

## 철산화 박테리아 *Thiobacillus ferrooxidans*에 의한 역청탄의 생물학적 탈황

류 희 옥

숭실대학교 화학공학과

### Microbial Desulfurization of a Bituminous Coal by Iron-Oxidizing Bacteria *Thiobacillus ferrooxidans*

Hee Wook Ryu

Department of Chemical Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea.

#### ABSTRACT

Microbial desulfurization characteristics of a bituminous coal have been determined by using *Thiobacillus ferrooxidans*. The effects of process variables (such as coal pulp density, particle size and addition of surfactants) on pyrite removal have been investigated in both shake and airlift-bioreactor culture experiments. In shake experiments, pyrite could be removed over 78% for pulp densities below 20% (w/v) and removed below 40% for pulp densities over 30% (w/v) in 8 days. Pyrite removal decreased with increasing pulp densities, and it also decreased sharply with increasing particle sizes. In airlift bioreactor experiments, pyrite at 50% (w/v) pulp density could be removed about 50%. Its value is much higher than 15% at the same pulp density in a shake experiment. With addition of surfactants, pyrite removal was enhanced in shake experiments significantly, whereas it was slightly decreased in an airlift bioreactor experiment.

#### 서 론

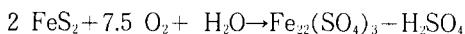
석유에너지의 고갈에 따른 대체 에너지원중의 하나가 석탄이다. 석유의 고갈에 따라 2,000년 이후의 정부 에너지 수급 계획에 의하면 에너지원으로서 석유 사용량은 줄이고, 석탄의 사용량을 늘릴 계획이다. 석탄을 에너지원으로 이용시 야기되는 문제점중의 하나가 연소과정에서의 아황산 가스의 발생에 따른 대기오염이다. 황을 제거하기 위해 주로 사용되는 기술들은 연소중이나 연소 후에 처리하는 공정들이고(1,2), 전처리 공정 중에 하나가 석탄의 연료가의 손실이 없이 황을 제거하는 생물학적 탈황법으로

이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(3-11).

석탄중의 황은 무기황과 유기황으로 구성되어 있다. 석탄의 종류에 따라 황함량은 0.5~5wt% 범위이며, 그 중의 유기황의 함량은 대략 20~50%이다. 석탄 중에 유기적으로 결합되어 있는 유기황은 모암의 일부분으로 생물학적으로 제거가 어렵다. 따라서, 지금까지의 생물학적 탈황에 관한 연구는 주로 무기황인 pyrite(황철광)의 제거를 다루고 있다(3-11). 무기황의 제거에 이용되는 박테리아들은 *Thiobacillus ferrooxidans*(3-8), *Thiobacillus thiooxidans*(12,13), *Sulfolobus acidocaldarius*(9,10) 등이다. 이들 박테리아들은 석탄으로부터 불용성

인 pyrite을 산화하여 수용성인 산화철과 황산염 형태로 수용액상으로 제거한다. 무기황 제거에 가장 효율적인 균주는 철산화 박테리아인 *T. ferrooxidans*로 알려져 있다. *T. ferrooxidans*는 ferrous iron과 환원된 무기 황화합물을 산화하여 에너지를 얻고, CO<sub>2</sub>를 탄소원으로 사용하는 독립영양 세균으로 호기성이며 주변 환경이 pH 1.8~3인 조건에서도 최적 활성을 나타내는 호산성 박테리아로 최적 성장 온도가 25~35°C이다. 매우 낮은 산도에서도 잘 성장하기 때문에 오염의 우려가 적어 석탄탈황이나 H<sub>2</sub>S 가스 제거 공정과 같이 노출된 환경에 적용이 용이하다. *T. ferrooxidans*가 황화합물을 산화하기 위한 최적 pH는 2.0 이지만, 불용성 황화염인 jarosite가 생성되면 석탄입자 표면에 침전되어 물질 전달을 방해하여 탈황을 저해시키는 원인이 되므로 jarosite의 생성을 방지하기 위해서는 pH 1.8 정도가 가장 적합하다(9).

#### *T. ferrooxidans*의 황철광 산화반응은



이다. *T. ferrooxidans*를 이용하여 10~30일 내에 약 80~95%의 황을 석탄으로부터 제거할 수 있는 것으로 알려져 있다(3-9).

