

용매추출-전해채취법에 의한 망간단괴 매트상 모의 침출용액으로부터 코발트 회수

김현호 · *남철우 · 박경호 · 윤호성 · 김민석 · 김철주 · 박상운

한국지질자원연구원, 제련연구실

Recovery of Cobalt from Synthetic Leaching Solution of Manganese Nodule Matte by Solvent Extraction-electrowinning

Hyun-Ho Kim, *Chul-Woo Nam, Kyung-Ho Park, Ho-Sung Yoon, Min-Seuk Kim,
Chul-Joo Kim and Sang-Woon Park

Extractive metallurgy department, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, 305-350, Korea

요 약

망간단괴 매트상 모의 침출용액에서 구리 용매추출과 수산화 침전법에 의해 구리와 철이 제거 된 용액(Co 1.91 g/L, Ni 14.65 g/L)으로부터 용매추출-전해채취 연속공정을 통해 코발트를 분리, 회수를 위한 규모확대 실험(망간단괴 기준 380 kg/day)을 수행하였다. 용매추출의 경우 추출제로는 NaOH로 45% 비누화 된 0.22 M Cyanex 272, 세정용액은 코발트 2 g/L(pH : 3.0), 탈거용액은 코발트 전해폐액(Co 36.0 g/L, Na₂SO₄ 70 g/L, pH : 1.5)을 사용하였으며, 탈거된 유기상은 산과 증류수의 세척 공정을 통해 재사용하였다. 추출단, 세정단 그리고 탈거단의 O/A 비는 각각 1/1.5, 10/1 그리고 1.5/1 이었으며, 산세척과 수세척단의 O/A 비는 각각 1/1, 6/1이었다. 용매추출공정의 코발트의 추출율과 탈거율은 각각 99.8%와 99.88%이었으며 탈거액의 코발트와 니켈의 농도는 각각 40.27 g/L, 4 ppm이었다. 전해액의 pH 조절을 위해 전해폐액 순환 방식을 도입한 전해채취공정은 0.563 A/dm²의 전류밀도에서 67.0%의 전류효율을 나타내었으며, 99.963% 순도의 금속 코발트를 얻었다.

주제어 : 망간단괴, 코발트 회수, 용매추출, 전해채취

Abstract

A scale up tests (380 kg/day) using a continuous solvent extraction and electro-winning system was carried out to separate and recover cobalt from a solution containing 1.91 g/L Co and 14.65 g/L Ni. The solution was obtained during a process including solvent extraction and precipitation stages for removal of Cu and Fe from a synthetic sulfuric acid solution of manganese nodule matte. The optimal condition for solvent extraction was : solvent concentration of 0.22M Na-Cyanex 272 (45% saponified with NaOH) and O:A phase ratios of 1:1.5, 10:1 and 1.5:1 used in extraction, scrubbing and stripping stages, respectively. The extraction and stripping efficiencies were found to be 99.8% and 99.88%, respectively. The stripped solution contained 40.27 g/L Co with 4 ppm Ni. Cobalt metal of 99.963% purity was yielded with current efficiency of 67% and current density of 0.563 A/dm² during the electro-winning process.

Key words : Manganese nodules, Cobalt recovery, Solvent extraction, Electro-winning

· Received : February 26, 2016 · Revised : March 30, 2016 · Accepted : April 7, 2016

*Corresponding Author : Chul-Woo Nam (E-mail : baram@kigam.re.kr)

Extractive Metallurgy Department, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources, 124 Gwahank-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34132, 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

심해저 망간단괴는 태평양과 인도양 심해에 부존되어 있으며 망간을 주성분으로 구리, 니켈 그리고 코발트 등의 유가금속들이 함유되어 있는 복합 산화광물이다^{1,2)}. 망간단괴의 제련방법 중에 환원용융-침출법은 망간을 페로망간 또는 실리코망간으로의 회수가 용이하고 습식공정에서의 침출잔사가 적은 등의 이점 때문에 가장 유망한 공정으로 알려져 있으며^{3,4)}, 한국지질자원연구원에서는 이 방법을 통한 망간단괴 제련에 대해 연구 중에 있다. 이 용융환원-침출법은 망간단괴를 선택적으로 환원용융하여 구리-니켈-코발트-철계 합금상을 제조한 후 이들 금속의 침출을 용이하게 하기 위하여 황을 첨가하여 매트상으로 만든 후 황산용액을 사용하여 고온고압하에서 용해시킨다^{5,6)}. 이 침출액의 조성은 구리 10.5 g/L, 니켈 15 g/L, 코발트 2.0 g/L, 철 0.2 g/L이며, 이 용액 중 구리는 용매추출-전해채취 통합공정을 통해 분리, 회수된다⁷⁾. 구리 용매추출 후 라피네이트(refinate)는 구리 0.33 g/L, 니켈 14.86 g/L, 코발트 1.95 g/L, 철 0.2 g/L의 조성을 가지며 pH는 약 1.11이다. 라피네이트에 포함된 구리와 철은 수산화나트륨을 이용한 침전법⁸⁾에 의해 수산화구리($\text{Cu}(\text{OH})_2$), 수산화철($\text{Fe}(\text{OH})_3$)로 침전 제거 되어 망간단괴 매트상 침출공정에서 재사용 되며, 여과액은 코발트 1.91 g/L, 니켈 14.65 g/L의 조성을 가진다. 코발트와 니켈 금속은 주기율표의 천이금속족의 이웃에 위치해 성질이 매우 유사하여 서로 분리하기가 용이하지 않다⁹⁾. 이 두 금속을 분리하는 것은 습식제련 공정에서 매우 중요하기 때문에 많은 연구들이 수행되어 왔으며 용매추출법이 널리 사용되고 있다. 용매추출법의 경우 염화물 용액에서는 음이온착체인 CoCl_4^{2-} 를 형성하는 코발트와 착염을 형성하지 않은 니켈의 성질을 이용하여 음이온추출제인 아민계통을 이용하여 분리한다¹⁰⁻¹¹⁾. 한편 황산용액의 경우에는 양이온추출제인 PC88A과 Cyanex 272가 일반적으로 사용되고 있다¹²⁻¹⁴⁾. 저자들은 구리 니켈, 코발트 혼합용액으로부터 Cyanex 272를 이용하여 용매추출 방법으로 코발트를 분리 하는 연구를 이미 보고하였다¹⁵⁻¹⁷⁾.

