

Zinc Titanate 탈황제의 탈황 · 재생 반응 속도 해석

이창근 · 조성호 · 손재익 · 문영섭* · 최정후*†

한국에너지기술연구원

*건국대학교 화학공학과

(2000년 7월 13일 접수, 2001년 1월 9일 채택)

An Analysis of Desulfurization and Regeneration Reaction Rates of Zinc Titanate Sorbent

Chang-Keun Yi, Sung-Ho Cho, Jae-Ek Son, Young-Sub Moon* and Jeong-Hoo Choi*†

Korea Institute of Energy Research, Taejeon 305-343, Korea

*Department of Chemical Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

(Received 13 July 2000; accepted 9 January 2001)

요 약

석탄가스중의 황화수소를 제거하기 위한 zinc titanate 탈황제의 탈황 반응 및 재생 반응 특성을 열 중량 분석기를 이용하여 측정 및 고찰하였다. 탈황 반응에는 새 탈황제를, 재생 반응에는 53% 황화된 탈황제를 사용하였다. 황화 반응은 600-750 °C, 재생 반응은 650-750 °C의 온도 범위에서 수행되었다. 재생 반응의 산소 농도 범위는 3-21 부피%이었다. 탈황 및 재생 반응의 활성화 에너지는 각각 13.36 kcal/gmol, 37.94 kcal/gmol이었다. 재생 반응의 산소 농도에 대한 반응 차수는 0.662이었다. 탈황 반응 속도는 탈황제의 전환율이 증가함에 따라 감소하여 전환율 0.789에서 활성이 소멸되었다. 재생 반응은 전환율이 증가함에 따라 증가하여 전환율 약 0.5에서 최대 값을 보인 후 감소하였다. 탈황 및 재생 반응에 대한 상관식을 제시하였다.

Abstract – Characteristics of desulfurization and regeneration reactions of a zinc titanate sorbent used to absorb hydrogen sulfide in coal gas have been investigated by using a thermo-gravimetric analyzer. Desulfurization was carried out with fresh sorbent and regeneration with sorbent sulfurized as much as 53%. Temperature ranged from 600 °C to 750 °C and from 650 °C to 750 °C for desulfurization and regeneration, respectively. Oxygen concentration ranged from 3 vol% to 21 vol% for regeneration. Activation energies of desulfurization and regeneration were found as 13.36 kcal/gmol and 37.94 kcal/gmol, respectively. The order of regeneration reaction with respect to oxygen concentration was found as 0.662. The rate of desulfurization decreased as the conversion of sorbent increased. The desulfurization ability of sorbent was depleted at a conversion about 0.789. The rate of regeneration decreased after an initial increase as conversion increased. The maximum regeneration rate occurred at a conversion about 0.5. Rate equations of desulfurization and regeneration were suggested.

Key words: Fluidized Bed, Desulfurization, Sorbent, Zinc Titanate, Hydrogen Sulfide

1. 서 론

석탄 가스화 복합 발전(IGCC) 공정에서 가스 터빈에 유입되는 연료 기체 중에서 H_2S 및 COS 를 제거는 가스 터빈의 부식을 방지하기 위하여 매우 중요하다. 석탄 가스화로에서 생산되는 연료 가스 중에는 H_2S 및 COS 가 포함되어 있으며, 이들은 가스 터빈에 유입되기 앞서 탈황 공정을 거쳐서 제거된다[1-4]. 열 효율의 제고를 위해서 고온에서 운전되는 건식 탈황 기술은 순수 금속 산화물이나 첨가제를 가한 금속 산화물 또는 복합 금속 산화물을 탈황제로 사용하며 연료 가스 중 H_2S 나 COS 를 선택적으로 흡수하는 탈황공정, 황을 흡수한 탈황제를 재생시키는 재생 공정 그리고 재생 공정에서 발생하는 SO_2 를 회수하는 유황 회

수공정으로 구성되어 있다[5].

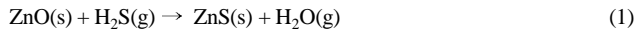
탈황 공정에는 초기에 고정층 반응기가 적용되었으나, 온도 제어 성능이 미흡하여 국부 과열 현상이 발생하고 이로 인한 탈황 성능의 저하가 보고되어 이동층과 유동층 탈황 공정이 개발되었다. 그중 유동층 탈황 공정은 재생로의 온도 제어성이 탁월하고 연속 조업에 여러 장점을 가지고 있어서 이 공정에 가장 적합한 탈황제를 제조하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. ZnO 흡착제는 황화 수소의 제거 성능과 재생성이 매우 우수한 것으로 보고되어 왔으며, 고온에서 증발되는 단점을 보완하기 위해서 Fe_2O_3 , TiO_2 , CuO 등과 같은 금속 산화물을 첨가한 복합 금속 산화물 흡착제의 제조가 활발히 연구되어 왔다. 유동층 탈황 공정에 사용되는 탈황제는 큰 탈황 능력과 아울러 내마모성도 좋아야 하는데 zinc titanate 탈황제가 이 조건들을 만족시킬 수 있을 것으로 기대되는 유력한 탈황제들 중의 하나이다[6-8].

