

청정소재제품기술

천연 Brucite의 물성분석 및 이산화황 흡수제로의 응용

강성구, 김명환,[†] 김진배*

호서대학교 화학공학과
336-795 충남 아산시 배방읍 세출리 165

[†](주)엘라이브텍
464-748 경기도 광주시 오포읍 문형리 384

(2009년 9월 18일 접수; 2009년 10월 15일 수정본 접수; 2009년 10월 16일 채택)

Property Analysis of Natural Brucite and Its Application as Sulfur Dioxide Absorbent

Seong-Gu Kang, Myoung-Hwan Kim,[†] and Jin-Bae Kim*

Department of Chemical Engineering, Hoseo University
165 Sechul-ri, Baebang-eup, Asan, Chungnam 336-795, Korea

[†]Alivetech Co., Ltd.
384 Munhyung-ri, Opo-eup, Kwangju, Kyungki 464-748, Korea

(Received for review September 18, 2009; Revision received October 15, 2009; Accepted October 16, 2009)

요 약

중국 Liaoning에서 산출된 천연 brucite를 원료로 Mg(OH)₂ slurry를 제조하고, 그 탈황 성능을 magnesite를 원료로 열분해 및 수화반응으로 제조된 Mg(OH)₂ slurry와 비교하였다. Brucite와 magnesite를 원료로 제조된 Mg(OH)₂ 분말의 물리/화학적 특성은 유사했지만, brucite를 원료로 제조된 Mg(OH)₂ 결정입자의 판상구조가 보다 안정적으로 발달되어 있었다. Brucite와 magnesite를 원료로 제조된 Mg(OH)₂ slurry의 탈황효율은 brucite가 조금 높았다. Brucite를 배연탈황용 흡수제로 충분히 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

주제어 : SO_x 흡수제, 천연 brucite, 탈황

Abstract : Mg(OH)₂ slurry was prepared by using natural mineral brucite mined in Liaoning province in China, and its de-SO_x efficiency was compared with that of Mg(OH)₂ slurry prepared by thermal decomposition and hydration of magnesite. The physical and chemical characteristics of Mg(OH)₂ powders prepared from brucite and magnesite were similar. However, the layered plate structure of Mg(OH)₂ crystal particles prepared from brucite had grown more stably. The desulfurization efficiency of Mg(OH)₂ slurry prepared from brucite was slightly higher than that of magnesite. Brucite may be used as a new absorbent for the desulfurization of flue gas in the future.

Keywords : SO_x absorbent, Natural mineral brucite, Desulfurization

1. 서 론

배연탈황공정은 연소과정 또는 화학공정에서 생성되어 배

출되는 가스로부터 황산화물을 비롯한 황화합물을 흡수제 및 촉매를 이용하여 흡수, 산화, 환원, 흡착 등의 방법을 통해 제거하는 기술로서 산업공정의 필수설비로 인식되고 있다. 그에

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jbkim@hoseo.edu

따라 미국, 독일, 일본 등 기술선진국을 중심으로 배연탈황 공정에 대한 연구개발이 활발히 이루어져 현재까지 많은 탈황기술이 개발되어 있지만 경제성 등의 측면에서 10여 종의 탈황기술이 실용화되어 화력발전소를 비롯한 여러 분야의 산업용 배출시설에 적용되고 있다[1-4]. 현재 널리 사용되는 탈황공정 기술로는 CaCO_3 를 이용한 석회·석고법과 NaOH , $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 를 이용한 알칼리 흡수법 등 습식탈황공정이 있으며, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 슬러리를 분사하는 반건식 탈황공정과 알칼리성 분말을 분사하는 건식 배연탈황공정 등이 있다[5-8]. 그 중 석회·석고법은 대형발전소에서 주로 사용되는 방법으로서 운전비용은 저렴하지만 초기 투자비가 큰 단점 때문에 소형 설비에는 적합하지 않은 것으로 알려져 있다. 건식탈황공정은 흡수제로 석회석, 소석회, 알칼리금속화합물 등의 물질을 분말화하여 사용하므로 습식공정의 단점인 폐수처리 문제가 생기지 않는 장점이 있다. 따라서 건식공정은 습식공정에 비해 상대적으로 배가스 처리비용이 높은 단점이 있지만, 수질에 대한 환경규제 강화로 중소형 설비에서 많이 적용되고 있는 실정이다.

