

鹽酸에 의한 CMSX-4 超耐熱合金의 浸出[†]

金珉奭* · [‡]李在天* · 金銀暎* · 柳泳守**

*韓國地質資源研究院 礦物資源研究本部 金屬回收研究室, **韓國機械研究院 附設 材料研究所 耐熱材料研究二팀

Leaching of CMSX-4 Superalloy in Hydrochloric Acid Solutions[†]

Min-seuk Kim*, [‡]Jae-chun Lee*, Eun-young Kim* and Young-soo Yoo**

*Mineral Resource Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources,
Gwahang-no 92, Yuseong-gu, Daejeon, 305-350, Korea

**High Temperature Materials Group, Korea Institute of Materials Science,
66 Sangnam-dong, Changwon, Kyungsangnam-Do, 641-010, Korea

요 약

CMSX-4 초내열합금의 순환활용을 위한 습식제련기술 개발의 일환으로 염산에서의 니켈, 코발트, 크롬, 알루미늄 등 주요 구성 금속성분들의 침출 특성을 조사하였다. 염산농도에 따른 합금시료 내 주요 금속성분들의 침출율은 염산농도가 높아짐에 따라 증가 하였으나, 3 M 이상에서는 둔화되었다. 염산농도 4 M, 고액비 10 g/L, 침출시간 60 분 조건에서 침출온도가 높아짐에 따라 침출율은 급격히 증가하였으며, 90 °C에서 니켈 93.2 %, 알루미늄 89.9 %, 코발트 80.4 %, 크롬 79.1 %의 침출율을 나타내었다. 한편 침출 초기에는 니켈과 알루미늄의 침출속도가 빠르고 60 분 이후 급격히 둔화되는 형태를 보인 반면 코발트와 크롬은 침출이 느리고 60 분 이후의 감소율만 상대적으로 적었다. 120 분 경과 시 주요 금속원소들의 침출율은 모두 99 % 수준에 도달하였다. 고액비가 높아지면 침출율은 서서히 감소하였으며, 니켈과 알루미늄이 코발트와 크롬에 비하여 침출을 감소가 적었다. 염산농도 4 M, 침출온도 90 °C, 침출시간 120 분의 조건에서 고액비 125 g/L 이하의 조건이 주요 금속 성분의 침출에 효과적임을 확인하였으며, 이는 CMSX-4 합금의 금속학적 조직구조와 관련이 있는 것으로 생각된다.

주제어 : 초내열합금, CMSX-4, 염산, 침출

Abstract

Leaching of CMSX-4 superalloy was done in hydrochloric acid solutions. The leaching behaviors of main alloy components, such as Ni, Co, Cr, Al, was investigated by controlling acid concentration, temperature, leaching time and pulp density. Increasing acid concentration enhanced the leaching rate till the rate decreased over 3 M acid concentration. Raising temperature increased the leaching amount of the metal components. After the leaching for 60 minutes at 90 °C and 10 g/L pulp density in 4 M acid solution, 93.2 % nickel, 89.9 % aluminum, 80.4 % cobalt, and 79.1 % chromium were leached. Nickel and aluminum were preferentially leached out, while the leaching rate of cobalt and chromium were relatively high only after 60 minutes. Increasing pulp density lowered the leaching rate and especially serious on cobalt and chromium. The optimum leaching condition for CMSX-4 was obtained at 90 °C, 120 minutes, and less than 125 g/L in 4 M hydrochloric acid solution.

