

Inconel713C 모사 용액으로부터 Alamine336을 통한 Mo의 용매추출분리를 위한 기초 연구

박상렬 · §안종관*

성일하이텍(주), *중원대학교 신재생에너지지원학과

Basic Study for Solvent Extraction Separation of Mo from Synthetic Leaching Solution of Inconel713C by Alamine336

Sang-ryul Park and §Jong-gwan Ahn*

Sungeel High-tech. Co.,

*Department of Renewable Energy Resources, Jungwon University

요 약

Inconel713C에는 Ni 70 wt.%, Cr 11~14 wt.%, Al 5~6 wt.% 및 Mo 4 wt.% 가량 함유되어 있다. 본 연구에서는 Inconel713C 모사용액으로부터 Mo를 회수하고자 용매추출공정을 이용하여 Mo 분리 추출하는 기초연구를 수행하였다. 실험변수로는 추출제의 종류 및 농도, 침출액의 평형 pH, H₂SO₄의 농도 및 불순물의 영향 실험을 수행하여 Mo를 회수하는 최적조건을 조사하였다. 음이온 추출제인 Alamine336은 평형 pH 1 이상에서 99% 추출되고, 양이온 추출제인 Cyanex272는 96%의 추출률을 나타내어 Alamine336의 Mo 추출률이 우수하다. 또한 수상의 평형 pH가 1~4인 조건에서 Mo의 회수율은 Alamine336이 Cyanex272 보다 높게 나타났다. 본 연구의 경우 용매추출공정을 이용한 Mo 회수의 최적조건은 평형 pH 1, Alamine336 1 wt.%, 황산의 활성화 처리 농도는 1 : 0.5이었다.

주제어 : 폴리브렌, 내열합금, 용매추출, Alamine336, Cyanex272

Abstract

Inconel713C which of a commercial Ni super alloy have the compositions of 70 wt.% Ni, 12 wt.% Cr, 6 wt.% Al and 4 wt.% Mo. In this study, solvent extraction has been performed to separate Mo from the synthetic leaching solution, formation of Inconel713C alloy similarly and is found the optimum conditions of recovery of Mo from the leaching solution. The effects of some variables, such as the nature and concentration of the extractants, H₂SO₄ concentrations, and the presence of impurities were investigated. The extraction percentage of Mo by Cyanex272 is 96% in the condition of pH 1 and 4% of concentration of Cyanex272 but Alamine336 is 99% in the condition of the range of pH 1 to 4 and 1 wt.% of concentration of Alamine336. In the case of Alamine336, the extraction percentage of Mo is increased by increasing of the concentration of Alamine336. The optimum condition of this experiment is pH 1 in aqueous phase, 1% concentration of Alamine336 and activation ratio of H₂SO₄ 1:0.5.

Key words : molybdenum, super alloy, solvent extraction, Alamine336, Cyanex272

· Received : April 17, 2018 · Revised : June 11, 2018 · Accepted : July 2, 2018

§ Corresponding Author : Jong-Gwan Ahn (E-mail: dran@jwu.ac.kr)

Department of Renewable Energy & Resources, Jungwon University, 85 Munmu-ro, Goesan-eup, Goesan-gun, Chungbuk 28024, 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

Inconel713C에는 Cr 11~14 wt.%, Al 5~6 wt.%, Mo 4 wt.% 가량 함유되어 있으며(Table 1 참조)¹⁾, 그 중 Mo의 금속가격은 톤당 약 14,991 \$로 경제성이 우수한 금속이며 최근 들어 수입가격이 급상승하고 있는 실정으로 회수 가치가 높은 금속으로 알려져 있다^{2,3)}. 니켈계 내열합금 중 Inconel713C는 자동차나 발전소, 항공기 등 일반 산업용 고온 부품소재로 사용되며 최근에는 자동차 및 선박용 터보차저 정밀부품의 원료로 대량 사용되고 있다³⁾. 이에 사용되는 모합금 및 제품의 무역수지 적자는 연간 5억 달러 이상으로⁴⁾ 국내에서 발생하는 스크랩의 재자원화를 통한 합금 제조기술이 개발되면, 수입대체 효과와 소재로 사용되는 자동차, 선박 등 관련 산업에 파급되는 경제적 효과가 매우 클 것으로 사료된다. Mo이 사용되는 터보엔진이 주력인 자동차산업, 항공우주산업 그리고 미래첨단산업에서의 사용량 증가로 수요량이 증가하는 반해 공급이 불안정한 부적절한 시장구조를 가지고 있다⁵⁾. 그러므로 Mo이 함유된 순환자원으로부터 Mo를 효율적으로 회수하면 국내의 자원효율성과 자원수요의 공급경쟁력을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

