

Water-cyclone을 이용한 미세입자 및 수용성가스 제거효율에 대한 실험적 연구

Experimental Study on Particle and Soluble Gas Removal Efficiency of Water-cyclone

김춘이 · 권성안 · 이상준* · 고창복¹⁾

평택대학교 환경에너지기술융합연구센터, ¹⁾한국에너지기술연구원
(2012년 12월 19일 접수, 2013년 1월 16일 수정, 2013년 2월 25일 채택)

Chun-Lee Kim, Sung-An Kwon, Sang-Jun Lee* and Chang-Bog Ko¹⁾

Environment & Energy Convergence Tech. R&D, Pyeongtaek University

¹⁾*Korea Institute of Energy Research*

(Received 19 December 2012, revised 16 January 2013, accepted 25 February 2013)

Abstract

The fine-particles, moisture and variety of hazardous gases are produced during electronic manufacture process. Most of the fine-particles are 0.1 ~ 10 μm in size and the hazardous gases such as HF, SiH₄, CO, NH₃, etc. seriously affect environment, human's body and manufacturing process. To remove these characterized gases and fine-particles, Water-Cyclone designed and tested for removal efficiency on fine-particles and NH₃ under -980Pa negative pressure condition.

As a result, under 0.1 ~ 1.0 m³/min flow condition, the efficiency on 5 μm particles was 80 ~ 96%, 10 μm particles was 86 ~ 96%, and 20 μm particles was 91 ~ 99%. Besides, the removal efficiency on soluble gas NH₃ was 56.5% at 0.5 m³/min and 79.1% at 1.0 m³/min under 500 ppm flow concentration and 70.0% at 1.0 m³/min under 1,000 ppm flow concentration. Therefore, on particles, as the flow rate and particle size increased, the collection efficiency rate was increased. On soluble gas, as the flow rate increased, the removal efficiency was increased under the same concentration.

Key words : Cyclone, Fine-particle, Soluble gas, Particle removal efficiency, NH₃

1. 서 론

원심력을 이용하여 입자를 포집하는 cyclone은 구조가 간단하여 입자 제거 장치로 많이 사용되고 있

다. 그러나 포집 효율을 높이기 위해서는 유량을 증가시켜 압력손실을 높여야하고, 그에 따른 에너지 손실이 증가하게 되는 단점이 있다 (Jung *et al.*, 2003). 따라서 미세입자에 대한 포집 효율을 증가시키기 위해 cyclone의 구조 및 형태를 변화시키는 많은 연구가 수행된 바 있다 (Qiu *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2010; Yoshida *et al.*, 2009; Jung *et al.*, 2003; Lim *et al.*,

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)31-659-8359, E-mail : sjlee2026@ptu.ac.kr

2003; Lim *et al.*, 2001; Molerus and Glückler, 1996).

전자산업공정에서는 미세입자 뿐만 아니라 HF, SiH₄, CO, NH₃, HCl 등과 같은 여러 유해가스들도 배출되고 있다. 이들은 서로 혹은 외부의 의도치 않는 조건 하에서 예기치 못한 폭발 등과 같은 사고의 위험성이 있으며, 이를 방지하기 위해 공정 후단 가스라인을 상온보다 높은 온도(120°C 내외)로 유지하고 있다. 이에 상대습도가 높아지게 되면서 많은 수분을 가지게 되는데, 유해 가스들이 수분에 용해되고, 이는 부식성을 지닌 액적(droplet) 상태로 되어 장비의 부식을 유발시키게 된다. 따라서 이는 미세입자와 함께 제품의 성능과 수율에 변수를 발생시켜 시장과 가격 경쟁력에도 영향을 미칠 수 있다(Oh, 2010; Chung *et al.*, 2003; Baek and Nam, 2002).

미세입자가 인체에 미치는 영향으로는 입자크기별로 6.0 μm 이하인 것은 약 10% 정도가 인간의 폐 내로 유입되고, 4.0 μm 이하인 것은 30%, 2.0 μm 이하인 것은 약 80%, 1.0 μm 이하인 것은 약 99%가 폐에 유입되어 침착된다(Baek and Nam, 2002; Hong, 2002). 또한 유해가스인 HF 또는 SiH₄는 흡입할 경우 구토 및 토혈을 할 수 있으며, 피부에 접촉될 경우 열상 및 각종 피부염을 유발할 수 있고, NH₃는 호흡곤란, 폐수

중, 기관지 폐렴 등의 증상이 나타날 수 있다(NIER, 2011).

