Journal of Environmental Science International
35(10); 891~901; October 2026
pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
https://doi.org/10.5322/JESI.2026.35.10.891

ORIGINAL ARTICLE

배출가스 중 먼지 농도 측정방법의 문제점 및 개선방안

송근우 · 박정호*
경상국립대학교 환경공학과

A Study on the Challenges and Improvement in Methods for Measuring Dust Concentrations in Stack Emissions

Geun-Woo Song, Jeong-Ho Park*
Department of Environmental Engineering, Gyeongsang National University, Jinju 52725, Korea

Abstract

This study compared the dust concentration measurement methods specified in Korean ES 01301.1, U.S. EPA Method 5, and Japanese JIS Z 8808, focusing on the effects of reference temperature and moisture measurement on isokinetic sampling and calculated dust concentrations. All three methods employ isokinetic sampling and gravimetric analysis; however, ES and JIS use a reference temperature of 0˚C, whereas EPA Method 5 uses 20˚C. Furthermore, several equations required for isokinetic sampling are not explicitly defined in ES, resulting in the use of EPA-based foemulations in field measurements. Analysis of 100 stack gas measurements with an isokinetic ratio (I factor) of 100 ± 1% revealed a liner relationship between orifice differential pressure (ΔH) and sampling flow rate (Flow = 0.275 × ΔH + 8.361). The resulting calculation constants differed by approximately 7.3% at 20˚C and 0˚C. Consequently, final dust concentrations calculated under different reference temperature and moisture content conditions ranged from 35.9 to 38.7 mg/m³. These results indicate that standardization of isokinetic sampling equations, appropriate correction for reference temperature differences, and improved moisture measurement representativeness are necessary to enhance the accuracy and reliability of stack emission dust measurements.

key words : Dust in stack emissions, Isokinetic sampling, Moisture content, Reference temperature, ES 01301.1, EPA Method 5, JIS Z 8808

1. 서 론

우리나라는 1963년 공해방지법 제정에서 현행 대기환경보전법에 이르기까지 60여 년 동안 대기질 개선을 위해 법·제도를 발전시켜 왔다. 특히 미세먼지 문제가 국내외 환경문제로 대두되면서, 사업장에서 배출되는 먼지의 저감과 함께 측정자료의 정확성 및 신뢰성이 중요한 정책 과제로 부각된다. 배출가스 중 먼지 농도는 배출허용기준의 준수뿐만 아니라 배출부과금 산정, 지도·점검 및 행정처분의 근거로 활용되므로, 측정 결과의 정확성이 중요하다(Kim, 2013; Jo et al., 2019).

국내 배출가스 측정은 1972년 공해배출허용기준 공정시험법의 제정을 시작으로, 1975년 공해공정시험법에서 대기편과 수질편으로 체계화되었다. 당시의 시험방법은 미국과 일본의 시험기준을 번역·도입한 수준이었으나, 1981년 대기오염공정시험법이 제정되면서 배

Received 18 August, 2026; **Revised** 11 September, 2026;
Accepted 17 September, 2026
***Corresponding author** : Jeong-Ho Park, Department of Environmental Engineering, Gyeongsang National University, Jinju 52725, Korea
Phone : +82-55-772-3345
E-mail : pjh3345@gnu.ac.kr
© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
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.

본 논문은 2026년 경상국립대학교 석사학위논문을 바탕으로 작성되었음.

출가스 측정방법이 표준화되어 배출허용기준 적용과 행정처분의 기술적 기반이 마련되었다. 이후 1991년 대기오염공정시험방법으로 개정되면서 등속흡인의 개념이 도입되어 먼지 측정기술이 고도화되었으며, 2007년에는 총 129개 항목의 대기오염공정시험기준으로 전면 개편되었다. 이후 지속적인 개정을 거쳐 현재의 ES 01301 계열 시험기준으로 정비되었으며, 2017년부터는 국립환경과학원 고시로 운영되면서 최신 기술과 국제 시험기준을 반영하도록 개선되고 있다(Kim, 2006; Kim and Bae, 2013).

국내 굴뚝 배출가스 중 먼지 측정방법은 제정 당시 미국 EPA Method 5와 일본 JIS Z 8808을 기반으로 도입되었다. 그러나 국내 시험기준은 서로 다른 국가의 시험방법을 조합하는 과정에서 측정절차와 계산방법이 혼재되어 적용되었으며, 이로 인해 일부 시험항목에서는 기준 간 정합성이 충분하지 않다는 지적이 제기되어져 왔다. 특히 등속흡인 조건 산정에 적용되는 기준온도와 계산식, 수분량 측정방법 및 시료채취 절차는 국내 기준과 해외 기준 간 차이가 존재하며, 이러한 차이는 최종 먼지 농도 산정 결과에도 영향을 미칠 가능성이 있다(Song and Cha, 2011).

