

논문

# 소규모(4·5종)산업체 배출구에서 배출되는 가스화합물 모니터링을 위한 온도 및 습도 전처리 기술과 센서 성능 평가

## Evaluation of Temperature and Humidity Pretreatment Technology and Sensor Performance for Monitoring Gaseous Compounds Emitted from Small-Scale Air Emission Stacks

최인영, 딘브영, 이상우<sup>1)</sup>, 박병규<sup>1)</sup>, 백다현<sup>1)</sup>, 조병찬<sup>2)</sup>, 김조천<sup>1)\*</sup>

건국대학교 국제기후환경연구소센터, <sup>1)</sup>건국대학교 사회환경공학부, <sup>2)</sup>(주)센코

In-young Choi, Treiu-Voung Dinh, Sang-woo Lee<sup>1)</sup>, Byung-kyu Park<sup>1)</sup>,  
Da-hyun Beak<sup>1)</sup>, Byung-chan Jo<sup>2)</sup>, Jo-chun Kim<sup>1)\*</sup>

International Climate & Environmental Research Center, Konkuk University, Seoul,  
Republic of Korea

<sup>1)</sup>Department of Social and Environmental Engineering, Konkuk University, Seoul,  
Republic of Korea

<sup>2)</sup>SENKO Co., Ltd, 445, Osan-si, Republic of Korea

접수일 2024년 11월 18일  
수정일 2024년 12월 4일  
채택일 2024년 12월 16일

Received 18 November 2024  
Revised 4 December 2024  
Accepted 16 December 2024

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

**Abstract** This study investigates the applicability of a sensor-based measurement system for monitoring gaseous pollutants (CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>) in small-scale industrial facilities. To ensure stable sensor operation, a preconditioning system was integrated and its effectiveness evaluated. The study focused on two distinct industries, chemical (plastic) and textile, to reflect diverse emission characteristics. The test-bed conditions were defined based on emission environments. The chemical industry exhibited an average temperature of 27°C and relative humidity of 60%, characterized by higher humidity. In contrast, the textile industry showed a higher temperature of 85°C and a lower relative humidity of 35%. The preconditioning system effectively stabilized sensor-operating conditions, achieving average temperatures of 18.9°C and 23.5°C and average relative humidities of 22.6% and 15.4% for the chemical and textile industries, respectively. This ensured compatibility with sensor operational requirements of -10°C to 40°C and 20~80% relative humidity. Absolute humidity removal efficiencies were 75.1% for chemical emissions and 97.6% for textile emissions, indicating higher efficiency in high-temperature, high-humidity environments. Emission monitoring revealed CO and NO<sub>x</sub> concentrations below 5 ppm for both industries, while SO<sub>2</sub> was undetected. Similar low-level concentrations of gaseous substances were observed with a co-located Tele-Monitoring System (TMS). These results were well below regulatory limits of 200 ppm (CO), 150 ppm (NO<sub>x</sub>), and 200 ppm (SO<sub>2</sub>). Further research is needed to assess the performance of the sensor-based system in environments with higher emission gas concentrations, as the current study focuses on very low concentrations. This is to better understand its effectiveness in more diverse and challenging conditions, especially in scenarios approaching or exceeding regulatory limits.

**Key words:** Tele-monitoring system, Sensor, Pretreatment, Stack emission

### 1. 서론

대기오염이 심화되는 것을 방지하기 위해서는 대기오염물질 배출량에 대한 정확한 측정과 산정이 필

요하다. 이를 위해 대한민국 정부는 1997년부터 1, 2, 3종 사업장의 주요 굴뚝시설에 원격감시체계 (Tele-Monitoring System, TMS) 설치를 의무화하였으며, 대기오염물질에 대한 실시간 배출량 측정을 시행하고

있다(Choi *et al.*, 2022; Lee *et al.*, 2004). TMS는 굴뚝 배출원을 상시 측정하고, 관계센터로 온라인 데이터를 송신하여 배출 상황을 24시간 감시하는 시스템이다(KECO, 2022). 감시 대상 오염물질 항목으로는 일산화탄소(CO), 질소산화물(NO<sub>x</sub>), 황산화물(SO<sub>x</sub>), 염화수소(HCl), 불화수소(HF), 암모니아(NH<sub>3</sub>), 총 먼지(TSP) 등 7개 항목이 있으며, 배출가스의 온도, 유량, 산소(O<sub>2</sub>) 농도 등 3개 보정 항목도 함께 측정한다(Dinh and Kim, 2021). TMS를 부착한 사업장의 모니터링 시스템은 굴뚝에서 배출되는 측정 물질을 상시 확인할 수 있으며, 이를 통해 대기오염물질 배출공정 및 방지시설을 효율적인 관리가 가능하다. 또한, 배출되는 대기오염물질의 실시간 측정으로 대기오염 사고 예방 및 대응이 가능하며, 배출현황의 데이터 수집을 통해 환경정책 수립의 기초자료로도 사용할 수 있는 장점이 있다. 해당 시스템을 통해 강화된 국내 환경정책과 더불어 국내 대기오염물질 배출시설에 방지시설의 확대가 이어지고 있으며, 이에 따라 대기오염물질이 수 ppm 수준으로 배출되고 있다(Kim and Choi, 2021). 하지만 굴뚝원격감시체계와 방지시설은 4, 5종 중소규모 사업장에는 방지시설 가동유무, 분기별 배출농도 측정 등의 제한적인 적용이 이루어지고 있다. 4, 5종 중소규모 사업장의 배출구 규모는 2023년 기준으로 전체 66,190개소 중 61,220개소를 차지하고 있어 이들에 대한 관리의 중요성이 더욱 부각되고 있다(KOSIS, 2024). 사업장의 규모가 작은 중소규모의 사업장에서는 고가의 측정 시스템을 구비하는 데에 어려움이 있으므로, 이를 대신할 수 있는 센서 기반의 측정 시스템이 필요하다. 기존의 배출가스 측정 방법은 높은 정확성을 제공하지만, 고가의 장비와 설치 비용, 복잡한 운영 절차가 필요해 중소규모 산업체에 적용하는 데 어려움이 따른다. 이를 해결하기 위한 대안으로 저렴한 비용과 소형화, 빠른 반응 속도의 장점을 가진 센서 기반 측정 시스템이 주목받고 있다. 센서 기반 측정 시스템은 대기오염 배출물질의 종류별로 각각 측정을 하며, 높은 정확도를 위해 센서 성능에 적합한 환경 조성이 필요