본 연구에서는 전자산업공정 상에서 발생하는 미세입자와 각종 유해가스를 제거하고자 변형된 형태의 3단 장치를 설계하였으며, 이 장치를 water-cyclone이라 명하고, 입자 크기, 처리 유량에 따른 입자 집진효율, 유해가스 처리효율에 관하여 연구하였다.

2. 연구 방법

2.1 Water-cyclone의 설계

입자상물질과 가스상물질을 동시에 효과적으로 제거하기 위해 water-cyclone을 그림 1과 같이 설계하였다. 1단은 고효율 집진기인 pencil cyclone을 벤츄리(venturi) 효과가 나타나도록 변형하고, 2단에서는 물을 순환시켜주며 내벽에 수막을 형성하여 입자는 흡착되고, 가스는 수용될 수 있도록 하였다. 그리고 3단은 2단에서 가스의 흐름으로 인해 발생될 수 있는 미세 액적을 처리할 수 있도록 설계하였다.

1단의 ①번은 벤츄리 효과를 위해 직경을 변형시킨 부위이며, ②번은 내부 공기를 흡입하는 배관의

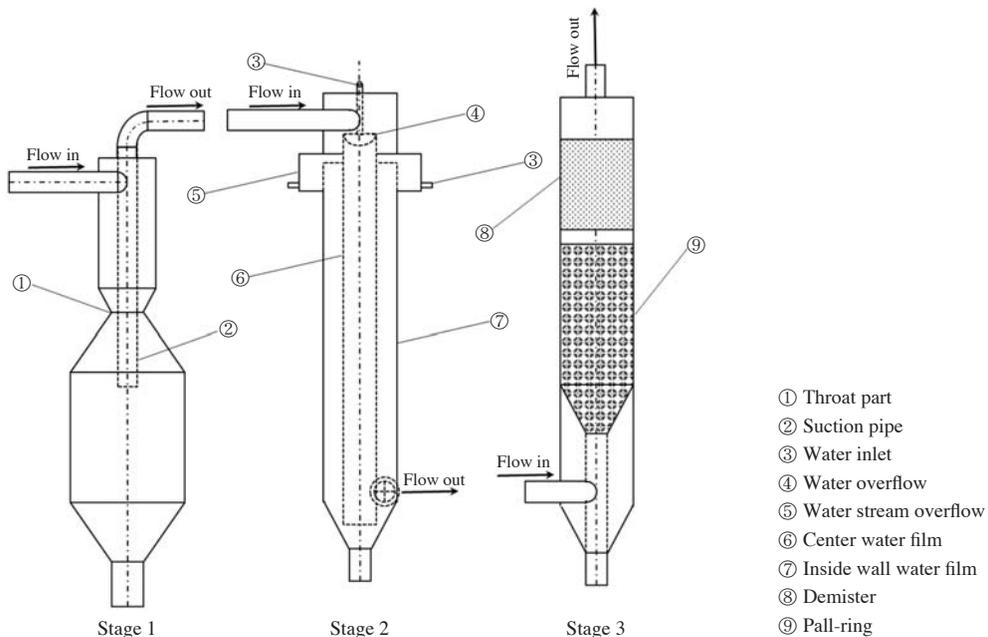


Fig. 1. Design of water-cyclone.

위치를 ①번 부위보다 아래로 배치하여 흡입 배관 끝에서 발생하는 난류에 영향을 받지 않고 선회류에 의해 입자가 원추부까지 이동 및 포집 될 수 있도록 설계하였다. 즉, 여기에 적용된 벤츨리 효과는 원심력을 극대화하여 미세입자들의 모멘텀(momentum)을 높임으로써 ②번 배출구로 미세입자들이 바로 배출되는 현상을 방지하고자 했다.

2단은 일반 cyclone과 scrubber의 원리를 이용하고자 ③번으로 물을 유입하여 ⑥번과 ⑦번에 수막을 형성할 수 있도록 하였다. 이처럼 반응기 내부에는 수막이 형성되어 흐르게 되는데, 선회류를 생성하며 유입되는 입자상물질은 수막에 흡착되고, 가스상물질은 수용되어 제거되도록 설계하였다. 유입되는 물은 상수를 사용하여 water-cyclone 하부의 순환용수저장조(circulation water tank)에 충전하여 용량이 0.07 m³/min인 펌프에 의해 순환되도록 운전하였으며, 순환수의 초기 pH는 7.2~7.4이다.