선행연구에서 국내 공정시험기준과 ISO 23210와의 굴뚝 미세먼지 측정방법의 비교 연구(Youn et al., 2017; NIER, 2012)를 비롯하여 배출가스의 유량, 유속 및 먼지 농도에 대한 정확성 높은 측정자료는 대기배출시설 관리와 환경정책 수립에 활용되므로 측정방법의 표준화와 신뢰성 확보가 필수적이라고 한다(Jo et al., 2019). 그러나 국내 공정시험기준과 EPA Method 5 및 JIS Z 8808의 시험체계를 비교하고 기준 온도, 등속흡인 조건 및 수분량 측정방법의 차이가 최종 먼지 농도 산정에 미치는 영향을 체계적으로 분석한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 현재 국내 ES 01301.1은 등속흡인에 의한 먼지 측정을 기본 원리로 유지하고 있으나, 실제 현장에서는 EPA Method 5의 계산식과 장비를 함께 사용하는 사례가 많다. 그러나 국내 기준은 표준상태를 0℃로 규정하는 반면, EPA Method 5는 20℃를 기준으로 하고 있어 기준온도의 차이에 따른 유량 산정, 오리피스 차압 및 등속흡인 조건의 차이가 발생할 수 있다. 수분량 측정방법과 계산 절차의 차이 역시 먼지 농도 산정 결과에 영향을 미칠 가능성이 있으나, 이에 대한 검토는 충분히 이루어지지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 대기오염공정시험기준 ES 01301.1, EPA Method 5 및 JIS Z 8808의 굴뚝 배출가스 중 먼지 측정방법을 비교·분석하였다. 특히 기준온도의 차이에 따른 등속흡인 조건 산정 특성, 수분량 측정방법의 차이 및 이들이 최종 먼지 농도 산정 결과에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다(Song, 2026). 이에 국내 배출가스 먼지 측정방법의 기술적 개선 방향을 제시하고, 향후 대기오염공정시험기준의 합리성과 측정자료의 신뢰성 향상을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 먼지의 배출허용기준 농도의 변천

Fig. 1에는 대기환경 관리체계의 변화를 파악하기 위하여, 공해방지법(1963)→환경보전법(1977)→대기환경보전법(1990)에 이르는 환경 관련 법령의 변화와 공해공정시험법(1975)→환경오염공정시험법(1981)→대기오염공정시험방법(1991)으로 이어지는 배출가스 먼지 측정법의 준용 그리고 배출허용기준 농도의 변천 과정을 나타내었다(KETRI, 1996; Kim, 2006; Kim, 2013; Kim et al., 2023; NLIS, 2026).

우리나라 최초의 환경 관련 법령인 공해방지법(1963)은 공해로부터 국민 보건을 보호하기 위한 목적으로 제정되었으며, 1964년 공해방지법시행령에서는 공해안전기준을 설정하고 분진(粉塵)의 함유물질인 시안化物(CN으로서) 5 mg/m^{3}의 기준을 정하였다. 그러나 당시의 기준은 배출시설의 종류나 규모는 고려하지 않고 일률적으로 적용되어 실질적인 배출저감을 기대하기는 어려웠다. 이후, 1971년 공해방지법시행규칙의 배출허용기준에서는 공장 및 사업장의 연돌 및 배출구에 대해 먼지 배출허용농도를 2 g/m^{3}로 설정하였고 1974년에는 이를 1 g/m^{3}로 강화하였다. 당시에는 시료채취 및 측정방법에 대한 국내 표준시험법이 정립되지 않아 미국과 일본의 시험방법을 준용하다가, 1975년 공해공정시험법을 제정하고 우리나라 환경시험기준의 출발점이 되었다.

1977년 공해방지법이 폐지되고, 보건위생상의 위해를 방지하고 환경을 적정하게 보전함으로써 국민 보건 향상에 기여하기 위하여 환경보전법이 제정되었으나, 대기환경보전법과 ·수질환경보전법으로 분화되기 이전의 과도기적 법령에 해당한다. 1978년 배출허용기준은 국내 시험방법을 전제로 한 규제 및 배출원 관리 중심의

