

Mg(OH)₂를 이용한 습식탈황에서 페슬러리 산화반응특성 연구

박영성 · 이은덕 · 김근범 · 이형근*

대전대학교 공과대학 환경공학과, *한국에너지기술연구소 에너지환경연구부

Oxidation Reaction Characteristics of Waste Slurry in the Wet Desulfurization Process Using Mg(OH)₂ Absorbent

Yeong-Seong Park, Eun-Duk Lee, Geun-Bum Kim and Hyung-Keun Lee*

Department of Environmental Engineering, Taeyon University

*Energy and Environmental Research Department, KIER

요 약

Mg(OH)₂를 흡수제로 이용한 습식탈황에서 페슬러리에 대한 산화반응 특성을 고찰하였다. SO₃²⁻ 전환율(MgSO₃ 페슬러리의 산화반응 전환율)과 산소의 물질전달특성을 고찰하기 위해 회분식 및 연속식 실험을 수행하였다. 3리터 용량을 갖는 직사각형모양의 아크릴 반응기에서 공기/슬러리 공급비(20~60), 수리학적 체류시간(HRT)(1~3 hr), SO₃²⁻ 유입농도(1000~3000 ppm) 등의 변화조건에서 실험이 행하여 졌다. 실험결과 SO₃²⁻ 전환율은 공기공급량과 체류시간에 비례하여 증가하였다. 또한 슬러리공급에 대한 최적공기공급비 0.02 l/(l·ppm)에서 MgSO₃ 페슬러리는 90% 이상 산화되었다.

Abstract—Oxidation reaction characteristics of waste slurry in the wet desulfurization process using Mg(OH)₂ as an absorbent were investigated. The continuous and batch type reactions in an aerator were carried out to measure the SO₃²⁻ conversion (conversion of oxidation reaction for MgSO₃) and to evaluate the mass transfer of oxygen in water. The rectangular type acrylic plastics reactor with capacity of 3 liter was used as the aerator. The air/slurry supply ratio (20~60), hydraulic retention time (HRT) (1~3 hr), and influent SO₃²⁻ concentration (1000~3000 ppm) were used as the operating variables of experiment. The experimental results showed that SO₃²⁻ conversion in oxidation reaction is mainly dependent on the factors such as air supply and HRT. The SO₃²⁻ conversion increased with increasing air supply and HRT. Also, the air/slurry supply ratio to obtain over 90% conversion for various SO₃²⁻ concentrations was found to be about 0.02 l/(l·ppm)

1. 서 론

연료의 연소에 의하여 대기로 방출되는 SO₂와 NO_x에 의한 대기오염의 심각성은 이미 잘 알려져 있으며 그에 따른 배출규제 또한 강화되고 있다. 대기오염 규제물질 중 아황산가스는 배출원이 다양하고 배출량이 많아 각 공정에 적합한 탈황방식이 선정되어야 한다. 발전설비와 같이 배출가스의 용량이 큰 경우를 비롯해 중 소규모의 산업용 보일러의 배가스탈황시 대부분 습식배연탈황공정이 적용되고 있으며 그에 따른 연구가 활발히 수행되고 있다¹⁾⁴⁾.

습식배연탈황은 물, 알칼리용액 등으로 배가스를 세정

하여 흡수하는 방법으로서 1차 생성물이 용액 또는 slurry 형태로 되고 기체와 액체의 반응으로 진행되기 때문에 혼합과 접촉효과면에서 유리하여 반응속도가 비교적 빠른 장점을 지니고 있다. 하지만 습식법은 건식에 비해 장치가 커지고 페슬러리의 처리문제 등이 뒤따르게 되므로 장치가 간단하고 유지비용이 저렴하며 부산물의 회수값치가 높은 공정들이 아직도 개발의 대상이 되고 있다.

특히 이러한 공정개발에 있어서 주요 관심사중의 하나는 탈황(흡수)효율이 좋고 부산물의 처리가 용이한 새로운 탈황제를 개발하는 것이며, 각국에서 이에 대한 연구가 활발히 추진되고 있다⁴⁾⁵⁾. 최근 크게 각광을 받고 있는 새로운 탈황제로는 Mg(OH)₂를 들 수 있는데 이는

탈황장치내 슬러리의 pH 조절이 가능하고 장치내부의 scaling생성이 감소되며, 공정상의 안전성을 높이고 황산 화물 제거효율이 크게 개선되는 것으로 밝혀진 바 있어 미국, 일본, 대만 등지에서 마그네슘계통의 탈황제에 대한 연구 및 개발보급이 한창 진행중에 있다^[6].