한편, 습식공정인 수산화마그네슘 흡수법은 석회석고법에 비해 반응설비가 소형이기 때문에 초기 투자비용이 적게 드는 장점이 있지만, CaCO_3 에 비해 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 가 원료 가격이 비싸 운전비가 많이 드는 문제가 있다. 따라서 배기가스 처리용량에 따라 경제성이 높은 원료를 선정하여 적용하고 있으며, 일반적으로 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 습식공정은 중형설비에 많이 적용되고 있다. $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 의 제조방법은 해수를 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 반응시켜 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ slurry를 추출하는 방법과, magnesite (MgCO_3) 광석을 973 K 이상의 고온에서 소성하여 MgO 를 만들고, 이 MgO 를 373 K 내외에서 수화반응시켜 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ slurry를 얻는 방법이 주로 사용되고 있다. 이와 같은 방법은 제조과정이 복잡하고 시간이 오래 걸리며, 제조과정에서 에너지가 많이 소모된다. 그리고 대부분의 광산에서 대기오염 방지 시설이 갖추어지지 않은 상태에서 MgCO_3 를 석탄을 사용하여 소성하기 때문에 광산 주변의 대기오염을 유발하기도 한다.

본 연구에서는 현재의 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 기존의 탈황공정에 사용되고 있는 수화 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 에 대체하여 자연에서 산출되는 brucite를 간단하게 가공하여 사용할 수 있는지 가능성을 검토하였다. Brucite는 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 를 주성분으로 하는 층상구조의 광물로서[9], 최근에는 환경 촉매로 응용된 예도 있다[10,11]. Brucite는 자연 상태에서 이미 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 로 결정화 되어있기 때문에 분쇄공정만으로도 간단하게 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ slurry를 제조할 수 있으며, 중국 Liaoning 지역(요녕성) 등에 매우 풍부하게 매장되어 있어 원료 공급이 쉬운 광물질이다[10]. 이와 같이 안정적인 공급이 가능한 저가의 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 를 흡수제로 이용한 탈황기술 개발은 최근 급속히 발전하고 있는 중국의 청정 환경기술 보급에도 도움이 될 것으로 사료된다. 본 연구에서는 중국 Liaoning에서 산출된 천연 brucite를 원료로 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ slurry를 제조하고, 그 탈황 성능을 MgO 의 수화반응으로 제조된 기존의 수화 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ slurry와 비교하여 상업적인 사용 가능성을 검토하였다.

2. 실험

2.1. $\text{Mg}(\text{OH})_2$ slurry의 제조

$\text{Mg}(\text{OH})_2$ slurry의 원료는 중국 Liaoning 지역의 광산에서 산출된 천연 brucite(Figure 1)를 사용하였다. Figure 2(a)에 나타난 제조 방법에 따라 광산에서 채취된 원석을 선별하여 조분쇄한 후 다시 milling하고 체로 분리하여 80 mesh이하의 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 분말을 제조하였다. 일반적으로 이 상태에서 물과 혼합하여 30~35 wt% 농도의 slurry로 제조하여 제품으로 사용된다. 본 연구에서는 brucite를 원료로 제조된 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ powder를 383 K oven에서 1일간 건조한 후 시료로 사용하였다. 비교를 위하여 Figure 2(b)와 같은 방법으로 magnesite (MgCO_3)를 원료로 제조된 325 mesh의 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ slurry 제품을 입수하여 진공여과 방식으로 수분을 제거한 후, 383 K Oven에서 1일간 건조하여 시료로 사용하였다.