3단은 2단에서 순환되는 물이 가스에 의해 액적 형태가 되어 처리 가스와 함께 배출되지 않도록 ⑩번에 폴링(pall-ring)을, ⑧번에는 제습장치를 충전하여 주었으며, 수분을 함유한 가스는 ⑧, ⑨번과 충돌하며 가스 내 수분이 응축되도록 유도하였다. 또한 이렇게 응축하여 형성된 수분들은 하단 배출구를 통하여 순환용수저장조로 배출되도록 하였다.

2. 2 Water-cyclone 실험

2. 2. 1 입자상물질 제거 실험

대규모 산업공정 중 화력발전소에서 배출되는 입자의 주성분은 SiO₂와 Al₂O₃이며, 수십 μm 이상의

조대 입자가 차지하는 비율이 높게 나타났다(Jung *et al.*, 2003). 또한 산업시설에서 생산 및 연소공정과 고체상 물질의 분쇄 및 수송공정 등에서 주로 발생하는 입자의 크기는 0.1~10 μm로 매우 미세한 형태로 알려져 있으며, 미국의 경우 10 μm 이하의 입자 배출량에 대한 조사결과 1996년 기준 산업공정이 27%를 차지하고 있는 것으로 연구되었다(Hong, 2002). 특히 전자산업공정에서 발생하는 입자는 보통 3~10 μm라고 보고되고 있다. 그러나 일반적인 cyclone은 미세 입자의 집진에는 효과적이지 못하며, 대용량 cyclone에서는 5 μm 이하의 입자는 집진효율이 낮다고 보고되고 있다(Chung, 2003; Jo *et al.*, 2000; Coker, 1993). 이에 5, 10, 20 μm의 규격화된 Al₂O₃입자를 사용하여 실험하였으며, 분자량 101.9 g/mol, 밀도 3.97 g/m³인 화학적으로 불활성인 백색 입자이다(ICSC, 1994).

입자의 투입은 입자제조기를 이용하거나(Yoshida *et al.*, 2009; Chung, 2003) 진동을 이용(Jo *et al.*, 2000) 하는 방법이 있으나 본 연구에서는 Al₂O₃입자 크기별 기성품을 사용하여 펌프에 의한 진동과 유량에 의해 일정량이 송풍기 음압에 의해 자연스럽게 유입될 수 있도록 하였고, 유량은 MFC에 의해 조절하였다.

Water-cyclone은 그림 2와 같이 연결하고, 상온에서 실험하였으며, PT sensor(S-10, WIKA KOREA, Korea)로 압력손실을 확인하였다. 배출부에는 송풍기를 설치하여 -980 Pa의 음압 조건에서 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0 m³/min 유량과 입자 5, 10, 20 μm에 따른 제거 실험을 실시하였다. 유량은 MFC control box에서 조절하였으며, 입자는 비산되는 입자가 송풍기에 의한 음압에 의해 water-cyclone으로 유입되도록 설치하였다. 유량에 따라 유입된 입자량은 입자가 충전된

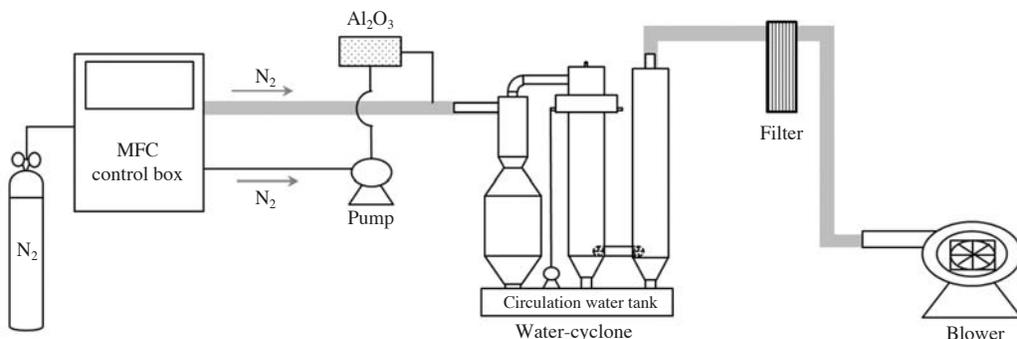


Fig. 2. Water-cyclone experimental schematic (particle-phase).

