

Fe₂O₃계 고온건식탈황제의 반응특성 연구

강석환 · 이영우 · 강 용 · 한근희* · 이창근* · 진경태* · 손재익* · 박영성**

충남대학교 화학공학과, *한국에너지기술연구소 에너지환경연구단, **대전대학교 환경공학과

A Study on Reaction Characteristics of Fe₂O₃ High-Temperature Desulfurization Sorbents

Suk Hwan Kang, Young Woo Rhee, Yong Kang, Keun Hee Han*, Chang Keun Yi*,
Gyoung Tae Jin*, Jae Ek Son* and Yeong Seong Park**

Department of Chem. Engineering, Chungnam Natational University

*Energy & Environment Research Department, KIER, **Department of Environ. Engineering, Taejon University

요 약

석탄가스화 복합발전 시스템의 주요 단위 공정인 고온건식 탈황공정에 사용되는 탈황제의 개발을 위한 연구의 일환으로 국내산 철광석과 호주산 철광석에 대해 환원, 황화 및 재생 반응을 수행하였다. 실험 장치로는 TGA와 시료 제조용 고정층 반응기를 이용하였고, BET 표면적, SEM, 탈황/재생 cycle 실험, 반응 온도 변화 및 탈황제의 질량변화곡선 등을 이용하여 세가지 철계 탈황제에 대한 기초반응 특성을 규명하였다. 500-700°C 구간에서 반응온도 증가에 따라 탈황반응의 H₂S 제거율과 재생반응의 재생율이 증가하였다.

Abstract— Reduction, sulfidation, and regeneration reactions were performed using domestic and Australian iron ore in order to develop a desulfurizing sorbent for the high temperature desulfurization process that is one of major processes in the integrated coal gasification combined cycle (IGCC) system. A TGA (Thermogravimetric Analysis) reactor and a fixed-bed reactor were used. Some basic kinetic information was obtained from BET surface area measurements, SEM photos, cyclic reactions, reaction temperature changes and TGA curves of the sorbents. The rates of both desulfurization and regeneration increased with increasing reaction temperature in the range of 500-700°C.

1. 서 론

석탄가스화 복합발전(Integrated Coal Gasification Combined Cycle, IGCC)은 발전 설비의 열효율이 높고 환경오염 방지가 가능한 청정석탄이용기술(Clean Coal Technology, CCT)로서 최근 세계적으로 크게 각광을 받고 있다. IGCC 공정은 크게 석탄가스화로, 가스정제 및 발전 부분으로 구성되어 있다. 가스정제 부분에 속하는 탈황공정은 전체 발전시스템의 고효율화와 공해 및 부식방지 문제를 동시에 해결하는 중요한 단위 공정이다¹⁾. 고온건식탈황공정은 고온에서 탈황제(iron ore, Zine ferrite, Zinc titanate 등)를 써서 H₂S, COS를 흡수하는 흡수 공정, 황화

물을 흡수한 탈황제를 공기나 스팀과 반응시켜 다시 재생시키는 재생공정, 재생시 배출되는 SO₂ 가스로부터 다시 유황(S)을 회수하는 유황회수공정으로 구성되어 있다. 지금까지 일반화학공장에서 널리 사용되고 있는 저온습식 탈황법이 폐수가 많이 발생하고 열효율이 낮는데 비하여 고온건식 탈황법은 400°C 이상의 고온에서 가스를 직접 처리하므로 가스냉각에 따른 타르 응축의 방지가 가능하고 열 손실이 적으며, 수증기 및 고질량의 탄산가스가 제거되지 않고 가스터빈의 구동에 이용되므로 열효율이 매우 높은 장점을 가지고 있다^{2,3)}.

고온건식 탈황제는 고온 고압하의 탈황/재생 반복 사이클을 거치면서 장시간 사용되어야 하므로 탈황 및 재

생 능력이 뛰어나고 내열성, 내마모성, 내구성이 좋아야 한다. 현재 미국을 비롯한 선진국에서는 고온 고압하의 전반적인 탈황공정 개발과 병행해서 성능이 우수한 탈황제 개발에 상당한 역점을 두고 있다. 대표적인 탈황공정 방식으로는 유동층, 고정층, 이동층 등이 있다. 이 중 유동층 탈황공정은 온도 제어가 용이하고 기-고 반응물의 혼합 효과가 크고 sulfate의 형성이 적어 공정의 운전 및 제어성이 우수한 것으로 보고되고 있다⁹⁾.

본 연구에서는 고온건식 탈황공정용 철계탈황제의 기초 반응 특성을 이해하고 국내철광석 탈황제의 활용 가능성을 조사하기 위하여 Fe₂O₃ 시약, 국내산 철광석(양양 분광) 및 호주산 철광석(Hamersley)을 선정하여 TGA를 이용한 환원, 탈황 및 재생 실험을 수행하였다. 또한 소형 고정층 반응기시스템을 구성하여 선정된 철계 탈황제에 대해 환원-탈황반응 실험을 수행하여 탈황제의 물리적 특성을 고찰하였다.