본 연구에서는 실험실 연구결과를 토대로 망간단괴를 380 kg/day을 처리할 수 있는 규모 확대용 실험 장치를 사용하여, 구리 용매추출과 수산화 침전법을 통해 구리와 철이 제거 된 용액으로부터 용매추출-전해채취의 연속공정을 통해 코발트를 선택적으로 분리, 회수를 위한 실험을 행하였다.

2. 실험방법

2.1 시료

본 실험에 사용한 코발트 공급용액은 EP (Extra pure) 급 시약들을 사용, 구리 용매추출과 구리, 철을 침전법으로 제거하여 얻은 용액을 이용하였다. 추출제인 Cyanex 272 (Cytec Industries Incorporated)는 EXXSOLD-80 (Hosung Chemec. Co., LTD.)으로 희석하여 사용하였다.

2.2 실험장치

망간단괴를 380 kg/day 처리 할 수 있는 용매추출용 혼합-침강기와 전해채취용 전해조를 제작하였다. 혼합기, 침강기 그리고 전해조의 용량은 각각 2 L와 8.8 L 그리고 70 L이며, 용매추출 각 단계는 pH 미터를 설치하여 실시간으로 pH를 측정할 수 있도록 하였다. 설치된 혼합-침강기(mixer-settler), 전해조, 저장조, 파이프라인의 재질은 모두 폴리프로틸렌(poly propylene)이었다. 전해조에는 셀 전방에서 공급된 전해액이 목표량의 코발트를 채취할 충분한 시간동안 셀 내에 체류 할 수 있도록 음극 10장(304 STS, 15 cm × 22.5 cm × 0.2 T), 양극 11장(Pb-Sb 5%, 15 cm × 22.5 cm × 0.5 T)을 일정한 격(5.3 cm)으로 두고 배열하였고, 전해액 온도를 조절하기 위해 히터를 바닥을 따라 길게 배치하였다. 한편 용매추출-전해채취 연속공정 실험을 진행할 때 중요한 조건인 유량을 일정하게 유지하기 위해 모든 용액의 공급 펌프는 무맥동 정량펌프(BMC-040L cheon-sei Co.)를 사용하였고, 또한 이 유량을 확인할 수 있게 모든 수상용액라인에는 전자 유량계(Converter for electromagnetic flowmeter, AMC3100-AC-CP-NN-NN-NN, MNC korea Co., LTD.), 유기상 용액라인에는 추출제의 특성(밀도, 점도)에 맞는 열 질량 유량계(Thermal mass flowmeter, 600-9/9500P, MNC korea Co., LTD.)를 설치하였다. 한편 유량계를 통해 실시간으로 나타내는 유량은 무맥동 정량펌프와 유량계를 통신으로 연결하고 PLC(programmable logic controller)프로그램을 통해 일정한 유량을 유지할 수 있게 하였다.

2.3 실험방법

구리 용매추출과 수산화 침전법을 통해 구리와 철이 제거 된 용액으로부터 향류 용매추출과 전해채취 연속공정을 통해 코발트를 회수하는 실험을 행하였다. 용매추출 공정의 경우 추출단은 4단으로 진행 하였으며, 수상과 유기상의 비율은 1.5 : 1, 추출제는 5 M NaOH로

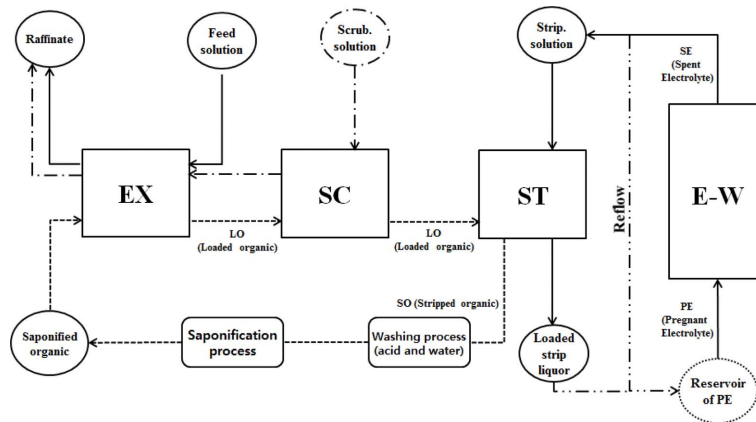


Fig. 1. A schematic diagram of the continuous plant operation of solvent extraction and electro-winning for cobalt, EX = extraction, SC= scrubbing, ST = stripping, E-W = electro-winning.

