

SO₂ 가스가 황화반응된 CuO/ γ -Al₂O₃ 흡수제의 재생반응에 미치는 영향

정상문 · 유경선 · 김상돈[†]

한국과학기술원 화학공학과
(1996년 6월 21일 접수, 1996년 8월 20일 채택)

Effect of SO₂ Gas on Regeneration of Sulfated CuO/ γ -Al₂O₃ Sorbent

Sang Mun Jeong, Kyung Seun Yoo and Sang Done Kim[†]

Department of Chemical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon 305-701, Korea
(Received 21 June 1996; accepted 20 August 1996)

요 약

열중량 분석기를 이용하여 황화반응된 CuO/ γ -Al₂O₃ 흡수제의 수소 재생반응에서 SO₂ 가스가 미치는 영향을 연구하였다. 황화반응된 CuO/ γ -Al₂O₃ 흡수제의 재생반응 속도는 SO₂ 존재에 의하여 감소되었으며 pseudoequilibrium 상태의 평형 전환율이 나타났다. 평형전환율은 SO₂ 농도 15 vol%까지 농도 증가에 따라 감소하였으며 그 이상의 농도에서는 일정한 값을 유지하였다. SO₂ 가스의 주입을 중지하면 수소에 의한 재생반응이 다시 진행되었으며 SO₂의 농도와 재생반응 온도에 관계없이 일정한 0.9 μ mol SO₂/m²의 탈착량을 보였다.

Abstract—The effect of SO₂ gas on regeneration of the sulfated CuO/ γ -Al₂O₃ sorbent by hydrogen gas has been determined in a thermogravimetric analyzer(TGA). The presence of SO₂ gas reduces the regeneration rate of the sulfated CuO/ γ -Al₂O₃ sorbent and regeneration conversion of pseudoequilibrium state is observed. Equilibrium conversion decreases with increasing SO₂ concentration up to 15 vol% and then remains constant. Without SO₂ gas injection, the regeneration reaction by hydrogen gas resumes and the amount of desorbed SO₂ exhibits a constant value of 0.9 μ mol SO₂/m² regardless of SO₂ concentration and regeneration temperature employed.

Key words: CuO/ γ -Al₂O₃, Regeneration, Pseudoequilibrium, Inhibition Effect

1. 서 론

화석연료의 연소에 의하여 방출되는 SO₂와 NO에 의한 대기오염의 심각성은 이미 잘 알려져 있으며 그에 따른 배출규제 또한 강화되고 있다. SO₂의 제거를 위해서는 석회슬러리를 이용하는 습식탈황법이 상용화되어 있으며 NO의 제거를 위해서는 V₂O₅/TiO₂ 촉매를 이용한 선택적 촉매 환원법이 실용화되어 있다. 그러나 최근에는 탈황과 탈질을 동시에 처리하는 동시 탈황탈질 공정의 연구가 진행되고 있다[1, 2]. 동시제거 공정은 주로 흡수제/촉매를 토대로 개발되고 있으며 산화구리가 담지된 알루미늄이나(CuO/ γ -Al₂O₃) 흡수제/촉매는 SO₂, NO, 동시제거에 효과적인 물질로 알려져 있다. 담지된 CuO와 담체 Al₂O₃는 SO₂와 O₂ 존재 하에 반응하여 CuSO₄와 Al₂(SO₄)₃가 되며 CuSO₄와 미반응된 CuO는 NO 제거를 위한 촉매로서의 역할을 하게 된다[1]. SO₂ 제거능력이 종결된 흡수제는 수소와 메탄과 같은 환원성 가스를 이용하여 재생한 후 공정에서 재사용되고 환원반응에 의하여 생성된 고농도의 SO₂ 가스는 상품성이 있는 황산이나 원소 황으로 전환시켜 처리된다. 이러한 공정에서 황화반응된 흡수제의 재생반응은 공정의 경제성을 좌우하는 중요한 변수가 된다.

