

총진제의 종류에 따른 습식 스크러버의 가스상 물질 제거특성

Removal Characteristics of Gaseous Contaminants by a Wet Scrubber with Different Packing Materials

한방우 · 김학준 · 김용진* · 한경수¹⁾

한국기계연구원 청정환경기계연구센터, ¹⁾동명캠프렌트

(2007년 10월 4일 접수, 2007년 10월 30일 채택)

Bangwoo Han, Hak-Joon Kim, Yong-Jin Kim* and Kyeong-Soo Han¹⁾

Environmental System Research Center,

Korea Institute of Machinery and Materials (KIMM)

¹⁾*Dongmyung Chem Plant Co., LTD*

(Received 4 October 2007, accepted 30 October 2007)

Abstract

Wet scrubber is widely used to remove toxic gaseous contaminants in various industries such as semi-conductor industry, display manufacturing industry and so on. In this study, to optimize a packed bed scrubber as one of typical wet scrubber size while keeping its performance, four different packing materials were investigated at different air flow rates, liquid-gas ratios and pH values. Ammonia, hydrochloric acid and hydrofluoric acid were used as test gases to characterize the scrubber performance. Gas removal efficiency increased as the packing size decreased, which resulted in the increase of specific surface area. The increase of air flow rate led to the decrease of gas removal efficiency, while the increase of liquid-gas ratio led to the increase of gas removal efficiency. For the case of NH₃ gas, lower pH, and for the cases of HCl and HF, higher pH contributed to higher gas removal efficiency. Gas removal efficiency of a wet scrubber increased in the order of HCl < NH₃ < HF according to its water solubility.

Key words : Scrubber, Packing Material, Packed Tower, Gas Removal Efficiency

1. 서 론

최근 급속한 현대 산업의 발전과 더불어 환경오염으로 인한 지구 환경의 파괴 문제가 심각하게 대두되면서 선진국을 중심으로 환경규제가 크게 강화되고 있는 추세에 있고, 따라서 환경산업의 규모 또한

다른 산업에 비해 매우 빠르게 증가하고 있다. 최근에는 환경기술의 선두에 있는 미국, 일본, 독일 등이 환경기술 후진 국가들을 공략하면서 환경산업은 고부가 가치산업으로 부상하고 있고 환경오염원 중 대기오염 물질은 국가간의 경계를 넘어 전 세계적으로 확산되고 있으므로 이를 방지하기 위한 국가간 협약과 규제 또한 대기오염물질 저감에 그 초점을 맞추고 있다. 이러한 배경에서 국내에서도 산업 발전설비 및 공장 등에서 발생하는 각종 유해 오염물질을 줄

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)42-868-4245, E-mail : yjkim@kimm.re.kr

이기 위한 많은 연구가 진행되고 있다.

특히 반도체, LCD 공정과 같은 다양한 유해성 화학물질을 사용하는 공정에서는 염산, 불산 등의 각종 유해 화학물질들이 배기가스로 배출되고 있다(US EPA, 2003). 일반적으로 이러한 배출가스를 제거하기 위하여 최종단에 스크러버(Scrubber)나 흡착제 등이 사용되고 있으나, 처리효율상의 한계와 구조적인 문제로 최종단에서 상당량의 유해가스가 그대로 방출되거나, 세정수 미스트에 포함되어 배출되고 있어 이에 대한 보완이나 대체 기술 개발이 매우 요구되고 있다. 유경훈 등(2003)은 철망을 다중겹층으로 제작한 데미스터를 충진제로 사용하고 이 충진제에 세정수를 분사시켜 유해가스와 액적의 접촉시간을 증가시키고자 하였고, 정광륜 등(2004)는 사이클론과 스크러버를 조합하여 대용량의 가스 및 입자 처리 장치를 개발하였다. 한편, 김종호 등(2005), 이명화 등(2006)과 Jaworek *et al.*(2006)은 스크러버에서 정전분무를 이용하여 가스상 물질 뿐만 아니라 미세 입자의 집진효율을 향상시키고자 하였고, 고승우 등(2007)은 충진층식 스크러버의 스프레이 시스템에 대한 수치해석을 통해서 액적의 크기, 분포 및 진행 방향에 따른 집진 특성을 살펴보았다.