본 연구에서는 철산화 박테리아인 *T. ferrooxidans*에 의한 역청탄의 탈황특성에 대하여 조사하였다. 플라스크 실험에서 역청탄의 탈황에 대한 여러 공정 변수들의 영향(석탄 슬러리 농도, 입자크기)을 평가하고, 계면활성제의 첨가가 탈황에 미치는 영향을 조사하였다. 또한, airlift 생물반응기에서 고농도 석탄 슬러리에서 탈황특성과 계면활성제의 영향을 조사하였다.

#### 재료 및 방법

##### 균주 배양 및 적응

석탄의 생물학적 탈황을 위해 사용된 균주는 *Thiobacillus ferrooxidans*(ATCC 19859)이다. 균주의 성장 배지는 Silverman의 9K 배지를 사용하였다(14). 9K 배지의 조성은 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 3.0g/ℓ; KCl, 0.10g/ℓ; K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, 0.50g/ℓ; MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 0.50g/ℓ; Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, 0.01g/ℓ; FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 45g/ℓ이다. 9K 배지는 1N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>를 첨가하여 pH 2.0으로 조절하였다. *T. ferrooxidans*는 온도 28°C, 교반속도 150 rpm의 조건으로 플라스크에서 진탕

Table 1. Chemical analysis of bituminous coal.

Proximate analysis (air dry base %)	Ultimate analysis (dry ash free base %)		Sulfur content (%)	
Moisture	1.99	Carbon	81.64	Total sulfur 1.05
Volatile matter	30.51	Hydrogen	4.97	Pyritic sulfur 0.80
Fixed carbon	50.73	Nitrogen	1.72	Organic sulfur 0.20
Ash	16.77	Oxygen	10.61	Sulfate sulfur 0.05
		Sulfur	1.05	

하며 3일간 배양하였다. 대량의 균체를 얻기 위하여, 플라스크에서 배양한 배양액 200ml로부터 원심분리(12,000rpm, 20분)에 의해 회수한 균체를 9K 배지 10ℓ가 들어있는 배양기에 옮기고 공기를 공급하면서 28°C에서 3일간 배양하였다. 이 대량 배양액을 12,000rpm에서 약 20분간 원심분리하여 균체를 회수하였다. 9K 배지에서 FeSO<sub>4</sub>를 첨가하지 않은 무기염배지(pH 1.8)로 균체를 2회 세정한 후, 무기염배지 500ml에 균체를 혼탁시킨 후 4°C에서 보관하였다. 균주를 pyrite에 적응시키기 위하여 무기염 배지 1ℓ에 pyrite 10g을 첨가하고, 1N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>를 사용하여 pH 1.8로 조절하였다. 위에서 준비한 균체현탁액 50ml을 첨가한 후 약 14일간 배양한 다음 배양액을 1,200rpm에서 5분 동안 원심분리하여 pyrite 입자와 균체를 분리하고, 다시 12,000rpm에서 20분간 원심분리하여 균체를 회수하여 무기염배지에 혼탁시킨 후 석탄탈황 실험의 접종원으로 사용하였다.

##### 석탄

석탄시료로 호주산 역청탄(Ulan)을 사용하였다. 석탄의 화학적 분석치를 Table 1에 나타내었다. 석탄중의 총 황함량은 1.05%이고, pyritic sulfur는 0.8%이었다. 역청탄의 휘발성 물질 함량은 30.51%이고, 고정탄소는 50.73%로 비교적 탄화가 덜 진행된 석탄이며, 밀도는 1.2g/cm<sup>3</sup>이다. 석탄은 전조시키고 분쇄한 다음 황산으로 pH를 1.0으로 조절한 물로 산처리한 후 탈황실험에 사용하였다.

##### 탈황실험

탈황특성에 미치는 석탄 슬러리 농도의 영향을 관찰하기 위하여 입자크기가 0.42mm이하 (평균입자크기 385μm)인 석탄을 5~70%(w/v)의 농도로 변화시켜 탈황실험을 수행하였다. 또한, 석탄입자의 크기가 탈황속도에 미치는 영향은 입자크기가 0.5mm이하, 0.2~0.5mm, 0.5~1.0mm, 1.0~2.0mm,

