

기술자료

센서 기반의 TMS (telemonitoring Systems)를 위한 수분 전처리 장치의 장기간 현장 운영 평가 사례 연구

A Case Study on the Long-Term Field Performance of a Frost-based Moisture Pretreatment Device for Sensor-Based Telemonitoring Systems

이상우, 최인영, 박병규, 백다현, 황원준, 조병찬²⁾, 딘브엉¹⁾*, 김조천*

건국대학교 사회환경공학부, ¹⁾국제기후환경연구소, ²⁾(주)센코

Sang-woo Lee, In-young Choi, Byung-kyu Park, Da-hyun Baek,
Won-jun Hwang, Byung-chan Jo²⁾, Trieu-Vuong Dinh¹⁾*, Jo-chun Kim*

Department of Social and Environmental Engineering, Konkuk University, Seoul,
Republic of Korea

¹⁾International Climate & Environmental Research Center, Seoul 05029, Republic of Korea

²⁾Senko, Gyeonggi, Republic of Korea

접수일 2024년 10월 3일
수정일 2024년 11월 14일
채택일 2024년 11월 16일

Received 3 October 2024
Revised 14 November 2024
Accepted 16 November 2024

*Corresponding author
Tel : +82-(0)2-455-0260
E-mail : dinhtrieuvuong@gmail.com

Tel : +82-(0)2-450-4009
E-mail : jckim@konkuk.ac.kr

Abstract Recently, the need to manage small and medium-sized air pollutant emitting plants has been increasing. In this study, 7 sites with 4 to 5 types of stack emission facilities in Korea were selected, and air pollutant monitoring systems were established using moisture pretreatment devices and sensor-based analyzers. The total research period was 16 months, and the research was carried out by operating KPASS (Key Compound Passer), a moisture pretreatment device, according to the situation at the selected workplace. Since the performance of the moisture pretreatment device may affect the sensor-based analyzer, temperature stability, moisture removal rate, and moisture stability were confirmed only after the chimney exhaust gas passed through the moisture pre-treatment device. The temperature reduction rate of the stack emission gas in the 7 test-beds was about 35%, and the temperature remained below 25°C. With the exception of one business site, temperature stability was relatively stable with a relative standard deviation (RSD%) of less than 10%. The moisture in the flue exhaust gas remained below 25% relative humidity after passing through the moisture pretreatment device, and moisture stability remained below 25% relative standard deviation (RSD%). Therefore, KPASS, a newly developed moisture pretreatment equipment, showed suitable performance for sensor-based TMS.

Key words: Moisture pretreatment devices, TMS (telemonitoring Systems), KPASS, Stack emission gas

1. 서 론

대기 환경에 영향을 미치는 오염물질은 주로 산업체의 굴뚝에서 배출되며, 대기 중으로 방출되면 빠르고 광범위하게 확산된다. 이러한 특성 때문에 대기 오염은 불특정 다수에게 쉽게 노출될 수 있어, 수질 오염이나 폐기물 오염보다 국민 건강에 미치는 부정적인 영향이 더 클 수 있다. 이러한 피해를 예방하고

국민 건강을 보전하기 위해서 외국에서는 연속 배출 모니터링 시스템 (Continuous emissions monitoring system, CEMS)을 도입하였다 (Seo and Lee, 2019). 연속 배출 모니터링 시스템 (CEMS)은 고정 배출원으로부터 방출되는 대기 오염물질을 모니터링하기 위해 적용되었으며, 보통 일산화탄소 (CO), 이산화탄소 (CO₂), 황산화물 (SO_x), 질소산화물 (NO_x), 염화수소 (HCl), 불화수소 (HF), 암모니아 (NH₃), 수증기 (H₂O),

입자상 물질 등과 같은 대기 오염 물질의 배출을 감지하는 데 적용된다 (Jahnke, 2022; Dinh and Kim, 2021). 환경부는 대한민국 상황에 맞게 연속 배출 모니터링 시스템 (CEMS)을 도입하였으며, 굴뚝 배출원에 대한 상시 측정과 관제센터로의 온라인 데이터 송신을 통해 대기오염물질 배출 상황을 24시간 감시하기 위해 굴뚝원격감시체계 (TMS)를 설치하여 굴뚝 배출원의 기초데이터를 수집하고 관리하고 있다 (MOE, 2021). 오염물질의 배출을 관리하기 위해 대기환경보전법에서 배출 허용 기준을 마련하여 사업장 특성에 따라 적용하고 있다. 굴뚝원격감시체계 (TMS)는 대기환경보전법 규정에 따라 사업장의 규모를 구분한 1~5종 중 대형사업장인 1~3종의 사업장에 배출되는 오염물질의 종류와 용량별 기준에 맞추어 설치하여 운영하고 있다 (MOE, 2021; Song, 2015).

4~5종 사업장은 대기오염물질 배출 업소의 대부분을 차지하고 있지만 1~3종 사업장보다 관리가 미흡하다. 4~5종 사업장의 경우 1~3종 사업장보다 규모가 작아 개별적인 배출량은 적지만, 사업장 수는 약 12배로 많고 10년 이상 노후 방지시설 운영 사업장 등 관리가 부족한 사업장들이 많은 실정이다 (MOE, 2022). 4~5종 사업장의 굴뚝에는 굴뚝원격감시체계 (TMS)가 설치되지 않아 관리가 미흡하며, 대기오염물질의 중요한 배출원임에도 불구하고 배출량 관리를 위한 투자는 상대적으로 부족하다. 이러한 사업장의 대기배출물질 관리 미흡으로 인해 민원과 사회적 갈등이 발생하고 있으며, 특히 영세사업장의 배출량 조사가 누락된 경우가 많아 실제로는 더 많은 양의 대기오염물질이 배출되고 있다. 따라서 사업장 배출 시설에 대한 관리 실태와 문제점을 진단하고, 이를 해결하기 위한 방안을 마련할 필요하다 (Cho *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2018).

수분 (H_2O)은 NDIR (Non-Dispersive Infrared) 분석기의 정확도에 영향을 미치는 중요한 간섭 인자이다. 수분은 NO_2 의 경우 30%, SO_2 의 경우 20%, NO 의 경우 5%까지 NDIR 분석기의 오차를 발생시킨다 (Dinh and Kim, 2021; Amaral *et al.*, 2015; Giechaskiel

et al., 2014; Elsasser *et al.*, 2012). 수분 (H_2O)은 또한 입자상 물질을 측정하는 데 사용되는 광 산란 방식에 상당한 영향을 미친다. 상대 습도가 20%에서 80%로 증가했을 때 염화나트륨 입자의 광 산란 비율은 1~10배 증가하는 것을 확인하였다 (Dinh and Kim, 2021; Jayaratne *et al.*, 2018; Shao *et al.*, 2017; Zieger *et al.*, 2013; Lundgren and Cooper, 1969). 시료가스가 고온, 다습한 경우 센서의 열 영향 및 수분의 적외선 흡수로 인해 간섭이 심하게 발생한다. 입자상물질의 경우 광원에서 발생하는 적외선을 반사, 굴절하는 등의 경로에 간섭을 일으키거나 시료 셀 내부의 광학필터, 반사경에 물리적 손상이 발생한다 (Dinh and Kim, 2021). 수분은 수용성 가스의 흡수 또는 아티팩트 형성과 같은 문제를 유발한다. 수분이 존재하는 상태에서 아티팩트 형성의 경우 HCl이 NH_3 와 반응하여 염화 암모늄과 같은 염을 생성한다. 시립 폐기물 소각로에서 NH_3 는 HCl과 SO_2 와 반응하여 염화 암모늄과 아황산 암모늄과 같은 암모니아 염을 생성하는 것으로 나타났다 (Dinh and Kim, 2021; US EPA, 1997, 1993). 배출 가스 함유된 수분에 의해서 발생하는 응축수는 대상 가스에 영향을 미칠 수 있다. 액상 상태의 응축수를 채취하여 분석하면 SO_x , NO_x , HCl 및 NH_3 와 같은 가용성 가스가 분석되어 응축수에서 흡수가 발생했음을 확인하였다. 또한 미국 EPA는 굴뚝 배출 가스의 HCl과 NH_3 가 수분에 흡수가 되어 손실되고 생성된 응축수는 시스템을 부식시키고 누출을 발생시킨다 (Dinh and Kim, 2021; US EPA, 1997, 1994, 1993).

