

廢 積層形세라믹콘덴서에 含有된 니켈의 浸出舉動†

金銀暎*** · 金炳洙** · 金珉奭** · 鄭鎮己** · †李在天**

*科學技術聯合大學院大學校 廢資源活用專攻, **韓國地質資源研究院, 資源活用素材研究部

Leaching Behavior of Nickel from Waste Multi-Layer Ceramic Capacitor†

Eun-young Kim***, Byung-Su Kim**, Min-Seuk Kim**, Jinki Jeong** and †Jae-chun Lee**

*Department of Resources Recycling, University of Science & Technology, Daejeon, Korea

**Minerals & Materials Processing Division, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources(KIGAM), Daejeon, Korea 305-350

요 약

폐 적층형세라믹콘덴서(Multi-Layer Ceramic Capacitor, MLCC)에 함유된 니켈의 침출거동에 대한 연구를 수행하였다. 침출제인 산의 종류와 산농도, 침출온도, 입자크기, 침출시간이 니켈의 침출거동에 미치는 영향을 조사하였다. 실험결과, 광액농도 5 g/L, 질산농도 1 N, 침출온도 90°C, 시료입도 -300/+180 µm, 침출시간 30분에서 니켈의 침출율은 97% 이었다. 니켈의 침출반응속도는 cylinder 형상의 Jander 식에 잘 따르는 것으로 분석되었다. 니켈의 침출반응은 잔류 BaTiO₃ 공극 확산속반응이며, 활성화 에너지는 37.6 kJ/mol(9.0 kcal/mol)이었다.

주제어 : 적층형세라믹콘덴서, 니켈, 질산침출, Jander 식

Abstract

Leaching behavior of nickel contained in waste Multi-Layer Ceramic Capacitor (MLCC) was investigated using a batch reactor. The effects of acid type, acid concentration, leaching temperature, particle size, and reaction time on the extraction of nickel metal from waste MLCC were examined. As a result, 97% of nickel contained in waste MLCC was leached out in 30 min at the temperature of 90°C under the condition of HNO₃ concentration 1 N, solid/liquid ratio 5 g/L and particle size -300/+180 µm. It was also found that a Jander equation was useful to fit well the leaching rate data. The rate of nickel leaching is controlled by pore diffusion in BaTiO₃ layer and has an activation energy of 37.6 kJ/mol (9.0 kcal/mol).

Key words : Multi-Layer Ceramic Capacitor, Nickel, HNO₃ leaching, Jander equation

1. 서 론

적층형세라믹콘덴서(Multi-layer Ceramic Capacitor, MLCC)는 각종 전기전자 정보통신기기에 사용되며 콘덴서시장의 70% 이상을 차지하고 있다. 일반적으로 휴대폰에는 150개, PDA에는 200개, 디지털 TV에는 300개 정도의 MLCC가 필요하다. 2004년의 경우 전 세계적으로 630억개 정도가 소비된 것으로 보고되었다.¹⁾ 디

지털 제품의 사용 증가에 따라 MLCC의 지속적인 수요증가로 인해 사용 후 버려지는 폐기물의 발생량도 꾸준히 증가될 것으로 예상된다.

현재 MLCC 제조 공정에서 발생되거나 사용 후 버려지는 폐 MLCC는 전량 매립되어지고 있으며, 폐 MLCC에는 MLCC 제조시 내부전극으로 사용된 니켈이 약 15% 정도 함유되어 있다.²⁾ 한편, 니켈의 습식 제련은 주로 원광중 니켈의 품위가 1~2%인 산화광이나 황화광으로부터 산침출에 의하여 수행되고 있다.³⁾ 따라서 폐 MLCC에서 니켈을 회수하는 것은 원광에서 니켈을

† 2005년 6월 14일 접수, 2005년 8월 12일 수리

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

회수할 때보다 에너지 비용면에서도 절약될 뿐만 아니라 매립으로 인한 환경오염의 부담도 경감시키는 동시에 수입대체 효과 등 다양한 이점이 있다.⁴⁾ 이와 같은 이유로 폐 MLCC로부터 니켈을 회수하기 위한 많은 관심이 집중되고 있다. 하지만, 아직까지 폐 MLCC로부터 니켈을 침출하여 회수하는 기술 개발은 미비한 상태이다.