2. 실험

2-1. 시료

철계 탈황제로 Fe₂O₃ 시약, 국내산 철광석(양양 분광) 및 호주산 철광석(Hamersley)을 선정하였다. 시약은 다른 철광석과의 성능 비교를 위한 기준 시료로 선정하였고, 국내산은 국내에서 가장 많이 생산되고 있는 철광석 중의 하나인 양양분광 철광석을, 외국산은 국내에 가장 많이 수입되고 있는 대표적인 호주 철광석을 대상으로 하였다. 탈황제를 oven에서 2시간 정도 건조시킨 후 입자 크기의 영향을 줄이기 위해 200 mesh(0.074 mm) 정도로 분쇄하였다. 세 시료에 대한 성분 분석 결과를 Table 1에 나타내었다. Table 1은 한국자원연구소의 원소분석연구팀에 의뢰하여 분석한 결과이다. 성분분석시 Fe₂O₃, Fe₃O₄, FeO를 구별하기 어려운 전체 Fe 함량을

분석한 후 상온에서 가장 존재하기 쉬운 Fe₂O₃으로 환산하였다. Table 1에서 보는 바와 같이 국내산과 호주산 철광석은 SiO₂, Al₂O₃을 총 13-14% 정도 함유하고 있다.

2-2. 실험 장치

시료의 세공 표면적 및 micropores 부피 측정에 Quantachrome사의 Autosorb-1을 사용하였다. TGA 실험에는 Du Pont사 제품인 TGA-951 열중량 천칭을 사용하였다. 이 TGA는 Fig. 1과 같은 수평형 반응기로 반응기체를 최대 1 l/min까지 흘려 보낼 수 있다. 반응기는 직경 23 mm의 수평관이고, 부식 기체에 의한 질량 센서 부위의 오염을 방지하기 위해 센서 뒤쪽에서 질소 가스를 흘려 보냈다. 이 장치의 질량 측정 한계 범위는 2 µg이며 시료와 시료 접시를 합해 500 mg까지 질량 측정이 가능하다. TGA의 제어 및 측정치의 저장은 Du Pont 9900 열분석기에 의해 이루어졌다. 이 열분석기에 의해 TGA-951 열천칭의 가열로를 0.5°C/min-100°C/min 범위의 속도로 가열할 수 있으며, 1200°C까지 노내 온도를 변화시킬 수 있다. 또한 컴퓨터에 저장된 결과를 시간, 온도, 질량 감량, 감량 속도 등으로 도시할 수 있다. 반

Table 1. Fe₂O₃ sorbent compositions.

Sorbent designation	Composition, wt%		
	Reagent	Domestic	Australia
Fe ₂ O ₃	97.70	83.43	85.33
SiO ₂	0.10	9.61	7.94
Al ₂ O ₃	0.01	4.39	5.12
MnO	0.07	0.18	0.12
Na ₂ O	1.05	1.17	1.04
TiO ₂	1.01	0.44	0.23
P ₂ O ₅	0.05	0.36	0.21
K ₂ O	<0.01	0.41	<0.01

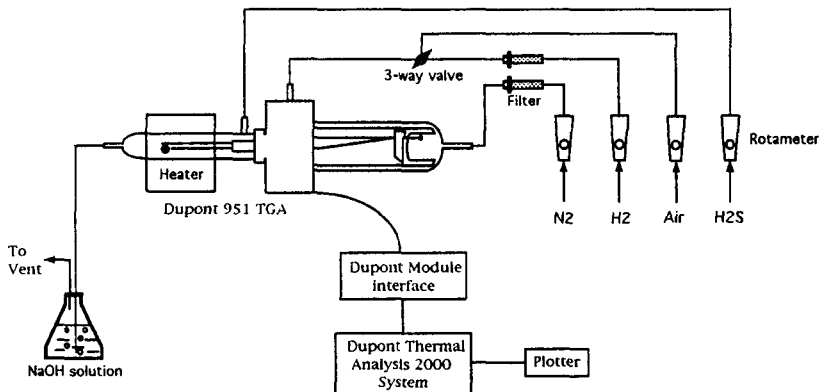


Fig. 1. Schematic diagram of thermogravimetric analyzer (TGA).