하다. 기존측정방식에도 사용되고 있는 전처리과정은 특히, 온도와 습도에 민감한 센서에는 필수적이다(Lehmkau and Lienig, 2021; Wang *et al.*, 2021; Zhao *et al.*, 2021; Jayaratne *et al.*, 2018). 기존 대규모 배출구의 경우 전처리를 통한 측정 시스템이 구성되어 있지만 소규모(4·5종) 배출구는 기존의 대형 배출구와 달리 측정 시스템 설치 의미가 없어 실시간 측정이 어려운 상황이다. 이에 소규모 배출구에서 실시간 측정을 가능하게 하기 위해, 상대적으로 비용이 저렴한 센서 시스템의 적용 가능성을 평가하고자 한다. 이를 위해 온습도 전처리시스템을 개발하고, 해당 기술의 성능을 검증하고자 한다. 본 연구에서는 소규모 굴뚝에서 배출되는 대기오염물질의 실시간 측정을 위해 개발된 온습도 전처리 기술을 센서 기반 측정 시스템에 적용하고, 이를 굴뚝 TMS와 비교하였다. 이를 통해 센서 기반 측정 시스템이 배출가스 모니터링에 적용될 가능성을 평가하였다.

## 2. 실험 방법

본 실험은 실제 소규모 현장의 굴뚝에서 Test-bed를 설치하여 수행하였으며, TMS와 동일한 시스템을 구축하여 센서 기반 측정 시스템과 비교 실험을 진행하였다. 센서 기반 측정 시스템에는 소규모 굴뚝에 적합한 전처리 장치를 사용하여, 배출가스의 온도와 습도를 센서 성능에 최적화된 환경 범위로 조성하였다. 측정은 굴뚝과 센서 챔버의 온도 및 습도를 비교하여 전처리장치의 성능을 확인하였고, 주요 대기오염배출물질인 CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>에 대해 TMS와 센서 기반 측정 시스템의 결과를 비교하였다. 측정 데이터는 5분 평균으로 기록하였으며, 약 20일간의 실험 결과를 비교하였다.

### 2.1 전처리시스템

본 연구에서 사용된 전처리시스템은 소규모 굴뚝의 배출가스 온도와 습도를 조절하여 센서 기반 측정

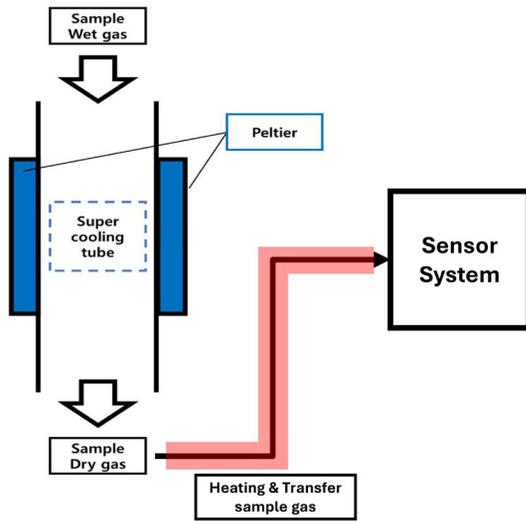


Fig. 1. Diagram of the pretreatment system configuration.

시스템이 안정적으로 작동할 수 있도록 설계되었다. 전처리시스템의 구성은 그림 1과 같으며, 샘플링 된 배출가스를 센서 기반 측정 시스템에 적합한 온도와 습도로 조절하는 역할을 한다.

전처리시스템은 펠티어를 이용한 가스 냉각 부분을 통해 고온의 배출가스를 빠르게 냉각하여 수분을 제거하며, 이후 가열 도관을 통해 센서 시스템으로 가스를 전달하여 적정 온도를 유지한다. 이 시스템의 전처리장치는 시료 가스의 수분을 선택적으로 제거할 수 있도록 국내에서 개발한 것으로, 시료 가스를 신속하게 냉각하여 제거하면서 분석 대상 물질은 그대로 통과시키는 특성을 가지고 있다 (Kim *et al.*, 2019; Son *et al.*, 2013).

