

Research Article

Open Access

## 기체상 유해화학물질 제거를 위한 이동형 와류식 세정장치 개발 및 가스 제거효율 분석

곽지현<sup>1</sup>, 황승울<sup>1</sup>, 이연희<sup>1</sup>, 김재영<sup>1</sup>, 송기봉<sup>1</sup>, 김 균<sup>1</sup>, 강재은<sup>1</sup>, 이상재<sup>1</sup>, 전준호<sup>2</sup>, 이진환<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>환경부 화학물질안전원 연구개발교육과, <sup>2</sup>창원대학교 공과대학 환경공학과

### Development of Mobile Vortex Wet Scrubber and Evaluation of Gas Removal Efficiency

Ji Hyun Kwak<sup>1</sup>, Seung-Ryul Hwang<sup>1</sup>, Yeon-Hee Lee<sup>1</sup>, Jae-Young Kim<sup>1</sup>, Ki Bong Song<sup>1</sup>, Kyun Kim<sup>1</sup>, Jae Eun Kang<sup>1</sup>, Sang Jae Lee<sup>1</sup>, Junho Jeon<sup>2</sup> and Jin Hwan Lee<sup>1\*</sup> (<sup>1</sup>Division of Research Development and Education, National Institute of Chemical Safety, Ministry of Environment, Daejeon, 305-343, Korea, <sup>2</sup>Department of Environmental Engineering, College of Engineering, Changwon National University, Changwon, 641-773, Korea)

Received: 24 February 2015 / Revised: 27 May 2015 / Accepted: 23 June 2015

Copyright © 2015 The Korean Society of Environmental Agriculture

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

#### Abstract

**BACKGROUND:** In recent years, several researchers have focused on odour control methods to remove the harmful chemicals from chemical accidents and incidents. The present work deals with the system development of the hazardous.

**METHODS AND RESULTS:** For on-site removal of hazardous gaseous materials from chemical accidents, mobile vortex wet scrubber was designed with water vortex process to absorb the gas into the water. The efficiency of the mobile vortex wet scrubber was evaluated using water spray and 25% ammonia solution. The inlet air velocity (gas flow rate) was according to the damper angle installed within the hood and with increase of gas flow rate, consequently the absorption efficiency was markedly decreased. In particular, when 25% ammonia solution was exposed to the hood inlet for 30 min, the water pH within the scrubber was changed from 7 to 12. Interestingly, although the removal efficiency of ammonia gas exhibited approximately 80% for 5 min, its

efficiency in 10 min showed the greatest decrease with 18%. Therefore, our results suggest that the ammonia gas may be absorbed with the driving force of scrubbing water in water vortex process of this scrubber.

**CONCLUSION:** When chemical accidents are occurred, the designed compact scrubber may be utilized as effective tool regarding removal of ammonia gas and other volatile organic compounds in the scene of an accident.

**Key words:** Ammonia gas, Chemical accident, Gas flow rate, Mobile Vortex Wet Scrubber, Removal efficiency

#### 서론

세계적으로 1,500만종 이상의 화학물질이 상업용 목적으로 사용되고 있으며, 이 중 국내에서 유통되는 화학물질은 약 4만3천여종으로 지속적으로 증가추세에 있다(Yoon *et al.*, 2014). 이러한 화학물질은 대부분 독성, 화재 및 폭발성이 강하여 사고 발생 시 피해규모가 크며 유해성·위해성이 높아 인체 건강과 생태계를 위협하고 있는 실정이다(KGupta and Verma, 2002). 그러나, 작업자와 근로자의 안전 불감증, 시설노후, 취급 부주의로 인한 화학물질 사고증가로 인명 및 주변환경 피해가 증가하고 있다. 2012년 9월 27일 경상북도 구

\*Corresponding author: Jin Hwan Lee  
Phone: +82-42-605-7079; Fax: +82-42-605-7095;  
E-mail: [schem72@korea.kr](mailto:schem72@korea.kr), [schem72@daum.net](mailto:schem72@daum.net)

미시 제4국가 산업단지에 위치한 업체에서 발생한 불화수소(Hydrogen fluoride) 누출사고가 대표적인 예이며, 이 사고로 근로자 5명이 사망하고 1,600여 건의 물적피해가 접수되었다(Lim and Lee, 2012; Na *et al.*, 2013; An *et al.*, 2015).

