

가스분사반응기에서의 SO₂ 흡수 특성

최 병 선 · 박 승 수 · 김 영 환

한국전력공사 기술연구원
(1994년 5월 6일 접수, 1994년 7월 1일 채택)

Absorption Characteristics of Sulfur Dioxide in Jet Bubbling Reactor

Byung-Sun Choi, Seung-Soo Park, and Yung-whan Kim

Korea Electric Power Corporation Research Center, Taejon 305-380, Korea
(Received May 6, 1994, Accepted July 1, 1994)

요 약 : 가스분사반응기(Jet bubbling reactor)에서의 가스분사관의 최적 설계조건과 SO₂ 제거효율에 미치는 운전변수들의 영향을 검토하였다. 효과적인 기-액 접촉을 위한 가스분사관의 설계에 있어서 가장 중요한 인자는 Reynolds number로서 Reynolds number를 12,000 이상으로 하고 가스분사관과 가스분사구멍에서의 Reynolds number가 동일하게 되도록 가스분사관을 설계하는 것이 가스분사관 설계의 최적조건인 것으로 판단된다. ΔP , pH, 유입 SO₂ 농도, 석회석 입자크기 등 공정의 운전변수 중에서 SO₂ 제거효율에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 ΔP 였으며 pH 4.0하에서 90% 이상의 SO₂ 제거효율을 얻기 위해서는 ΔP 를 230mmAq 이상으로 유지시켜야 하였다. 실험결과 3.0 정도의 낮은 pH 하에서도 높은 SO₂ 제거효율이 얻어졌으며 이러한 이유는 강제산화에 의해 흡수액내의 HSO₃⁻ 이온이 SO₄²⁻ 이온으로 거의 완전한 산화가 일어나 흡수액 내의 SO₂ 평형분압이 매우 낮은 상태로 유지되었기 때문으로 생각된다. 또한 흡수액의 pH 5.0 이하의 조건에서는 SO₂ 흡수에 사용된 석회석의 입자크기에 관계없이 모두 99.5% 이상의 높은 석회석 이용률을 나타내었다.

Abstract: The optimum design conditions of gas sparger pipe and the effects of operating variables on SO₂ removal efficiency have been examined in Jet Bubbling Reactor. Geometry of gas sparger pipe of Jet Bubbling Reactor is a very important factor to obtain a effective gas-liquid contact. Test results revealed that Reynolds numbers at sparger and slot have to be kept greater than 12,000 identically at a given gas velocity. SO₂ removal efficiency was a function of ΔP , pH, inlet SO₂ concentration and particle size of limestone and was more sensitive to the change of ΔP than to the changes of others. The ΔP of at least 230mmAq must be maintained to achieve the above 90% SO₂ removal at pH of 4.0 which is considered as adequate operating pH. Higher SO₂ removal efficiency was obtained even at lower pH ranges, which resulted from the complete oxidation of the absorbed SO₂ to sulfates by adding air and consequently from the reduction of SO₂ equilibrium partial pressure in the gas-liquid interface. The 99.5% of the limestone utilization was attained in pH range from 3.0 to 5.0 with regardless to the particle size of limestone employed.

1. 서 론

국민적인 관심이 고조되고 있는 대기오염현상은 이

제 한 국가만의 문제를 초월하여 국제적인 문제로 이
슈화되고 있다. 아황산가스, 질소산화물 등의 산성
대기오염물질은 특정지역의 대기오염을 심화시킬 뿐

만 아니라 대기오염으로 인한 범지구적인 생태계 파괴는 인접국가간의 분쟁요인으로 작용하여 국제적인 문제로의 대두가 예상되고 있으므로 선진 각국에서는 이미 대기오염 방지기술에 많은 노력을 기울여 왔다. 우리 나라에서도 급격한 산업활동의 증가와 에너지 소비의 증가에 따라 아황산가스, 질소산화물 등의 대기오염물질이 대기오염도를 심화시켜 환경기준을 위협하는 상황에 이르게 되었고, 정부에서는 1999년까지 3단계의 엄격한 배출허용기준을 입법, 예고하게 되었다. 향후 지구의 환경보전을 위해 예상되는 범지구적인 환경규제 강화와 현재 입법, 예고된 우리의 환경기준치를 적극 준수하고, 환경보전에 기여하기 위해서는 배연탈황·탈질 기술의 조기 정착과 배연탈황·탈질설비의 설치가 요구되고 있는 현실이나 현재 국내의 기술 수준은 극히 초보적인 단계에 머무르고 있다.