†E-mail: choijhoo@konkuk.ac.kr

새로이 제조된 탈황제는 반응기에 적용되기 앞서서 기본적인 반응 특성이 측정되어야 한다. 본 연구에서는 유동층 탈황 공정에 적합하게 제조된 한 zinc titanate 탈황제의 탈황 및 재생 반응 특성을 열 중량 분석기(TGA, thermo-gravimetric analyzer)를 사용하여 측정 및 고찰하였다. 탈황 반응 속도에 대한 온도 및 전환율의 영향과 산화적 재생 반응 속도에 대한 온도, 산소 농도, 전환율의 영향에 중점을 두어 반응 특성을 고찰하였고 각 반응에 대한 속도식을 제시하였다.

2. 이론적 배경

Zinc titanate 탈황제는 ZnTiO_3 , $\text{Zn}_2\text{Ti}_3\text{O}_8$, 그리고 Zn_2TiO_4 의 세 가지 종류의 결정 구조로 합성되며[9], zinc/titanium의 비가 높은 Zn_2TiO_4 가 황 수용 능력이 가장 높다. Ti는 탈황 작용을 하지 않고 Zn이 고온에서 휘발되는 것을 억제하고 또 탈황제의 내마모성을 증가시키며, 반응은 순수하게 zinc에 의해서 이루어진다. Zinc titanate 탈황제의 탈황 반응은 환원 반응이 포함되는 zinc ferrite 탈황제와 비교해 반응 단계가 간단하다. 결과적으로 zinc titanate 탈황제의 탈황 및 재생 반응은 다음과 같이 고려될 수 있다.



반응 구조가 알려지지 않은 불균일 반응의 속도 식은 Arrhenius 식 형태로 나타낼 수 있으며, 탈황 및 재생 반응에 대해서 다음과 같이 표현될 수 있다[10].

$$\frac{dX}{dt} = k_0 f(X) e^{-E/(RT)} C_{\text{H}_2\text{S}}^n \quad (3)$$

$$\frac{dX'}{dt} = k'_0 f'(X') e^{-E'/(RT)} C_{\text{O}_2}^{n'} \quad (4)$$

위 식들에서 X와 X'는 각각 탈황 반응과 재생 반응에서 탈황제의 전환율, t는 반응 시간, k_0 와 k'_0 는 각각 탈황 반응과 재생 반응의 빈도 인자, 함수 f와 f'는 각각 탈황 반응과 재생 반응의 전환율의 영향을 나타내는 항, E와 E'는 각각 탈황 반응과 재생 반응의 활성화 에너지, $C_{\text{H}_2\text{S}}$ 와 C_{O_2} 는 각각 탈황 반응과 재생 반응에서 H_2S 와 O_2 의 몰농도, n과 n'는 각각 H_2S 와 O_2 몰농도의 반응 차수를 나타낸다. 함수 f는 반응 표면적으로서 탈황제 세공의 크기, 모양, 분포 상태 등에 영향을 받는 값으로 예측이 용이하지 않다. 열 중량 분석기에서 측정되는 탈황제의 반응 전환율은 반응이 시작된 후 탈황제의 누적 무게 변화를 탈황제가 완전히 반응하였을 경우의 이론 총괄 무게 변화에 대한 비로 나타낸다. 탈황 반응의 경우에는 무게가 증가하며, 재생 반응의 경우에는 무게가 감소한다.

3. 실험

3-1. 탈황제

실험에 사용된 zinc titanate 탈황제는 실제 공정에서 사용되는 탈황제로서 ZnO/TiO_2 몰 비 1.5로 구성되며, 각 고체를 100 μm 이하의 미분말로 분쇄한 다음 전체 시료 양에 대하여 2 wt%의 결합제를 첨가하여 성형하였다. 성형 입자는 800 $^\circ\text{C}$ 에서 2시간 동안 소성된 후 사용되었다(입도 100-200 μm)[11]. 탈황 반응에는 반응하지 않은 탈황제를 사용하였으며, 재생 반응에는 53% 황화된 탈황제를 사용하였다.