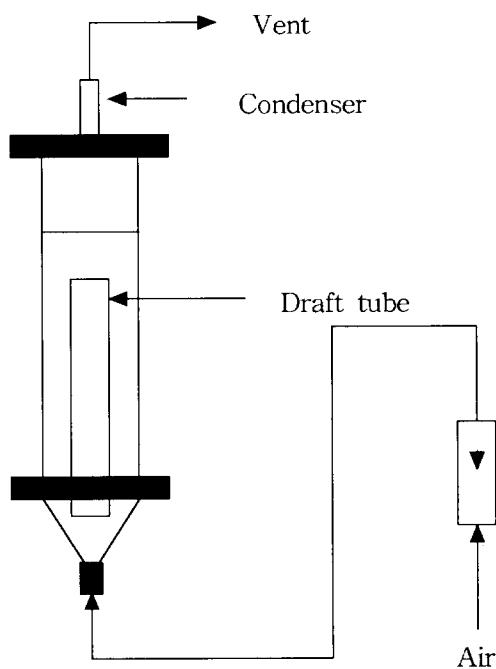


Fig. 1. Schematic diagram of airlift bioreactor.

2.0~4.0mm에 대하여 석탄 슬러리 농도 20% (w/v)에서 조사하였다. 계면활성제가 석탄 탈황에 미치는 영향을 조사하기 위하여 sodium naphthalene sulfonate의 formaldehyde condensate(CWM 1104)와 sodium polyacrylate(CWM 1105)를 첨가하여 탈황특성을 조사하였다. 석탄의 탈황실험은 250ml의 플라스크에서 진탕 배양하여 조사하였다. 100ml의 무기 염배지를 넣은 각 플라스크에 원하는 조건의 입자크기와 슬러리농도로 석탄을 첨가하였다. 배지의 초기 pH는 0.1N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>로 1.8로 조절하였다. 각각의 플라스크는 pyrite에 적응된 10<sup>9</sup> cells/ml 농도의 농축된 균주를 10% (v/v) 접종하여, 28°C와 150rpm에서 배양하였다. 배양액중의 ferrous iron과 ferric iron의 농도를 측정하기 위하여 매 24시간마다 배양액을 1ml씩 채취하였다.

Air nozzle이 장착된 airlift 생물반응기(5ℓ)에서 역청탄의 탈황특성을 조사하였다(Fig. 1). 0.42mm 이하로 분산된 역청탄을 사용하여 50% (w/v)의 고농도 석탄슬러리 농도에서 실험을 하였고, 계면 활성제의 영향을 조사하기 위하여 50% (w/v) 슬러리농도에서 음이온 계면활성제인 CWM 1105 1,000ppm을 첨가하여 탈황특성을 조사하였다. 배지의 pH는 0.1N

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>을 사용하여 1.8로 조절하였고, 석탄 자체에 함유된 물질들 때문에 초기에 pH가 증가할 경우 2.0이하로 조절하였다. 초기 배지의 부피는 3ℓ이고, 석탄 슬러리의 혼합과 산소전달이 원활하게 될 수 있도록 공기를 1ℓ/min로 주입하면서 실온에서 수행하였다. 종균은 황철광에 적응된 균체 혼탁액 150ml을 사용하였다. 철농도를 측정하기 위하여 매 24시간마다 배양액을 1ml씩 채취하였고, 공기주입에 의한 물의 증발은 매 시료 채취 직전에 3차 중류수를 공급하여 증발 손실을 보정하였다.

### 분석법

석탄중의 황철광(FeS<sub>2</sub>)은 탈황처리하는 동안에 박테리아에 의해 산화되어 산화철(Fe<sup>3+</sup>)로 수용액 상태로 용출되므로 배양액중에 존재하는 철 이온의 농도를 측정하여 황제거율(pyrite 제거율) 계산에 사용하였다. 측정한 철 농도의 2.148배가 제거된 황철광의 양이다. 분석에 앞서 추출용액에 포함된 석탄 입자 및 기타 침전물을 제거하기 위하여 추출액을 1,200 rpm에서 10분간 원심 분리한 후에 상등액을 취하여 분석하였다. 상등액에서의 총철(Fe) 농도와 Fe<sup>2+</sup> 농도는 UV/VIS spectrophotometer (Spectronic 21 UVD)를 사용하여 Muir에 의해 제안된 흡광도법으로 분석하였다(15). 상등액 0.1ml에 o-Phen reagent 0.4ml를 섞고, 중류수로 2.5ml 까지 채운 후 510 nm파장에서 흡광도를 분석하였다. 수용액내의 철의 총량을 분석하기 위해서 환원력이 강한 환원제를 사용하여 Fe<sup>3+</sup>을 Fe<sup>2+</sup>로 환원한 후에 Muir의 방법으로 철의 총량을 분석하였다. Fe<sup>3+</sup>를 Fe<sup>3+</sup>로 환원시키는 환원제로 10% hydroxylamine hydrochloride 수용액을 사용하였다. Fe<sup>3+</sup> 이온의 양은 철의 총량과 Fe<sup>2+</sup> 이온의 양간의 차이로부터 계산하였다.

