Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 16, No. 1 pp. 906-913, 2015

http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.1.906
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

초음파를 이용한 레드머드로부터 유가금속 회수에 관한 연구

임기혁[1], 손병현[1*]
[1]한서대학교 환경공학과

Study on recovery of heavy metals from red mud by using the ultrasonic waves

Ki-Hyuk Lim[1], Byung-Hyun Shon[1*]
[1]Dept of Env. Engineering, Hanseo University

요 약 알루미나를 생산하는 Bayer 공정에서 발생하는 레드머드는 환경과 인간에게 심각한 위험요인이 되고 있어, 알루미늄 산업에서 레드머드의 발생량을 줄이거나 또는 재활용 하는 것은 매우 시급한 문제이다. 본 연구에서는 초음파 강도, 반응온도, 반응시간 및 산성용액 농도 등 4가지 변수가 레드머드 내의 철과 알루미늄의 침출에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 레드머드로부터 금속 성분의 용출에 미치는 가장 중요한 변수는 초음파 강도와 반응온도로 나타났다. 초음파를 조사할 경우, 철과 알루미늄의 회수율은 초음파를 조사하지 않은 경우보다 각각 1.72배와 1.28배 정도 증가하는 것으로 나타났다. 본 연구 결과, 알루미나로부터 금속성분을 회수하기 위한 적정 조업조건은 초음파 강도 150 W, 황산 용액의 농도 4-6N, 반응온도 70℃, 반응시간 2시간 등이었다.

Abstract The red mud generated from the Bayer alumina production process seriously threatens the environment and human safety. Therefore, the reduction and recycling of red mud is an urgent topic in the aluminum industry. In this study, the effects of four parameters, ultrasound power, reaction temperature, time, and acid concentration, on the leaching of Fe, Al from red mud was investigated. The major parameters influencing the metal recovery efficiency from red mud were ultrasound power and reaction temperature. The use of ultrasonic irradiation resulted in 1.72 and 1.28 times higher recovery efficiency for Fe and Al, respectively. The proper conditions for the recovery of the metal components present in the red mud is the ultrasound intensity (150 W), sulfuric acid concentration (4-6N), reaction temperature (70 ℃), and reaction time (2 hours), etc.

Key Words : Bayer process, Metal leaching, Red mud, Sulfuric acid, Ultrasound power

1. 서론

레드머드(red mud)란 bauxite로부터 수산화알루미늄($Al_2O_3 \cdot xH_2O$)을 추출하는 과정에서 부산물로 발생하는 슬러지이다. 최근 산업의 발달로 알루미나 수요가 크게 증가함에 따라 레드머드의 발생량 또한 비례해서 증가하고 있다. 레드머드는 알루미나 1톤을 생산하는데 약 1.6~2.0톤 정도가 발생하며, 전 세계적으로 연간 약 1억 2천만 톤이 발생하고 국내에서도 연간 약 20만 톤이 발생하고 있다. 전 세계적으로 레드머드의 누적량은 약 27억 톤으로 추산되며 지속적인 알루미나 산업 발전으로 인해 2015년도에는 레드머드의 총 누적량이 약 30억 톤을 초과할 것으로 예상된다[1].

레드머드는 주요 구성성분은 Fe_2O_3, Al_2O_3, TiO_2, SiO_2, Na_2O, CaO 등 6가지 주요 성분과 기타 미량 성분 등 14~21 가지의 광물성 물질을 함유하고 있다. 레드머드는 대부분 육상매립 및 해양투기로 처리되고 있는데, 육상매립의 문제점으로는 강우로 인해 레드머드의 독성이 토

본 논문은 2012년도 한서대학교 교비학술연구 지원 사업에 의하여 연구되었음.
*Corresponding Author : Byung-Hyun Shon(Hanseo Univ.)
Tel: +82-41-660-1368 email: bhshon@hanseo.ac.kr
Received August 25, 2014 Revised (1st October 21, 2014 2nd November 5, 2014 3rd November 17, 2014) Accepted January 8, 2015

양 및 지하수로 누출되어 환경오염을 유발시킬 우려가 있으며, 건조된 레드머드는 바람에 의해 비산되어 처분장 인근 주변에 피해를 줄 우려가 있다[2].

이에 국내・외적으로 레드머드를 재활용하기 위해 무기 응집제 개발, 산업폐수처리 활용, 벽돌제조 등 다양한 활용방안이 연구되고 있지만 레드머드 발생량에 비해 재활용율은 극히 적은 편이다. 따라서 레드머드 재활용에 대한 연구 개발이 절실히 필요한 실정이다[3]. 레드머드의 재활용 방법 중 산성 용액 및 알칼리 용액을 사용하여 레드머드로부터 유가 금속 성분을 추출하는 연구가 많이 진행되고 있다[4]. 이는 레드머드 내 유가 금속 성분을 회수하여 최종 처리되는 부피를 감소시켜 처리 비용을 절감하고 회수한 유가 금속을 재활용하여 새로운 부가가치를 창출할 뿐만 아니라 점차 고갈되어가고 있는 유용 자원을 재활용 할 수 있기 때문이다.