환경부에서 발표한 유해성 화학물질 중 빈번히 발생하는 사고물질은 톨루엔(Toluene), 황산(Sulfuric acid), 암모니아(Ammonia), 염화수소(Hydrogen chloride), 질산(Nitric acid), 불화수소(Hydrogen fluoride) 등으로 대부분이 산·염기 계열의 기체·액체상 화학물질이다(Min and Park, 2014). 특히, 대기로 유출된 기체물질은 단시간에 확산하여 피해가 증가하는 특성이 있으므로 화학사고 발생 시 인적·물적 피해의 최소화를 위해서는 현장에서 기체상 유해물질의 신속한 중화·방제작업이 절대적으로 필요하다.

산·염기 계열의 기체상 유해물질을 제거하기 위한 대표적인 방법으로 흡수(Absorption)와 흡착(Adsorption) 원리가 있다(Lee *et al.*, 2013). 흡수는 오염된 기체를 용액으로 된 세정액과 접촉시켜 오염된 가스가 액상에 잘 용해되거나, 화학적으로 반응하는 특성을 이용하여 제거하는 방법이다. 흡착은 기체분자나 원자가 부착하는 성질을 이용하여 오염된 기체를 흡착제에 통과시켜 제거하는 기술이다. 그러나, 흡착법의 경우 분자량이 작거나 극성을 가지는 물질에는 적합하지 않기 때문에 가스흡착에는 적합하지 않는 것으로 알려져 있다(Bandosand Petit, 2009). 따라서 산·염기 계열 가스 제거를 위해서는 흡수법이 일반적이며, 흡수처리 기술로는 충전탑(Packed tower)(Chen *et al.*, 2002; Counce and Perona, 2004), 분무탑(Spray tower)(Javed *et al.*, 2006; Kallinikos *et al.*, 2010), 사이클론형 세정기(Cyclone scrubber)(Park and Lee, 2009), 벤츨리형 세정기(Venturi scrubber)(Ali *et al.*, 2013) 등이 사용되고 있으나, 분사노즐과 충전층의 폐쇄 위험성이 있어 주기적인 유지 보수가 필요하며 많은 동력 및 수압이 요구된다(Byeon *et al.*, 2009). 이러한 기존 방법의 문제점을 극복하기 위하여 Byeon *et al.* (2009)은 세정펌프와 충전물을 사용하지 않고 장치구성을 간단히 하고 동시에 유지관리를 최소화하여 오염물질을 고효율로 처리가 가능한 와류믹스 세정집진기(Turbulent wet scrubber)를 개발하였다. 와류믹스 세정집진기는 분진을 포함한 유해가스가 집진기의 노즐을 통해 세정액 속으로 고속 분사되며, 이 때 앞쪽에 설치된 전향판(Deflector)에 충돌되면서 유체의 와류(Vortex)현상(유체 흐름의 일부가 분류와 반대되는 방향으로 소용돌이 치는 현상)에 의해 유해가스가 물에 흡수·제거되는 원리를 이용하였다(Byeon *et al.*, 2009).

본 연구에서는 와류믹스 세정집진기와 유사한 제거기술을 이용한 이동형 와류식 세정장치(Mobile vortex wet scrubber)를 제작하여 화학사고 발생 시 현장에서 신속하게 유해가스 처리가 가능하도록 하였다. 또한, 신속한 현장대응을 위하여 단상전원을 이용하여 이동식으로 간편하게 활용할 수 있도록 고려했다. 제작된 장치의 성능을 확인하기 위하여 흡입구에서의 유입 풍량 조절에 따른 송풍기 배출구에서의 풍속변화를 확인하였으며, 분무연기 및 25% 암모니아 용액을 이용하