이와 같은 관점에서 본 연구에서는 폐 MLCC로부터 니켈을 회수하는 공정을 개발하기 위한 기초연구로서 폐 MLCC에 함유된 니켈의 침출거동에 대한 실험을 수행하였다. 침출제의 종류, 산농도, 침출온도, 입도크기, 침출시간이 니켈의 침출거동에 미치는 영향을 조사하였으며, 이를 바탕으로 폐 MLCC에 함유된 니켈의 침출율과 반응속도에 대한 연구결과를 제시하였다. 얻어진 결과는 향후 폐 MLCC로부터 습식공정에 의한 니켈 회수 공정 개발에 필요한 기초 자료로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험

2.1. 시료 특성

MLCC는 유전체와 내/외부 전극재료로 구성되어 있

Table 1. Average chemical composition of the waste MLCC used in the study.

Element	Concentration (wt.% or ppm)
Ba	37.79±1.35%
Ti	10.49±0.7%
Ni	14.92±1.4%
Zn	0.07%
Mn	0.08%
Mg	0.003%
Al	0.2%
Ca	0.72%
Cu	15 ppm

Table 2. Nickel contents with mean particle size of waste MLCC used in the study.

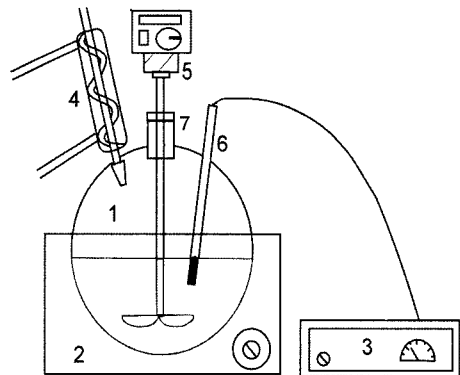
Particle size (μm)	Ni (wt.%)
-500/+300	15.23
-300/+180	12.86
-180/+90	10.45
-90	10.16

다. 유전체의 주성분은 BaTiO₃ 이다. 종래에 전극재료로 Ag(외부전극)/Pd(내부전극)계가 사용되어 왔으나, 가격이 비싸고 Cu 전극이 가진 우수한 고주파 특성 때문에 Cu(외부전극)/Ni(내부전극)계로 전환되어 사용되고 있다.¹⁾ 외부전극은 단자형성(Termination) 과정 중에도 포되는데 여기서는 외부전극 소성 전 공정에서 얻어진 MLCC를 사용하여 실험하였다. 따라서 실험에 사용된 시료는 외부전극이 포함되지 않았고 내부전극과 유전체층으로 구성되어 있다.

시료로 사용된 폐 MLCC는 hammer mill을 이용하여 -500 μm 로 분쇄한 다음 체분리하여 사용하였다. 시료의 평균 화학적 조성은 Table 1에 나타내었으며 주성분으로 Ba와 Ti이 각각 38%, 10% 정도이고 니켈이 15%정도인 것으로 분석되었다. Table 2는 체분리하여 입도에 따른 니켈함량을 나타낸 것이다. Table 2에 보여지는 것 같이 시료의 입도가 작아질수록 니켈의 함량이 감소하는 것으로 나타났다. 입도별 침출율 변화를 제외한 모든 실험에서 -300/+180 μm (-48/+80 mesh)의 시료를 사용하였다.

2.2. 실험방법

폐 MLCC에 함유된 니켈의 침출연구를 위하여 본 실험에 사용된 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 실험장치는 크게 온도조절부, 반응부, 응축부로 구



1. Reactor
2. Heating mantle
3. Temp. Controller
4. Reflux Condenser
5. Stirrer
6. Thermometer
7. Mercury Seal

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus.

성되어 있다. 반응조는 1 L 용량의 3구플라스크를 사용하였으며 가열맨틀에 장착하여 요구하는 온도로 가열하였다. 반응온도는 자동온도 조절장치에 의해 일정하게 유지하였다. 침출액 교반에는 반달모양의 테플론 패들을 사용하였으며 고온반응 시 용액의 증발을 방지하기 위하여 환류 응축기를 반응조에 설치하였다.

일정농도의 침출제 500 mL를 반응조에 넣고 반응온도가 요구되는 온도에 도달하면 2.5 g의 시료를 반응조에 넣은 후 침출반응을 시작하였다. 일정시간 간격으로 용액시료 4 mL를 채취하여 syringe filter로 여과 후 원자흡광분석기(Atomic Absorption Spectrometer, Varian Spectra A-400), 유도결합플라스마방출분석기(Inductively coupled plasma Spectrometer, Jobin-Yvon Equipment Co., JY-38 plus)를 이용하여 용액중의 니켈의 양을 분석하였다. 침출 잔사는 에너지 분산형 X-선 분리기(Energy dispersive X-Ray spectrometer, Oxford Instrument, Link ISIS 3.0), 주사전자현미경(Scanning electron microscope, JEOL Ltd., JSM-6380LA) 및 X-선 회절분석기(X-ray diffractometer, Rigaku, D-max-2500PC)를 이용하여 분석하였다. 반응 후의 니켈의 침출율은 다음 식에 의하여 계산하였다.

