

에어버블과 UV-C LED를 활용한 스크러버 기반 복합 악취 저감 시스템 설계 및 성능 평가

조진표*, 장원모*, 김지유*, 전시환*, 김학선*, 현승균*, 김광희*

*인하대학교 제조혁신전문대학원

e-mail : realwind@inha.ac.kr

Design and Performance Evaluation of a Scrubber-Based Hybrid Odor Reduction System Using Air Bubbles and UV-C LED

Jin-Pyo Cho*, Won-mo Jang*, Ji-You Kim*, Si-e-Whan Jeon*, Hark-Sun Kim*,
Seung-Gyun Hyun*, Kwang-Hee Kim*

*Manufacturing Innovation School, Inha University

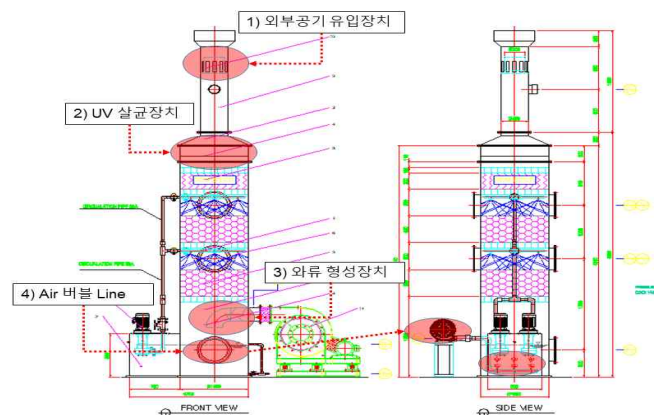
요약

본 연구는 산업 현장에서 발생하는 복합 악취 문제를 효과적으로 저감하기 위해 스크러버 기반의 복합 악취 저감 시스템을 개발하고, 그 성능을 실험적으로 분석하였다. 기존의 습식 스크러버(Wet Scrubber)는 물리적인 세정에 의존하기 때문에 휘발성 유기화합물(VOC), 미생물, 암모니아 등의 제거 효율에 한계가 있었다. 이에 본 연구에서는 에어버블(Air Bubble) 기술과 자외선(UV-C LED) 조사 기술을 접목하여 기계적 세정과 광화학적 분해를 동시에 수행할 수 있는 복합 시스템을 구성하였다. 시스템은 수직형 충전탑 구조를 바탕으로 하여 하단에는 에어버블 장치를, 상단에는 UV-C 모듈을 장착하였으며, 악취 투입을 위한 와류형 혼합장치와 외기 유입형 벤츄리형 토출 구조를 함께 설계하였다. 실험은 실제 화장품 제조 공정에서 배출되는 공정을 대상으로 진행되었으며, CO₂, TVOC, PM2.5 등의 제거 효율을 각 운전 조건에 따라 측정하였다. 시험 결과, UV와 에어버블을 병용한 조건에서 TVOC 제거율은 최대 87%, 입자상 물질(PM2.5)의 제거율은 평균 81~82%로 확인되었으며, 특히 Ring Blower와 UV가 동시에 작동할 경우 가장 우수한 성능을 보였다. 또한, 디미스터 구간에서 가장 큰 압력 손실이 발생하는 것으로 나타났으며, 이는 향후 구조 개선의 핵심 요소로 판단되었다. 본 시스템은 모듈형으로 설계되어 중소규모 산업현장에 적용이 용이하며, 악취 민원 저감과 환경 개선에 실질적인 기여가 가능할 것으로 기대된다.