화석연료 연소시 발생하는 아황산가스 배출을 저감하는 배연탈황기술은 일부 선진국가에서 이미 개발, 확립되어 많은 배연탈황설비들이 설치, 운용되고 있으며[1-3] 그중에서도 특히 아황산가스가 포함된 배기가스를 석회석 또는 소석회 슬러지와 접촉시켜 아황산가스를 제거하고 부산물로 석고를 생성시키는 습식 석회석-석고법이 주류를 이루고 있다. 또한 최근에는 공정의 단순화를 위해 탈황공정에서 일어나는 모든 화학반응을 하나의 반응기 내에서 이루어지도록 하는 강제산화방식을 채택하는 공정[4, 5]들이 늘어나고 있다. 습식 석회석-석고법은 물질전달 측면에서 볼때 크게 액분산방식(Liquid dispersion)과 가스분산방식(Gas dispersion)으로 대별할 수 있으며 액분산 방식으로는 흡수제 슬러리를 배기가스에 분무하는 spray tower가 대표적이고 가스분산방식에는 흡수제 슬러리에 배기가스를 직접 분사하는 Perforated(sieve) tray tower와 Jet bubbling reactor 등이 대표적이며 이들 방식들은 각각의 장·단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 공정이 비교적 단순한 가스분사 반응기(Jet bubbling reactor)[6-8]를 실험대상 Model로 선정하여 장치의 핵심부분인 Gas sparger의 구조를 최적화하고 이를 이용한 아황산가스 흡수실험을 통해 반응기 설계를 위한 기초자료를 얻고자 하였다.

2. 실험

2.1. Sparger 구조 선정 실험

Jet bubbling reactor는 Flue gas 중의 SO₂ 흡수가 Liquid dispersion 방식인 기존의 Spray tower 등과는 달리 Gas dispersion에 의해 이루어지기 때문에 Sparger slot에서 분사되는 Gas의 속도, Slot의 크기, 개수, 침수깊이(submergence depth) 등에 따라 Reactor 내에서의 mass transfer를 결정하는 Gas bubble의 거동 및 특성과 Liquid flow pattern이 크게 달라지게 된다. 따라서, Air-Water system 하에서 Sparger의 geometry와 gas 속도, 침수깊이의 변화에 따른 Gas의 분사상태, Liquid flow pattern, Froth zone의 안정성 및 Gas hold-up을 관찰 측정하여 이들 변수들 사이의 상관관계를 조사함으로써 SO₂ 흡수 실험을 수행하기에 가장 적합한 최적의 Sparger 구조를 알아보하고자 하였다.

실험에 사용한 반응기는 교반기와 Oxidation air distributor가 부착된 직경 60cm, 높이 250cm인 원통형 반응기로서 내부 관찰을 위해 아크릴로 제작하였으며, Sparger pipe의 직경은 10cm, 개수는 3개로 고정하였다. 따라서 반응기의 단면적에 대한 Sparger pipe의 단면적의 합의 비율은 1/12이었다. 또한 끝이 개방된 Sparger pipe의 하단부로부터 20cm 위의 지점에 Gas분사에 필요한 Slot을 뚫었으며, Sparger 구조변경 실험을 위하여 Slot의 직경과 개수를 각각 달리한 7가지 형태의 Sparger(총 21개)를 탈부착이 용이하도록 나사식으로 제작하였다. Table 1은 실험에 사용한 Sparger의 구조를 나타낸 것으로 여기에서 $\sum So/Ss$ 는 Sparger의 단면적에 대한 Slot 단면적의 합의 비를 나타낸다.