$$X_{Ni}(\%) = \frac{\Delta W_{Ni}}{W_{Ni}} \times 100 \quad (1)$$

여기서, X_{Ni} 는 니켈의 침출율, ΔW_{Ni} 는 침출된 니켈 함량 (mg) 그리고 W_{Ni} 는 시료에 함유된 총 니켈 함량 (mg)을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

모든 조건에서 침출반응은 반응초기에 높은 반응율을

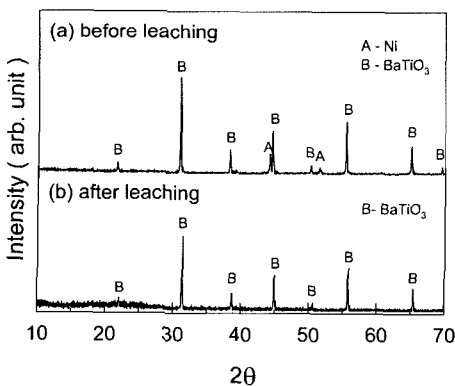
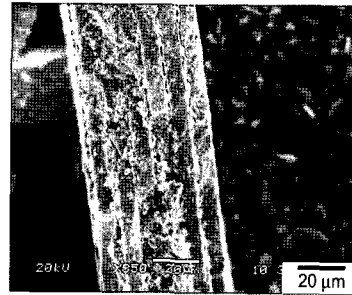
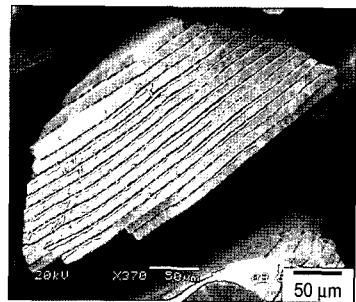


Fig. 2. X-ray diffraction patterns of the waste MLCC before and after leaching.



(a) before leaching



(b) after leaching

Fig. 3. SEM morphologies of the waste MLCC before and after leaching.

나타내었다. 질산에 의한 니켈의 침출반응 후 잔사의 성분변화를 확인하기 위한 X-ray 분석 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 폐 MLCC 시료의 X-ray 회절패턴에서는 BaTiO₃과 니켈에 해당하는 피크들이 동시에 나타났으나 침출잔사에서는 BaTiO₃의 회절피크만이 나타났다. 이러한 분석결과를 유전체 층으로 존재하던 BaTiO₃는 침출반응 시 침출되지 않고 그대로 유지됨을 의미한다. 또한 Fig. 3은 침출반응 전 후의 시료에 대한 SEM 분석결과를 나타낸 것이다. Fig. 3(a)와 (b)에서 보여지듯이 침출반응 후 니켈이 존재하던 층은 니켈이 침출되어 빠져나간 빈 공간으로 확인되었다.

3.1. 침출실험 결과

3.1.1. 산종류별 침출율

Fig. 4는 침출제의 종류에 따른 침출율의 변화를 나타낸 것이다. 침출조건은 침출제로 사용한 산농도 1 N, 교반속도 400 rpm, 침출온도 90°C이었다. 반응온도 90°C로 매우 높은 조건에서도 염산, 황산은 완전한 침출율의 증가를 보였으며 90분 경과시 40% 미만의 침출율을 나타내었다. 한편 질산의 경우에는 반응초기부

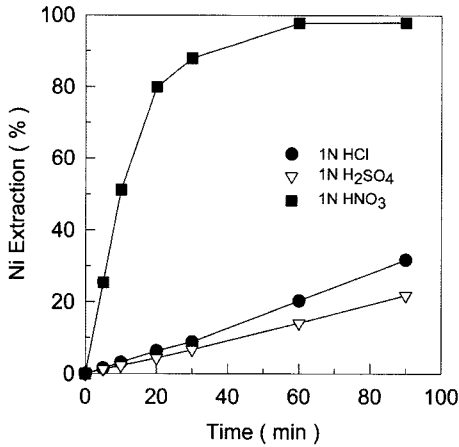
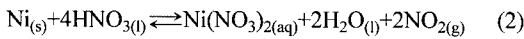


Fig. 4. Effect of the acid type on Ni leaching. (Leaching temperature 90°C, agitation speed 400rpm, particle size -300/+180 μm, pulp density 5 g/L).