이 원리를 바탕으로 전처리시스템을 개발하였으며, 이는 수분을 고체 상태로 응결시키는 방식을 적용하여 수분 제거율을 높이고, 수용성이 큰 가스상 물질의 손실률을 개선하였다. 해당 장치를 사용한 선행연구로 일반적으로 사용되는 쿨러와의 성능을 비교하였으며, 전처리시스템과 쿨러의 수분 제거율은 각각 90%, 60% 수준이었다. 일산화탄소(CO)에 대한 회수율은 98.0%, 93.6%로 전처리시스템의 회수율이 약간 높았으며, 상대적으로 수분 용해도가 높은 이산

화황(SO<sub>2</sub>)의 회수율은 전처리시스템의 경우에 98% 수준, 쿨러의 회수율은 38% 수준으로 나타났다(Kim *et al.*, 2019). 수분용해도가 더 높은 염화수소(HCl)에 대한 회수율 또한 각각 95%, 15%로 나타났다(Gil *et al.*, 2022).

따라서, 응결 방식의 전처리시스템이 수분용해도가 높은 물질을 측정 시 분석 물질에 영향을 좀 더 적게 주고 수분만 선택적으로 제거함을 확인하였다(Lee *et al.*, 2023; Dinh *et al.*, 2022; Kim *et al.*, 2019; Lee *et al.*, 2019).

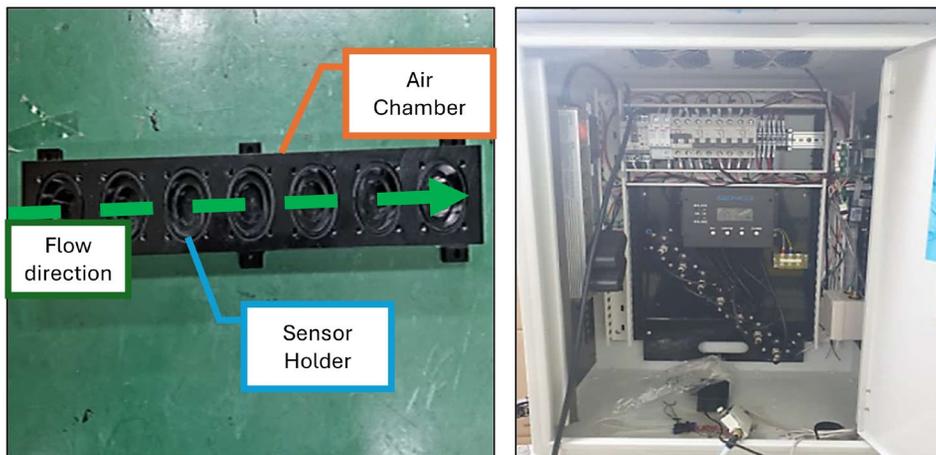
## 2.2 측정 시스템

측정 시스템은 각 센서에 흡착 및 간섭성을 저하시키기 위해 설계·제작된 챔버를 적용하여 구성하였다. 이 과정에서 가스 농도를 측정하기 위해 센서를 고정하고 가스에 노출시키는 센서 배열(Array)이 필요하며, 센서 배열의 구조는 크게 센서를 고정하는 '센서 고정부'와 이 고정부를 통해 가스를 통과시켜 센서 반응을 유도하는 '에어 챔버' 두 부분으로 나누어진다. 모듈형 센서 배열은 각각의 센서에 독립된 에어 챔버와 센서 고정부로 구성된 모듈을 사용하는 형태이다. 측정부의 온도가 크게 변할 경우 센서의 감도가 변할 수 있다(Yi, 2017). 이에 에어 챔버의 구조는 직선형에서 수직형으로 변경되어 챔버 내 공기 흐름을 강제적으로 발생시킴으로써, 센서의 반응을 극대화하는 장점이 있다. 또한, 센서별로 독립된 에어 챔버가 있어, 챔버 내 오염 발생 시 다른 센서에 미치는 영향을 최소화할 수 있다.

본 실험에서 사용된 시스템에는 총 8종의 센서를 사용할 수 있는 시스템 중 표 1에 작성된 5종의 센서를 사용한 통합시스템을 구성하였다. 그림 2의 에어 챔버에 5종의 센서를 설치하였으며, 에어챔버는 열악한 환경에서도 안정적으로 운영될 수 있는 부식에 강한 SUS 소재를 사용하고 방수 기능을 적용하였으며, 동작 온도는 -10°C에서 40°C 범위에 맞추어 설계하였다. 또한, 전체 시스템을 모듈화하여 현장에서도 측정값을 확인할 수 있도록 제어시스템을 구성하였다(그림 2).

**Table 1.** Air pollutant measurement sensor information and emission limit standards.

No.	Target gas	Emission limit concentration (ppm)	Sensor specifications
1	CO	200	Model: SS2128, Senko, Korea Measurement Range: 0~500 ppm Resolution: 1 ppm
2	NO	150	Model: SS2138, Senko, Korea Measurement Range: 0~1000 ppm Resolution: 1 ppm
3	NO <sub>2</sub>	150	Model: SS2148, Senko, Korea Measurement Range: 0~500 ppm Resolution: 0.1 ppm
4	SO <sub>2</sub>	200	Model: SS2158, Senko, Korea Measurement Range: 0~500 ppm Resolution: 1 ppm
5	Temp, RH	-	Model: SHT31, Sensirion, Switzerland Measurement Range: -40~125°C/0~100%RH Resolution: 0.2°C/2%RH

**Fig. 2.** Photo of Modular Sensor Array Configuration and Multi-Material Sensor Measuring Device (Left: Air Chamber for Sensor Array, Right: Sensor Measuring Device).