한편 흡수제로 Mg(OH)₂를 사용할 때 흡수탑내에서 탈황 및 산화과정을 거치면서 부산물로 MgSO₃ 성분이 포함된 폐슬러리가 생성되며, 이들은 대부분 하천이나 해양을 통해 폐수로 방류시키게 되는데 폐수에 포함된 각종 성분들이 하천이나 해양의 부영양화 촉진과 함께 수질오염을 가중시킬 수 있으므로 이의 효율적인 처리가 전체공정의 경제성을 높이는데 중요한 변수가 되고 있다^[7].

이에 대한 처리방법에는 산화반응, 흡착, 여과, 침전, 부상법 등 생물학적 및 물리화학적 방법이 있으나 폐슬러리의 농도, 입자크기, 밀도, 점도 등의 특성에 따라 적응성이 다르기 때문에 다양한 종류의 실험분석과 기술검토를 통해 대상 폐슬러리에 대해 효율적인 적용이 가능한 처리기술을 모색하는 것이 매우 중요하다^[8].

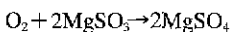
특히 MgSO₃는 용해도가 아주 낮아(용해도 0.84 g/100 ml H₂O at 50°C) 과포화시 고형성분의 침전과 함께 관폐쇄등 원활한 운전을 저해시키게 되므로 산화과정을 거쳐 용해도가 높은 MgSO₄(용해도 33 g/100 ml H₂O at 50°C)로 변환시켜 방류시키는 것이 우선적으로 요구되고 있다. 이와 같은 폐슬러리아산화처리는 주로 포기방식에 의해 이뤄지므로 반응장치의 조업에 있어서 산소전달특성이 중요한 요소에 해당되며, 특히 공기분배와 혼합(교반)등이 중요한 변수가 되어 최근 이에 대한 최적화방안연구가 많이 시도되고 있다^{[9][10]}.

본 연구에서는 Mg(OH)₂를 이용한 습식탈황공정에서 생성되는 MgSO₃ 산화처리에 주안점을 두고 공정의 설계 및 조업인자인 공기공급량, 수리학적 체류시간(HRT), SO₃²⁻ 유입농도, air/slurry 공급비 등의 주요 변수에 대한 영향과 회분식 실험에 의한 산소전달과 반응속도에 대하여 고찰하였다.

2. 이론적고찰

2-1. MgSO₃ 산화반응

흡수제로 Mg(OH)₂가 사용될 때 생성되는 MgSO₃의 산화반응은 통상적인 기액반응으로 다음식과 같이 표시될 수 있다.



즉, 산화조내 지속적으로 공급되는 산소가 기상(gas phase)과 액상(liquid phase)경막을 통해 전달되면서 액

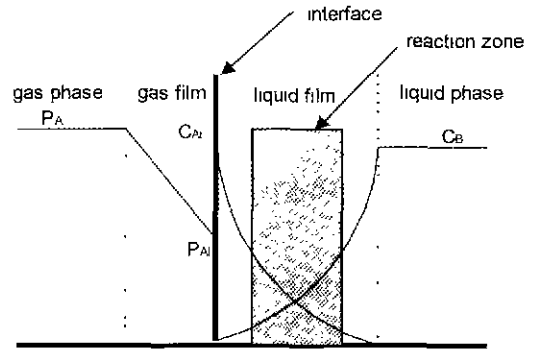


Fig. 1. Interface behavior for the liquid phase.

상내에서 용해되어 아래와 같은 양론식으로 반응하는 것으로 간주되며 이중적막이론(double film theory)이 적용될 수 있다^{[11][13]}.

이 반응에 있어서 양론적으로 MgSO₃ 산화반응속도는 산소소비속도의 2배에 해당되며, 반응속도는 비교적 빠르게 진행되므로 반응영역은 액체경막에 존재한다. 경막내 각 반응물질의 농도분포는 Fig. 1과 같다.