고온에서 CuSO₄는 환원가스의 존재없이 CuO와 SO₂로 열분해 된

다. 흡수제의 경우에도 열분해는 동일하게 일어나지만 열분해 속도가 느리고 담체의 열적 소결이 함께 일어나므로 흡수제의 비활성화를 촉진하는 것으로 알려져 있다[3]. 순수한 CuSO₄와 Al₂(SO₄)₃는 수소에 의하여 각각 300 °C와 600 °C 이상에서 환원반응이 진행되어 H₂O와 SO₂를 생성한다[4]. 황화반응된 흡수제에 포함되어 있는 sulfates[CuSO₄와 Al₂(SO₄)₃]는 수소에 의하여 450 °C 이상에서는 효과적으로 재생될 수 있다[4]. CuSO₄의 환원반응에 대해서 고온에서 Cu₂S 생성과 같은 부반응이 환원가스로써 수소를 사용한 경우에 발생하고 메탄의 경우 부반응은 일어나지 않는 것으로 보고되었다[3]. 그러나 메탄의 경우 반응속도가 수소를 이용하는 경우보다 매우 느리므로 일반적으로 수소가 고려되며, Shell사의 경우 deep bed 형태의 재생반응기를 약 400 °C에서 수소를 이용하여 황화반응된 흡수제를 재생하고 있다[6].

재생반응에 의하여 생성되는 SO₂ 가스는 반응기 출구에서 농도가 증가하고 재생된 흡수제 표면과의 재반응으로 재생반응 속도의 감소를 동반하게 된다. 이러한 SO₂ 방해효과는 흡수제의 탈황성능을 감소시키게 되므로 이에 대한 자세한 고찰이 요구된다. 본 연구에서는 SO₂ 농도와 반응온도의 변화가 황화반응된 흡수제의 수소재생반응에 미치는 영향을 열중량분석기(thermogravimetric analyzer)를 이

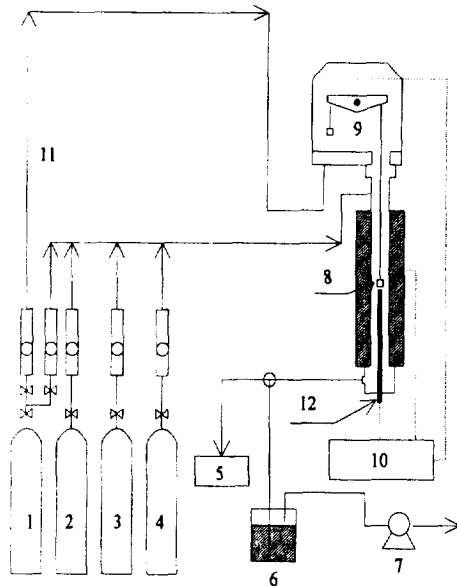


Fig. 1. The schematic diagram of thermogravimetric analyzer.

- | | |
|-------------------------|--------------------|
| 1. N ₂ | 7. Fan |
| 2. Air | 8. Basket |
| 3. SO ₂ | 9. Balance |
| 4. H ₂ | 10. Controller |
| 5. Gas analyzer | 11. Buffering line |
| 6. SO ₂ trap | 12. Thermocouple |

용하여 고찰하였다.

2. 실험

2-1. 흡수제

본 연구에 사용되는 흡수제는 3 mm pellet 형태의 γ -alumina(Strem Chemical)를 이용하여 제조하였다. 먼저 Cu(NO₃)₂·3H₂O를 원하는 정도의 담지량이 되도록 계산하여 증류수에 녹인 후, 회전 진공 증발기내 플라스크에 γ -alumina와 함께 넣는다. 약 70 °C에서 플라스크 내의 수용액이 모두 증발되면 시료를 오븐에서 24시간 동안 건조한다. 건조된 흡수제를 600 °C, 공기 분위기에서 소성시키면 3 mm pellet 형태의 CuO/ γ -alumina의 흡수제가 얻어진다. 이 흡수제를 ball mill로 분쇄한 후 sieving하여 1-1.41 mm를 취하였다. EDX를 이용하여 산화구리의 균일한 담지를 확인하였고 BET 방법을 이용하여 본 실험에 사용된 흡수제의 비표면적(184.7 m²/g), 기공부피(0.39 cc/g) 및 평균 기공크기(84 Å)를 측정하였다.

2-2. 실험장치(열중량분석기-TGA)

본 연구에 사용된 TGA(TGDTA92 Setaram, France)를 Fig. 1에 보였다. 10⁻⁶ g의 정확성을 갖는 전자식 저울을 사용하며, 독성기체가 반응영역 외로 흘러 들어가는 것을 막기 위해 15 mm의 직경을 가진 quartz 관을 이용하였다. 반응기체는 quartz 관 상단으로 주입하여 하단으로 배출되며 반응기 내부에 매달린 백금 basket에 장착된 흡수제와 반응하게 된다. 열원은 외부가열 방식으로 원통형 graphite로 만들어진 가열요소가 furnace 중앙에 위치하여 온도를 PID 제어하며 순환되는 물에 의하여 냉각된다.