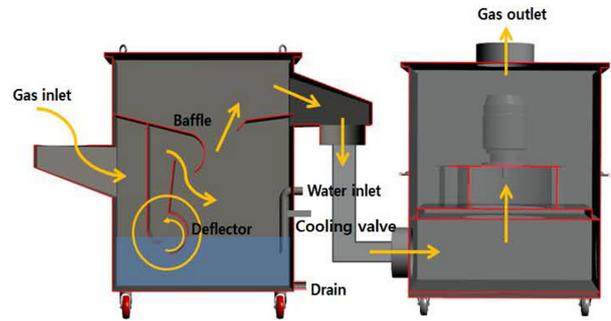


Fig. 1. A schematic of mobile vortex wet scrubber: scrubber (left) and blower (right).

여 성능평가를 수행하였다.

## 재료 및 방법

### 이동형 와류식 세정장치

Fig. 1은 본 연구에서 제작한 이동형 와류식 세정 장치의 구성도를 나타내고 있다. 장치는 크게 세정기(Scrubber)와 송풍기(Blower)로 구성되며, 세정기 내에서 유해가스가 와류 현상에 의해 세정액에 흡수·제거되고 세정기와 연결된 송풍기는 내장된 펌프에 의해 일정 유량으로 가스를 흡입한다. 세정기 본체에 부착된 3 m 길이의 후드(이 부분은 그림에서 생략)를 통해서 유해가스가 흡입되며, 후드 입구 쪽에 장착된 댐퍼(Damper)의 개·폐 조절을 통해 유입가스의 유량이 조절된다. 이 때 유입되는 산·염기 가스 등에 의해 후드 입구 부분이 부식되는 것을 방지하기 위하여 카보나이트 재질을 사용하였으며, 후드 내부는 PVC로 코팅된 폴리에스테르로 제작하였다. 세정기의 크기는 790 mm (W) × 790 mm (L) × 1,105 mm (H)이며, 세정액이 차지하는 최대 부피는 수위를 250 mm로 설정하고 계산하였을 때 약 160 L이다. 호스를 통해 세정액의 주입 및 배출이 가능하도록 급·배수 밸브가 장착되어 있으며, 세정기와 송풍기는 PVC 재질의 호스로 연결하였다. 또한, 향후 세정기 내에서 다양한 유해가스를 산 또는 염기 용액으로 중화처리 시 발생하는 온도상승(>10 0°C)을 막기 위해 냉각용 순환장치를 연결하기 위한 밸브를 설치하였다(Fig. 1). 송풍기는 후곡 우근형 타입으로 터보팬이 내장되어 있어 고품압이 가능하며 송풍 효율이 높다. 송풍기의 크기는 740 mm (W) × 740 mm (L) × 900 mm (H)이며, 처리된 가스가 최종적으로 배출되는 배출구의 직경은 25 cm이다.

### 유입 유량 산출

본 연구에서의 세정장치는 화학사고 현장에서 활용 가능한 이동형으로 제작하였으며, 이를 위한 필요 유입 유량(Gas flow rate,  $Q$ )은 아래의 계산식에 의하여 산출되었다.

$$Q = (10D^2 + A) \times V_c \times 60$$



Fig. 2. Measured inlet air velocity according to the different gas flow rate.

여기에서,  $D$ 는 후드와 오염원과의 거리이며, 후드에서의 가스 흡입 속도는 개구면의 직경만큼 떨어질 경우 1/10으로 감소하여 후드 직경 이상에서는 흡입력이 미치지 못하므로 본 연구에서는 이 값을 20 cm로 설정하였다.  $A$ 는 후드단면 적이며 제작한 장치의 후드 형상은 타원형이나, 편의상 원형 ( $\pi \times r^2$ )으로 적용하여 계산한 값은 314  $\text{cm}^2$ 이다.  $V_c$ 는 제어 풍속(Control velocity)으로, 최초후드 입구로 흡입되는 가스의 속도이며, 본 연구에서 제작한 후드는 외부식 상방후드 타입으로 산업안전보건공단 제어풍속 기준값(1.2 m/s)을 적용하였다. 위의 공식에 의해 계산된 필요 유입유량은 31  $\text{m}^3/\text{min}$ 이나, 보통 필요 유량에 여유분을 두어 계산하므로 단상전원에서 사용 가능한 최대 마력(3 HP)으로 적용하여 40  $\text{m}^3/\text{min}$ 으로 설계하였다.