가스상 물질을 제거하기 위한 대부분의 스크러버는 처리가스의 체류시간이 길고 세정액과의 접촉율이 큰 습식 충전탑(Packing Tower) 형태를 많이 사용하고 있다(Kiil *et al.*, 2002). 그렇지만 습식 충전탑형 스크러버는 장치의 규모가 크고 내부의 충진제(Packing)가 막히면서 생기는 여러 가지 유지 관리상의 문제점 때문에 사용상에 제약이 있다. 본 연구에서는 스크러버 크기를 줄이면서도 동급이상의 효율을 확보하기 위해 충진제의 종류에 따른 압력손실 및 암모니아, 염산 및 불산 가스의 제거효율을 측정 및 비교해 보았다. 적절한 충진제를 선택하여 스크러버 차압 및 크기를 절약하면 기타 보조장치를 추가적으로 적용할 수 있기 때문에 기존 습식 충전탑형 스크러버의 단점을 최대한 극복할 수 있을 것으로 생각된다. 또한, 충진제 종류에 따른 성능 변화와 함께 유속별, 액기비별, pH 농도별 가스 제거 성능을 살펴봄으로써 스크러버의 운전 조건에 따른 성능 특성을 살펴보았다.

2. 연구 방법

2.1 실험 장치

그림 1은 본 연구를 수행하기 위한 실험 장치의 구성도를 나타내고 있다. 시스템은 충전탑 본체, 시험덕트, 시험가스 공급장치, 액체 공급 및 순환 장치, 가스 측정 장치, 압력손실 측정 장치 등으로 구성되고 있다. 스크러버는 세정수 방향과 유동방향이 수직인 수평형 충전탑으로 구성하였다. 충전탑 본체는 충진제, 충진제 지지판, 스프레이 노즐, 데미스터(demister), 배수구 등으로 이루어져 있다. 충진제는 그림 2에 나타난 것과 같이 폴리프로필렌(polypropylene)의 재질로 구형의 모양을 갖고 있고 표면적을 넓이기 위해 내, 외부에 격자를 여러 개 형성한 형태를 나타내고 있다. 본 연구에서는 크기와 비표면적이 다른 4종류의 충진제를 사용하였고 그 물성은 표 1과 같다. 충진제 크기에 따른 영향을 살펴보기 위해 직경이 2.54, 6.35 및 8.89 mm인 세 종류의 충진제(P1.0, P2.5A 및 P3.5)을 비교하였고 동일 크기에서 비표면적에 따른 영향을 살펴보기 위해 충진제 격자가 8개인 것(P2.5A)과 12개(P2.5B)인 것을 비교해 보았다. 충진제의 비표면적은 충진제를 제조하기 위한 몰드(mold)의 3차원 모델로부터 계산을 통해 대략적으로 구하였다. 표 1에서 보는 것과 같이 충진제 크기가 커질수록 비표면적과 밀도가 작아지는 것을 알 수 있다. 한편 P2.5B는 P2.5A에 비하여 비표면적이 약 1.5배 큰 것으로 나타났다.

충진제별 효율 비교를 위해 충전탑 본체의 충진제 함유 부피는 높이(H) 0.4 m, 폭(W) 0.4 m, 길이(Z) 0.47 m로 고정하였다. 스프레이 분사 노즐 위치는 2열로 3개씩 각각 충진제 상단에 6개를 설치하였고, 데미스터는 가스 출구 쪽에 설치하여 미스트가 후단으로 배출되는 것을 방지하도록 하였다. 시험가스는 버블러(bubbler) 내에 시험가스 수용액을 주입하고 온도를 30~40°C의 범위에서 일정하게 유지시키면서 0.1~10 lpm의 공기를 가스 수용액 내로 일정하게 주입하여 발생시켰다. 충전탑 본체의 배수구는 pH 조절을 위하여 별도의 액체 저장탱크와 연결되도록 구성하였다. 액체 저장 탱크는 순환 펌프와 연결되어 pH가 조절된 수용액을 스프레이 노즐로 공급할 수 있도록 하였고 충전탑 본체의 배수구에도 연결되