### 2.3 Test-bed 선정

대기오염 배출 사업장은 다양한 업종으로 구성되어 있으며, 각 업종은 고유한 생산 공정과 환경적 특성에 따라 배출물질의 종류와 농도가 다르다. 예를 들어, 섬유 및 플라스틱 산업은 주로 휘발성 유기화합물(VOCs), 미세먼지, 그리고 특정 대기오염물질을 배출하며, 이에 대한 적절한 관리와 측정이 필요하다. 이를 위해 업종별 특성에 맞춘 측정 시스템과 전처리

장치가 요구되며, 이를 통해 정확한 환경 데이터를 확보하고 환경 규제를 준수하는 것이 중요하다. 본 연구는 경기도 내 산업지구에서 섬유 및 화학(플라스틱)업종의 4·5종 규모 소규모 사업장을 Test-bed 대상으로 선정하여 실험을 진행하였다. 섬유업종 사업장과 화학업종 사업장 모두 실험에 포함되었으며, 실험에 앞서 각 업종의 현장 배출 특성을 조사하였다. 화학업종의 경우, 배출가스의 온도와 습도가 각각

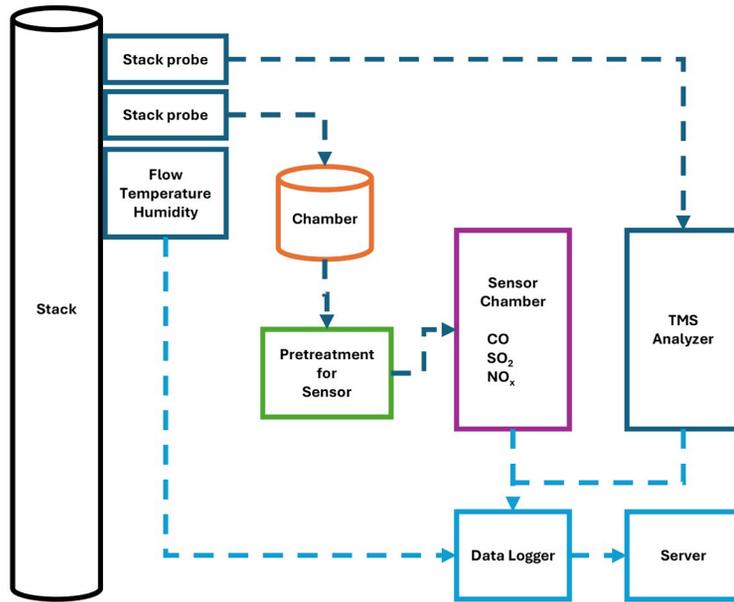


Fig. 3. Experimental schematic of the Test-bed site.

27°C와 60%로 측정되어 높은 습도가 특징적이었다. 반면, 섬유업종은 배출 온도와 습도가 각각 85°C와 35%로 측정되었으며, 높은 배출 온도가 특징적이었다. 이렇게 업종별 배출 특성에 영향을 줄 수 있는 습도와 온도 조건이 다른 환경에서 Test-bed 실험이 진행되었다.

### 2. 4 Test-bed 실험 구성

다음 그림 3은 전처리 장치가 설치된 Test-bed의 전체 시스템 구성도를 나타낸다. 전처리 장치를 통과하여 수분이 제거된 가스는 센서 챔버로 흐르게 되고, 센서에서 오염물질을 측정하여 데이터 수집이 시작된다. 본 연구에서는 전처리 장치의 성능을 파악하기 위해 전처리 장치 전단과 후단에 설치된 온습도 측정 센서를 통해 수분 제거율과 전처리 장치 통과 후 수분 안정도, 온도를 현장에서 실증 연구하였다. 연구기간은 2023년 6월부터 2023년 11월까지 2개의 Test-bed를 운영하였으며, 각각의 Test-bed 운영 기간은 사업장의 상황에 맞추어 진행하였다. 이때 온습도

측정 센서를 통해 온습도를 굴뚝에서 유입되는 지점과 전처리장치에서 배출되는 지점을 5분 평균으로 측정하였다.

측정된 데이터를 통해 본 연구에 사용된 전처리 장치의 성능을 평가하고 실증 결과를 확인하기 위해, 측정된 데이터 이외에 TMS와 센서 기반 측정 시스템의 대기오염물질 농도 데이터를 이용하여 성능평가를 실시하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3. 1 온습도 비교

대상 사업장의 굴뚝에서 온습도를 측정한 결과는 그림 4에 제시되어 있다. 화학업종의 굴뚝은 평균 온도 28.2°C, 평균 습도 53.6%로 나타났으며, 이들의 상대 표준 편차(Relative Standard Deviation, RSD)는 각각 21.6%, 25.9%로 확인되었다. 섬유업종의 굴뚝은 평균 온도 85.5°C, 평균 습도 37.7%로, RSD는 각각

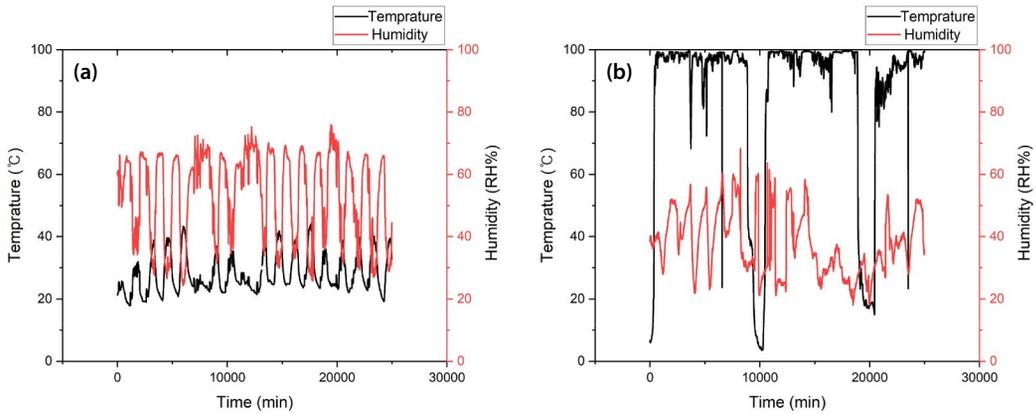


Fig. 4. Temperature and humidity measurement results of the stack during the experimental period: (a) Chemical, (b) Textile.