2.2. SO₂ 흡수 실험

본 실험에서는 Flue gas 대신 Air를 사용하였으며, Air inlet line에 SO₂ gas를 주입하여 SO₂ gas의 농도를 조절하였다. Oxidation air는 Compressor를

Table 1. Specifications of Sparger

Sparger Type	Sparger I.D.	Sparger O.D.	Slot dia. (cm)	Number of slot (Ea)	$\sum So/Ss$
A	10.0	11.0	1.0	10	0.10
B	10.0	11.0	1.4	8	0.15
C-1	10.0	11.0	1.4	10	0.20
C-2	10.0	11.0	1.0	20	0.20
C-3	10.0	11.0	2.0	5	0.20
D	10.0	11.0	1.4	13	0.25
E	10.0	11.0	1.4	15	0.30

이용하여 반응기 하부의 Air distributor(Orifice size 및 개수=0.8mm×75Ea)를 통해 당량의 5~10배로 주입하였다. ΔP (반응기 입구와 출구의 차압)는 Level controller를 이용하여 Overflow weir의 높이를 조절함으로써 일정치로 유지하였고, Overflow되는 Liquid는 반응기 내의 Gypsum slurry 농도가 일정 농도를 유지할 때까지 Limestone slurry tank로 순환시켰으며, 일정 농도에 도달된 이후에는 반응기 하부의 Draw off pump를 이용하여 일정 속도로 배출하였다. 흡수 반응액의 pH는 Limestone slurry의 Feed rate를 조절함으로써 일정치를 유지하였으며, Froth zone의 Liquid를 Reaction zone으로 순환시키며 연속적으로 측정하였다. 실험조건은 아래와 같으며 Fig. 1의 실험에 사용한 장치의 개요도를 나타내었다.

ΔP : 200~350mmAq

pH : 3.0~4.5

Gas flow rate : 150~300Nm³/hr

Oxidation air flow rate : 100NI/min.

사용된 CaCO₃ : Precipitated Calcium Carbonate

(평균입경 3~5 μ m)

Ground Limestone

(-200mesh 95%)

Inlet SO₂ concentration : 1,000ppm, 1,800ppm

반응 온도 : 30±2°C

3. 결과 및 고찰

3. 1. Sparger구조 선정 실험

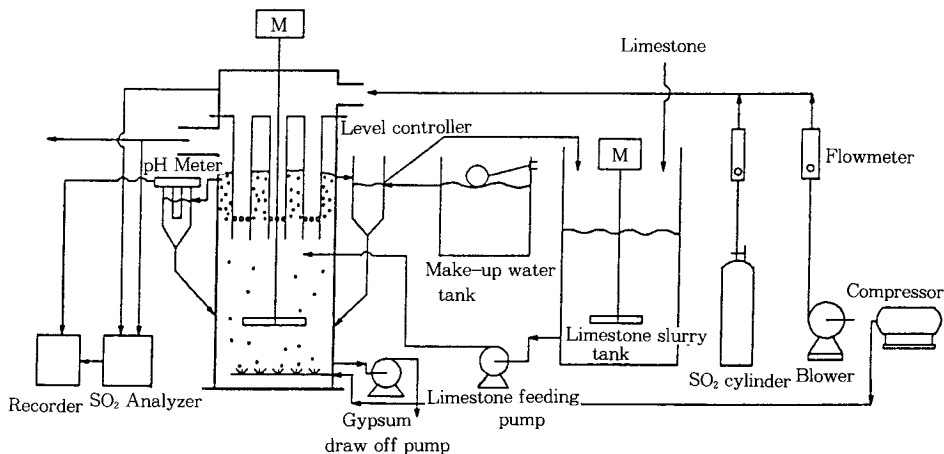


Fig. 1. Schematic flow diagram.

각각의 Sparger type에 대하여 침수깊이와 Gas flow rate 변화에 따른 물리실험결과 Gas flow rate와 Liquid submergence depth가 증가하면 ΔP 도 증가하는 경향을 나타내고 있으나, 반응기의 ΔP 는 Gas flow rate보다는 Submergence depth에 훨씬 더 의존적이었다. 여기에서 침수깊이(Submergence depth)는 Sparger의 Slot 상부에서 최초 Liquid level까지의 거리를 나타낸다. 실험결과 본 실험조건 하에서 반응기의 ΔP 는 Sparger slot에서의 Liquid head와 거의 동일하였으며, Gas 흐름의 방향 변화 등에 따른 P는 무시할 수 있을 정도로 작았다. 또한 Submergence depth가 낮을수록 또한 Gas flow rate가 증가할수록 Gas hold-up은 증가하는 경향을 보였다. Liquid submergence depth 150~300mm, Gas flow rate 150~300Nm³/hr 범위 내에서 Gas hold-up은 약 0.4~0.5 정도의 값을 나타내었고, Bubble 크기는 직경 2~20mm를 유지하였다.