터 급격한 침출율의 증가를 보였으며 60분 경과시 95%의 침출율을 나타내었다. 이것은 NO₃⁻이 산화제의 역할로 작용하기 때문으로 생각되어진다. 질산에 의한 니켈의 침출 반응은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.⁵⁾ 니켈과 NO₃⁻가 1:4의 몰비로 반응함을 알 수 있다.



본 실험에서는 광액농도를 5 g/L로 고정하였으나 일반적으로 조업에 적용할 경우 광액농도를 증가시킬수록 경제적으로 유리하다. 따라서 가격 면에서 다소 고가이지만 광액농도를 증가시킬 수 있는 이점이 있고 산화력이 좋아 비교적 낮은 온도에서도 침출율이 뛰어난 질산을 침출제로 사용하여 본 연구를 수행하였다.

3.1.2. 교반속도의 영향

질산에 의한 폐 MLCC에 함유된 니켈의 침출반응에 대하여 경막확산(film boundary layer diffusion)효과^{6,7)}의 영향을 제거하기 위해 교반속도의 영향을 조사하였다. Fig. 5는 교반속도에 따른 니켈의 침출율을 나타낸 것이다. 질산농도 1N, 반응온도 50°C 조건에서 교반속도를 100에서 600 rpm 까지 변화시키며 실험하였다. 200 rpm 이상에서는 교반속도에 관계없이 침출율이 일정하였다. Fig. 5에 보여지는 바와 같이 반응속도는 교반속도가 200 rpm 이상에서부터는 경막확산(film boundary layer diffusion)효과에 의한 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 이 결과로부터 안전율을 고려하여 400 rpm이 교반속도에 따른 전체 반응에 대한 경막확산(film boundary

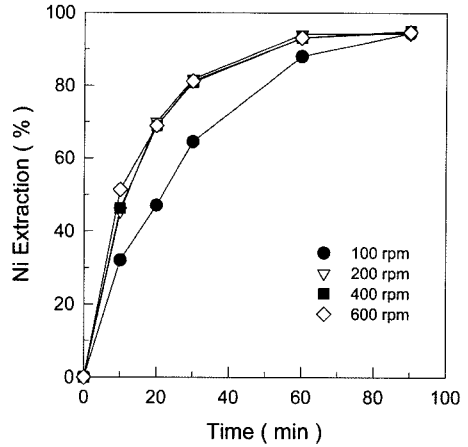


Fig. 5. Effect of the agitation speed on Ni leaching. (HNO₃ concentration 1 N, leaching temperature 50°C, particle size -300/+180 μm, pulp density 5 g/L).

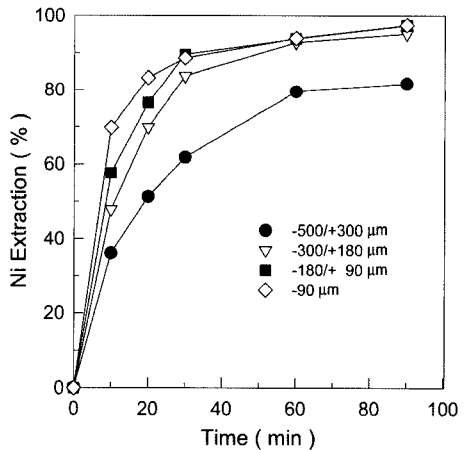


Fig. 6. Effect of the particle size on Ni leaching. (HNO₃ concentration 1 N, leaching temperature 50°C, agitation speed 400 rpm, pulp density 5 g/L).

layer diffusion)효과의 기여를 제거할 수 있는 교반속도로 선택되어졌다. 따라서 이후 모든 실험에서는 경막확산(film boundary layer diffusion)효과의 영향이 배제된 400 rpm 조건에서 수행하였다.

3.1.3. 시료입도의 영향

침출율에 미치는 시료입도의 영향을 살펴보기 위하여 시료를 분쇄 후 4종류의 입도(-500/+300, -300/+180, -180/+90, -90 μm)로 분급하여 침출실험을 실시하였다. Fig. 6은 입도크기에 따른 니켈의 침출율의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 6에서 보듯이 시료입도가 감소할수록

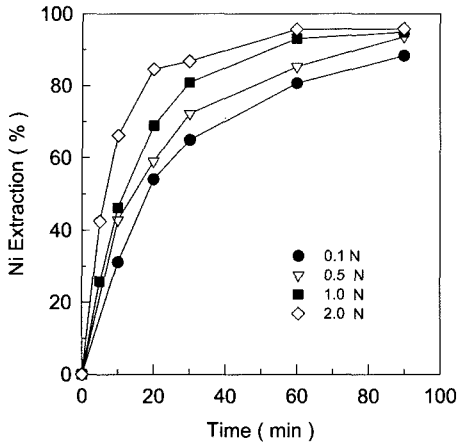


Fig. 7. Effect of the HNO₃ concentration on Ni leaching. (Leaching temperature 50°C, agitation speed 400 rpm, particle size -300/+180 μm, pulp density 5 g/L).