초음파는 음향 화학 분야에서 화학반응을 일으키거나 촉진시키기 위해 사용되며, 주로 액체 물질에 조사하여 초음파의 캐비테이션에 의해 기계・화학적인 영향력에 효율 증대를 위한 수단과 밀접한 관련이 있다[5]. 초음파의 효과는 초음파가 고체 표면에 도달하면 미세균열을 일으켜, 물질의 확산계수를 증가시킨다. 또한 고체의 물질을 분쇄하여 파우더 형태의 물질로 만들기도 하는데, 이러한 효과 때문에 표면적이 증가함에 따라 초음파로 인해 화학적 반응성 또한 향상되는 것으로 보고되고 있다[6].

이에 본 연구에서는 레드머드로부터 금속 성분의 회수율을 향상시키기 위해 다양한 변수에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 초음파의 강도, 황산용액의 농도, 반응온도, 침출 시간 및 고-액비 등의 변수가 레드머드로부터 금속성분의 회수에 미치는 영향을 실험하여 최적의 반응조건을 도출하고자 하였다.

2. 실험

2.1 레드머드

본 연구에 사용된 레드머드는 전남의 대불산업공단에 위치한 "OO 주식회사"의 알루미나 생산 과정에서 발생하는 레드머드를 사용하였다. [Table 1]은 본 연구에서 사용한 레드머드의 물리・화학적 특성을 나타낸 것이다. Fe_2O_3 형태의 화합물이 가장 많이 존재하며, 그 다음으로는 Al_2O_3, CaO 및 TiO_2 성분이 각각 15~20%, 7~10% 및 6~8%로 높은 함유율을 나타냈다. 또한, pH는 11.0~12.5%의 범위로 매우 높은 알카리성을 띄고 있음을 알 수 있다.

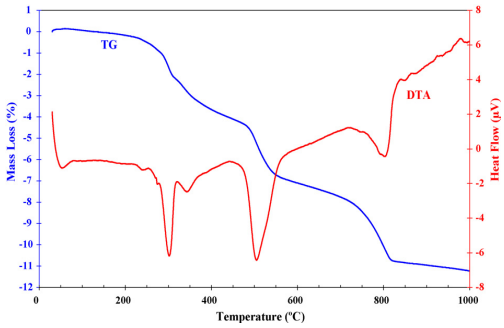
황산 용액과 레드머드의 원활한 혼합을 위해 초기 함수율이 35~45%로 많은 수분을 함유하고 있어, 24시간 건조 후 실험에 사용할 입경으로 분쇄하여 황산과 혼합하여 사용하였다. 회수율 산정을 위해 Fe_2O_3 40%, Al_2O_3 15%라고 가정하였으며, 이들이 황산 용액에 모두 추출된다고 하면 철 5,600 mg/ℓ, 알루미늄 2,125 mg/ℓ가 된다.

[Table 1] Physical and chemical characteristics of red mud used in this experiment

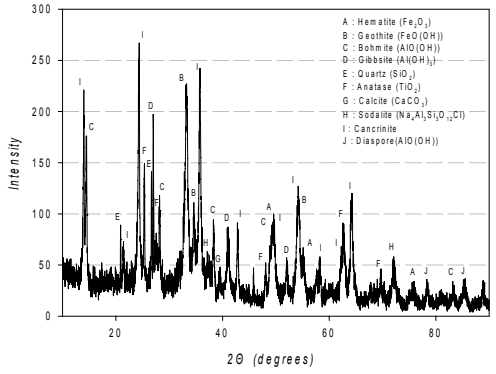
Items		Range
Chemical composition (%)	Fe_2O_3	40 ~ 45
	Al_2O_3	15 ~ 20
	TiO_2	6 ~ 8
	SiO_2	5 ~ 7
	CaO	7 ~ 10
	Na_2O	4 ~ 7
Physical properties	Color	Red
	Moisture (%)	35 ~ 45
	Loss on ignition (%)	9.5
	pH	11.0 ~ 12.5
	Bulk density (g/cm^3)	0.98
	True density (g/cm^3)	4.2

[Fig. 1]은 전형적인 레드머드의 열분석 결과를 나타낸 것으로서, 4번의 중량 감소를 확인할 수 있다. 첫 번째 중량 감소(약 140℃ 이전, 약 1%)는 레드머드에 포함되어 있던 물리적 수분의 증발에 기인한 것으로 판단되고, 두 번째(440℃ 이전, 약 4%)와 세 번째(600℃ 이전, 약 3%) 중량감소는 레드머드에 화학적으로 부착되어 있던 수분의 증발에 기인하며 주로 gibbsite와 diaspore의 분해 때문으로 판단된다. 네 번째 중량 감소는(800℃ 이전, 약 4%), calcite의 하소과정에서 배출되는 CO_2 때문으로 사료된다[7].