Mo의 회수 연구는 폐촉매로부터 Mo와 V 등 회수 기술 연구는 2008년에 석유 폐촉매로부터 세척, 침전법 및 전기투석법을 사용하는 방법이 개발되었으나 상용화 연구는 미비하며 이때 제조된 Mo 화합물 순도는 92%이다⁶⁾. 이 공정은 순도가 제품기준 약 95% 이상에 미달하므로 고순도 공정이 필요한 문제점이 있다. 또한 강민우 등은⁷⁾ 탈황폐촉매의 소다침출액으로부터 용매추출법을 이용하여 V와 Mo를 선택적으로 회수하기 위해 추출제로는 Aliquat 336, 희석제로는 Exxol D80, modifier 로는 Octanol이 사용하고, 적정 pH 5에서 mixer & settler 적용 시 추출과 탈거에 각각 2단이 필요한 것으로 보고하고 있다. 이만승 등⁸⁾은 황산용액에서 Alamine336에 의한 용매추출로 Mo와 W를 분리하여 수상의 평형 pH가 3에서 5사이의 범위에서 낮은 농도의 아민에 의해 Mo이 선택적으로 추출되었으며 추

출제 혼합효과에 대해서도 고찰하였다. 또한 폐촉매를 침출한 산성용액으로부터 용매추출에 의해 Mo과 V을 회수하는 공정을 조사하여 폐촉매의 산성 침출액으로부터 Mo과 V을 분리 회수하는데 있어서 양이온과 중성의 혼합추출제가 가장 적합하다고 보고하고 있다⁹⁾. 기존의 연구에서 Mo 회수 연구의 대상은 폐촉매이며, 산 침출 후 용매추출공정으로 기타 불순물과의 분리를 행하는 것을 알 수 있다. 그러므로 본 연구에서도 국내에서 재활용을 행하지 않았던 니켈계 내열합금의 재활용을 위하여 니켈계 내열합금의 한 종류인 Inconel713C로부터 Mo을 회수하고자 기초연구를 용매추출 공정을 이용하여 수행하고자 하였다. Inconel713C를 침출한 용액 내에는 Mo이 4 wt.% 가량 함유되어 있고 또한 Ni이 다량으로 함유되어 있으므로 Mo만 선택적으로 회수하는 방법으로 용매추출공정을 수행하였다.

따라서 본 연구에서는 Mo이 2,000 ppm 함유된 모의 용액에서 용매추출공정을 이용하여 Mo을 회수하는 최적조건을 조사하였다. 실험은 수상의 평형 pH, 추출제의 종류 및 농도, 상비, H₂SO₄의 농도, Ni 불순물의 영향 조사를 통하여 Mo함유 황산용액으로부터 Mo 회수기술을 확립함으로써 Mo을 회수하는 기초연구를 진행하였다.

2. 실험방법 및 재료

추출제로부터 추출되는 목적추출종이 음이온으로 존재할 경우 음이온으로 하전되고 다른 음이온과 화학 당량적으로 교환되며, 추출제로는 알킬아민과 같은 음이온 교환제인 유기산이 사용된다. 예를 들어 Amine으로 식 (1) ~ (3)의 반응식에 나타내었다^{10,11)}.