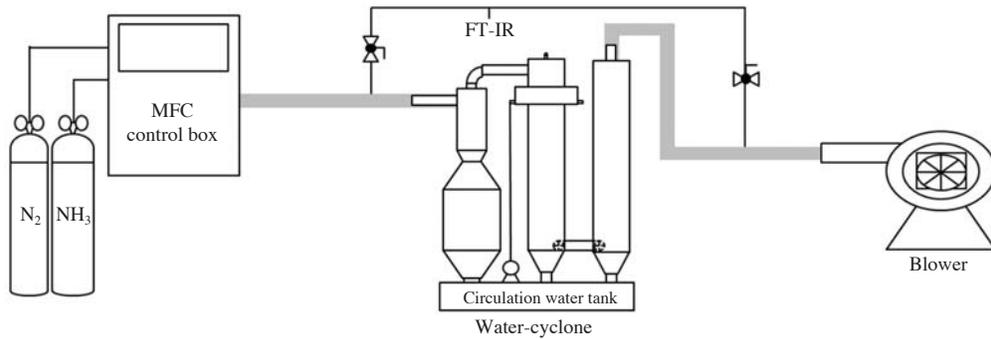


Fig. 3. Water-cyclone experimental schematic (gas-phase).

병의 전·후 무게를 측정하여 계산하고, 유출량은 후단에 설치한 필터의 실험 전·후 무게를 측정하여 계산하였다.

2. 2. 2 가스상물질 제거 실험

전자산업공정에서 발생하는 가스상물질 중 수용성 물질에는 HF, NH₃, HCl 등이 있다 (Park *et al.*, 2012; Allgood, 2003). 이와 같은 가스 중 HCl의 용해도는 20°C, 101.3 kPa에서 각각 53.3 g/100 mL와 70 g/100 mL이다.

본 실험에서는 수용성 가스 중 취급이 용이한 NH₃ 가스를 선정하여 실험하였으며, 농도와 유량을 변화시켜주었다. 또한 NH₃의 포화 용해 시점을 파악하여 순환수의 교체 혹은 중화제 투입 여부를 결정하기 위해 NH₃가 용해되며 변화하는 순환수의 pH를 측정하였다.

그림 3과 같이 가스상물질 제거를 위해 NH₃를 MFC control box에 연결하여 유입량을 조절하도록 하고, 유입농도 500, 1,000 ppm-NH₃, 유량 0.5, 1.0 m³/min, 배출압 -980 Pa일 때 상온에서 실험을 진행하였다. 유입되는 농도와 유출되는 농도는 FT-IR (model: I4001-E, MIDAC Co., USA)을 사용하여 실시간으로 측정할 수 있도록 설치하였다. FT-IR 분석 조건은 100 °C, 97.9 kPa, 0.01 m-cell 상태였으며, NH₃ 측정 가능 농도 범위는 50~50,000 ppm이다.

3. 결과 및 고찰

3. 1 입자상물질 제거 실험 결과

일반적으로 cyclone의 높은 집진효율을 얻기 위해

서는 원심력이 높아야한다고 알려져 있으며, 원심력은 식(1)과 같다. 즉 식(1)에서 알 수 있듯이 집진효율은 입자 직경, 밀도, 유속이 클수록 높아진다 할 수 있다.

$$\text{원심력}(F) = \frac{\pi d_p \rho_p}{6} \times \frac{v_{\theta}^2 R_2}{R_2} \tag{1}$$

이와 같은 기본 원리를 바탕으로 유량과 입자 크기에 따른 집진효율 실험을 실시하였다. 본 실험에서는 Al₂O₃ 5, 10, 20 μm를 이용하여 실험하였으며, 그 결과는 그림 4와 같다. 그림 4의 (a), (b), (c)에서 확인할 수 있듯이 유량이 0.1~1.0 m³/min으로 증가함에 따라 5 μm 입자는 80~96%, 10 μm 입자는 86~96%, 20 μm 입자는 91~99%의 집진효율 (collection efficiency)을 나타내어 같은 입자 크기에서 유량이 증가함에 따라 집진효율이 높아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 유량이 증가함에 따라 유속이 증가하여 원심력이 증가하기 때문이다.