산소의 소비(흡수)속도는 다음과 같이 표시된다.

$$-r_A = k_G a (P_A - P_{A1}) = k_L a C_{A1} E = -\frac{1}{2} r_B \quad (1)$$

$$P_{A1} = H_A C_{A1} \quad (2)$$

여기서,

- r_A : 산소의 액상내 전달(흡수)속도, gmol/liter · hr
- r_B : MgSO₃의 산화반응속도, gmol/liter · hr
- k_Ga : 산소의 기상내 물질전달계수, mol/liter · hr · atm
- k_La : 산소의 액상내 물질전달계수, 1/hr
- P_A : 산소의 기상분압, atm
- P_{A1} : 기액 경계면에서의 산소분압, atm
- C_{A1} : 산소의 경계면 농도 gmol/liter
- C_B : SO₃²⁻ 농도, gmol/liter
- H_A : 산소의 헨리상수, atm · liter/mol
- E : 증진인자(enhancement factor)

위 식들을 정리하면

$$-r_A = \frac{1}{\frac{1}{k_G a} + \frac{H_A}{k_L a E}} P_A \quad (3)$$

여기서 산소의 액상내 용해도는 매우 낮은 편이므로 액상내 전달저항이 비교적 크게 작용하게 되며 따라서 물질전달에 관여하는 두가지 저항중에서 기상전달저항을 무시할 경우, 전체적인 산소의 소비속도는 다음식과 같

이 표시된다.

$$-r_A = \frac{k_L a E P_A}{H_A} \quad (4)$$

즉, 산소의 소비속도는 SO₃²⁻ 농도보다는 산소의 기상분압과 액상내 물질전달계수에 좌우되며, 물질전달저항에 비해 순수 화학반응저항이 차지하는 비중은 아주 낮다. 한편, E값은 화학반응을 통해 증진되는 비율을 나타내는 특성치로서 액상내 산소전달계수(k_La), 반응의 양론계수(β), 산소의 제면농도(C_A), 그리고 액상내 SO₃²⁻ 농도(C_B) 등에 좌우되는 것으로 밝혀져 있다 이와 같은 특성을 고려할 때 MgSO₃의 산화반응속도는 주어진 산소의 분압하에서 물질전달을 좌우하는 공기공급량의 조절이 매우 중요한 인자임을 알 수 있다.

2-2. 산소전달계수

산소전달에는 물질전달저항이 있는데 각 저항은 크게 세 부분으로 나눌 수가 있다. 기상과 기액 계면에서의 gas film 저항. 기액 계면에서의 계면 저항, 계면과 액상 사이의 liquid film 저항으로 구분할 수 있으며, 총괄산소전달저항은 각 개 저항의 합과 같고, 각 저항의 상대적인 값은 액의 조성과 밀도, 기액 접촉면 현상에 따라 달라진다. 그러나 보통 기포의 크기가 작고 기상은 충분히 혼합되어 있다고 보기 때문에 다른 저항에 비하여 gas film 저항은 무시된다. 또한 기포면에서의 산소농도나 기포내에서의 농도는 같기 때문에 기액 계면 저항도 무시된다. 따라서 산소 공급면에서 볼 때, 주 저항은 기포를 둘러싸고 있는 liquid film에서의 저항이고, 이때 총괄산소전달계수(K_La)는 liquid film의 산소전달계수

(k_La)라고 볼 수 있다.

액체막의 저항이 산소전달율을 제한한다고 가정한 난류 조건하에서 가스상으로부터 액체상으로의 산소의 전달은 총괄 전달계수 K_La와 산소 부족량의 함수이다.

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C_s - C) \quad (5)$$

적분을 하면

$$K_L a = \frac{\ln[(C_s - C_1)/(C_s - C_2)]}{t_2 - t_1} \quad (6)$$

여기서

C : 시간 t에서의 DO 농도

K_La : 총괄물질전달계수, t⁻¹

C_s : 표준 온도, 압력, 염도에서의 수중 포화 DO 농도

C₁ : 시간 t₁에서의 DO 농도

C₂ : 시간 t₂에서의 DO 농도

총괄 물질 전달 계수 K_La는 다음에서 설명하는 방법에 의해 물리적으로 측정할 수 있다. 전달효율을 결정하기 위해 가장 일반적인 방법인 시험 탱크 또는 실제 포기조내의 탈산소화된 물의 비정상상태 재포기방법에 의해서 산소전달을 측정할 수 있다^[4].