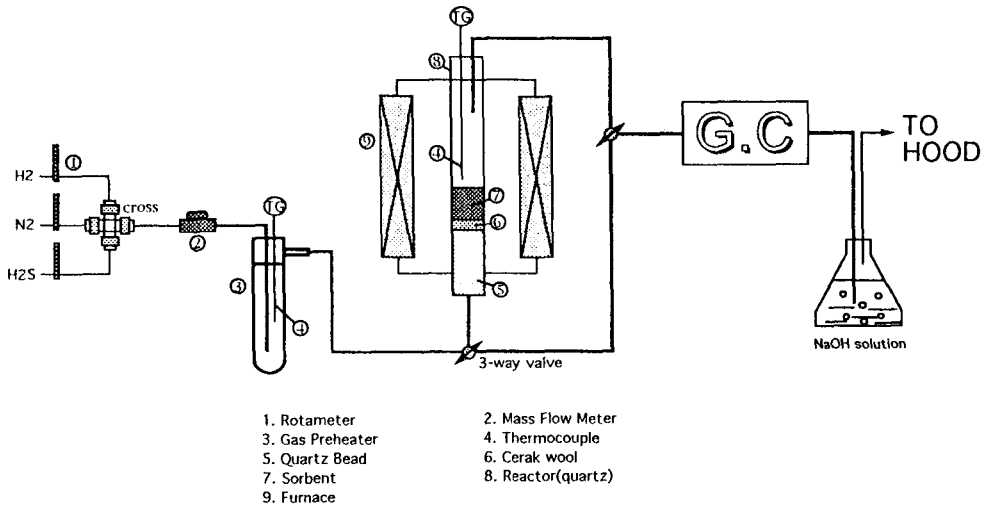


Fig. 2. Schematic diagram of fixed-bed reactor system.

응의 불활성 분위기 기체로 질소 가스를 사용하였으며, 가스 내의 미량 산소나 수분에 의한 반응 오차를 줄이기 위하여 유량계 유입 이전에 산소, 수분 제거 필터인 Oxisorb(Supelco사 제품)를 설치하였다. 실험에 사용된 가스는 N₂ balance로 H₂ 12.9%, H₂S 5.47%이었다.

TGA에 사용되는 시료량은 10 mg 정도이기 때문에 반응 후 시료의 세공 변화를 보기 위해서는 비슷한 조건하에서 측정에 필요한 시료를 준비하는 것이 필요하다. 이를 위해 Fig. 2와 같은 소형 고정층 반응 시스템을 구성하여 시료를 제조하였다. 반응기는 내경이 2 cm의 석영관을 사용하였으며, 혼합 가스의 유입으로 인한 반응기내의 온도의 불균일을 방지하기 위하여 반응기 입구에 석영으로 제작한 예열기를 설치하여 150°C로 예열하였다. 미반응 H₂S를 제거하기 위해 NaOH trap을 통과시킨 후 hood를 통하여 배출하였다.

2-3. 실험 방법

환원 반응 온도의 영향을 조사하기 위해 처음부터 H₂ 가스(N₂ balance) 50 ml/min를 넣어 주면서 시료별 반응 상태를 관찰하였다. 환원 반응의 경우 10 mg정도의 시료를 TGA에 장착한 후 질소 가스를 50 ml/min의 유속으로 유입시키면서 10°C/min의 가열 속도로 원하는 온도에 도달할 때까지 가열하였다. 원하는 온도에 도달한 후 약 20~40 min이 지나면 12.9% H₂(N₂ balance)를 50 ml/min의 유속으로 투입하였다. 반응 온도에 따른 영향을 보기 위하여 450~700°C의 온도구간에서 세가지 철계 탈황제에 대한 등온 환원실험을 하였다. 그리고 탈황제의 황화수소 흡수량과 O₂에 의한 재생성을 관찰하고자 1.5 cycle 실험을 수행하였는데, 위의 환원 반응과 같

Table 2. Experimental conditions for sorbents with TGA.

	Reduction	Sulfidation	Regeneration
Temperature (°C)	500~700	500~700	500~700
Pressure (atm)	1	1	1
Flow rate (ml/min)	100	70	70
Gas composition (vol%)			
H ₂	6.45	-	-
H ₂ S	-	1.56	-
O ₂	-	-	5.7
N ₂	93.55	98.44	94.3

은 조건으로 탈황제를 환원시킨 후 질량 변화가 없으면 H₂를 H₂S(N₂ balance)로 대체하였으며, 탈황반응 완결 후 공기를 주입시켜 탈황제를 재생하였다.