3-2. 실험장치

탈황제의 탈황·재생 반응실험에는 열 중량 분석기[Du Pont TGA (thermo-gravimetric analyzer)-951]를 사용하였다. 이 TGA는 Fig. 1과 같

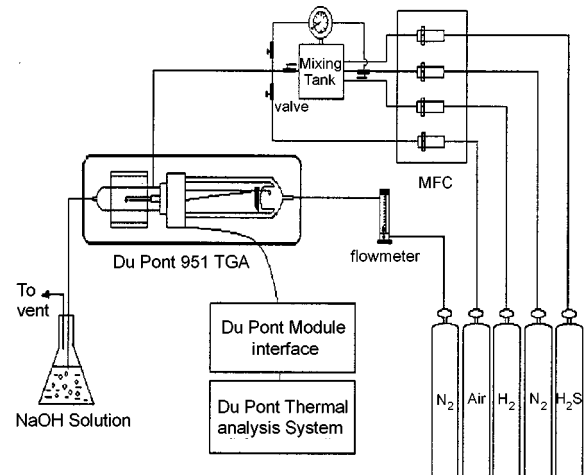


Fig. 1. Flow diagram of a thermo-gravimetric analyzer system.

이 수평형 반응기로 반응 기체를 최대 1 l/min까지 흘려 보낼 수 있다. 반응기는 직경 23 mm의 수정관이고, 부식 기체에 의한 무게 감지부의 오염을 방지하기 위해 감지부 뒤쪽에서 질소 기체를 흘려 보냈다. 이 장치의 무게 측정 한계는 2 μg 이며, 시료와 시료 접시를 포함하여 500 mg까지 무게 측정이 가능하다. TGA 반응기의 제어 및 측정값의 저장은 Du Pont 9900 열 분석기에 의해 이루어진다. 이 열 분석기에 의해 TGA-951 열 중량 분석기의 가열로는 0.5-100 $^\circ\text{C/min}$ 범위의 속도로 가열될 수 있으며, 노 내 온도가 1,200 $^\circ\text{C}$ 까지 변화될 수 있다. 또한 컴퓨터에 저장된 결과를 시간, 온도, 무게감량, 감량 속도 등으로 도시할 수 있다.

3-3. 실험방법

Zinc titanate 탈황제는 650 $^\circ\text{C}$ 에서 우수한 탈황 능력을 보이며, 재생 반응은 500 $^\circ\text{C}$ 이하의 온도에서는 반응 속도가 매우 느리고 500-600 $^\circ\text{C}$ 영역에서는 600 $^\circ\text{C}$ 와 거의 유사한 결과를 나타냄이 보고된 바 있으며[12, 13], 반응 속도 측정 실험에 앞서서 예비 실험을 통하여 이와 유사한 경향을 관찰할 수 있었다. 본 실험의 범위는 이를 기반으로 결정하였다. 반응의 불활성 분위기 기체로는 N_2 를 사용하였다. 주입되는 기체들은 각각의 유량계로 조절되었으며, 혼합 후 반응기로 유입되었다.

Table 1은 실험조건을 요약하여 나타낸다. 탈황 반응에서는 실제 공정에서 H_2S 의 농도가 매우 작기 때문에 H_2S 에 대한 농도 차수는 1차로 간주하고 상압 하에서 반응 온도에 따른 영향만을 고려하였다. 반응 온도는 600, 650, 700, 750 $^\circ\text{C}$ 를 고려하였다. 반응 기체는 H_2 8.6%, H_2S 1.0% 나머지는 N_2 로 실제 탈황로의 기체와 유사한 조성을 갖도록 하였다. 재생 반응에서는 상압 하에서 반응 온도의 영향과 산소 농도의 영향을 고려하였다. 반응 온도는 650, 700, 750 $^\circ\text{C}$, O_2 농도는 3, 10, 21% 나머지는 N_2 로 변화시켰다. 반응이 진행되는 중의 시료 무게의 변화는 0.1 min 간격으로 측정되었다.

Table 1. Experimental conditions

Variables	Ranges	
	Desulfurization	Regeneration
Temperature($^\circ\text{C}$)	600, 650, 700, 750	650, 700, 750
Pressure(atm)	1	1
Gas composition(vol%)		
H_2	8.6	
H_2S	1.0	
O_2		3, 10, 21
N_2	Balance	Balance