45% 비누화 된 0.22 M Cyanex 272, 코발트 공급용액은 코발트 1.91 g/L, 니켈 14.65 g/L 조성을 갖는 황산염 용액이었다. 그리고 세정단은 2단으로 진행하였으며, 수상과 세정용액(Co 2.0 g/L, pH : 3.0)의 비율은 10 : 1, 탈거단 역시 2단으로 진행하였으며, 수상과 유기상의 비율은 1 : 1.5이었다. 탈거액은 전해채취 공정으로부터 발생하는 전해폐액(Co 36 g/L, Na₂SO₄ 70 g/L, pH : 1.5)으로 사용하였다. 한편 코발트 공급용액, 추출제, 세정액 그리고 탈거액의 유량은 각각 200, 143, 14.3 그리고 95.2 ml/min이었으며, 코발트 공급용액의 초기 pH는 6.15이었다. 한편 용매추출 탈거 공정 후 유기상의 산세척과 수세척은 각각 1단으로 진행되었다. 유기상과 산세척용액(2M H₂SO₄)의 비율은 1 : 1, 유기상과 수세척의 비율은 6 : 1 이었으며 산세척용액, 수세척 용액의 유량은 각각 143, 23.8 ml/min이었다. 전해채취의 경우 음극 10장, 양극 11장으로 구성되었으며 코발트 용매추출 탈거 공정으로부터 95.2 ml/min의 속도로 공급되는 코발트 40.27 g/L(pH : 2.5) 용액과 전해채취 후 발생하는 전해폐액으로부터 일부 재순환(1000 ml/min)되는 코발트 36.0 g/L(pH : 1.5)용액을 혼합하여 전해액(Co 36.39 g/L, Na₂SO₄ 70 g/L, pH : 1.58)으로 사용하였다. 전해액의 유량은 용매추출 탈거액과 전해폐액의 일부의 양을 합친 1095.2 ml/min으로 이는 전해조내의 pH를 최소 1.5로 유지하기 위한 것이다. 한편 음극의 면적, 코발트 목표 전해채취량(4.27 g/L)을 통해 얻어진 초기 인가전류 값은 0.563 A/dm²이었으며, 이 인가 전류값 하에서 정전류방식으로 전해채취 실험을 행하였다. 용매추출 모든 공정은 상온에서 행하였으며, 전해채취 공

정에서는 전해액 저장조와 전해조내 용액은 40°C로 유지하였다. 한편 코발트 회수를 위한 용매추출과 전해채취 연속공정 실험은 각각 47, 35시간동안 행하였으며, 공정 간에 발생하는 모든 샘플은 ICP-OES(Optima 8300 Perkin Elmer co.)를 이용해 분석하였다. Fig. 1에 코발트 용매추출-전해채취 연속공정의 개략도를 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 코발트 용매추출

3.1.1 코발트의 추출

Fig. 2는 코발트 용매추출공정 추출 4단에서 반응시간에 따른 각단에서 수상의 pH를 나타낸 결과이다. 추출 반응시간 10 ~ 11시간까지는 추출 각단에서 pH가 조금씩 증가하는 경향을 보였으며, 그 이후 반응시간에는 추출 각단에서의 pH 변화는 크게 나타나지 않았다. 이 결과로 보아 가동시간 11시간까지는 코발트의 추출이 진행됨에 따라 안정화 상태(steady state condition)에 도달하는 시간으로 보여지며, 이후에는 안정화 상태에 도달했다고 판단된다. 안정화 상태에서의 추출 1단, 2단, 3단 그리고 4단에서의 pH는 각각 4.94 ~ 5.00, 4.69 ~ 4.74, 4.70 ~ 4.75, 6.10 ~ 6.15 로 나타났다. 코발트 용매추출 반응에서 추출제에 비누화를 하지 않으면 추출반응, 즉 식 (1)의 반응이 진행함에 따라 수상에 H⁺이 발생하기 때문에 pH는 감소하게 된다. 식 (1)에서 A는 산성추출제를 나타낸다.

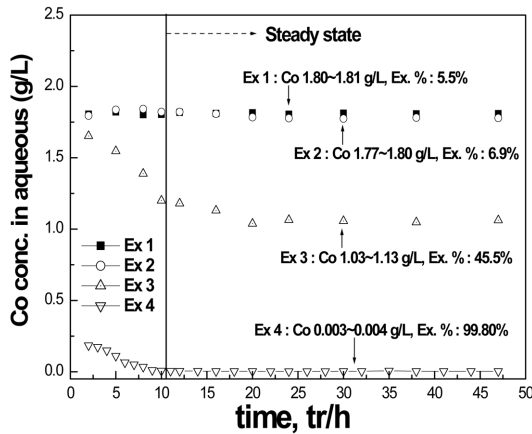


Fig. 2. pH in aqueous phases of 4 extraction stages with reaction time.