2.2. 물성분석

시료의 화학분석은 ICP (inductively coupled plasma)방법으로 Leeman사의 PS1000UV 장비를 사용하였다. Particle

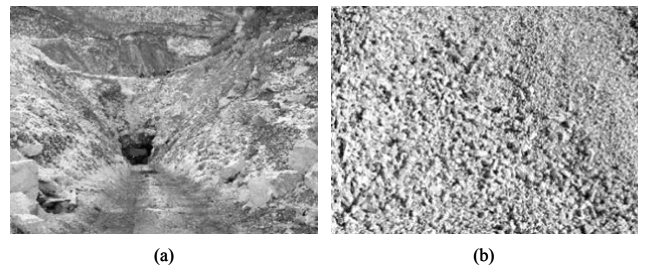


Figure 1. Photographs of (a) a brucite mine of Liaoning province in china, and (b) crushed brucite.

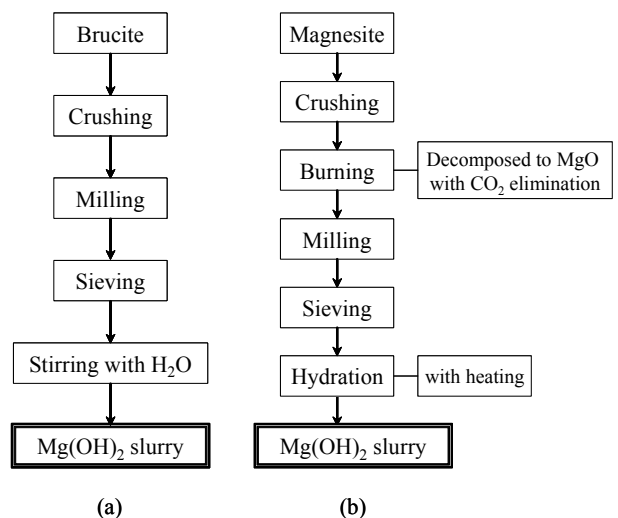


Figure 2. General procedures of $\text{Mg}(\text{OH})_2$ slurry preparation from (a) brucite, and (b) magnesite.

analysis는 Malvern사의 Mastersize Micro를 사용하여 N₂ 가스를 흘리면서 분석하였다. Powder X-ray diffraction pattern은 PANalytical사의 X'pert Pro에서 Ni filter, Cu-K α ₁ radiation을 사용하여, 2 θ 값 10~80°범위에서 1.2°/min의 scanning 속도로 측정하였다. Hitachi사의 SEM(scanning electron microscope) S-3500N을 사용하여 진공상태에서 1,000~10,000배 확대사진을 얻었다. 또한 열중량분석(thermal gravimetric analysis)을 위하여 TA Instrument사의 TGA2950 장비를 사용하여 N₂ 분위기에서 5 K/min의 속도로 승온하여 323~1,223 K 범위에서 온도에 따른 중량변화를 측정하였다.

2.3. 탈황실험

Figure 3과 같이 실험실 규모의 소형 반응기를 제조하여 탈황성능을 실험하였다. 실험에 사용된 가스는 1,000~2,000 ppm SO₂, 4% O₂, He balance의 혼합가스를 사용하였고, 30 l/min의 유속으로 반응기에 주입하였다. 반응온도는 유입되는 혼합가스를 예열기로 가열하여 조절하였다. SO₂ 제거효율은 SO_x 분석기(Horiba Co. SLFA-UV21)를 사용하여 반응기 전후의 SO₂ 농도 변화를 측정하여 SO₂ 제거 성능을 측정하였다. 흡수제는 brucite와 magnesite를 원료로 제조된 Mg(OH)₂ 분말 시료를 1.0 wt%의 동일한 농도로 슬러리화하여 사용하였다. 본 실험에 사용된 반응기 및 반응조건은 산업현장에서 실제 사용되는 조건과는 다르지만 두 가지 시료의 de-SO_x 성능에 대한 상대적인 차이를 비교하기 위한 것으로 SO₂ 제거 효율의 절대치보다는 상대적인 비교 분석에 의미가 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Mg(OH)₂ 분말의 특성 분석

Brucite와 magnesite를 원료로 제조된 Mg(OH)₂ 분말의 화학분석 결과를 Table 1에 나타냈다. ICP 분석에 의해 검출된 원소 중에 정량적인 의미가 거의 없는 미량 성분을 제외하면 Mg, Ca, Si, Fe, Al 5개의 성분이 함유되어 있으며, 주로 수화물 또는 산화물의 형태로 존재하고 있는 것으로 사료된다. Table 1에는 5개 원소 성분의 함유 비율을 나타냈다. 주요성