$\Sigma So/Ss$ 의 값이 동일한 경우에도 Slot의 직경과 개수가 달라지면 Slot Reynolds number도 달라지게 되며 Slot Reynolds number가 달라지면 분사되는 Gas의 분사상태 및 흐름특성 또한 달라지게 되므로 $\Sigma So/Ss$ 는 직접적인 설계변수가 될 수 없을 것으로 판단된다. 또한 Slot과 Sparger의 Reynolds number의 차이가 큰 Sparger type일수록 Froth zone의 안정성 및 Liquid flow pattern이 급격하게 나빠지는 현상이 발생하였다.

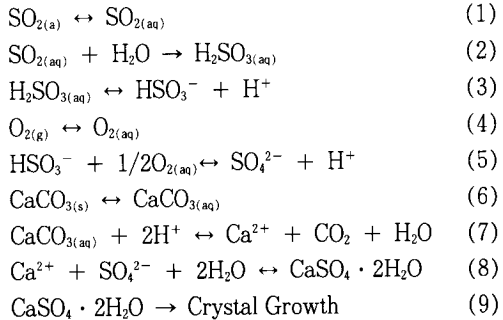
일반적으로 Bubble column에서 Gas sparger의 Orifice Reynolds number가 10,000~50,000의 범위

이때 Jet gas가 형성되고 Orifice Reynolds number의 변화에 따라 분사되는 Gas의 분사상태 및 Bubble의 거동과 특성이 크게 달라지는 것으로 알려져 있다. Submergence depth 150~300mm, Gas flow rate 150~300 Nm³/hr의 범위 내에서 가장 안정하고 양호한 Froth zone과 Liquid flow pattern을 형성한 Sparger는 Type A와 Type C-3였으며 이 Sparger들은 Reynolds number가 Slot과 동일하다는 특징을 가지고 있다. 따라서 Slot의 Reynolds number를 약 12,000 이상으로 하고 Slot과 Sparger의 Reynolds number가 동일하게 되도록 Sparger를 설계하는 것이 Sparger 설계의 최적 조건인 것으로 판단된다. 다만 Slot 및 Sparger의 Reynolds number가 동일한 Type A와 Type C-3를 비교해 보면 ΣSo/Ss 값이 큰 Type C-3가 Type A보다 같은 조건 하에서 ΔP가 작으므로 Blower의 동력소모 측면을 고려해 볼 때 Type C-3가 훨씬 유리함을 알 수 있다. 따라서 SO₂ 흡수 실험에서는 Type C-3의 Sparger를 선택하여 실험을 수행하였다. Table 2에 Sparger type C-3에 대하여 Gas flow rate의 변화에 따른 Slot과 Sparger의 Reynolds number를 나타내었다.

3. 2. SO₂ 흡수 실험

이 공정의 가장 큰 특징은 탈황공정에서 일어나는 모든 화학반응 즉 SO₂의 흡수, 산화, 중화, Gypsum의 결정화 및 결정성장반응이 하나의 반응기 내에서 연속적으로 이루어진다는 점이다. 일반적으로 흡수액의 pH가 5~7 범위에서 운전되는 별도 산화방식의 습식 석회석-석고공정에서는 SO₂가 물에 흡수되어 H₂O의 Hydrolysis에 의해 생성된 H⁺이온과 반응할 SO₃²⁻나 CO₃²⁻ 등 일정량 이상의 Buffer가 존재해야 연속적인 SO₂흡수가 가능하지만, 이 공정은 흡수된 SO₂를 SO₄²⁻로 강제산화하여 흡수액 내의 SO₂평형분압을 낮은 상태로 유지시킴으로써 낮은 pH 하에서도

연속적인 SO₂ 흡수가 가능하다. 반응기 내에서 일어나는 화학반응은 다음과 같이 나타낼 수 있다.