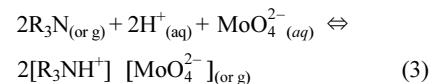
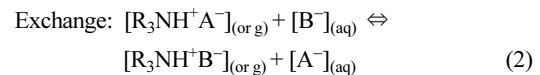


Table 1. Inconel713c ingredients analysis table¹⁾

Chemical composition of Inconel713C									
Element	C	Mn	S	Si	Cr	Mo	Ti	Al	Fe
Percentage (wt.%)	0.2	1	0.015	1	11~14	3.5~5.5	0.5~1	5.5~6.5	5

식 (1)은 음이온 추출제의 활성화처리 식을 도식화한 것으로 음이온 추출제 R₃N에 산 용액을 반응시켜 추출제의 끝단을 음이온 형태로 변형시킨다. 예를 들면 음이온 추출제 Alamine336을 황산을 사용하여 활성화하면 2[R₃N] + H₂SO₄ = 2[R₃NH⁺]SO₄²⁻으로 형성된다.

식 (2)는 활성화 후 음이온 추출제와 음이온으로 존재하는 금속이온간의 치환 반응을 나타내는 식이다. 이는 2[R₃NH⁺]SO₄²⁻ + MoO₄²⁻ = 2[R₃NH⁺]MoO₄²⁻ + SO₄²⁻으로 볼 수 있다.

식 (3)은 본 기초 연구에서의 화학반응식을 나타낸 것이다.

Mo 모의용액으로부터 용매추출을 통한 Mo 회수 기초연구를 위해 사용되어진 시약은 몰리브덴산나트륨(Na₂MoO₄·2H₂O)을 사용하였고, 수상에 존재하는 Mo를 유기상으로 추출하기 위해서 음이온추출제인 Alamine336과 양이온추출제인 Cyanex272를 사용하였다. 추출제와 등유(Kerosene)를 혼합하여 희석한 후 용매추출 실험을 진행하였고, 실험에 사용된 시약들은 Table 2에 나타내었다. Sodium molybdate dihydrate(Na₂MoO₄·2H₂O)를 사용하여 Inconel713C 모사용액을 제조하기 위해 Na₂MoO₄·2H₂O 시약을 Mo의 분자량 비례식을 통해 (Na₂MoO₄·2H₂O 241.95 g/mol, Mo 95.96 g/mol) Na₂MoO₄·2H₂O 10.0812 g 계산하여 1 L의 증류수에 용해시켜 Mo 4,000 ppm 모사용액을 제조하였다. 그 후 2,000 ppm으로 희석하여 실험을 시행하였다. 평형 pH조절은 산 용액(H₂SO₄)과 염기 용액(NaOH)을 사용하여 조절하였다. 본 실험에서는 수상에 함유된 금속이온을 추출제를 사용하여 추출하는 용매추출방법을 사용하였고 수상과 유기상의 분리를 위해 100 mL 분액깔매기를 사용하였으며, 용매추출공정도와 실험 장치는 Fig. 1에 나타내었다. Mo의 추출실험을 진행하기에 앞서 추출제에 따른 Mo의 추출거동을 알아보

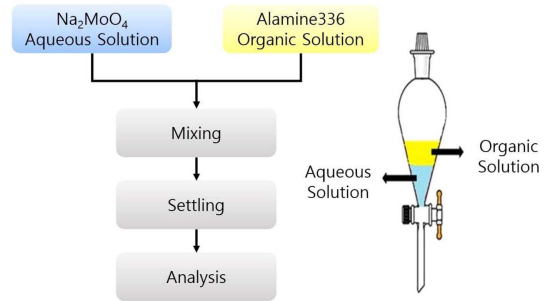


Fig. 1. The flow chart and separatory funnel of solvent extraction of Mo.