2-3. 실험방법

흡수제의 재생반응을 위하여 황화반응이 먼저 선행되어야 한다. TGA에서의 황화반응은 흡수제를 일정한 무게만큼 백금 basket에

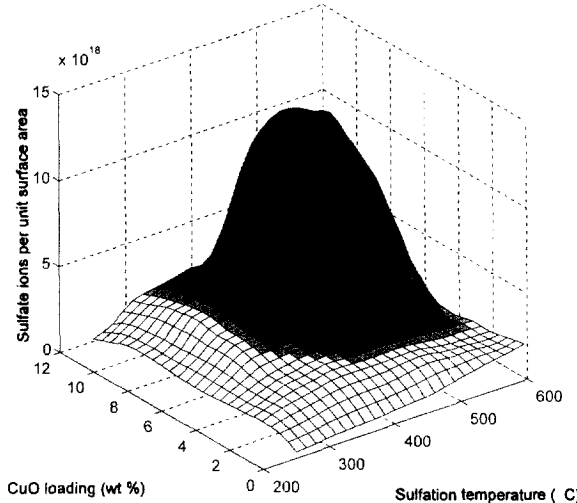


Fig. 2. Three-dimensional diagram for sulfation of alumina as a function of reaction temperature and CuO loading.

장착하고 900 ml/min의 공기유량에서 수행되어야 하는 황화반응 온도까지 온도를 증가시킨다. 원하는 조건에서 TGA가 정상상태에 도달하면 SO₂ 농도가 15,000 ppm이 되도록 SO₂를 주입하여 황화반응을 수행한다. 재생반응은 황화반응된 흡수제는 20 mg을 이용하여 수행되며 N₂ 분위기에서 원하는 반응온도가 되면 H₂ 가스를 주입하여 재생반응을 수행한다. 재생반응에 대한 SO₂ 가스의 영향을 고찰하기 위하여 120 ml/min의 5% H₂/N₂ 가스 분위기에서 SO₂의 농도 및 반응온도를 변화시켜 재생반응을 수행하였다. 반응 동안 열중량 분석기의 전자식 저울의 무게변화는 computer에 저장하여 계산을 수행하였다.

3. 결과 및 검토

3-1. 흡수제의 황화반응과 재생반응

Fig. 2는 CuO/ γ -Al₂O₃ 흡수제에 대하여 산화구리 담지량과 황화반응 온도 변화에 따른 단위면적당 유황산화물 제거량을 3차원으로 보여준 결과이다. 단위면적당 제거된 유황산화물의 양은 Yoo 등[7]이 제시한 바와 같이 반응온도와 산화구리 담지량의 변화에 따라서 크게 세 가지 형태(surface, slightly deep, bulk sulfations)로 나뉜다. 흰색으로 표현된 부분은 surface sulfation으로 알루미늄 담체에서의 유황산화물 제거량이 2.0×10^{18} ions/m² 이하이고 검정색 부분은 유황산화물 제거량이 3.4×10^{18} ions/m² 이상이며 중간 영역에서 slightly deep sulfation이 일어난다. Surface와 slightly deep sulfation의 경우는 유황산화물 제거량이 각각 2.0×10^{18} ions/m²과 3.4×10^{18} ions/m²에서 종결되며 bulk sulfation의 경우 지속적인 담체의 황화반응에 의하여 담체의 33%까지 황화반응에 참여한다. 이렇게 황화반응된 흡수제에 존재하는 sulfate들은 CuSO₄와 Al₂(SO₄)₃의 형태를 띠게 된다.

Fig. 3은 8 wt% CuO/ γ -Al₂O₃ 흡수제를 300-500 °C에서 황화반응시킨 후 수소를 이용하여 반응온도 500 °C에서 재생반응을 수행한 결과를 반응시간에 따라서 도시한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 재생반응 온도 500 °C에서는 2-3 μ mol/m²의 residual sulfate 양을 제외한 산화구리와 알루미늄 자리에서 형성된 모든 sulfate가 재생됨을 알 수 있다. 본 실험에 의하여 측정된 표면에 남아있는 residual sulfate 양은 Nam과 Gavalas[8]가 순수한 알루미늄에 의하여 제거된 SO₂의 양(2.0 μ mol/m²)과 거의 일치한다. Waqif 등[9]은 300 °C에서 황화반응된 흡수제의 수소 재생반응에서 유사한 결과(2.5 μ mol/m²)를 얻었으며 IR 분석을 통하여 residual sulfate가 주로 알루미늄 표

