Korean Journal of Environmental Agriculture

Korean J Environ Agric. 2018;37(1):49-56. Korean
Published online 2018 March 27. https://doi.org/10.5338/KJEA.2018.37.1.02

Online ISSN: 2233-4173
Print ISSN: 1225-3537

Research Article

Open Access

이동형 스크러버를 이용한 암모니아 및 톨루엔의 제거 효율

김재영, 김장윤, 이연희, 김민선, 김민수, 김현지, 류태인, 정재형, 황승율, 김 균, 이진환*

환경부 화학물질안전원

Removal Efficiency of Ammonia and Toluene using Mobile Scrubber

Jae-Young Kim, Jang-Yoon Kim, Yeon Hee Lee, Min Sun Kim, Min-Su Kim, Hyun Ji Kim, Tae In Ryu, Jae Hyeong Jeong, Seung-Ryul Hwang, Kyun Kim and Jin Hwan Lee* (National Institute of Chemical Safety, Ministry of Environment, Daejeon 34111, Korea)

Received: 3 January 2018 / Revised: 19 March 2018 / Accepted: 20 March 2018

ORCID
Jae-Young Kim
http://orcid.org/0000-0001-8041-5254

Abstract

BACKGROUND: The mobile vortex wet scrubber was developed to remove the harmful chemicals from accidental releases. However, there was a disadvantage that it was limitedly used for volatile organic compounds (VOCs) such as toluene according to the physicochemical properties. This study compared the removal efficiencies of an improved mobile scrubber on toluene and ammonia by applying diverse adsorption and absorption methods.
METHODS AND RESULTS: The removal efficiencies on harmful chemicals were examined using various adsorption and absorption methods of water vortex process (C), phosphoric acid-impregnated activated carbon adsorption (PCA), pH-controlled water (pH 2.5) vortex process absorption with sulfuric acid (SWA) after ammonia exposure, granular activated carbon adsorption (GCA), and activated carbon mat adsorption (CMA) after toluene exposure. As a result, the best removal efficiency was shown in the SWA for ammonia and GCA for toluene. Also, the SWA and GCA methods were compared with different concentration levels. In the case of ammonia exposure (5, 10 and 25%), there was no difference by concentration levels, and the concentration in the outlet gradually increased, with pH change from acid to base. In the case of toluene exposure (50, 75 and 100%), the outlet concentration was higher relative to the exposure concentration in the initial 10 min, but the outlet concentration was remained steady after 10 min.
CONCLUSION: The newly improved mobile scrubber was also effective in removing VOCs through adsorption techniques (activated carbon, activated carbon fiber, carbon mat filter etc.), as well as removing acid-base harmful chemicals by neutralization reaction.

Key words: Ammonia, Harmful chemicals, Mobile scrubber, Removal efficiency, Toluene

*Corresponding author: Jin-Hwan Lee
Phone: +82-42-605-7079; Fax: +82-42-605-7799;
E-mail: schem72@korea.kr

서 론

산업발전과 인간의 생활수준 향상을 위해 화학물질은 다양하고 광범위하게 사용되어왔다. 그 범위는 의류 생산, 식품제조 및 건물 건축과 같은 우리 인간의 의식주에 관여할 뿐 아니라 반도체, 페인트, 세제, 의약품, 가정용품 등의 상업용품을 생산하는데 있어서도 중요한 소재로서 자리 잡고 있다. 또한, 소비의 증가, 산업발전 및 과학의 급진적 진보에 따라 신규로 개발되는 화학물질의 수는 매년 증가하여 전 세계적으로 약 1억 3천여 종이 등록 되어 있다(American chemical society, 2017). 이러한 화학물질은 의약품 이용, 원료 생산, 병해충 방제, 생활수준 향상 등에 이용되어 우리 인간에게 유

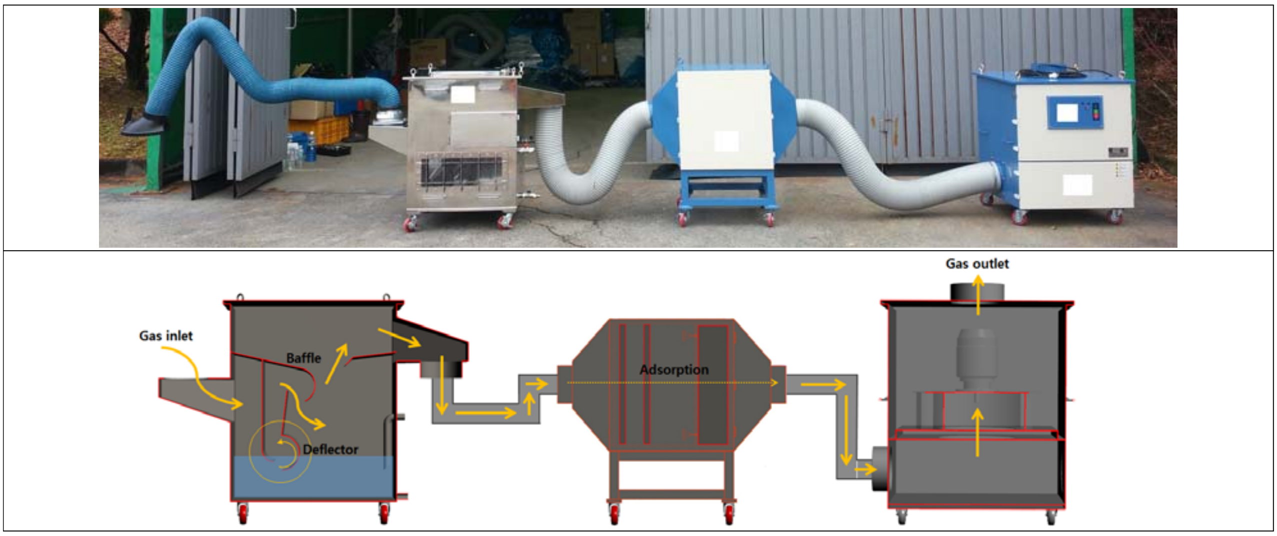

Fig. 1. Schematic diagram of improved mobile scrubber.