이들 반응 중 Froth zone에서는 (1)과 (6)의 반응이, Reaction zone에서는 (4)와 (9)의 반응이 속도 결정단계인 것으로 생각된다.

Fig. 2와 3은 pH변화에 따른 SO₂ 제거효율을 나타낸 것이다. 흡수액의 pH가 증가할수록 SO₂ 제거효율은 약간 증가하는 경향을 나타내고 있으나 pH 3.8 이상에서는 SO₂ 제거효율이 거의 일정하게 유지되었으며 낮은 pH영역에서도 비교적 높은 제거효율이 얻어졌다. 이렇게 낮은 pH영역에서도 높은 SO₂ 제거효율이 얻어진 이유는 강제산화에 의해 HSO₃⁻이온이 SO₄²⁻로 완전하게 산화됨으로써 흡수액 내의 SO₂ 평형분압이 매우 낮게 유지되었기 때문으로 생각된다. 또한 입구 SO₂농도가 높은 경우(1800ppm)가 낮은

Table 2. Relationship Between Slot Velocity and Reynolds Number

Sparger Type	ΣSo/Ss	Gas flow rate (Nm ³ /hr)	Slot Velocity (m/s)	Reynolds Number	
				Slot	Sparger
C-3 (20φ×5)	0.20	150	8.9	12,700	12,700
		200	11.8	17,000	17,000
		250	14.7	21,200	21,200
		300	17.7	25,500	25,500

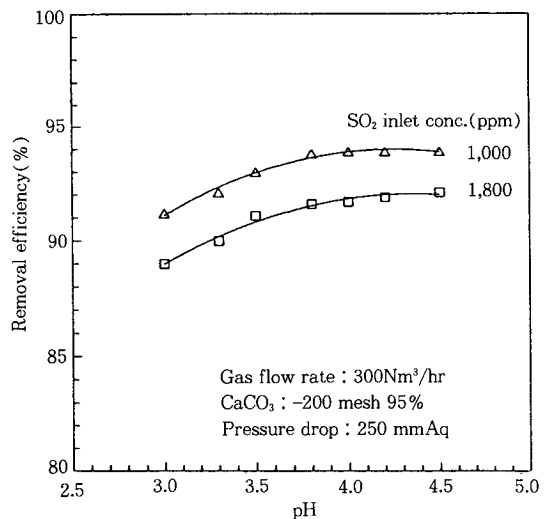


Fig. 2. Effect of pH on SO₂ removal efficiency at different inlet SO₂ concentration.

경우(1000ppm) 보다 pH 변화에 관계없이 SO₂ 제거 효율이 약 2% 정도 낮게 나타났다. 이러한 이유는 반응기 입구 SO₂농도가 증가함에 따라 흡수액 내에서의 SO₂ 평형분압이 다소 증가했기 때문으로 추측된다. Spray Type의 재래식 습식 석회석-석고공정에서는 일반적으로 SO₂ 제거효율이 pH 변화에 대단히 민감하게 영향을 받는 것으로 알려져 있지만, 실험결과 본 공정에서는 SO₂ 제거효율이 pH 변화에 따라 민감하게 영향을 받지 않는 것으로 판단되나, 반응기 내부의 재질부식 등의 문제를 고려하여 pH 약 4.0 정도에서 운전하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

ΔP(반응기 입구와 출구의 압력차)의 증가는 Sparger의 침수깊이(Liquid depth) 증가를 의미하므로 가스유속이 일정한 경우에는 ΔP가 증가할수록 기-액 접촉면적과 접촉시간이 증가하게 된다. 따라서 ΔP가 증가하면 SO₂ 제거효율도 증가하게 된다. 그러나 높은 SO₂ 제거효율을 얻기 위해서 Sparger의 침수깊이 즉 ΔP를 지나치게 높게 유지하는 것은 운전 동력비용의 증가를 초래하므로 요구되는 SO₂ 제거효율에 대응하는 최소한의 ΔP로 장치를 운전하는 것이 바람직하다.