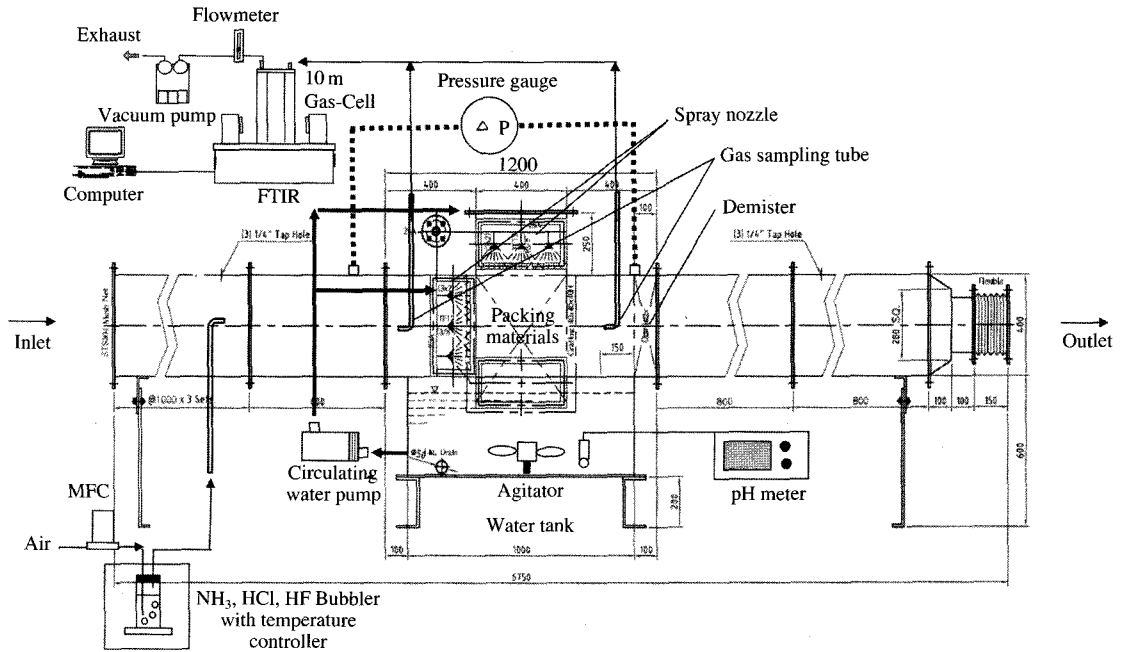


Fig. 1. Experimental setup for measuring gas removal efficiencies and pressure drop in a wet scrubber.

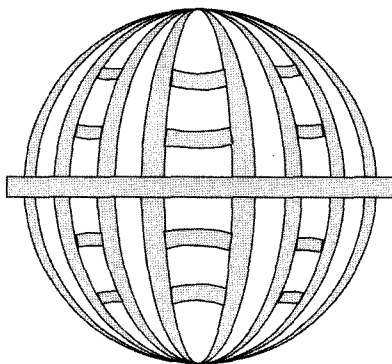


Fig. 2. The shape of the packing materials used in a wet scrubber.

어 있어 충전제로 공급된 물이 다시 순환하여 액체 저장탱크로 회수되도록 구성하였다. 시험가스인 암모니아, 염산 및 불산의 계측에는 10 m 가스셀을 장착한 FT-IR 장치(ABB, FILA2000-100)를 사용하였다.

2.2 실험 방법

충전탑 본체 전, 후단 사이의 압력손실은 충전탑

Table 1. Properties of four different packing materials.

Packing	Diameter (m)	Specific surface area (m ² /m ³)	Void space (%)	Bulk density (kg/m ³)
P1.0	2.54 × 10 ⁻²	279	90	139
P2.5A	6.35 × 10 ⁻²	150	93	110
P2.5B	6.35 × 10 ⁻²	224	89	149
P3.5	8.89 × 10 ⁻²	125	95	77

본체를 시험 덕트에 장착시켜 액기비(L/m³)를 2.0으로 고정시킨 상태에서 충전제 충전부의 통과 유속을 1.0에서 3.0 m/s까지 변화시키면서, 충전제 종류별로 측정하였고, 충전제 자체만의 압력손실을 비교하기 위해 충전제가 비어있는 상태의 충전탑 본체에서의 유속별 압력손실을 측정하여 차감시켰다. 시험 가스 대상 물질로는 반도체 공정에서 주로 발생하는 암모니아(NH₃), 염산(HCl) 및 불산(HF)을 사용하였다. 시험 가스의 특성을 표 2에 나타내었다. 먼저, 시험가스 공급장치를 이용하여 암모니아, 염산 및 불산 가스를 시험 덕트의 상단에서 50~60 ppm의 농도 범위에서 일정하게 공급하였고 충전제 종류를 변화시켜 가면서 액기비 2.0, pH 3(암모니아) 또는 pH

Table 2. Properties of the tested gases.