**제거효율 실험**

제작된 세정기에 대한 물질의 제거효율을 확인하기 위해 분무연기와 25% 암모니아 용액(Wako pure chemicals, Japan)을 이용하였다. 분무연기는 물에 대한 용해도가 높은 HQ light enhancement fluid(증류수에 triethylene glycol과 propylene glycol이 용해되어 있는 용액)를 분무기 장치(Antari, Zeries 1500 II)에 주입하여 발생시켰다. 암모니아 용액의 경우 극성이며 물에 대한 용해도가 높고 암모니아의 증기압이 물보다 높기 때문에 증발하는 특성이 있어, 본 실험에서는 세정액으로 물(수온 평균 15°C)을 사용하였다. 암모니아 가스 농도는 휴대용 복합가스탐지기(IBRID MX6, Industrial Sci.)를 사용하여 측정하였으며, 가스 제거효율에 대한 계산식은 다음과 같다.

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

여기서,

- $\eta$  : 제거효율(%)
- $C_i$  : 입구측 농도(ppm)
- $C_o$  : 출구측 농도(ppm)



Fig. 3. Absorption and emission measurement of water spray.



Fig. 4. Measurement of water pH within the scrubber using a pH paper after 30 min of exposure to the ammonia solution.

**결과 및 고찰**

Fig. 2는 설계상 산출된 필요 유입유량이 후드 흡입구에서 실제로 작동되는지알아보기 위해 풍속을 측정한 결과이다. 풍속 측정은 후드와 20 cm 정도 떨어져 있는 거리에서 수행하였으며, 후드 입구 쪽의 댐퍼 각도를 완전개방(90도), 60도 개방, 30도 개방으로 변화시키면서 측정하였다. 그 결과, 풍속은 1.6 m/s, 0.9 m/s, 0.6 m/s로 변화하였으며, 특히 댐퍼를 완전히 닫을 경우 세정기 내 세정액의 와류가 형성되지 않는 것을 확인하였다.

Fig. 3은 분무기 장치로 연기를 발생시킨 후 후드 댐퍼를 완전 개방하여 장치로 흡입 및 배출되는 정도를 관찰한 결과이다. 세정기 후드를 통해 흡입된 연기가 세정액 내에서 충분히 흡수되나, 일부는 와류 내에서 체류하지 못하고 송풍기 배출구로 나오는 것으로 확인되었다. 이는 유입 가스 유량 대비 세정기 내의 체류시간이 충분하지 못한 것으로, 세정기 내에서의 가스 체류시간을 충분히 확보하기 위해서는 댐퍼 각도를 조절하여 유입 풍속을 감소시키고 동시에 세정기 내에서 가스의 체류시간을 확보시키는 것이 적절할 것으로 사료된다.

제작된 장치의 유해가스 제거효율을 확인하기 위하여 세정기 후드 댐퍼를 60도 개방한 상태에서 암모니아 용액(25%)을 흡입시켰다(Fig. 4). 약 30분간 후드에 노출 후 세정기 내 외류된 물의 pH를 pH 페이퍼로 측정된 결과 12 이상으로 강염기 상태로 변화하였으며, 이는 암모니아 가스가 물에 충분히 흡수된 것을 의미한다. 또한, 송풍기의 배출구에서도 암모니아 냄새가 약하게 발생하여 일부 처리되지 못한 가스가 송풍기로 배출된 것을 확인하였다. 이는 고농도 유해가스의 경우 제거효율을 향상시키기 위해서는 세정액의 주기적인 교체 또는 추가적인 제거장치(예, 활성탄, 제올라이트 등) 도입이



Fig. 5. Ammonia gas measurement at the inlet and outlet after 10 min.