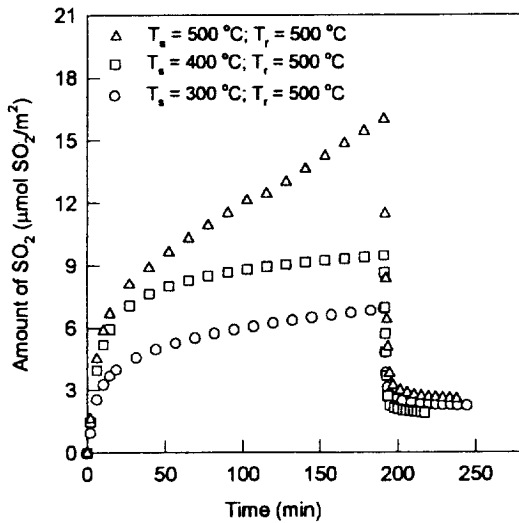


Fig. 3. The first cycle of sulfation and regeneration of CuO/γ-Al₂O₃ sorbent(sulfation temperature, 300-500 °C; regeneration temperature, 500 °C).

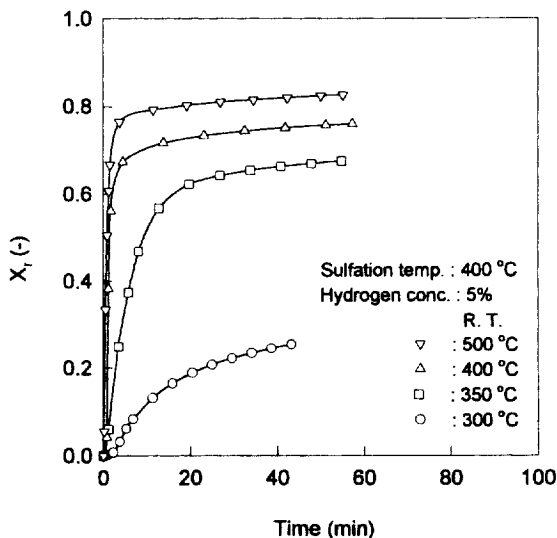


Fig. 4. Regeneration conversion of slightly deep sulfated sorbent($T_s = 400$ °C) as a function of time with variation of regeneration temperature.

면에 존재함을 확인하였다. 이들은 이러한 형태의 sulfate가 이후의 황화-재생반응의 cycle에서도 계속 존재하며 재생된 흡수제의 초기 2-3회의 황화반응 활성을 감소시키는 것으로 보고하였다.

3-2. 반응온도가 재생반응에 미치는 영향

Fig. 4는 황화반응이 진행된 흡수제를 H₂로 환원시킬 경우, 시간에 따른 재생전환율을 보여주는 그림이다. 이 실험에서 수소농도는 5%, 황화반응 온도는 400 °C에서 3시간(S/Cu=1.7) 진행하였다. 400 °C의 황화반응은 slightly deep sulfation이 일어나는 온도영역이다. 재생전환율은 다음과 같이 정의한다.

$$X_r = \frac{\Delta m_{r,SO_3}}{\Delta m_{s,SO_3}} \quad (1)$$

여기서, X_r 은 재생전환율, Δm_r 은 재생반응시 변화된 SO₃의 몰수변화, Δm_s 은 황화반응시 변화된 SO₃의 몰수변화를 나타낸다. 이 반응

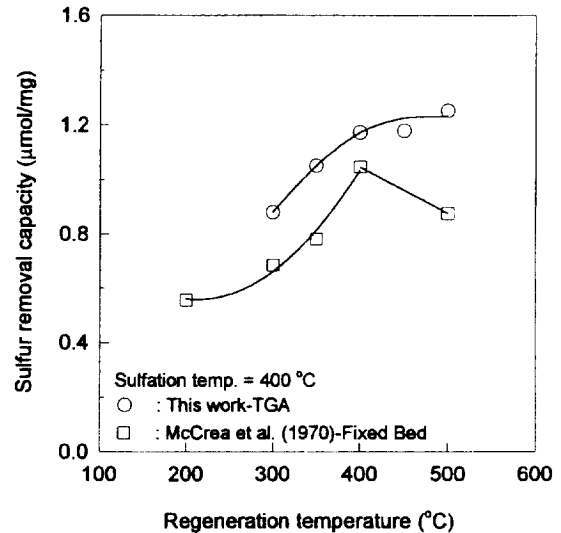
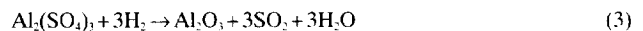


Fig. 5. Effect of the regeneration temperature on sulfur removal capacity of CuO/γ-Al₂O₃ sorbent.