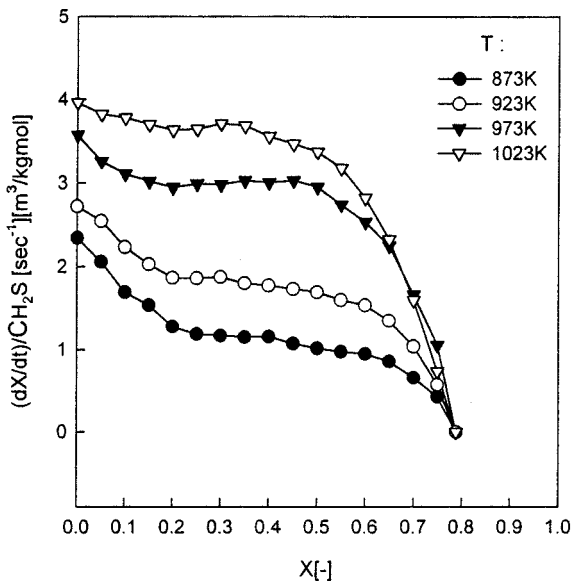


Fig. 2. Effect of conversion on rates of desulfurization reaction at various temperatures(n=1).

각 반응에서 시료의 무게는 약 11-21 mg정도로 조절되었다. 반응 온도에 이르기 위해서 시료가 올려진 TGA를 150 ml/min의 N₂로 퍼지(purge)시키며 약 0.83 °C/sec로 가열하였다. 반응 온도에 이르면 TGA를 등온 상태로 유지시켰으며, N₂ 주입을 조성이 설정된 반응 기체(총괄 유량 150 ml/min)로 전환하여 주입시켜 반응을 진행시키며 시료의 무게 변화를 측정하였다. 시간에 따른 무게 변화가 거의 없는 시기를 반응의 완결로 간주하였다. 측정된 시간에 따른 무게 변화를 이용하여 이론 무게 변화에 근거한 단위 시간당 전환율을 계산하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 탈황반응

탈황반응에서 시료의 무게는 반응이 진행됨에 따라 증가하며, 기울기가 매우 완만하여 더 이상 증가하지 않는 시기를 반응의 완결로 간주하였다. 탈황제의 제조 조건으로 계산되는 완전 반응시 이론 무게 증가를 기준으로 전환율을 계산하였으며, 단위 시간당 전환율의 변화를 결정하였다. 탈황 반응에서는 실제 탈황량의 H₂S 농도가 매우 작기 때문에 H₂S의 반응 차수를 1차로 가정하였다.

Fig. 2는 측정된 결과로부터 얻어진 탈황 전환율(X)에 따른 H₂S 농도로 나누어진 단위 시간당 전환율의 변화 즉 반응 속도를 온도별로 나타낸다. 반응 속도는 예측되는 바와 같이 온도가 증가함에 따라 증가하였으며 아울러 반응의 전환율에 영향을 받았다. 반응 전환율의 영향은 기체-고체 불균일 반응이 계면의 구조에 영향을 받음을 의미하며, 이는 충분히 예측될 수 있는 경향이다. 그림에서 나타내는 바와 같이 대체로 네 가지 온도 조건에서 반응 속도는 초기에는 전환율이 증가함에 따라 감소한 후 일정한 과정을 거쳐서 감소하는 경향을 나타내었다. 반응은 평균 전환율 0.789에서 거의 완결되어 활성이 소멸되는 것으로 나타났다. 본 실험에서 사용된 zinc titanate 탈황제는 zinc ferrite 탈황제와는 달리 최종 전환율이 온도에 상관없이 거의 같은 값으로 나타낸다는 것을 확인할 수 있었다[14].

식 (3)에서 탈황 반응의 활성화 에너지를 구하기 위하여 ZnO의 전환율 별로 실험 온도의 역수에 대하여 전환속도의 대수 값을 Fig. 3에 나타내었다. 반응 속도의 결정에 비교적 오차가 클 것으로 예측되는 전환율 0.1의 경우를 제외한 전환율 0.2-0.7에서 얻어진 직선의 기울기들을

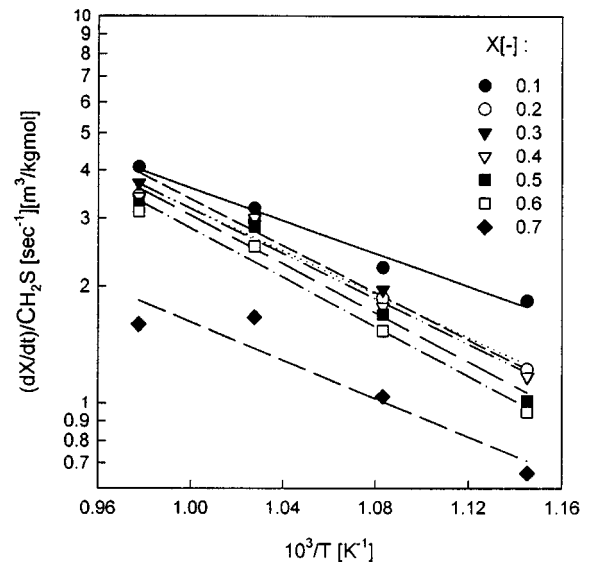


Fig. 3. Effect of temperature on the rate of desulfurization reaction at various conversions(n=1).