Fig. 4는 반응기 내의 흡수액의 pH를 일정하게 (pH=4.0)유지한 상태에서 압력손실과 SO₂ 제거효율의 관계를 나타내고 있다. 실험결과에 따르면 pH 4.0 정도에서 90% 이상의 SO₂ 제거효율을 얻기 위해서는 P를 적어도 230mmAq 이상으로 유지시켜야 할

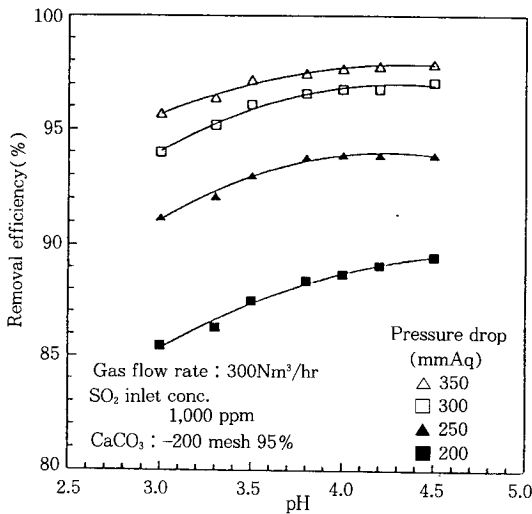


Fig. 3. Effect of pH on SO₂ removal efficiency at different pressure drop.

것으로 판단된다. 또한 본 공정에서 SO₂ 제거효율은 pH보다 P의 변화에 보다 더 큰 영향을 받고 있으며 이러한 특징은 반응기 내에서의 화학반응과 장치의 특성에 기인하는 것으로서 가스분사방식의 가장 두드러진 특징 중의 하나인 것으로 생각된다.

Table 3은 Gas flow rate 변화에 따른 SO₂ Removal efficiency를 나타낸 것으로 Gas flow rate에 따른 SO₂ Removal efficiency의 변화는 인정되지 않는다. 이러한 이유는 Gas flow rate의 감소에 따라 ΔP를 일정하게 유지하려면 Submergence depth가 증가해야 하기 때문에 Gas flow rate를 변화시켜도 Froth zone의 높이 즉, 기-액 접촉면적은 일정하게 유지되었기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 5는 반응기 입구의 SO₂농도 1,000ppm, ΔP 250mmAq 조건하에서 중화제로써 Precipitated Calcium Carbonate(PCC : 침강성탄산칼슘)와 -200mesh

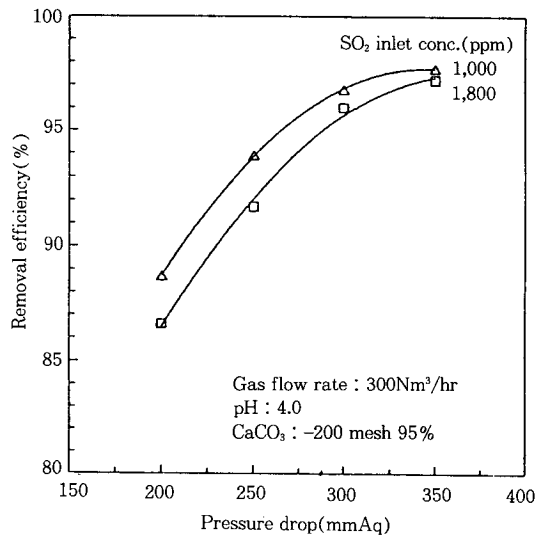


Fig. 4. Effect of pressure drop on SO₂ removal efficiency at different inlet SO₂ concentration.

Table 3. Gas Flow Rate Vs. SO₂ Removal Efficiency

Gas Flow Rate(Nm ³ /hr)	SO ₂ Removal Efficiency (%)
300	96.0
250	95.9
200	96.0
150	96.3

pH=4.0, SO₂ inlet conc.=1,800ppm
 ΔP=300mmAq
 Oxidation Air Flow Rate=100 NI/min.