Gas	Phase	M.W. (g/mol)	Boiling temp.(K)	Melting temp.(K)	Density (gmol/cm ³)	Solubility in water ((J/cm ³) ^{0.5})	Chemical properties	Physical properties
NH ₃	Gas	17.03	240	195	0.0375	2.500 × 10 ⁴	Corrosive and toxic	Colorless gas with strong pungent odor
HCl	Liquid	36.46	188	158	0.0327	1.200 × 10 ⁴	Corrosive and toxic	Colorless gas, hygroscopic
HF	Liquid	20.01	293	189	0.0483	3.645 × 10 ⁴	Corrosive and toxic	Colorless liquid

11(염산, 불산)에 대하여 1.0에서 3.0 m/s 까지 유속별로 시험을 수행하였다. 또한 유속 2.0 m/s, pH 3(암모니아) 또는 pH 11(염산, 불산)에 대하여 1.5에서 3.0 L/m³까지의 액기비별로 시험을 수행하였고, 액기비 2.0, 유속 2.0 m/s에 대하여 pH 값 3, 4, 5 또는 8, 10, 11의 조건에서 pH 농도별로 가스 제거효율을 측정하였다. 염기성 기체인 암모니아를 제거하고자 할 때에는 HCl 용액을 이용하여 공급 액체의 pH를 3, 4 및 5로 변화시켰고 산성 기체인 염산과 불산을 사용할 때에는 NaOH 용액을 이용하여 pH를 8, 10 및 11로 변화시켰다. 가스 제거효율은 충전탑 본체의 상류측 및 하류측에서의 암모니아, 염산 및 불산 가스의 가스 농도를 교대로 측정하고 그 비를 이용하여 계산하였다. 가스 제거효율 계산식은 다음과 같다.

$$\eta = \left(1 - \frac{C_o}{C_i}\right) \times 100 \quad (1)$$

여기서,

η : 제거 효율 (%)

C_i : 입구측 농도(ppm)

C_o : 출구측 농도(ppm)

한편, 충전탑의 길이 (Z)는 이동단위 수 (NTU: Number per Transper Unit)와 이동단위 높이 (HTU: Hight per Transper Unit)의 곱으로 나타내므로 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$Z = NTU \cdot HTU \quad (2)$$

또한, NTU는 간단하게 다음 식으로 표현할 수 있다(Chen *et al.*, 2002).

$$NTU = \int_0^i \frac{dC}{C} = \ln\left(\frac{C_i}{C}\right) = \ln\left(\frac{100}{100-\eta}\right) \quad (3)$$

Table 3. Removal efficiencies of NH₃, HCl and HF gases for four different packing materials.

Gas	Velocity (m/s)	L/G (L/m ³)	pH	Efficiency (%)				
				P1.0	P2.5A	P2.5B	P3.5	
NH ₃	1.0	2.0	3	98.9	94.5	96.8	90.5	
	1.5	2.0	3	98.4	93.7	95.9	88.7	
	2.0	2.0	3	97.9	92.8	95.3	86.7	
	2.5	2.0	3	96.9	92.1	94.1	85.6	
	3.0	2.0	3	95.7	90.4	93.2	84.9	
	2.0	1.5	3	97.1	90.3	94.4	84.3	
	2.0	2.5	3	98.4	94.8	96.6	87.8	
	2.0	3.0	3	98.7	95.6	97.5	89.3	
	2.0	2.0	4	95.8	89.5	93.4	83.9	
	2.0	2.0	5	93.8	87.0	90.7	79.8	
	HCl	1.0	2.0	11	97.3	91.9	93.7	88.1
		1.5	2.0	11	97.2	90.9	92.8	87.1
2.0		2.0	11	96.0	90.2	92.5	85.5	
2.5		2.0	11	95.8	88.3	91.5	83.5	
3.0		2.0	11	94.6	87.7	90.1	82.4	
2.0		1.5	11	94.9	87.6	91.6	82.8	
2.0		2.5	11	97.2	92.0	94.9	87.0	
2.0		3.0	11	97.5	92.8	95.6	89.7	
2.0		2.0	10	94.6	86.8	90.6	82.4	
2.0		2.0	8	92.7	84.4	88.0	78.3	
HF	1.0	2.0	11	99.6	95.0	97.6	91.3	
	1.5	2.0	11	99.2	94.7	96.8	89.4	
	2.0	2.0	11	98.6	93.2	95.7	87.3	
	2.5	2.0	11	97.6	92.9	94.6	86.1	
	3.0	2.0	11	96.3	91.2	93.9	85.4	
	2.0	1.5	11	97.6	91.8	95.0	84.8	
	2.0	2.5	11	99.5	95.5	97.7	88.4	
	2.0	3.0	11	99.6	96.4	98.4	92.0	
	2.0	2.0	10	97.8	90.4	94.2	84.3	
	2.0	2.0	8	94.8	85.7	91.5	81.0	