용성과 편익을 가지는 소재로서 활용되는 반면에 독성, 잔류성, 화재·폭발성 및 확산성의 유해·위험성 이면을 가지고 있어 취급 부주의시 화학 사고를 발생하여 천문학적인 인적 또는 물적 피해를 야기하는 경우가 많다.

한편, 이러한 유해·위험성을 가진 화학물질은 정부차원에서 유해화학물질, 사고대비물질, 위험물 및 독성가스의 유형별로 관리되고 있지만 취급시설의 노후화, 취급 부주의, 안전인식 부재 등의 문제로 크고 작은 화학 사고는 빈번하게 발생하고 있다. Lee 등(2017)에 따르면 최근 4년간 국내에서 발생된 화학 사고는 총 367건으로 연 평균 90여건이 발생되었다고 보고되었다. 이 중 화학사고의 원인물질은 염산 32건, 암모니아 28건, 질산 27건, 황산 18건, 불산 11건순으로 대부분이 산성 또는 염기성 물질이었으며, 이외에 톨루엔, 벤젠 등의 휘발성 유기화합물 화학사고도 발생되고 있다. 이러한 화학사고는 사업장, 운송차량, 연구실 등에서 주로 발생되는데, 사업장, 연구실 등의 밀폐 공간에서 화학사고가 발생할 경우 흄에 의한 인체 노출 및 화재·폭발 위험으로 초기에 사전 차단하지 않을 경우 대규모 사고로 커질 수 있기 때문에 사전에 중화 또는 방재작업으로 제거가 필요하다.

유해화학물질 제거 방법에 관한 연구는 활발하게 진행되고 있는데, 활성탄 또는 활성탄소섬유를 이용한 톨루엔, 벤젠, 메틸에틸케톤 등의 휘발성 유기화합물 흡착/탈착 연구(Park *et al.*, 2001; Lillo-Ródenas *et al.*, 2006; Woo *et al.*, 2007; Mohan *et al.*, 2009; Baek *et al.*, 2011), 인산 첨착 활성탄을 이용한 암모니아 흡착 특성 연구(Park *et al.*, 1997; Ahn *et al.*, 2002), 제올라이트 등을 이용한 황화수소 제거 연구(Ya yerli *et al.*, 2002), 촉매산화 방법을 이용한 암모니아 제거 연구(Hung *et al.*, 2003) 등이 대표적이다. 하지만 유해화학물질이 누출되어 대규모 인적 또는 물적 피해를 야기할 수 있는 화학사고에 초점을 맞춘 연구 사례는 드물며, 특히, 기체상으로 순식간에 사고 지점 주변으로 확산될 여지가 있는 유해화학물질 처리방법에 관한 연구는 극히 드물다.

실제 사고 현장에서 기체상 유해화학물질의 제거는 물을 분무 주수하여 증기를 줄이거나 소석회와 같은 중화제를 살포하여 처리하는 방법이 활용되고 있다(Ahn *et al.*, 2014). 그러나 화학물질의 물리화학적 특성에 따라 제한적으로 활용되기 때문에 좀 더 효율적이고 실용적인 대안이 필요하다. 이에 Kwak 등(2015)은 화학사고 발생 시 현장에서 신속하게 유해가스 처리가 가능하도록 이동형 와류식 세정장치를 개발한 바 있다(Kwak *et al.*, 2015). 하지만 이 장치는 휘발성 유기화합물의 물리화학적 특성에 따라 세정액에 의한 흡수효율이 낮아 제한적으로 활용된다는 단점이 존재하였다. 따라서 본 연구는 기 개발된 장치에 흡착 필터, 활성탄, 중화 등의 흡수/흡착방법을 달리하여 기능을 개선하였고, 암모니아 및 톨루엔을 노출시킨 후 이에 따른 제거효율을 비교 분석하고자 하였다.

재료 및 방법

시약 및 재료

실험에 사용된 시약 중 암모니아수 및 황산은 Wako사(Osaka, Japan)로부터 특급 시약을 톨루엔은 Merck사(Darmstadt, Germany)로부터 분석용 등급을 구입하여 사용하였다. 인산 첨착 활성탄은 자연과학산업(Cheorwon, Korea), 활성탄은 백석화학(Sangju, Korea), 프리필터 및 카본매트필터는 다나필터이엔지(Bucheon, Korea)에서 구입하여 사용하였다.

이동형 스크러버

이동형 스크러버는 Kwak 등(2015)에 의해 개발된 이동형 와류식 세정장치에 필터박스를 추가하여 제작하였으며, 장치는 크게 네더만 암 후드, 세정기, 필터박스 및 송풍기로 구성하였다(Fig. 1). 후드의 기본 길이는 3 m로 하되, 경우에 따라 길이 조정이 가능하도록 분리되게 제작하였고, 단상전원에서 사용 가능한 최대 마력(3 HP)이 적용되어 필요 유입유

량은 40 m^3/min으로 설계하였다. 후드 입구는 산성/염기성 가스 등에 의한 부식을 방지하기 위해 카보나이트 재질을 사용하였으며, 후드 내부는 PVC로 코팅된 폴리에스테르 재질로 제작하였다. 세정기의 크기는 860 mm×860 mm×1,105 mm로 세정액 주입이 가능한 최대 수위는 250 mm, 부피로 산출하였을 때 약 160 L 수준으로, 세정액 주입과 배출이 가능하도록 급수/배수 밸브(전면)와 개폐 가능 상판도어(상단)를 장착하였다. 필터박스의 크기는 1,230 mm×630 mm×1,110 mm로 프리필터(pre filter)와 카본매트필터(carbon mat filter, activated carbon 소재) 또는 활성탄이 충진 되도록 필터 가이드를 장착하였다. 송풍기는 크기가 870 mm×870 mm×1,028 mm의 후곡 우근형 모양으로 고풍압 및 송풍 효율을 높이기 위한 터보팬을 내장하였고, 처리된 기체상 화학물질의 최종 배출을 위해 상단에 직경 25 cm의 배출구를 장착하였다. 또한, 세정기, 필터박스 및 송풍기 등 모든 장치의 연결은 PVC 재질의 호스를 사용하였다.