Key words : superalloy, CMSX-4, hydrochloric acid, leaching

1. 서 론

초내열합금은 일반구조재료가 견디기 어려운 극한환경에서 널리 사용되는 재료로서 1000 °C가 넘는 작동

[†] 2010년 7월 16일 접수, 2010년 9월 2일 1차수정

2010년 9월 27일 수리

* E-mail: jcllee@kigam.re.kr

온도에서도 기계적, 화학적 파괴나 침식 없이 사용될 수 있어야 한다. 초내열합금은 주성분에 따라서 크게 Co기, Fe기, Ni기 등으로 구분할 수 있다. 특히 Ni기 초내열합금은 항공기의 가스터빈엔진에서 고온/고응력에 노출되는 터빈블레이드에 사용되는 대표적인 것으로 니켈기지에 Al, Cr, Co, W, Ta 등의 원소들이 적절히 혼합된 합금이다.¹⁾ Ni기 초내열합금은 2차대전 당시 개발이 시작되었으며, 초기의 초내열합금으로는 Nimonic 시리즈가 대표적이다. 이후 끊임없는 성능향상을 통해 단결정합금을 제조하기에 이르렀고 Re의 함량에 따라 첨가되지 않은 1세대 합금, 무게비로 3% 함유한 2세대 합금, 그리고 6% 함유한 3세대 합금으로 구분하고 있다. 대표적인 Ni기 단결정 초내열합금은 Cannon-Muskegon사에서 개발한 CMX 시리즈가 유명하며, 제2세대 합금인 CMSX-4는 Table 1과 같은 조성을 가지고 있다.¹⁾

이와 같이 기지성분 뿐만 아니라 합금원소들도 회유금속으로 구성되어 있는 CMSX-4 합금은 고가일 뿐만 아니라 이의 제조를 위한 금속자원의 확보가 용이하지 않으므로 이들의 스크랩을 순환활용하는 것은 필수적이다. 초내열합금의 순환활용은 i) 합금을 재용해(remelting)²⁾하여 사용하거나, ii) 합금으로부터 유가금속들을 추출, 분리, 회수하여 산업소재원료로 순환활용하는 방법들이 있다. 합금을 재용해하여 순환활용하는 방식은 비행기와 같은 매우 엄격한 물성치를 충족시켜야 하는 응용분야에서는 제한적인 수밖에 없으며, 합금으로부터 유가금속들을 추출, 분리, 정제하는 방식이 일반적이다.

스크랩으로부터 유가금속을 회수하기 위한 첫 단계는 침출단계로서 통상의 산을 이용한 침출 또는 전기를 인가하여 용해시키는 전해침출 등이 시도되고 있다. 특히 침출과정에서 용해속도를 향상시키기 위하여 물리적인 방법으로 스크랩을 파분쇄하거나 산화시켜 미립자로 분쇄하는 방법, 파분쇄 및 용해가 용이한 Al, Zn 등과 금속간 화합물, 또는 용해가 용이한 금속염을 만들어 처리하는 등 다양한 방식이 개발되었다.³⁻⁵⁾ 그러나 CMSX-4의 경우 기지금속 외에 9가지에 달하는 다양한 회유금속을 효율적으로 용해시키는 침출방식은 아직 연구가 필요한 부분이다.

본 연구에서는 CMSX-4 초내열합금의 순환활용을 위

한 습식제련기술 개발의 일환으로 초내열합금에 대한 성분원소별 선택적 침출 기술 개발을 위한 첫 단계로서 염산에서의 주요 구성금속성분들의 침출 특성을 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1. 침출 시료

본 연구에서는 상용의 CMSX-4 초내열합금을 시료로 사용하였으며, 벌크형태의 합금을 칩(chip) 형태로 가공하여 침출용 시료로 사용하였다(Fig. 1). 화학조성은 Table 1에 나타낸 바 있으며, 기지금속으로 니켈(Ni)이 60.8% 정도 함유되어 있으며, 산 침출이 가능한 주된 합금원소로 코발트(Co), 알루미늄(Al), 크롬(Cr) 등이 있다. 칩 형태로 가공된 시료는 에탄올과 초순수에서 각각 15 분간 초음파 세척 후 80°C에서 건조하여 침출 실험에 사용하였다.