에서 흡수제내의 sulfate로 존재하는 형태는 CuSO₄와 Al₂(SO₄)₃이고, 황화반응된 흡수제와 H₂와의 환원 재생반응에서의 주요 반응은 다음과 같은 반응식 (1)과 (2)이다.



이 그림에서 350 °C 이하에서는 재생반응속도가 느리며, 반응시간 40분 후에도 느린 반응속도로 계속해서 재생반응이 진행되고 있는 것을 알 수 있다. 또한 이 그림은 재생반응의 온도가 400 °C 이상이 되면, 반응속도가 매우 빠르며 반응이 종결되는 시간도 훨씬 빨라짐을 보여주고 있다. 재생온도 500 °C의 경우는 반응이 종결되는 시간이 3분 이내가 된다. Habashi 등[4]은 sulfates의 수소에 의한 환원반응을 연구하여 CuSO₄는 230 °C 이상에서, Al₂(SO₄)₃는 이보다 높은 온도인 430 °C 이상에서 환원반응이 서서히 시작되어 600 °C 이상에서 본격적으로 일어난다고 하였다. Fig. 4에서 보인 400 °C 이하의 낮은 재생전환율은 황화반응된 흡수제내에 Al₂(SO₄)₃의 형태가 많이 존재하여 이 온도에서는 재생이 진행되지 않기 때문이다. 그러나, Al₂(SO₄)₃는 400 °C 이상에서는 수소에 의해 환원반응이 진행되는데, 이는 환원된 금속 Cu에서 수소의 spillover 현상이 일어나 Al₂(SO₄)₃의 환원반응이 촉진되기 때문이다[5].

3-3. 재생반응온도가 재황화반응에 미치는 영향

Fig. 5는 400 °C에서 황화반응된 흡수제를 300-500 °C에서 수소로 재생한 후 400 °C에서 재황화반응시켰을 때의 유황산화물 제거용량을 도식한 것이다. 열중량분석기에서 수행한 결과는 재생반응 450 °C까지는 재생반응온도가 증가할수록 재생된 흡수제의 유황산화물 제거능력이 증가하고 450 °C 이상에서는 유황산화물 제거능력이 일정하게 유지됨을 볼 수 있다. McCrea 등[3]이 제시한 고정층 반응기 실험결과와 비교하여 재생된 흡수제의 유황산화물 제거능력은 재생반응 온도 400 °C에서 최대값을 보인다. 이러한 결과의 차이는 최근 Harriot과 Markussen[11]이 보고한 SO₂ 방해효과에 의하여 설명될 수 있다. 그들은 황화반응된 흡수제의 재생반응속도가 열중량분석기에 비하여 고정층 반응기에서 급격히 감소하는 것을 고찰하였다. 이러한 차이는 재생된 흡수제로부터 발생하는 SO₂ 가스가 흡수제에 다시 흡착반응하여 발생하는 것으로 설명하였다. 재생반응 중에 흡착된 SO₂는 재황화반응에서 흡수제의 황화반응 활성을 감소시키게 되

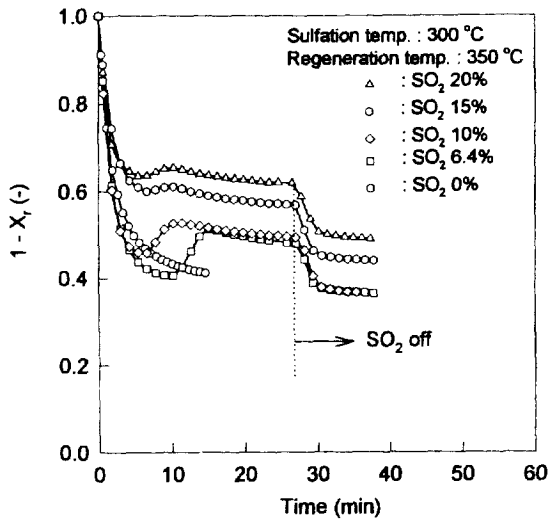


Fig. 6. Weight loss ($1 - X_t$) of the sulfated CuO/ γ -Al₂O₃ sorbent as a function of reaction time with variation of SO₂ concentration at 350 °C in 5 vol% H₂/N₂.