Table 2에 본 실험에서 사용된 가스의 농도 및 유량을 나타내었다. 이 가스 농도는 여러 논문 실험들을 참고로 결정하였으며^{5,9)}, 가스량은 반응이 유속에 영향을 받지 않는 범위내에서 반응하는데 필요한 충분한 양이 되게 하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 환원 반응

Fe₂O₃는 650°C 이하의 환원반응에서는 Fe₃O₄로 환원되고, 700°C 이상의 온도에서는 FeO로 환원되는 것으로 알려져 있다¹⁰⁾. Fig. 3은 처음부터 6.45% H₂(N₂ balance)를 보내면서 온도에 따른 환원반응을 나타낸 것이다. 반응초기의 감량형태가 다른 것은 시료에 포함되어 있는 구성성분이 다르기 때문이며 그래프는 호주산 철

광석이 다른 시료에 비해 열적으로 불안정한 성분을 많이 포함하고 있음을 나타내고 있다. Fe₂O₃ 시약과 호주산 철광석의 경우 650~700 전후에서 환원반응이 진행되었으나 국내산 철광석은 이 온도구간에서 뚜렷한 환원반응을 보이지 않았다. 이를 좀더 자세히 규명하기 위하여 세시료에 대한 FeO 분석을 한 결과 시약과 호주산의 경우 FeO의 함량은 0.5% 이하였고 국내산의 경우는 약 26.5%였다. 즉, 국내산 철광석이 위 온도구간에서 뚜렷한 환원반응을 보이지 않은 이유는 높은 FeO의 함량으로 인해 FeO로 환원될 Fe₂O₃의 양이 상대적으로 적기 때문인 것으로 판단된다. 450~700°C 사이에서 등온 반응 실험을 한 결과 650 이상의 반응 온도에서는 세시료 모두 3.3% 이상 감소되었다. Fe₂O₃가 모두 Fe₃O₄로 환원되었을 때의 이론적 최대 감량이 3.3%인 것을 고려한다면 3.3% 이상의 질량감소는 Fe₃O₄에서 FeO로의 환원이 진행되었음을 알 수 있다.

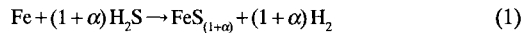
고정층 반응기를 이용하여 450°C와 700°C에서 환원 반응시킨 시료의 Fe 함량과 비표면적을 Table 3에 정리하였다. Fe₂O₃ 시약, 국내산 및 호주산 철광석의 Fe₂O₃가 Fe₃O₄로 환원되었을 때의 이론적 Fe 함량은 각각 70.24, 60.41, 61.76%로 계산되는데, Fig. 3의 결과와 비교해 보

면 환원온도가 700°C일 경우 시료내의 모든 Fe₂O₃가 Fe₃O₄로 환원되었을 때의 이론적 Fe 함량보다 높았는데 이는 Fe₂O₃가 FeO로 환원되었기 때문이다.

450°C에서 환원반응을 거친 시료의 비표면적은 반응 전과 큰 차이가 없었으나 700°C에서는 국내산 철광석을 제외한 두 시료의 비표면적이 거의 반으로 감소하였다. 이는 Fe₂O₃가 Fe₃O₄로 환원될 때에는 시료의 구조에 큰 변화가 없으나 FeO로 환원되면서 구조상 많은 변화가 있음을 나타내는 것으로 국내 철광석의 비표면적이 크게 변하지 않은 이유는 다른 두 철광석 시료에 비해 FeO의 함량이 높기 때문이다¹³⁾.

3-2. 황화 반응

환원된 탈황제는 Fe₃O₄, FeO, Fe 등으로 존재하지만 H₂S와 실질적으로 반응하는 원소는 Fe이므로 황화 반응의 총괄 반응식을 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다¹²⁾.



여기서 α는 Fe와 S의 반응몰비를 결정할 수 있는 인자이고, 이 α인자에 관한 평형질량비를 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다¹²⁾.

$$(W/W_0)_{eq} - 1 = \frac{2W_0}{M_{Fe_2O_3}} \left\{ M_{Fe} + (1 + \alpha)M_S - \frac{M_{Fe_2O_3}}{2} \right\} \quad (2)$$

철광석 탈황제의 황화반응에서는 반응 온도에 따라 황화물의 구조가 바뀌는데 Schrodtt 등은 357°C 이하의 반응 온도에서는 사방형의 FeS_x(백철광, marcasite)가 생성되기 쉽고, 415°C 이상의 온도에서는 입방형의 FeS(황철광, pyrite)가 대부분이며 FeS_{1.4}(α=0~0.2)가 약간 존재하는 것으로 보고한 바 있다¹³⁾. 또한 Abel 등은 826°C의 탈황온도에서 α값이 1.3~1.5임을 밝힌 바 있다¹⁴⁾. 본 실험에서는 Table 4에 나타낸 바와 같이 식 (2)에 의해 계산된 α인자의 범위는 0.01~0.1정도였다. 세시료 모두 온도가 높을수록 α값이 높았으며, α값이 가장 높은 경우는 700°C에서 반응한 호주산 철광석이었다.

황화온도별 황화반응 속도를 비교하기 위하여 전환율 X_s를 식 (3)과 같이 정의하였으며 식 (3)에 의거하여 계산된 X_s를 Fig. 4에 나타내었다.