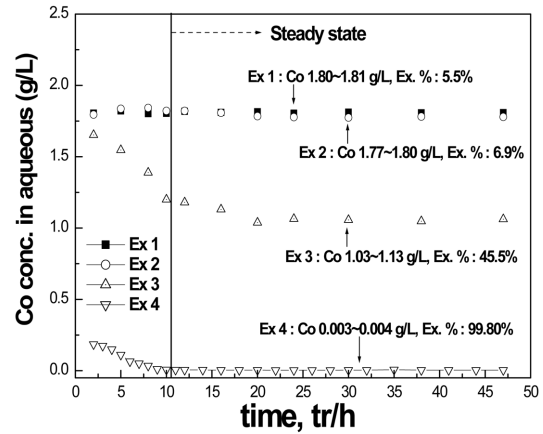
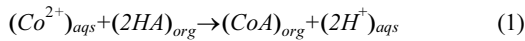


Fig. 3. Cobalt concentrations and extraction efficiencies in aqueous phase at 4 extraction stages with reaction time.



수상의 평형 pH는 코발트의 추출 효율에 큰 영향을 미침으로써, 이를 보상하기 위해 추출제에 암모니아나 수산화나트륨과 같은 알칼리 용액을 이용한 비누화 공정이 반드시 필요하다. 식 (2)에는 수산화나트륨을 이용한 비누화 반응에 대해 나타내었고, 식 (3)에는 비누화된 용매에 대한 코발트 추출반응에 대해 나타내었다. 이 반응을 통하여 추출 4단 수상의 평형 pH는 초기용액 pH 부근에서 유지 되었다.

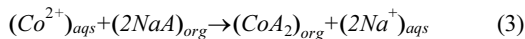
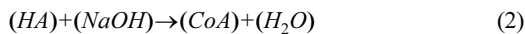


Fig. 3에는 용매추출공정 추출 4단에서 반응시간에 따른 추출단별 수상의 코발트의 농도와 코발트 추출 효율을 나타내었다. 공급용액내의 코발트 농도가 1.91 g/L에서 추출 4단을 통하여 코발트 농도는 0.004 g/L로 감소하였다. 안정화 상태에서 추출 1단, 2단, 3단 그리고 4단에서 수상의 코발트의 농도는 각각 1.80~1.81 g/L, 1.77~1.80 g/L, 1.03~1.13 g/L 그리고 0.003~0.004 g/L 이었으며, 추출 효율은 각각 약 5.5%, 6.9%, 45.5% 그리고 99.8%로 높은 추출 효율을 보였다. 또한 유기상내의 추출 1단의 니켈의 농도와 추출 효율은 각각 21 ppm, 0.14%로 이는 니켈, 코발트 혼합용액으로부터 코발트가 잘 분리되었음을 보여준다.

3.1.2 니켈의 세정

안정화 상태에서 추출 1단 유기상에 포함 된 니켈 농도는 약 21 ppm 이었다. 이 니켈은 탈거 공정을 통해 코발트 전해액으로 투입되어 코발트 전해채취에 불순물로 작용할 수 있기 때문에 탈거 공정 전 니켈을 제거하는 것은 필수적이다. 니켈은 코발트와 치환반응에 의해 제거 되는데 이는 세정이라 하며 식 (4)에 세정반응식을 나타내었다.

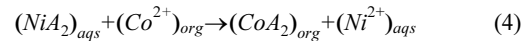


Fig. 4에는 반응시간에 따른 추출 1단과 세정 2단의 유기상내 니켈농도를 나타내었다. 세정공정 결과 세정 각단 유기상내에 니켈 농도는 감소하였고, 세정 1단과 2단에서 니켈의 농도는 각각 5~7 ppm, 2~3 ppm으로 유지되었다. 탈거 1단 공정으로 들어가는 세정 2단의 유기상내 니켈 불순물 농도를 21 ppm에서 2~3 ppm으로 낮추고 탈거 공정에 들어 갈 수 있으므로 이는 세정 공정이 잘 진행 되었다고 판단 할 수 있다.

3.1.3 코발트의 탈거

앞서 설명한 바와 같이 코발트의 탈거액은 전해채취 공정으로부터 발생하는 전해폐액이며, 코발트 탈거 후 용액은 코발트 전해액의 일부로 사용되었다. Fig. 5에는 탈거 각단에서 반응시간에 따른 수상의 pH를 나타내었다. 반응시간의 지남에 따라 탈거 각단의 pH는 증가하

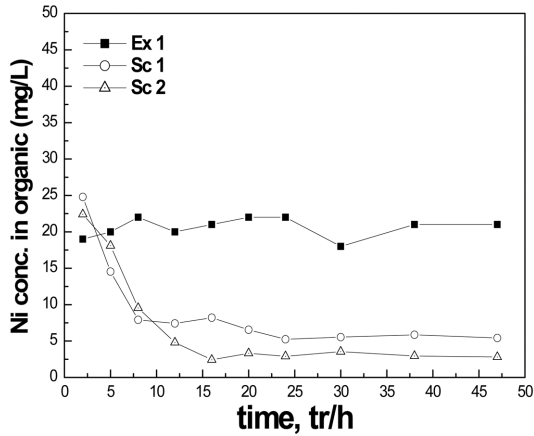


Fig. 4. Concentrations of nickel in organic phase at Ex 1 and 2 scrubbing stages with reaction time.