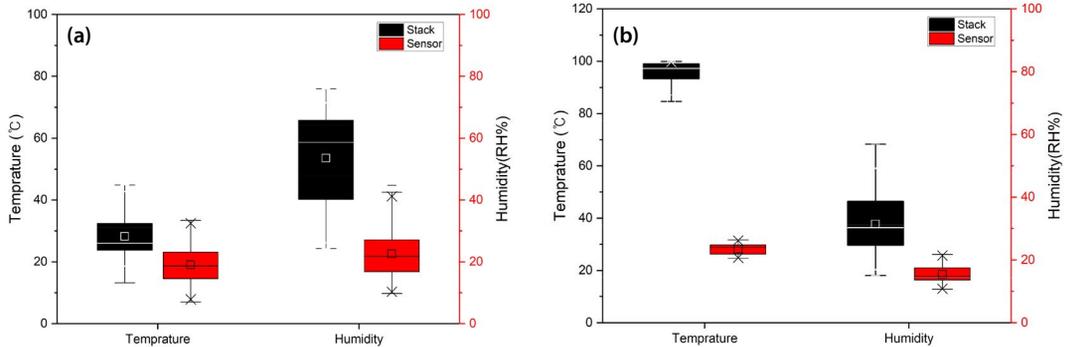


Fig. 5. Temperature and humidity measurements after passing through the pretreatment system for each stack: (a) Chemical, (b) Textile.

32.2%, 27.0%로 나타났다. 섬유업종에서 온도 변화가 크게 나타났고 화학업종의 굴뚝은 비교적 낮은 온도 범위인 10~45°C에서 유지되었지만, 섬유업종은 굴뚝의 온도 범위가 거의 3~100°C에 달하는 차이를 보였다. 상대습도의 특수성으로 인해 화학업종의 상대 습도가 더 높게 측정되었지만, 섬유업종의 경우 온도가 높아 포함된 수분량이 더 많은 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 측정을 통해 화학 및 섬유업종 굴뚝들의 온습도 특성을 파악할 수 있었다.

그림 5는 전처리 장치를 사용하여 화학 및 섬유업종의 굴뚝 시료 가스를 전처리한 결과를 보여준다. 전처리는 냉각방식을 주로 사용하였기 때문에 고온

으로 유입된 샘플 가스의 온도가 낮아졌으며, 너무 낮은 온도로 낮아질 위험이 있으므로, 가열 도관을 사용하여 센서에 적합한 온도로 조절하였다. 그 결과, 전처리 후 화학업종과 섬유업종의 온도는 평균 18.9°C와 23.5°C로 측정되어, 센서 운용 온도 범위인 -10~40°C에 적합하게 조절되었다.

습도의 경우는 평균 22.6%와 15.4%로 센서 운용 습도 범위인 20~80RH%에 적합하였다. 추가로 본 실험에서 사용된 센서에 권장되는 조건(온도 25°C 이하, 습도 50% 이하)에 맞는 결과로, 센서측정에 적합한 전처리가 진행되었음을 확인하였다. 상대습도를 기준으로 했을 때 화학 및 섬유업종에서 각각 57.8%

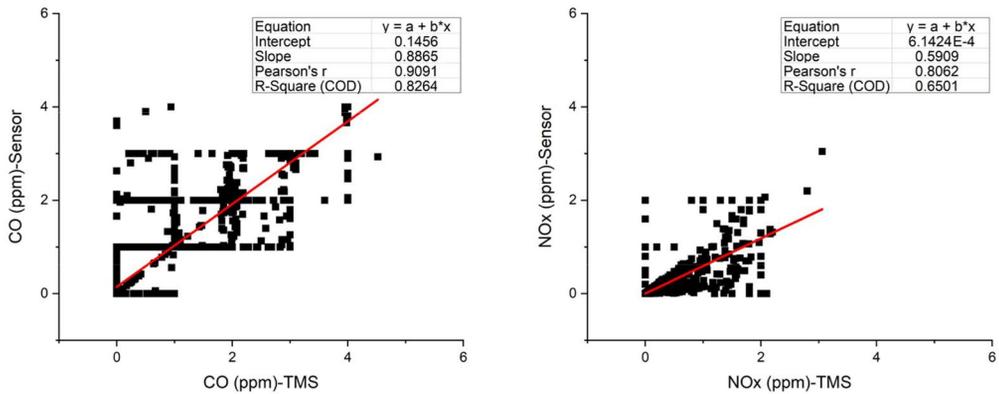


Fig. 6. Comparison of gaseous pollutants (CO, NO<sub>x</sub>) measurement results in Chemical Stack (TMS vs. Sensor).