기 위하여 Alamine336과 Cyanex272를 사용하였다. 제조된 수상과 추출제를 10분간 반응시킨 후 용액을 3시간 상온에서 정치하고, 수상에서 유기상으로 추출된 Mo 농도는 ICP 기기를 통하여 분석하였다. 또한 수상에서 유기상으로 이동한 Mo의 추출률은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$D = 100 - \left(\frac{\text{수상에 잔류한 Mo 농도}}{\text{수상 중 Mo 농도}} \times 100 \right) \quad (4)$$

3. 결과 및 검토

3.1. 추출제의 영향

Mo를 추출하는 최적추출제를 알아보기 위해 추출제의 종류에 따른 수상의 평형 pH와 추출제의 농도를 변화하여 Mo의 추출 거동을 조사하였다. 실험은 수상의 평형 pH를 1, 7, 13으로 조절하였으며, 유기상은 추출제 Alamine336과 Cyanex272를 kerosene으로 각각 1% 농도로 조절하여 유기상을 제조하였으며, 추출제의 농도는 0.5%에서 4%까지 변화시켜 실험을 진행하였다.

Table 2. Chemicals in Experiment

Trade Name	Chemical Formula	Molecular Weight(mass)	Purification(%)	Product company
Sodium molybdate dihydrate	Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	241.95 g/mol	99.5	Junsei Co. (Japan)
Nickel chloride	NiCl ₂ ·6H ₂ O	237.7 g/mol	99.9	Junsei Co. (Japan)
Alamine336	C ₂₄ H ₅₁ N	353.171 g/mol	99.9	Henkel Co.
Cyanex272	C ₁₆ H ₃₅ O ₂ P	322.43 g/mol	99.9	Henkel Co.
Sulfuric acid	H ₂ SO ₄	98.056 g/mol	99.9	Junsei Co. (Japan)
Sodium hydroxide	NaOH	40 g/mol	99.9	Junsei Co. (Japan)

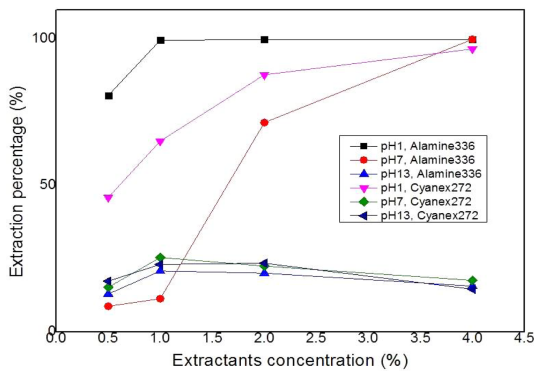


Fig. 2. Extraction percentage of Mo by the kinds of extractants and pH of aqueous solution.

실험 조건은 수상과 유기상의 비율은 1 : 1, 반응시간은 10분간 교반하고, 3시간 이상 상온에서 정치하여 유기상과 수상을 분리하였다. Alamine336을 이용한 용매추출 실험의 경우는 Alamine336과 황산을 10분간 교반하는 활성화 전처리(Activation process)를 행하여 실험에 사용하였다. Fig. 2에 추출제의 영향에 따른 Mo 추출을 실험 결과를 나타내었다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 추출제 Alamine336을 사용하였을 때 평형 pH 1 인 조건에서 추출제 농도가 1% 이상일 때 99% 이상 추출되었으며 Cyanex272는 평형 pH 1이면서 추출제의 농도가 4%인 경우에만 95% 이상의 추출률을 보여 Alamine336에 비해 상대적으로 추출 효율이 낮음을 확인할 수 있었다. 이러한 이유는 Zheng 등^{12,13}의 연구 보고서에서 나타난 바와 같이 Mo의 이온 종은 평형 pH 1 ~ 6에서 MoO_4^{2-} 등과 같은 음이온으로 존재하며, 또한 Nekovar 등¹⁴은 수용액 중에서 MoO_4^{2-} 는 수소이온과 결합하여 다양한 Mo 수산화 음이온 종을 형성한다고 보고하고 있다. 이상의 연구 결과에 따라 본 실험 조건에서 Mo은 음이온으로 존재한다고 생각할 수 있으며, 이에 따라 음이온 추출제인 Alamine336의 추출률이 양이온 추출제보다 높게 나오는 결과를 확인할 수 있었다.