석탄시료의 총 황함량은 ASTM의 Eschka method를 사용하여 분석하였다(16). 석탄 중에 함유된 황산염 농도는 흡광도를 사용하여 분석하였다. 10% BaCl<sub>2</sub> · 2H<sub>2</sub>O 용액 2ml에 추출액 2ml를 혼합한 후 흡광도를 UV/VIS spectrophotometer (Spectronic 21 UVD)를 사용하여 450nm에서 측정하였다(17).

### 결과 및 고찰

#### 석탄슬러리 농도의 영향

석탄 슬러리 농도 5~70% (w/v)에서 *T. ferro-*

Table 2. Sulfur removal with particles sizes of coal(20% pulp density).

Particles size(mm)	Specific surface area (cm <sup>2</sup> /g coal)	Initial sulfur removal rate		Sulfur removal (%) /duration (day)
		mg S/g FeS <sub>2</sub> · day	mg S/l · day	
dp < 0.42	129.9	121	169	79/8
0.42 < dp < 1.0	69.4	91	128	72/13
1.0 < dp < 2.0	31.3	84	117	65/13
2.0 < dp < 10.0	8.3	75	105	59/13

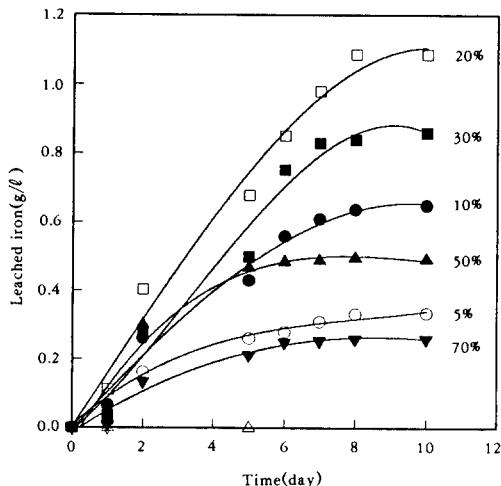


Fig. 2. Iron release curve for various pulp densities (%) of the bituminous coal.

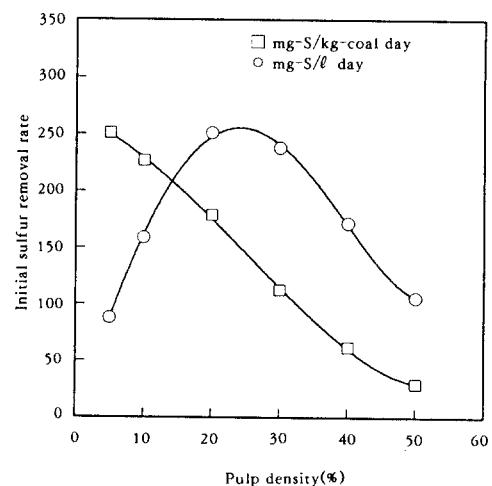


Fig. 4. Effect of pulp density on initial sulfur removal rate.

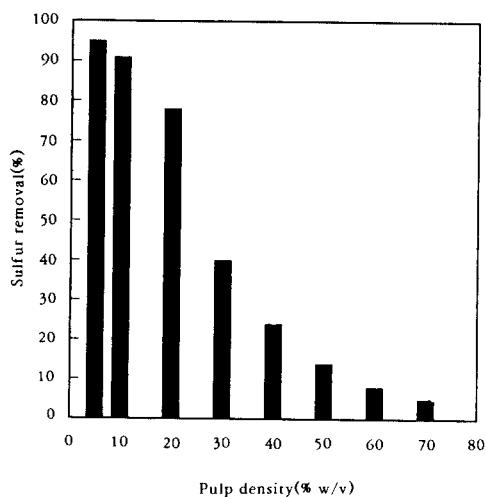


Fig. 3. Effect of pulp density on sulfur removal after 8 days (dp &lt; 0.42mm).