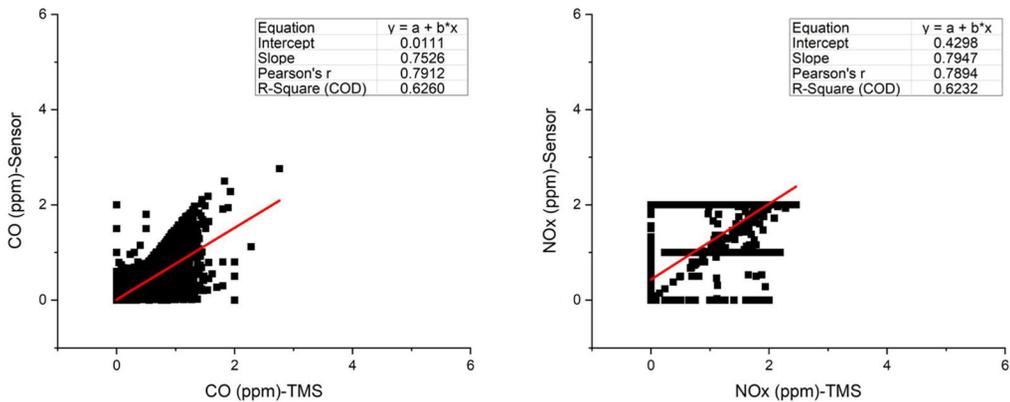


Fig. 7. Comparison of gaseous pollutants (CO, NO<sub>x</sub>) measurement results in Textile Stack (TMS vs. Sensor).

와 59.2%의 습도 제거 효율을 나타냈다. 상대습도 변동 폭은 화학업종이 섬유업종에 비해 상대적으로 28.3% 더 크게 측정되었으며, 전처리 후 습도 변동 결과에서도 유사한 패턴이 확인되었다. 온도에 따른 상대습도 변화는 크기 때문에 절대 습도로 환산하여 계산한 결과, 화학업종의 경우 초기 14.73 g-H<sub>2</sub>O/m<sup>3</sup>에서 3.67 g-H<sub>2</sub>O/m<sup>3</sup>로 감소하여 약 75.1%의 제거 효율을 나타냈고, 섬유업종의 경우 초기 134.6 g-H<sub>2</sub>O/m<sup>3</sup>에서 3.26 g-H<sub>2</sub>O/m<sup>3</sup>로 감소하여 약 97.6%의 제거 효율을 기록했다. 이를 통해 고온 고습의 유입 가스에서 더욱 높은 습도 제거 효과가 있음을 알 수 있었다.

### 3.2 가스농도 비교

가스상 오염물질인 CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>를 측정된 결과, 각 오염물질의 배출농도는 5 ppm 이하로 측정되었고, 특히 SO<sub>2</sub>는 전혀 검출되지 않았다. 그림 6, 7의 측정 결과는 센서 및 TMS의 분석 해상도에 기인한 것으로 보이며, 측정값이 평탄한 패턴을 보이게 된 원인으로 추정된다. 화학업종에서 배출된 CO와 NO<sub>x</sub> 농도의 센서 기반 측정값과 TMS 측정값에 대한 피어슨 상관분석(Pearson correlation analysis)을 통해 구한 상관계수는 각각 약 0.91과 0.81로, 두 측정값 간에 매우 강한 선형 관계가 있음을 알 수 있었다. 섬유업종의 경우에도 그 각각의 상관계수가 약 0.79와 0.79

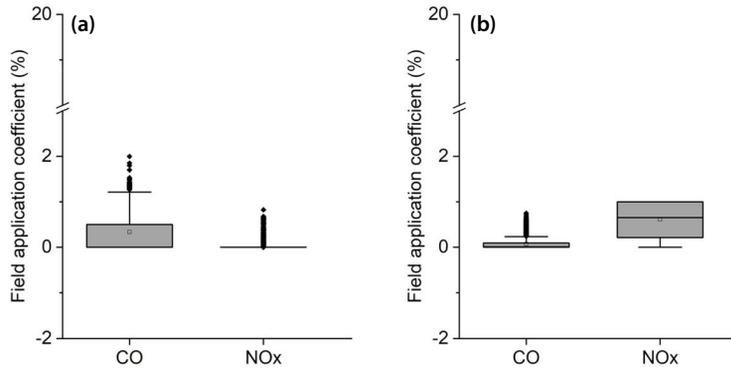


Fig. 8. Field application coefficients for gaseous pollutants (CO, NO<sub>x</sub>): (a) Chemical, (b) Textile.

로 CO와 NO<sub>x</sub> 배출농도에 대한 센서 기반 측정값과 TMS 측정값이 강한 선형 관계에 있음을 알 수 있었다. 화학업종의 CO와 NO<sub>x</sub>의 경우 Paired t-test를 통해 두 장비의 측정값을 비교한 결과, 평균 차이는 0.03 ppm, 0.02 ppm이었으며, p-value는  $1.88 \times 10^{-7}$ ,  $4.08 \times 10^{-27}$ 으로 나타났다. 이는 두 장비의 측정값이 통계적으로 유의미하게 차이가 있음을 의미하며, 센서장비의 측정값이 TMS 측정값에 비해 CO는 평균적으로 더 높게( $t=5.22$ ,  $df=4997$ ) NO<sub>x</sub>는 더 낮은 결과를 보였다( $t=-10.85$ ,  $df=4997$ ). 이어서 섬유업종의 CO와 NO<sub>x</sub>의 경우 Paired t-test를 통해 두 장비의 측정값을 비교한 결과, 평균 차이는 0.07 ppm, 0.18 ppm이었으며, p-value는  $2.12 \times 10^{-79}$ 으로 나타났다. 이는 두 장비의 측정값이 통계적으로 유의미한 차이가 있음을 의미한다. 구체적으로 센서장비의 평균 측정값이 TMS 비해서 CO의 경우는 더 낮게( $t=-19.21$ ,  $df=4999$ ), NO<sub>x</sub>의 경우는 더 높게( $t=25.42$ ,  $df=4994$ ) 측정된 것으로 나타났다.