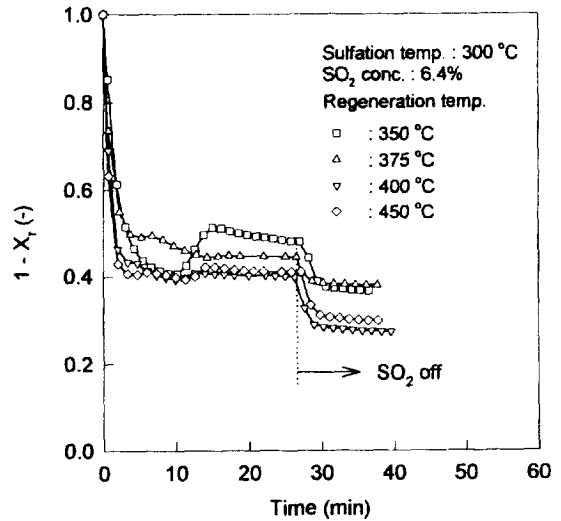


Fig. 7. Weight loss ($1 - X_t$) of the sulfated CuO/ γ -Al₂O₃ sorbent as a function of reaction time with variation of temperature in 6.4 vol% SO₂/vol% H₂/N₂.

므로 흡수제의 유황산화물 제거능력을 감소시키게 된다.

3-4. 흡수제의 재생반응에 대한 SO₂의 영향

고정층 재생반응기의 경우 황화반응된 흡수제의 환원반응에 의하여 발생하는 SO₂가 층의 상단부분으로 향하고 상대적으로 수소의 농도는 작아지게 된다. 이 경우 층의 상단에서는 부분적으로 SO₂의 농도가 높은 영역이 생기고 흡수제의 수소 재생반응에서 SO₂ inhibition 효과를 가져오게 된다.

Fig. 6은 재생반응온도 350 °C에서 SO₂의 농도변화가 surface sulfate의 수소재생반응(5 vol% H₂)에 미치는 영향을 시간에 따른 재생 전환율로 표시하였다. Fig. 6에 보인 바와 같이 황화반응된 흡수제의 재생반응에서 초기속도는 SO₂의 농도가 증가함에 따라서 감소한다. 이것으로써 흡수제의 수소에 의한 재생반응에서 SO₂가 inhibition 효과를 야기시킨다는 것을 알 수 있다. 모든 실험조건에서 초기의 빠른 무게 감소 후에 다시 무게 증가 현상이 일어난다. 이 현상은 흡수제의 표면에 가스 상의 SO₂가 흡착되기 때문이다. H₂/N₂ 분위기에서 SO₂의 존재시, 황화반응된 흡수제(CuO/γ-Al₂O₃)에서 일어나는 반응은 sulfate들[CuSO₄, Al₂(SO₄)₃]의 수소에 의한 환원반응과 흡수제 표면으로 SO₂의 흡착이 경쟁적으로 일어나게 된다. 재생반응 초기에는 H₂에 의한 sulfate들의 환원반응이 흡수제 표면으로의 SO₂ 흡착보다 훨씬 빠르게 일어나며, 따라서 흡수제의 무게 감소가 나타나게 된다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 SO₂의 농도가 증가하면 SO₂ 가스에 의한 흡착속도가 빠르게 일어나게 되며, 따라서 흡수제의 초기 재생반응속도는 감소하게 된다. 황화반응된 흡수제의 재생반응이 진행됨에 따라 흡수제에 존재하는 sulfate들의 양은 점점 줄어들게 되고, 흡수제 표면에 SO₂의 흡착이 가능한 Cu site가 증가하게 된다. 그 결과로써, 재생반응의 후반부에서는, SO₂ 흡착이 sulfate들의 환원반응보다 지배적으로 일어나며, 흡수제의 무게 증가 현상이 나타난다. 그 후, 흡수제에 존재하는 sulfate들의 H₂에 의한 환원반응속도와 흡수제 표면으로의 SO₂ 흡착 속도가 비슷해져서 pseudoequilibrium 형태의 평형이 이루어진다[11]. 이러한 pseudo-equilibrium은 반응시간이 계속됨에 따라 유지가 되고 SO₂의 공급을 중단하면 수소에 의한 환원반응만이 유지되고 흡수제의 무게 감소가 이루어지며 환원반응은 종결된다. 초기의 환원반응속도와 pseudoequilibrium에서의 재생반응 전환율은 SO₂의 농도가 증가할수록 감소함을 보이고 있다. 그