*oxidans*에 의해 산화작용에 의해 석탄으로부터 배

양액으로 추출된 철의 시간에 따른 농도변화를 측정하였다(Fig. 2). 배양액에서의 철의 농도는 20% (w/v) 슬러리 농도까지는 석탄 농도 증가에 따라 증가하였지만, 20% 이상의 농도에서는 슬러리농도의 증가에 따라 감소하였고 50% 이상의 농도에서는 초기에 철 농도가 증가하다가 6일 이후에는 거의 변화가 없었다. Fig. 2에서 8일 동안 배양한 후 배양액의 철 농도를 기준으로 석탄 농도에 따른 탈황율을 구하였다(Fig. 3). 슬러리 농도 20% 이하에서는 약 78~95%의 탈황율을 얻을 수 있었지만, 슬러리 농도가 증가함에 따라 탈황율이 급격히 감소하여 슬러리 농도 30% 이상에서는 40% 미만의 탈황율을 얻을 수 있었고, 70%의 고농도의 슬러리 농도에서는 탈황율이 5%로 매우 낮았다. 각 슬러리 농도에서의 초기 탈황속도를 Fig. 2의 시간에 따른 철의 농도변화 그래프의 slope로부터 계산하였다(Fig. 4). 단위 부피당 초기 탈황속도는 20% 슬러리 농도까지는 거의 선형적으로 증가하였고, 20% 슬러리 농도에서 최대값 (130mg-S/l · day)을 보인 후 30% 이상에서

감소를 보였다. 단위 질량당 탈황속도는 석탄 농도가 증가함에 따라 거의 선형적으로 감소하였다. 20~30% 이상의 슬러리 농도에서 농도가 증가함에 따라 탈황율과 탈황속도가 현저하게 감소하는 현상은 여러 종류의 역청탄 시료에서 보고되고 있다(5,18). 석탄 농도의 증가에 따른 탈황속도의 감소 현상은 석탄 입자의 응집과 침전에 의한 산소와 이산화탄소의 물질전달 제한과 석탄에서 액체배지로 용해된 유기 화합물들의 독성 때문에 박테리아의 활동이 저해되기 때문으로 추정되고 있다(19).

#### 입자 크기의 영향

Flask 실험에 있어 여러 종류의 입자분포를 갖는 석탄 입자에 대해 황 제거에 미치는 입자크기의 영향을 조사하였다(Table 2). 석탄 슬러리의 농도는 20%(w/v)이었다. 0.42mm 크기 이하의 입자에서는 8일 동안에 약 78.5%의 황이 제거되었다. 0.42mm 이상의 입자들은 13일 동안에 72~59%의 황을 제거할 수 있었으며, 입자 크기가 증가함에 따라 탈황률이 감소하였다. 단위부피당 탈황속도도 0.42mm 크기 이하의 입자에서  $169\text{mg-S/l} \cdot \text{day}$  ( $121\text{mg-S/g pyritic-S} \cdot \text{day}$ )로 가장 큰 값이 얻어졌으며, 입자크기가 증가할수록 탈황속도가 감소하였다. 입자의 크기가 증가함에 따라 표면적은 작아지기 때문에 석탄입자의 기공내로 미생물의 접근은 매우 제한되므로, 석탄의 미생물 탈황에서는 입자의 크기에 따른 물질전달 저항을 최소화시킬 필요가 있다.

#### Airlift 생물반응기에서의 탈황특성

50% 슬러리 농도에서 탈황과정에서의 배지의 redox potential, 철이온의 농도, 탈황률을 조사하였다(Fig. 5). Redox potential은 pyrite의 산화가 진행됨에 따라 증가하기 때문에 반응기에서의 탈황상태를 간접적으로 감지할 수 있는 지표로 초기 450mV에서 탈황이 진행됨에 따라 580mV로 급격히 상승한 후에 일정하게 유지되었다. Redox potential로부터 예측할 수 있듯이 초기 3일 동안에는 빠른 황제거율을 보였지만 시간이 지남에 따라 급격히 탈황능력이 저하하였다. 8일 경과 후에 약 50%의 황이 제거되었다. Fig. 5의 철 농도 곡선으로부터 구한 초기 탈황속도는  $417\text{mg-S/l} \cdot \text{day}$  ( $104\text{mg-S/g-FeS}_2 \cdot \text{day}$ )로 같은 농도의 플라스크 실험에서 얻은 초기 탈황속도  $56\text{mg-S/l} \cdot \text{day}$ 보다