1. 서론

현대 산업사회에서 생활수준의 향상과 건강한 삶에 대한 요구가 증가함에 따라 대기환경 문제, 특히 악취에 대한 민감도가 높아지고 있다. 악취는 감각 공해 중 하나로, 인근 거주민의 삶의 질을 저해하고 지역사회의 민원을 유발하는 주요 원인으로 작용하고 있다. 특히 화학제품, 식품, 폐수처리, 화장품 제조 등의 산업공정에서 발생하는 복합 악취는 다양한 가스 성분과 미립자, 미생물 등이 혼합되어 있어 제거가 까다롭고 효율적인 처리 기술이 요구된다. 기존의 스크러버 시스템은 수세 방식에 기반해 입자상 물질이나 수용성 가스의 제거에는 일정 효과가 있으나, 비수용성 휘발성 유기화합물(TVOC)이나 세균성 악취물질에 대한 처리에는 한계가 존재한다. 이에 본 연구는 기존 습식 스크러버 시스템의 한계를 극복하고, 에어버블 기술과 UV-C LED 광원을 융합한 복합 악취 저감 시스템을 개발하여 처리 효율을 향상시키고자 한다. 또한, 시스템 성능을 정량적으로 평가하기 위해 각종 센서를 장착하고 운전 조건에 따른 실험을 수행함으로써 실질적

인 현장 적용 가능성을 확보하고, 중소 제조업 현장의 악취 민원 대응과 환경 개선에 기여하는 것을 목표로 한다. 그림 1에는 에어버블과 UV시스템을 결합한 스크러버 시스템 개념도를 나타내었다.



[그림 1] 개발 스크러버시스템 장치 개념도

2. 연구방법

본 연구에서는 스크러버 시스템의 복합 악취 저감 성능을 향상시키기 위한 방법으로, 기존의 습식 스크러버에 에어버블(Air Bubble) 기술과 자외선(UV-C LED) 조사 장치를 융합한 복합형 시스템을 개발하였다. 이를 위해 다음과 같은 단계별 연구 방법을 적용하였다.

2.1 스크러버 시스템 설계

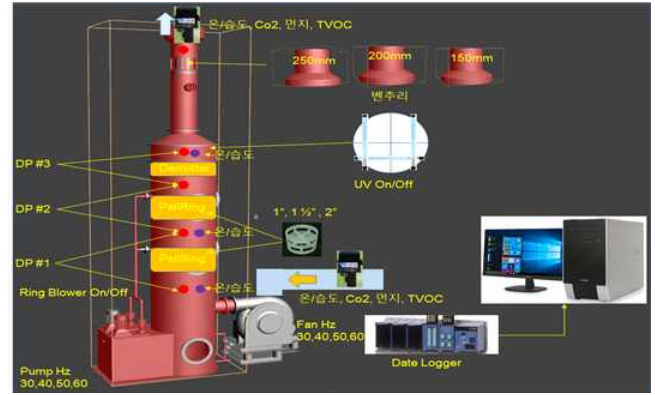
소형 실험용 스크러버 시스템을 설계하고 주요 장비 및 부품을 선정하였다. 본체는 내화특성과 내구성이 뛰어난 FRP(Fiber Reinforced Plastic)로 제작하였으며, 수직형 충전탑 구조를 채택하였다. 내부에는 2단 폴링(Pall Ring) 구조를 적용하여 기체와 세정수가 최대한 접촉할 수 있도록 하였고, 최상단에는 디미스터(Demister)를 설치하여 수분 비산을 방지하였다. 수조 하부에는 워터펌프(100 LPM)와 링 블로어(Ring Blower, 300 LPM)를 장착하였으며, 상부에는 275nm 파장의 UV-C LED 모듈을 탑재하여 배출가스의 광분해 처리를 수행하였다.

주요 제어장치를 구성하였다. 세정수에는 약품 투입이 가능한 노즐을 장착하여 산-염기성 약액 혼합이 가능하도록 설계하였다. 와류 형성 장치는 분사구 인근에 설치되어, 회전형 공기 분사장치와 블레이드가 결합된 구조로 세정액에 와류를 유도하여 악취 가스와의 접촉 면적을 극대화하였다. 또한 수조 하단에는 에어버블 라인을 구성하여 미세기포를 생성하고, 이를 통해 순환수 내 산소동화 작용 및 세정효과를 증대시켰다.