3. 실험

3-1. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 실험장치는 Fig. 2와 같이 유입부, 공기주입부, 산화조, 유출부로 나누어진다. 산화조는 항

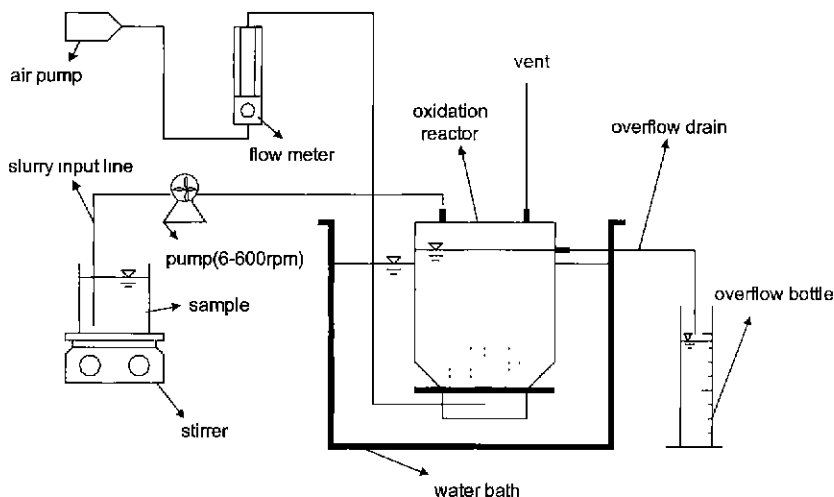


Fig. 2. Schematic diagram of oxidation test unit.

Table 1. Conditions of experiment.

Item	Condition
Temp. (°C)	40
Air Supply (l/hr)	30~90
HRT (hr)	1~3
Inf. SO ₃ ²⁻ (ppm)	1000~3000

온수조안에 위치하고, 아크릴 재질에 유효용량이 3 l이며, 직사각형으로 제작되었고 밑부분의 dead space를 없애고 시료와 공기 접촉이 용이하도록 하였다. 공기의 공급용으로 air pump와 유량계가 부착되어 있으며, 산화조의 하부에는 다공성 확산석이 배치되어 있다. 산화조내 시료의 주입은 슬러리펌프(Cole Parmer Inc Co. Model)가 사용되며, 시료의 Mixing과 온도조절이 되도록 열교환기(MS 310)를 부착하였다.

MgSO₃ 페슬러리 시료는 Mg(OH)₂ 흡수제에 이황산가스가 포함된 혼합기체를 흡수시킬 때 생성되는 MgSO₃ 슬러리입자를 물에 용해시켜 적당한 농도로 제조된 것이다. 시료의 공급은 슬러리펌프의 회전수를 변화시켜 공급량이 조절된다. 용량 3 l의 반응조부피를 기준으로 유입량을 변화시키므로써 서로 다른 수리학적 체류시간 (Hydraulic Retention Time, HRT)을 1~3 hr 범위에서 적용하였다. 산화처리시 수리학적, 체류시간이외에 영향을 주는 인자로는 공기공급량과 시료의 유입농도 등을 들 수 있다. 본 실험에서는 공기공급량은 30~90 l/hr, 시료의 유입농도(SO₃²⁻ 농도기준)는 1000~3000 ppm으로 적용하였으며, SO₃²⁻ 이온농도는 중화법에 의하여 측정하였다¹⁵⁾. 실험조건을 요약하면 Table 1과 같다.

4. 결과 및 고찰

4-1. SO₃²⁻ 초기농도 및 체류시간 변화

페슬러리 산화반응에 있어서 세가지 초기농도조건에 대하여 수리학적 체류시간(HRT)을 1시간에서 3시간 범위내에서 변화시키면서 산화반응을 수행하였다. Fig. 3은 공기유량 30 l/hr에서의 실험자료를 나타낸 것이다. 주어진 공기량하에서 HRT가 증가할수록 SO₃²⁻ 농도는 점차 감소되는 현상을 보여주고 있다. 즉, HRT가 2시간 일 때 초기농도 1000 ppm에서는 98%의 전환율을 보이나 2000 ppm에서는 63%, 3000 ppm에서는 48% 정도의 전환율을 보임으로써 산화조에서의 시료의 체류시간이 매우 중요한 인자임을 보여 주고 있다. 또한 공기공급이 30 l/hr이며, 체류시간이 3시간 이하 일 때 적어도 90% 이상의 전환율을 얻기 위해서는 페슬러리의 농도는 2000 ppm 이하가 되어야 함을 알 수 있다.