사업장에서 배출되는 대기오염물질의 배출량을 결정하기 위해서는 배출농도의 정확도가 중요하다. 만일 측정기기의 오차로 인하여 배출농도가 수 ppm의 오차가 발생한다면 이로 인하여 수십 %의 배출량 변동이 발생하여 실제로 환경기준을 위반하거나 대기 배출부과금제도로 인한 부과금이 증가할 수 있다 (KITECH, 2010). 이를 방지하기 위해서는 측정기기의 정확도 향상이 중요하다. 정확도 향상을 위한 방법으로는 새로운 측정방법의 연구와 기존 측정방법

의 개선 등이 있으며, 목표하고자 하는 대기오염물질을 오차 없이 정확하게 측정하기 위한 간섭성분의 전처리 방법이 연구되고 있다. 이 중 측정기기로 주로 사용되는 NDIR, 센서, 광산란 방법을 사용한 기기는 입자상 물질과 수분에 의해 간섭을 받고 있으며 이에 대한 전처리 및 보정을 진행해야 한다(Lee *et al.*, 2023; Choi *et al.*, 2022; Dinh and Kim, 2021; Kim *et al.*, 2019; Lee *et al.*, 2019; Oleszek-Kudlak *et al.*, 2007).

굴뚝 가스에 함유된 가스에 의한 오류와 피해를 줄이기 위해서 굴뚝원격감시체계(TMS)에 고온 및 다습에 대해 전처리하기 위해서 주로 쿨러(Cooler)와 나피온 드라이어(Nafion dryer)를 사용하며, 냉각이나 막을 이용하여 수분을 전처리 하게 된다(Jahnke, 2022). 수분을 전처리하기 위한 장치 중 나피온 드라이어는 수분 제거가 가능하지만 특정 물질의 측정 및 분석 과정에 손실되거나 흡수되어 측정에 부적합할 수 있다는 선행연구 결과들이 있다(Dinh and Kim, 2021; Boylan *et al.*, 2014; Son *et al.*, 2013; McGlenny *et al.*, 1991). 쿨러는 이슬점보다 낮게 냉각하여 수분을 응축하여 제거하는 기술이다. 수분은 응축되어 액체상태인 물로 변화하게 되며, 시료가스에 포함된 친수성 가스 및 접촉하여 흡수하게 된다. 이렇게 흡수된 친수성 가스는 측정기기로 전달되지 않아 측정에 손실과 오류를 발생하게 된다. 배출 가스 중 용해도가 높은 암모니아의 경우 쿨러에서 제거된 유출수에서 검출되기도 하였다(Dinh and Kim, 2021; Kim *et al.*, 2019; Lee *et al.*, 2019; Gluck *et al.*, 2003).

기존에 사용되고 있던 수분 전처리 장치를 대체하기 위한 연구가 시도되고 있으며, 최근에 개발된 KPASS(Key Compound Passer) 수분 전처리 장치는 시료 중의 수분을 응결하여 제거하는 방법을 사용한다. 수분을 함유하고 있는 굴뚝 가스를 응결하는 방식은 펠티어 효과를 이용하여 응결하는 방식이다. 펠티어 효과란 두 개의 서로 다른 금속선의 양끝을 접합한 다음 회로에 직류전기를 흘리면 한쪽 접합부에서 흡열반응이 다른 접합부에서는 발열 반응이 일어난다. 전류의 방향을 반대로 하면 흡열과 발열이 반대로 일

어나는 현상으로 일종의 히트 펌핑 현상으로써 전자 냉각의 원리이다. 이러한 펠티어 효과를 사용하여 관 내부에 Frost filter를 생성하여 수분을 선택적으로 제거한다. 수분 전처리 장치인 KPASS는 실증 현장에 설치되기 전에 많은 연구를 진행하여 성능을 검증하였다. 김동준(Kim, 2019)은 상대습도 조건을 다르게 하여 수분 가스를 제조하여 KPASS의 수분 제거 성능을 검증하고 굴뚝 배출 가스의 회수율을 연구하였으며, 길한늬(Gil and Kim, 2021)에는 고온의 조건에서 상대습도를 다르게 하여 수분 제거 성능과 굴뚝 배출 가스 중 HCl의 회수율에 대해 연구하였다. 건국대학교(Konkuk University Industry-Academic Cooperation Group, 2024, 2020)에서는 1~3종 배출시설에 TMS를 구축하여 수분 전처리 장치인 KPASS를 설치하였으며 수분 제거 성능과 TMS 대기오염물질 회수율에 대한 연구를 진행하여 KPASS에 대한 성능을 검증하였다. 또한 수분 전처리 장치인 Cooler와 KPASS의 대기오염물질 회수율 성능 평가를 연구하였으며 대기오염물질은 TMS 주 항목인 SO₂, CO₂, CO, NO, NO₂를 선정하여 연구를 진행하였다. Cooler는 SO₂, CO₂, CO, NO, NO₂ 각각 83.3%, 89.2%, 87.8%, 99%, 97.7%의 회수율을 보였으며, KPASS는 100%, 99.3%, 98.8%, 99.8%, 99.8%의 회수율을 보였다.

본 연구는 선행연구와 같이 대표적으로 사용되던 Cooler와 KPASS의 성능 비교 실험을 통해서 KPASS를 현장에서 사용해도 문제가 없는 것으로 판단하여 이번 연구에 수분 전처리 장치를 현장 실증화 연구를 진행하였다. 수분 전처리 장치인 KPASS는 장기간 동안 설치 및 운영하여 성능을 검증한 데이터가 부족하다. 그렇기 때문에 본 연구에서는 KPASS의 장기간 수분 제거율과 수분 배출 안정성에 집중하여 성능을 연구하였다.

2. 실험 방법 및 이론

2.1 KPASS 원리

본 연구에서 사용된 KPASS는 측정 대상 물질에 대

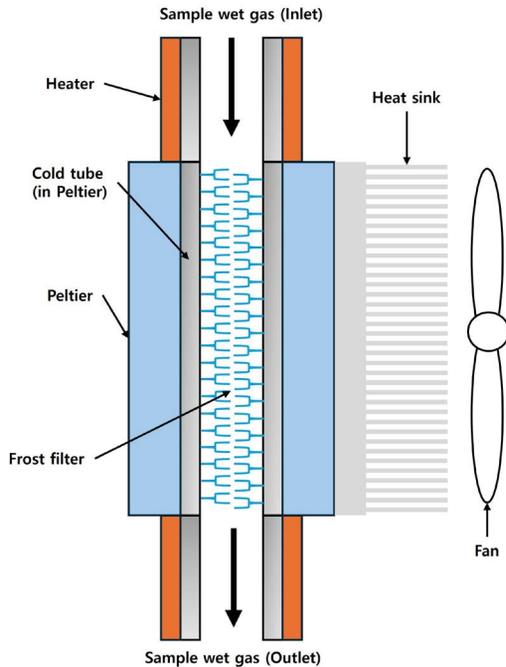


Fig. 1. KPASS peltier section and frost filter.

한 손실 없이 굴뚝 가스 내에 존재하는 수분만을 선택적으로 제거하기 위해 개발된 수분 전처리 장치이다. KPASS는 그림 3, 4와 같이 펠티어, 히터, 가스가 흐르는 관, 히트싱크, 팬 (Fan)으로 구성되어 있으며, 그림 4는 KPASS의 작동하는 단면이다. KPASS의 작동 원리는 peltier (펠티어) 장치 내부를 통과하는 관을 냉각하여 frost filter를 형성하는 것을 기반으로 한다. 굴뚝 배출 가스가 냉각된 관을 통과하면서 포함되어 있는 수분이 기체에서 고체상으로 상태 변화하는 탈승화 과정으로 frost filter가 생성되며 굴뚝 배출 가스의 수분들은 frost filter에 의해 선택적으로 제거된다 (Lee *et al.*, 2023; Kim *et al.*, 2019; Lee *et al.*, 2019). KPASS의 펠티어 모식도와 수분 제거 원리는 그림 1에 제시하였다. 본 연구에서 실증현장에 설치한 KAPSS의 peltier (펠티어) 내부의 관 외경은 19.05 mm, 관 내경은 18.05 mm, 관 길이는 140 mm로 제작하였다. Test-bed에 설치된 센서들이 약 600 mL/min의 유속으로 흡입하기 때문에 KAPSS를 통과하는 유

속은 1 L/min으로 설정하였으며 남은 가스들은 Split 라인을 설치하여 외부로 빼내었다. KPASS는 관 내에 오염물질이나 수분 응결로 인한 Frost filter가 과하게 생성되어 압력이 발생하면 purge를 하는 기능을 가지고 있다. 또한 압력이 발생하기 전 현장의 대기배출가스의 수분과 오염물질 상황에 따라 미리 관 내부를 purge를 자동적으로 할 수 있도록 시간을 조절할 수 있어 각 Test-bed를 가동하면서 압력 발생을 대비하여 purge 가동 시간을 설정하였다. 본 연구에서 사용한 7개의 KPASS는 가동 온도를 $-15\sim-18^{\circ}\text{C}$ 를 사용하였으며 purge가 시작될 때 약 20°C 까지 올려 관 내부의 수분과 오염물질을 배출하였다. KAPSS는 가스가 흐를 수 있도록 2개의 관을 사용하여 한 개의 관이 purge를 시작하면 가동 준비를 하고 있는 다른 관으로 스위칭하도록 설계하였다.