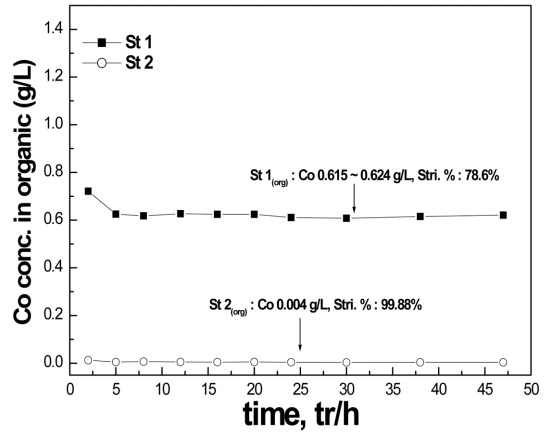


Fig. 6. Cobalt concentrations and stripping efficiencies in organic phase at 2 stripping stages with reaction time.

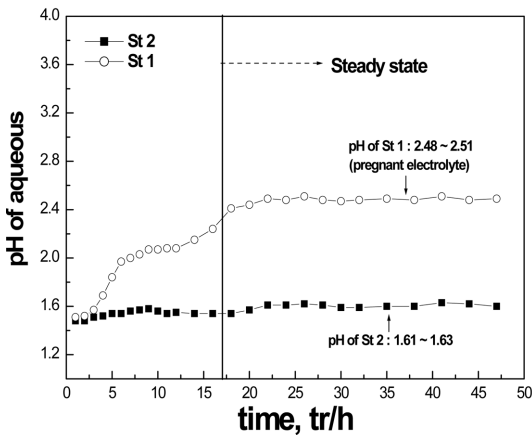
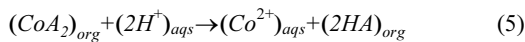


Fig. 5. pH in aqueous phases of 2 stripping stages with reaction time.

였으며, 이는 탈거 반응식 (5)가 진행됨에 따라 코발트 탈거효율이 증가하여 나타나는 결과이다.

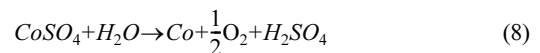


위의 결과로 탈거단은 반응시간 16시간 이후에 안정화 상태에 도달한 것으로 보이며, 이는 추출반응(안정화 상태-11시간)에 영향을 받은 것으로 보인다. 안정화 상태에서 탈거 1단, 2단의 pH는 각각 2.48~2.51, 1.61~1.63으로 전해액의 일부로 사용되는 탈거 1단의 용액의 pH가 목표치인 2.50 부근에 도달하였다. Fig. 6에는 탈거 각단에서 유기상내의 코발트 농도와 탈거효

율에 대해 나타내었다. 실험 시작 후 16 시간이후에 탈거 2단과 1단에서 유기상내 코발트의 농도는 일정하게 유지되었다. 이 안정화상태에서 탈거 1단과 2단의 코발트의 농도는 각각 0.615~0.624 g/L, 0.004 g/L 범위 내에서 유지되었으며, 이때의 코발트의 탈거 효율은 탈거 1단과 탈거 2단에서 각각 78.6%, 99.88%이었다. 최종적으로 탈거된 용액의 코발트 농도와 pH는 각각 40.27 g/L와 2.50 부근이었으며, 불순원소인 니켈농도는 4 ppm의 매우 적은 농도로 코발트의 전해채취에 크게 영향을 미치지 않았다. 한편 탈거된 유기상은 세척(산세척 1단, 수세척 1단)과 비누화공정을 거쳐 추출단의 추출제로 재사용된다.

3.2. 코발트의 전해채취

코발트 용매추출-전해채취 연속공정시스템에서 4.27 g/L의 코발트를 회수하기 위하여 전해채취 실험을 행하였다. 전해채취공정에서 발생하는 양극, 음극의 각 반응은 식 (6), (7), 그리고 전체적인 전해채취 반응은 식 (8)로 나타낼 수 있다.



코발트의 전해채취 시 전해조내의 pH는 1.50이상 유

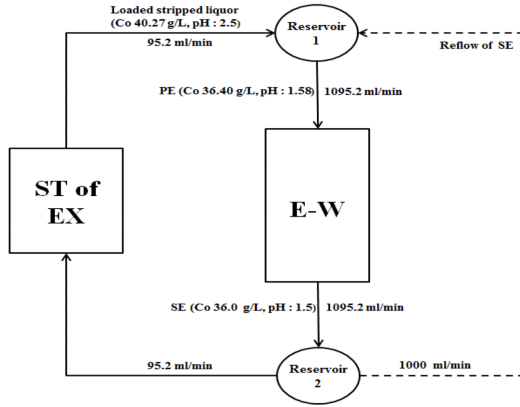


Fig. 7. Scale-up electro-winning system for cobalt.