3.2. 평형 평형 pH의 영향

추출제의 영향에 따른 Mo 추출거동 결과를 통해 1% Alamine336 및 수상의 평형 pH가 1인 경우에 Mo의 추출률이 약 99% 이상으로 추출됨을 확인할 수 있었다. 그러므로 수용액의 평형 pH의 최적 조건을 알아보기 위해 수상의 평형 pH를 변화시키면서 용매추출 실험을 진행하였다.

수상의 평형 pH는 0, 2, 4로 조절하였으며, 유기상은 음이온 추출제인 Alamine336을 1% 희석용액을 Alamine336 : H_2SO_4 , 1 : 2 비율로 황산화 처리하여 사용하였다. 평형 pH를 조절한 수상 30 mL와 추출제 1% Alamine336 30 mL를 반응시킨 후 상온에서 3시간 이상 정치시켜 수상과 유기상을 분리하고 수상의 금속이온을 ICP로 분석하였다. 이때의 Mo의 추출률 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 실험결과, 평형 pH가 0인 경우 추출률이 약 88%, 평형 pH 2 이상에서 약 99% 이상의 추출률을 보였다. 따라서 평형 pH 1 이상인 경우에 Alamine336 1%를 사용하면 Mo의 추출률이 99% 이상의 회수율을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 평형 pH 0에서 추출률이 감소하는 이유는 Mo의 Eh-평형 pH diagram에서 낮은 평형 pH영역에서

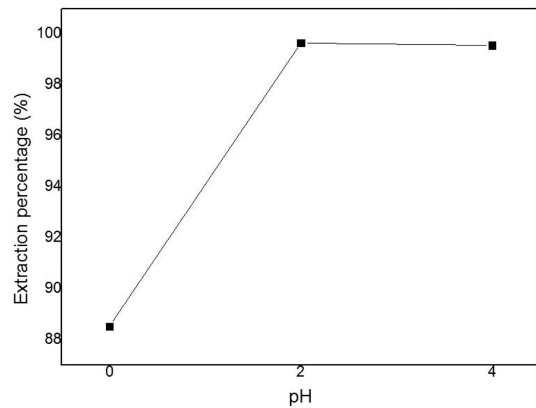


Fig. 3. The effect of pH on the extraction percentage of Mo in aqueous solution.

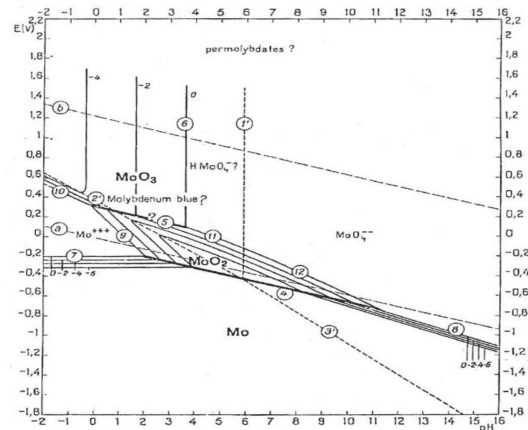
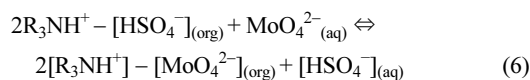
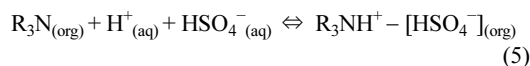


Fig. 4. The Eh-pH diagram of Mo in water.

Mo이온의 일부가 양이온으로 존재하기 때문에 사료된다.