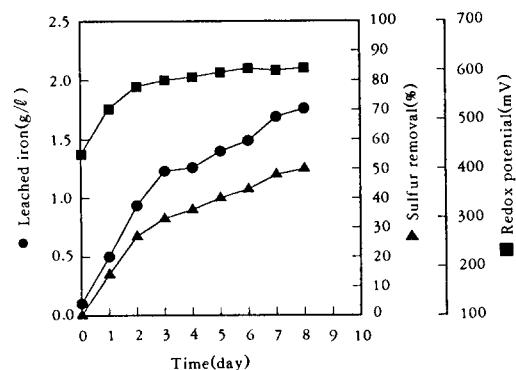


Fig. 5. Sulfur removal from bituminous coal in an airlift reactor (pulp density 50%(w/v),  $d_p < 0.42\text{mm}$ ).

약 7배 이상 빠르다. 황 제거율도 Fig. 3에서 보는 바와 같이 플라스크 실험에서는 15%에 불과하지만 airlift 생물반응기에서는 약 50%까지 탈황이 가능하였다. Airlift 생물반응기에서 얻은 탈황 결과가 플라스크 실험에서 얻은 결과보다 우수한 것은 airlift 생물반응기에서는 석탄 슬러리의 응집현상이 없이 잘 교반되기 때문에  $\text{CO}_2$ 나 산소 등의 물질전달이 원활하기 때문으로 보인다. Airlift 생물 반응기에서 얻은 탈황률이 플라스크 실험에서 얻은 결과보다 향상되었지만, 50% 정도의 낮은 제거율은 석탄의 생물학적 탈황효율을 결정하는 주 인자는  $\text{CO}_2$ 나 산소의 물질전달 보다는 다른 인자일 가능성성을 의미한다고 사료된다.

#### 계면활성제의 영향

계면 활성제 CWM 1104와 CWM 1105가 *T. ferrooxidans*의 활성에 영향을 미치지 않는 500ppm과 1,000ppm 농도에서 탈황에 미치는 영향을 조사하였다(24). 50% 슬러리 농도에서 계면활성제 CWM 1105를 1,000ppm 첨가한 경우와 첨가하지 않았을 경우의 탈황률을 플라스크 실험을 통하여 비교하였다(Fig. 6). 계면활성제를 첨가하지 않은 control의 경우, 2일 경과 후에 14%의 황을 제거한 후에 더 이상의 탈황이 이루어지지 않았다. 계면활성제가 첨가된 경우에는 6일 동안 지속적인 탈황이 진행되어 상대적으로 높은 24%의 탈황률을 얻었다.

50% 슬러리 농도에서 계면활성제 CWM 1104와 1105가 각각 500ppm 씩 첨가된 플라스크 배양에서 탈황률을 조사하였고, airlift 생물반응기에서 CWM

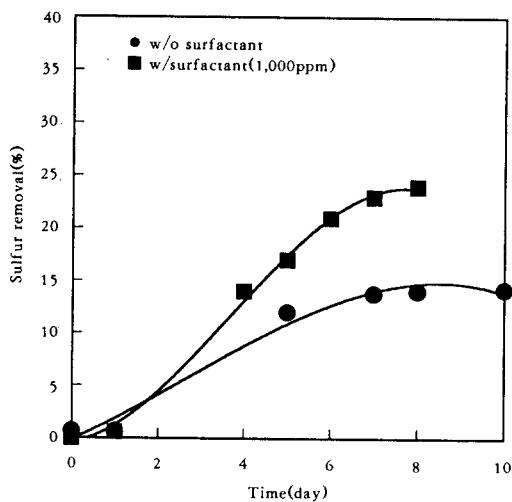


Fig. 6. Effect of surfactant (CWM 1105) on microbial desulfurization of the bituminous coal.

1105를 1,000ppm 첨가한 50%(w/v) 농도에서 탈황률을 조사하였다(Fig. 7). 플라스크 실험에서 CWM 1104와 CWM 1105를 첨가했을 때 탈황률은 각각 24~26%로 control의 14% 보다 현저하게 향상되었다. 계면활성제를 첨가하면 석탄슬러리의 응집이나 침전을 방지할 수 있기 때문에 물질전달이 원활하여 탈황효율이 향상된 것으로 추정된다. 계면활성제를 첨가하는 경우에 석탄 탈황효율이 증가한다는 여러 보고가 있었고(8), 계면활성제가 *T. ferrooxidans*의 ferrous iron 산화에 미치는 영향은 여러 종류의 음이온과 비이온성 계면활성제들이 100 ppm 이하의 낮은 농도에서는 ferrous iron의 산화를 향상시키나 그 이상의 농도에서는 저해하는 것으로 보고되었다(20). 또한, CWM 1104와 CWM 1105는 상대적으로 높은 농도인 1,000ppm 까지 *T. ferrooxidans*의 활성을 다소 향상시키거나 영향이 없는 것으로 보고되고 있다(21).