이러한 현상은 Mpemba 효과가 중요한 역할을 한다. Mpemba 효과는 고온 상태의 물이 특정 상황에서 저온 상태의 수분보다 더 빨리 얼어붙는 현상으로, 분자 간의 상호작용과 수소결합과 관련이 되어 있다. 저온 상태의 물 분자 사이의 수소결합은 인력을 발생시켜 물 분자 내에서 산소와 수소 원자의 공유결합이 길어지면서 에너지를 축적하지만 고온 상태의 물 분자들은 간격이 넓어지면서 수소결합의 인력이 약해지고 산소와 수소의 공유결합이 짧아지면서 에너지를 방출한다. KPASS는 유입되는 굴뚝 배출 가스를 온도를 높게 유지하고 펠티어 내부의 냉각된 관을 유입되면서 빠르게 냉각되어 굴뚝 배출 가스에 함유되어 있는 수분이 frost 형태로 바뀌어 관 내부에 부착되어 filter를 형성하게 한다 (Lee *et al.*, 2023; Tyrovolas, 2017; Sun, 2015; Keutsch and Saykally, 2001).

2.2 Test-bed 선정

2.2.1 지역 선정

[미세먼지 개선을 위해 시급한 사업장 배출시설관리] 연구에 따르면, 경기북부 지역의 경우 17,357개소 사업장 중 24.8%가 불법 또는 등록하지 않은 채 공장을 운영하고 있다. 특히 2017년 경기도 포천시 일대



Fig. 2. Location of selected business sites.

의 대기오염물질 배출 사업장의 대기분야 위반사항 81건 중 대부분이 4~5종 배출 사업장에서 적발되었다(Kim et al., 2018).

환경부에서는 이러한 문제를 해결하기 위해서 4~5종 소규모 굴뚝배출 시설이 설치되어 있는 대기배출 사업장에 사물인터넷 측정기기 부착을 제도화하는 내용의 대기환경보전법 하위법령 개정안을 입법 예고하였다(MOE, 2022). 전자 장치를 통한 자동관리는 관리 인력 부족 및 소규모 배출사업장의 관리 역량을 향상시킬 수 있을 것으로 기대하고 있다. 중소기업 대기오염물질 배출업소에 대한 관리 필요성이 증대되고 있는 상황이기 때문에 본 연구에서 수분 전처리 장치와 연계하여 대기오염물질 모니터링 시스템을 선정된 사업장에 설치하여 수분 전처리 장치의 수분 제거율과 성능을 현장 실증화를 통해 연구하였다. 그림 2는 경기북부지역에 본 연구에서 선정된 지역을 나타낸 것이다.

2.2.2 업종 선정

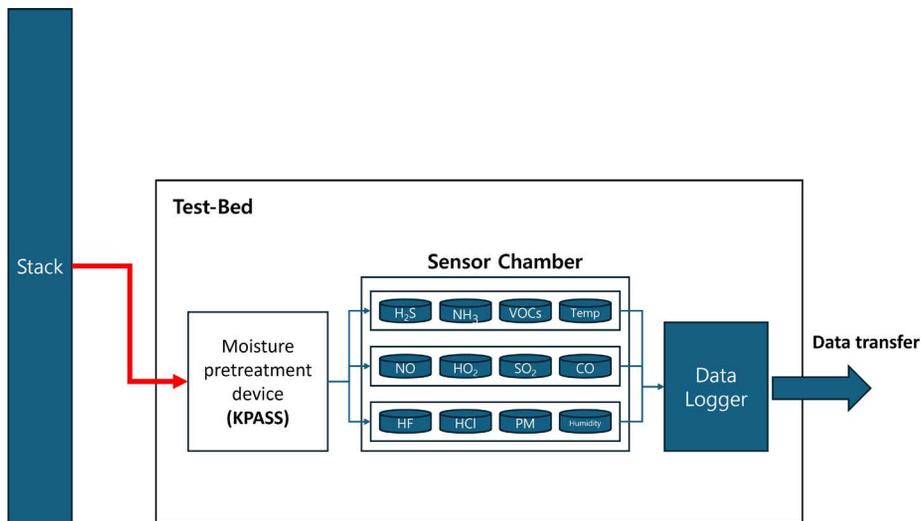
본 연구는 7개의 사업장을 선정하여 대기오염물질 통합측정시스템 Test-bed를 설치하였다. 통합측정시스템은 대기오염물질을 측정하는 다항목 센서형 측정기와 수분 전처리 장치인 KAPSS로 구성하였다. Test-bed를 설치한 사업장은 가구 제조업 1개소, 금속 가공업 1개소, 도금업 1개소, 섬유 제조업 2개소, 플라스틱 가공업 1개소, 자동차 수리업 1개소로 총 7개의 사업장을 선정하였다. 표 1은 선정된 사업장의 위치와 대기환경보전법 규정에 따른 사업장의 규모를 나타낸다.

2.3 현장 Test-bed 시스템 구성

그림 3은 수분 전처리 장치가 설치된 Test-bed의 전체 시스템 구성도이다. 수분 전처리 장치인 KPASS를 통과하여 수분이 제거된 가스가 센서 챔버로 흐르게 되고 센서에서 오염물질을 측정하여 데이터 수집이 시작된다. 본 연구에서는 수분 전처리 장치의 성

Table 1. Basic information for the selected sites

	Type of industry	City	Classification of air pollutant emission sites	Monitoring compounds
A	Furniture manufacturing	Po-choen	5	TSP
B	Metal processing	Yang-Ju	4	TSP, HCl, NO _x
C	Metal plating	Yang-Ju	3	TSP, HCl, NO _x
D	Textile manufacturing	Yang-Ju	4	TSP, HCl, NO _x
E	Textile manufacturing	Yang-Ju	4	TSP, HCl, NO _x
F	Plastic processing	Po-choen	4	TSP, HCl, NO _x , SO _x
G	Automobile industry	Po-choen	5	TSP, NO _x , SO _x

**Fig. 3.** A schematic diagram for the field test-bed system.

능을 파악하기 위해서 수분 전처리 장치 전단과 후단의 수분 측정 센서를 통해서 수분 제거율과 수분 전처리 장치 통과 후 수분 안정도를 현장에서 실증 연구하였다.

총 연구기간은 2022년 11월부터 2024년 3월까지 7개의 Test-bed를 16개월간 운영하였으며 각각의 Test-bed의 운영기간은 사업장의 상황에 맞추어 운영하였다. 이때 수분 측정 센서를 통해서 굴뚝에서 유입되는 수분과 센서로 배출되는 수분을 5분 데이터로 수집하였다. 수분 전처리 장치의 성능평가 및 현장운용 데이터 추가 수집을 위해 전 후단에 온도, 습도 센서를 설치하였으며, 측정데이터 수집을 위한 데

이터 전송보드를 제작 후 운영하였다. 수분 전처리 장치의 전단과 후단의 온도와 습도에 대한 데이터 ID 및 주소를 구분하였고, 또한 현장별 전처리장치 전단과 후단에 온도, 습도 센서 및 데이터 수집용 통신보드도 설치하였다. 온도와 습도 측정의 정확성을 확인하기 위해서 교정성적서를 발급받은 온도, 습도 센서 (Testo 645, Testo, Germany)를 가지고 현장에서 비교하여 확인하였다.