또한 각 입자 크기별 집진효율은 그림 4(d)와 같이 동일 유량에서 입자의 크기가 커질수록 높아짐을 확인할 수 있는데 이는 입자 크기가 클수록 원심력이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

Yi and Lee (2011)에서는 유입구 높이 0.102 m, 원통부 높이 0.306 m, 원추부 높이 0.510 m의 일반적인 cyclone이 유량 4.0, 5.0, 6.0 m³/min일 때, 각각 5 μm 입자는 73.3, 70.3, 84.3%, 10 μm 입자는 76.8, 87.9, 95.3%의 집진효율을 나타내었다. 반면 본 연구에서는 유입구 높이 0.05 m, 상부 원통부 높이 0.25 m, 상부 원추부 높이 0.1 m, 하부 원통부 높이 0.35 m, 하

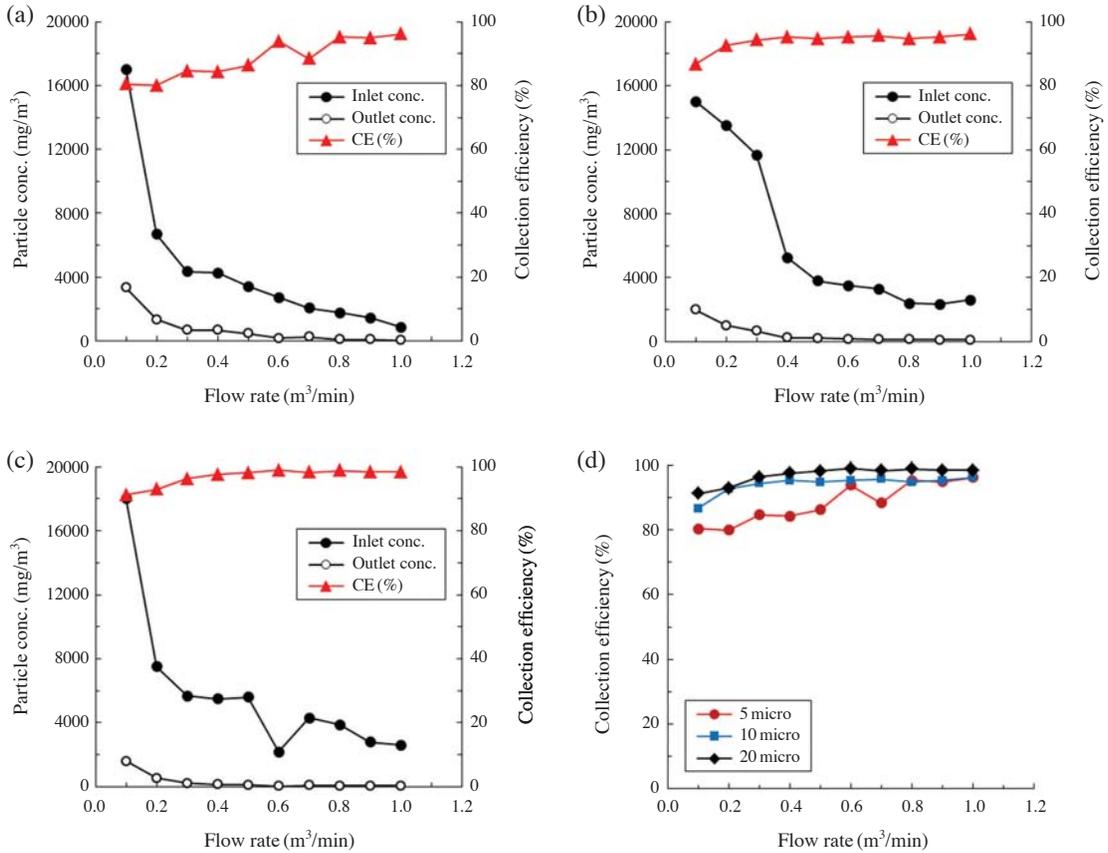


Fig. 4. Particle collection efficiency: (a) 5 μm, (b) 10 μm, (c) 20 μm and (d) Total.

부 원추부 높이 0.15 m인 water-cyclone 1단과 물이 순환되는 2단, 폴링이 담지된 3단에 의해 처리었다. Yi and Lee (2011)와 본 과제의 집진효율을 비교한 결과 일반적인 cyclone에 의한 집진효율보다 water-cyclone이 적은 유량에서 동일 입자 크기에 대해 높은 집진효율을 나타내었다. 이는 1단의 벤츄리 효과가 생성되는 throat part에서 속도가 증가하면서 빠른 선회류를 생성하여 입자를 집진하고 2단에서는 입자가 물에 흡착되어 제진되는 것으로 추측된다.