2.2 시험 측정 센서설치 및 데이터 측정

그림 2는 본 연구에서 시험에 적용한 스크러버 시스템 내 각 센서의 설치 위치와 데이터 취득 흐름에 대한 개념도를 나타낸다. 스크러버의 정량적 성능 평가를 위해 총 8개의 센서가 시스템에 설치되었으며, 이들은 각각 차압, 온/습도, 공기질 측정을 담당한다. 차압센서는 폴링 1단, 폴링 2단, 디미스터 구간의 주요 유로에 설치되어 구간별 압력 손실을 실시간으로 측정하였다. 온/습도 센서는 스크러버 입구, 세정탑 내부, 배출구에 각각 부착되어 온도 및 습도의 변화를 모니터링함으로써 처리 전·중·후의 물리적 환경을 파악하는 데 활용되었다. 공기질 센서는 입구와 출구 측면에 설치되어 CO₂, 총휘발성유기화합물(TVOC), 미세먼지(PM_{2.5}) 등의 농도를 측정하고, 이를 기반으로 오염물질 제거 효율을 산정하였다.

실험은 다양한 운전 조건을 설정하여 단계적으로 수행되었으며, 에어 블로워의 주파수는 30Hz에서 60Hz까지 범위 내에서 조절하였다. 워터펌프는 모든 실험에서 고정된 상태로 작



[그림 2] 시험 센서 측정 개념도

동 되었고, Ring Blower와 UV-C LED의 작동 여부에 따라 네 가지 실험 조건이 설정되었다: ① UV 미작동 / 에어버블 미작동, ② UV 작동 / 에어버블 미작동, ③ UV 미작동 / 에어버블 작동, ④ UV 및 에어버블 모두 작동. 각 조건에 대해 반복 실험을 통해 신뢰도 있는 데이터를 확보하고, 제거 효율 및 시스템 내 압력 변동 등 주요 성능 지표를 비교 분석하였다.

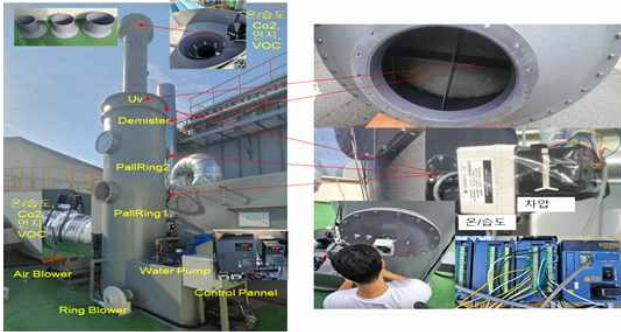
2.3 데이터 측정 및 분석

각 조건에 대해 TVOC, CO₂, PM_{2.5} 등의 제거율을 비교 분석하였고, 특히 유입가스의 농도가 높고 습도가 높은 조건에서도 안정적인 성능을 발휘하는지를 중점적으로 검토하였다. 실험 대상 가스는 실제 화장품 용기 코팅 공정에서 발생하는 혼합 악취이며, 부천시의 OEM 공장을 대상으로 실험이 수행되었다. 이외에도 토출부 직경을 300mm, 200mm, 150mm로 각각 변경하여 외부 공기 유입, 백연 저감, 유속 변화에 따른 영향을 분석하였다.

이러한 실험 결과는 복합 시스템이 개별 기술 대비 우수한 처리 효율을 보이며, 특히 UV와 에어버블의 병용 효과가 유의미함을 입증하였다. 추가적으로 Ring Blower 작동에 따른 혼합 성능 개선, UV 조사에 따른 광화학적 탈취 효과, 와류 및 기포 접촉 강화에 의한 입자 제거 능력 등을 정량적으로 평가할 수 있었다.

3. 연구결과

본 연구에서는 스크러버 기반 복합 악취 저감 시스템의 성능을 정량적으로 평가하기 위해 CO₂, 총휘발성유기화합물(TVOC), 미세먼지(PM_{2.5}), 일반 먼지(PM₁₀) 등 주요 오염물질의 입출구 농도를 비교 분석하였다. 실험 대상은 암모니아(NH₃), 이산화탄소(CO₂), TVOC와 같은 기체상 악취 물질뿐 아니라, 입자상 오염 물질까지 포함하여 다양한 운전 조건



[그림 3] 실제 스크러버 제작 및 성능시험

하에 반복 실험을 수행하였다. 그림 3은 실제 제작된 스크러버 시스템과 성능 시험 과정을 시각적으로 제시한 것이다.