2.2. 산 침출실험

산 침출실험은 워터자켓이 달린 2L 반응조를 사용하여 수행하였으며, 항온조를 사용하여 침출액의 온도를 일정하게 조절하였다. 먼저 산농도가 조절된 침출액 1L를 반응조에 투입하고 가열하였다. 용액온도가 미리 설정한 침출온도에 도달하면 준비된 침출시료를 장입하고 교반을 시작하였다. 일정시간 간격으로 침출용액을 채

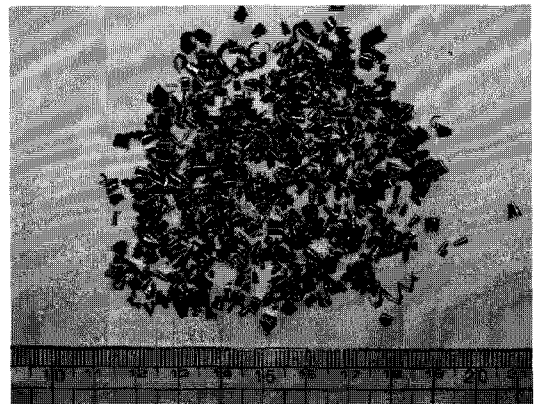


Fig. 1. The chipped CMSX-4 superalloy sample for leaching.

Table 1. Chemical composition of CMSX-4 superalloy

Element	Co	Ta	Cr	W	Al	Re	Ti	Mo	Hf	Ni
wt.%	9.6	6.5	6.4	6.4	5.7	2.9	1.0	0.6	0.1	bal.

취하여 용해 금속 성분의 정량 분석을 행하였으며, 이로부터 침출율을 계산하였다. 침출에는 염산, 황산, 질산을 사용하였으며, 이들 중 침출율이 가장 우수한 산을 선택하여 산농도, 침출온도, 침출시간, 고액비 등을 변화시키면서 침출 반응을 관찰하였다. 실험조건은 산농도; 1.0~6.0 M, 침출시간; 0~120 분, 침출온도; 25~90 °C, 고액비; 5~200 g/L 이었다.

2.3. 침출용액의 분석

침출 시 일정 시간간격으로 채취된 시료 용액 내 주요금속성분의 함량은 시료 용액을 5% 염산용액으로 희석한 후 유도결합 플라즈마 분광 분석법 (Inductively coupled plasma (ICP) spectrometry, Jobin Yvon, JY 38plus)으로 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 산 종류의 영향

CMSX-4 합금시료 용해에 효율적인 침출제를 선정하기 위하여 염산(HCl), 황산(H₂SO₄), 질산(HNO₃)을 사용하여 침출실험을 행하였다. 침출 조건은 산 농도; 6 N, 침출온도; 90 °C, 침출시간; 60 분, 고액비; 10 g/L 이었다. Fig. 2에서 보는바와 같이 동일한 침출조건에서 주요 금속 성분의 침출율 순서는 염산 > 황산 >> 질산 순이었다. 산 용액 내의 수소이온이 수소기체로 환원될

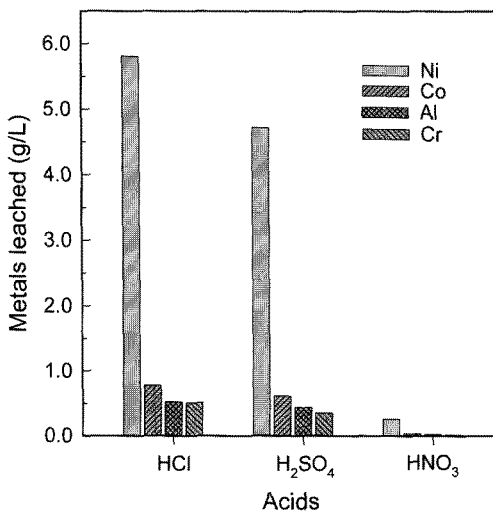


Fig. 2. CMSX-4 leaching in various acid solutions (acid concentration; 6 N, temperature; 90 °C, leaching time; 60 min., pulp density; 10 g/L).