3.2 가스상물질 제거 실험 결과

일반적인 cyclone을 이용하여 입자와 가스를 동시에 제거한 연구들 가운데 Jang et al. (2008)은 가스상 물질을 제거하기 위해서 평균 17 μm의 활성탄 분말을 투입하여 톨루엔 가스를 흡착시켜 제거하는 실험

을 하였으나 이는 오히려 처리해야할 입자뿐만 아니라 활성탄 분말이 배출될 가능성이 있어 본 연구에서는 선회류에 의한 수막과 가스상물질의 접촉면적을 증가시켜 가스상물질이 제거되는 실험을 하였다.

본 가스상물질 제거 실험에 사용한 가스는 NH₃이며, water-cyclone 배출압은 입자상물질 제거 실험과 동일한 -980 Pa로 설정하여 실험하였다.

그림 5(a)는 500 ppm-NH₃가 0.5 m³/min으로 유입될 때의 배출 농도와 순환수의 pH 변화이며, 그림 5(b)는 500 ppm-NH₃가 1.0 m³/min으로 유입될 때의 배출 농도와 순환수의 pH 변화, 그림 5(c)는 1,000 ppm-NH₃가 1.0 m³/min으로 유입될 때의 배출 농도와 순환수의 pH 변화를 나타낸 것이다. 그림 5에서 배출농도의 변동이 심하여 추세를 통해 배출되는 NH₃ 농도의 경향성을 알아보았으며, 그 결과 큰 변화

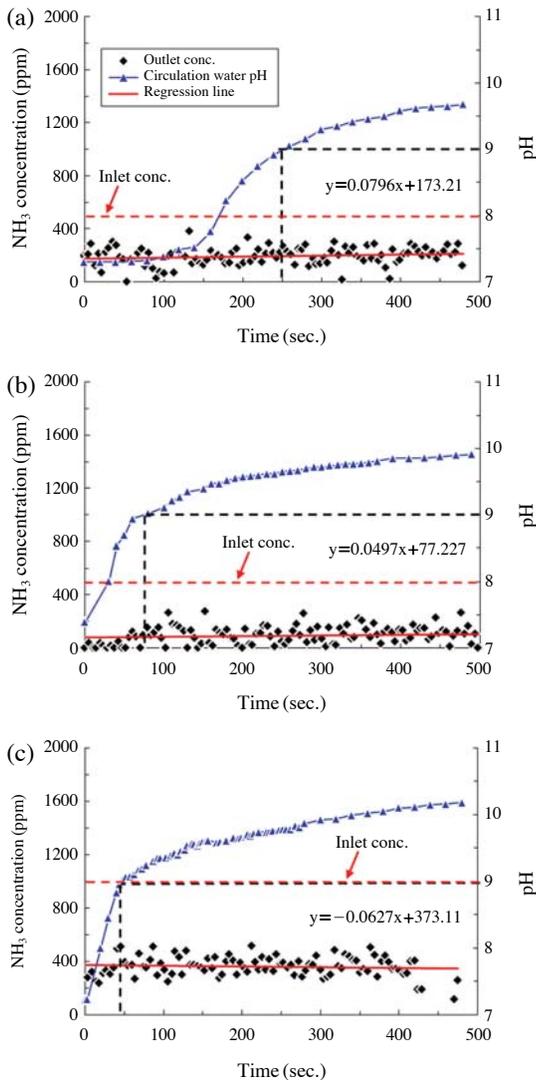


Fig. 5. Outlet pH of NH₃ concentration and circulation water: (a) Q=0.5 m³/min and inlet conc. 500 ppm-NH₃, (b) Q=1.0 m³/min and inlet conc. 500 ppm-NH₃, (c) Q=1.0 m³/min and inlet conc. 1,000 ppm-NH₃.

없이 거의 일정한 것으로 나타났다.

500 ppm-NH₃가 0.5 m³/min으로 유입될 때는 56.5%, 500 ppm-NH₃가 1.0 m³/min으로 유입될 때는 79.1%, 1,000 ppm-NH₃가 1.0 m³/min으로 유입될 때는 70.0%의 평균 제거율을 나타내었다.