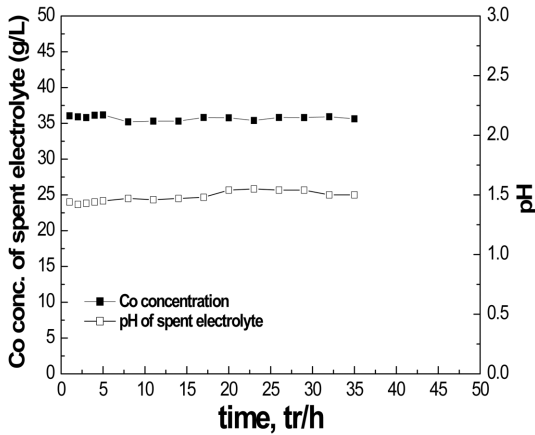


Fig. 8. Change of cobalt concentration and solution pH during electro-winning.

지하는 것이 최소 전류효율을 확보하고 원활한 코발트 회수를 위하여 중요하다. 이를 위해 전해액의 pH를 조절하는 별도의 시스템을 도입하지 않고 전해액의 순환 방식을 개선하여 공정시간동안 전해조의 pH가 최소 1.50를 유지하도록 고안하였고 이는 Fig. 7에 상세하게 나타내었다. 용매추출 공정이 안정화(16시간) 될 때 까지는 코발트 36.39 g/L, 70 g/L Na₂SO₄, pH는 1.58로 합성 된 모의용액으로 전해폐액(탈거용액)을 사용하였으며, 용매추출이 안정된후부터 용매추출-전해채취 연속 공정이 시작되었다. Fig. 8에는 반응시간에 따라 전해채

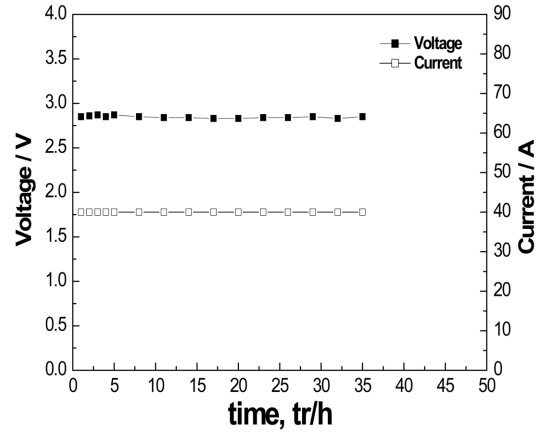


Fig. 9. Change of cell voltage according to applied current during cobalt electro-winning, $I_m = 0.563 \text{ A/dm}^2$.

취 공정을 통해 배출 되는 전해폐액의 코발트 농도와 pH를 나타내었다. 용매추출-전해채취 연속공정 시작 후 배출 되는 전해폐액의 코발트 농도는 36.0 g/L 부근에서 안정화 되었으며, pH는 코발트 탈거반응에 적합한 1.50로 유지되었다. 탈거반응의 pH는 코발트의 용매추출-전해채취 연속공정시스템에서 설계된 최적 pH이다. 일반적으로 용매추출 공정에서 탈거반응은 pH가 낮을수록 탈거효율을 높일 수 있고, 코발트 전해채취에서는 전해액(탈거 후 용액)의 pH가 높을수록 전류효율을 높일 수 있다. 본 용매추출과 전해채취 연속공정시스템에서 코발트 탈거효율과 전류효율을 모두 고려하여 탈거액(전해폐액)의 pH가 1.50일 때 최적의 pH로 판단되었다. 한편 이때의 음극 전류밀도(I_m) 값은 0.563 A/dm^2 이었다. 이에 따라 용매추출-전해채취 연속공정시스템에서 코발트 회수 목표량인 4.27 g/L을 0.563 A/dm^2 의 음극 전류밀도 값으로 회수 할 수 있었다. Fig. 9에는 반응시간에 따라 인가된 전류 값과 이에 따른 셀 전압의 변화를 나타낸 것으로 셀 전압의 변화는 인가전류의 변동과 동일한 양상을 보였으며, 이로부터 직접적으로 영향을 받는 것을 알 수 있다. 이때 셀 전압은 2.80 V 이내로 유지되었고, 0.563 A/dm^2 의 음극 전류밀도에 의한 전류 효율은 67%였다. Table 1에 회수된 금속의 조성을 나타내었으며, 이는 ICP-OES에 의해 분석되었다.

Table 1. Composition of cobalt metal obtained by electro-winning (wt.%)

Element	Co	Mn	Cr	Fe	Ni	Sb	Sn	In	Pb	Al	Zn	Cu
wt. %	99.963	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	0.009	<0.002	<0.002	0.028	<0.002	<0.002	<0.002