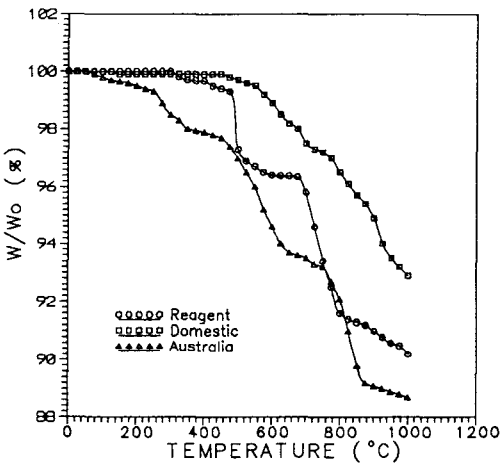


Fig. 3. Weight change during the reduction of the samples.

Table 3. Fe content and Surface area of reduced Fe₂O₃.

Reduction Temperature (°C)	Specific surface area (m ² /g)			Fe content (%)		
	Reagent	Domestic	Austria	Reagent	Domestic	Austria
before reaction	8.3	1.7	10.4	67.9	58.4	59.7
450	7.1	1.4	10.0	69.8	59.5	60.5
700	4.1	1.3	6.0	71.1	61.3	65.2

Table 4. Comparison of α factor after sulfidation reaction.

Temp. sample	500°C	600°C	700°C
Reagent	0.026	0.044	0.065
Domestic	0.010	0.035	0.080
Australia	0.058	0.078	0.102

$$X_s = \frac{(W/W_o)_{initial} - (W/W_o)}{(W/W_o)_{initial} - (W/W_o)_{final}} \quad (3)$$

식 (3)에서 'initial' 및 'final'은 황화반응의 시작과 종결을 나타낸다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 온도 변화에 따른 반응 속도는 700°C에서 가장 높았다. H₂S와의 황화반응성은 Fe로 환원이 많이 될수록 높다. 700°C에서 환원된 호주산 철광석이 가장 많은 환원을 나타냈으며 따라서 호주산 철광석이 700°C에서 가장 높은 황화반응을 나타냈다. 최종 전환율이 X_s > 1인 이유는 환원된 탈황제가 H₂S와 반응하여 FeS로 황화될 때를 100%로 가정하였는데 실제 생성물은 FeS_(1.01-1.1)이기 때문이다. 세 시료 모두 온도가 높을수록 H₂S와의 반응율이 높은 것을 알 수 있다.

반응 온도의 증가가 탈황제의 물성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 황화반응을 수행하지 않은 국내산 철광석의 표면과 500~700°C에서의 황화 반응을 진행시킨 후의 탈황제 표면을 SEM으로 조사하여 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 황화 반응을 수행하지 않은 국내산 철광석에 대한 SEM 사진인 Fig. 5(a)를 보면 철광석 표면에 여러가지 불순물이 나타나고 있는데 이는 Fe₂O₃ 이외의 성분들이 다량 함유되어 있기 때문이다. Fig. 5(b) 및 5(c)의 사진에서는 탈황제 표면이 어느 정도 안정된 형태로 비슷하게 나타났지만 FeS의 결정 주변에 더 작은 입자들이 붙어 있는 것을 볼 수 있다. 반면에 Fig. 5(d)의 700°C에서 반응시킨 경우는 성장된 FeS의 구조가 갈라졌음을 볼 수 있다. 이 현상을 좀더 관찰하기 위하여 황화된 탈황제의 비표면적을 측정하여 Table 5에 정리하였다. 500 및 600°C에서의 탈황반응 후 비표면적은 환원된 탈황제의 비표면적에 비해 급격히 감소하였지만 700°C 탈황반응의 경우 비표면적의 감소는 매우 적었다. 이와 같이 탈황반응온도가 높을수록 황화 반응은 탈황제 입자의 균열로 인해 비표면적이 증가하고 외견상 탈황능력이 증가하는 것으로 나타나지만 반복사용시 물리적 강도가 현저히 저하될 것이므로 Fe₂O₃계 탈황제를 이용한 탈황공정은 600°C 이하에서 조업하는 것이 바람직한 것으로 사료된다. 白井 등은 Fe₂O₃ 탈황제의 H₂S 흡수

