 유리 추출제가 감소하기 때문으로 풀이할 수 있다. 한편, 마그네슘의 경우는 상비의 증가 유무에 관계없이 추출이 거의 되지 않은 것을 알 수 있었다. 이 경우 Fig. 5와 같이 상비 변화에 따라 유기상에 코발트 및 니켈의 농도가 증가하여 상비 4.0에서는 코발트 3.23g/L, 니켈 1.34g/L 까지 농축되었다.

3.2.2. McCabe-Thiele diagram 에 의한 추출단수 결정
수용액상으로부터 유기상으로 금속성분의 이동은 두 액상간의 상대적인 부피와 분배계수(distribution coefficient)에 의하여 좌우되는데, 이 두 인자를 같이 도표에 나타낸 것이 McCabe-Thiele diagram이다. Fig. 6에서 곡선으로 표시된 것이 유기상으로 추출된 금속 성분과 수용액상에 남아 있는 금속성분의 분배를 나타낸 추출등온곡선(Extraction isotherm)이며, 직선으로 나타낸 것은 수용액상과 유기상의 비를 나타낸 공정선(operating line : O/A비)으로 임의로 선정을 할 수 있다. 이 그림으로부터 공정선의 변화에 따라 각 금속성분을 원하는 추출률까지 추출하는데 필요한 이론적인 추출단수를 구할 수 있다. 초기 코발트 농도가 0.92g/L인 경우 그림과 같이 A/O 비가 2.0에서 2단(stages)에 의하여 99%이상의 코발트를 추출할 수 있

Fig. 6. McCabe-Thiele diagram of Co and Ni extraction by Versatic acid 10.

며, 니켈의 경우도 초기 농도 0.34g/L인 경우 2단으로 대부분 추출된다는 것을 알 수 있다. 한편, A/O비가 높을수록 추출단수는 증가하며 공정이 복잡해지고 시설투자비의 증가요인이 된다. 그러나 A/O비가 낮을 경우에는 추출 용매의 사용량이 많아지고 유기상 성분이 수용액상으로 용해하는 등의 문제가 있다. 따라서 실제 공정에 응용할 경우에는 이러한 두 가지 요인을 고려하여 적절한 상비를 결정해야 한다. 본 연구 결과 초기 코발트 농도 0.92g/L, 니켈 0.34g/L인 경우 10% Versatic acid 10에 의해 pH 7.0, 온도 25°C, A/O 2.0에서 2단추출로 충분하다는 것을 알 수 있다.

3.2.3. 황산농도 변화에 의한 탈거

유기상으로 추출된 코발트 및 니켈을 회수하기 위해서 순수한 황산용액을 이용하여 탈거 실험을 실시하였다. Table 2에 Versatic acid-10에 추출된 유기상에서 상온에서 황산농도에 따라 각 금속의 탈거 거동을 고찰한 결과이다. 표에서와 같이 황산농도가 증가함에 따라 코발트와 니켈의 탈거율은 조금 증가하는 경향을 보였고 70g/L 황산용액에서 코발트의 경우는 99.78%, 니켈의 경우는 98.42%

Table 2. Effect of sulfuric acid concentration on the stripping of metals. 10% Versatic acid-10, O/A=1.0, 25°C)

Stripping solution	Element	Conc. of organic phase (mg/L)	Conc. of stripping solution (mg/L)	Stripping (%)
20 g/L H ₂ SO ₄	Co	1020.46	966.10	94.67
	Ni	396.13	370.41	93.51
	Mg	9.62	9.60	99.79
30 g/L H ₂ SO ₄	Co	1020.46	974.88	95.53
	Ni	396.13	378.87	95.64
	Mg	9.62	9.59	99.69
50 g/L H ₂ SO ₄	Co	1020.46	1004.52	98.44
	Ni	396.13	386.80	97.65
	Mg	9.62	9.57	99.50
70 g/L H ₂ SO ₄	Co	1020.46	1018.22	99.78
	Ni	396.13	389.86	98.42
	Mg	9.62	9.51	98.86
100 g/L H ₂ SO ₄	Co	1020.46	1019.4	99.9
	Ni	396.13	394.9	99.68
	Mg	9.62	9.61	99.92

의 높은 탈거율을 보였고, 마그네슘의 경우도 용액 중 농도가 낮지만 99% 전후의 높은 탈거율을 보였다. 따라서 Versatic acid 10에 추출된 코발트 및 니켈의 경우 황산용액에 의해 탈거가 쉽게 가능하다는 알 수 있었고, 황산농도는 70 g/L 이상으로 유지하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

3.2.4. 탈거에 의한 농축 효과

용매추출공정의 장점중의 하나는 탈거과정 중에 상비(O/A)를 조절함으로써 탈거된 용액중의 금속 농도를 농축시킬 수 있다는 점이다. Fig. 7은 30g/L 및 100g/L H_2SO_4 을 탈거제로 사용하여 상비(O/A)를 10까지 변화시켜 코발트 및 니켈 등의 탈거율을 고찰한결과이다. 그림에서 코발트의 경우는 100g/L H_2SO_4 에서는 상비에 큰 변화 없이 99% 이상의 탈거율을 보였고, 니켈의 경우도 상비 증가에 따라 탈거율이 약간 감소하여 O/A=10에서는 약 83.2%의 탈거율을 보였다. 그러나 30g/L H_2SO_4 에서는 코발트의 경우는 상비 10에서도 97% 정도의 탈거율을 보이고 있으나, 니켈의 경우에는 상비증가에 따라 탈거율이 급격히 감소하여 상비 2.5에서는 40% 이하로 급격히 감소하는 경향을 보였다. 이것은 탈거 반응에 관여하는 유리 황산의 농도가 상대적으로 감소하였기 때문이라고 생각된다. 따라서 상비를 증가시켜 탈거액 중의 코발트 및 니켈의 농도를 농축시키기 위해서는 황산농도를 100g/L 정도로 유지하는 것이 바람직하다. 이 경우 마그네슘은 두 경우 모두 99% 이상의 탈거율을 나타내어 본 그림에서는 제외 시켰다. 한편, 코발트 및 니켈의 농축된 효과를 조사