때 필요한 전자를 금속으로부터 빼앗는 반응에 의해 침출이 일어나는 염산과 황산에 비해 금속의 용해 반응이 이들 산과는 상이하게 질산은 Ni의 3% 정도 외엔 침출이 거의 일어나지 않았다. 질산의 경우 발생기산소의 생성과 이에 의한 금속의 산화물 형성이 일어나는데 이러한 산화물의 생성이 낮은 침출율과 연관이 있는 것으로 생각된다. 본 연구에서는 산 종류에 따른 침출결과를 바탕으로 침출율이 가장 높은 염산을 침출제로 선정하였다.

3.2. 염산에 의한 침출

Fig. 3은 염산농도에 따른 합금시료 내 주요 금속성분들의 침출율 변화를 나타낸 것이다. 침출조건은 염산농도; 1.0~6.0 M, 침출온도; 90 °C, 침출시간; 60 분, 고액비; 10 g/L 이었다. 그림에서 보는바와 같이 염산농도가 증가함에 따라 Ni, Co, Al, Cr 등 주요 금속성분들의 침출율은 증가하였다. 염산농도 2 M 이하에서는 염산 농도 증가에 따른 침출율의 향상이 뚜렷하였으나 3 M 이상에서는 둔화되었다. 한편 염산농도 3 M 이상에서 Ni와 Al은 90% 이상, Co와 Cr은 80% 정도의 침출율을 나타내었다. 모든 농도의 염산에서 Ni의 침출율이 가장 높았으며, 모든 농도에서 Ni과 비교하여 Al은 약 3.5%, Co는 약 12%, Cr은 약 14% 정도 낮은 침출율을 나타내었다. 염산농도 4 M에서 주요 금속성분들의 침출율은 Ni; 93.2%, Al; 89.9%, Co; 80.4%, Cr; 79.1%이었다.

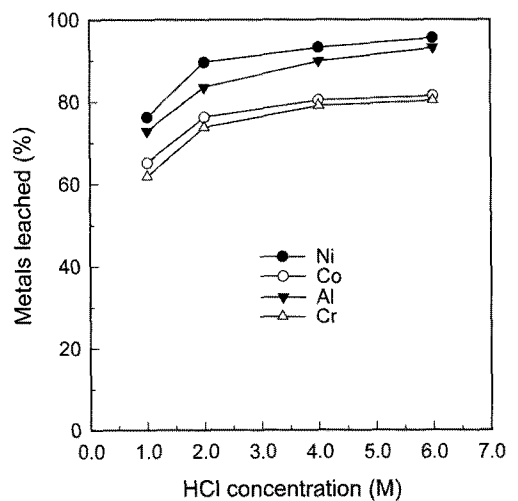


Fig. 3. The effect of hydrochloric acid concentration on CMSX-4 leaching (temperature; 90 °C, leaching time; 60 min., pulp density; 10 g/L).

Fig. 4는 침출온도에 따른 침출율의 변화를 나타낸 것이다. 침출조건은 염산농도; 4 M, 침출시간; 60 분, 고액비; 10 g/L 이었다. 침출온도가 증가함에 따라 모든 금속 성분들의 침출율이 급격히 증가하였다. 50°C에서 Ni, Co, Al, Cr의 침출율은 각각 4.1 %, 3.1 %, 4.6 %, 2.2 %에 불과하였으나, 침출온도가 높아짐에 따라 침출율이 급격히 증가하여 90 °C에서는 Ni; 93.2 %, Al; 89.9 %, Co; 80.4 %, Cr; 79.1 %를 나타내었다. 한편 75 °C에서 Ni의 침출율은 Al보다 2.3 % 낮았고 온도가 90 °C로 높아짐에 따라 3.3 % 높아졌으나 전체적으로 Ni과 Al은 유사한 침출거동을 나타내었다. 이에 비하여 Co는 온도에 관계없이 Cr 보다 1.3 % 정도 높은 침출율을 나타내었으며, Fig. 3에서와 유사하게 두 금속은 Ni과 Al에 비하여는 10 % 전후 정도의 낮은 침출율을 나타내었다.