3.3. 추출제 전처리 농도의 영향

Mo은 수용액 상에서 MoO_4^{2-} 음이온을 형성하고 이러한 음이온을 Alamine336과 같은 음이온 추출제가 추출하기 위해서는 식 (5)와 같이 추출제를 황산이온에 처리시키는 활성화 전처리 과정이 필요하다¹⁵⁾. 유기상의 활성화처리는 식 (5)와 (6)에 나타난 바와 같이 황산 음이온과 Mo 음이온과의 치환반응을 통해 Mo을 선택적으로 추출할 수 있다. 그러므로 추출제의 활성화처리 시 H_2SO_4 농도가 미치는 영향을 알아보고자 Alamine336 : H_2SO_4 의 반응비를 1 : 0.5, 1 : 1, 1 : 4로 변화시키며 실험을 진행하였으며 그 실험결과를 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, H_2SO_4 의 비율이 1 : 0.5 및 1 : 1인 경우에는 Mo의 추출률이 99% 이상으로 나타났으나 1 : 4인 경우에는 약 68%로 낮아짐을 알 수 있다. 즉 활성화처리 시 H_2SO_4 의 비율이 높은 경우 추출률이 감소함을 알 수 있었다. 고농도의 황산용액으로 활성화처리 시 유기상에 흡착된 황산이 다량 수상과 반응하여 수상의 평형 pH가 낮아지고 이로 인해 Mo의 화학종이 MoO^{2+} 와 같은 이온종이 형성되어¹⁶⁾ 음이온 추출제인 Alamine336의 추출효과가 낮아지는 것으로 사료된다. 추가적으로 강산 영역에서는 황산의 용해도에 따라서 앞단에 주어진 (3)번과 같은 화학반응이 일어나지만 평형 pH가 1~3 사이에서는 아래 식 (5)와 (6)과 같이 HSO_4^- 이온으로 활성화 반응을 할 것으로 판단할 수 있다.



수상의 평형 pH가 0인 경우에 활성화 전처리 시 황산비를 변화에 따른 Mo의 추출률 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 5와 Fig. 6을 비교하여 보면, 황산 전처리 농도가 증가함에 따라 큰 폭으로 추출률의 감소가 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 수상의 평형 pH가 낮아질 때 추출률 감소를 확인할 수 있었다. 또한 활성화 전처리를 하지 않은 1% Alamine336 유기상과 평형 pH 1인 수상을 반응시켜 추출 실험한 결과, Mo 추출률은 약 19.7%로 나타내었다. 그러므로 Mo 용매추출

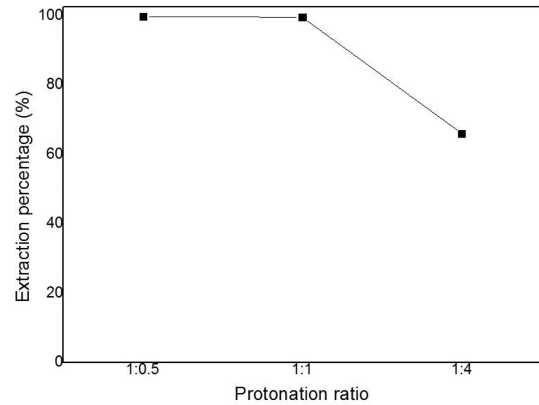


Fig. 5. Extraction percentage of Mo by H_2SO_4 Activation ratio. (pH 1, 1% Alamine336 and ratio of O/A 1 : 1)

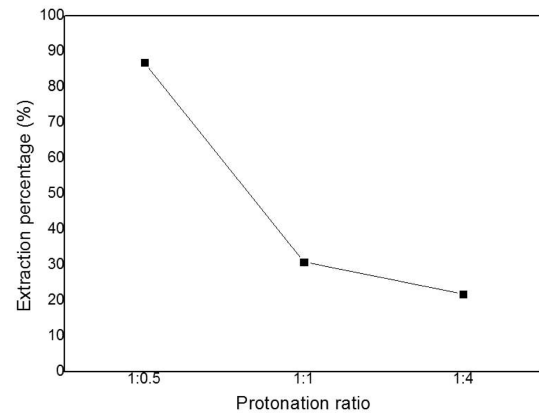


Fig. 6. Extraction percentage change by Activation ratio (pH 0, Alamine336 1% O/A ratio 1 : 1)

시 추출률에 미치는 활성화 전처리의 영향은 매우 크다는 것을 확인하였다.