수집된 데이터를 통해서 본 연구에 사용된 수분 전처리 장치의 성능을 평가하고 실증 결과를 확인하기 위해서 굴뚝 배출 가스의 온도제어 데이터, 굴뚝 배출 가스 수분 데이터를 가지고 평균, 표준편차, 상대

표준편차 (RSD) 그리고 수분 제거율을 계산하였다. 각 수집 데이터는 다음 식을 이용하여 계산되었다.

$$Average(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Xi \tag{1}$$

$$Standard\ deviation(s) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (xi-x)^2}{n-1}} \tag{2}$$

$$Relative\ standard\ deviation(RSD\%) = \frac{s}{x} \times 100 \tag{3}$$

$$Humidity\ removal\ rate = \frac{Inlet\ Humidity - Outlet\ Humidity}{Inlet\ Humidity} \times 100 \tag{4}$$

3. 결과 및 고찰

3.1 Test-bed 굴뚝 배출 가스의 온도 변화

표 2와 그림 4는 각각 Test-bed로 선정한 7개의 장소에서 실시간 측정된 수분 전처리 장치 후단의 배출 가스 평균 온도와 안정성, 수분 전처리 장치 전단과 후단의 굴뚝 배출 가스의 온도 측정 결과이다. 수분 전처리 장치는 굴뚝 가스에 함유된 수분의 양을 제어 하고 온도를 안정적으로 유지시켜 분석기로 보내는 역할을 한다. 수분 전처리 장치를 통과한 후에 배출 가스 온도는 충분히 낮아져야 하며 안정적으로 유지 되어 후단에 설치된 센서의 측정·분석에 영향이 적어야 한다.

본 연구에서 선정된 7개의 산업체는 소규모 산업 체로 공정운영시간 및 방지시설운영시간이 불안정하 며 각 산업체의 생산이 요청될 때마다 가동을 진행한 다. 전체적으로 그래프에서 굴뚝 배출 가스 유입 온 도가 평균적으로 하향 곡선일 때 가동을 중지한 상태 로 판단하였다. 가구 제조업인 A Test-bed는 가동시 간과 비가동시간의 가스 온도가 차이가 없는 것은 가 구 제조업의 특성으로 높은 온도의 가스가 배출되지 않는다. 플라스틱 가공 사업장인 F Test-bed는 24시간 가동을 기본으로 유지하고 있어 굴뚝 배출 가스의 유 입 온도가 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다.

Table 2. Average and stability of outlet gas temperatures for each site.

Test-bed	Outlet temperature average (%)	Outlet temperature RSD (%)
A	16.38	8.12
B	16.38	8.12
C	16.60	9.08
D	16.82	25.51
E	19.60	7.55
F	18.87	4.39
G	23.66	2.53

A Test-bed는 가구 제조 산업체이고, 굴뚝 배출 가 스 온도는 평균 33°C로 배출되었으며, 수분 전처리 장치를 통과한 후 온도 감소율이 33% 줄어들어 22.63 °C로 유지되었다. 상대표준편차 (RSD)는 2.85%로 매 우 안정적인 온도를 유지하였다.

B Test-bed는 금속가공업으로 4개월간 KPASS를 가동하여 수분 전처리 장치의 실증 연구를 진행하였 다. 굴뚝 배출 가스 온도는 평균적으로 24°C로 낮은 온도로 배출되었으며, 수분 전처리 장치를 통과하여 평균 16.40°C로 유지되었으며 상대표준편차 (RSD)가 7.92%로 비교적 안정적인 온도를 유지하였다. 데이 터 수집 후 3개월 지점부터 배출되는 가스의 온도가 매우 불안정하였으며, 사업체의 운영조건이 많이 바 꾸면서 수분 전처리 장치를 통과한 시료 가스의 온도 에 영향을 주어 온도가 불안정하게 유지된 것으로 판 단된다.

C Test-bed는 도금 사업장이며 굴뚝 배출 가스 온 도는 약 25°C로 배출되고 있으며 그래프와 같이 배 출 가스의 온도의 편차가 큰 편으로 불안정한 온도의 가스가 수분 전처리 장치로 유입되었다. 수분 전처리 장치를 통과한 후 출구 시료 가스의 온도는 평균 16.6°C를 유지하였으며 상대표준편차 (RSD)는 9.08% 로 안정적으로 온도가 유지되어 분석기로 전달이 되 고 있었다.

D Test-bed는 섬유 제조업으로 약 6개월간 수분 전 처리 장치를 설치하여 실증 연구를 진행하였다. 굴뚝 배출 가스의 온도는 매우 불안정하게 유지되었으며,

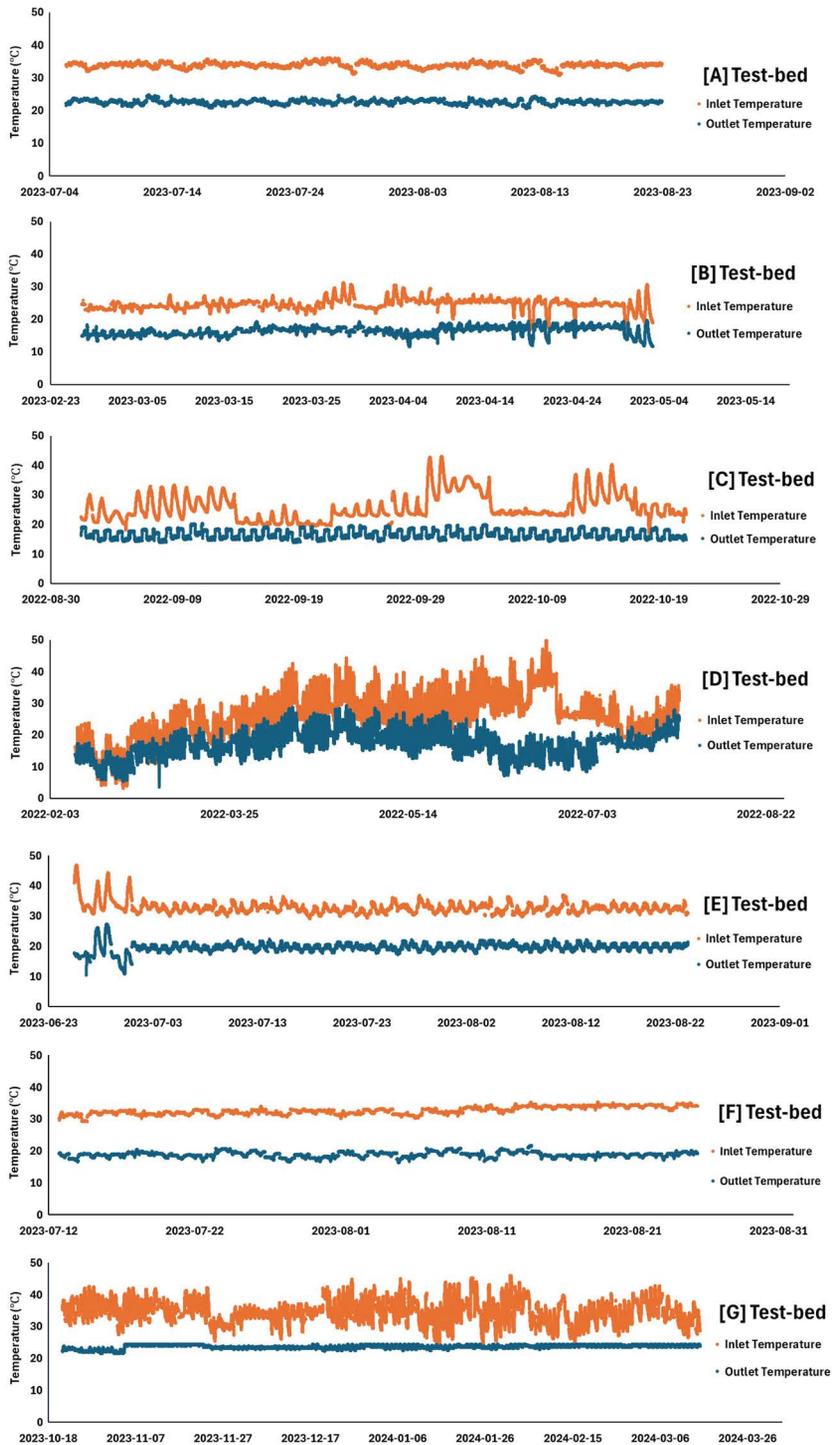


Fig. 4. Variations of the temperature of stack exhaust gas at the front and rear ends of the moisture pretreatment device in the test-bed.