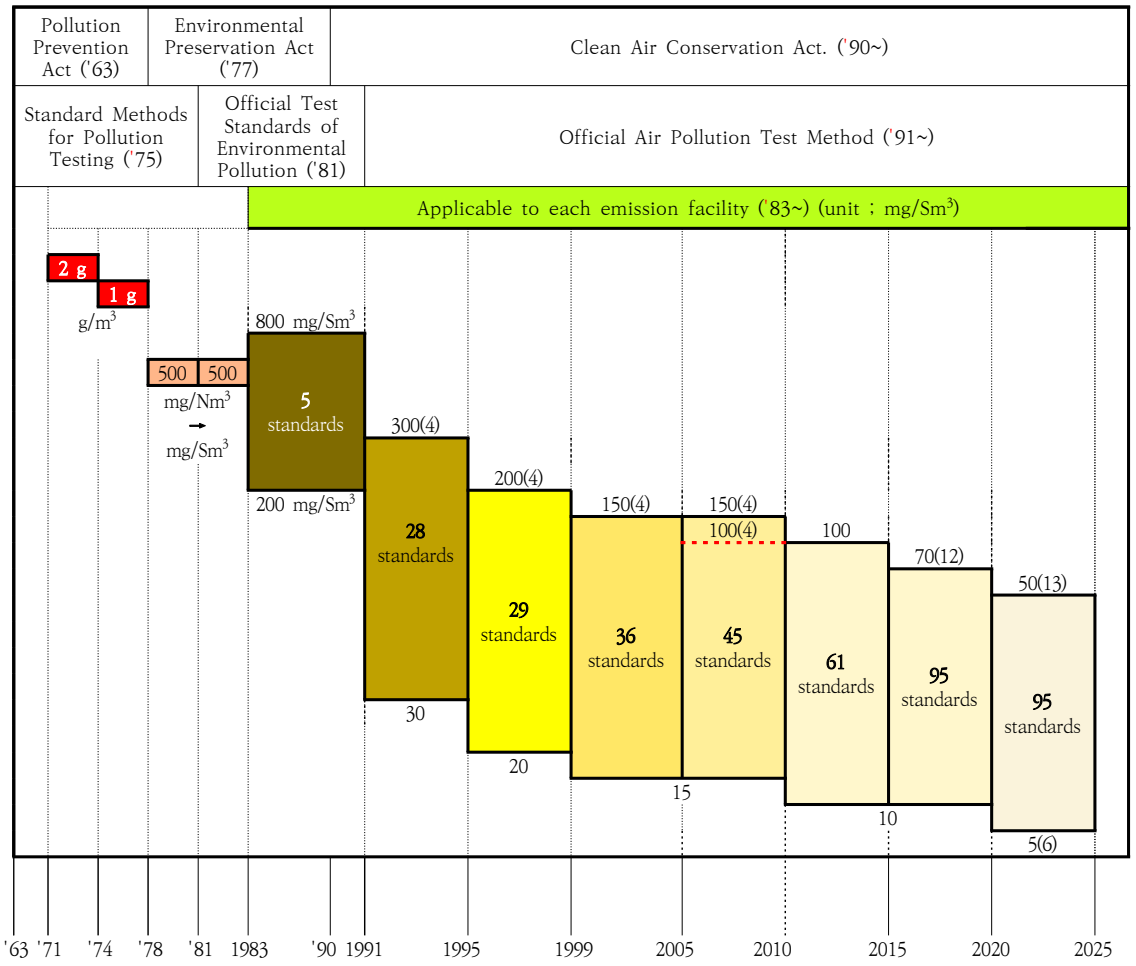


Fig. 1. Stack dust emission standards (1971~2025).

환경규제로 변화되었다. 1978년 환경보전법 시행규칙의 배출허용기준에서는 먼지 500 mg/Nm^3(정규상태)에서 1981년도에는 500 mg/Sm^3(표준상태)로 기준 상태의 표현이 변경되었다. 여기서 Nm^{3}와 Sm^{3}는 국내 기준상 모두 0℃, 1 atm 조건을 의미하므로 실제 농도 환산 결과에는 차이는 발생하지 않는다.

1980년대 산업화에 따른 대기오염 문제가 심화되면서 배출시설별 관리 필요성이 증가하였고, 1981년 환경오염공정시험법이 제정되면서 대기·수질·소음 등 환경오염물질 측정방법이 종합적으로 표준화되었다. 이후 1983년부터 환경보전법 시행규칙에서는 대기배출시설을 5개 유형으로 구분하고 시설별 배출허용기준을 적용하는 등 배출원 중심의 관리체계가 본격적으로 도입되었다.

1990년 대기환경보전법 제정 이후 대기오염물질은 보다 체계적인 배출원 관리 중심으로 전환되었으며, 1991년 대기오염공정시험방법이 제정되면서 배출가스 중 먼지 측정방법과 등속흡인 원리가 구체화 되었다. 이에 대기환경보전법 시행규칙에서는 배출시설별 먼지 배출허용기준을 설정하였으며, 1991년부터 1994년까지 28개 배출시설에 대해 30~300(4) mg/Sm^3 범위의 기준을 적용하였다. 또한 ( )안의 표준산소농도(O_2 백분율)는 연소시설에서 공기를 과도하게 주입하여 배출가스를 희석하는 방식으로 배출 농도를 낮추는 것을 방지하기 위해 적용하기 시작하였다.

이후 배출허용기준은 지속적으로 강화되어 1995~

1998년에는 29개 배출시설에 대해 20~200(4) mg/Sm^3, 1999~2004년에는 29~36개 배출시설에 대해 15~150(4) mg/Sm^3 범위로 조정되었다. 2005년 이후에는 일부 시설을 기존시설과 신규시설로 구분하여 신규시설의 기준을 강화하였으며, 기존 최대 150 mg/Sm^3 수준의 기준을 100 mg/Sm^3 이하로 낮추는 등 관리 수준을 향상시켰다. 또한 2010~2014년에는 56~61개 배출시설에 대해 10~100 mg/Sm^3, 2015~2019년에는 95개 배출시설에 대해 10~70(12) mg/Sm^3 그리고 2020년 이후 현재까지는 95개 배출시설에 대해 5(6)~50(13) mg/Sm^3 범위의 강화된 배출허용기준을 적용하고 있다.

2.2. 국내외 배출가스 먼지 농도 측정법

고정배출원에서 배출되는 총먼지(total particulate matter, TPM)를 측정하기 위해 국내 대기오염공정시험기준 ES 01301.1(이하 'ES')에서는 배출가스 중 먼지의 측정방법을 규정하고 있다. 국내 측정방법은 미국 EPA Method 5(이하 'EPA')와 일본 JIS Z 8808(이하 'JIS')의 시험원리와 절차를 참고하여 국내 실정에 맞게 도입·발전시켜 온 것으로 볼 수 있다. ES, EPA 및 JIS에서 규정하고 있는 측정원리, 시료채취법, 등속흡인 조건 및 주요 계산법의 차이를 비교하여 Table 1에 나타내었다.

본 연구에서는 현장에서 널리 사용되는 반자동식 시료채취방법을 중심으로 비교하였다. 반자동식 측정법은 배출가스의 유속 변화에 따라 시료채취 유량을 조절하여 등속흡인 조건을 유지할 수 있으며, 수동식에 비해 작업자의 조작에 따른 변동을 줄일 수 있고 자동식에 비해 장비 구성과 현장 적용성이 우수하다는 장점이 있다. 따라서 국내 굴뚝 배출가스 중 먼지 측정에서도 반자동식 채취기가 주요 측정장비로 활용되고 있다(Yang, 2018).

JIS는 1963년 제정된 이후 굴뚝 배출가스 중 먼지의 시료채취 및 분석방법을 지속적으로 개정하여 왔으며, 수분 측정, 등속흡인 조건의 산정 및 시료채취 가스량 계산 등의 절차를 체계화하였다. 이러한 개정을 거쳐 2013년에는 「Methods of measuring dust concentration in flue gas」에 해당하는 JIS Z 8808: 2013이 제정되어 현재의 시험체계로 발전하였다(JSA, 2013).

EPA는 1971년 최초로 공포된 이후 화력발전소를 대상으로 재현성 및 정밀도를 검증하고, 이후 여과온도, 등속흡입 및 중량법에 의한 PM 측정원리를 재확인하여 2020년 개정된 EPA Method 5:2020이 적용되고 있다. 특히 굴뚝 배출가스 중 입자상물질 측정에서 재현성이 우수하고 대부분 국가 시험법의 기초가 되는 등 국제표준으로 활용되고 있다(EPA, 2020).