전처리를 진행한 센서기반 측정 시스템의 결과를 비교하기 위해 현장적용계수를 사용하였다. 현장적용계수는 시험실에서 자동측정기의 성능시험 및 정도검사가 이루어질 수 없는 상황에서 적용되는 기준으로, 해당 기준을 통과하면 환경측정기기의 정도검사 기준을 충족한 것으로 간주된다. 국립환경과학원에서 제시한 환경측정기기 정도검사 시험방법에 따

라 배출허용기준에 맞추어 현장적용계수를 다음 식 (1)과 같이 적용하였다(NIER, 2023).

$$\text{현장적용계수 (\%)} = \frac{|\bar{D}|}{\text{배출허용기준}} \times 100 \quad (1)$$

D: 시험측정기-기기분석법

여기서 사용된 해당 사업체의 배출 기준은 CO 200 ppm, NO<sub>x</sub> 150 ppm, SO<sub>2</sub> 200 ppm으로 실제로 측정된 농도는 기준치에 비해 매우 낮은 수준이었다. 현장적용계수의 검사기준은 20% 이하로 화학업종의 굴뚝에서 CO와 NO<sub>x</sub>의 현장적용계수는 각각 0.34%와 0.01%로 나타났으며, 섬유업종의 굴뚝에서는 CO와 NO<sub>x</sub>의 현장적용계수가 각각 0.07%와 0.61%로 확인되었다(그림 8).

실험결과 센서 기반 측정 시스템은 화학 및 섬유업종의 소규모 사업장에서 가스상 오염물질의 배출 농도를 효율적으로 모니터링할 수 있는 가능성을 보여준다. 전처리시스템을 통해 센서의 온도 및 습도 범위를 안정적으로 유지할 수 있었던 것은 긍정적인 결과이다. 특히, TMS 시스템에 비해 상대적인 비용 절감 효과가 있다는 점에서 소규모 사업체가 환경 규제를 준수하는 데 실질적인 도움을 줄 가능성이 있다. 그러나 측정된 오염물질의 농도와 배출량이 낮게 나타났다라는 점을 고려하면, 소규모 사업장에서의 오염물질 관리 방안과 실제 규제 기준의 조정 방안이 필

요하다. 현장적용계수 결과를 보면 배출농도가 배출 기준에 비해 매우 낮은 농도에서도 의미 있는 데이터로 해석될 수 있는지 논의가 필요하다. 이어 배출량은 낮지만 지역사회에 미치는 환경적, 건강적 영향을 고려하여 특정 물질에 대한 신규 규제가 필요할 수도 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 소규모 사업장에서 발생하는 가스상 오염물질(CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>)을 모니터링하기 위해 센서기반의 측정 시스템을 적용하고 전처리시스템의 효과를 평가했다. 화학 및 섬유업종을 대상으로 한 실험결과 전처리시스템을 통해 센서가 안정적인 온도와 습도 환경에서 작동할 수 있음을 확인했으며, 이를 통해 소규모 사업장에서도 기존 TMS대비 경제적인 환경 모니터링이 가능함을 확인했다. 측정 결과, 두 업종 모두 배출되는 가스의 농도가 환경 기준치보다 낮았으며, 특히 SO<sub>2</sub>는 검출되지 않았다.

섬유업종은 화학업종에 비해 주기적인 배출 특성을 보였으며, 이는 소규모 사업장 특유의 간헐적인 운영 방식과 연관이 있을 가능성이 높다. 따라서 업종별 특성에 맞는 맞춤형 측정 시스템 설계와 소규모 사업장의 배출 특성에 대한 추가 연구가 필요하다. 다만 본 연구에 선정된 사업장에서 배출된 가스상 물질의 농도는 허용기준에 비해 현저히 낮았다. 이러한 조건에서는 센서시스템의 대체 가능성을 충분히 확인하기에는 어려웠으나, 농도 변화 추이를 파악하거나 이상 배출 상황을 감지하는 데는 충분히 활용 가능할 것으로 보인다.

또한, 소규모 사업장은 개소가 많아 낮은 농도임에도 불구하고 다수 사업장에서 발생하는 배출 물질의 총합이 환경에 미치는 영향을 주의 깊게 관리할 필요성이 있다. 향후, 소규모 사업장에 적합한 규제 기준과 맞춤형 모니터링 시스템이 마련된다면 보다 효과적인 환경 관리가 가능할 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 대기환경 관리기술 사업화 연계 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(1485019428).