한 결과, 100g/L 황산용액으로 탈거 상비(O/A)를 10으로 조절할 경우 탈거액 중의 코발트는 약 10.0g/L, 니켈 3.5g/L 정도 농축되었다.

4. 결 론

코발트, 니켈 및 마그네슘이 함유된 황산용액으로부터 코발트 및 니켈을 마그네슘과 선택적으로 추출·분리를 위한 기초 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 추출제로 PC88A 및 Cyanex272의 경우는 코발트와 니켈을 마그네슘으로부터 선택적으로 분리하기에는 불가능하며, Versatic acid 10을 사용할 경우 pH 7.0 부근에서 니켈 및 코발트를 동시에 추출한 후 마그네슘을 추출잔액으로 분리가 가능하였다. 이때 니켈의 및 코발트의 추출율은 98% 이상이었으며, 마그네슘의 혼입율은 3.0%이었다.
- 2) McCabe-Thiele diagram 분석으로부터 초기 코발트 농도가 0.92g/L인 경우 상비(A/O)가 2.0인 경우 2단에 의하여 99%이상의 코발트를 추출할 수 있으며, 니켈의 경우도 초기 농도 0.34g/L인 경우 2단으로 99.3%가 추출된다는 것을 알 수 있었다.
- 3) Versatic acid 10에 의해 추출된 니켈 및 코발트의 경우 황산용액에 의해 두 성분을 효과적으로 탈거할 수 있었고, 100g/L 황산용액에 의해 상온에서 상비(O/A) 1.0에서 99.0% 이상의 코발트 및 니켈의 탈거율을 보이거나 상비를 증가할 경우 니켈의 탈거율이 약간 감소하는 경향을 보였고, 탈거 상비를 10으로 조절할 경우 탈거액 중의 코발트는 약 10.0g/L, 니켈은 약 3.5g/L로 농축이 가능하였다.

References

1. Lee, M.S. Kim, S.B. and Chae, J.G., 2010 : Adsorption of Ni(II), Co(II) and Mg(II) from Sulfuric Acid Solution by Diphonix Resin, J. Miner. Soc. Korea, 23(3), pp.183-189.
2. Agatzini-Leonardou, S., Dimaki, D., 1994 : Recovery of nickel and cobalt from low-grade nickel oxide ores by the technique of extraction in heaps using dilute sulphuric acid at ambient temperature, Greek patent GR1001555, 22 March.
3. Whittington, B.I., Muir, D., 2000 : Pressure acid leaching

Fig. 7. Effect of O/A on the stripping of Co and Ni with H_2SO_4 (10% Versatic acid 10, 25°C).

- of nickel laterite : a review, Mineral processing and Extractive Metallurgy Review, 21, pp.527-600.
4. Douglas S. Flett, 2005 : Solvent extraction in hydrometallurgy : the role of organophosphorus extractant, J. of Organometallic Chemistry, 690, pp.2426-2438.
 5. S. Agatzini-Leonardou, P.E. Tsakiridis, P. Oustadakis, et al., 2009 : Hydrometallurgical process for the separation and recovery of nickel from sulphate heap leach liquor of nickeliferous laterites ores, Mineral Engineering, 22, pp.1181-1192.
 6. Ritcey, G. M., Hayward, N.L., Salinovich. T., 1996 : The recovery of nickel and cobalt from laterites ores, Australian patent No. AU-B-40890.
 7. Mihaylov, I., Krause, E., Okita, Y., et al., 2000 : The development of a novel hydrometallurgical process for nickel and cobalt recovery from Goro laterite ore, CIM Bulletin, 93, pp.1224-130.
 8. Tsakiridis, P.E., Agatzini, S.L., 2004 : Process for the recovery of cobalt and nickel in the presence of magnesium and calcium form sulphate solution by Versatic 10 and Cyanex 272, Minerals Engineering, 17, pp.535-543.
 9. Tsakiridis, P.E., Agatzini, S.L., 2004 : Simultaneous solvent extraction of cobalt and nickel in the presence of manganese and magnesium from sulphate solutions by Cyanex 301, Hydrometallurgy, 72, pp.269-278.
 10. Tsakiridis, P.E., Agatzini-Leonardou, S., 2005 : 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, pp.913-923.
 11. Lee, M.S., Kim, S.B., Choi, Y.Y., et al., 2010 : Recovery of Nickel and cobalt by a hydrometallurgical process from Nickel Laterite Ore with High magnesium content, Kor. J. Met. Mater., 48(1), pp.62-70.

조 연 철

- 2018 대전대학교 신소재공학과 석사
 - 현재 대전대학교 신소재화학시스템공학과 박사과정
-

안 재 우

- 현재 대전대학교 신소재공학과 교수
 - 당 학회지 제11권 6호 참조
-

이 재 영

- 2010 포항공대 재료공학과 박사
 - 현재 포스텍 연구교수
-