Fig. 5는 침출율이 가장 높게 나타난 염산농도; 4 M, 침출온도; 90 °C, 고액비; 10 g/L에서 침출시간에 따른 주요 금속원소들의 침출율을 나타낸 것이다. 초기 60 분 동안 침출시간이 증가함에 따라 침출율이 급격히 증가하다가 60 분 이상에서는 증가율이 둔화되었다. Fig. 3, 4의 결과와 마찬가지로 Ni와 Al의 침출율이 전반적으로 Co와 Cr보다 높았다. Ni은 침출 30분까지는 Al보다 1.3 % 정도 낮은 침출율을 나타내었고 이후 높아졌으나 120 분 경과 시 다시 Al 보다 약간 낮아졌다. 한편 Co는 산의 농도와 침출온도 실험결과보다는 뚜렷하지 않지만 전반적으로 Cr보다 미세하게 높은 침출율을

나타내었다. 침출 초기에는 Ni과 Al이 Co와 Cr보다 침출속도가 빨랐으며 60 분경과 시 90 % 이상의 침출율을 보이고 이후 침출속도가 다소 둔화되었다. 한편 Co와 Cr은 99 % 전후의 침출율을 나타내는 120 분에 도달할 때까지 Ni과 Al에 비하여 상대적으로 낮은 침출율을 보였다. 120 분 경과 시 금속원소들의 침출율은 모두 99 % 수준에 도달하였으며, 금속원소들의 침출율은 Ni; 98.6 %, Co; 99 %, Al; 100 %, Cr; 98.4 % 이었다.

염산에서의 금속의 용해는 일반적으로 수소이온이 침출대상금속으로부터 전자를 얻어 수소기체로 환원되고 이에 따라 산화된 금속은 이온상태로 용액으로 용해되게 된다. Ni, Co, Cr, Al 등의 금속은 식 (1)~(5)에서 나타낸 바와 같이 모두 전극전위⁶⁾가 수소발생반응보다 낮다. 전극전위 값에 따라 염산에 의한 용해 반응이 영향을 받는다면, 식 (1)~(5)에서 나타낸 바와 같이 전극전위가 낮은 Al, Cr, Co, Ni 순으로 침출이 잘 일어날 것으로 예상된다.

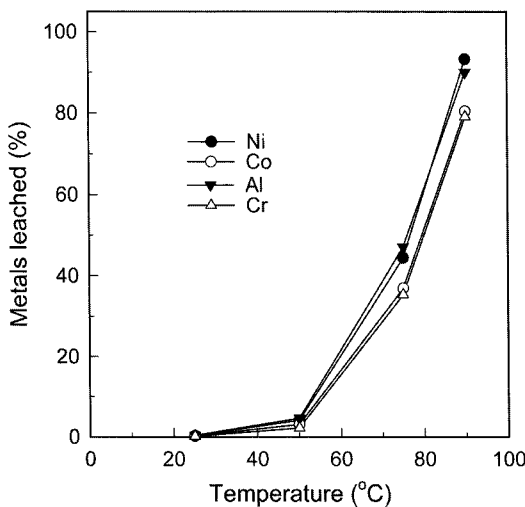
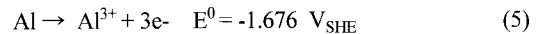
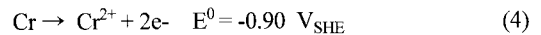
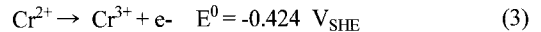
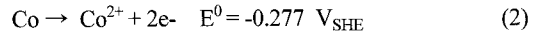
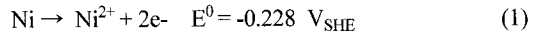


Fig. 4. The effect of temperature on CMSX-4 leaching (hydrochloric acid concentration; 4 M, leaching time; 60 min., pulp density; 10 g/L).