Airlift 생물반응기에서는 계면활성제를 첨가하지 않은 경우 탈황률은 약 50%이고, 1,000ppm의 CWM 1105를 첨가한 경우에는 다소 낮은 45%가 탈황되었다. 이 결과는 석탄 입자의 침전이나 응집이 없고 물질전달이 원활한 airlift 생물반응기에서는 계면활성제의 첨가에 따른 탈황률의 향상 효과가 없는 것을 의미한다. 즉, 플라스크 실험에서 고농도 슬

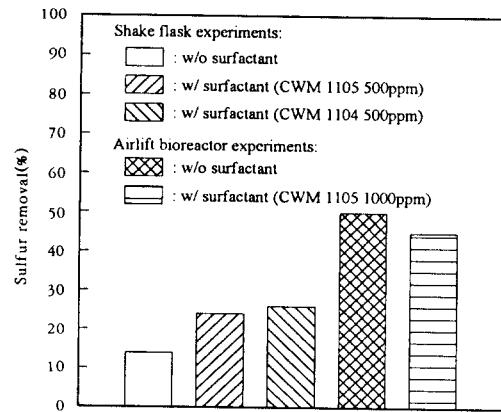


Fig. 7. Effect of surfactant on sulfur removal.

러리의 역청탄에서 관찰되는 낮은 탈황률의 원인은 일차적으로는 석탄입자의 뭉침이나 침전에 의한 물질전달의 제한으로 사료된다.

석탄중의 고정탄소가 많은 무연탄의 경우 휘발성 유기물의 함량은 역청탄의 1/5~1/3 수준이다(22). 무연탄의 경우 플라스크 실험에서도 70%(w/v)의 고농도 슬러리에서 80% 이상의 높은 탈황률을 얻을 수 있는 것으로 보고되고 있다(3,4). 반면에 역청탄의 경우, airlift 생물반응기에서와 같이 물질전달 제한 문제가 없는 조건하에서도 탈황률이 낮은 것은 석탄 중에 *T. ferrooxidans*의 활성을 저해하는 물질들이 존재하기 때문인 것으로 사료된다. 석탄에 세균 발육억제제와 살균제를 함유하는 경우도 있고, 원탄이나 또는 특별한 공정에서 일어나는 화학반응에 의해 생성될 수 있다는 보고들도 그 가능성을 뒷받침하고 있다(23). 즉, 미생물을 이용한 석탄 탈황효율은 석탄 슬러리 농도 및 입자크기 등과 같은 조업조건뿐만 아니라 석탄의 종류에 많은 영향을 받는 것으로 사료된다.

## 요약

석탄중의 무기황화합물인 pyrite를 생물학적으로 제거하기 위하여 호산성, 독립영양성인 철산화 세균 *Thiobacillus ferrooxidans*를 사용하였다. 호주산 역청탄을 대상으로, 석탄 입자의 크기, 농도, 계면활성제의 영향 등의 공정변수들이 탈황속도에 미치는 영향을 조사하였고, airlift 생물반응기에서 탈황특성을 조사하였다. 플라스크 배양의 경우, 탈황률은 슬러리

농도 증가에 따라 감소하였고, 20% 이하의 슬러리 농도에서 78% 이상의 탈황이 가능하였지만 슬러리 농도가 30% 이상이 되면 탈황률은 40% 미만으로 저하하였다. 또한, 석탄 입자의 크기가 증가함에 따라 탈황률은 급격하게 감소하였는데, 0.42mm이하의 입자크기에서 초기 탈황속도 169mg-S/l day가 얻어졌다. 슬러리 농도가 50%로 고농도인 경우, 플라스크 실험에서는 15%의 낮은 탈황률이 얻어진 반면, 물질전달 효율이 높은 airlift 생물반응기에서는 탈황률이 50%로 상대적으로 높은 값을 얻을 수 있었다. 동일조건하에서 플라스크 실험에서는 계면활성제의 첨가로 탈황률이 약 10% 정도 향상되었으나, airlift 생물반응기에서는 탈황률이 약간 감소하였다. 이러한 결과로부터 계면활성제의 역할은 석탄 입자의 침전을 방지하여 혼합을 용이하게 하고 산소와 탄소원인 이산화탄소의 물질전달속도를 향상시키는 것임을 알 수 있었다. 무연탄이 70%(w/v)의 고농도에서도 80% 이상의 탈황률과 비교해서 역청탄의 탈황률은 매우 낮았다. 이는 역청탄 중에는 미생물의 활성을 저해하는 물질이 포함되어 있으며, 석탄의 생물학적 탈황은 석탄의 종류에 많은 영향을 받음을 시사하였다.