3.4. 추출제 농도의 영향

반응식 (3)에 따라 Mo 추출반응에서 추출제 농도에 따라 Mo의 추출률이 변화함을 예상할 수 있다. 그러므로 최적의 추출제 농도를 알아보기 위해 추출제 Alamine336의 농도를 변화하여 실험을 수행하고 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Alamine336의 농도를 0.5, 0.8, 1, 2, 4%로 변화시켜 kerosene과 혼합하여 유기상으로 사용하였다. 수상의 평형 pH는 H_2SO_4 와 NaOH를 사용하여 1로 조절하였고, Activation ratio 1 : 2 및 O/A ratio 1 : 1로 하여 실험을 진행하였다. 실험결과는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 0.8%의 Alamine336의 경

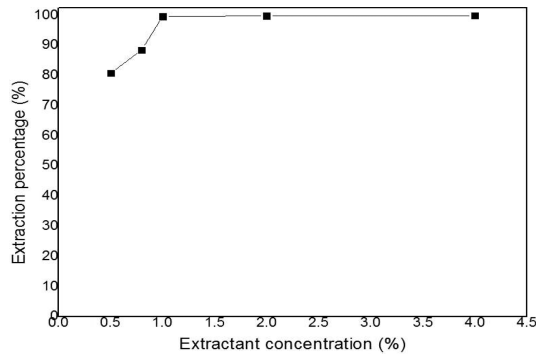


Fig. 7. The effect of extractant concentration on extraction percentage of Mo. (pH 1, 1% Alamine336 and ratio of O/A 1 : 1)

우 약 88%의 추출률을 나타내어 0.5%의 조건보다 상승하였으나, 99% 이상의 추출률을 얻기 위해서는 Alamine336을 1% 이상으로 조절하여 사용하여야 한다는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 실험조건에서 Mo 용매추출 최적조건은 평형 pH 1, 1% Alamine336 및 황산 활성화처리 비 1:0.5인 경우임을 확인할 수 있었다.

3.5. Ni 첨가의 영향

Inconel713C 합금에서 70 wt.% 이상을 차지하는 Ni 을 수용액에 첨가하여 Ni 첨가 시 혼합수용액 상에서의 Mo 분리회수를 실험하였다. 실험조건은 Ni은 침출 용액 상에서 70 wt.%(70,000 ppm)이지만, Mo(4 wt.%, 4,000 ppm)을 1/2으로 비율을 낮추어 실험하였기 때문

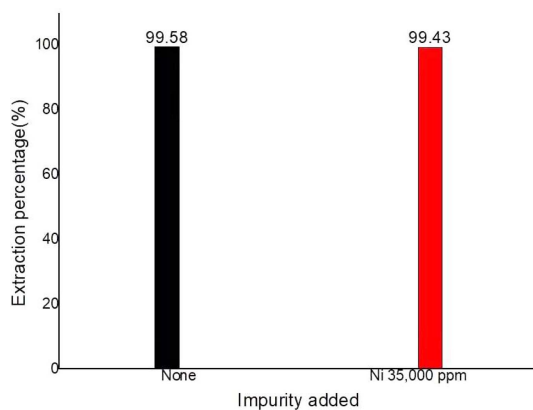


Fig. 8. The effect of Ni added on extraction percentage of Mo.

에 Ni 역시 같은 조건으로 실험을 진행하였다. 실험 후 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 불순물 실험의 결과는 Ni 이 35,000 ppm 첨가되었음에도 Mo은 약 99%의 추출률을 보였으며 Ni의 영향을 거의 받지 않음을 알 수 있었다.

4. 결 론

Inconel713C 모사용액으로부터 Mo 회수를 위해 용매 추출공정 기초실험을 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Mo이 함유된 수상과 1% Alamine336 및 4% Cyanex272 유기상과의 용매추출 결과 각각 99% 및 96%의 추출률을 나타내어, 음이온 추출제인 Alamine336의 Mo 추출률이 높음을 확인하였다.
2. Alamine336을 이용하여 수상의 평형 pH가 0일 때 88%, 평형 pH가 1 이상인 경우 99%의 Mo 추출률을 보여 최적 평형 pH조건은 1 이상인 경우이며, 활성화처리 시 H₂SO₄의 비율이 증가할수록 추출률은 감소하였다.
3. 추출제인 Alamine336의 농도 실험결과, 농도가 증가할수록 추출률은 증가하며 1% Alamine336 이상에서 추출률이 약 99%로 나타내었다.
4. Mo 2,000 ppm 용액에 불순물 Ni 35,000 ppm을 첨가하여 실험한 결과, 99.4%의 추출률을 보임으로써 Mo의 추출에는 Ni의 영향이 거의 없음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 산업자원통상부 에너지기술평가원에서 수행하는 산업기술혁신사업의 일환으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