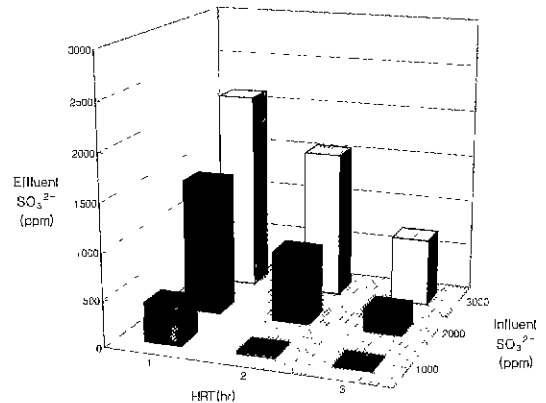


Fig. 3. Effect of HRT on oxidation reaction (at 40°C, Air Flow: 30 l/hr).

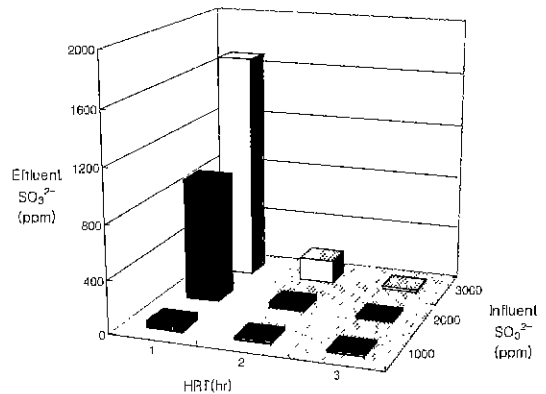


Fig. 4. Effect of HRT on oxidation reaction (at 40°C, Air Flow: 60 l/hr).

Fig. 4는 공기공급량이 60 l/hr인 경우 페슬러리내 SO₃²⁻ 초기농도 및 HRT에 따른 SO₃²⁻ 농도변화를 나타낸 것이다. HRT가 증가됨에 따라 동일한 초기농도 및 체류시간하에서 전환율이 크게 증가됨을 알 수 있으며, 공기유량이 30 l/hr 보다는 60 l/hr일 때의 농도감소 폭이 크다는 것을 알 수 있다. 즉, SO₃²⁻ 초기농도 3000 ppm인 경우에 공기공급량 30 l/hr, HRT가 2시간일 때 48%의 전환율을 보이나 공기공급량이 60 l/hr일 때 동일한 체류시간에서 전환율은 94% 이상을 보이고 있다.

Fig. 5는 공기공급량이 90 l/hr 인 경우, 페슬러리내 SO₃²⁻ 초기농도 및 HRT에 따른 SO₃²⁻ 농도변화를 나타낸 것이다. 역시 앞의 Fig. 3 및 Fig. 4와 비교해 동일한 농도와 체류시간에서 공기공급량이 증가할수록 SO₃²⁻ 농도는 큰 폭으로 감소됨을 알 수 있다. 공기유속이 90 l/hr 일 때 3000 ppm의 농도에 대해서 HRT 2시간 이내에 산화반응이 완결됨을 알 수 있다.

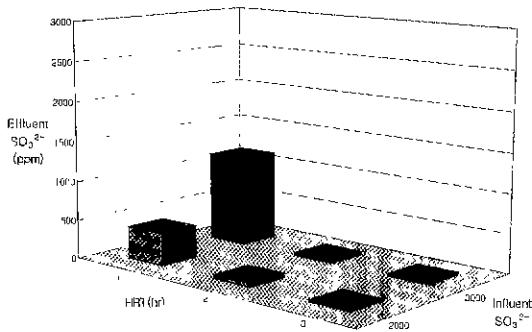


Fig. 5. Effect of HRT on oxidation reaction (at 40°C, Air Flow: 90 l/hr).