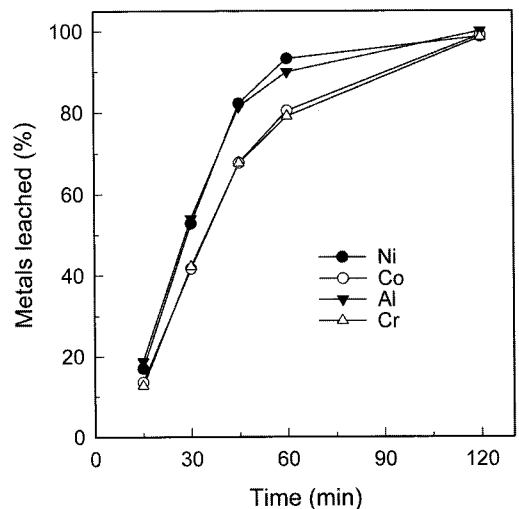


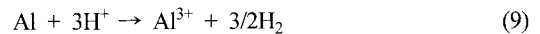
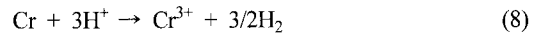
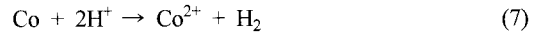
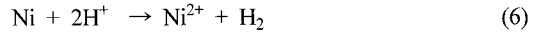
Fig. 5. The effect of leaching time on CMSX-4 leaching (hydrochloric acid concentration; 4 M, temperature; 90 °C, leaching time; 60 min., pulp density; 10 g/L).

그러나 Fig. 2~5의 실험결과에서는 산 농도, 침출시간, 침출온도 등의 침출조건에 관계없이 Ni와 Al이 Co와 Cr보다 전반적으로 높은 침출율을 나타내었다. 실험 조건에 상관없이 Ni와 Al이 Co와 Cr에 비하여 높은 침출율을 나타낸 것은 이러한 개별 금속의 전극전위 값의 차이보다는 다른 원인이 지배적인 것임을 의미한다. Ni가 초내열합금은 FCC Y 기지에 Ni₃Al 구조의 Y'을 약 60% 이상 함유하고 있는데, 일반적으로 입방형의 Y'이 Y 모상에 3차원적으로 배열된 모습을 하는 것으로 알려져 있다.^{1,7)} 한편 Co와 Cr은 주로 FCC 기지에 분배되어 있는 것으로 보고되고 있다.^{1,7)} Ursula 등에⁷⁾ 의하면 합금 내 Al, Co, Cr 등의 at.% 함량이 각각 13.7, 9.80, 7.3이고, Y와 Y' 상에의 분배는 덴드라이트 조직 부분을 기준으로 Y 상이 Al 2.4 at.%, Co 21.1 at.%, Cr 22.9 at.%, Y' 상이 Al 16.4 at.%, Co 6.5 at.%, Cr 2.7 at.%로 보고된 바 있다. 침출 시 Ni와 Al이 Co와 Cr에 비하여 보다 높은 침출율을 나타내는 것은 Ni와 Al이 집중 분포하는 Y' 상의 용해 속도가 Co와 Cr가 농축된 상에 비하여 빠르다는 것을 의미한다. Co와 Cr이 주로 분포하는 기지인 Y 상과 Al이 집중된 Y' 상 사이에 용해 시 일어나는 상호작용은 현 단계로는 명확히 알 수 없으나 한 가지 가능성은 이상(二相) 사이에 갈바닉셀⁸⁾이 형성되고 이로 인해 Y'의 용해가 상대적으로 활발해지는 것이다.