실험 결과, UV-C LED 조사와 에어버블 분사 기술을 병행 적용한 조건에서 가장 우수한 오염물질 제거 성능을 보였다. 구체적으로, TVOC는 최대 87%, NH_3 는 81%, CO_2 는 약 25%까지 농도가 감소하였다. 입자상 물질의 경우 $\text{PM}_{2.5}$ 는 72%, PM_{10} 은 65%의 제거율을 기록하며, 기체뿐 아니라 입자 제거에도 효과적인 성능을 나타냈다. 특히 에어버블의 분사 주파수를 증가시킬수록 기체와 액체의 접촉 면적이 확대되어 입자 포집 효율이 상승하였으며, 이에 따라 시스템 내 압력 손실도 증가하는 경향을 보였다.

UV-C LED 조사 장치는 기체상 물질뿐만 아니라 입자 표면에 부착된 유기 화합물의 광분해를 유도함으로써, 물리적 포집과 화학적 분해가 동시에 이루어지는 복합 처리 메커니즘을 구현하였다. 이로 인해 입자 제거 성능 역시 향상되었으며, 벤츨리 상승 구조와 악취 혼합 장치는 기류 내 와류 및 난류를 유도하여 반응 효율을 극대화하였다.

본 실험은 각 센서로부터 시간대별 데이터를 수집·분석하여 성능을 평가하였으며, 단일 기술 대비 복합 시스템이 명확히 우수한 오염물질 저감 효과를 보유하고 있음을 입증하였다. 또한, 모듈형 구조와 자동 제어 기능을 갖춘 본 시스템은 설치 공간의 제약이 있는 중소규모 제조 환경에서도 실질적인 적용 가능성을 지닌 기술로 평가된다.

4. 결론

본 연구를 통해 에어버블과 UV-C LED 기술을 융합한 복합형 스크러버 시스템이 복합 악취 저감에 높은 효과를 나타냄을 실험적으로 확인하였다. 물리적 접촉 면적 확대와 광화학 반응의 병행 적용으로 TVOC, NH_3 , CO_2 , 미세먼지 등 다양한 오염물질의 제거 성능이 향상되었으며, 시스템은 모듈형 구조로 설계되어 중소 제조업 현장에도 손쉽게 적용 가능하다.

이는 반복되는 악취 민원 문제에 대한 실질적인 해법이 될 수

있으며, 향후 환경 규제 대응과 친환경 설비 확산에도 기여할 수 있는 기술적 기반으로 평가된다.

[후기]

본 논문은 인하대학교 제조혁신전문대학원 석사학위 프로젝트 진행과 학위논문 제출을 위해 발표한 논문입니다.

참고문헌

- [1] Ministry of Environment. (2020). Report on the status of atmospheric environment. Korea.
- [2] Ansan Green Environmental Support Center. (2017). Emission status of hazardous air pollutants in Banwol-Sihwa Industrial Complex. Korea.
- [3] Das Environmental Expert GmbH. (2022). Gas cleaning technologies. Retrieved from <https://www.das-ee.com>
- [4] Nederman MikroPul. (n.d.). Venturi Scrubber. Retrieved May 4, 2025, from <https://www.nedermanmikropul.com/en-AU/Products/Wet-Scrubbers/Venturi-Scrubber>
- [5] Kim, J. H., et al. (2019). A study on improvement of packing structure to enhance scrubber performance. Journal of Korean Society of Environmental Engineers, [In Korean].
- [6] Siheung Green Environmental Support Center. (2020). Status report on odor control facilities in Sihwa Industrial Complex. Korea.
- [7] Jung, E. H., et al. (2021). Recent trends in the development of hybrid odor reduction technologies. Environmental Technology, [In Korean].