Table 1. Chemical analysis of Mg(OH)₂ powder prepared from brucite and magnesite

Component	Composition (wt%)	
	Brucite	Magnesite
Mg	94.35	95.23
Ca	2.27	2.90
Si	2.84	1.42
Fe	0.48	0.28
Al	0.06	0.17

분인 Mg는 brucite 원료의 경우 94.35 wt%였으며, magnesite의 경우 95.23 wt%로 약간 높은 수치를 나타냈다. 주요 불순물로는 Ca과 Si 성분이 있었다. 이 중에 brucite는 Si 성분이 많았고, magnesite는 Ca성분이 많았다. 전체적으로 약간의 차이는 있지만 두 시료의 화학 조성은 거의 유사한 것으로 사료된다.

두 시료의 X-ray diffraction pattern (Figure 4)을 분석한 결과 모두 hexagonal 구조를 가지며, unit cell dimension은 brucite가 원료인 경우 a=3.148 Å, c=4.769 Å였고, magnesite가 원료인 경우에는 a=3.140 Å, c=4.755 Å의 값으로 약간 수치가 작지만 Mg(OH)₂ 구조와 거의 일치하는 것으로 사료된다. Magnesite 원료의 경우 unit cell dimension이 약간 작은 것은 제조 과정에 MgO의 수화반응을 필요로 하기 때문에 수화과정에서 MgO가 100% Mg(OH)₂로 수화되지 않고 일부 미수화 상태로 존재하는 defect site를 가지기 때문에 격자의 크기가 작은 것으로 사료된다. Brucite를 원료로 제조된 Mg(OH)₂ 분말의 경우 Figure 4(a)와 같이 X-ray diffraction pattern에서 001면의 peak가 매우 강한 intensity를 나타내고 있는데 이는 판상의 구조가 잘 발달하였기 때문으로 사료된다. 이에 비해 magnesite를 원료로 한 경우에는 Figure 4 (b)와 같이 상대적으로 001면의 peak가 작고 101면의 peak 강도가 매우 높았다. 그리고 (b)에서는 impurity peaks로 MgCO₃

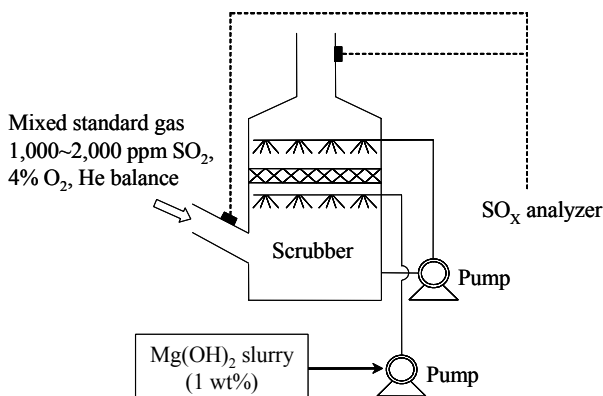


Figure 3. Modified bench scale desulfurization reactor.

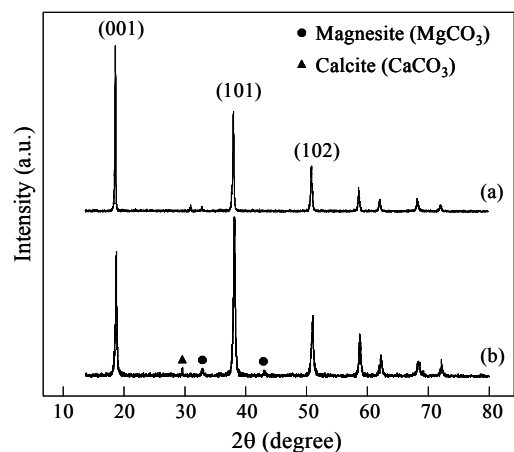


Figure 4. X-ray diffraction patterns of Mg(OH)₂ powder prepared from (a) brucite, and (b) magnesite.

peak와 CaCO_3 peak가 나타났다. 이중 MgCO_3 는 광석을 분쇄 후 CO_2 열분해 과정에서 일부의 MgCO_3 가 분해되지 않고 잔존하는 것으로 사료된다. CaCO_3 peak는 Table 1의 성분분석의 결과에서 보이는 바와 같이 Ca 성분(2.90 wt%)이 일부 존재하는 것에 기인된 것으로 보인다.