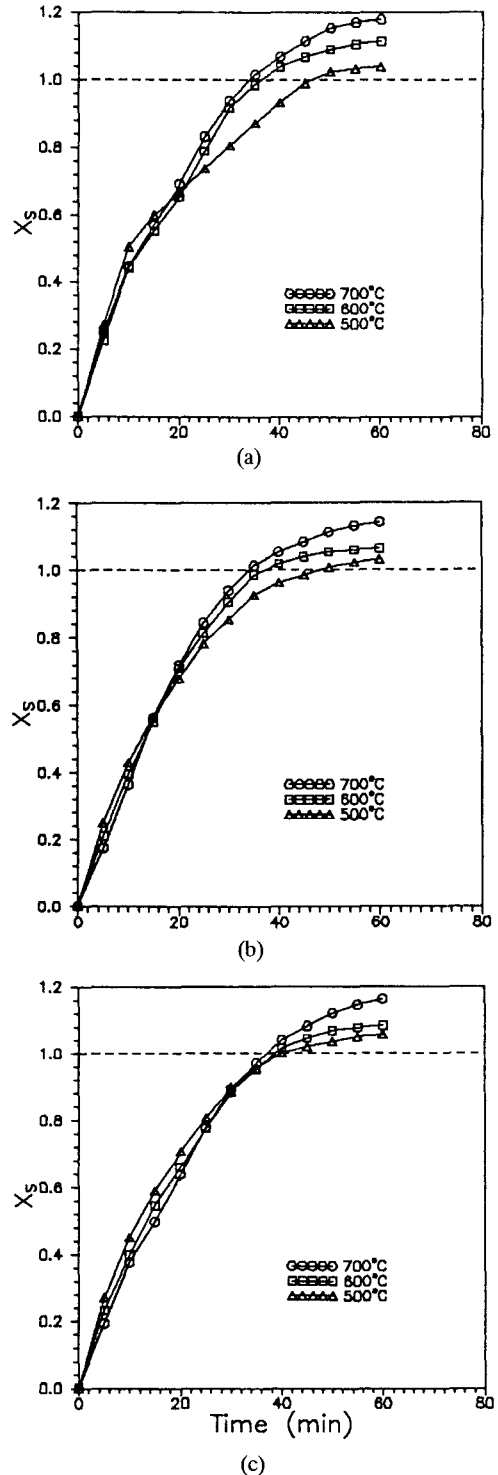


Fig. 4. Comparison of calculated conversion during the sulfidation reaction.

(a) Reagent (b) Domestic (c) Australian

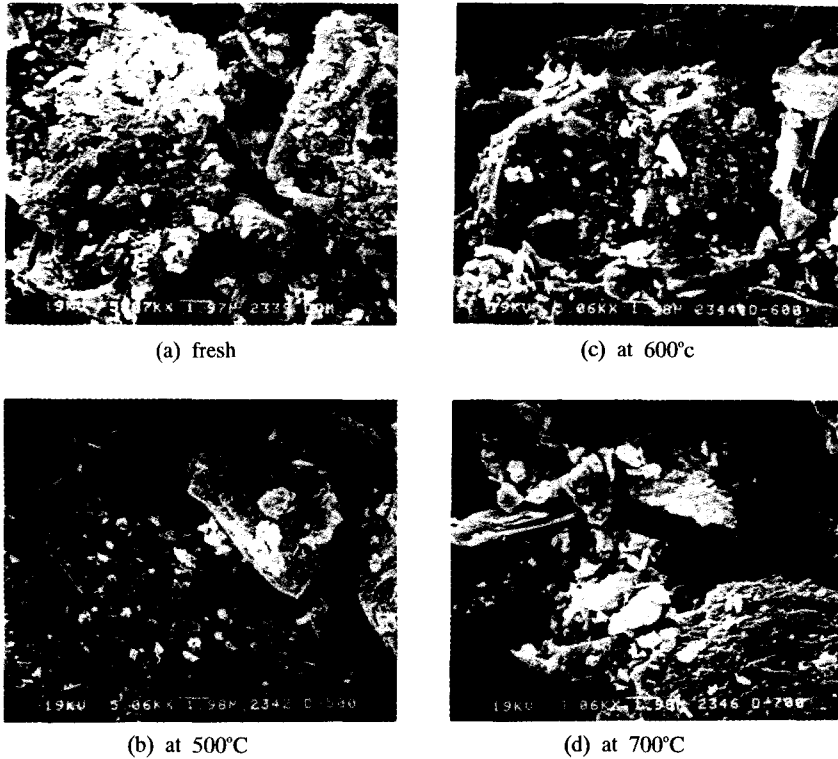


Fig. 5. Scanning electron microscopy of domestic iron ore.

Table 5. Comparison of surface area after sulfidation reaction.

Sulfidation Temperature (°C)	Specific surface area (m ² /g)		
	Reagent	Domestic	Austria
500	2.3	0.84	4.6
600	2.5	0.91	4.7
900	3.8	1.2	5.5

특성실험을 400~600°C의 온도 범위에서 수행한 결과 500°C가 최적 반응 조건임을 보고한 바 있다¹⁵⁾.