산출 평균하여 활성화 에너지로 결정하였다. 본 탈황제의 탈황 반응의 평균 활성화 에너지는 13.36 kcal/gmol로 계산되었다. 강 등[15]은 2 wt%의 bentonite를 첨가한 zinc titanate(ZnO/TiO₂ mol ratio=1.5) 탈황제의 활성화 에너지를 15.29 kcal/gmol로 보고한 바 있으며, 나 등[5]은 2 wt%의 kaoline을 첨가한 ZT01, 2 wt%의 bentonite를 첨가한 ZT02 zinc titanate 탈황제에 대하여 활성화 에너지가 각각 9.01 kcal/gmol, 10.35 kcal/gmol임을 보고한 바 있고, 이 등[6]은 조립법(granulation)에 의해 제조된 zinc titanate 탈황제의 황화 반응에서 활성화 에너지가 15-20 kcal/gmol임을 보고한 바 있다. 본 실험에서 얻어진 활성화 에너지는 앞서 보고된 값들의 중간 값에 해당하는 것으로 나타났다.

Fig. 4는 식 (3)으로부터 유도되는 기체-고체 불균일 반응에서 계면의 구조의 영향이 포함된 빈도 인자를 전환율에 따라 나타낸다. 전환율 0.17 이상에서는 모든 온도 조건에서 유사한 경향을 나타내었으나 전환율 0.17 이하에서는 온도에 따라 다소 분산되는 경향을 나타내었다. 이는 반응 초기의 반응 속도가 매우 민감하여 반응 속도의 결정에 다소 큰

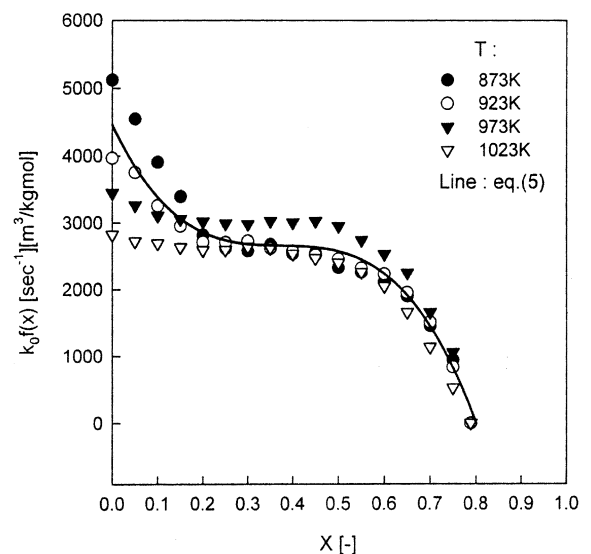


Fig. 4. Conversion versus $k_0 f(X)$ in desulfurization reaction.

오차가 발생하였기 때문으로 사료되었다. 평균적인 경향은 전환율이 증가함에 따라 전환율 0.17 이하에서는 다소 급격한 감소를 보이나, 전환율 0.17-0.6 구간에서는 매우 완만한 감소를 나타냈으며, 전환율 0.6 이상에서는 급격한 감소를 나타내었다. 결과적으로 계면 구조의 영향이 포함된 빈도 인자는 ZnO의 전환율 X 를 변수로 하는 다음의 상관식을 나타낼 수 있었다. 그림에서 실선은 상관식을 나타낸다.

$$k_0 f(X) = -3.334 \times 10^4 (X^3 - 1.121 X^2 + 0.423 X - 0.134) \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kgmol} \cdot \text{s}} \right] \quad (5)$$

4-2. 재생반응

재생 반응에서 시료의 무게는 반응이 진행됨에 따라 감소하며, 기울기가 매우 완만하여 더 이상 감소하지 않는 시기를 반응의 완결로 간주하였다. 탈황제의 제조 조건과 53% 황화된 조건으로 계산되는 완전 반응시 이론 무게 감소를 기준으로 전환율을 계산하였으며, 단위 시간당 전환율의 변화를 결정하였다.