Figure 5에 두 시료의 SEM image를 나타냈다. Brucite를 원료로 제조된 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 분말의 경우 Figure 5(a)와 같이 표면에 넓고 평평한 부분이 많았으며 전반적으로 모서리가 날카로운 형태를 보였다. 이는 분쇄 후에 바로 건조하여 얻어진 시료이므로 경계면이 날카롭게 깨어져 불규칙하게 나타나는 것으로 사료된다. 한편 Magnesite에서 제조된 시료의 경우(Figure 5(b))에는 전반적으로 모서리가 둥근 형태를 보이며 표면에도 작고 둥근 입자가 많이 생성되어 있었다. 이와 같은 입자 형태의 차이는 XRD 에서 관찰된 결과와 같이 brucite는 a축과 b축으로 이루어지는 평면에 평행한 방향으로 판상구조가 잘 발달되어 있기 때문에 001면의 peak가 강한 intensity를 보이며, magnesite에서 제조된 시료는 001면보다 101면의 peak가 강한 intensity를 나타낸 결과와 연관이 있는 것으로 추정된다.

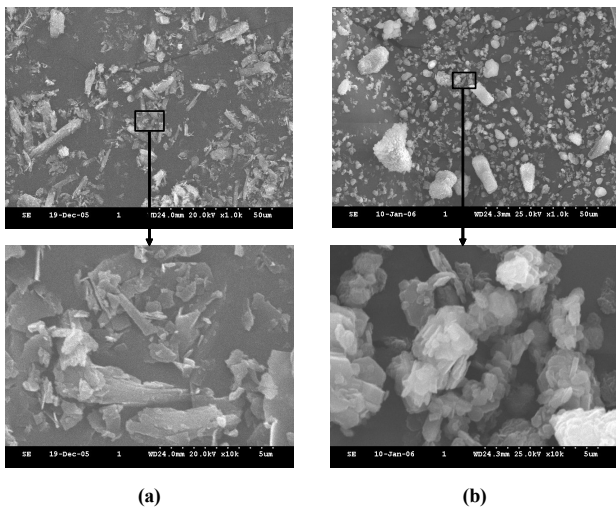


Figure 5. SEM images of $\text{Mg}(\text{OH})_2$ powder prepared from (a) brucite, and (b) magnesite.

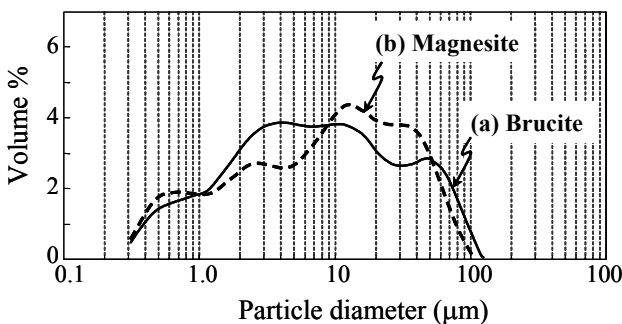


Figure 6. Comparison of particle size distributions of $\text{Mg}(\text{OH})_2$ powder prepared from (a) brucite, and (b) magnesite.

Magnesite를 원료로 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 분말을 제조하는 경우에는 MgCO_3 의 열분해 과정과 MgO 의 수화과정에서 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 결정 표면이 매끄럽게 변하면서 이와 같은 차이를 나타내는 것으로 사료된다.

De- SO_x 효율은 흡수제의 입자 크기 및 분포에 영향을 받을 수 있으므로 본 연구에 사용한 두 시료의 입도분포를 비교하였으며, 그 결과를 Figure 6에 나타냈다. 두 시료의 입자 크기는 거의 같은 영역에 분포되어 매우 유사한 입도분포를 나타내고 있지만, brucite의 경우에 약간 작은 입자가 많은 것으로 나타났다. 평균 입자직경은 brucite가 원료인 경우 $16.98 \mu\text{m}$, magnesite가 원료인 경우 $17.26 \mu\text{m}$ 였으며, 325 mesh ($45 \mu\text{m}$) 입도 통과율은 모두 88%로 거의 같은 값을 나타냈다.