### 감 사

본 연구는 생물공정연구센터 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

### 참 고 문 헌

1. R. C. Eliot(1978), *Coal desulfurization prior to combustion*, pp.33-42, Noyes Data Corp., N. J.
2. T. D. Wheelock(1977), *Coal Desulfurization: Chemical and Physical Methods*, American Chemical Society, Washington DC.
3. H. W. Ryu, Y. K. Chang, and S. D. Kim (1993), *Fuel Process. Technol.*, **36**, 267.
4. H. W. Ryu, Y. K. Chang, and S. D. Kim (1993), *Hwahak Konghak*, **31**, 325.
5. G. F. Andrews, M. Dorroch, and T. Hansson (1988), *Biotechnol. Bioeng.*, **32**, 813.
6. E. Beier(1990), *Bioprocessing and Biotreatment of Coal*(L. W. Donald, ed), Marcel Dekker, New York and Basel.
7. M. Beyer, H. G. Ebner, and J. Klein(1986), *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **24**, 342.
8. D. Chandra and A. K. Mishra(1990), *Bioprocessing and Biotreatment of Coal*(L. W. Donald ed), p. 631, Marcel Dekker, New York and Basel.
9. F. Kargi and J. M. Robinson(1985), *Appl. Environ. Microbiol.*, **44**, 878.
10. F. Kargi and J. M. Robinson(1982), *Biotechnol. Bioeng.*, **24**, 2115.
11. J. Klein, M. Beyer, M. V. Afferden, W. Hodek, F. H. Seewald, H. Wolff, E. Fischer, and H. Juntgen(1988), *Biotechnology*(H. J. Rehm and G. Reed, eds), **6b**, pp. 497-567, VCH, Weinheim, frg.
12. J. E. Dutrizac, and R. J. C. MacDonald (1974), *Miner. Sci. Eng.*, **6**, 59.
13. M. R. Hoffmann, B. C. Faust, F. A. Panda, H. H. Koo, and H. Tsuchiya(1981), *Appl. Environ. Microbiol.*, **42**, 259.
14. M. P. Silverman and D. G. Lundgren(1959), *J. Bacteriol.*, **77**, 642.
15. M. K. Muir and F. N. Andersen(1977), *Metallurgical Transactions B*, **8B**, 517.
16. American Society for Testing and Materials (1985), *ASTM Annual Book*, D2492,05, p.350, Philadelphia.
17. C. Karr(1978), *Analytical Method for Coal and Coal Product*, Vol. I, pp. 228-321, Academic Press, New York.
18. M. Beyer, H. G. Ebner, and J. Klein(1986), *Fundamental and Applied Biohydrometallurgy*, (R. W. Lawrence, M. R. Branikow and H. G. Ebner, eds), pp. 151-164, Elsevier, Amsterdam.
19. S. Gruder and F. Genchev(1979), *C. R. Acad. Bulg. Sci.*, **32**, 353.
20. N. Wakao, M. Mishira, Y. Sakuai, and H. Shiota(1983), *Appl. Microbiol.*, **29**, 177.
21. H. W. Ryu, T. H. Lee, Y. K. Chang, and S. D. Kim(1994), *Hwahak Konghak*, **32**, 726.
22. H. W. Ryu(1993), *Ph. D. Thesis*, Dept. of Chem. Eng., KAIST, Daejon.
23. G. R. Couch(1990), *Bioprocessing and*

*Biotreatment of Coal* (L. W. Donald ed),  
p. 29, Marcel Dekker INC., New York and  
Basel.

24. H. W. Ryu, T. H. Lee, Y. K. Chang, and S. D.  
Kim(1994), *Hwahak Konghak*, **32**, 726.