따라서, 충전탑 길이 Z에서의 가스 제거효율 η 를 알면, NTU와 HTU 값을 구할 수 있다.

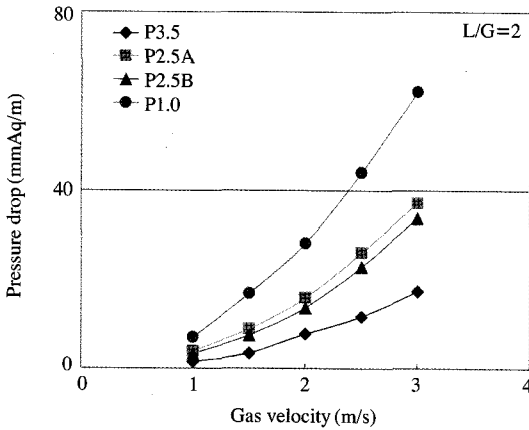


Fig. 3. Changes in pressure drop with gas velocities for four different packing materials.

3. 결과 및 고찰

충진탑 방식의 스크러버에 적용되는 충전제의 종류에 따른 차압 특성과 암모니아, 염산 및 불산의 유속별, 액기비별, pH 농도별 가스 제거효율을 측정하였고 조건별 가스 제거효율의 결과를 표 3에 정리하여 나타내었다.

3.1 충전제 종류별 차압 비교

그림 3은 액기비가 2.0일 때의 4종류 충전제의 유속에 따른 차압 변화를 나타내고 있다. 차압은 대략적으로 유속에 대하여 지수적으로 증가하는 경향을 나타내었고 충전제 크기가 증가할 때 거의 선형적으로 차압이 감소되는 것을 확인할 수 있었다. 한편, P2.5B는 P2.5A보다 표면적이 약 1.5배나 높음에도 불구하고 P2.5A와 거의 유사하거나 오히려 약간 작은 차압 특성을 나타내었다. 따라서 충전제의 차압은 충전제 표면적보다는 충전제 크기에 의해 좌우되는 것으로 보아 충전제가 적층될 때 충전제 사이의 공간에 의한 영향이 지배적이며 또한 충전제 내의 빈 공간(void space)도 미소하게 영향을 주는 것으로 판단된다.

3.2 유속에 따른 암모니아 가스 제거 특성

그림 4는 액기비가 2.0이고 pH가 3.0일 때 4종류 충전제의 유속에 따른 암모니아 가스 제거효율을 나타내고 있다. 암모니아 제거효율은 액기비를 고정시

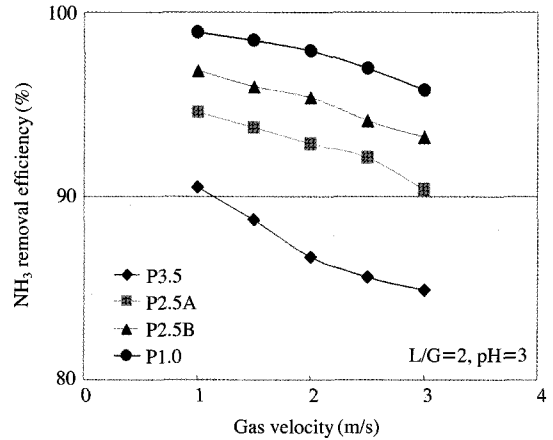


Fig. 4. Removal efficiencies of NH₃ gas with gas velocities for four different packing materials.