기초 성능 평가

이동형 스크러버의 실제 풍량이 장치 사양 이상 성능으로 작동되는지를 판단하기 위해 흡입구 부분의 풍량을 풍속기 Testo 416(Testo, Lenzkirch, Germany)로 측정하였고, 후드 흡입부와 송풍기 배출부의 작동 여부를 확인하기 위해 5% 암모니아수 용액 1 L 용액을 2 L 용량 비커에 넣고 개방된 흄 상태에서 노출시켜 흡입부와 배출부의 농도를 휴대용 복합가스탐지기 IBRID MX6 (Industrial Scientific, Pittsburgh, PA, USA)로 측정하였다. 측정된 실제 풍량은 아래의 유입유량 계산식에 대입하여 제어풍속 기준 및 실제 유입유량(Gas flow rate, Q)을 산출하였다. 여기서 Vc는 제어풍속이며, D는 후드와 오염원과의 거리, A는 후드단면적이다.

$$Q(m^3/min)=60\times Vc(m/s)\times[10\times D2(m^2)+A(m^2)]$$

암모니아 제거효율 측정

염기성 물질인 암모니아의 화학적 특성을 고려하여 대조군으로 증류수만을 세정액으로 사용한 처리군(C, control group, water vortex process), 증류수만을 세정액으로 사용하고 필터박스에 인산 첨착 활성탄을 충진한 처리군(PCA, adsorption method group by phosphoric acid-impregnated activated carbon) 및 증류수에 황산 용액을 첨가하여 pH를 2.5로 조정한 세정액을 사용한 처리군(SWA, absorption method group by pH-controlled water (pH 2.5) vortex process with sulfuric acid)으로 흡수/흡착방법을 달리하여 암모니아 제거 효율을 비교 분석하였다. 3개 처리군은 각각 10% 암모니아수 용액 1 L을 2 L 용량 비커에 채운 후 후드 흡입구에서 개방된 흄 상태로 90분 노출시킨 후 10분 간격으로 배출구 농도를 휴대용 복합가스측정기 IBRID MX6를 이용하여 3반복 측정하였다. 또한, 세정액 pH 조정에 의한 노출 농도별 암모니아 제거효율 변화를 확인하기 위해 25% 암모니아수 용액을 5, 10 및 25% 농도가 되도록 조제한 후 각각 1 L용액을 2 L 용량 비커에 채운 후 후드 흡입구에서 개방된 흄 상태로 90분 노출시킨 후 10분 간격으로 세정액의 pH는 pH 측정기(Thermo scientific, Ayer Rajah Crescent, Singapore), 배출구 농도는 휴대용 복합가스측정기 IBRID MX6를 이용하여 3반복 측정하였다.

톨루엔 제거효율 측정

휘발성 유기화합물(VOCs, Volatile organic compounds)인 톨루엔의 물리화학적 특성을 고려하여 대조군으로 증류수만을 세정액으로 사용한 처리군(C), 증류수만을 세정액으로 사용하고 필터박스에 활성탄이 충진된 처리군(GCA, adsorption method group by granular activated carbon) 및 증류수만을 세정액으로 사용하고 필터박스에 카본매트필터가 충진된 처리군(CMA, adsorption method group by activated carbon mat)으로 흡착방법을 달리하여 톨루엔 제거 효율을 비교 분석하였다. 3개 처리군은 각각 75% 톨루엔 용액 1 L을 2 L 용량 비커에 채운 후 후드 흡입구에서 개방된 흄 상태로 90분 노출시킨 후 10분 간격으로 배출구 농도를 기타가와 가스 검지관(Komyo Rikagaku Kogyo K.K., Kanagawa, Japan)을 이용하여 3반복 측정하였다. 또한, 활성탄 흡착에 따른 노출 농도별 제거효율 변화를 확인하기 위해 100% 톨루엔 용액을 50, 75 및 100% 농도가 되도록 조제한 후 각각 1 L 용액을 2 L 용량 비커에 채운 후 후드 흡입구에서 개방된 흄 상태로 90분 노출시킨 후 10분 간격으로 배출구 농도를 기타가와 가스검지관을 이용하여 3반복 측정하였다.

통계처리

통계분석은 SPSS ver. 19(SPSS Inc., Chicago, Illinois, USA) 소프트웨어를 이용하여 측정하였다. 즉, 데이터 간의 유의차는 One way ANOVA의 Duncan's multiple range test를 통해 $p<0.05$ 수준에서 검증하였다.

결과 및 고찰

이동형 스크러버 개선

본 연구는 Kwak 등(2015)에 의해 개발된 이동형 와류식 세정장치를 개선하여 와류세정법, 유입풍속 조절 등의 장점을 살리고, 활성탄 및 카본필터를 통한 기체상 유해화학물질의 흡착방법 도입을 통해 기존 장치 단점을 보완하였다.

톨루엔과 같은 VOCs는 물에 대한 용해도가 낮아 와류세정방법을 적용하면 기체상의 유해화학물질 제거가 어렵다. 일반적으로 VOCs 제거에 활용되는 기술은 농축 소각, 열 산화, 촉매 산화 및 기체상 흡착과 같은 대상물질의 물리화학적인 특성과 제거효율에 따라 여러 방법이 활용되고 있는데(Cotte *et al.*, 1995; Park *et al.*, 2001; Woo *et al.*, 2007; Noh *et al.*, 2008), 이 중 기체상 흡착에 가장 많이 활용되고 있는 활성탄은 화학물질 취급 사업장 현장에서 보편적으로 이용되고 있고, VOCs 처리에 있어 운전 및 관리가 용이하며 비교적 흡착효율이 높다고 알려져 있다(Woo *et al.*, 2007; Noh *et*

Table 1. Concentrations of inlet and outlet and water pH of mobile scrubber after exposure to 5% ammonia solution