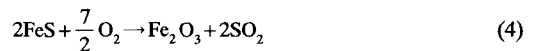
3-3. 1.5 cycle 반응

탈황제의 탈황율과 재생율, 그리고 탈황/재생반응의 반복 사용 후의 탈황제 성능을 조사하기 위해 1.5 cycle 반응을 수행하였다. Fig. 6에 환원→황화→재생→환원→황화반응 실험 결과를 나타내었다. 500°C와 600°C의 경우 환원반응이 종결되어 질량 감량이 없는데 반해 700°C에서의 환원반응은 계속 진행되므로 500°C 및 600°C의 경우엔 더 이상의 환원반응이 일어나지 않을 때까지 환원시켰고 700°C의 경우엔 임의 시간동안 환원 반응을 진행하였다. 환원 및 황화반응의 결과에서 언급

한 바와 같이 반응 온도가 높을수록 환원반응 후 시료의 상대질량(%)은 낮았고, 황화반응후 시료의 상대질량은 높은 것으로 나타났다.

재생반응의 경우 반응 온도가 높을수록 초기의 Fe₂O₃ 질량에 가까워짐을 알 수 있는데, 특이한 것은 1 cycle 진행 후 두번째 황화반응은 첫번째 황화반응후의 상대 질량(%)보다 더 높은 것으로 나타났다. 문헌에 의하면 Ayala 등에 의한 zinc ferrite의 50 cycle 실험에서 cycle 횟수가 증가할수록 탈황제의 성능이 감소하였고¹⁶⁾, 박 등⁹⁾에 의한 zinc ferrite의 cycle 실험에서는 cycle 횟수가 증가함에 따라 탈황제의 성능이 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 반응이 진행되면서 탈황제의 표면에 균열이 일어나고, 결과적으로 탈황제의 표면적이 증가하였기 때문이다.

재생반응에서는 일반적으로 식 (4)와 같이 Fe₂O₃와 SO₂가 생성되며 재생율은 식 (5)와 같이 정의된다⁹⁾.



$$X_{reg} = \frac{(W/W_o)_{initial} - (W/W_o)_{final}}{(W/W_o)_{initial} - (W/W_o)} \tag{5}$$

식 (5)에서 'initial' 및 'final'은 재생반응의 시작과 종

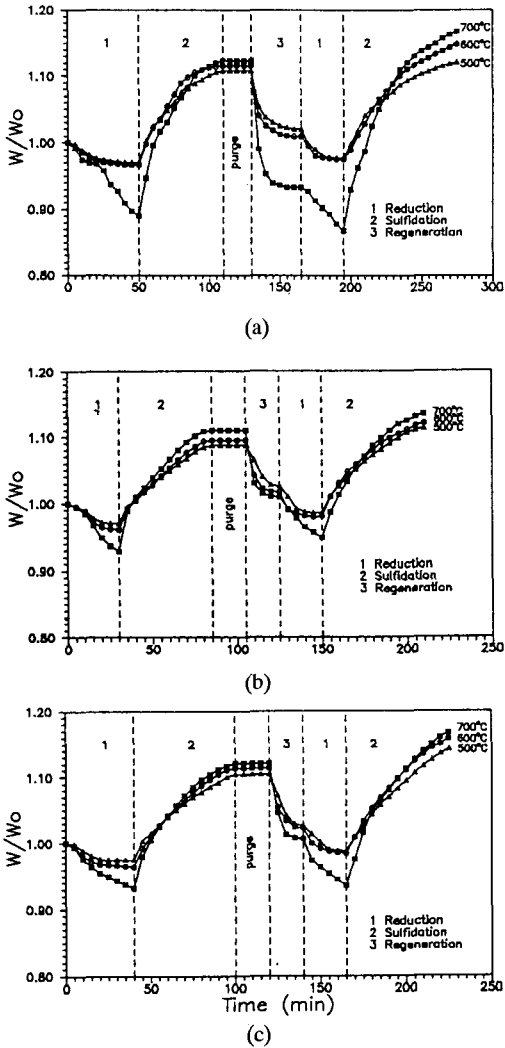


Fig. 6. TGA reactivity profiles for 1.5 cycle. (a) Reagent (b) Domestic (c) Australian

결과를 나타낸다. 재생온도에 따른 재생율을 Fig. 7에 나타내었다. 탈황제 종류에 상관없이 반응온도가 높을수록 재생율이 높음을 알 수 있다. 철광석시약의 700°C 재생반응이 X_{reg} 1로 나타난 것은 Tamhankar 등⁹⁾이 보고한 바와 같이 탈황반응을 거친 탈황제가 고온에서 재생될 때 일부 Fe₂O₃가 Fe₃O₄로도 재생되기 때문이다.