Fig. 5는 계산된 전환율과 단위 시간당 전환율의 변화를 온도 및 산소 농도별로 나타낸다. 재생 반응은 모두 전환율 1에서 반응이 완결되었다. 반응 속도는 온도가 증가함에 따라 증가하여 1,023 K에서 반응 속도는 923 K에서 보다 약 10배 증가하였으며, 산소 농도의 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 탈황 반응에서와 같이 반응 속도는 전환율에도 영향을 받는 것으로 나타났다. 973 K와 1,023 K에서는 전환율이 증가함에 따라 반응 속도가 증가하여 전환율 약 0.5에서 최대 값을 보인 후 감소하는 경향을 나타내었다. 온도 923 K에서 반응 속도는 느리게 진행되어 초기에는 거의 일정하게 유지되었고, 전환율 약 0.4에서부터 증가하기 시작하여 전환율 0.6-0.8에서 최대 값을 보인 후 감소하는 경향을 나타내었다. 이와 유사한 초기 경향은 반응 온도 973 K에서도 나타났다.

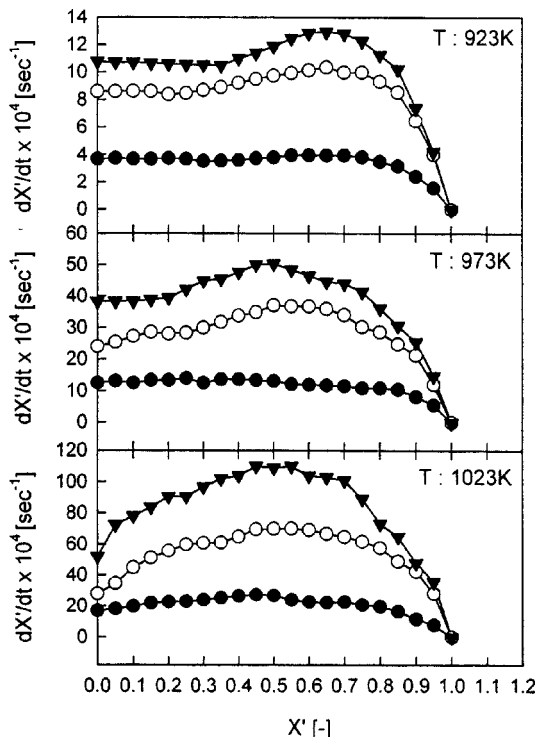


Fig. 5. Effect of conversion on rates of regeneration reaction at various temperatures and O₂ concentration. O₂ concentration [vol%]: ● 3, ○ 10, ▼ 21.

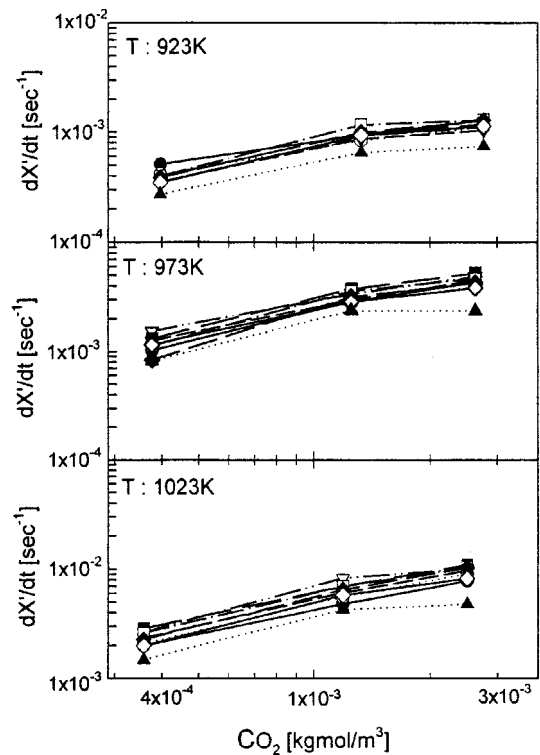


Fig. 6. Effect of O₂ concentration on regeneration reaction at various temperatures and conversions. Conversion [-]: ● 0.1, ○ 0.2, ▼ 0.3, ▽ 0.4, ■ 0.5, □ 0.6, ◆ 0.7, ◇ 0.8, ▲ 0.9.

Fig. 6은 식 (4)에서 유도되는 O₂ 농도의 재생 반응에 대한 차수를 결정하기 위해서 O₂ 농도의 대수 값에 대한 반응 속도의 대수 값을 나타내었다. O₂ 농도의 반응 차수는 대수 좌표 계에서 1차 직선으로 회귀된 기울기로 결정되며, 각 온도 및 전환율에서 얻어진 기울기의 산술 평균 값으로 정하였다. 반응 속도의 결정에 있어서 오차가 비교적 클 것으로 예상되는 전환율 0.1, 1.0의 경우는 제외하고 기울기의 산술 평균값 즉 산소 농도의 차수는 0.662이었다.