사업장 가동조건과 가동시간이 수시로 바뀌어 운영된 것을 파악할 수 있었다. 설치 후 약 25일간 사업장 점검으로 인하여 수분 전처리 장치만 가동하고 사업장은 가동되지 않아 굴뚝 배출 가스가 유입되지 않고 일반 대기가 유입되어 수분 전처리 장치를 통과하는 문제가 발생하였다. 겨울철의 영향으로 일반 대기 온도가 굴뚝가스 온도보다 더 낮은 것을 확인할 수 있었으며, 수분 전처리 장치를 통과하여 온도를 유지하기 위해서 분석기로 들어가는 시료가스의 온도가 상승한 것을 확인할 수 있다. 연구 전체 기간의 굴뚝 배출 가스의 평균 온도는 25°C이었으며, 사업장 가동 후 평균 온도는 27°C를 유지하였다. 굴뚝 배출 가스의 온도 분포는 3.27°C에서 49.85°C로 넓은 온도 범위를 나타내어 매우 불안정함을 확인하였다. 수분 전처리 장치를 통과한 출구 시료 가스의 온도는 평균 16.82°C이었으며, 상대표준편차(RSD)는 25.51%로 불안정하였다. 굴뚝 배출 가스의 온도가 넓게 분포되어 있고 온도가 불안정한 가스가 유입되어 수분 전처리 장치에 영향을 준 것으로 판단되며, 타 사업장에 비해 굴뚝 배출 가스 수분량이 가장 높은 Test-bed였다. 또한, 굴뚝 배출 가스의 수분량이 매우 불안정하게 형성되어 설치된 수분 전처리 장치의 가동 조건인 -15°C로 시료 가스의 온도를 안정하게 유지하기 어려웠던 것으로 사료된다. 수분 전처리 장치의 일차적인 목적은 수분 제어이기 때문에 D Test-bed 수분 전처리 장치는 수분 제어가 충분히 잘 되어 가동 온도의 변경을 주지 않고 실증 연구를 지속할 수 있었다.

E Test-bed는 섬유 제조 사업장으로 약 2개월간 연속 가동하였으며 설치 초기 5일간 사업장 정비로 인해 가동하지 않고 사전 정보를 입수한 후 수분 전처리 장치의 가동 조건 설정 후 사업장 가동과 함께 현장 실험을 시작하였다. 굴뚝 배출 가스의 유입 온도는 평균 32°C를 유지하였고, 수분 전처리 장치를 통과한 출구 시료 가스의 온도는 19.6°C를 유지하였으며, 상대표준편차 7.55%로 매우 안정적인 온도로 시료 가스를 분석기로 전달하였다. 비교적 굴뚝 배출 가스의 온도가 안정적으로 유지가 되면 수분 전처리

장치에 영향이 적어 온도 제어 효율이 상승하는 것을 확인할 수 있었다.

F Test-bed는 플라스틱 가공 사업장으로 약 40일간 가동을 실시하였다. 굴뚝 배출 가스의 온도는 평균 32.7°C로 유입되었고, 수분 전처리 장치를 통과 후 평균 18.9°C의 온도를 유지하였으며 상대표준편차(RSD)는 4.39%로 매우 안정적인 출구 시료 가스 온도를 유지하였다.

G Test-bed는 자동차 수리업으로 수분 전처리 장치를 설치 후 약 6개월간 가동하였으며 굴뚝 배출 가스의 온도는 23°C에서 45°C까지 배출 가스의 온도 분포가 넓었다. 수분 전처리 장치를 통과한 후 출구 시료 가스의 온도는 평균 23.7°C를 유지하였으며, 상대표준편차(RSD)는 2.52%로 안정적인 온도를 나타내었다. D Test-bed와 마찬가지로 굴뚝 배출 가스의 온도의 범위가 넓지만 비교적 G Test-bed가 그 온도범위가 작으며 굴뚝 배출 가스의 수분량이 많이 포함되어 있지 않아 수분 전처리 장치를 통과한 후 가스의 온도가 안정적으로 유지된 것으로 사료된다.

3.2 Test-bed 굴뚝 배출 가스의 수분 변화

표 3과 그림 5, 6은 각각 선정된 7개 Test-bed의 수분 제거율과 수분 전처리 장치 전단과 후단의 수분을 나타내는 표와 그래프이다. 각 Test-bed의 굴뚝 배출 가스의 수분 조건에 따라 상황에 맞게 수분 전처리 장치인 KAPSS의 가동 조건을 변경하여 적용하였다. 수분 전처리 장치의 가장 중요한 역할은 굴뚝 배출

Table 3. Moisture removal rate and outlet moisture stability for each site.

Test-bed	Outlet humidity average (%)	Outlet humidity RSD (%)	Humidity removal rate (%)
A	25.08	12.24	40.78
B	10.69	19.17	50.32
C	6.78	13.41	74.95
D	7.04	23.27	71.95
E	23.58	11.48	56.35
F	25.37	17.14	53.68
G	16.24	14.39	62.03

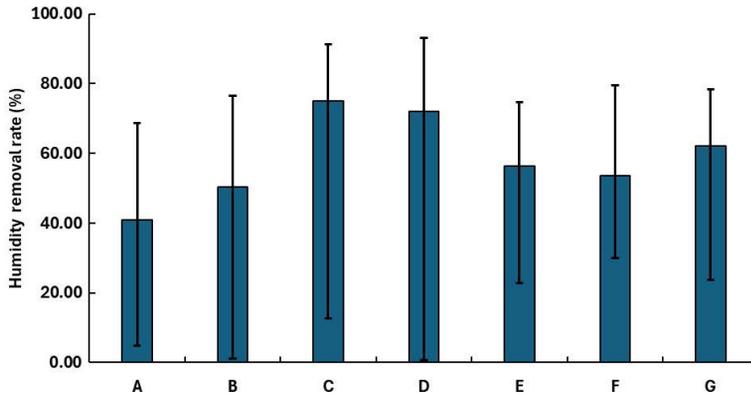


Fig. 5. Moisture removal rates of the pretreatment devices at seven field-test.

가스의 수분 농도를 제어하여 후단에 설치되어 있는 분석기와 센서를 높은 수분 농도로부터 보호하고 배출 가스의 대기오염물질의 정확한 측정과 분석을 할 수 있도록 수분으로부터 간섭을 최소화하는 것이다.

수분 전처리 장치를 통과하고 나온 굴뚝 배출 가스의 수분 농도의 안정성을 20%를 목표로 하였으며, 각 Test-bed의 수분 농도 상대표준편차(RSD)는 6개의 Test-bed는 모두 20% 이내로 들어왔으나, 1개의 Test-bed는 23.27%를 나타내었다. 그림 5는 각 Test-bed의 굴뚝 배출 가스의 수분 제거율의 평균을 나타내고 있으며 수분 제거율의 최대와 최소를 표기하였다. 섬유 제조업인 D Test-bed의 굴뚝 배출 가스는 온도와 수분 농도가 가장 불안정하였으며, 그에 따라 수분 전처리 장치가 제거할 수 있는 수분의 농도의 범위가 가장 넓어 최대와 최소의 차이가 큰 것으로 확인하였다. 플라스틱 가공업인 F Test-bed는 24시간 가동과 굴뚝 배출 가스의 일정한 온도와 수분 농도로 수분 제거율의 최대 최소 범위가 작은 것으로 확인하였다. 가구 제조업인 A Test-bed는 굴뚝 배출 가스 자체 온도와 수분 농도가 낮아 수분 전처리 장치가 제거할 수 있는 수분의 양이 적어 수분 제거율이 50% 미만으로 확인하였다.

A Test-bed는 포천에 소재하고 있는 가구 제조업으로 굴뚝 배출 가스의 수분 농도는 상대습도 평균 43%로 비교적 일정한 수분 농도를 나타내었다. 굴뚝 배

출 가스는 수분 전처리 장치를 통과하여 상대습도 평균 25.08%로 분석기 부분으로 전달되었으며 상대표준편차(RSD) 12.24%로 안정적인 수분을 유지하였다. 수분 제거율은 40.8%로 수분 전처리 장치에 유입되는 굴뚝 배출 가스에 포함하고 있는 수분 농도가 매우 낮아 수분 제거율이 높게 산출되지는 않았다. 또한 수분 전처리 장치 설치 초기에는 -10°C 를 유지하였다가 30일 경과 후에는 -13°C 로 가동 온도를 바꾸어 수분 전처리 장치 후단의 수분 농도의 안정성을 높이도록 하였다. 가동 온도 -10°C 에서 수분 전처리 장치 통과 후 수분 농도의 안정성은 상대표준편차 13.78%를 유지하였고 -13°C 로 변경 후 수분 농도 안정성은 상대표준편차(RSD) 8.23%로 안정성이 상승함을 볼 수 있었다.

B Test-bed(양주 금속 가공업)에 있는 굴뚝 배출 가스의 수분 농도는 23.8%로 7개의 Test-bed 중 굴뚝 배출 가스가 가장 낮게 배출되었다. 수분 전처리 장치인 KPASS의 가동 온도를 -10°C 로 유지하였으며 KPASS를 통과 후 분석기 부분으로 전달되는 수분은 상대습도 11.18%이었고, 상대표준편차(RSD) 18%로 안정적인 수분 농도를 유지하였다. 굴뚝 배출 가스 자체 수분 농도가 낮아 제거 가능한 수분 가스가 많이 존재하지 않았기 때문에 수분 제거율은 51.47%로 산출되었다.