초기 반응속도가 증가되는 것으로 나타났다. 질산농도 1 N, 반응온도 50°C, 반응시간 90분 조건에서 입도 -500/+300 μm 시료의 니켈 침출율은 83.4% 이었으며, 입도 300 μm이하 시료들의 침출율은 약 95%로 나타났다.

3.1.4. 질산농도의 영향

Fig. 7은 반응온도 50°C에서 질산의 농도를 0.1 N에서 2 N까지 변화시키면서 폐 MLCC에 함유된 니켈의 침출율에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 0.1 N인 경우 반응시간 90분에서 니켈의 침출율은 88% 였으며, 0.5 N이상에서는 니켈의 침출율이 94% 이상이었다. 또한 Fig. 7에서 보여지듯이 질산농도가 증가할수록 초기반응속도가 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 질산의 산화제로의 작용이 농도증가와 함께 커지기 때문으로 판단된다.

3.1.5. 반응온도의 영향

반응온도가 폐 MLCC에 함유된 니켈의 침출율에 미치는 영향을 조사하기 위하여 광액농도 5 g/L, 반응시간 90분, 질산농도 1 N인 실험조건에서 반응온도를 30°C 부터 90°C까지 변화시켰으며, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 니켈은 반응온도가 증가함에 따라 반응속도가 함께 증가하는 것으로 나타났다. 반응온도 30°C, 반응시간 90분에서 니켈의 침출율은 약 88%였으나, 반응온도 90°C, 반응시간 30분에서는 니켈의 침출율이 97%로 나타났다. 이 실험의 재현성은 각 온도에서 ±3% 이내였다.

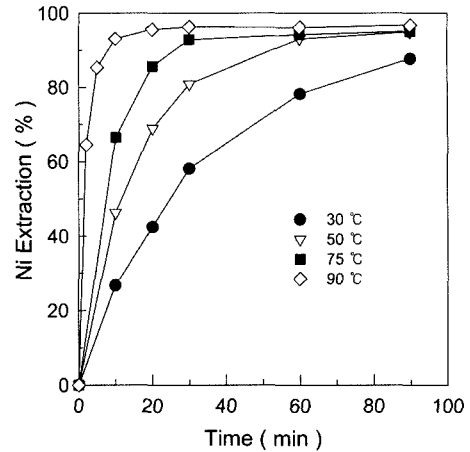


Fig. 8. Effect of the temperature on Ni leaching. (HNO₃ concentration 1 N, agitation speed 400 rpm, particle size -300/+180 μm, pulp density 5 g/L).

3.2. 속도론적 해석

Fig. 6, 7, 8에 나타나 있는 니켈의 침출반응 속도데이터를 설명하기 위해 Jander 식과 같은 서로 다른 많은 속도 식⁸⁻¹⁴⁾을 이용하여 분석하였다. 분석결과 니켈의 침출반응은 확산속반응에 대하여 유용한 Jander 식⁸⁻¹⁰⁾이 가장 좋은 결과를 나타내는 것으로 확인되었다. 일반적으로 Jander 식은 반응 전 후의 체적변화가 거의 없는 반응기구에 대하여 잘 적용되는 것으로 알려져 있다. 따라서 질산에 의한 폐 MLCC에 함유된 니켈의 침출반응에서 이와 같은 현상이 발생되었을 것으로 생각되어진다. 이것은 간접적으로 반응 전 후 폐 MLCC 입자의 SEM 사진에서 확인되었다. Fig. 3은 반응 전 후 폐 MLCC입자의 SEM 사진이다. Fig. 3에서 나타난 바와 같이 니켈층은 두께가 1~2 μm 정도로 BaTiO₃ 층에 비해 상대적으로 매우 적고 니켈 층간에 존재하는 BaTiO₃층은 침출 전 후 거의 동일한 표면적과 체적을 가지고 있는 것으로 확인되었다. 따라서 폐 MLCC에 함유된 니켈의 질산침출반응의 속도데이터를 Jander 식을 이용하여 분석하는 것이 타당한 것으로 판단된다. 한편 본 실험에서 사용한 폐 MLCC 시료는 Fig. 3의 반응 전의 폐 MLCC 입자의 SEM 사진에서 보여 지는 바와 같이 두께가 표면적에 비해 상대적으로 매우 적은 cylinder 형상을 알 수 있다. 그러므로 cylinder 형상의 고체 입자 반응에 유용한 아래의 Jander 식을 이용하여 본 실험에서 얻어진 폐 MLCC에 함유된 니켈의 질산침출반응의 속도데이터가 분석되었다.