국내 먼지 측정법은 1978년 환경보전법 시행과 함께 JIS의 영향을 받아 먼지 측정을 위한 중량법 및 등속흡입 방식이 도입되었고, 1990년대 이후 EPA의 계산식, 피토관 유속 측정, 등속흡입 개념 등이 시험기준에 반영되었다. 2007년에는 대기오염공정시험기준 체계 도입으로 먼지 시험법은 ES 01301.1(배출가스 중 먼지)로 재정비되었고, 2016년 등속흡입 절차, 시료채취 장치, 계산식 등을 보완하여 개정된 ES 01301.1:2016이 적용되고 있다. 참고적으로 국제표준시험방법인 ISO 23210은 PM10 및 PM2.5를 동시에 측정할 수 있으나 TPM 측정에 이용할 수 없고, 시료 채취 과정의 난이도가 높다(ISO, 2009; Youn, 2017).

한편, ES에서 배출가스 중 먼지는 액체 또는 고체상으로 함유된 입자상물질을 등속흡입하여 채취하고 부착 수분을 제거한 후 질량농도를 측정하는데, 먼지 농도는 표준상태 (0℃, 760 mmHg)의 건조 배출가스 1 Sm^3 중에 함유된 먼지의 질량농도로 표시한다(NIER, 2025). 먼지 측정법은 ES, EPA, JIS 모두 동일하게 배출가스 중 총먼지(TPM)에 대해 기본적으로 등속흡입으로 시료를 채취하고 여과지 포집의 중량법으로 농도를 구하는 것은 같다. 반면, 가장 큰 차이는 기준 온도인데 ES 및 JIS는 0℃를 적용하나 EPA는 20℃를 적용하고 있다.

등속흡입은 가스상 물질과 달리 입자상물질의 대표성 있는 포집을 위해 시료채취 노즐의 흡입속도(u)와 굴뚝 내 배출가스 유속(V)을 일치시키는 것이 중요하며, 이를 정량적으로 나타내는 지표가 식(1) 나타낸 등속흡입 계수(I factor)이며, 등속흡입률(I factor, %)을 I = (u/V) × 100으로 정의한다. ES, EPA, JIS에서 모두 90~110% 범위를 요구한다.

배출가스 중 먼지 농도는 건조 표준상태의 가스량을 기준으로 산정되므로, 수분함량은 시료채취 가스량의 건조상태 환산 및 최종 먼지 농도 산정에 직접적인 영향을 미치는 중요한 변수이다. 동일한 습윤 배출가스량이라도 수분함량에 따라 실제 건조 배출가스량이 달라지므로, 수분량을 정확하게 측정하지 못할 경우 건조 표준상태의 시료가스량 및 먼지 농도 산정에 오차가 발생할

Table 1. Comparison of stack dust sampling method

	Korea (NIER, 2024)	US (EPA, 2020)	Japan (JSA, 2013)
Method	ES 01301.1 (1978→2016)	Method 5 (1971→2020)	JIS Z 8808 (1963→2013)
Measurement principle	Isokinetic sampling + Filter sampling (Gravimetric method)		
Standard condition	0℃ (273 K), 760 mmHg	20℃ (293.15 K), 760 mmHg (101.32 kPa)	0℃ (273.15 K), 760 mmHg (101.32 kPa)
Dust unit	mg/Sm^3	mg/dscm or gr/dscf	g/Nm^3 or mg/Nm^3
Maintain isokinetic conditions	95% ≤ I ≤ 110% → (2019) 90% ≤ I ≤ 110% (Post-check)	90% ≤ I ≤ 110% (Post-check)	95% ≤ I ≤ 110%
Determination of moisture	Direct measurement	Direct measurement (EPA Method 4)	Direct measurement or calculated method

* I = Percent of isokinetic sampling (NIER, 2024)

$$I(\%) = \frac{T_s\left[0.00346\,V_{ic} + \frac{V_m'}{T_m}\left(P_a + \frac{\triangle H}{13.6}\right)\right]}{P_s \cdot t \cdot v \cdot A_n} \times (1.667 \times 10^4) \quad \cdots\cdots (1)$$

I = Percent of isokinetic sampling (%)
P_s = Absolute pressure of stack gas (mmHg: $P_a + P'_s$)
P'_s = Static pressure of stack gas (mmHg)
T_s = Average absolute stack gas temperature (K)
V_{ic} = Total volume of liquid collected in the impingers and silica gel (mL)
V'_m = Volume of gas sample as measured by dry gas meter (m^3)
T_m = Average absolute dry gas meter temperature (K)
P_a = Atmospheric pressure (mmHg)
ΔH = Orifice differential pressure (mmH_2O)
t = Total sampling time (min)
v = Velocity of stack gas (m/s)
A_n = Cros s-sectional area of nozzle (cm^2)

수 있다. EPA는 임핀저에 포집된 응축수의 질량을 측정하여 수분함량을 실측하고 산정한다. ES 역시 기본 원리는 EPA와 유사하게 응축수 실측 방식을 적용하고 있다. 반면 JIS는 응축수 직접 측정 외에도 연소가스 조성과 연료 특성을 이용한 계산법을 허용하고 있다.

따라서 ES, EPA 및 JIS는 모두 배출가스 중 수분량을 건조가스량으로 환산하기 위한 보정인자로 활용한다는 공통점이 있으나, 수분량의 측정 및 산정방법에서는 차이를 보인다. 특히 수분함량은 등속흡인에 필요한 시료채취 유량 산정뿐만 아니라 최종적으로 건조 표준상태에서의 먼지 농도를 산정하는 과정에도 영향을 미치므로, 시험방법 간 수분 측정방식의 차이를 검토하는 것은 측정결과의 정확성과 신뢰성을 평가하는데 중요한 요소이다.