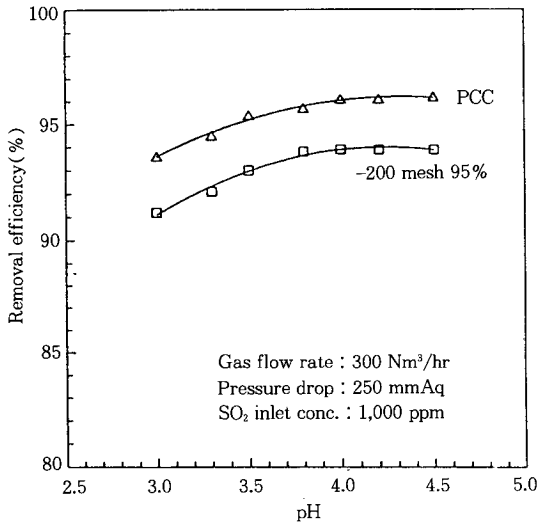


Fig. 5. Effect of particle size of CaCO₃ on SO₂ removal efficiency.

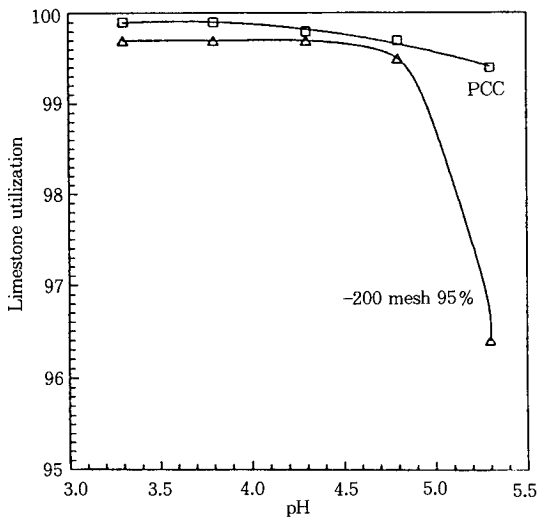
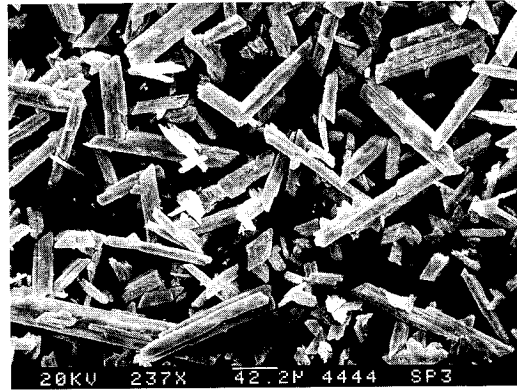
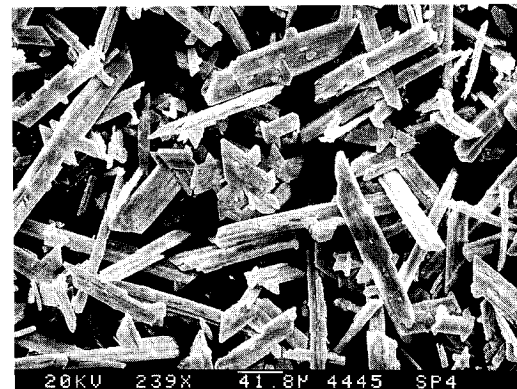


Fig. 6. Relationship between pH and limestone utilization.

95%인 중질탄산칼슘(Ground limestone)을 사용하였을 경우의 pH에 대한 SO₂ 제거효율을 나타낸 것이고, Fig. 6은 pH 변화에 따른 석회석 이용률을 도식한 것이다. Fig. 5로부터 전 pH 범위 내에서 90% 이상의 SO₂ 제거효율이 얻어졌으며, pH 변화에 관계없이 사용한 CaCO₃의 종류에 따라서 약 2.4% 정도의 효율 차이를 나타내었다. 이러한 이유는 CaCO₃의



A : Residence Time 20hrs



B : Residence Time 40hrs

Fig. 7. Typical SEM micrographs of by-product gypsum.

용해속도 차이에 기인하는 것으로 생각된다.