Elapsed time (min)	Inlet concentration (ppm)	Outlet concentration (ppm)	pH in scrubber
0	>500 (over range)	0	6.89
5	54.7	4.7	8.33
10	51.8	5.1	8.39
20	49.9	5.1	8.42
30	50.2	5.2	8.48

al., 2008). 따라서 개선된 장치는 와류세정을 거친 기체상 물질이 활성탄소로 제작된 카본매트필터를 통과하여 추가적인 흡착 제거가 가능하도록 세정기와 송풍기 사이에 활성탄 또는 카본매트필터 장착이 가능한 필터박스를 도입하였다. 필터박스의 구조는 크게 두 가지로 구성되는데, 와류세정을 거침으로써 생성되는 잔여수분과 기타 불순물 유입에 의한 활성탄의 기능 저하 방지를 위해 폴리에스터 재질의 이중프리필터를 전단에 장착하였고, 후단에 활성탄 또는 카본매트필터 탑재가 가능하도록 610 mm×610 mm 크기의 필터 가이드를 장착하였다. 추가적으로 약 30 kg의 활성탄을 고루 채워 가이드에 고정시킬 수 있는 캐비닛을 별도로 구성하여 유량에 따른 기체상 흐름이 원활하게 이루어지도록 설계하였다. 이는 기존 활성탄 및 활성탄소섬유를 이용한 VOCs 제거 연구들에 의해 확인되는데, Baek 등(2011)은 활성탄소섬유와 활성탄을 이용하여 톨루엔의 흡착/탈착 특성을 조사한 결과, 우수한 흡착능력과 탈착성능이 5~20분 정도 소요된다 하였고, Woo 등(2007)은 활성탄 및 활성탄소섬유를 사용하여 톨루엔의 흡착성능을 분석한 결과, 효율적인 제거와 회수가 가능하다고 보고된 바 있다. 따라서 활성탄 및 카본필터를 장착한 필터박스의 역할에 따라 와류세정방법에서 어려웠던 기체상 유해화학물질의 제거 뿐 아니라 미처 제거되지 못한 잔여 가스의 추가 흡착 기능이 부여되었고, 비교적 증기압이 높아 높은 증발 특성을 보이는 VOCs 제거에도 효과를 나타내었다.

개선된 이동형 스크러버의 기초 성능 평가

이동형 스크러버가 충분한 흡입력으로 유입되는지를 확인하기 위해 후드 흡입구에서 댐퍼 개방 각도를 변화시켜 풍속을 측정하였다. 후드 흡입 기류의 속도는 개구면의 직경만큼 떨어질 경우 약 1/10으로 감소하여 후드 직경 이상에서는 흡입력이 미치지 못하는데, 이러한 영향을 고려하여 후드 직경인 20 cm를 측정거리로 두었다. 이와 같은 방법으로 풍속을 측정한 결과, 후드 입구 쪽 댐퍼 각도의 변화에 따라 풍속의 변화가 달라짐을 확인할 수 있었는데, 90도, 60도 및 30도 각도에서 각각 1.6 m/s, 1.0 m/s 및 0.7 m/s를 나타내었다. 산업안전보건기준에 관한 규칙에 따르면 가스 상태의 제어풍속은 1.0 m/s이며, 입자 상태의 제어풍속은 1.2 m/s이다 (MOEL, 2017). 따라서 개선된 이동형 스크러버는 후드가 '외부식 상방 흡인형'으로 가스 상태의 경우 90도 및 60도 각도, 입자 상태의 경우가 90도 각도의 경우에 가장 적합한 것으로 판단되었다. 이는 Kwak 등(2015)의 연구에서 댐퍼 각도가 60도와 90도 사이의 풍속이 적합하였다고 보고한 결과와 유사하였고, 이를 통해 필터박스 도입에 따른 물리적 간섭이 없는 것으로 판단되었다.

후드 흡입부와 송풍기 배출부의 기초 성능을 평가하기 위해 5% 암모니아수 용액 1 L를 2 L 비커에 넣고 개방된 흄 상태에서 30분 노출시켜 흡입부와 배출부의 농도 및 세정액 pH를 측정한 결과는 Table 1과 같다. 흡입부의 암모니아 농도는 장치를 가동하지 않은 상태인 노출 직후 농도가 복합가스측정기의 최대 분석 가능 농도인 500 ppm을 초과한 반면에 5분 경과 후의 농도는 54.7 ppm으로 감소되었고, 30분이 경과되는 시점에서는 소폭 감소된 50.2 ppm을 나타내었다. 이는 최대 분석 가능 농도를 나타내던 암모니아 가스가 이동형 스크러버가 가동되면서 후드가 지속적인 풍속에 의해 정상적으로 흡입되고 있는 것으로 보인다. 세정액 pH는 노출 직후 6.89의 중성을 나타내다 5분 경과 후 8.33의 약 염기로 높아지면서 시간이 경과할수록 소폭 상승하는 경시적인 변화를 나타내었는데, 이는 암모니아 가스가 세정기 내 체류하면서 세정액인 물에 흡수가 진행된 것으로 판단된다. 하지만 30분 경과 후 pH는 8.48로 5분 경과 후 측정치보다 0.15 소폭 높아진 경향이었는데, 이는 5%의 저농도 노출이 원인인 것으로 판단된다. 배출부 농도는 5분 경과 후 4.7 ppm에서 10분 경과 후 5.1 ppm으로 증가하다 30분 경과 후 5.2 ppm으로 소폭 증가되는 경향이었는데, 이는 일부 제거되지 못한 가스가 송풍기로 배출되고 있음을 의미하면서 송풍기 배출부가 정상적으로 작동하고 있음이 확인되는 결과이다. 따라서 이동형 스크러버는 기초 성능 평가를 통해 적정 풍속 기준을 충족하고, 후드 흡입부, 송풍기 배출부 및 세정기가 정상적으로 가동되고 있음을 확인하였다.