4-2. 체류시간 및 공기공급량의 변화

Fig. 6과 Fig. 7은 주어진 SO₃²⁻ 초기농도하에서 HRT와 공기공급량에 따른 SO₃²⁻ 농도변화를 나타낸 것이다. 주어진 SO₃²⁻ 초기농도에 대해 공기공급량이 증가할수록 그리고 HRT가 증가할수록 SO₃²⁻ 농도는 커다란 비율로 감소하는 것으로 나타났다. 2000 ppm과 3000 ppm에서 90% 이상의 전환율을 얻기 위한 운전조건은 HRT가 2시간 이상에서 공기공급량은 60 l/hr 이상으로 운전을 해야 얻을 수 있음을 보여주고 있다. 이는 폐슬러리내 SO₃²⁻ 산화반응에 있어서 반응물질의 체류시간과 공기공급율이 매우 중요한 인자임을 말해주는 것이다.

한편, MgSO₃ 산화반응시 90% 이상 전환율을 보이는 조건에 대한 슬러리 공급율과 Air 공급율을 각 농도별로 표시하면 Table 2와 같다. MgSO₃ 유입농도에 따라 Air/Slurry 공급비율(A/S)은 비례관계를 보이고 있다. MgSO₃ 유입농도가 1000~3000 ppm 범위에서 변화할 때 A/S 비율은 20~60 l/(MgSO₃의 유입농도 고려시 대략 0.02 l · ppm)을 갖는 것으로 나타났으며 이는 산화조

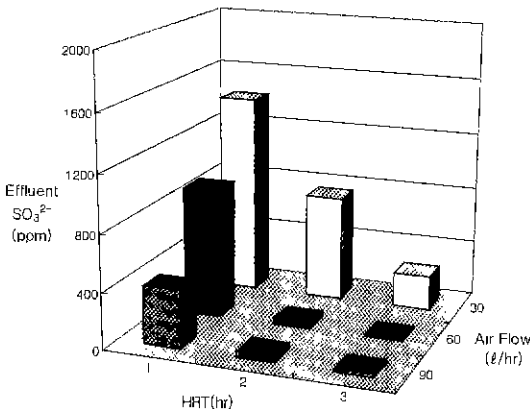


Fig. 6. Effect of air flow rate and HRT (at 40°C, raw sample: 2000 ppm).

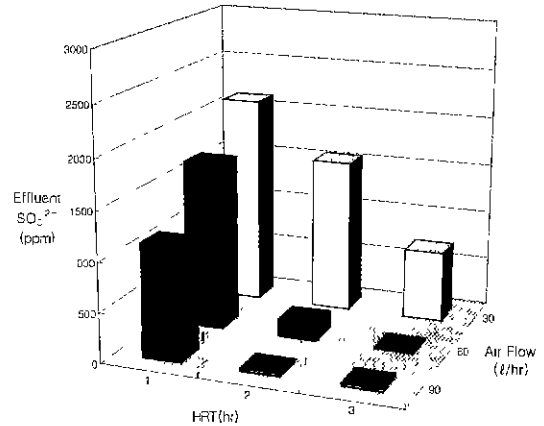


Fig. 7. Effect of air flow rate and HRT (at 40°C, raw sample: 3000 ppm).

Table 2. Ratio of the flow rate between air and slurry.

Conc. (ppm)	HRT (hr)	Air Supply (l/hr)	Slurry Supply (l/hr)	Air/Slurry ratio (A/S, l/l)
1000	1	60	3	20
	2	30	1.5	20
2000	1	90	3	30
	2	60	1.5	40
	3	30	1	30
3000	2	90	1.5	60
	2	60	1.5	40
	3	60	1	60

의 scale-up 설계시 설계기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

4-3. 산소전달계수

Fig. 8은 산화조에 공급되는 공기의 공급량과 물의 온도를 변화시키면서 측정된 용존산소(DO)를 토대로 산출된 물질전달계수를 나타낸 것이다. 산소의 물질전달계수는 온도와 공기공급속도에 비례하여 증가함을 알 수 있으며, 특히 공기공급에 커다란 영향을 받고 있음을 보여 주고 있다. 이는 앞에서 언급한 공기공급량의 증가에 따른 MgSO₃ 산화반응의 전환율 증가현상과 잘 부합되는 것이다. 본 실험에서 보여준 공기공급량의 변화에 따른 물질전달계수의 변화는 결국 기-액 접촉특성에 관련된 것으로 볼 수 있으며 앞으로 산화(포기)조의 최적 조업자료도출을 위해 다양한 기-액접촉 pattern에 대한 연구가 요구된다^{[9][11]}.