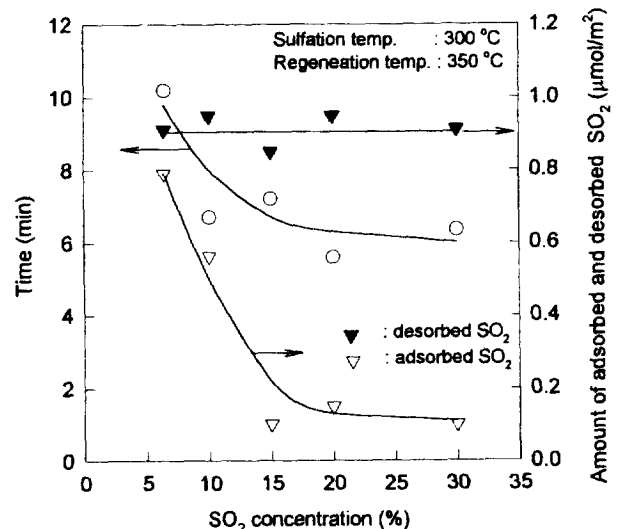


Fig. 8. Effect of SO₂ concentration on the amount of adsorbed and desorbed SO₂ and the time of weight gain in 5 vol% H₂/N₂.

러나 SO₂ 동시주입을 제거하였을 경우의 탈착된 SO₂의 양은 SO₂의 농도와는 무관하게 일정한 값을 보이고 있다. 이러한 결과는 재생된 흡수제에 SO₂가 흡착될 수 있는 자리가 일정함을 의미하고, SO₂는 주로 Cu site에 흡착되는 것으로 보고되어 있다[1].

Fig. 7은 SO₂ 농도 6.4%와 5%의 수소에서 황화반응된 흡수제(surface sulfate)의 반응시간에 따른 재생전환율을 재생반응온도 변화에 따라서 도시한 것이다. 재생반응시 SO₂ 가스의 재흡착으로 나타나는 pseudoequilibrium 전환율은 반응온도가 증가함에 따라서 수소에 의한 흡수제의 재생전환율이 증가하므로 증가하게 된다. 그러나 SO₂ 가스 주입을 중지하면 반응온도 350 °C 이상에서는 온도 증가에 따라 일정한 양의 탈착량이 보임을 알 수 있다. 이러한 이유는 SO₂ 흡착이 주로 구리자리에서 일어나며[1], 구리의 환원은 350 °C 이상에서 모두 재생되기 때문이다.

Fig. 8은 SO₂ 가스 농도가 흡착반응에 의한 무게 증가가 나타나기 시작하는 시간과 증가한 무게 그리고 탈착량에 미치는 영향을 나타내었다. 흡착반응이 나타나기 시작하는 시간과 그 시간 이후에서 발

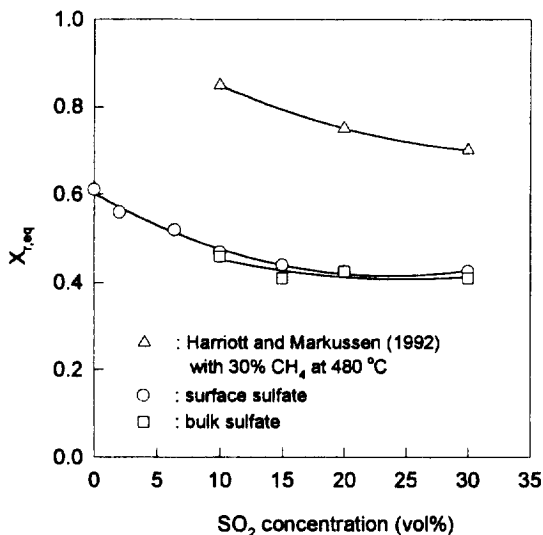


Fig. 9. Effect of SO₂ concentration on the pseudoequilibrium regeneration conversion.

생하는 무게 증가량은 SO₂ 농도 15 %까지 급격하게 감소하고 그 이후에는 시간과 흡착량이 일정하게 유지되었다. 그러나 SO₂ 주입을 중지하였을 때 탈착량은 일정하게 유지되었으며 그 이유는 앞서 밝힌 듯이 SO₂의 흡착이 환원된 구리자리에서 일어나기 때문이다. 높은 SO₂ 농도에서는 황화반응된 흡수제내의 sulfate들의 수소에 의한 환원반응과 경쟁적으로 일어나는 SO₂ 흡착속도가 낮은 SO₂ 농도의 경우보다 커져서 이 황화반응된 흡수제의 초기 재생반응속도에 영향을 주게 되며, 그 결과로써 재생반응에서 SO₂ 가스의 방해효과는 초기 재생반응속도를 늦추게 한다. 따라서, 흡수제가 재생될 때 SO₂의 흡착속도가 sulfate들의 환원속도보다 지배적으로 나타남으로써 야기되는 무게 증가 현상이 SO₂ 농도가 높을수록 빠른 시간에 나타난다. 또한, 흡착된 SO₂의 양 역시 SO₂ 농도가 증가함에 따라서 감소하며, 이러한 감소는 15 %의 SO₂ 농도까지 나타나고 그 이상의 농도에서는 일정해진다.