암모니아 제거효율

흡착방법에 따른 개선된 장치의 제거효율을 확인하기 위해 C, PCA 및 SWA 군에 10% 암모니아수 용액 1 L을 개방된 흄 상태에서 노출시킨 후 10분 간격으로 90분간 배출구의 농도를 측정하였다(Fig. 2). 초기 10분 경과 후 배출구 농도는 7.50~20.67 ppm 범위로 PCA≥C>SWA 순의 유의적인 차이가 인정되었다($p < 0.05$). 여기서 PCA 군은 대조군인 C 군보다 0.40 ppm 소폭 높아지는 경향으로 그 차이가 미미하였으나, SWA 군은 대조군보다 12.77 ppm 낮은 결과를 나타내었다. 이는 pH 수준이 산성인 와류 세정액이 염기

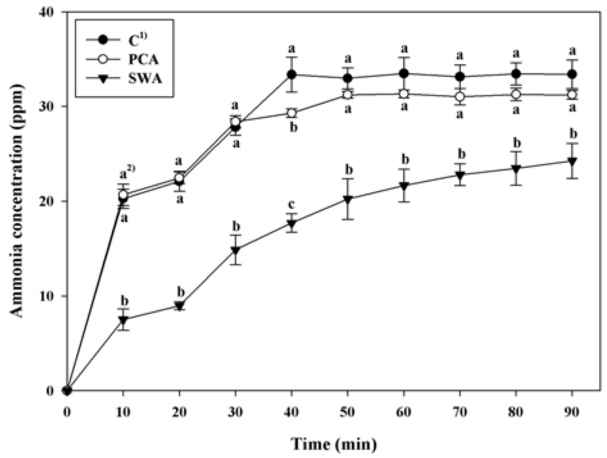

Fig. 2. Outlet concentration by adsorption methods after exposure to 10% ammonia solution.
[1)] C : control group (water vortex process), PCA : adsorption method group by phosphoric acid-impregnated activated carbon, SWA : absorption method group by pH-controlled water (pH 2.5) vortex process with sulfuric acid, [2)] Means with the same letter superscript in histogram's are not significantly different by Duncan's multiple range test (p<0.05).

성인 암모니아 가스를 흡수하여 제거 효율을 향상시키고 있음을 추정할 수 있었다. 또한, 90분 경과 후에도 배출구 농도는 24.27~33.40 ppm 범위로 C≥PCA>SWA 순의 유의적인 차이를 나타내었으며(p<0.05), 경시적인 변화에서도 SWA 군의 농도가 가장 낮아 제거 효율이 가장 높은 군임을 확인할 수 있었다. 한편, 인산 첨착 활성탄을 사용한 PCA 군은 제거효율이 대조군과 큰 차이가 없는 경향이었는데, 이러한 결과는 인산 첨착 활성탄이 암모니아 흡착에 효과적이라 보고한 Ahn 등(2002) 및 Park 등(1997)의 결과와는 차이가 있었다. 하지만 Park 등(1997)이 보고한 인산과 암모니아의 화학반응과 화학양론에 의해 흡착이 일어난다는 결과와 Ahn 등(2002)의 인산 첨착 활성탄 흡착 수준이 저농도 수준에 활용이 가능한 결과로 미루어 본 바, 본 연구에서 사용한 인산 첨착 활성탄의 인산 침척 농도 또는 활성탄 투입량이 문제가 될 수 있을 것으로 추정되며, 이를 입증하기 위한 흡착/탈착 특성 연구가 추가로 필요할 것으로 판단된다. 반면에 모든 군에서 배출구 농도는 시간이 경과되면서 증가하는 경향이었고, C 군과 PCA 군은 각각 40분 및 50분 시점에서 배출구 농도가 일정하게 측정되는 결과이었는데, 이는 세정액 또는 인산 첨착 활성탄에 의한 흡수/흡착 한계로 추정될 수 있다. 한편, SWA 군은 90분 시점까지 C 군과 PCA 군의 최대치인 약 31~34 ppm 수준에 못 미치는 것으로 보았을 때 pH 조정에 의한 흡수는 10% 암모니아수 노출 수준에서 90분 이상 가능할 것으로 판단되었다.

암모니아 제거에 가장 효율적인 처리방법은 SWA 군으로 확인되어, 세정액 pH를 산성으로 조정한 SWA 군의 암모니아 노출 농도를 5, 10 및 25% 수준 별로 달리하여 제거효율을 비교하였다(Fig. 3). 배출구 농도는 노출 농도와 무관하게 체류시간이 경과할수록 증가되었고 세정액의 pH는 점진적으로 증가되어 산성에서 염기성으로 변화되었다. 세정액 pH는 5% SWA 군에서 초기 10분 경과 시 2.80의 강산성 수준에서 점진적으로 증가하다 50분 경과 후 5.62의 약산성 수준으로 변화되었고, 60분이 경과되면서 8.43의 약염기 수준으로 변화되었다. 또한, 10% SWA 군에서도 초기 10분 경과 시 동일하게 3.03의 강산성 수준에서 점진적으로 증가하다 5% SWA 군보다 빠른 30분 경과 후에 5.64의 약산성 수준으로 변화되었고, 40분이 경과되면서 8.69의 약염기 수준을 나타내