4-4. 반응속도의 선정

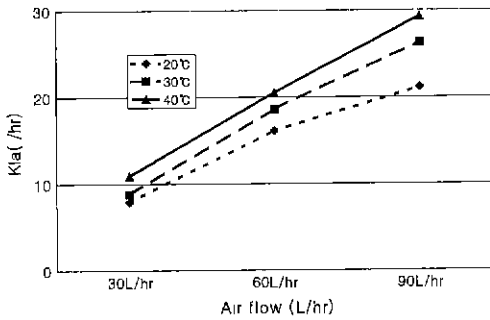


Fig. 8. Effect of air flow rate on mass transfer coefficient for different temperatures.

MgSO₃ 페슬러리의 산화반응속도를 고찰하기 위해 회분식 실험을 수행하였다. Fig. 9는 산화조의 SO₃²⁻ 초기 농도 3000 ppm, 반응온도 40°C에서 유입되는 공기공급량을 달리할 때 SO₃²⁻ 농도의 시간적 변화를 나타낸 것이다. SO₃²⁻ 농도는 거의 직선적으로 감소하며, 공기공급

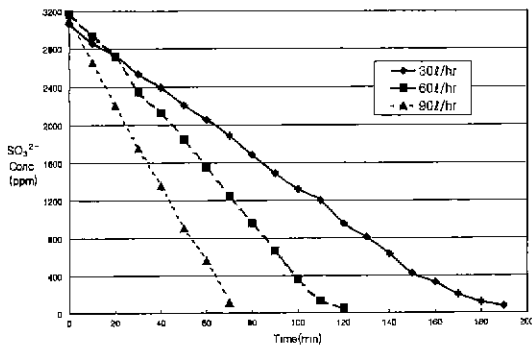


Fig. 9. SO₃²⁻ concentration as a function of time for different air flow rates (at 40°C, Influent SO₃²⁻: 3000 ppm).

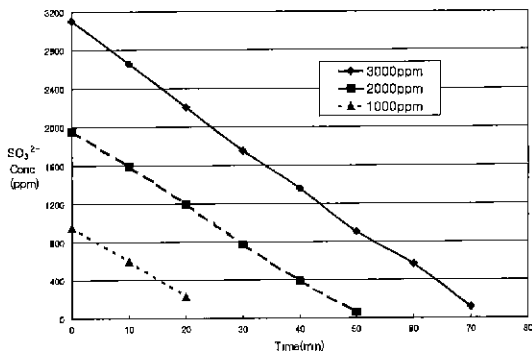


Fig. 10. SO₃²⁻ concentration as a function of time for different influent concentrations (at 40°C, air flow rate: 90 L/hr).

급량이 증가할수록 반응속도가 빨라지면서 농도의 급격한 감소현상을 보이고 있다.

Fig. 10은 공기공급량 90 L/hr에서 SO₃²⁻ 초기농도를 달리할 경우 시간에 따른 농도변화를 보여주고 있다. 초기농도가 더러지라도 시간이 증가할수록 SO₃²⁻ 농도는 동일한 기울기를 가지며, 직선적으로 감소됨을 보이고 있다. 이는 MgSO₃ 산화반응이 SO₃²⁻ 농도와 거의 무관하게 진행됨을 의미하는 것이며, 이는 이러한 반응이 앞의 이론적 고찰에서 살펴본 물질전달저항에 지배를 받는 (4)식과 같은 산화반응속도식으로 설명될 수 있음을 말해주는 것이다.

또한, 앞에서 (4)식과 같이 제시된 산화반응속도식을 적용하는데 있어서, 문헌자료를 인용하여 용해도가 낮은 산소의 헨리상수(H_A)를 1000 atm·liter/gmol, 산소의 기상분압을 0.21 atm으로 적용하면 산화반응속도식은 -r_B=4.2×10⁻⁴k_iaE gmol/l·hr로 표시된다^{[16][17]} 한편, 본 실험에 있어서, MgSO₃ 초기농도 1000~3000 ppm, 공기공급율 30~90 L/hr, 반응온도 40°C 조건에서 MgSO₃의 산화반응속도는 0.033~0.096 gmol/hr에 해당하는 것으로 나타났으며, 본 실험에서 구한 k_ia 값을 이론식에 적용하면, 대략적인 E(증진인자)값은 1.98~2.61의 값에 해당하는 것으로 나타났다.