[Fig. 2]는 본 연구에서 사용한 레드머드의 XRD diagram을 나타낸 것이다. 레드머드는 매우 다양한 결정상들로 구성되어 있는데 주요 광물상으로는 hematite, geothite, bohmite, gibbsite, quartz, anatase, calcite, sodalite, cancrinite 및 diaspore 등 이다.



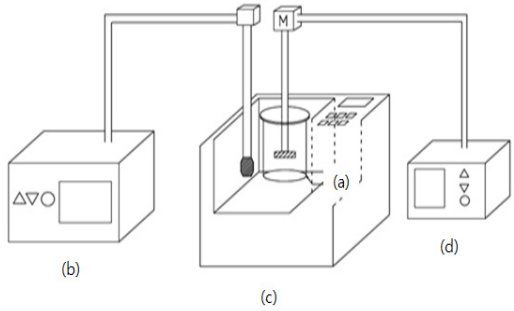
[Fig. 1] TG/DTA analysis of red mud.



[Fig. 2] XRD analysis of red mud.

2.1 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용한 실험 장치는 [Fig. 3]과 같다. 실험 장치는 크게 금속 성분 침출 반응기, 온도 조절이 가능한 초음파 발생기, 보조 가열기 및 교반기 등으로 구성하였다. 황산과 레드머드의 균일한 혼합을 위해 교반용 프로펠러 크기에 적절한 1 ℓ 석영 반응기를 사용하여 황산 용액과 레드머드를 혼합하여 사용하였다. 초음파 조사는 150 W, 60 Hz 성능을 구비한 초음파 발생기를 사용하였으며, 파워 조절이 가능한 반응기를 사용하여 실험 동안 초음파 조사 유·무에 따른 영향을 볼 수 있도록 설계하였다. 또한 온도에 따른 영향을 알아보기 위해 온도 조절이 가능한 초음파 발생기 외에 별도로 DH-K5232 모델의 디지털 가열 장치를 사용하였는데, 이는 ± 0.1℃까지 온도조절이 가능하여 실험 동안 온도가 일정하게 유지할 수 있도록 하였다. 교반기는 MS-3040D로 0-3000 rpm 범위의 디지털 교반기를 사용하여 교반 속도로 일정하게 유지하였으며, 황산 용액에 교반기의 부식을 방지하기 위해 테프론 코팅된 교반기를 사용하였다.



[Fig. 3] Schematic diagram of experimental apparatus. (a)Quartz reactor, (b)Ultrasonic generator, (c)Heater, (d)Stirrer

본 연구에서의 실험변수는 초음파의 강도, 황산용액의 농도, 반응온도, 반응 시간 및 고-액비 등 5가지이며 실험 조건은 [Table 2]와 같다.

[Table 2] Experimental conditions

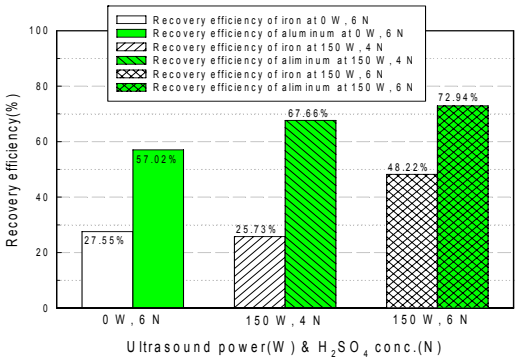
Parameters	Range
Ultrasound power (W)	0, 150 W
Sulfuric acid concentration (N)	2, 4, 6 N
Reaction temperature (℃)	30, 60, 70, 80 ℃
Reaction time (hr)	2, 4 hr
Solid-liquid ratio (%)	2%

3. 결과 및 고찰

3.1 초음파 강도

레드머드 내 유가금속의 추출에 미치는 초음파 영향을 알아보기 위해 초음파를 조사한 경우와 조사하지 않은 경우에 대해 실험을 수행하였다. 동일한 실험을 3회 수행하여 평균값을 결과값으로 사용하였으며, 표준실험 조건은 황산 농도 4N 및 6 N, 반응 온도 70℃, 반응시간 2 hr, 고-액비 2%의 조건으로 설정하여 실험하였다.