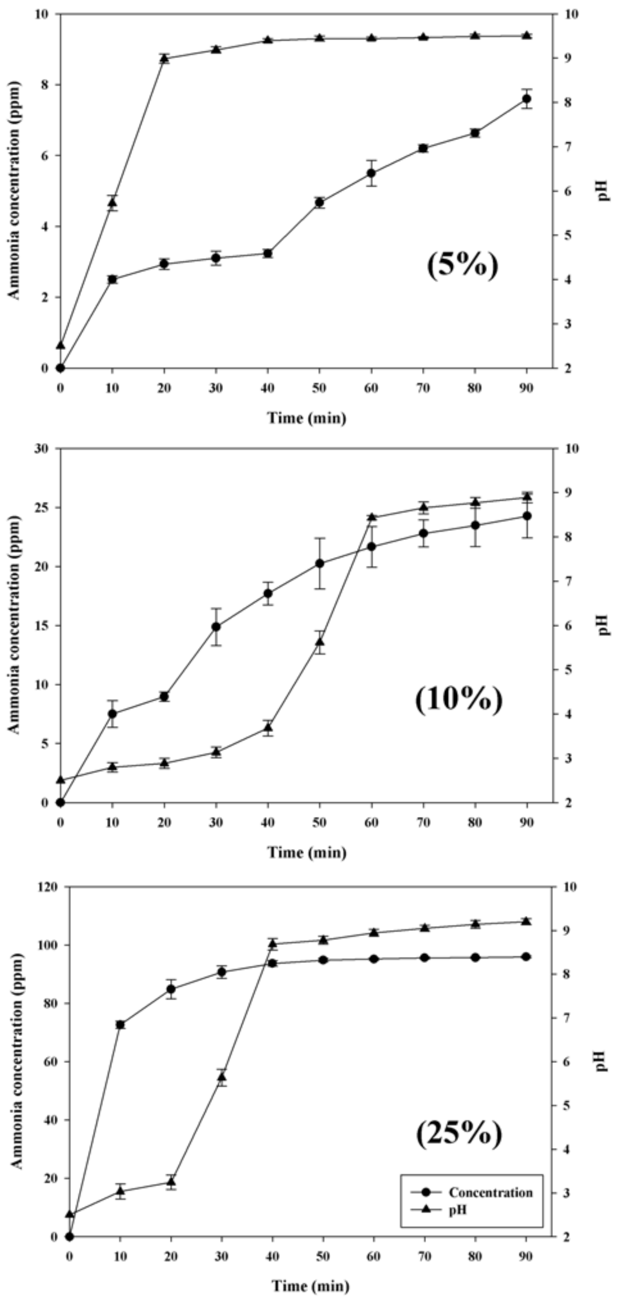

Fig. 3. Outlet concentration and water pH of ammonia exposure concentrations by pH-controlled water (pH 2.5) vortex process absorption with sulfuric acid (SWA).

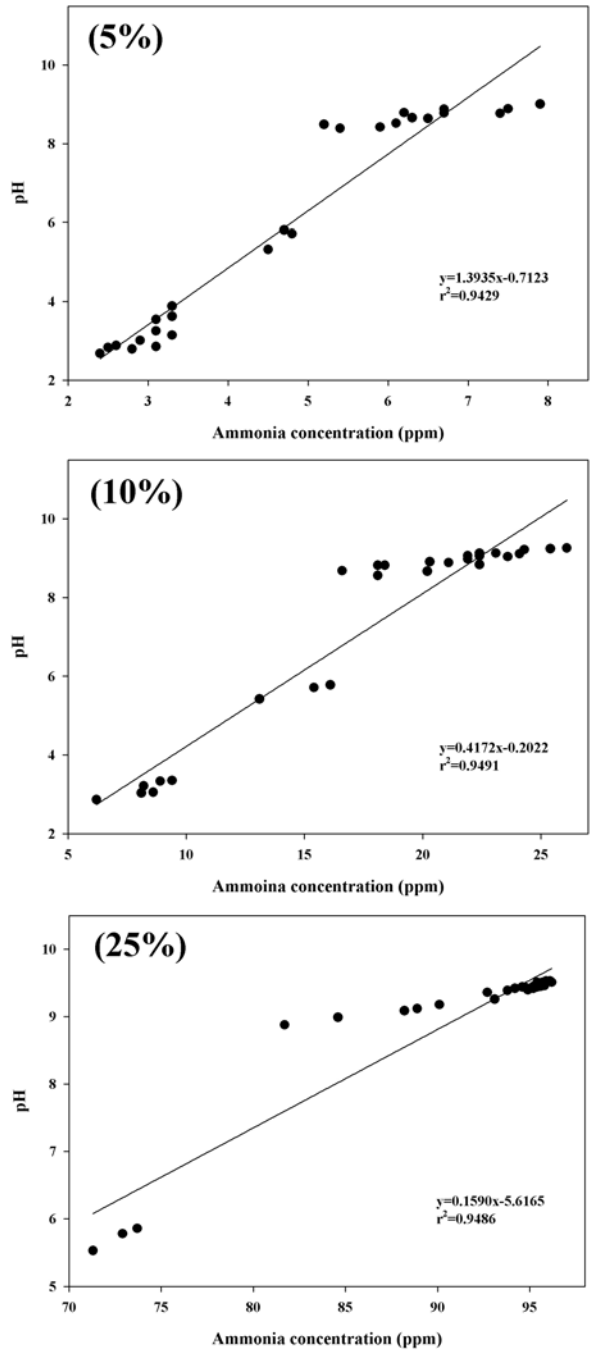

Fig. 4. Correlation between outlet concentration and water pH of ammonia exposure concentrations by pH-controlled water (pH 2.5) vortex process absorption with sulfuric acid (SWA).

다 90분 경과 시에 강염기 수준으로 넘어가 9.20을 나타내었다. 반면에 25% SWA 군은 pH가 급격하게 변화하였는데, 초기 10분 경과부터 5.72의 약산성을 나타내다 20분이 경과하면서 8.99로 pH가 급격하게 증가하다 90분 경과 후에는 9.50의 강염기 수준을 나타내었다. 특히, 40분 경과 시부터 93.70~95.97 ppm 수준의 배출구 농도를 보이면서 9.40~9.50의 일정한 pH를 나타내었는데, 이는 중화반응에 의해 세정기 내 유입된 암모니아 가스가 pH가 조정된 세정액에 흡수되지만 동시에 세정액의 pH 증가되어 염기성으로 전환됨에 따라 더 이상 중화반응에 의한 흡수요건이 어려워진 것으로 판단되고, 흡수되지 못한 암모니아 가스는 와류현상에 의해 세정기 내 체류되면서 일정하게 배출구로 이송되어 일정한 농도를 나타낸 것으로 판단된다.