Limestone의 용해속도는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$R = k \cdot A \cdot [H^+]$$

여기에서 R = limestone 용해속도

k = 용해속도상수

A = limestone 입자 표면적

[H⁺] = 수소이온농도

따라서 Limestone의 용해속도는 주로 Limestone의 입자표면적과 H⁺ 이온의 농도 즉, pH에 의해 영향을 받는다. 실험에 사용한 PCC와 Ground limestone의 Particle size 차이가 약 10배 정도인 점을 감안하면 2.4%의 제거효율 차이는 그다지 크다고는

할 수 없다. 또한 Fig. 6에 의하면 흡수액의 pH 약 5.0 이하에서는 SO_2 흡수에 사용된 CaCO_3 의 입자크기에 관계없이 모두 99% 이상의 높은 석회석 이용율을 나타내었다. 따라서 Limestone의 용해속도는 입자표면적보다는 H^+ 이온의 농도 즉, 반응액의 pH에 더 큰 영향을 받는 것으로 보이며 본 공정의 적정 운전 조건인 pH 4.0 정도에서는 미반응 석회석으로 인한 부산물 Gypsum의 순도 저하현상은 발생하지 않는다. 그러므로 비교적 낮은 pH에서 운전되는 본 공정에서는 흡수 반응제인 석회석(CaCO_3)의 가격을 고려하여 -200mesh 95% 정도의 Ground limestone(중질 탄산칼슘)을 사용하는 것이 타당할 것으로 생각된다.

본 공정의 실험에서 얻어진 부산물은 IR과 XRD분석을 통해 Gypsum임을 확인하였다.

Fig. 7은 Solid phase residence time 20시간과 40시간에서 얻어진 부산물 석고의 SEM분석결과를 나타낸 것으로서 체류시간의 증가에 따라 생성되는 석고결정의 크기도 증가하였다. 따라서 석고의 Settling rate 즉 Filterability를 증가시키기 위해서는 생성된 석고가 일정시간 이상의 체류시간을 통해 충분한 결정성장반응이 일어날 수 있도록 반응기 내의 석고농도를 비교적 높게 유지하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

4. 결 론

이상과 같은 Jet bubbling 공정을 이용한 SO_2 흡수실험을 통해 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

Jet Bubbling 공정의 핵심부분인 Gas Sparger의 설계에 있어서 가장 중요한 인자는 Reynolds number로서 Reynolds number를 12,000 이상으로 하고 Sparger와 Slot Reynolds number가 동일하게 되도록 Sparger를 설계하는 것이 Sparger설계의 최적조건인 것으로 판단된다.

본 공정의 가장 중요한 운전변수는 흡수액의 pH와 ΔP 로서 3.0 정도의 낮은 pH하에서도 높은 SO_2 제거효율이 얻어졌으며 pH 3.8 이상에서는 SO_2 제거효

율이 거의 일정하게 유지되었다. 낮은 pH 범위하에서도 높은 SO_2 제거효율이 얻어지는 이유는 강제산화에 의해 흡수액 내의 HSO_3^- 이온이 SO_4^{2-} 이온으로 거의 완전한 산화가 일어나 흡수액 내의 SO_2 분압이 매우 낮은 상태로 유지되기 때문으로 생각된다. 본 공정에서 SO_2 제거효율은 pH 변화보다는 ΔP 의 변화에 훨씬 더 의존적이었으며 90% 이상의 SO_2 제거효율을 얻기 위해서는 ΔP 를 230mmAq 이상으로 유지시켜야 할 것으로 판단된다. 또한 흡수액의 pH 5.0 이하의 조건에서는 SO_2 흡수에 사용된 석회석의 입자크기에 관계없이 모두 99.5% 이상의 높은 석회석 이용율을 나타내었다.

감 사

본 연구는 국가 선도기술개발사업으로 수행된 연구결과 중 일부임

참고 문헌

1. S. Kudo et al., First Combined FGD and DRY SO_2 Control Symposium, St. Louis, Missouri, Oct. 25(1988).
2. M. Nagashima et al., 1993 SO_2 Control Symposium, Boston, Massachusetts, Aug. 24(1993).
3. W. F. Gohara et al., IGCI Forum '91, Washington, D.C., Sept. 11(1991).
4. H. Kuroda et al., 1990 SO_2 Control Symposium, New Orleans, May 8(1990).
5. T. Hiruta et al., Hitachi Review, **38**, 3(1989).
6. D. P. Burford and I. G. Pearl, Joint ASME/IEEE Power Generation Conference, Kansas city, Kansas, Oct. 17(1993).
7. G. Maller et al., EPRI Research Report 2865-1 (1990).
8. Y. Ogawa et al., SO_2 Control Symposium, Washington D.C., Dec. 3(1991).