식 (4)에서 재생 반응의 활성화 에너지는 온도의 역수와 산소 농도의

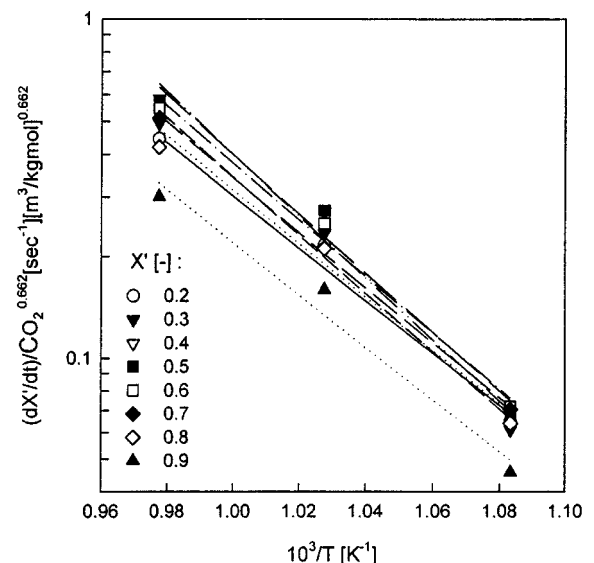


Fig. 7. Effect of temperature on the rate of regeneration reaction at various conversions.

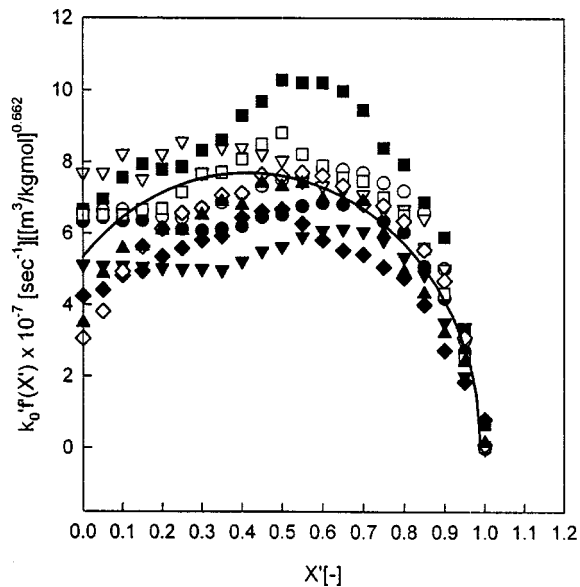


Fig. 8. Conversion versus $k_0'f'(X')$ in regeneration reaction. C_{O_2} [vol%] at $T=923$ K: ● 3, ○ 10, ▼ 21; C_{O_2} [vol%] at $T=973$ K: ▽ 3, ■ 10, □ 21; C_{O_2} [vol%] at $T=1,023$ K: ◆ 3, ◇ 10, ▲ 21.

영향으로 나누어진 단위 시간당 전환율의 대수 값과의 관계에서 결정된다. Fig. 7은 전환율 별로 얻어진 온도의 역수와 산소 농도의 영향으로 나누어진 단위 시간당 전환율의 대수 값과의 관계를 나타낸다. 각 온도 및 전환율에서 y축의 값은 세 가지 산소 농도에서 얻어진 y값의 산술 평균값을 나타낸다. 활성화 에너지는 그림의 좌표 계에서 1차 회귀의 기울기로부터 얻어지며, 고려된 각 전환율에서 얻어진 기울기의 산술 평균값으로부터 결정된 활성화 에너지는 37.94 kcal/gmol이었다. 오등[13]은 600-700 °C의 온도 범위, 20 vol%의 O_2 농도에서 ZnO-TiO₂ (1.5 at%)의 활성화 에너지는 56.81 kcal/gmol, 순수한 ZnO의 활성화 에너지는 12.96 kcal/mol로 보고한 바 있으며, 본 실험에서 얻어진 활성화 에너지는 이들의 중간 값에 가깝다.

Fig. 8은 위에서 결정된 산소의 반응 차수와 활성화 에너지가 사용되어 식 (4)에서 유도되는 재생 전환율의 영향이 포함된 빈도 인자를 반응 전환율에 따라 나타내고 있다. 재생 전환율이 포함된 빈도 인자는 앞서 탈황 반응에서와 같이 전환율에 영향을 받으며 다소 분산되는 경향이 있지만 대체로 전환율에 따라 유사한 경향을 나타내었다. 전환율이 증가함에 따라 반응 초기에는 증가하는 경향을 보이며 전환율 약 0.5에서 최대 값을 보인 후 감소하고 전환율이 1에 접근함에 따라 급속히 감소한다. 결과적으로 전환율의 영향이 포함된 재생 반응의 빈도 인자는 전환율 X' 의 함수인 다음의 상관식으로 표현되었다.