킬 때 충전제 종류에 관계없이 유속이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다. 액기비를 일정하게 유지하기 위하여 유속을 증가시킬 때 분무 세정액의 양을 비례적으로 증가시켰기 때문에 유속을 증가시킬수록 제거효율이 감소해야 하는 것은 아니지만 결과적으로 유속이 증가할 때 제거효율이 지속적으로 감소하는 것으로 나타났다. 이는 액기비보다는 충전제 내의 가스 체류시간이 스크러버 흡수 과정에서 더욱 중요한 요인임을 말해준다. 한편, 충전제 크기가 작아질수록 암모니아 제거효율이 우수해지는 경향을 나타내었다. 또한, P2.5B는 P2.5A와 유사한 차압 특성에도 불구하고 암모니아 제거효율은 P2.5A보다 약 2.4~3.2% 정도 높은 것으로 나타났다. 즉, 충전제의 표면적이 클수록 암모니아 제거효율이 우수해지는 것으로 나타났고 이는 충전제의 표면적이 높을수록 넓은 면적의 액체막이 형성되어 기체가 액체로 확산되는 흡수량이 증가하기 때문으로 생각된다.

충진제의 두께는 0.47 m이므로 암모니아 제거효율을 이용하여 HTU (Height per Transfer Unit)를 구해보면 2.0 m/s에 대하여 P1.0은 0.12, P2.5A는 0.18, P2.5B는 0.15 및 P3.5는 0.23을 나타내었다. 즉 P3.5 충전제가 P1.0 충전제보다 HTU값이 약 1.9배까지 크게 나타났고 따라서 동일한 가스 제거효율을 얻기 위해서 P3.5가 P1.0보다 약 1.9배의 충전제 두께를 사용해야 하는 것을 의미한다. 한편, P2.5A는 P2.5B보다 약 1.2배 정도 큰 HTU값을 나타내므로 P2.5B

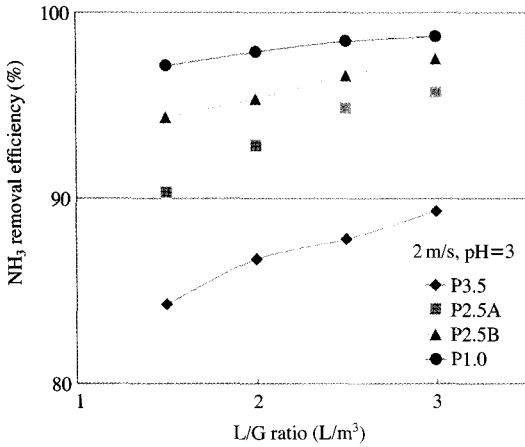


Fig. 5. Removal efficiencies of NH₃ gas with liquid-gas ratios (L/G) for four different packing materials.

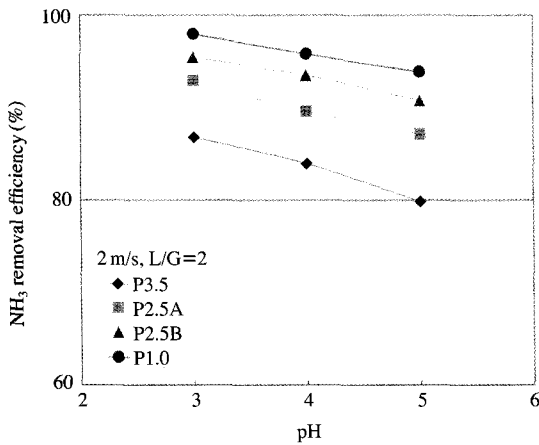


Fig. 6. Removal efficiencies of NH₃ gas with pH values for four different packing materials.

를 사용할 경우 P2.5A를 사용할 때보다 약 20%의 부피를 줄일 수 있음을 알 수 있다.

3.3 액기비에 따른 암모니아 가스 제거 특성

그림 5는 유속 2 m/s, pH 3일 때 충진제 네 종류에 대하여 액기비별 암모니아 제거효율을 나타내고 있다. 암모니아 제거효율은 유속 및 pH가 일정할 때 충진제 종류에 관계없이 액기비를 증가할수록 비례하여 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 액기비가 증가할수록 충진제 격자면에서의 액체막이 많이 형성

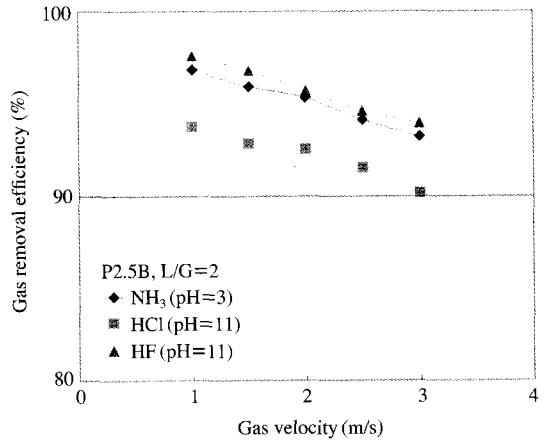


Fig. 7. Removal efficiencies of NH₃, HCl and HF gases with gas velocities for a P2.5B packing material.