Figure 7에 시료를 383 K oven에서 1일간 건조한 후에 측정된 열분석 결과를 나타냈다. Brucite에서 제조된 시료는 696 K 근처에서 무게 감소가 29.3% 나타났으며, 981 K 근처에서 2.4%의 무게 감소가 나타났다. Magnesite에서 제조된 시료는 첫 번째 무게 감소 온도가 약간 낮아져서 651 K 근처에서 약 28.0%의 무게 감소가 있었으며, 910 K 근처에서 약 2.4%의 무게 감소가 완만하게 나타났다. 상온에서 1,223 K까지의 전체 무게 감소는 brucite에서 제조된 시료는 32.9%, magnesite에서 제조된 시료는 30.4%였다. 순수한 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 가 MgO 로 분해된다고 가정하면 이론상 30.9%의 무게 감소가 예상된다. 두 시료의 1,223 K까지의 전체 무게 감소는 이론값에 근접하고 있지만 brucite의 경우 이론치보다도 약간 높은 수치를 보이는 것은 천연에서 산출되어 열처리를 거치지 않은 시료이므로 일부 유기계 불순물 등의 영향이 있을 것으로 추정된다. 또한 magnesite에서 제조된 시료의 경우 무게 감소가 약간 작은 것은 제조과정 중에 수화되지 않은 미반응 MgO 가 존재하는 것이 원인으로 사료된다. 673 K 전후에서 나타나는 큰 폭의 무게 감소는 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 가 MgO 와 H_2O 로 열분해 되는 것으로 여겨서 대부분의 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 가 MgO 로 분해된다. 한편, brucite에서 제조된 시료의 경우 981 K, magnesite에서 제조된 시료는 910 K 근처에서도 작은 무게 감소가 나타나는데, 이는 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 결정의 격자 내부에 안정화 되어있는 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 가 고온에서

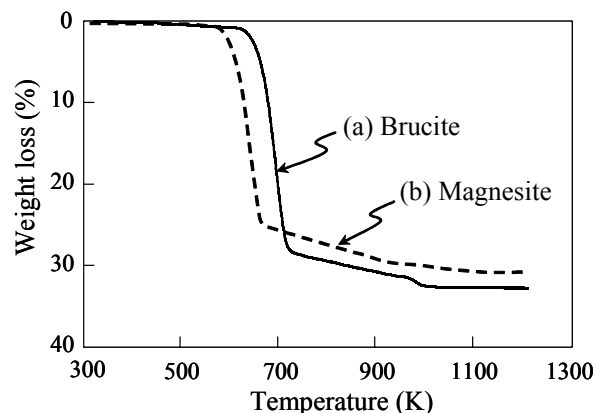


Figure 7. Thermo gravimetric curves of $\text{Mg}(\text{OH})_2$ powder prepared from (a) brucite, and (b) magnesite.

열분해 되면서 나타나는 peak로 추정된다. 전반적으로 brucite에서 제조된 시료가 열분해 온도가 높은 영역에서 일어나고 있는데, 이는 XRD 및 SEM 분석에서도 확인된 바와 같이 brucite에서 제조된 시료가 magnesite의 경우보다 판상구조가 잘 발달되어 있으며 더 안정화되어 있기 때문인 것으로 사료된다.