Table 1. Ammonia concentrations at the inlet and outlet depending on the elapsed time

Elapsed time (min)	Inlet concentration (ppm)	Outlet concentration (ppm)
0	>500(over range)	0
5	29	5
10	11	9

필요할 것으로 사료된다.

실제 세정기 내에서의 암모니아 가스 제거효율을 평가하기 위해 세정기 후드 근처에 암모니아 용액을 노출시켜 측정 초기(0분), 5분, 10분 후의 농도를 후드 입구와 송풍기 배출구에서 각각 측정하여 보았다(Fig. 5). 그 결과는 테이블1과 같으며, 암모니아 용액 노출 시 초기 흡입구에서의 농도는 500 ppm 이상으로 휴대용 복합가스탐지기의 측정범위를 초과하여 정확한 농도를 측정할 수 없었다. 이 때 배출구에서의 암모니아 농도는 검출되지 않아 초기 흡입 시에는 암모니아 가스가 세정액에 포화되지 않은 것으로 판단된다. 암모니아 용액 노출 5분 후 흡입구와 배출구에서의 농도는 29 ppm과 5 ppm, 10분 후 농도는 11 ppm과 9 ppm으로 나타나, 시간이 지남에 따라 흡입되는 암모니아 가스가 세정액에 포화(Saturation) 되면서 일부는 처리되지 못하고 배출되는 것으로 확인되었다. 후드 입구에서 측정된 암모니아 농도가 시간이 지남에 따라 감소하는 것은 용액 내의 암모니아가 계속 증발하면서 그 농도가 점점 낮아졌기 때문으로 판단된다.

후드 입구 및 송풍기 배출구에서의 암모니아 농도를 비교해보면 가스 체류시간이 5분 이내일 때는 제거효율이 80% 이상으로 높았으나, 10분 후 측정 시에는 18%로 감소하는 것으로 나타났다(Table 1). 이러한 측정결과는 Byeon *et al.* (2009)에 의해 와류믹스 세정집진기를 이용하여 실험한 측정치와 유사하게 관찰되었다. 그의 연구에서 45 ppm의 암모니아 가스를 3.5 m<sup>3</sup>/min의 유량으로 15°C 수용액에 흡입시켰을 경우, 가스 체류시간이 15분일 때 최대 제거효율이 85%였

으며 그 이후는 지속적으로 감소한다고 보고하였다. 이는 세정기 내에서의 가스 체류시간이 세정액으로의 흡수 및 제거 효율에 미치는 중요한 요인임을 나타낸다. 우리의 실험에서 체류시간 10분 후 암모니아 제거효율이 급격히 낮아진 이유는 세정액이 순환되지 않는 구조에서 이미 포화된 세정액에 고농도 암모니아 용액이 지속적으로 유입되었기 때문으로 판단된다.

## 요 약

본 연구에서는 기존 스크리버의 분사노즐과 충전층의 폐쇄 위험성 및 장치의 복잡함으로 인한 단점을 극복하고 화학 사고 발생 시 현장에서 유해물질의 신속한 처리가 가능하도록 이동형 와류식 세정장치를 제작하였다. 제작된 장치의 성능을 확인하기 위하여 후드 입구에서 유입풍량 조절에 따른 송풍기 배출구에서의 풍속변화를 확인하였으며, 분무연기 및 25% 암모니아 용액을 이용하여 성능평가를 수행하였다. 제작된 장치의 후드 댐퍼 개방 각도를 변화시킴에 따라 유입풍속(유입유량)이 변하는 것을 확인하였으며, 이는 물질의 용해도 특성 및 농도에 따라 유입풍속을 증감시켜 세정기 내에서의 체류시간을 조절하는데 유용할 것으로 판단된다.