Fig. 9는 동일한 양의 유황산화물 제거용량을 갖는 surface sulfate와 bulk sulfate의 수소재생반응에서 SO₂의 농도가 흡수제의 평형전환율에 미치는 영향을 나타내고 있다. 평형전환율은 SO₂의 농도가 증가할수록 감소하며 SO₂ 농도 15 % 이상에서 일정한 값을 보인다. Surface sulfate와 bulk sulfate의 차이점은 거의 나타나지 않았으며 두 경우 모두 SO₂ 농도 15 vol% 이상에서 0.4의 평형전환율을 나타내었으며, 이 값은 황화반응된 흡수제의 재생전환율이 SO₂가 존재하지 않을 때의 값보다 약 30 % 정도 감소시킨다는 것을 보여준다. 황화반응된 CuO/ γ -Al₂O₃ 흡수제의 메탄을 이용한 재생반응에서도 본 경우와 유사하게 SO₂의 농도증가에 따라 평형전환율이 SO₂ 농도 30 vol%까지 감소하였다[11]. 그러나 재생반응 전환율은 반응온도(480 °C)와 메탄의 농도가 높기 때문에 본 실험결과 보다 높은 재생

전환율을 보이고 있다.

4. 결 론

이상 열중량분석기에서 황화반응된 흡수제의 수소에 의한 재생반응에 대한 SO₂ 가스가 미치는 영향에 대한 연구의 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 재생반응온도가 증가할수록 황화반응된 흡수제의 재생반응 전환율은 증가하였고 400 °C 이상에서 알루미늄 자리에 반응한 SO₂의 환원반응이 진행되었다.
- (2) 황화반응된 흡수제의 수소에 의한 재생반응에서 생성된 SO₂ 가스는 재생반응속도를 감소시키며 pseudoequilibrium 상태의 평형 전환율을 나타내었다.
- (3) SO₂의 방해효과에 의한 pseudoequilibrium 평형전환율은 SO₂ 농도가 15 %까지 증가할수록 지속적으로 감소하였다.
- (4) SO₂ 주입을 중지하면 재생반응이 지속되며 재생반응에 의한 무게감소는 SO₂ 농도와 재생반응온도에 관계없이 일정한 0.9 $\mu\text{mol/m}^3$ 의 값을 보였다.

감 사

본 연구에 연구비를 지원해준 통상산업부에 감사드립니다.

참고문헌

1. Centi, G., Riva, A., Passarini, N., Brambilla, G., Hodnett, B. K., Delmon, B. and Ruwet, M.: *Chem. Eng. Sci.*, **45**, 2679(1990).
2. Yeh, J. T., Ma, W. T., Pennline, H. W., Haslbeck, J. L., Joubert, J. I. and Gromicko, F. N.: *Chem. Eng. Comm.*, **114**, 65(1992).
3. McCrea, D. H., Forney, A. J. and Myers, J. G.: *J. Air Pollution Control Association*, **20**, 819(1970).
4. Habashi, F. and Mikhail, S. A.: *Can. J. Chem.*, **54**, 3646(1976).
5. Yoo, K. S., Jeong, S. M., Kim, S. D. and Park, S. B.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **35**, 1543(1996).
6. Dautzenberg, F. M., Nader, J. E. and van Ginneken, A. J. J.: *Chem. Eng. Prog.*, **67**, 86(1971).
7. Yoo, K. S., Kim, S. D. and Park, S. B.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **33**, 1786(1994).
8. Nam, S. W. and Gavalas, G. R.: *Appl. Catal.*, **55**, 193(1989).
9. Waqif, M., Saur, O., Lavalley, C., Perathoner, S. and Centi, G.: *J. Phys. Chem.*, **95**, 4051(1991).
10. Yeh, J. T., Drummond, C. J. and Joubert, J. I.: *Environmental Progress*, **6**, 44(1987).
11. Harriot, P. and Markussen, J. M.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **31**, 373(1992).