되어 기체의 흡수량이 증가하기 때문으로 판단된다. 액기비 변화에서도 충진제 크기가 작을수록 암모니아 제거효율이 우수하였고, P2.5B가 P2.5A보다 암모니아 제거효율이 우수한 특성을 나타내었다. 동일한 P2.5B 충진제를 사용할 경우 액기비 1.5인 경우가 액기비 3.0인 경우보다 HTU값이 약 1.3배 큰 값을 나타내므로 액기비 3.0을 적용할 경우 액기비 1.5를 적용할 경우보다 약 30%의 부피를 줄일 수 있음을 확인할 수 있다.

3.4 pH에 따른 암모니아 가스 제거 특성

그림 6은 유속 2 m/s, 액기비 2일 때의 pH 농도에 따른 암모니아 제거효율을 나타내고 있다. 암모니아 제거효율은 유속 및 액기비를 고정시킬 때 충진제 종류에 관계없이 pH를 3에서 5로 증가시킬수록 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 암모니아가 세정액 중의 HCl과 반응하여 붉은 색의 염화암모늄(NH₄Cl)으로 변환됨으로써 세정액의 내의 암모니아 농도를 줄여주고 가스 흡수율을 지속적으로 유지시켜주기 때문이다(Shabunya *et al.*, 2003).

3.5 가스 종류에 따른 가스 제거 특성 비교

그림 7~9는 암모니아, 염산 및 불산 가스에 대하여 P2.5B 충진제에서의 유속, 액기비 및 pH 농도에 따른 가스 제거효율을 각각 나타내고 있다. 가스 제거효율은 유속 및 액기비에 관계없이 동일 조건에서

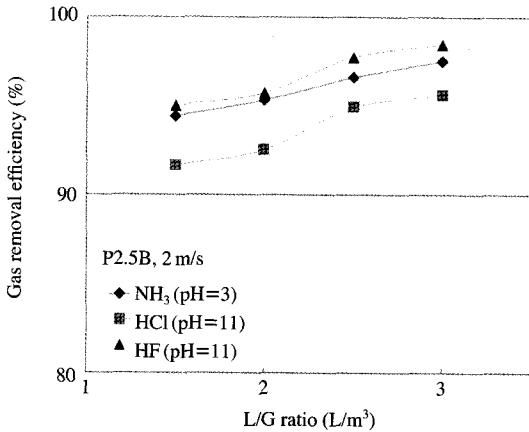


Fig. 8. Removal efficiencies of NH₃, HCl and HF gases with liquid-gas ratios (L/G) for a P2.5B packing material.

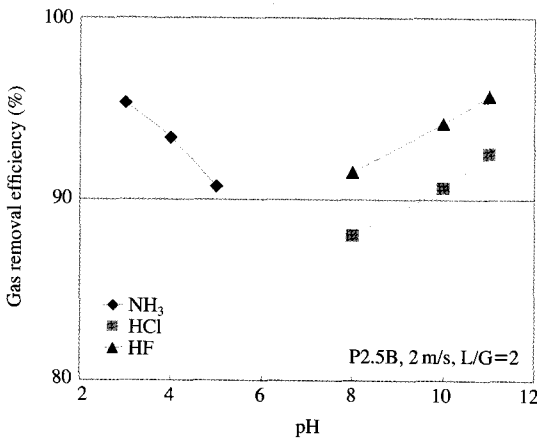


Fig. 9. Removal efficiencies of NH₃, HCl and HF gases with pH values for a P2.5B packing material.