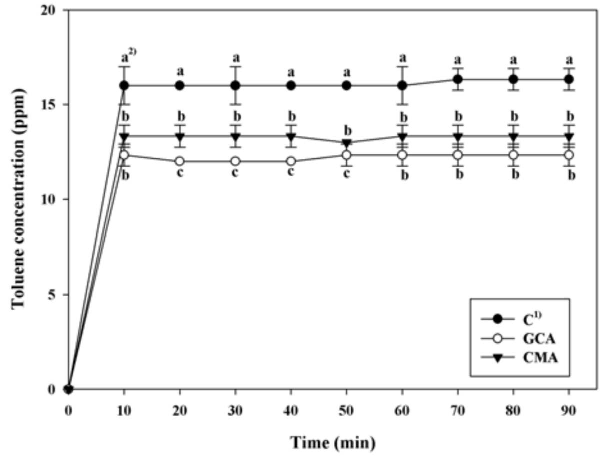

Fig. 5. Outlet concentration by adsorption methods after exposure to 75% toluene solution.
[1] C : control group (water vortex process), GCA : adsorption method group by granular activated carbon, CMA : adsorption method group by activated carbon mat, [2] Means with the same letter superscript in histogram's are not significantly different by Duncan's multiple range test (p<0.05).

한편 시간 경과에 따른 노출 농도 별 세정액의 pH와 배출구 농도 값을 선형 회귀 분석에 의해 상관관계를 확인한 결과 (Fig. 4), 5% SWA 군에서 0.9429, 10% SWA 군에서 0.9491 및 25% SWA 군에서 0.9486 수준으로 노출 농도와 무관하게 세정액 pH 변화와 배출구 농도 변화 사이에 모두 정의 상관관계가 확인되었다. 이와 같은 결과는 세정액의 pH 수준이 배출되는 암모니아 가스 농도에 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있는데, 세정액이 지속적으로 산성 상태를 유지한다면 염기성인 암모니아 가스를 중화하여 연속적으로 흡수 제거할 수 있고, 암모니아 뿐 아니라 염기성을 가지는 유해화학물질 흡수 제거에도 효과적일 것으로 추정된다.

톨루엔 제거효율

흡착방법에 따른 개선된 장치의 제거효율을 확인하기 위해 C, GCA 및 CMA 군에 75% 톨루엔 용액 1 L을 개방된 흄 상태에서 노출시킨 후 10분 간격으로 90분간 배출구의 농도를 측정하였다(Fig. 5). 초기 10분 경과 후 배출구 농도는 12.33~16.00 ppm 범위로 C>CMA≥GCA 순의 유의적인 차이가 인정되었다($p < 0.05$). 여기서 대조군인 C 군과 비교하였을 때 GCA 군은 3.67 ppm, CMA 군은 2.67 ppm 낮은 결과를 나타내었다. 이는 와류 세정에 의해 제거된 기체상 톨루엔이 필터박스에 유입되면서 활성탄 또는 카본매트필터

의 활성탄소에 의해 추가 제거된 것으로 추정된다. 한편, 모든 군에서 노출 시간이 경과하여도 배출농도가 초기 수준과 큰 차이가 없었는데, 90분 경과 후의 배출농도는 초기 10분과 비교하여 C 군의 경우 0.33 ppm의 소폭 증가, GCA 군 및 CMA 군의 경우 변화가 없었다. 이처럼 C 군의 일정한 배출농도는 톨루엔 가스가 세정액인 물에 용해되고 있으며, 그 수준이 90분 이후에도 일정하게 유지됨을 추정할 수 있었다. 또한, GCA 군 및 CMA 군은 C 군보다 낮은 배출농도를 보이면서 C 군과 동일하게 시간이 경과하여도 일정한 배출농도를 보였는데, 이는 활성탄 또는 활성탄소가 흡착제 역할을 하여 세정에 의해 제거되지 못한 잔여 가스가 추가적으로 제거되어 배출되고 있음을 의미하며, 활성탄 및 카본매트필터 역시 90분 이후에도 충분한 흡착 능력을 보유하고 있음을 추정할 수 있었다.

톨루엔 제거에 가장 효율적인 처리방법은 GCA 군으로 확인되어, 활성탄 흡착에 따른 톨루엔 노출 농도를 50, 75 및 100% 수준 별로 달리하여 제거효율을 비교하였다(Fig. 6). 초기 10분에 각 노출 농도 군에서 배출 농도는 각각 3.67, 12.00 및 24.00 ppm을 나타내었지만, 암모니아 노출과 달리 시간이 경과하여도 일정한 배출 농도를 유지하다 90분 경과 후에는 각각 4.33, 12.33 및 24.00 ppm을 나타내어 초기 10분 배출 농도와의 차이가 0~0.66 ppm 수준이었다. 이는 앞선 결과와 같이 톨루엔 가스가 세정액에 용해되고 활성탄이 흡착제 역할을 하여 제거 효율을 높이는 것으로 판단된다. 하지만 노출 농도에 비례하여 배출 농도가 높아지는 경향인데, 이는 노출시킨 고농도 톨루엔이 영향을 미친 것으로 판단된다. 기존의 톨루엔 흡착특성 연구에서도 볼 수 있듯이 탄소 친화력이 높은 톨루엔은 방향족 휘발성 유기화합물로 활성탄, 활성탄소섬유 등에 흡착성능이 우수하다고 알려져 있다(Noh *et al.*, 2008). 따라서 실제 화학사고 및 사업장 현장에서 활용이 가능하도록 농도 대비 활성탄 투입량이 실제 어느 정도 필요한 지에 대한 추가 연구가 진행되면 이를 해결할 수 있을 것으로 추정되며, 노출되는 화학물질 농도와 흡착제의 관계에서 파괴점, 포화점, 흡착속도 등 물리적인 요소를 확인하는 연구가 추가적으로 진행되어야 할 것으로 판단된다.