4. 결 론

세 가지 Fe₂O₃계 탈황제를 이용한 고온건식 탈황반응 특성 연구 및 물리적 특성 분석으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

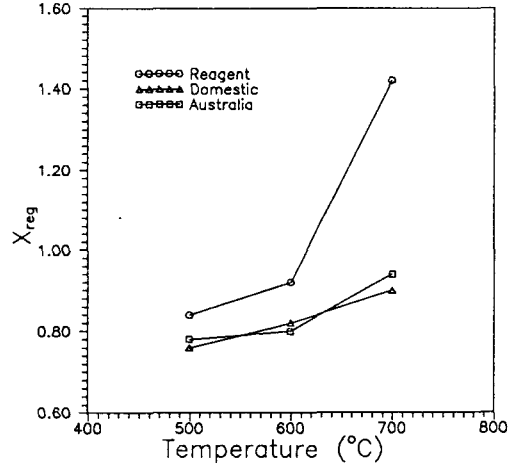


Fig. 7. Comparison of regeneration modules.

온도에 따른 환원반응에서 양양 철광석은 계속적인 환원반응을 보였으나 Fe₂O₃ 시약과 호주산 철광석은 뚜렷하게 단계적인 환원반응을 보였다. 환원된 시료의 Fe 성분에 대한 계산결과 세 탈황제 모두 650°C 이상에서 FeO로 환원됨을 알 수 있었다. 황화반응에서는 온도 상승에 따라 황흡수율이 증가하였으며 호주산 철광석이 다른 두 시료에 비해 황흡수율이 높았다.

황화된 탈황제의 비표면적 및 SEM 분석결과 500°C와 600°C에서는 비표면적이 FeS 생성으로 인해 급격히 감소되었다. 그러나, 700°C에서는 비표면적의 변화가 적었고, SEM 분석 결과 입자의 갈라짐 현상이 관찰되었다. 재생 반응에서는 온도의 증가에 따라 재생율이 증가하였으며, Fe₂O₃ 시약의 재생율이 가장 높았다. 700°C 1.5 cycle 실험에서 탈황제의 cracking이나 spalling으로 인한 비표면적 증가로 황흡수율은 증가하였다. Fe₂O₃계 탈황제를 이용한 탈황 반응은 500~600°C, 재생 반응은 700°C에서 수행하는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사 기술연구원에서 주관하는 "석탄가스화 복합발전용 고온건식 탈황기술 개발" 연구사업의 일환으로 수행된 것으로 연구비 지원에 감사드립니다.

사용기호

- M : molecular weight, g/mol
- w_i : weight fraction of iron oxide in the original sample
- W₀ : sample weight before reaction, g

W : sample weight after reaction, g
 X : fractionl conversion
 α : defined eq. (2)
 eq. : equilibrium
 o : initial data
 reg. : regeneration
 s : sulfidation

참고문헌

1. 박태준 등: "석탄 가스화 복합 발전(IGCC) 기술개발 연구 기획", 한국 전력 공사 기술 연구원 보고서, p. 4 (1992).
2. 杉谷 恒雄: 燃料協會誌, **68**(9), 787 (1989).
3. 玉貫 滋: 燃料協會誌, **56**, 14 (1977).
4. 박영성 등: "석탄 가스화 복합 발전용 고온전식 탈황기술 개발", 한국 전력 공사 기술 연구원 보고서, p. 155 (1994).
5. Tamhankar, S.S., Garimeia, S. and Wen, C.Y.: *Chem. Eng. Sci.*, **40**, 1019 (1985).
6. 박도현, 이영수, 김희택, 류경옥: *화학공학*, **30**, 700 (1992).
7. Motoo Yumura and Edward Furimsky: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **24**, 1165 (1985).
8. 이영수, 류경옥, Gavalas, G.R.: *KJChE*, **8**, 214 (1978).
9. Anir Attar: *FUEL*, **57**, 201 (1978).
10. Woods, M.C., Gangwal, S.K., Harrison, D.P. and Jothimurugesan, K.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **30**, 100 (1991).
11. Sa, L.N., Focht, G.D., Ranade, P.V. and Harrison, D.P.: *Chem. Eng. Sci.*, **44**, 215 (1989).
12. Tamhankar, S.S., Hasatani, M. and Wen, C.Y.: *Chem. Eng. Sci.*, **36**, 1181 (1981).
13. Schrodt, J.T., Hilton, G.B. and Rogge, C.A.: *FUEL*, **54**, 269 (1975).
14. Abel, W.T., Shultz, F.G. and Langdon, P.F.: *U.S. Dept. of Interior, USBM Rep. Invest. 7947* (1974).
15. 白井 裕三, 田中 隆, 新田義孝: 燃料協會誌, **69**, 453 (1990).
16. Ayala, R.E. and Marsh, D.W.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **30**, 55 (1991).