[Fig. 4]는 초음파를 조사 유·무에 따른 철과 알루미늄 성분의 평균회수율을 나타낸 것이다. 초음파를 조사하지 않은 경우, 철 성분의 평균 회수율은 27.55%를 나타냈으나 150 W의 초음파를 조사한 경우 철의 평균 회수율은 48.22%로 나타나 초음파를 조사하지 않은 경우보다 회수율이 약 1.72배 이상 증가하였다. 그러나 초음파를 조사하고 4N의 황산용액을 사용하여 침출시킨 결과, 철 성분의 평균 회수율은 25.73%로 나타나 6N 황산용액에



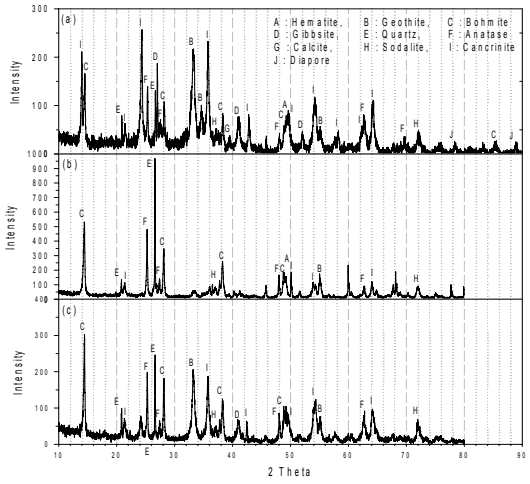
[Fig. 4] Effect of ultrasound power on the recovery efficiency of iron and aluminum (6N, 70℃, 2h, 2%).

침출시킨 결과와 큰 차이를 보였다. 또한 초음파를 조사하지 않은 경우, 알루미늄 성분의 평균 회수율은 57.02%를 나타냈으나 150 W의 초음파를 조사한 경우 알루미늄의 평균 회수율은 72.94%로 나타나 초음파를 조사하지 않은 경우보다 회수율이 약 1.28배 이상 증가하였다. 그러나 초음파를 조사하고 4N의 황산용액을 사용하여 침출시킨 결과, 아루미늄의 평균 회수율은 67.663%로 나타나 6N 황산용액에 침출시킨 결과와 5% 이상의 차이를 보였다.

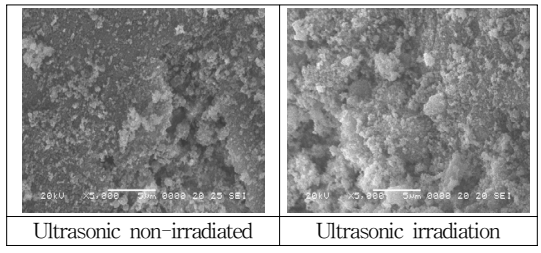
결국, 초음파 조사가 금속 성분 회수율에 긍정적인 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 이는 초음파가 조사되면 공동화 현상이 발생하여 레드머드의 입자가 보다 작게 분쇄되어지고, 황산 용액 내 기포가 생성되어 황산용액과 레드머드의 접촉효율이 증가하여 금속성분의 침출이 증가하기 때문으로 사료된다.

[Fig. 5]는 원시료 및 실험 후(0W, 150W 초음파 조사) 여과 슬러지의 XRD를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 초음파 조사 유·무에 관계없이 많은 양의 금속들이 황산용액에 침출되어 여과 슬러지 내의 결정상이 많이 소멸되었음을 알 수 있다. 특히 gibbsite와 cancrinite 성분이 황산용액에 쉽게 용출되는 것으로 판단된다.

[Fig. 6]은 초음파 조사 여부에 따른 레드머드 슬러지의 SEM 사진을 나타낸 것이다. 사진에서 볼 수 있듯이, 초음파를 조사한 여과슬러지 표면이 초음파를 조사하지 않은 여과슬러지 표면에 비해 비교적 거칠고 입자의 크기가 작은 것을 볼 수 있다. 이는 초음파를 조사함에 따라 공동현상으로 인해 레드머드의 입경이 더 작게 분쇄되기 때문으로 판단된다.



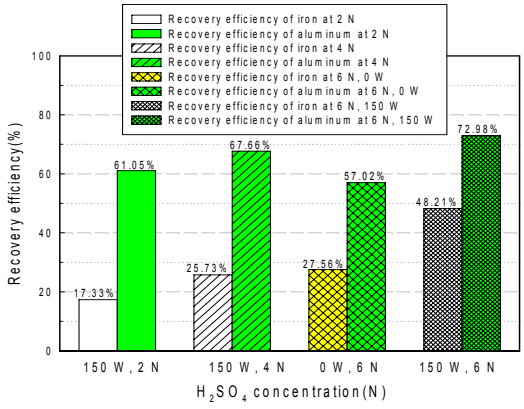
[Fig. 5] Comparison of XRD diagram before and after experiment. (a)raw material, (b)0W, (c)150W



[Fig. 6] SEM images of red mud before and after the experiment.

3.2 산성용액 농도

산성 용액의 농도가 실험에 미치는 영향을 살펴보기 위해 2N, 4N 및 6N 황산용액을 사용하였으며, 기타 실험 조건은 초음파 0 W 및 150 W, 반응 온도 70℃, 반응 시간 2시간 및 고-액비 2%의 조건에서 실험을 수행하였다.