$$[1 - (1 - X_{Ni})^{1/2}]^2 = k_{app}t \quad (4)$$

여기서, X_{Ni} 는 니켈의 전환율, k_{app} 는 겉보기 속도상수(min^{-1}), t 는 침출시간(min)이다.

이때 겉보기 속도상수 k_{app} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_{app} = b k f (C_{HNO_3}) = b k [HNO_3]^n \quad (\text{min}^{-1}) \quad (5)$$

b: 반응식 (2)에 대한 화학양론 상수(1/4)¹⁵⁾

k: 속도 상수($\text{min}^{-1} \cdot \text{N}^{-n}$)

C_{HNO_3} , $[HNO_3]$: HNO_3 의 농도(N)

f: 농도의 속도 의존성을 나타내는 function

n: 질산에 대한 반응차수

Fig. 9, 10, 12는 Fig. 6, 7, 8의 시료입도, 질산농도, 반응온도에 따른 니켈의 침출율에 대한 실험결과를 확

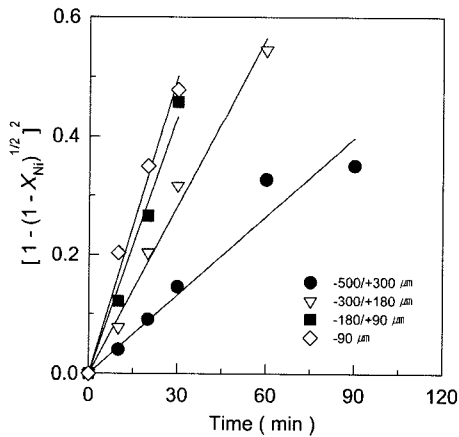


Fig. 9. Plot of the results in Fig. 6 according to Eq. (2).

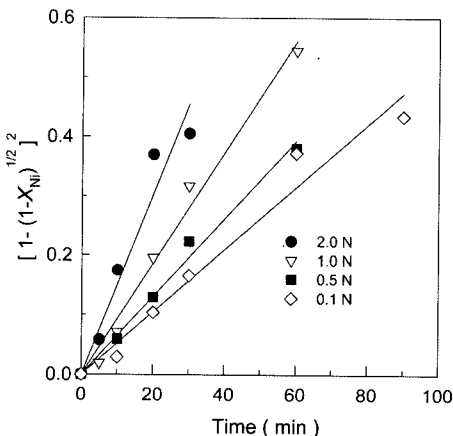


Fig. 10. Plot of the results in Fig. 7 according to Eq. (2).

산율속반응에 대하여 유용한 식 (4)를 이용하여 fitting 한 결과를 보여준다. Fig. 9, 10, 12에 나타난 바와 같이 폐 MLCC에 함유된 니켈의 침출반응의 속도데이터는 침출율 90%까지 Jander 식과 잘 일치하는 것으로 나타났다. 반응초기에는 질산이 니켈과 입자표면에서 쉽게 반응하여 침출되지만 침출반응이 진행될수록 질산은 니켈과 접할 수 있는 면적은 줄어드는 반면 층간에 존재하는 $BaTiO_3$ 층은 침출 전 후 동일한 표면적을 가지고 있으므로 이 층이 회층(ash layer)과 동일한 역할을 하여 니켈과 질산의 반응에 가장 큰 저항인 확산장벽(diffusion barrier)으로 작용하는 것으로 판단된다. Fig. 10, 12에서 각각의 직선의 기울기는 식 (4)에 나타난 바와 같이 겉보기 속도상수를 의미한다. Fig. 11은 Fig.