2.3. 오리피스 차압과 시료채취 유량 간의 상관성

배출가스 중 먼지 측정에 적용되는 등속흡인법에서 오리피스 차압(⊿H)은 시료채취 유량(Flow)을 결정하는 중 주요 인자로, 밀접한 상관성을 갖는다. ⊿H과 유량 간의 실측 관계를 분석하기 위하여, 대기오염 측정분석기관인 A 보건환경연구원에서 2013년 도내 대기오염사업장 지도·점검을 목적으로 수행한 굴뚝 배출가스 중 먼지 측정자료를 활용하였다.

분석대상은 반자동식 채취기 1형을 사용하여 측정한 자료 중 I factor가 100±1% 범위에 해당하는 100건의 측정 결과를 선정하였다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 선정된 측정자료를 대상으로 ⊿H과 유량 간의 상관성을

분석하고 선형 회귀분석을 수행한 결과, Flow = 0.275 × ⊿H + 8.361의 회귀식이 도출되었다.

참고로 오리피스의 이론적인 유량과 차압의 관계는 일반적으로 베르누이 방정식에 따라 유량이 차압의 제곱근에 비례하는 비선형 관계로 설명된다. 그러나 본 연구에서 도출된 회귀식은 이론식이 아니라, 특정 측정장비와 제한된 현장 운전조건에서 얻어진 실측자료의 경험적 관계식으로 해석하였다.

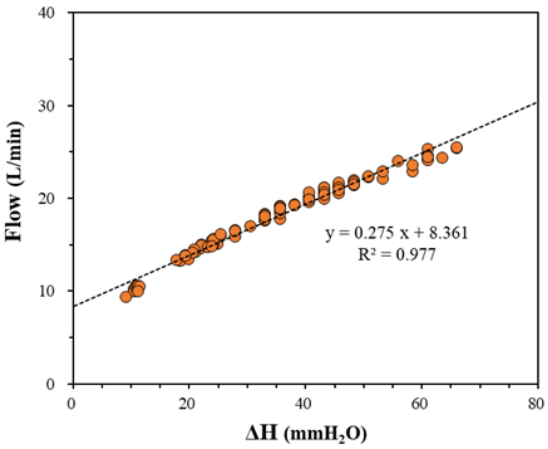


Fig. 2. Relationship between orifice differential pressure and sampling flow rate.

3. 결과 및 고찰

3.1. 기준 온도 불일치에 따른 오차

배출가스 중 먼지 농도 측정에서 표준상태는 측정된 배출가스의 체적을 일정한 기준조건으로 환산하기 위한 기준 온도와 압력을 의미한다. ES, JIS 및 EPA는 표준압력을 760 mmHg로 동일하게 적용하고 있으나, 기준 온도는 ES 및 JIS가 0℃를 적용하는 반면, EPA는 20℃를 적용한다. 이러한 기준 온도의 차이는 동일한 실제 가스량을 표준상태로 환산하는 과정에서 표준가스량의 차이를 발생시키며, 결과적으로 단위 건조가스 체적당 먼지 질량으로 표현되는 최종 먼지 농도에도 영향을 미친다. 또한 ES에서는 등속흡인 조건을 판단하기 위한 I factor를 규정하고 있으나, Flow 및 ⊿H를 산정하기 위한 세부적인 계산관계가 EPA와 같이 구체적으로 제시되어 있지 않다. 이에 따라 국내 현장에서는 EPA의 계산식 및 이를 기반으로 제작된 시료채취장비가 활용되는 경우가 있으며, 이때 EPA의 20℃ 기준 계산 관계를 국내 ES의 0℃ 기준에 대한 보정 없이 적용할 경우 측정자의 숙련도와 관계없이 기준 온도 차이에 기인한 체계적인 오차가 발생할 가능성이 있다.

Table 2에는 기준 온도 0℃와 20℃에 따른 ① 표준가스량, ② 먼지 농도, ③ 등속흡입 비례계수(K factor), ④ ⊿H의 차이를 비교하여 나타냈으며, 기준압력은 760 mmHg로 동일하게 적용하였다.

① 기체의 체적은 절대온도에 비례하므로, 동일한 압력과 가스량을 기준으로 할 경우 20℃에서의 표준가스량(V_{20})은 0℃에서의 표준가스량(V_0)에 비해 (V_{20}/V_0) = 1.073으로 약 7.3% 커진다.

반대로, ② 동일한 먼지 질량에서 표준 가스량으로 나눈 먼지 농도(C)는 (C_{20}/C_0) = 0.932로 20℃ 기준이 0℃ 기준보다 약 6.8% 낮게 계산되는데, 예를 들어 먼지 질량(W)이 100 mg이라면 기준 온도에 따라 먼지 농도는 6.8 mg/Sm^3의 차이가 발생한다. 이는 채취된 먼지 질량 자체의 변화가 아니라 기준 온도에 따른 가스 체적 환산의 차이에서 발생하는 것이다.

한편, ⊿H는 오리피스를 통과하는 시료가스의 유량에 의해 발생하는 압력차로서, 시료채취장치에서는 시료채취 유량을 확인하고 조절하기 위한 주요 측정변수로 활용된다. 등속흡인에서는 시료채취 노즐의 흡입속도와 굴뚝 내 배출가스 유속이 일치하도록 시료채취 유량을 조절하여야 하며, 이 과정에서 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 ⊿H와 Flow 사이의 관계가 이용된다.

등속흡인에 필요한 시료채취 유량은 노즐의 직경, 배출가스의 온도와 압력, 수분함량 및 피토관 계수 등 여러 측정조건의 영향을 받는다. 이러한 변수들은 등속흡인 비례계수(K factor)에 반영될 수 있으며, 실제 현장에서는 K factor와 ⊿H와의 관계를 이용하여 필요한 시료채취 유량을 산정하고 제어한다. 따라서 동일한 장비를 사용하더라도 K factor가 어느 기준 온도를 적용하여 산정·교정되었는지에 따라 요구되는 ⊿H 및 Flow가 달라질 수 있다.