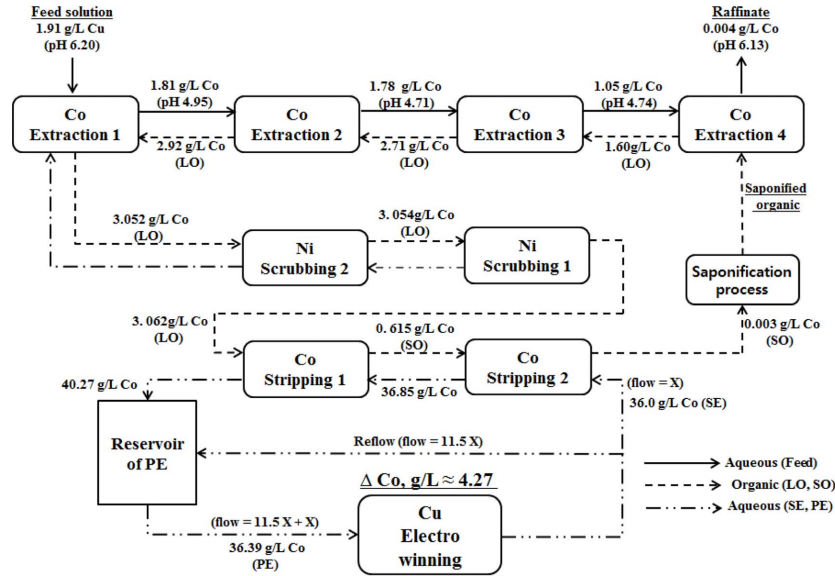


Fig. 10. Material flow diagram of cobalt in SX-EW continuous process at steady state.

금속의 순도는 코발트가 99.963%, 구리 raffinate 용액에 포함되어 있는 니켈은 ICP-OES 검출한계 이하로 나타났으며, 양극 재질인 Pb와 Sb가 각각 0.028%, 0.009% 함유되어 있었다. 따라서 전해채취 된 금속 코발트의 순도는 니켈금속에 영향을 받지 않았으며, 양극 재질에 조금의 영향을 받은 것으로 보인다. Fig. 10은 용매추출-전해채취 연속공정의 코발트의 물질 흐름도를 나타낸 것이다.

4. 결 론

망간단괴 매트상 모의 침출액으로부터 구리와 철이 제거된 용액(Co 1.91 g/L, Ni 14.65 g/L)을 사용하여 용매추출-전해채취 연속공정에 의한 코발트 분리, 회수를 위한 규모확대 실험(망간단괴 기준 380kg/day)을 행하였으며 실험의 결과는 아래와 같다.

- 1) 용매추출 공정 안정화상태에서 추출 1단, 2단, 3단 그리고 4단 각각의 코발트 농도는 1.80 g/L, 1.77 g/L, 1.05 g/L 그리고 0.004 g/L 이었으며, 추출 효율은 각각 5.5%, 6.9%, 44.5% 그리고 99.80%로 높은 추출 효율을 보였다.
- 2) 추출 유기상내 니켈 농도는 21 ppm에서 세정 2 단 공정을 통해 2~3 ppm으로 감소되어, 추출, 세정 공정을 통해 니켈, 코발트 혼합용액으로부터 코발트가

잘 분리되었다.

3) 전해폐액으로부터 탈거 된 코발트의 최종 탈거 효율은 99.88%, 탈거 된 용액의 코발트 농도는 40.27 g/L, pH는 2.50 부근이었다. 그리고 불순원소인 니켈 농도는 4 ppm 이내로 코발트의 전해채취에 영향을 미치지 않았다.

4) 전해채취 공정 안정화상태에서 0.563 A/dm²의 음극 전류밀도 값으로 67%의 전류효율 값을 나타내었으며, 이로 인해 전해액과 전해폐액의 코발트 농도차이, 즉 코발트 전착량은 목표 치인 4.27 g/L 부근에서 유지되었고, 최종적으로 99.963%의 순도를 가지는 금속 코발트를 얻었다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

1. G. Seabayake, 2011 : *Acid leaching of metals from deep-sea manganese nodules – a critical review of fundamentals and applications*, Miner. Eng., **24**(13), pp1379-1396.
2. K. H. Park, C. W. Nam, H. I. Kim and J. T. Park, 2005 :