3.2. Mg(OH)₂ slurry의 탈황 특성

앞에서 언급된 바와 같이 유사한 입도와 순도를 가진 두 종류의 Mg(OH)₂ 분말을 물과 혼합하여 1 wt% 농도의 slurry로 만들어서 탈황성능을 비교하였다. 탈황 실험은 Figure 3에 나타낸 반응기를 사용하여 SO₂ 농도를 1,000~2,000 ppm으로 변화시키면서 SO_x 농도에 따른 두 시료의 탈황성능을 비교하였다. 반응기의 온도는 333.15 K로 동일한 조건에서 비교 실험하였으며, 그 결과를 Figure 8에 나타냈다. 반응기의 특성상 반응기 가동 초기 약 2 min 정도는 Mg(OH)₂ slurry의 공급이 원활하지 못하여 탈황이 거의 일어나지 않지만 약 3min 경과 후에는 거의 일정한 탈황 효율을 나타낸다. Figure 8에 나타낸 바와 같이 SO₂ 농도 1,000~2,000 ppm 사이에서 모두 brucite에서 제조된 시료가 약간 높은 탈황 효율을 보이고 있다. 각 농도별로 3 min 이후의 탈황 효율을 비교하면 brucite에서 제조된 시료는 1,000 ppm에서 91%, 1,500 ppm에서 87%, 2,000 ppm에서 78%였으며, magnesite에서 제조된 시료는 각각 86, 83, 75%로 brucite의 경우보다 3~5%

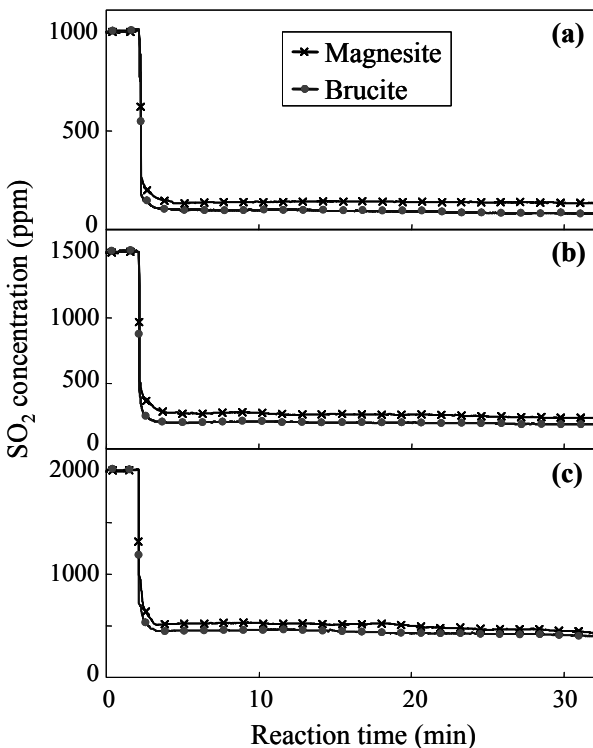


Figure 8. Comparison of de-SO₂ efficiency at 333.15 K by Mg(OH)₂ slurry prepared from brucite and magnesite on the conditions of SO₂ (a) 1000 ppm, (b) 1500 ppm, (c) 2000 ppm.

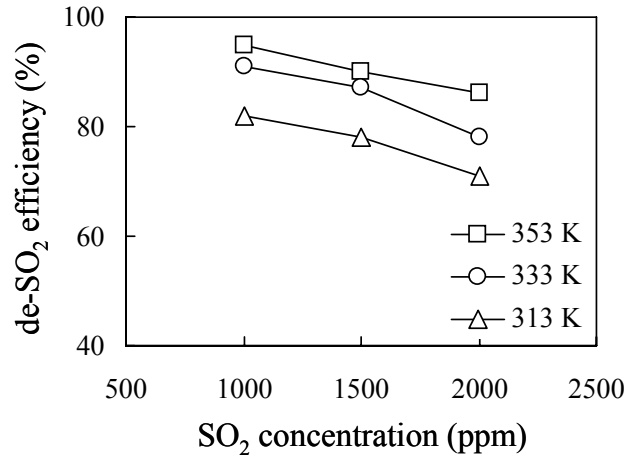


Figure 9. Effects of temperature and SO₂ concentration upon de-SO₂ efficiency by Mg(OH)₂ slurry prepared from brucite.

정도 낮은 수치를 나타냈다. 이와 같이 brucite에서 제조된 시료의 탈황 효율이 약간 높은 것은 앞에서 언급된 XRD, 열분석 등의 분석결과와 일치하는 것으로 사료된다.