한편 침출 시 고액비가 높아지면 한번에 처리할 수 있는 시료의 양이 많아져 그만큼 시간과 에너지소모 측면에서 유리하다. Fig. 6은 염산농도; 4 M, 침출온도; 90 °C, 침출시간; 120 분에서 염산침출을 최적화하기 위하여 고액비를 10~200 g/L로 변화시키면서 침출을 행한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는데와 같이 고액비가 증가함에 따라 금속원소들의 침출율은 서서히 감소하였다. 고액비의 증가에 따른 침출거동의 변화는 크게 세 가지 영역으로 구분할 수 있다. 침출율의 감소가 Ni, Al, Co, Cr 순서로 증가하는 고액비 75 g/L까지의 I 단계 영역, 감소가 멈춘 Al의 Ni, Co, Cr의 감소가 더욱 심화되는 75~150 g/L까지의 II 단계 영역, 감소가 없는 Al을 제외한 Ni, Co, Cr의 감소율이 동일한 150 g/L 이상의 III 단계 영역이다. 고액비가 150 g/L 이상인 영역에서의 침출율은 Cr, Co, Ni, Al 순으로 높았다. Al의 경우 200 g/L의 고액비에서도 약 93%의 높은 침출율을 유지하였다. 고액비에 따른 침출 실험결과로부터 CMSX-4 합금의 주요 금속원소인 Ni, Co, Cr, Al 등의 침출에 염산농도 4 M, 침출온도 90 °C, 침출시간 120 분

의 조건에서는 고액비 125 g/L 이하의 조건이 효과적임을 확인하였다.

Fig. 6에서 고액비 125 g/L 이상의 조건에서의 급격한 침출율 저하의 원인은 금속의 용해반응에 필요한 염산의 고갈 현상으로 생각된다. 침출 용액 내 수소이온의 양과 아래 식 (6)~(9)와 같이 각 금속원소들의 예상 용해 반응을 통해 이론적으로 용해에 필요한 염산의 양을 계산할 수 있다.



CMSX-4 합금시료 내 Ni, Co, Cr, Al의 함량으로부터 이론적으로 계산된 염산의 필요량은 시료 1 g당 0.034 몰로서 주요 금속원소들의 침출율이 90% 전후인 고액비 100 g/L 일 때 필요 염산농도는 3.4 M에 해당한다. Fig. 6의 고액비에 따른 침출율의 변화는 실험에 사용된 염산의 농도가 4 M인 것을 고려할 때 125 g/L 이상에서의 급속한 침출율 감소는 침출액내 염산의 고갈에 따른 결과로 생각된다. 한편 알루미늄은 II 단계 영역인 125 g/L 이상에서 높은 침출율을 유지하고, 다른 금속들은 급격한 침출율 저하를 보이는 III 단계 영역인 200 g/L의 조건에서도 침출율이 125 g/L의 조건과 동일하게 유지되고 있다. 특히 III 단계 영역에서의 Al만의 높은 침출율은 금속의

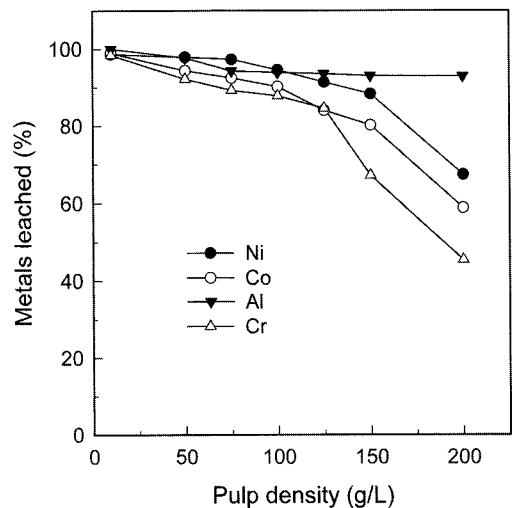


Fig. 6. The effect of pulp density on CMSX-4 leaching (hydrochloric acid concentration; 4 M, temperature; 90 °C, leaching time; 120 min.).