③ 기준 온도에 따른 K factor는 $K \propto \sqrt{T_{std}}$의 절대온도의 함수로 나타내며, (K_{20}/K_0) = 1.036으로 20℃ 기준이 0℃ 기준보다 약 3.6% 크게 산정되고, ④ 동일한 등속흡인 조건에서 기준온도 차이에 따른 ⊿H은 ($\Delta H_{20}/\Delta H_0$) = 1.073으로 약 7.3% 차이가 발생한다. ⊿H이 증가하면 상대적으로 흡입유속이 증가하므로 등속흡입을 방해하는 요소뿐만 아니라 최종적으로 배출가

Table 2. Differences in standard flow rate(V_{std}), dust concentration(C), K factor, and ⊿H according to standard temperature

	(ES, JIS) 0℃, 760 mmHg	(EPA) 20℃, 760 mmHg
① Standard flow rate (V_{std})	T_0 = 273.15 K	T_{20} = 293.15 K
$V_{std} = V_m \times \frac{P_m}{P_{std}} \times \frac{T_{std}}{T_m}$	$V_{20} = V_0 \times \frac{293.15\,K}{273.15\,K} = 1.073\,V_0$	
	V_0 = 1.000 Sm^3	V_{20} = 1.073 Sm^3
② Dust concentration (C)	$C = \frac{W}{V_{std}}$, (if W=100 mg)	
	$C_0 = \frac{100\,mg}{1.000\,Sm^3} = 100\,mg/Sm^3$	$C_{20} = \frac{100\,mg}{1.073\,Sm^3} = 93.2\,mg/Sm^3$
③ Isokinetic sampling factor (K factor) $K \propto \sqrt{T_{std}}$	$\frac{K_{20}}{K_0} = \sqrt{\frac{293.15\,K}{273.15\,K}} = 1.036$	
	K_0 = 1.000	K_{20} = 1.036
④ Orifice differential pressure ($\triangle H$) $\triangle H = K^2 \times \triangle P$	$\frac{\triangle H_{20}}{\triangle H_0} = 1.036^2 = 1.073$	
	⊿H_0 = 1.000	⊿H_{20} = 1.073

V_{std} : standard volume, V_m : measured volume, P_m: absolute pressure during measurement, P_{std} : absolute pressure at standard conditions, T_m : absolute temperature during measurement, T_{std} : absolute temperature at standard conditions

스 중의 먼지가 더 많이 포집되어 먼지 농도를 증가시키는 결과를 초래한다. 또한, ⊿H과 포집되는 먼지 질량의 사이에는 상관관계가 존재하지 않기 때문에 최종 결과인 먼지 농도를 보정할 방법은 없다.

결국 국내 현장측정에서 EPA 기반의 시료채취 장비와 방법을 사용할 경우 K factor 등이 어떤 기준 온도(0℃ 또는 20℃)로 교정되었는지 확인하지 않거나, 기준 온도의 수정 없이 그대로 사용할 경우 등속흡입 유량 설정과 최종 먼지 농도 산정에 체계적인 오차가 발생할 가능성이 있다.

3.2. 수분량 측정에 따른 오류 가능성

배출가스 중 수분량은 습윤 배출가스의 시료 채취량을 건조 표준상태의 가스량으로 환산하고 먼지 농도를 산정하기 위한 필수 변수이므로, 수분량 측정의 정확성은 최종 먼지 농도의 신뢰도에 직접적인 영향을 미친다. 배출가스 중 수분함량은 배출시설 및 공정조건에 따라 상당한 차이를 나타내며, 일반적으로 약 1~20% 수준의 범위에서 나타난다(Kim, 2020).

ES 01321에서는 배출가스 중 수분량이 0.1% 이상인 경우 흡습관법, 임핀저법 등의 방법을 이용하여 수분량을 측정하도록 규정하고 있다. 흡습관법은 장비 구성이 비교적 간단하고 취급이 편리하여 현장에서 널리 사용되는 방법이다. 이 방법은 흡습관 내 흡습제의 질량을 측정하여 채취 전후의 질량 차이로부터 흡수된 수분량을 산정하는 방식으로, 흡입유량은 1개의 흡습관에 포함된 흡습제 1 g당 0.1 L/min 이하가 되도록 조절하고, 흡습제에 흡수되는 수분량이 0.1~1.0 g이 되도록 시료를 채취하고 수분량을 식(2)에 의해 구한다(NIER, 2024). 예를 들어 하나의 흡습관에 흡습제 10 g을 사용하면 허용되는 최대 흡입유량은 1.0 L/min이며, 10분간 채취할 경우 총 시료가스량은 10 L가 된다. 이는 먼지 농도 측정에 필요한 최소 시료채취량 400 L의 약 2.5%에 해당하며, 수분량 측정에 사용되는 시료가스량은 전체 먼지 시료채취량에 비해 상대적으로 매우 적다. 특히 실제 먼지 시료채취가 30~60분 동안 이루어지는 경우, 먼지 시료채취 전 약 5~10분 동안 측정한 수분량을 전체 채취기간의 대표값으로 적용하면 측정 시점의 배출가스 수분조건과 실제 먼지 포집기간의 평균 수분조건 사이에 차이가 발생할 가능성이 있다. 또한 흡습관법에서는 흡습제에 흡수된 수분의 질량이 매우 작을 경우 질량 측정에 따른 상대오차가 증가할 수 있다. 특히

$$X_w(\%) = \frac{\frac{22.4}{18} m_a}{V_m \times \frac{273}{273+\theta_m} \times \frac{P_a + P_m}{760} \times \frac{22.4}{18} m_a} \times 100 \quad \cdots\cdots (2)$$

$$V_{ic} = V_s \times \left(\frac{X_w}{100 - X_w} \right) \times \frac{18}{22.4} \quad \cdots\cdots (3)$$