C Test-bed(양주 금속 도금 사업장)는 굴뚝 배출

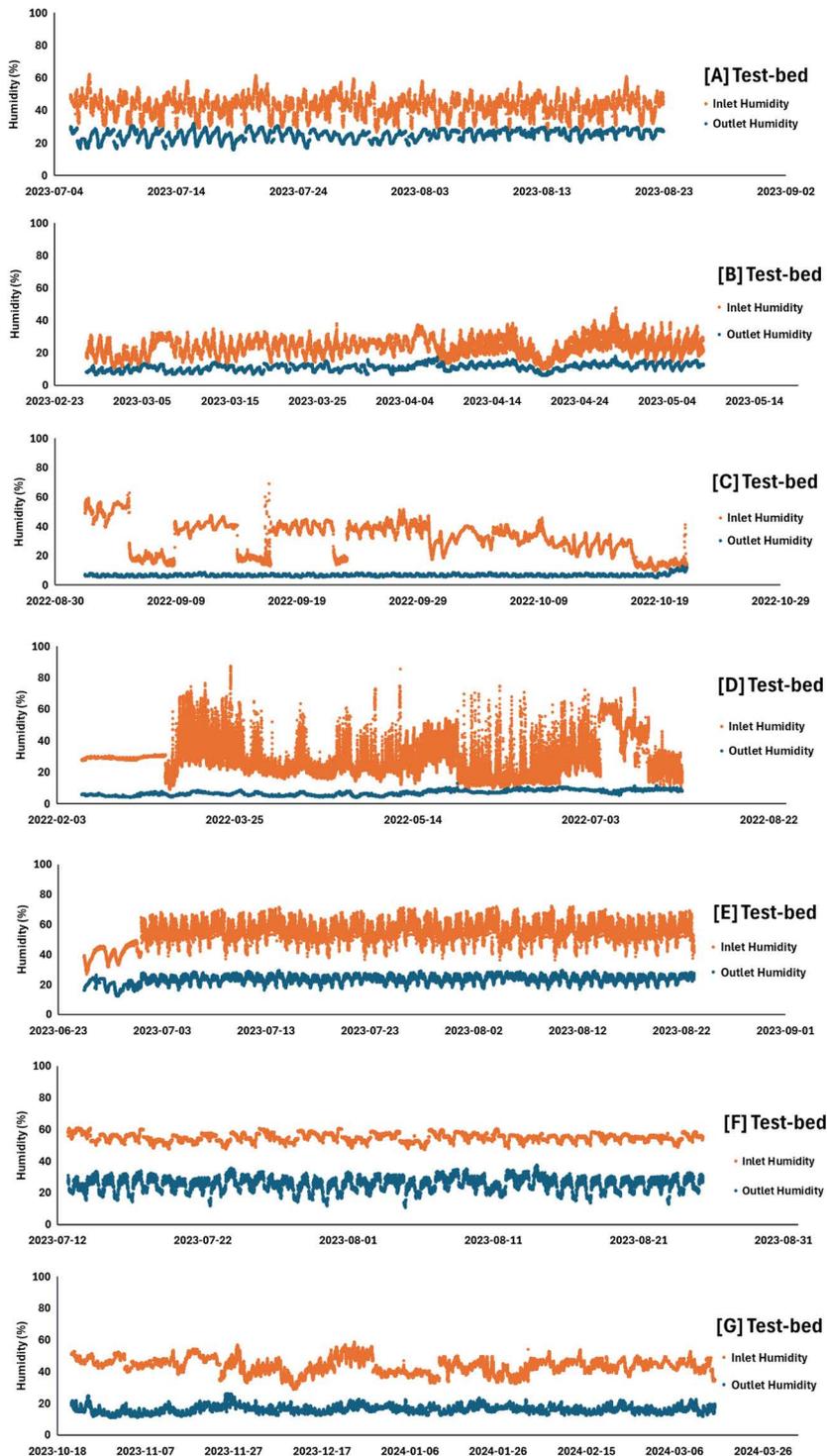


Fig. 6. Variations of the moisture of stack exhaust gas at the inlet and outlet of moisture pretreatment devices of concern.

가스 배출량이 많아 3종 사업장으로 분류가 되어 있다. 굴뚝 배출 가스의 수분 농도는 평균 31.9%이지만 그림 6에서 나타난 것과 같이 생산되는 제품과 작업의 방법에 따라 배출되는 가스의 최대 수분 농도는 상대습도 68.96%, 최소 수분 농도는 상대습도 9.75%로 편차가 크기 때문에 최대 수분 농도를 기준으로 하여 수분 전처리 장치의 가동 온도는 -15°C 로 설정하여 가동하였다. 굴뚝 배출 가스는 수분 전처리 장치를 통과한 후 평균 상대습도 6.78%로 배출되었으며 상대표준편차(RSD) 13%로 매우 안정적인 수분 농도를 유지하였다. 수분 제거율은 평균 74.95%로 산출되었다. KPASS 전단의 굴뚝 배출 가스의 수분 농도는 상대습도 12.6~91.21%로 매우 편차가 컸지만 KPASS를 통과한 후 수분 전처리 장치 후단의 수분 농도는 상대습도 5.3~12.95% 이내로 유지됨을 확인하였다.

D Test-bed는 양주에 있는 섬유 제조 사업장으로 설치 후 약 25일간 사업장 운영을 하지 않아 외기가 유입되어 수분 전처리를 통과하였다. 그 후 사업장이 운영되면서 굴뚝 배출 가스가 유입되었다. 굴뚝 배출 가스 수분은 평균 상대습도 29.08%이며 최대 87.33%, 최소 9.22%로 수분의 편차가 매우 큰 것을 확인하였다. 수분 전처리 장치인 KPASS는 최대 수분에 맞추어 가동 온도를 -15°C 로 설정하여 운영하였다. 굴뚝 배출 가스가 수분 전처리를 통과한 후 평균 상대습도 7.04%로 측정되었으며 배출되는 수분 안정성인 상대표준편차(RSD)는 23.27%로 본 연구의 목표보다 약 3% 이상 높았지만 유입되는 굴뚝 배출 가스의 수분 편차를 보았을 때 수분 전처리 장치를 통과한 후 표준편차(SD)는 1.63으로 안정적으로 수분을 제거하였기 때문에 수행 능력이 안정하다고 판단하여 가동 온도를 변경하지 않고 그대로 유지하였다. 수분 제거율은 평균 71.94%이었으며 수분 제거율 범위는 0.68~93.13%로 유입되는 굴뚝 배출 가스의 영향으로 수분 제거율 편차가 큰 것을 확인하였다. D Test-bed의 경우 굴뚝 배출 가스의 온도가 $5\sim 50^{\circ}\text{C}$ 로 넓은 범위로 분포되어 있었으며 그 이유는 소규모 사업체이지

만 같은 제품을 생산하는 라인이 2개로 되어 있어 공정 가동과 비가동을 자주 변경하였다. 그에 따라 유입되는 굴뚝 배출 가스의 수분 농도의 차이도 크게 나는 것으로 판단된다.

E Test-bed는 양주의 섬유 제조 사업장으로 생산되는 품목과 공정과 생산량이 일정하여 굴뚝 배출 가스의 수분과 온도가 안정하게 유지되어 배출되는 사업장이다. 굴뚝 배출 가스의 수분은 평균 상대습도 54.83%이며 최대 상대습도 72.09% 최소 상대습도 26.83%로 편차는 큰 편이지만 배출되는 가스의 수분이 일정한 패턴을 보였다. 이 때문에 수분 전처리 장치인 KPASS의 가동온도를 -15°C 를 유지하여 운영하였다. 굴뚝 배출 가스는 수분 전처리 장치를 통과한 후 평균 상대습도 23.57%를 나타냈으며, 수분 안정성을 나타내는 상대표준편차(RSD)는 11.47%로 안정적으로 수분을 제어하였음을 알 수 있었다. 수분 제거율은 평균 56.34%, 최대 74.64%, 최소 22.84%로 산출되었다.