본 연구에서는 500 ppm-NH₃ 유입 시 0.5 m³/min일 때보다 1.0 m³/min에서 선회류 생성이 원활하여 wa-

ter-cyclone 2단의 수막과 가스상물질의 접촉 면적이 증가하여 제거율이 현저히 높아진 것으로 판단된다. 또한 1.0 m³/min의 동일 유량에서는 1,000 ppm-NH₃가 유입될 때보다 500 ppm-NH₃가 유입될 경우 좀 더 높은 제거효율을 나타내었는데, 2단 반응기 내에서 NH₃가 순환수와 접촉 가능한 면적이 일정하여 1,000 ppm-NH₃ 유입 시 접촉하지 못하고 배출되기 때문인 것으로 추측된다.

가스상물질 실험에 앞서 NH₃ 농도가 수용될수록 순환수의 pH 농도가 증가하여 pH 10.0 이상에서는 더 이상 순환수에 수용되지 못하고 유입되는 NH₃가 배출될 것으로 예상하였다. 그러나 그림 5와 같이 순환수의 pH 농도가 pH10.0에 근접하기까지 소폭 증가했을 뿐 큰 변화를 나타내지 않았다. NH₃의 용해도는 0°C에서 89.9 g/100 mL, 20°C에서 52 g/100 mL, 96°C에서 7.4 g/100 mL이다(Parker, 1993). 이를 토대로 유량 1.0 m³/min, 유입농도 1,000 ppm-NH₃, 온도는 20°C이며, 유입된 NH₃가 100% 용해된다고 가정했을 때, 실험을 시행한 약 480초 동안의 용해 가능한 NH₃의 양을 계산하여 보았다. 그 결과 용해 가능한 NH₃의 양은 5.6 g이다. 따라서, pH농도는 10.0 이상으로 증가되고 있으나 NH₃가 계속해서 수용될 수 있는 이유는 NH₃ 용해량보다 순환수에 용해된 NH₃ 양이 적기 때문인 것으로 판단된다.

또한 그림 5에서 검은 점선(dotted-line)은 순환수가 pH 9.0이 될 때까지의 NH₃ 용해 속도로 5(a)는 253초, 5(b)는 79초, 5(c)는 41초의 시간이 소요되었다. 그림 5(a)와 5(b)의 pH 농도 변화에서 같은 농도의 NH₃가 유입될 때 유량이 많을수록 pH 농도가 급격하게 변하는 것을 확인할 수 있으며, 그림 5(b)와 5(c)에서 1.0 m³/min의 동일 유량일 때 유입 농도가 2배 높아졌음에도 불구하고, pH 농도의 변화는 크지 않았는데 이는 순환수에 포함되어 있는 이온들에 의한 완충작용에 의한 것으로 추측된다.

4. 결 론

본 연구는 입자상물질과 가스상물질의 동시제거를 위한 연구로써, 3단 형태로 제작된 water-cyclone을 이용하여 실험을 수행하였다.

입자상물질의 경우 유량이 0.1~1.0 m³/min으로 증

가할수록 5 μm 입자는 80~96%, 10 μm 입자는 86~96%, 20 μm 입자는 91~99%의 제거율을 나타내었는데, 이는 사용된 입자가 동일한 밀도를 갖기 때문에 입자의 크기가 크고, 중량이 늘어날수록 원심력이 증가하여 포집효율이 높아진 것으로 보인다. 또한 Yi (2011)에 비해 water-cyclone은 낮은 유량에서도 더 높은 집진효율을 보이는데, 이는 기존의 cyclone과 같은 원심력과 벤츄리 효과에 의한 결과라 판단된다.

가스상물질의 경우에는 500 ppm-NH₃가 0.5 m³/min으로 유입될 때 56.5%, 500 ppm-NH₃가 1.0 m³/min으로 유입될 때 79.1%, 1,000 ppm-NH₃가 1.0 m³/min으로 유입될 때 70.0%의 제거율을 보임으로써 유입농도보다 유량 즉, 선회류가 많이 생성될 수 있는 조건이 가스상물질의 제거율에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 가스상물질의 용해 속도는 순환수가 pH9.0이 되기까지 500 ppm-NH₃가 0.5 m³/min으로 유입될 때 253초, 1,000 ppm-NH₃가 0.5 m³/min으로 유입될 때 78초였으며, 1,000 ppm-NH₃가 1.0 m³/min으로 유입될 때 41초의 시간이 소요되었다. 이는 유량이 크고, 유입 농도가 높을수록 NH₃의 용해 속도가 증가한 것으로 보인다. 즉, 유량이 클수록 선회류가 많이 발생하여 가스상물질이 순환수와의 접촉 시간이 길어지고, 물결이 형성되면서 접촉가능 면적이 넓어지기 때문으로 추측된다.