항상 염산, 암모니아, 불산 순으로 증가하는 것으로 나타났다. 한편, pH가 3일 때의 암모니아 제거효율과 pH가 11일 때의 염산, 불산의 제거효율을 비교해 볼 때에도 역시 염산, 암모니아, 불산 순으로 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 암모니아와 불산 제거효율은 크게 차이가 나지 않았지만 염산 제거효율은 다른 두 가스에 비해 상대적으로 낮은 제거성능을 나타내었다. 이는 표 2의 물에 대한 용해도의 크기와 유사한 경향을 나타내었다. 즉, 물에 대한 용해도가 클수록 스크러버의 가스 제거능력이 우수해지는 것으로

나타났다. 따라서 스크러버에서 기체의 액체로의 흡수과정에는 기체의 액체에 대한 용해도가 매우 중요한 요인임을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 충전탑 방식의 스크러버에 적용되는 충전제의 종류에 따른 가스제거효율을 측정하고 이와 동시에 유속별, 액기비별, pH별 및 가스 종류별 제거 특성을 파악하여 충전제 종류에 따른 스크러버 크기의 설계 기준을 도출하고자 하는 것이었다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 충전제에서의 차압은 유속이 증가할수록 비례하여 증가하는 경향을 나타내었고, 충전제 크기가 작을수록 더 큰 차압이 인가되는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 동일한 크기의 P2.5A와 P2.5B는 표면적이 다름에도 불구하고 유사한 차압 특성을 나타내었다.

2) 충전제 크기가 작을수록 스크러버의 가스 제거효율이 증가하였고 동일한 충전제 크기에서는 표면적이 클수록 가스 제거효율이 우수한 경향을 나타내었다. 기준치의 가스 제거효율을 얻고자 할 때 적용하는 충전제 종류에 따라서 약 1.9배의 충전제 부피 차이를 얻을 수 있었고, 동일 크기의 충전제에서도 표면적 변화를 통해 약 1.2배의 부피 차이를 얻을 수 있었다. 즉 적절한 충전제의 적용을 통해서 스크러버의 크기를 상당 수준 줄일 수 있음을 알 수 있었다.

3) 충전제 종류에 관계없이, 액기비를 고정시킬 때 유속이 증가할수록 가스 제거효율은 감소하는 경향을 나타내었고, 유속을 고정시킬 때 액기비를 증가할수록 가스 제거효율은 비례하여 증가하는 경향을 나타내었다. 또한, 암모니아 가스의 경우는 pH를 감소시킬 때, 염산 및 불산 가스의 경우는 pH를 증가시킬 때 가스 제거효율이 증가하는 경향을 나타내었다.

4) 가스 제거효율은 유속, 액기비 변화에 관계없이 동일 조건에서 항상 염산, 암모니아, 불산 순으로 증가하는 것으로 나타났고 이는 가스의 물에 대한 용해도의 순서와도 일치하는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

고승우, 노경철, 유홍선 (2007) 충전층식 스크러버의 스프레

- 이 시스템 최적 설계에 대한 수치해석적 연구, 한국전산유체공학회지, 12(1), 28-34.
- 김중호, 황의현, 황유성, 최훈주 (2005) 하전역적 스크러버를 이용한 미세분진의 제거, 한국대기환경학회 추계 학술대회 논문집, 488-490.
- 유경훈, 노희환, 최은수, 김종균 (2003) 충전충식 세정집진기의 집진특성 실험, 설비공학논문집, 15(4), 305-311.
- 이명화, 김상범, 황유성, 김중호, 김경수 (2006) 입자와 액적간의 정전기적 응집을 통한 미세입자의 효율적인 제어, 한국액체미립화학회지, 11(2), 98-104.
- 정광륜, 이병규, 이주혁, 박성훈 (2004) 사이클론과 스크러버를 조합한 새로운 개념의 처리장치 개발, 한국대기환경학회 추계학술대회 논문집, 455-456.
- Chen, L., J.W. Lin, and C.L. Yang (2002) Absorption of NO_2 in a packed tower with Na_2SO_3 aqueous solution, Environmental Progress, 21(4), 225-230.
- Jaworek, A., W. Balachandran, M. Lackowski, J. Kulon, and A. Krupa (2006) Multi-nozzle electro spray system for gas cleaning processes, Journal of Electrostatics, 64, 194-202.
- Kill, S., H. Nygaard, and J.E. Johnsson (2002) Simulation studies of the influence of HCl absorption on the performance of a wet flue gas desulphurisation pilot plant, Chemical Engineering Science, 57, 347-354.
- Shabunya, S.I., B. Wende, S.P. Fisenko, and K. Schaber (2003) Simulations and experiments on the formation of ammonium chloride particles in wet scrubbers, Chemical Engineering and Processing, 42, 789-800.
- US EPA (2003) Technology transfer network air toxic web site, <http://www.epa.gov/ttn/atw>