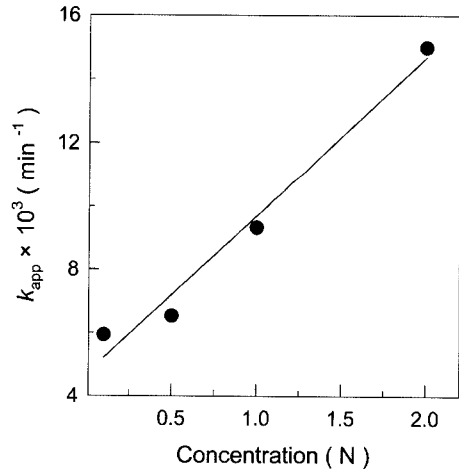


Fig. 11. Dependence of k_{app} on the HNO_3 concentration from the results shown in Fig. 7.

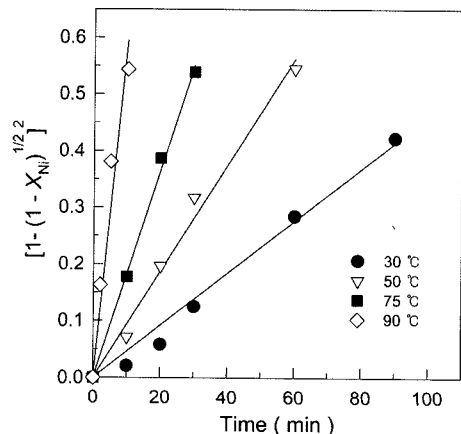


Fig. 12. Plot of the results in Fig. 8 according to Eq. (2).

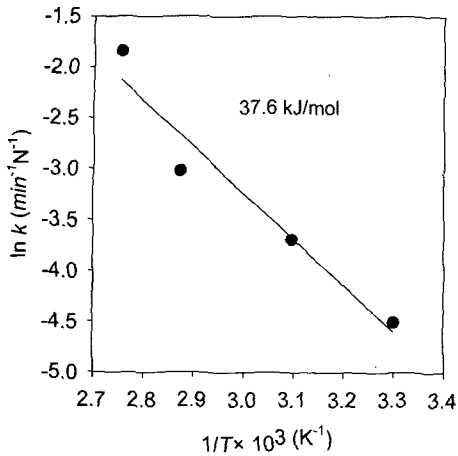


Fig. 13. Arrhenius plot of the rate constants.

10의 데이터를 이용하여 얻어진 겉보기 속도상수 값은 질산농도와의 상관관계로부터 그려진 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 질산농도에 대한 반응차수는 본 실험범위(0.1 N-2 N HNO₃)에서 일차관계가 성립하였다. 이를 토대로 (5)식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_{app} = bkf(C_{HNO_3}) = (1/4)k[HNO_3] \text{ (min}^{-1}\text{)} \quad (6)$$

또한 Fig. 13은 Fig. 12의 온도변화에서 얻어진 겉보기 속도상수와 식 (6)을 이용하여 계산된 속도상수 k에 대해 그려진 Arrhenius 그래프이다. Fig. 13의 직선의 기울기로부터 활성화 에너지는 37.6 kJ/mol (9.0 kcal/mol)로 계산되었다. 따라서 계산된 활성화 에너지 값으로부터 반응속도상수식을 완성할 수 있으며 반응속도상수 k는 -300/+180 μm의 입자크기를 가진 폐 MLCC에 함유된 니켈의 질산에 의한 침출반응에 대하여 다음과 같다.

$$k = 3.03 \times 10^4 \exp\left(\frac{-4,520}{T}\right) \text{ (min}^{-1} \cdot \text{N}^{-1}\text{)} \quad (7)$$

한편 식 (4), (6), (7)로부터 다음과 같이 질산에 의한 폐 MLCC에 함유된 니켈의 침출반응속도식을 얻을 수 있었다.

$$[1 - (1 - X_{Ni})^{1/2}]^2 = k_{app}t \quad (8)$$

여기서, $k_{app} = 7.58 \times 10^3 \cdot [HNO_3] \exp\left(\frac{-4,520}{T}\right) \text{ (min}^{-1}\text{)}$ 이다.

4. 결 론

본 연구에서는 폐 적층형세라믹콘덴서(Multi-Layer

Ceramic Capacitor, MLCC)에 함유된 니켈의 침출거동에 대한 연구를 수행하였다. 얻어진 실험결과들은 다음과 같다.

1) 광액농도 5 g/L, 질산농도 1 N, 반응온도 90°C, 반응시간 90분, 시료입도 -300/+180 μm에서 폐 MLCC에 함유된 니켈의 침출율은 97%였다.

2) Cylinder 형상의 고체 입자 반응의 확산속반응에 대해 유용한 Jander 식이 폐 MLCC에 함유된 니켈의 질산에 의한 침출반응에서 침출율 90%까지 반응속도를 해석하는데 적합한 것으로 분석되었다.