[Fig. 7] Effect of sulfuric acid concentration on the recovery efficiency of iron and aluminum.

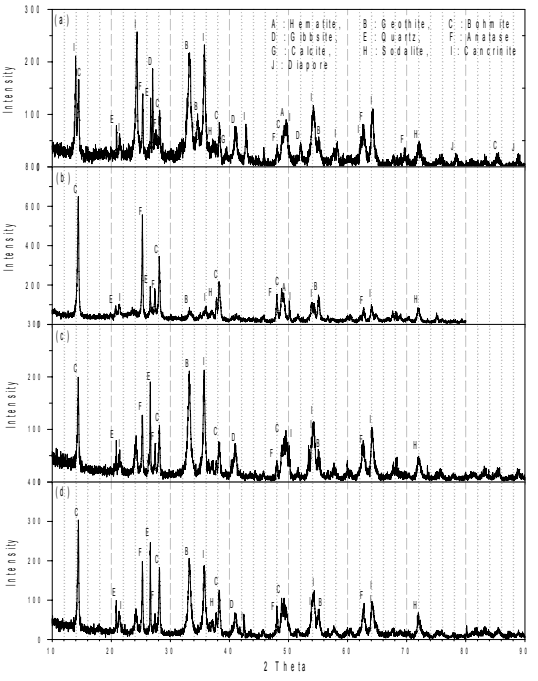
[Fig. 7]에서 볼 수 있듯이, 150W의 초음파를 조사하면서 2N 황산 용액을 사용하여 철 성분을 침출시킨 결과 철의 평균 회수율은 17.33%로 나타났다. 또한 각각 4N과 6N 황산 용액을 사용하여 철 성분을 침출시킨 결과 철의 평균 회수율은 각각 25.73%와 48.21%로 나타나 2N 황산 용액에 침출시킨 결과에 비해 철의 회수율은 각각 약 1.48배, 2.78배 증가하는 결과를 보였다. 그러나 초음파를 사용하지 않고 6N의 황산 용액을 사용하여 침출시킨 결과, 철 성분의 평균 회수율은 27.56%로 나타나 4N 황산 용액에 침출시킨 결과와 큰 차이를 보이지 않았다.

또한 150W의 초음파를 조사하면서 2N 황산 용액을 사용하여 알루미늄 성분을 침출시킨 결과 알루미늄의 평균 회수율은 61.05%로 나타났다. 또한 각각 4N과 6N 황산 용액을 사용하여 알루미늄 성분을 침출시킨 결과 알루미늄의 평균 회수율은 각각 67.66%와 72.98%로 나타나 2N 황산용액에 침출시킨 결과에 비해 철의 회수율은 각각 약 1.11배, 1.20배 증가하는 결과를 보였다. 그러나 초음파를 사용하지 않고 6N의 황산 용액을 사용하여 침출시킨 결과, 알루미늄의 평균 회수율은 57.02%로 나타나 2N 황산용액에 침출시킨 결과보다 적은 회수율을 보여 초음파의 효과를 확인할 수 있다.

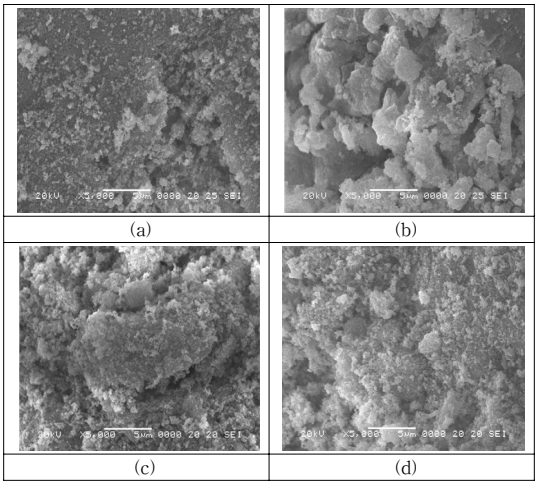
산성용액의 농도가 증가함에 따라 두 가지 금속 성분 모두 회수율이 증가하긴 하지만 그 차이가 농도증가비율과 선형적으로 일치하지 않으며 또한 황산용액의 농도가 높아지면 산성증기의 발생이 많아지는 문제 및 장치의 부식 문제 등이 발생하므로 다른 연구자들의 연구결과[6, 8]과 마찬가지로 4N 이상 6N 이하가 적정한 산성용액의 농도라고 판단된다.

[Fig. 8]은 황산 농도 조건에 따른 여과 슬러지 내 존재하는 광물상을 알아보기 위해 XRD 분석 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이, cancrinite 성분이 다량 용출되어 제거되었음을 확인할 수 있었고 철 화합물인 hematite, geothite, 알루미늄 화합물인 gibbsite, diaspore 성분 또한 용출되어 결정상이 많이 감소한 것을 볼 수 있다.