$$k_0'f'(X') = 7.70 \times 10^7 \sqrt{1 - \left(\frac{X' - 0.425}{0.575}\right)^2} \left[\frac{1}{\text{sec}}\right] \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kgmol}}\right]^{0.662} \quad (6)$$

4. 결 론

Zinc titanate 탈황제의 탈황 반응 및 재생 반응 특성을 열 중량 분석기를 이용하여 측정 및 고찰하고, Arrhenius 속도식 식 (3)과 (4)를 제시하였다. 탈황 반응 속도는 온도가 증가함에 따라 증가하고, 탈황제의 전환율이 증가함에 따라 감소하여 전환율 0.789에서 활성이 소멸되었다. H_2S 에 대한 반응 차수가 1차로 간주될 때 반응의 활성화 에너지는 13.36 kcal/gmol이었으며, 탈황제 전환율의 영향이 포함된 빈도 인자는 식 (5)로 표현되었다. 재생 반응은 온도와 산소 농도가 증가함에 따라 증가하여

고, 재생 반응의 전환율이 증가함에 따라 증가하여 전환율 약 0.5에서 최대 값을 보인 후 감소하여 전환율 1.0에서 완결되었다. 산소 농도에 대한 반응 차수는 0.662이었으며, 활성화 에너지는 37.94 kcal/gmol이었다. 재생 반응의 전환율의 영향이 포함된 빈도 인자는 식 (6)과 같이 표현되었다.

사용기호

C_{H_2S}	: concentration of H_2S [kgmol/m ³]
C_{O_2}	: concentration of O_2 [kgmol/m ³]
E	: activation energy of desulfurization [cal/gmol]
E'	: activation energy of regeneration [cal/gmol]
$f(X)$: function of X
$f'(X')$: function of X'
k_0	: frequency factor of desulfurization [(m ³ /kgmol) ⁿ]
k_0'	: frequency factor of regeneration [(m ³ /kgmol) ^{n'}]
n	: order of desulfurization reaction with respect to H_2S concentration [-]
n'	: order of regeneration reaction with respect to O_2 concentration [-]
R	: gas constant [cal/gmol · K]
T	: temperature [K]
t	: time [s]
X	: conversion of ZnO [-]
X'	: conversion of ZnS [-]

감 사

본 연구는 대체에너지기술개발사업(G7)의 일환으로 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- Yi, C. K.: "Solid Circulation Technology for the Stable Operation of a Hot Gas Desulfurization Bench-Scale Unit(II)," IGCC Research Report, Taejeon, 1(1998).
- Chen, H. T., Klett, M. G., Ruthkowski, M. D. and Zaharchuk, R.: Proceedings of the Coal-Fired Power Systems 93, DOE/METC-93/6131, 359(1993).
- Park, Y. S., Rhee, Y. W. and Son, J. E.: *Chemical Industry and Technology*, **11**, 366(1993).
- Ji, P. S.: "Development of a Hot Gas Clean-up Technology for IGCC," IGCC Research Report, Taejeon, 45(1994).
- Na, J. E., Park, S. J., Wi, Y. H., Yi, C. K. and Lee, T. J.: *HWAHAK KONGHAK*, **37**, 499(1999).
- Lee, Y. W., Lee, T. J. and Yi, C. K.: *Chemical Industry and Technology*, **15**, 237(1997).
- Yi, C. K., Park, J. H., Cho, S. H., Jin, K. T. and Son, J. E.: *HWAHAK KONGHAK*, **37**, 81(1999).
- Dulin, F. H. and Rase, D. E.: *J. Am. Ceram. Soc.*, **43**, 125(1960).
- Levenspiel, O.: "Chemical Reaction Engineering," John Wiley & Sons, Inc. 2nd ed., 21(1972).
- Lee, T. J., Kwon, T. W., Chang, W. C. and Kim, J. C.: *Korean J. Chem. Eng.*, **14**, 513(1997).
- Lee, T. J., Park, N. K., Kim, J. H., Kim, K. S., Park, Y. W. and Yi, K. K.: *HWAHAK KONGHAK*, **34**, 435(1996).

12. Lim, C. J., Cha, Y. K., Park, N. K., Ryu, S. O., Lee, T. J. and Kim, J. C.: *HWAHAK KONGHAK*, **38**, 111(2000).
13. Oh, S. C., Lee, H. P., Kim, H. T., Lee, J. B. and Yoo, K. O.: *HWAHAK KONGHAK*, **38**, 117(2000).
14. Woods, M. C., Gangwal, S. K., Jothimurugesan, K. and Harrison, D. P.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **29**, 1160(1990).
15. Kang, S. H., Rhee, Y. W., Kang, Y., Han, K. H., Lee, C. K. and Jin, K. T.: *HWAHAK KONGHAK*, **35**, 642(1997).