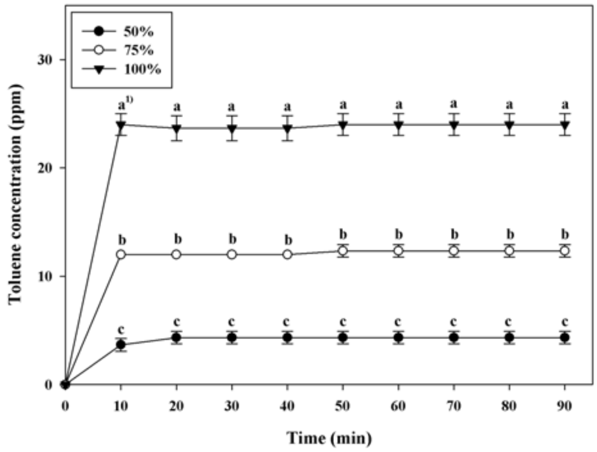

Fig. 6. Outlet concentration of toluene exposure concentrations by granular activated carbon adsorption (GCA). [1)] **Means with the same letter superscript in histogram's are not significantly different by Duncan's multiple range test ($p<0.05$).**

요 약

본 연구는 국내에서 다량 취급되고 있는 암모니아 및 톨루엔을 흄 상태로 노출시킨 후 흡수/흡착방법을 달리한 이동형 스크러버를 이용해 각 유해화학물질의 제거효율을 비교 분석하였다. 이동형 스크러버는 기 개발된 장치를 개선하여 와류 세정에 의한 흡수, 유입풍속 조절의 장점을 살리고, 활성탄 및 카본필터를 통한 기체상 유해화학물질의 흡착방법 도입을 통해 단점을 보완하였다. 개선된 장치는 기초성능평가를 통해 적정 제어풍속이 검증되었고, 5% 암모니아수 용액을 흄 상태로 노출시켜 후드 흡입부, 송풍기 배출부 및 세정기가 정상 작동함을 확인하였다. 흡수/흡착방법에 따른 암모니아 제거 효율은 90분 경과 후 C≥PCA>SWA 순으로 가장 우수한 SWA 군의 노출 농도별 제거 효율은 시간이 경과할수록 노출 농도와 무관하게 배출 농도는 증가되었고, 세정액의 pH는 산성에서 염기성으로 변화되었다. 또한, 시간 경과에 따른 노출 농도 별 세정액의 pH 변화와 배출구 농도 변화 사이에 0.9429~0.9491 수준의 정의 상관관계를 나타내었다. 흡착방법에 따른 톨루엔의 제거 효율은 초기 10분 경과 후 배출구 농도에서 C>CMA≥GCA 순을 나타내다 90분 경과까지 일정한 농도로 유지되었다. 가장 우수한 GCA 군의 노출 농도 별 제거 효율은 초기 10분 경과 시 노출 농도에 비례하여 배출 농도가 높은 경향이었다. 이와 같은 결과를 통해 개선된 이동형 스크러버는 중화반응에 의해 산성 또는 염기성 유해화학물질의 제거 뿐 아니라, 활성탄 등의 흡착기능 개선을 통해 VOCs 제거에도 효과적이었다. 하지만, 실제 현장에서 활용이 가능하도록 세정액 pH를 지속적으로 유지하여 연속적으로 흡수 제거할 수 있는 방법과 노출되는 화학물질 농도와 흡착제의 관계에서 파괴점, 포화점, 흡착속도 등의 물리적인 요소가 추가적인 연구를 통해 도출되어야 할 것이다.

Notes

The authors declare no conflict of interest.

References

Ahn, H. G., Jung, S. C., & Park, S. S. (2002). Adsorption characteristics of sulfide and amine on H_3PO_4 impregnated activated carbon in flow system. Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 24(9), 1615-1622.

Ahn, S. R., Kim, S. B., Lee, J. H., & Chun, K. S. (2014). Study on chemical incident response plan identified as a chemical accident statistics. Korean Journal of Hazardous Materials, 2(1), 50-54.

Baek, G. H., Kim, J. S., Jang, H. T., Kim, H. W., Kim, H. J., & Cha, W. S. (2011). Adsorption/desorption properties of VOCs on activated carbon fiber. Journal of the Korea Academia-Industrial, 12(5), 2439-2444.

Cotte, F., Fanlo, J. L., Cloirec, P. L., & Escobar, P. (1995). Absorption of odorous molecules in aqueous solutions of polyethylene glycol. Environmental Technology, 16, 127-136.

Hung, C. M., Lou, J. C. & Lin, C. H. (2003). Removal of ammonia solutios used in catalytic wet oxidation processes. Chemosphere, 52, 989-995.

Kwak, J. H., Hwang, S. R., Lee, Y. H., Kim, J. Y., Song, K. B., Kim, K., Kang, J. E., Lee, S. J., Jeon, J., & Lee, J. H. (2015). Development of mobile vortex wet scrubber and evaluation of gas removal efficiency. Korean Journal of Environmental Agriculture, 34(2), 134-138.

Lee, D. J., Lee, T. H., & Shin, C. H. (2017). Study of the improvement of hazardous chemical management for chemical accident prevention. Fire Science and Engineering, 31(1), 74-80.

Lillo-Ródenas, M. A., Fletcher, A. J., Thomas, K. M., Cazorla-Amorós, D. & Linares-Solano, A. (2006). Competitive adsorption of a benzene-toluene mixture on activated carbons at low concentration. Carbon, 44, 1455-1463.

Mohan, N., Kannan, G. K., Upendra, S., Subha, R., & Kumar, N. S. (2009). Breakthrough of toluene vapours in granular activated carbon filled packed bed reactor. Journal of Hazardous Materials, 168, 777-781.

Noh, S. Y., Kim, K. H., Choi, J. H., Han, S. D., Kil, I. S. Kim, D. H., & Rhee, Y. W. (2008). Adsortion characteristics of VOCs in activated carbon beds. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 24(4), 455-469.

Park, B. B., Kim, H. S., & Park, Y. S. (2001). Simultaneous adsorption characteristics of binary-component volatile organic compounds. Clean Technology, 7(2), 133-140.

Park, G. I., Lee, H. K., Park, Y. T., & Moon, H. (1997). A study on the adsorption characteristics of NH_3 on H_3PO_4 impregnated carbon in fixed bed. Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 19(9), 1125-1134.

Woo, K. J., Kim, S. D., & Lee, S. H. (2007). Adsorption characteristics of multi-component VOCs including poorly absorbable chemicals on activated carbonaceous adsorbents. Korean Chemical Engineering Research, 45(3), 277-285.

Ya yerli, S., Ar, İ., Doğu, G. & Doğu, T. (2002). Removal of hydrogen sulfide by clinoptilolite in a fixed bed adsorber. Chemical Engineering and Processing, 41, 785-792.