[Fig. 9]는 황산 농도 변화에 따른 여과 슬러지의 표면을 알아보기 위해 SEM 사진을 나타낸 것이다. [Fig. 9]에서 볼 수 있듯이, 2N 황산용액으로 실험을 수행한 슬러지의 표면에 비해 4N과 6N 황산 용액을 사용한 레드머드의 표면이 거칠고 미세한 입경의 입자들이 밀집해 있음을 알 수 있다. 이로 인해 황산의 농도가 강할수록 표면의 금속성분들이 용출이 증가하여 효율적인 중금속 회수가 가능한 것으로 판단된다.



[Fig. 8] Changes in the XRD diagram according to the sulfuric acid concentration before and after the experiment. (a) raw material, (b) 2N, (c) 4N, (d) 6N



[Fig. 9] SEM images of red mud before and after the experiment. (a) raw, (b) 2N-H_2SO_4, (c) 4N-H_2SO_4, (d) 6N-H_2SO_4

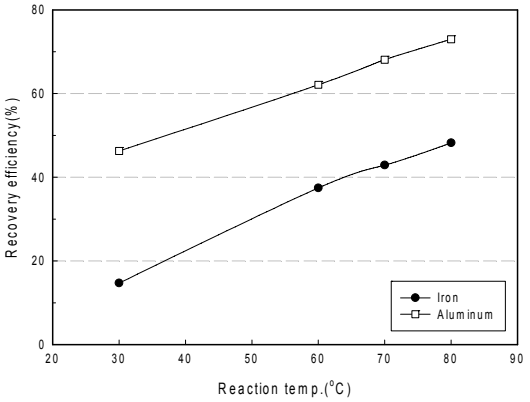
3.3 반응온도

반응온도에 따른 금속성분의 회수율을 알아보기 위해 온도를 30℃, 60℃, 70℃, 80℃로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 레드머드로부터 금속성분의 추출에 사용되는 반응온도는 대부분 60℃ 전·후이지만[8], 본 연구에서는 60℃ 이상의 온도에서의 회수율의 차이를 확인해 보고자 하였다.

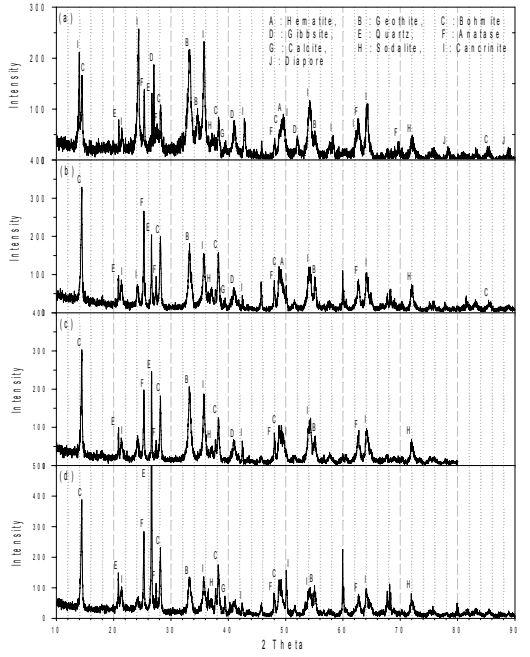
[Fig. 10]은 온도 변화에 따른 철 및 알루미늄 성분의 평균회수율 변화를 나타낸 것으로써, 30℃에서 철 성분의 평균회수율은 14.07%로 나타났다. 60℃, 70℃ 및 80℃에서의 철 성분의 평균회수율은 각각 37.45%, 42.51% 및 48.21%로 나타났다. 실험결과, 30℃에서 60℃까지의 온도증가에 따른 회수율 상승속도는 0.779 %/℃, 60℃에서 70℃까지 온도증가에 기인한 회수율 상승속도는 0.506 %/℃, 70℃에서 80℃까지 온도증가에 기인한 회수율 상승속도는 0.570 %/℃로 나타나 60℃이상에서는 온도증가에 기인한 회수율의 상승속도가 둔화되고 또한 60℃~70℃구간보다 70℃~80℃구간에서의 회수율 상승속도가 약간 크게 나타났지만 그 차이가 크지 않았다. 알루미늄의 경우 30℃에서 평균회수율은 46.30%로 나타났으며, 60℃, 70℃ 및 80℃에서의 알루미늄의 평균회수율은 각각 62.10%, 67.25% 및 72.98%로 나타났다. 실험결과, 30℃에서 60℃까지의 온도증가에 따른 회수율 상승속도는 0.527 %/℃, 60℃에서 70℃까지 온도증가에 기인한 회수율 상승속도는 0.515 %/℃, 70℃에서 80℃까지 온도증가에 기인한 회수율 상승속도는 0.573 %/℃로 나타나 온도증가에 따라 거의 선형적으로 회수율이 상승하는 경향을 나타냈다.