MgSO₃ 페슬러리의 산화반응에 대한 슬러리공급속도, 초기농도, 전환율, 반응속도간의 설계식은 다음과 같으며, 이식을 응용하는데 있어서 본실험에서 구한 물질전달계수, 증진인자등을 적용한 MgSO₃ 산화반응속도(-r_B)를 구하면 실제로 요구되는 슬러리 처리율과 전환율조건에 부합되는 최적의 산화반응조 크기를 결정할 수 있다

$$V = \frac{v_0 C_{Bo} X_B}{-r_B} \tag{7}$$

- V : 페슬러리 산화반응조 크기, liter
- v₀ : 페슬러리 공급속도, liter/hr
- C_{Bo} : SO₃²⁻ 초기농도, gmol/liter
- r_B : Na₂SO₃ 산화반응속도, gmol/liter · hr
- X_B : 산화반응의 전환율, (-)

5. 결 론

MgSO₃ 페슬러리 산화반응에 대한 회분식 및 연속식 실험을 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 일정한 SO₃²⁻ 초기농도조건에서 공기공급율이 증가할수록, HRT가 증가할수록 산화반응의 전환율은 급속히 증가함으로써 페슬러리 산화처리에 있어서 반응물질의 체류시간과 공기 공급이 매우 중요한 인자임을 알 수 있었다.

2. MgSO₃ 페슬러리 농도 1000~3000 ppm 범위 내에서 90% 이상 전환율을 얻는데 필요한 Air/Slurry 공급비(A/S ratio)는 약 0.02 liter/(liter·ppm) 으로 밝혀졌다.

3. MgSO₃ 페슬러리 산화반응에 대한 회분식실험에 있어서 SO₃²⁻ 초기농도는 반응속도에 독립적이며, 산소의 액상 물질전달에 의해 좌우됨을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 유경선, 추경준, 김경태· 대한환경공학회지, 20(9), 1191 (1998).
2. 김은호, 이재천, 이형근, 김인원: 화학공학, 36(5), 827 (1998).
3. 이형근, 김성수, 신대현: “연소가스중의 대기오염물 저감기술개발”, 한국에너지기술연구소 보고서, KIER-966405, 과학기술부 (1996)
4. 이형근, 최원길, 조항대, 김종기, 이우석, 윤혜식: “배연탈황공정에 국내산 석회석의 활용과 첨가제 개발에 관한 최종보고서”, 한국에너지기술연구소, 통상산업부 (1997).
5. 최병선, 박길용, 하창호, 이정빈, 김성철, 김동화, 천성남, 김기형, 박준영, 이인영, 신영진. “배연탈황·탈질 동시처리기술 2단계 1차년도 연구보고서”, 한국전력공사 전력연구원, 환경부 (1997).
6. 이형근: “배연탈황 공정의 최신기술동향”, 한국전력공사 기술기획처 발행, 제 26집, 봄호 (1996).
7. 정홍기, 장성호, 임찬섭, 김장호: 동아대학교 환경문제연구소 연구보고, 18(2), 19 (1995).
8. 김용환, 홍성철, 한동준, 손무정: “수질오염 방지기술 개론”, 동화기술 (1998).
9. 이경호, 김광수, 김동진, 최희철, 황인호: 대한환경공학회 춘계학술발표회 초록집, B-47, 평운대학교, 156 (1999).
10. 박찬진: 대한환경공학회지, 20(6), 621 (1998).
11. 도진환, 장호남, 이창엽: 화학공학의 이론과 응용 6(1), 1265 (2000).
12. 김우식, 이기준: “화학반응공학”. 회중당, pp. 369-415 (1995).
13. 김우식, 이기준: “이동현상론”, 회중당, pp. 402-438 (1996).
14. 김동진: “과산화 공기를 이용한 발효 기포탑에서의 K_La의 등적측정”, 한국과학기술원 석사 학위논문 (1986).
15. 경기화학공업(주), “Mg(OH)₂를 이용한 FGD 시료의 분석법”, pp. 4-5 (1997).
16. 임제규, 김영해: “대기화학”, 동화기술, pp 15-17 (1995).
17. Perry and Green: Perry's Chemical Engineers' HANDBOOK. McGraw Hill, 7th Ed (1997).