#### References

- Choi, I.-Y., Dinh, T.-V., Kim, D.-E., Jun, B.-H., Lee, S.-A., Park, M.-Y., Kim, J.-C. (2022) The Effect of a Hybrid Pretreatment Device for CEMS on the Simultaneous Removal of PM<sub>2.5</sub> and Water Vapor, *Atmosphere*, 13, 1601. <https://doi.org/10.3390/atmos13101601>
- Dinh, T.-V., Kim, D.-J., Lee, J.-Y., Park, B.-G., Choi, I.-Y., Kim, I.-Y., Kim, J.-C. (2022) Development of a humidity pretreatment method for the measurement of ozone in ambient air, *Journal of Hazardous Materials*, 426, 128108. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.128108>
- Dinh, T.-V., Kim, J.-C. (2021) Moisture removal techniques for a continuous emission monitoring system: A review, *Atmosphere*, 12, 61. <https://doi.org/10.3390/atmos12010061>
- Gil, H.-N., Dinh, T.-V., Lee, J.-H., Park, B.-G., Choi, I.-Y., Lee, S.-W., Kim, I.-Y., Kim, J.-C. (2022) Effects of Humidity Pretreatment Devices on the Loss of HCl Gas Emitted from Industrial Stacks, *Atmosphere*, 13, 33. <https://doi.org/10.3390/atmos13010033>
- Jayarathne, 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, 4883-4890. <https://doi.org/10.5194/amt-11-4883-2018>
- Kim, D.-Y., Choi, M.-A. (2021) Evaluation and Improvement of Subsidy Program for Air Pollutant Emission Facility in Gyeonggi-Do, *Gyeonggi Research Institute (GRI)*, 9-34.
- 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, 3446. <https://doi.org/10.3390/ijerph16183446>
- Korea Environment Corporation (KECO) (2022) Stack Tele Moni-

- toring System Work Manual (Government Publications Registration Number: 11-1480000-001355-14), Ministry of Environment (MOE), Korea, 3-16.
- Korean Statistical Information Service (KOSIS) (2024) Status of emissions from air pollutant emission facilities and stack TMS installation sites, Ministry of Environment (MOE), Korea, [https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=106&tblId=DT\\_106N\\_03\\_0200077&vw\\_cd=MT\\_ZTITLE&list\\_id=T\\_8&seqNo=&lang\\_mode=ko&language=kor&obj\\_var\\_id=&itm\\_id=&conn\\_path=MT\\_ZTITLE](https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=106&tblId=DT_106N_03_0200077&vw_cd=MT_ZTITLE&list_id=T_8&seqNo=&lang_mode=ko&language=kor&obj_var_id=&itm_id=&conn_path=MT_ZTITLE) (accessed on Dec. 3, 2024).
- Lee, S.-W., Dinh, T.-V., Park, S.-Y., Choi, I.-Y., Kim, I.-Y., Park, B.-G., Beak, 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>
- Lee, J.-Y., Dinh, T.-V., Kim, D.-J., Choi, I.-Y., Anh, 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, H.-G., Kim, H.-R., Kim, H.-R., Lee, K.-W., Lee, K.-H. (2004) Status of Pollutants Through Smoke Stack Tele-Monitoring System, *Proceeding of the 38<sup>th</sup> Meeting of Korean Society for Atmospheric Environment, Korean Society for Atmospheric Environment (KOSAE)*, 89-90, (in Korean with English abstract). [https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NO\\_DE00567288](https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NO_DE00567288)
- Lehmkau, R., Lienig, J. (2021) A Novel Approach to Model the Thermal-electrical Behavior of Pyroelectric Infrared Sensors, *Sensor and Measurement Science International (SMSI) 2021 Conference*, <https://doi.org/10.5162/SMSI2021/C1.3>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2023) Notification on type approval, accuracy inspection, etc. of environmental measuring equipment (National Institute of Environmental Research Notice No. 2023-70), Ministry of Environment (MOE), Korea.
- Son, Y.-S., Lee, G.-W., Kim, H.-C., Han, J.-S. (2013) Development of a pretreatment system for the analysis of atmospheric reduced sulfur compounds, *Analytical Chemistry*, 85, 10134-10141. <http://doi.org/10.1021/ac401345e>
- Wang, G., Qian, C., Yang, G., Nan, L., Yu, H. (2021) Verification of PEMS measurement accuracy based on light vehicle emission test system, *E3S Web of Conferences*, 268, 01003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126801003>
- Yi, S.-H. (2017) Temperature Compensation Methods of Nondispersive Infrared CO<sub>2</sub> Gas Sensor with Dual Ellipsoidal Optical Waveguide, *Sensors and Materials*, 29(3), 243-252. <https://doi.org/10.18494/SAM.2017.1439>
- Zhao, J., Zhu, R., Chen, J., Zhang, M., Feng, P., Jiao, J., Wang, X., Luo, H. (2021) Enhanced temperature stability of compensated pyroelectric infrared detector based on Mn:PMN-PT single crystals, *Sensor and Actuators A*, 327, 112757. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112757>

## Authors Information

- 최인영 (건국대학교 국제기후환경연구소 연구원)  
([ichoi@hsph.harvard.edu](mailto:ichoi@hsph.harvard.edu))
- 딘브영 (건국대학교 국제기후환경연구소 연구원)  
([dinhtrieuvuong@gmail.com](mailto:dinhtrieuvuong@gmail.com))
- 이상우 (건국대학교 사회환경공학부 박사과정)  
([lsw0511@naver.com](mailto:lsw0511@naver.com))
- 박병규 (건국대학교 사회환경공학부 박사과정)  
([smarteddy@naver.com](mailto:smarteddy@naver.com))
- 백다현 (건국대학교 사회환경공학부 박사과정)  
([ibym100@hanmail.net](mailto:ibym100@hanmail.net))
- 조병찬 (췌센코 부장) ([bccho@senko.co.kr](mailto:bccho@senko.co.kr))
- 김조천 (건국대학교 사회환경공학부 교수)  
([jckim@konkuk.ac.kr](mailto:jckim@konkuk.ac.kr))