실험 결과, 철의 경우 60℃ 이상에서는 온도증가에 기인한 회수율 상승속도가 둔화되고, 알루미늄의 경우 온도증가에 따라 회수율의 상승속도가 거의 선형적으로 증가하지만 70℃와 80℃ 사이에서 평균회수율 차이가 크지 않는 것으로 나타났다. 또한 온도가 증가할수록 황산 증기의 발생이 많아져 장치의 부식문제 및 안전상의 문제도 고려해야 하므로 본 연구의 실험조건에서의 반응온도는 70℃가 적절할 것으로 판단된다.

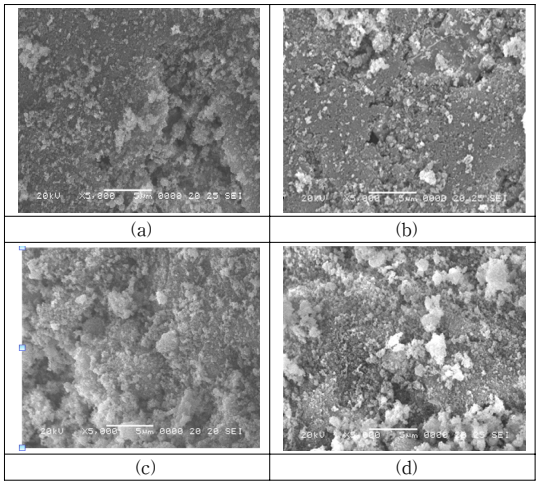
[Fig. 11]은 온도 변화에 따른 여과 슬러지의 XRD 그래프를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 온도 변화에 상관없이 cancrinite와 diaspore의 용출이 많이 일어남을 확인할 수 있어 이 두 광물은 낮은 온도에도 기타 성분에 비해 쉽게 용출이 된다고 판단된다. 반면에 반응온도 30℃에서 실험한 그래프에서 hematite 피크가 관찰되지만 70℃와 80℃ 조건 그래프에서는 나타나지 않았다. 이로 인해 철 화합물인 hematite를 회수하기 위해서는 70℃ 이상에서 실험을 수행하는 것이 효율적일 것으로 판단된다.



[Fig. 10] Effect of reaction temperature on the recovery efficiency(150 W, 6N, 2hr, 2%).



[Fig. 11] Changes in the XRD diagram according to reaction temperature before and after the experiment. (a) raw material, (b) 30℃, (c) 70℃, (d) 80℃



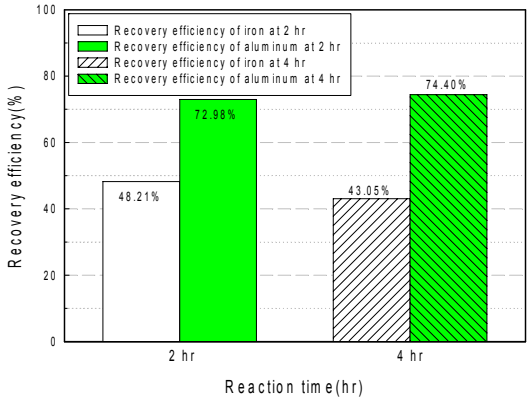
[Fig. 12] SEM images of red mud before and after experiment. (a) raw material, (b) 30℃, (c) 70℃, (d) 80℃

[Fig. 12]는 온도 변화에 따른 여과 슬러지 표면의 SEM 사진을 나타낸 것이다. 30℃ 온도 조건에서 실험한 여과슬러지의 표면은 비교적 매끈하며 공극 또한 적게 나타남을 확인할 수 있어 적은 양의 금속 성분이 용출되었기 때문으로 사료된다. 반면, 70℃와 80℃ 조건의 여과 슬러지 표면은 매우 거칠고 비교적 넓은 공극을 나타내고 있어 고온에서 실험하면 입자의 인력이 낮아져 레드머드 입자와 황산과의 활발한 반응으로 중금속이 다량 용출되기 때문이라고 판단된다.

3.4 반응시간

반응시간에 따른 금속 성분의 용출에 미치는 영향을 알아보기 위해, 반응시간을 2시간 및 4시간으로 설정하고 각각 3번의 실험을 수행하였으며, 이외의 조건은 초음파 150 W, 황산 농도 6N, 반응 온도 70℃ 및 고-액비 2%로 동일하게 설정하였다.

[Fig. 13]에서 볼 수 있듯이, 용출 시간 2시간으로 설정하여 실험한 결과 철 성분의 평균회수율은 48.21%를 나타냈으며, 4시간 용출 시 철 성분의 평균회수율은 43.05%로 나타났다. 또한 2시간 용출 시 알루미늄 성분의 평균회수율은 72.98%, 4시간 용출 시 알루미늄 성분의 평균회수율은 74.40%를 보였다. [Fig. 14]에서 알 수 있듯이, 각 금속 성분별 반응 시간에 따른 회수율의 변화가 크지 않아 반응시간은 2시간 정도면 어느 정도 용출이 일어나는 것으로 판단된다.