한편, NH₃가 수용되어 순환수의 pH 농도가 증가할수록 수용되지 못하고 배출되는 NH₃가 많을 것으로 예상하였으나 실제 수용된 NH₃의 양이 용해가능한 양보다 적어 pH 농도와 상관없이 더 수용될 수 있는 것으로 추측된다. 또한 pH9.0에서 pH10.0까지 완만하게 증가하였는데 이는 순환수에 함유된 다양한 이온들에 의한 완충작용으로 생긴 현상으로 보인다.

따라서 동일 유량에서 순환수에 용해되는 수용성 가스의 실제 포화 농도, 유량 변동에 따른 최적 제거율 산출 등에 대한 추가 실험이 필요할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 환경부 글로벌탑 환경기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다(과제고유번호: GT-11-E-02-004-2).

참고 문헌

- Allgood, C.C. (2003) Fluorinated Gases for Semiconductor Manufacture: Process Advances in Chemical Vapor Deposition Chamber Cleaning, *J. Fluorine Chem.* 122, 105-112.
- Baek, D.H. and J.G. Nam (2002) Data mining using semiconductor yield improvement system, *Proceedings of the Joint Conference of the Korean Institute of Industrial Engineers and The Korean Operations Research and Management Science Society*, 293-300.
- Coker, K. (1993) Understand cyclone design *Chemical Engineering and Processing*, 89(12), 51-55.
- Chung, J.W., Y.H. Lee, H.D. Lee, J.H. Park, G.I. Jun, and M.H. Cho (2003) Characteristics of Fly Ashes Emitted from Large Scale Industrial Process, *J. of Korea Society of Waste Manag.*, 20(2), 179-185. (in Korean with English abstract)
- Hong, J.H. (2002) Industrial facilities in the fine dust control technology, *Air Cleaning Technology*, 54-66.
- International chemical safety Cards (1994) Aluminum Oxide ICSC.
- Jang J.H., J.H. Lee, and Y.M. Jo (2008) Simultaneous control of dust and gases using a double centrifugal device, *Korean Society for Atmospheric Environment*, 24(3), 336-345.
- Jo, Y.M., C. Tien, and M.B. Ray (2000) Development of a post cyclone to improve the efficiency of reverse flow cyclones, *Powder Technology*, 113, 97-108.
- Jung, C.H., M.C. Kim, K.S. Yim, K.W. Lee, and C.Y. Park (2003) Particle collection efficiency using granular cyclone, *Proceeding of the 36th Meeting of Korean Society for Atmospheric Environment*, 497-498.
- Lim, K.S., K.W. Lee, and M.R. Kuhlman (2001) An experimental study of the performance factors affecting particle collection efficiency of the electrocyclone, *J. Aerosol Sci.*, 12, 79-87.
- Lim, K.S., S.B. Kwon, and K.W. Lee (2003) Characteristics of collection efficiency for a double inlet cyclone with clean air, *J. Aerosol Sci.*, 34, 1085-1095.
- Molerus, O. and M. Glückler (1996) Development of a cyclone separator with new design, *Powder Technology*, 86, 37-40.
- National institute of environmental research (2011) MSDS (Material Safety Data Sheet).
- Oh, S.J. (2010) A study on property changes matter of metal coating materials (wax) by Air pollution, *Hanseol*

- University.
- Park, T.H., C.S. Lee, and H.J Kim (2012) Experimental a study on the removal for hazardous white smoke and aerosols using dielectric coagulation system to treat off-gases from semiconductor manufacturing, Proceeding of the spring meeting of the Korean Society for Precision Engineering, 1221-1222.
- Parker, S.P. (1993) Ammonia, McGraw-Hill encyclopedia of chemistry, McGraw-Hill, 69-72.
- Qiu, Y., B. Deng, and C.N. Kim (2012) Numerical study of the flow field and separation efficiency of a divergent cyclone, Powder Technology, 217, 231-237.
- Wang, W., P. Zhang, L. Wang, G. Chen, L. Li, and X. Li (2010) Structure and performance of the circumfluent cyclone, Powder Technology, 200, 158-163.
- Yi, C.S. and C.W. Lee (2011) Comparisons of dust collection efficiency on the tangential entry and axial-vane type cyclone, Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 10(6), 115-121.
- Yoshida, H., Y. Inada, K. Fukui, and T. Yamamoto (2009) Improvement of gas-cyclone performance by use of local fluid flow control method, Powder Technology, 193, 6-14.