X_w = Volume percent of water vapor in stack gas (%)
m_a = Mass of absorbed moisture (g)
V_m = Volume of dry gas sampled (L)
θ_m = Gas temperature at the meter (°C)
P_a = Atmospheric pressure at sampling point (mmHg)
P_m = Gauge pressure of the gas at the meter (mmHg)
V_{ic} = Total volume of water collected in the impingers and silica gel (mL)
V_s = Volume of gas sampled, as measured by the dry gas meter (L)

흡수된 수분의 질량이 0.1 g에 가까운 경우에는 저울의 분해능 및 반복 측정오차가 전체 측정값에서 차지하는 비율이 커질 수 있으므로 수분량 산정의 불확도가 증가할 수 있다. 반면 배출가스의 수분량은 연료의 연소상태, 공정조건 및 대기오염방지시설의 운전상태 등에 따라 시간에 따라 변동할 수 있으므로, 측정 초기에 얻은 수분량이 전체 먼지 시료채취기간의 평균 수분량을 정확하게 대표한다고 단정하기 어렵다(Lee et al., 2024).

따라서 흡습관법에 의한 수분량 측정의 대표성과 재현성을 향상시키기 위해서는 흡습제의 적정량을 확보하고, 측정 가능한 수분량이 충분히 확보되도록 시료채취 유량 및 채취시간을 적절하게 설정할 필요가 있다. 특히 수분량의 시간적 변동이 큰 배출시설에서는 먼지 시료채취기간과 수분량 측정기간의 차이를 최소화하거나, 시료채취기간을 대표할 수 있도록 수분량 측정조건을 개선하는 방안이 필요하다.

한편, 임핀저법에서는 임핀저 및 실리카겔에 포집된 수분의 총량을 직접 측정하여 수분함량을 산정할 수 있다. 그러나 임핀저에 응축된 물과 실리카겔에 흡수된 수분의 총량을 직접 측정하기 어려운 경우에는 배출가스의 수분함량(X_w)과 건식가스 시료채취량(V_s)을 이용하여 임핀저 및 실리카겔에 포집된 수분의 총량(V_{ic})을 식(3)과 같이 계산할 수 있다. 산정된 수분량은 배출가스의 습윤가스량을 건조 표준상태의 가스량으로 환산하는 데 사용되며, 등속흡인 조건을 평가하기 위한 I factor 산정 과정에서도 중요한 입력변수로 활용된다. 이때 수분량을 먼지 시료채취 전에 별도로 측정하고, 측정된 수분함량이 실제 먼지 시료채취기간 동안에도 일정하다고 가정하면 수분량의 시간적 변동이 계산에 반영되지 않을 수 있다. 특히 사전 측정된 수분함량이 실제 먼지 시료채취기간의 평균 수분함량과 차이가 있는 경우, 건조가스량 및 시료채취 유량의 산정에 오차가 발생하고 이는 결과적으로 I factor의 산정에도 영향을 미칠 수 있다.

따라서 수분량 측정에서 발생하는 주요 오류는 단순한 수분 질량 측정오차뿐만 아니라, ① 수분량 측정에 사용되는 시료가스량의 대표성 부족, ② 수분함량의 시간적 변동, ③ 흡수된 수분 질량이 적을 때 발생하는 상대적 측정오차, ④ 사전 측정된 수분함량을 전체 먼지 시료채취기간에 적용하는 데 따른 대표성 오차 등으로 구분할 수 있다. 이러한 요인들은 건조가스량과 등속흡인 조건의 산정에 연쇄적으로 영향을 미칠 수 있으므로, 수분량 측정방법의 정확성과 대표성을 확보하는 것은 최종 먼지 농도의 신뢰성 향상을 위해 중요하다.

한편, 수분량 측정에서 1~5%의 오차가 발생할 경우 최종 먼지 농도 계산에 미치는 영향은 무시할 수 없으며, 수분량 오차는 가스의 분자량과 밀도 계산에 연쇄적인 영향을 미쳐 등속흡입 유속 결정에 오류를 가중시킨다. EPA에서 적용되는 임핀저법은 등속흡입 조건에서 배출가스를 채취하면서 임핀저를 통과시켜 배출가스 중 수증기를 포집한 응축수(V_{water})로 포집하고, 후단의 실리카겔에서 남아 있는 수분(V_{silica})을 흡착하여

Table 3. Dust concentration by temperature and moisture content

	(ES, JIS) 0℃, 760 mmHg		(EPA) 20℃, 760 mmHg	
① Calculation constant (C_{std})	$C_0 = 7.460 \times 10^{-5}\left(\frac{1}{mmH_2O \cdot mm^4}\right)$		$C_{20} = 8.007 \times 10^{-5}\left(\frac{1}{mmH_2O \cdot mm^4}\right)$	
	$\frac{(8.007\times10^{-5}) - (7.460\times10^{-5})}{(8.007\times10^{-5})} \times 100 = 6.8\%$			
② Orifice differential pressure ($\triangle H$)	ΔH_0 = 22.4 mmH_2O		ΔH_{20} = 24.1 mmH_2O	
Flow (L/min)	$Flow = 0.2754 \times \Delta H + 8.3607$, (Fig. 2)			
	$Flow_0$ = 14.52 L/min		$Flow_{20}$ = 15.01 L/min	
	$\frac{15.01-14.52}{15.01} \times 100 = 3.3\%$			
③ Volume percent of water vapor (X_W)	$Q_s = Q_a(1 - X_W)$			
	1%	5%	1%	5%
Standard dry sampling flow rate (Q_s)	14.37 L/min	13.79 L/min	14.86 L/min	14.26 L/min
④ Particulate matter concentration	Sampling time 30 min / Collected particulate mass 16 mg			
	37.1 mg/m^3	38.7 mg/m^3	35.9 mg/m^3	37.7 mg/m^3