Figure 9에는 brucite에서 제조된 1.0 wt% Mg(OH)₂ slurry의 탈황 특성에 대한 온도의 영향을 나타냈다. SO₂ 투입농도가 1,000, 1,500, 그리고 2,000 ppm일 때의 반응온도(313.15, 333.15, 353.15 K)에 따른 de-SO_x 성능의 변화를 나타내었다. 반응온도별 탈황 성능은 SO₂ 주입농도에 관계없이 반응기의 온도가 높을수록, 즉, 353.15 K 영역에서 반응효율이 가장 높게 나타났다. 이는 고온영역에서 알칼리 활성이 우수한 것에 기인된 것으로 보이며, 이 영역에서 알칼리 활성이 SO₂ 가스에 온도에 의해 탈착하려는 능력보다 우수한 것으로 사료된다.

4. 결 론

- 1) Brucite와 magnesite를 원료로 제조된 Mg(OH)₂ 분말의 물리/화학적 차이는 크지 않은 것으로 보이며, brucite에서 제조된 Mg(OH)₂의 결정이 판상구조가 잘 발달되어 있다.
- 2) Brucite와 magnesite를 원료로 제조된 Mg(OH)₂ slurry의 탈황효율은 비슷한 물성 조건에서 brucite가 조금 우수하게 나타났다. 이는 brucite를 발전소의 배연탈황 공정에 충분히 적용할 수 있음을 보여준다.
- 3) Brucite를 탈황제로 개발할 경우, Mg(OH)₂의 제조공정상 문제점인 에너지 비용, 제조시간, 대기오염 문제 등을 동시에 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Miller, M. J., "Retrofit SO₂ and NO_x Control Technologies for Coal-fired Power Plants," *Environ. Prog.*, **3**, 171-177 (1986).
2. Yrjas, P., Iisa, K., and Hupa, M., "Limestone and Dolomite as Sulfur Absorbents under Pressurized Gasification Conditions,"

- Fuel*, **75**(1), 89-95 (1996).
- Lin, R.-B., Shih, S.-M., and Liu, C.-F., "Characteristics and Reactivities of Ca(OH)₂/silica Fume Sorbents for Low-temperature Flue Gas Desulfurization," *Chem. Eng. Sci.*, **58**, 3659-3668 (2003).
 - Cheng, J., Zhou, J., Liu, J., Zhou, Z., Huang, Z., Cao, X., Zhao, X., and Cen, K., "Sulfur Removal at High Temperature during Coal Combustion in Furnaces: a Review," *Prog. Energ. Combust.*, **29**, 381-405 (2003).
 - Kim, H. S., Yoon, Y. I., Lee, H. K., and Kim, S. H., "Study of Desulfurization of Limestone and Crystal Habit of Gypsum by Adding Dibasic Acid as Buffer Additives," *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **13**(5), 468-475 (2002).
 - Wi, Y.-H., Choi, M., Park, S.-J., Rhu, C.-K., and Lee, J.-B., "A Study on Shaping & Characteristics of Coal Gas Sorbent," *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **14**(5), 556-563 (2003).
 - An, H.-S., Park, S.-S., Kim, K.-H., and Kim, Y.-H., "A Study on Optimization of Spray Type Flue Gas Desulfurization (FGD) System," *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **18**(1), 29-35 (2007).
 - Dou, B., Pan, W., Jin, Q., Wang, W., and Li, Y., "Prediction of SO₂ Removal Efficiency for Wet Flue Gas Desulfurization," *Energ. Convers. Manage.*, **50**, 2547-2553 (2009).
 - Reynard, B., and Caracas, R., "D/H Isotopic Fractionation between Brucite Mg(OH)₂ and Water from First-principles Vibrational Modeling," *Chem. Geol.*, **262**, 159-168 (2009).
 - Dong, Y., He, K., Zhao, B., Yin, Y., Yin, L., and Zhang, A., "Catalytic Ozonation of Azo Dye Active Brilliant Red X-3B in Water with Natural Mineral Brucite," *Catal. Commun.*, **8**, 1599-1603 (2007).
 - He, K., Dong, Y., Li, Z., Yin, L., Zhang, A., and Zheng, Y., "Catalytic Ozonation of Phenol in Water with Natural Brucite and Magnesia," *J. Hazard. Mater.*, **159**, 587-592 (2008).