용해에 필요한 염산의 절대량 부족에도 불구하고 관찰된 현상이어서 식 (6)-(9)에 나타난 산에 의한 금속의 용해 과정으로는 해석할 수 없다. 이를 설명할 수 있는 한 가지는 세멘테이션(cementation) 반응으로 염산이 고갈된 상태에서 기 용해된 Ni, Co, Cr 등이 미 용해된 합금 시료내의 Al 성분과 반응하여 이들 금속은 환원되고 Al은 용해되는 것으로 생각된다. 그러나 침출잔사에서 세멘테이션에 의해 생길 수 있는 Ni, Co, Cr 등의 금속 환원 석출물을 관찰하지 못하였으며, 고액비가 증가하여도 일정하게 유지되는 Al의 침출율을 세멘테이션으로 설명하기 위해서는 좀 더 세밀한 향후 연구가 필요한 부분이다.

4. 결 론

다양한 유가금속을 함유한 사용 후 초내열합금은 수집이 체계적으로 관리 가능한 매우 유용한 순환자원이다. 특히 향후 항공우주산업의 급격한 성장이 예측되는 상황에서 이들 산업에서 사용되는 핵심재료인 초내열합금의 순환자원화 기술 개발은 매우 중요한 문제이다. 재료의 특성상 재사용이 어려운 CMSX-4 초내열 합금의 습식순환자원화 기술 개발의 일환으로 수행한 염산 침출연구를 통해 니켈, 알루미늄, 코발트, 크롬은 산성영역에서 습식용해처리가 매우 효과적임을 확인하였다. 한번에 처리하는 시료의 양을 고려할 때 염산농도 4 M, 침출온도 90 °C, 침출시간 120 분의 조건에서 고액비 125 g/L의 조건이 Ni, Co, Cr, Al 등 주요 금속 성분 침출의 최적 조건이었다. 한편 니켈과 알루미늄의 침출율이 코발트와 크롬에 비하여 산의 농도, 침출온도, 침출시간, 고액비에 관계없이 높았으며, 이는 니켈기지에

60 % 이상의 금속간화합물 Ni₃Al을 함유하는 니켈기 초내열합금의 특성에 의한 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 한국기계연구원 부설 재료연구소의 초고온 금속재료 기술개발 사업의 지원으로 연구가 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 유영수, 조창용, 2008: 니켈기 초내열합금 개발 현황. 재료마당, **21**(3), pp. 13-21.
2. Prasad, V. S., *et al.*, 1996: Recycling of Superalloy Scrap through Electro Slag Remelting, ISIJ International, **36**(12), pp. 1459-1464.
3. 박문경, 이영근, 1995: Superalloy 스크랩으로부터 Co 미분말의 제조(I) (Superalloy 스크랩의 아연처리), J. of Korean Ist. of Resources Recycling, **4**(1), pp. 52-59.
4. Kempfer, L., 1991: Back to basics. Elemental superalloy recycling, Materials engineering, **108**(7), pp. 30-32.
5. Olbrich, A., *et al.*, 2009: Recycling of superalloys with the aid of an alkali metal salt bath, US patent, US 2009/0255372 A1.
6. Bard, A. J., Parsons, R., and Jordan, J., 1985: Standard Potentials in Aqueous Solution, IUPAC, pp. 329, 381, 458, 566, Marcel Dekker, Inc., New York.
7. Hemmersmeier, U., Feller-Kniepmeier, M., 1998: Element distribution in the macro- and microstructure of nickel base superalloy CMSX-4, Materials Science and Engineering, **A248**, pp. 87-97.
8. 孫雲澤, 1981: 金屬腐蝕學, pp.100-106, 南榮文化社, 韓國

金 珉 奭

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

李 在 天

- 현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 책임연구원
- 당 학회지 제10권 6호 참조

金 銀 暎

- 현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 금속회수연구실 박사 후 과정
- 당 학회지 제19권 4호 참조

柳 泳 守

- 현재 한국기계연구원 부설 재료연구소 내열재료연구그룹 그룹장