F Test-bed는 포천에 소재하고 있는 플라스틱 가공 업체로 사업장의 사정으로 인하여 짧은 기간 연구를 진행하였다. 플라스틱 품목과 생산량이 일정하여 굴뚝 배출 가스의 수분과 온도가 일정하게 배출되는 것을 확인하였다. 굴뚝 배출 가스의 수분은 평균 상대습도 54.89%이며 수분 범위는 상대습도 47.36~1.05%로 배출되는 가스의 수분 편차가 크지 않기 때문에 수분 전처리 장치는 -13°C 를 설정하여 운영하였다. 수분 전처리 장치를 통과한 배출 가스의 수분은 평균 상대습도 25.37%이었으며 상대표준편차(RSD) 17.14%로 수분 제거율은 53.68%로 산출되었다.

G Test-bed는 포천에 소재한 자동차 수리업으로 굴뚝 배출 가스 수분은 평균 상대습도 43.65%이며 범위는 상대습도 29.12~58.93%이다. 이 곳은 같은 공정을 반복적으로 운영하는 곳이 아니고, 생산 품목과 작업 시간이 일정하지 않기 때문에 수분 전처리 장치의 가동온도를 -17°C 로 설정하여 초기에 운영을 하였으며 연구 시작 후 3개월 후에 배출되는 배출 가스의 수

분 패턴을 확인한 후 -15°C 로 변경하여 유지하였다. 수분 전처리 장치를 통과한 배출 가스의 수분은 평균 상대습도 16.17%이며 상대표준편차 (RSD) 14.04%로 수분이 안정적으로 제어된 가스를 분석기 부분으로 전달하였다. 수분 제거율은 62.48%이며 약 6개월 동안 안정적으로 굴뚝 배출 가스의 수분을 제어하였다.

본 실증연구를 진행하기 전 선행연구들은 실험실 내에서 대표적으로 사용되는 수분 전처리 장치들을 가지고 KPASS 장비와 수분 제거 효율을 비교를 하였다. 선행연구(Kim, 2019)는 온도 25°C , 유량 1 L/min 조건에서 상대습도 30%, 50%, 80%의 수분 가스를 제조하여 KPASS, Nafion dryer, Cooler 세 가지 장비를 가지고 수분 제거 효율을 비교 진행하였다.

상대습도 30% 조건에서는 KPASS, Nafion dryer, Cooler 각각 수분 제거 효율이 86.4%, 82.1%, 17.6%로 측정되었으며 그 중 KPASS는 상대표준편차(RSD)가 0.3%로 안정적인 수분 제거 성능을 보였지만 Cooler는 8.8%로 KPASS에 비해 불안정한 수분 제거 성능을 보였다. 상대습도 50% 조건에서 수분 제거 효율은 각각 90.8%, 88.0%, 54.7%로 측정되었다. KPASS와 Nafion dryer는 수분 제거 효율이 약간 상승한 것에 비해 Cooler는 초기 수분 농도가 높아져 수분 제거 효율의 상승폭이 향상된 것을 확인할 수 있었다. 상대습도 80% 조건에서는 수분 제거 효율이 각각 93.6%, 46.8%, 59.2%로 측정되었으며 KPASS가 상대표준편차(RSD)가 0.4%로 나타내 고습도 조건에서도 안정적인 수분 제거 효율을 보여주었다. 대표적인 수분 전처리 장치인 Nafion dryer와 Cooler와의 비교를 통해서 KPASS가 수분 전처리 장치로서 현장에 적용될 수 있는 것을 확인하였다. 또 다른 선행연구(Gil and Kim, 2021)에서는 80°C 조건에서 저습 조건과 고습 조건에서 Cooler와 Nafion dryer의 수분 제거 효율 비교 연구를 진행하였다. 절대습도 $17 \pm 2 \text{ v/v}\%$ (온도 80°C , 상대습도 35%)에서 Cooler와 Nafion dryer는 수분 제거 효율 각각 94.4%, 92.4%이었으며 상대표준편차(RSD) 2.3%, 3.8%로 수분 전처리 장치를 통과한 후 안정적인 수분 농도를 배출함을 확인하

였다. 건국대학교 (Konkuk University Industry-Academic Cooperation Group, 2024)에서는 수분 전처리 장치의 실증화 연구를 위해서 KPASS에 대한 저습 조건과 고습 조건에서의 수분 제거 효율 성능을 시험하였다. 저습 조건은 온도 26°C 절대습도 20 g/m^3 의 수분 가스를 생성하여 KPASS를 통과시켜 86.8%의 수분 제거 효율을 보였으며 고습 조건에서는 온도 110°C 절대습도 170 g/m^3 의 수분 가스를 KPASS에 통과시켜 98.3%의 수분 제거 효율을 보였다. 유입 온도의 변화는 저온 조건인 26°C 에서 KPASS를 통과후 24°C 를 유지하였으며, 고온 조건인 110°C 에서 25.2°C 로 온도를 안정적으로 제어하였다. 이러한 선행연구들을 통해서 수분 전처리 장치로서 현장에서의 적용 가능성을 확인한 후에 본 연구를 진행하였다.

따라서 본 연구에서 수분 전처리 장치의 성능은 수분 제거율과 출구 수분 안정성 측면에서 실용적인 것을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내에서 새로 개발된 수분 전처리 장치인 KPASS를 사용하여 경기북부지역의 여러 사업장에 설치하여 수분 제어에 대한 실증화 연구를 수행하였다. 가구 제조업, 금속 가공업, 도금업, 섬유 제조업, 플라스틱 가공업, 자동차 수리업을 대상으로 KPASS를 설치하여 장기간 운영하였다. 수분 전처리 장치의 수분 제어 성능에 대해서 평가하기 위해서 굴뚝에서부터 프로브 라인을 연결하여 수분 전처리 장치와 온·습도 센서와 대기오염물질 분석 장비를 설치하여 시스템을 구성하였다. 수분 전처리 장치 전단과 후단에 2개의 온·습도 센서를 설치하여 수분 제거율을 측정하였으며 장기간 데이터를 수집하기 위해서 통신 보드를 설치하여 실증 연구를 진행하였다. 사업장별 굴뚝 배출 가스의 수분과 온도가 차이가 있기 때문에 사전 조사와 데이터 분석을 통해서 KPASS

의 가동 온도, 가동 시간 등을 사업장별로 설정하여 운영을 하였다.

7개의 사업장의 굴뚝 배출 가스가 KPASS를 통과하여 배출온도를 15~25°C 이내로 유지하였으며 온도 안정성은 D Test-bed를 제외하고 6개의 사업장에서 상대표준편차(RSD) 10% 이내로 매우 안정적인 배출 가스의 온도를 유지하였다. 수분 제거율은 모든 사업장에서 평균 50% 이상으로 나타났지만 유입되는 굴뚝 배출 가스의 수분 편차가 크기 때문에 수분 제거율의 편차도 크게 나타났다. KPASS를 통과한 굴뚝 배출 가스의 수분은 상대습도 30% 이내로 모두 제거 되었으며 D Test-bed를 제외하고 모두 상대표준편차(RSD) 20% 이내로 수분은 안정적으로 배출되었다. D Test-bed와 같이 굴뚝 배출 가스의 온도와 수분 양의 편차가 매우 큰 가스가 유입되어 안정적으로 수분과 온도를 제어할 수 있도록 KPASS의 가동 설정 온도와 가동 주기에 대한 연구가 더 필요함을 알 수 있었다.

수분 전처리 장치인 KPASS는 기존 TMS에 설치되어 있는 수분 전처리 장치와 다른 방식으로 개발된 장치이며 기존 장치들의 단점을 보완하면서 개선해야 하는 연구가 지속적으로 진행되어야 한다. 기존 장치들과의 다른 점은 가동 온도의 범위가 매우 크며 사업장의 굴뚝 배출 가스의 형태에 따라서 변경이 가능하다는 점이다. 이런 점을 활용하기 위해서는 많은 사업장에 적용하여 데이터를 축적해서 분석해야 하며 이를 바탕으로 사업장에 맞는 가동조건을 적용할 수 있다고 판단된다. 사업장별 수분 전처리 장치를 최적화하게 된다면 에너지 소비를 절감하고 굴뚝 배출 가스 분석장비를 효율적으로 보호하며 가스내의 오염물질을 정확하게 분석할 수 있다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 대기환경 관리기술 사업화 연계 기술개발사업

의 지원을 받아 연구되었습니다(2050000167).