- Treatment of metal wastes with manganese nodules*, J. of the Korean Inst. of Resources Recycling, **14**(4), pp17-21.
3. B. W. Haynes, M. J. Magyar and F. E. Godoy, 1987 : *Extractive metallurgy of ferromanganese crusts from necker ridge area*, Hawaiian Exclusives Economic Zone. Mar. Min., **6**, pp23-36.
 4. K. Jung, 1993 : *A review of processing of deep-sea nodules and crusts*, CSIRO division of mineral and process engineering, CSIRO Com 788, CSIRO Report, Australia.
 5. K. H. Park, C. W. Nam and H. I. Kim, 2004 : *High temperature and high pressure sulfuric acid leaching of (Cu-Ni-Co-Fe) matte*, J. Korean. Soc. Geosystem. Eng., **41**(5), pp1-5.
 6. K. H. Park, D. Mohapatra, B. R. Reddy and C. W. Nam, 2007 : *A study on the oxidative ammonia/ammonium sulphate leaching of a complex (Cu-Ni-Co-Fe) matte*, Hydrometallurgy, **86**, pp164-171.
 7. H. H. Kim, K. H. Park, C. W. Nam, H. S. Yoon, M. S. Kim, C. J. Kim and S. W. Park, 2016 : *Recovery of copper from Synthetic Leaching solution of manganese nodule matte by solvent extraction-electrowinning process*, J. of the Korean Inst. of Resources Recycling, **25**(1), pp1-8.
 8. K. H. Park, C. W. Nam, H. H. Kim and S. P. Barik, 2013 : *Removal of copper from the solution containing copper, nickel, cobalt and iron*, J. of the Korean Inst. of Resources Recycling, **22**(6), pp48-54.
 9. D. S. Flett, 2004 : *Cobalt-Nickel separation in hydrometallurgy : A review*, Chemistry for sustainable development, **12**, pp81-91.
 10. A. Fernandes, J. C. Afonso and A. J. B. Dutra, 2013 : *Separation of nickel(II), cobalt(II) and lanthanides from spent Ni-MH batteries by hydrochloric acid leaching, solvent extraction and precipitation*, Hydrometallurgy, **133**, pp37-43.
 11. N. A. Sayar, M. Filiz and A. A. Sayar, 2009 : *Extraction of Co(II) and Ni(II) from concentrated HCl solution using Alamine 336*, Hydrometallurgy, **96**, pp148-153.
 12. N. B. Devi, K. C. Nathar and V. Chakravorty, 1998 : *Separation and recovery of cobalt(II) and nickel(II) from sulphate solutions using sodium salts of D2EHPA, PC88A and Cyanex 272*, Hydrometallurgy, **49**, pp47-61.
 13. T. Y. Kim, S. H. Ryu and J. W. Ahn, 2015 : *Separation of copper & cobalt by solvent extraction in organic acid leaching solution*, J. of the Korean Inst. of Resources Recycling, **24**(3), pp3-10.
 14. K. H. Park, B. R. Reddy, S. H. Jung and D. Mohapatra, 2006 : *Transfer of cobalt and nickel from sulphate solutions to spent electrolyte through solvent extraction and stripping*, Sep Purif Technol, **51**, pp265-271.
 15. K. H. Park, S. H. Jung, C. W. Nam, S. M. Shin and D. S. Kim, 2004 : *Solvent extraction of cobalt by cyanex 272 from sulfuric acid solution containing nickel and cobalt*, Korean J. Met. Mater., **42**(11), pp947-951.
 16. K. H. Park and D. Mohapatra 2006 : *Process for cobalt separation and recovery in the presence of nickel from sulphate solutions by Cyanex 272*, Met. Mater. Int., **12**(5), pp441-446.
 17. B. R. Reddy and K. H. Park, 2007 : *Process for the recovery of cobalt and nickel from sulfate leach liquors with saponified Cyanex 272 and D2EHPA*, Sep Sci Technol, **42**(9), pp2067-2080.

김 현 호

- 현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 연구자
- 당 학회지 제22권 6호 참조

남 철 우

- 현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 책임연구원
- 당 학회지 제22권 6호 참조

박 경 호

- 현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 전문연구위원
- 당 학회지 제22권 6호 참조

윤 호 성

- 현재 한국지질자원연구원 책임연구원
 - 당 학회지 제11권 2호 참조
-

김 민 석

- 현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 책임연구원
- 당 학회지 제13권 5호 참조

김 철 주

- 현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 책임연구원
- 당 학회지 제11권 2호 참조

박 상 운

- 현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 연수자
- 당 학회지 제25권 1호 참조

《광 고》 本 學會에서 發刊한 자료를 판매하오니 學會사무실로 문의 바랍니다.

- * EARTH '93 Proceeding(1993) 457쪽, 價格 : 20,000원
(The 2th International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology)
- * 자원리사이클링의 실제(1994) 400쪽, 價格 : 15,000원
- * 학회지 합본집 I~X 價格 : 40,000원, 50,000원(비회원)
(I: 통권 제1호~제10호, II: 통권 제11호~제20호, III: 통권 제21호~제30호, IV: 통권 제31~제40호, V: 통권 제41호~제50호, VI: 통권 제51호~제62호, VII: 통권 제63호~제74호, VIII: 통권 제75호~제86호 IX: 통권 제87호~제98호, X: 통권 제99호~제110호)
- * 한·일자원리사이클링공동워크샵 논문집(1996) 483쪽, 價格 : 30,000원
- * 한·미자원리사이클링공동워크샵 논문집(1996) 174쪽, 價格 : 15,000원
- * 자원리사이클링 총서I(1997년 1월) 311쪽, 價格 : 18,000원
- * '97 미주 자원재활용기술실태조사(1997년) 107쪽, 價格 : 15,000원
- * 日本의 리사이클링 産業(1998년 1월) 395쪽, 價格 : 22,000원, 발행처-文知社
- * EARTH 2001 Proceeding (2001) 788쪽, 價格 : 100,000원
(The 6th International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology)
- * 오재현의 자동차 리사이클링기행(2003년 2월) 312쪽, 價格 : 20,000원, 발행처-MJ미디어
- * 리사이클링백서(자원재활용백서, 1999년) 440쪽, 價格 : 15,000원, 발행처-文知社
- * 리사이클링백서(자원재활용백서, 2004년) 578쪽, 價格 : 27,000원, 발행처-淸文閣
- * 리사이클링백서(자원재활용백서, 2009년) 592쪽, 價格 : 30,000원, 발행처-淸文閣
- * EARTH 2009 Proceeding (2009) 911쪽, 價格 : 100,000원
(The 10th International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology)
- * 리사이클링백서(자원재활용백서, 2014년) 435쪽, 價格 : 35,000원, 발행처-S&M미디어(주)