1. All Metals & Forge Group webpage, 2018 : <http://www.steelforge.com/>.
2. KORES webpage, 2017 : <https://m.kores.net/mobile/mprice/mbasemetal>.
3. KIMM, 2009 : MaterALL, pp.343-350.
4. KITA, 2015 : Trade trends of Ni alloy, <https://unipass.customs.go.kr:38030/ets/>.
5. Kyoungho, P. and Jeungsu, S., 2010 : Application and understanding of Ni, Steel & metal news.

6. Wonguen, L. and Bumrae, C. 2017 : Eco-friendly hydro-metallurgy process for the recovery of Mo from spent petroleum catalyst. KR. Patent No. 101727891B1.
7. Minwoo, K., 2011 : Master thesis, Selective recovery of V, Mo by solvent extraction from sodium leaching solution of spent DSC, Korea Univ., pp.10-15.
8. Nguyen, Hong Thi, and Lee, Man Seung, 2013 : Recovery of Molybdenum and Vanadium from Acidic Leaching Solution of Spent Catalysts by Solvent Extraction, J. the Korean Inst. of Resources Recycling, 22(4), pp.3-11.
9. Nguyen, Thi Hong and Lee, Man Seung, 2016 : Separation of Molybdenum and Tungsten from Sulfuric acid Solution by Solvent Extraction with Alamine336, J. the Korean Inst. of Resources Recycling, 25(1), pp.16-23.
10. Valverde Jr, I. M., Paulino, J. F., and Afonso, J. C., 2008 : Hydrometallurgy route to recover molybdenum, nickel, cobalt and aluminum from spent hydrotreating catalysts in sulphuric acid medium, J. Hazad. Mater., 160, pp.310-317.
11. Parhi, P. K., Park, K. H., Kim, H. I., and Park, J. T., 2011 : Recovery of molybdenum from the sea nodule leach liquor by solvent extraction using Alamine 304-I, Hydrometallurgy, 105, pp.195-200.
12. Zeng, L. and Cheng, C. Y., 2009 : A literature review of the recovery of molybdenum and vanadium from spent hydrodesulphurisation catalyst. Part I: Metallurgical processes, Hydrometallurgy, 98, pp.1-9.
13. Zeng, L. and Cheng, C. Y., 2009 : A literature review of the recovery of molybdenum and vanadium from spent hydrodesulphurisation catalysts Part II: Separation and purification and references within, Hydrometallurgy, 98, pp.10-20.
14. Nekovar, P. and Schrotterova, D., 2000 : Extraction of V(V), Mo(VI) and W(VI) polynuclear species by JMT, Chem. Eng. J., 79, pp.229-233.
15. Jonggwan A. and Heekeong J., 2015 : Solvent Extraction Separation of Re (VI) from Hydrochloric Acid Leaching Solution of Spent Super Alloy by Alamine 304-1, J. the Korean Inst. of Resources Recycling, 24(5), pp.56-62.
16. Mishra, D., Chaudhury, G. R., Kim, D. J., and Ahn, J. G., 2010 : Recovery of metal values from spent petroleum catalyst using leaching-solvent extraction technique, Hydrometallurgy, 101, pp.35-40.

박 상 렬

- 2017년 중원대학교 자원순환환경공학과 학사
 - 현재 성일하이텍(주) 기술연구소
-

안 종 관

- 1996년 고려대학교 화학금속 박사
 - 2011년 한국지질자원연구원 책임연구원
 - 현재 중원대학교 신재생에너지지원학과 교수
-