References

- Amaral, S., De Carvalho, J., Costa, M., Pinheiro, C. (2015) An Overview of particulate matter measurement instruments, *Atmosphere*, 6(9), 1327-1345. <https://doi.org/10.3390/atmos6091327>
- Boylan, P., Helmig, D., Park, J.-H. (2014) Characterization and mitigation of water vapor effects in the measurement of ozone by chemiluminescence with nitric oxide, *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(5), 1231-1244. <https://doi.org/10.5194/amt-7-1231-2014>
- Cho, S.-H., Kim, D.-Y., Go, J.-G. (2019) The core task of improving fine dust is strengthening the management capacity of emission facilities at workplaces.
- Choi, I.-Y., Dinh, T.-V., Kim, D.-E., Jun, B.-H., Lee, S.-A., Park, Y.-M., Kim, J.-C. (2022) The effect of a hybrid pretreatment device for CEMS on the simultaneous removal of PM_{2.5} and water vapor, *Atmosphere*, 13(10), 1601. <https://doi.org/10.3390/atmos13101601>
- Dinh, T.-V., Kim, J.-C. (2021) Moisture removal techniques for a continuous emission monitoring system: a review, *Atmosphere*, 12(1), 61. <https://doi.org/10.3390/atmos12010061>
- Elsasser, M., Crippa, M., Orasche, J., DeCarlo, P.F., Oster, M., Pitz, M., Cyrys, J., Gustafson, T.L., Pettersson, J.B.C., Schnelle-Kreis, J., Prévôt, A.S.H., Zimmermann, R. (2012) Organic molecular markers and signature from wood combustion particles in winter ambient aerosols: aerosol mass spectrometer (AMS) and high time-resolved GC-MS measurements in Augsburg, Germany, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(14), 6113-6128. <https://doi.org/10.5194/acp-12-6113-2012>
- Giechaskiel, B., Maricq, M., Ntziachristos, L., Dardiotis, C., Wang, X., Axmann, H., Bergmann, A., Schindler, W. (2014) Review of motor vehicle particulate emissions sampling and measurement: from smoke and filter mass to particle number, *Journal of Aerosol Science*, 67, 48-86. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2013.09.003>
- Gil, H.-N., Kim, J.-C. (2021) The effect of Hybrid water pretreatment device on the recovery rate of HCl from its emission sources. Konkuk University.
- Gluck, S., Glenn, C., Logan, T., Vu, B., Walsh, M., Williams, P. (2003) Evaluation of NO_x flue gas analyzers for accuracy and their applicability for low-concentration measure-

- ments, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 53(6), 749-758. <https://doi.org/10.1080/10473289.2003.10466208>
- Jahnke, J.A. (2022) *Continuous emission monitoring* (3rd ed.). John Wiley & Sons. https://books.google.co.kr/books?hl=ko&lr=&id=5AtvEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT216&dq=Continuous+emission+monitoring&ots=0JQpiAl7lk&sig=F9VNO61_Rqlx0iQ1VjNFP1C9Nag#v=onepage&q=Continuous%20emission%20monitoring&f=false
- Jayaratne, R., Liu, X., Thai, P., Dunbabin, M., Morawska, L. (2018) The influence of humidity on the performance of a low-cost air particle mass sensor and the effect of atmospheric fog, *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(8), 4883-4890. <https://doi.org/10.5194/amt-11-4883-2018>
- Keutsch, F.N., Saykally, R.J. (2001) Water clusters: Untangling the mysteries of the liquid, one molecule at a time. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(19), 10533-10540. <https://doi.org/10.1073/pnas.191266498>
- Kim, D.-J. (2019) The effect of water pretreatment device on environmental air pollutants (O₃, SO₂, CO) measurements and analysis. Konkuk University.
- Kim, D.-J., Dinh, T.-V., Lee, J.-Y., Choi, I.-Y., Son, D.-J., Kim, I.-Y., Sunwoo, Y., Kim, J.-C. (2019) Effects of water removal devices on ambient inorganic air pollutant measurements, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(18), 3446. <https://doi.org/10.3390/ijerph16183446>
- Kim, D.-Y., Choi, M.-A., Yoon, B. (2018) Management of emission facilities at workplaces urgently to improve fine dust. <http://www.gri.kr>
- Konkuk University Industry-Academic Cooperation Group. (2020) Development of Air Emission Source Complex Hazardous Substances Measurement and Analysis System.
- Konkuk University Industry-Academic Cooperation Group (2024) Development of technology linked to commercialization of air environment management technology.
- Korea Institute of Industrial Technology, & Korea Environment Corporation (KITECH) (2010) A Study on the Improvement of Accuracy/Precision of Environmental Measuring Instruments.
- Lee, J.-Y., Dinh, T.-V., Kim, D.-J., Choi, I.-Y., Ahn, J.-W., Park, S.-Y., Jung, Y.-J., Kim, J.-C. (2019) Comparison of water pretreatment devices for the measurement of polar odorous compounds, *Applied Sciences*, 9(19), 4045. <https://doi.org/10.3390/app9194045>
- Lee, S.-W., Dinh, T.-V., Park, S.-Y., Choi, I.-Y., Kim, I.-Y., Park, B.-G., Baek, D.-H., Park, J.-H., Seo, Y.-B., Kim, J.-C. (2023) Development of a moisture pretreatment device for the accurate quantitation of water-soluble volatile organic compounds in air, *Chemosensors*, 11(3), 188. <https://doi.org/10.3390/chemosensors11030188>
- Lundgren, D.A., Cooper, D.W. (1969) Effect of humidify on light-scattering methods of measuring particle concentration, *Journal of the Air Pollution Control Association*, 19(4), 243-247. <https://doi.org/10.1080/00022470.1969.10466482>
- McGlenny, W.A., Pleil, J.D., Evans, G.F., Oliver, K.D., Holdren, M.W., Winberry, W.T. (1991) Canister-based method for monitoring toxic vocs in ambient air, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 41(10), 1308-1318. <https://doi.org/10.1080/10473289.1991.10466924>
- Ministry of Environment (MOE) (2021) *Stack Remote Monitoring System Business Manual* (굴뚝원격감시체계 업무편람), Korea Environment Corporation.
- Ministry of Environment (MOE) (2022) *Support Project for the Installation of Prevention Facilities in Small Businesses*.
- Oleszek-Kudlak, S., Shibata, E., Nakamura, T., Li, X., Yu, Y., Dong, X. (2007) Review of the sampling and pretreatment methods for dioxins determination in solids, liquids and gases, *Journal of the Chinese Chemical Society*, 54(2), 245-262. <https://doi.org/10.1002/jccs.200700037>
- Seo, H.-J., Lee, H.-S. (2019) How air pollutants influence on environmental diseases?: Focused on Seoul Metropolitan Area, 9, 39-59.
- Shao, W., Zhang, H., Zhou, H. (2017) Fine particle sensor based on multi-angle light scattering and data fusion, *Sensors*, 17(5), 1033. <https://doi.org/10.3390/s17051033>
- Son, Y.-S., Lee, G., Kim, J.-C., Han, J.-S. (2013) Development of a pretreatment system for the analysis of atmospheric reduced sulfur compounds, *Analytical Chemistry*, 85(21), 10134-10141. <https://doi.org/10.1021/ac401345e>
- Song, G.-Y. (2015) A case study on the interferential factors of non-dispersive infrared for carbon monoxide monitoring. Konkuk university.
- Sun, C.Q. (2015) Mpemba paradox: Hydrogen bond memory and water-skin supersolidity.
- Tyrovolas, I.J. (2017) Explanation for the mpemba effect, *Journal of modern physics*, 8(12), 2013-2020. <https://doi.org/10.3390/jmp81202013>

org/10.4236/jmp.2017.812121

U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (1993) AMMONIA CEMS BACKGROUND. Center for Environmental Research.

U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (1994) An Operator's Guide To Eliminating Bias in CEM Systems.

U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (1997) EPA Continuous Emission Monitoring Systems for Non-criteria Pollutants.

Zieger, P., Fierz-Schmidhauser, R., Weingartner, E., Baltensperger, U. (2013) Effects of relative humidity on aerosol light scattering: results from different European sites, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(21), 10609-10631. <https://doi.org/10.5194/acp-13-10609-2013>

Authors Information

이상우 (건국대학교 사회환경공학부 박사과정)
(lsw0511@naver.com)

최인영 (건국대학교 사회환경공학부 박사)
(force@konkuk.ac.kr)

박병규 (건국대학교 사회환경공학부 박사과정)
(smarteddy@naver.com)

백다현 (건국대학교 사회환경공학부 박사과정)
(ibym100@hanmail.net)

황원준 (건국대학교 사회환경공학부 학사)
(ghkddnjswns5@naver.com)

조병찬 (연구개발팀 부장) (bccho@senko.co.kr)

단브영 (연구개발팀 연구팀장) (dinhtrieuvuong@gmail.com)

김조천 (건국대학교 사회환경공학부 교수)
(jckim@konkuk.ac.kr)