[Fig. 13] Effect of reaction time on the recovery efficiency.(150 W, 6N, 70℃, 2%)

4. 결론

레드머드 내 존재하는 철 및 알루미늄을 회수하기 위한 적정의 조건을 알아보기 위해 산성용액 침출 방법에 초음파를 병합하여 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 초음파를 조사함에 따라 레드머드 내 함유되어 있는 철 및 알루미늄의 회수율이 초음파를 조사하지 않은 경우보다 각각 1.72배 및 1.28배 증가하여 초음파가 금속 성분의 회수에 매우 유용한 방법임을 알 수 있었다.
2. 산성용액의 농도가 증가함에 따라 철과 알루미늄 모두 회수율이 증가하긴 하지만 그 차이가 농도증가비율과 선형적으로 일치하지 않으며 또한 황산용액의 농도에 기인한 문제점도 발생하므로 황산용액의 농도는 4N 이상 6N 이하가 적정한 산성용액의 농도라고 판단된다.
3. 철은 60℃ 이상에서는 온도증가에 기인한 회수율 상승속도가 둔화되고, 알루미늄은 온도증가에 따라 회수율의 상승속도가 거의 선형적으로 증가하지만 70℃와 80℃ 사이에서 평균회수율 차이가 크지 않았다. 온도 증가에 기인한 황산 증기 및 장치의 부식문제, 안전상의 문제를 고려한다면 반응온도는 70℃가 적절할 것으로 판단된다.
4. 반응시간을 2시간에서 4시간으로 증가하여도 회수율에는 큰 차이를 보이지 않아 에너지 비용 등을 고

려할 때 반응시간은 2시간 정도면 충분히 용출은 일어나는 것으로 판단된다.

References

[1] Wanchao Liu, Jiakuan Yang. Bo Xiao, “Review on treatment and utilization of bauxite residues in China” Int. J. Miner. Process. Vol. 93, pp. 220 - 231, 2009.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2009.08.005

[2] Edith Poulin, Jean-Francois Blais, Guy mercier, “Transformation of red mud from aluminium into a coagulant for wastewater treatment”, Hydrometallugy, Vol. 82, pp.16-25, 2008.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.02.004

[3] Dong-Young Jeong, Kyoung-Rae Choi, Moon-Hoon Kim and Chong-Hyun Hong, "An Experiment Study on Development of Eco-Friendly Color Concrete Using Industrial Waste Red Mud", Jouranl of Environmental Science International, Vol. 16, No. 8, pp. 929-939, 2007.
DOI: http://dx.doi.org/10.5322/JES.2007.16.8.929

[4] R. K. Paramguru, “Trends in Red Mud Utilization - A Review", Mineral Processing & Extractive Metall. Rev., Vol. 26, pp.1-29, 2005.
DOI: http://dx.doi.org/10.1080/08827500490477603

[5] Mason, T. J., “Practical sonochemistry", Mineral Processing & Extractive Metall. Rev., Vol. 26, pp.1-29, 2005.

[6] Enes Sayan, Mahmut Bayramoglu, “Statistical modeling and optimization of ultrasound-assisted sulfuric acid leaching of TiO_2 from red mud”, Hydrometallugy, Vol. 71, pp. 397-401, 2004.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/S0304-386X(03)00113-0

[7] S. Agatzini-Leonardou, P. Oustadakis, P.E. Tsakiridis, Ch. Markopoulos, "Titanium leaching from red mud by diluted sulfuric acid at atmospheric pressure", Journal of Hazardous Materials, Vol. 157, pp. 579-586, 2008.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.01.054

[8] Enes Sayan, Mahmut Bayramoglu, “Statistical modelling of sulphuric acid leaching of TiO2, Fe2O3 and Al2O3 from red mud”, Process Safety and Environmental Protection, Vol. 79, No. 5, pp. pp. 291-296, 2001.

임 기 혁(Ki-Hyuk Lim) **[정회원]**

- 2011년 2월 : 한서대학교 환경공학과 (공학사)
- 2013년 2월 : 한서대학교 환경공학과(공학석사)
- 2013년 6월 ~ 현재 : (주)씨티케이 주임연구원

<관심분야>
유해가스처리, 산업폐기물처리

손 병 현(Byung-Hyun Shon) **[정회원]**

- 1990년 2월 : 부산대학교 환경공학과(공학사)
- 1994년 2월 : 부산대학교 환경공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 부산대학교 환경공학과 (공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 환경공학과 교수

<관심분야>
대기오염제어(탈황 및 탈질), 폐기물처리, 이산화탄소 흡수