제작된 장치의 유해가스 제거성능을 확인하기 위하여 분무연기와 25% 암모니아 용액을 이용하여 실험을 수행하였다. 세정기 후드의 댐퍼를 완전 개방시킨 상태에서 분무연기를 노출시킨 결과, 높은 유입 유량으로 인해 연기 일부는 와류 내에서 체류하지 못하고 송풍기로 배출되었다. 그러므로 암모니아 용액을 이용한 실험에서는 댐퍼 개방 각도를 60도로 설정하여 후드에 노출시켰다. 암모니아 용액을 30분간 세정기에 흡입시킨 후 물의 pH를 측정한 결과 12 이상으로 나타나 염기성의 암모니아 가스가 물에 충분히 흡수된 것을 관찰하였다. 후드 입구 및 송풍기 배출구에서 암모니아 농도 비교 시, 체류시간 5분일 때 제거효율 83%로 최대로 나타났으며 (pH 10) 이후로 급격히 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 유해가스의 물에 대한 용해도외에도 체류시간이 세정액으로의 흡수 및 제거효율에 미치는 중요한 인자임을 나타낸다.

## Acknowledgment

This study was carried out with the support of National Institute of Chemical Safety, Ministry of Environment, Republic of Korea.

## References

- Ali, M., Yan, C., Sun, Z., Gu, H., & Mehboob, K. (2013). Dust particle removal efficiency of a venturi scrubber. *Annals of Nuclear Energy*, 54, 178-183.
- An, J., Lee, H. A., Lee, J. S., & Yoon, H. O. (2015). Fluorine distribution in soil in the vicinity of an

- accidental spillage of hydrofluoric acid in Korea, *Chemosphere*, 119, 577-582.
- Bandosz, T. J., & Petit, C. (2009). On the reactive adsorption of ammonia on activated carbons modified by impregnation with inorganic compounds. *Journal of Colloid and Interface Science*, 338(2), 329-345.
- Byeon, S. H., Lee, B. K., & Mohan, B. R. (2012). Removal of ammonia and particulate matter using a modified turbulent wet scrubbing system, *Separation and Purification Technology*, 98(9), 221-229.
- Chen, L., Lin, J. W., & Yang, C. L. (2002). Absorption of NO<sub>2</sub> in a packed tower with Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> aqueous solution, *Environmental Progress*, 21(4), 225-230.
- Counce, R. M., & Perona, J. J. (1983). Scrubbing of gaseous nitrogen oxides in packed towers, *AIChE Journal*, 29(1), 26-32.
- Javed, K. H., Mahmud, T., & Purba, E. (2006). Enhancement of mass transfer in a spray tower using swirling gas flow, *Chemical Engineering Research and Design*, 84(6), 465-477.
- Kallinikos, L. E., Farsari, E. I., Spartinos, D. N., & Papayannakos, N. G. (2010). Simulation of the operation of a wet flue gas desulfurization system, *Fuel Processing Technology*, 91(12), 1794-1802.
- Gupta, V. K., & Verma, N. (2002). Removal of volatile organic compounds by cryogenic condensation followed by adsorption, *Chemical Engineering Science*, 57(14), 2679-2696.
- Lee, S. W., Oh, G. Y., Kim, R., & Kim, D. K. (2013). Surface properties of modified activated carbon for ammonia gas removal, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(3), 317-324.
- Lim, H. S., & Lee, K. (2012). Health care plan for hydrogen fluoride spill, Gumi, Korea *Journal of Korean Medical Science*, 27(11), 1283-1284.
- Min, S. H., & Park, Y. C. (2014). A study on the actual management of toxic gas leak site using the remote sensing spectrometer, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 14(3), 227-233.
- Na, J. Y., Woo, K. H., Yoon, S. Y., Cho, S. Y., Song, I. U., Kim, J. A., & Kim, J. S. (2013). Acute symptoms after a community hydrogen fluoride spill. *Annals of Occupational and Environmental Medicine*, 25, 17.
- Park, S. H., & Lee, B. K. (2009). Development and application of a novel swirl cyclon scrubber:(2) Theoretical, *Journal of Hazardous Materials*, 164(1), 315-321.
- Yoon, C. S., Ham, S. H., Park, J. H., Kim, S. J., Lee, S. A., Lee, K. S., & Park, D. U. (2014). Comparison between the chemical management contents of laws pertaining to the Ministry of Environment and the Ministry of the Employment and Labor, *Journal of Environmental Health Sciences*, 40(5), 331-345