3) 폐 MLCC에 함유된 니켈의 질산침출반응에 대한 활성화 에너지는 37.6 kJ/mol(9.0 kcal/mol)로 계산되었다.

4) 질산농도 0.1 N에서 2 N 범위에서 질산에 의한 폐 MLCC에 함유된 니켈의 침출반응에 대해 다음과 같은 속도식을 얻었다.

$$[1 - (1 - X_{Ni})^{1/2}]^2 = k_{app}t$$

여기서, $k_{app} = 7.58 \times 10^3 \cdot [HNO_3] \exp\left(\frac{-4,520}{T}\right) \text{ (min}^{-1}\text{)}$ 이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부/환경부의 21C 프론티어연구개발사업인 자원재활용기술개발사업단으로부터 지원받아 수행 중인 “폐전기·전자기기의 토탈 리사이클링 기술 개발” 사업에서 얻어진 연구결과의 일부입니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 심재홍, 2004: 적층 세라믹 칩 콘덴서의 특허 동향, 한국 특허정보원.
2. 김은영 외, 2005: MLCC 스크랩으로부터 니켈의 질산 침출 연구, 2005년 제25회 학술발표회 논문집, pp. 41-45, 한국자원리사이클링학회, 연세대학교, 5월 19-21일, 2005년, 서울, 한국.
- 3.李應祚, 1985: 습식제련공학, 문운당, 서울, 한국.
4. 손정수 외, 2005: 戰略金屬 스크랩 資源化를 위한 코발트 物質흐름 現況調査, 한국자원리사이클링학회지, 14(2), pp. 43-55.
5. Mecucci, A., Scott, K., 2002: Leaching and electrochemical recovery of copper, lead and tin from scrap printed circuit boards, J. Chem. Technol. Biotechnol., 77, pp. 449-457.
6. Kim, D. J., Park, K. H., 1999: Study on the leaching mechanism of Cu and Ni from deep-sea manganese

nodules with sulfuric acid, J. Kor. Inst. Met. & Mater., **37**(12), pp. 1564-1569.

7. Levenspiel, O., 1962: Chemical reaction engineering, pp. 338-352, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.
8. Yoo, J. M. et al., 2005: *Kinetics of the volatilization removal of lead in electric arc furnace dust*, Mater. Trans., **46**(2), pp. 323-328.
9. Abdel-Aal, E. A., Rashad, M. M., 2004: *Kinetic study on the leaching of spent nickel oxide catalyst with sulfuric acid*, Hydrometallurgy, **74**, pp. 189- 194.
10. Hernandez, L. G. et al., 1986: *Preparation of amorphous silica by acid dissolution of sepiolite-kinetic and textural study*, J. Coll. Int. Sci., **109**(1), pp. 150-160.
11. Yoo, J. M. et al., 2004: *Leaching of Nickel from a hydrodesulphurization spent catalyst with ammonium sulfate*, J. of Chem. Eng. of Japen, **37**(9), pp. 1129-1134.
12. Jena, P. K., Barbosa-Filho, O. and Vasoncelos, I. C., 1999: *Studies on the kinetics of slurry chlorination of a sphalerite concentrate by chlorine gas*, Hydrometallurgy, **52**, pp. 111-122.
13. Habashi, F., 1980: *Principles of extractive metallurgy*, Volume I., pp. 111-169, Gordon and Breach, New York, USA.
14. Habashi, F., 1980: *Principles of extractive metallurgy*, Volume I., pp. 223-252, Gordon and Breach, New York, USA.
15. Sohn, H. Y., 1978: *Law of additive reaction times in fluid-solid reactions*, Metall. Trans. B, **9B**(1), pp. 89-96.

金 銀 嘆

- 1999년 경상대학교 지질학과 졸업
- 2001년 경상대학교 지구환경과학과 대학원 졸업
- 현재 과학기술연합대학원대학교 폐자원활용전공 박사과정 재학

金 炳 洙

- 현재 한국지질자원연구원 자원활용소재연구부 금속회수연구실
- 본 학회지 제13권 1호 참조

金 珉 爽

- 연세대학교 금속공학과 박사
- 현재 한국지질자원연구원 자원활용소재연구부 금속회수연구실
- 본 학회지 제13권 1호 참조

鄭 鎭 己

- 현재 한국지질자원연구원 자원활용소재연구부 금속회수연구실
- 본 학회지 제10권 6호 참조

李 在 天

- 현재 한국지질자원연구원 자원활용소재연구부 부장
- 본 학회지 제10권 6호 참조