총 수분량($V_{ic} = V_{water} + V_{silica}$)을 산출한다. 이에 회수율이 높고 먼지 시료채취와 동시에 측정함으로 재현성이 우수하며, 수분함량이 높은 조건에서도 신뢰성 있어 국제적으로 가장 널리 사용되는 표준 측정법이다. 따라서 EPA와 같이 먼지 포집 과정 전체에서 발생하는 응축수를 실시간으로 계량하여 평균값을 산출하는 임핀저법의 적용으로 포집 시간과 수분 측정 시간을 일치시켜 데이터의 동시성을 확보하는 가장 확실한 방법이다.

3.3. 현장 실측 데이터에서 통합 오차의 정량적 평가

Table 3에는 배출가스 중 먼지 측정에서 기준 온도와 수분 함량의 차이가 시료채취 유량, 건조가스량 및 최종 먼지 농도 산정에 미치는 영향을 예시하여 나타냈다.

① 계산 상수(C_{std})는 기체상태방정식, 노즐 단면적, 오리피스 특성, 각종 물리상수 및 단위환산계수와 표준상태 조건 등을 하나의 계수로 통합하여 복잡한 계산과정을 간략화하기 위해 사용하는 값이다. EPA의 표준상태인 20℃에서는 $C_{20} = (8.007 \times 10^{-5})$이고, ES의 표준상태인 0℃에서는 $C_0 = (7.460 \times 10^{-5})$로 산정된다. 따라서 20℃ 기준 EPA 계산 상수를 0℃ 기준 ES 시험에 그대로 적용하면 등속흡입 유량 산정 시 약 6.8% 차이가 발생하게 된다.

② Fig. 2에 나타낸 바와 같이 ΔH와 Flow와의 관계를 평가하기 위해 A 보건환경연구원에서 측정한 100건의 배출가스 먼지 측정자료를 분석하여 얻은 실험적 회귀식을 적용하였다. 여기서, $(C_{20}/C_0) = (8.007\times10^{-5})/(7.460\times10^{-5}) = 1.073$의 비율을 적용해 보면, ΔH_{20} 24.1 mmH_2O와 ΔH_0 22.4 mmH_2O인 경우 채취하게 될 1분당 채취 유량을 회귀식에서, Q_{20} 15.01 L/min 및 Q_0 14.52 L/min으로 산정된다. 따라서 20℃ 기준 EPA 계산 상수를 0℃ 기준 ES 시험에 그대로 적용하면 시료채취 흡입 유량은 약 3.3% 차이가 발생하게 된다.

③ 배출가스 중 수분량이 각각 1%와 5%라고 가정하고 건조가스 유량을 산정해 보면, 20℃ 기준에서는 각각 14.86 L/min 및 14.26 L/min 그리고 0℃ 기준에서는 각각 14.37 L/min 및 13.79 L/min로 산정되었다. 이는 수분함량이 증가할수록 동일한 습윤가스 유량에서 실제 건조가스량이 감소하기 때문이며, 기준 온도 차이에 따라서도 건조 표준상태로 환산되는 가스량이 달라짐을 의미한다. 따라서 기준 온도와 수분함량은 최종 먼지 농도 산정에 독립적으로 또는 상호 연계되어 영향을 미칠 수 있다.

④ Fig. 2의 실험적 회귀식을 이용하여, 기준 온도

차이(0℃ vs 20℃)와 수분량 측정 오차(1% vs 5%)의 시나리오를 적용하여 최종 먼지 농도를 산출한 결과, 채취시간 30 min, 먼지 포집량 16 mg 동일한 시료 채취 조건에서 기준 온도와 수분량 보정 여부에 따라 먼지 농도는 35.9~38.7 mg/m^3 범위로 7~8% 정도 변동하는 것으로 나타났다. 이는 기준온도 및 수분량의 차이가 단순한 계산상의 차이에 그치지 않고, 최종적인 먼지 농도 산정 결과에 직접적인 영향을 미칠 수 있음을 보여준다.

4. 결 론

본 연구에서는 배출가스 중 먼지 측정방법인 ES 01301.1을 EPA Method 5 및 JIS Z8808과 비교·분석하고, 기준 온도와 수분량 측정방법의 차이가 등속흡인 조건 및 최종 먼지 농도 산정에 미치는 영향을 검토하고 개선 방안을 제안하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

1) ES에서는 I factor의 적용 범위는 규정하나, 등속흡인에 필요한 ⊿H과 Flow와의 관계를 구체적으로 제시하지 않고, 현장에서는 EPA를 기반으로 한 계산방법이 관행적으로 적용되고 있어 시험기준과 실제 장비의 계산조건 사이에 차이가 발생할 가능성이 있다. 따라서 시험방법의 일관성과 측정결과의 재현성을 위해서는 ⊿H과 Flow 산정에 관한 구체적인 관계식과 적용조건을 시험기준에 명확하게 제시할 필요가 있다.

2) ES는 0℃, 1기압을 기준으로 하는 반면, EPA는 20℃, 1기압을 기준으로 하고 있어, 이에 20℃의 표준가스량은 0℃보다 약 7.3% 크게 산정되며, 농도는 약 6.8% 낮게 산정된다. 따라서 EPA 기준의 계산식이나 장비 설정값을 ES의 0℃ 기준 측정에 별도의 보정 없이 적용할 경우 기준 온도 차이에 기인한 체계적인 측정오차가 발생할 수 있는 것으로 판단된다.

3) 배출가스 중 수분량 측정방법에서 흡습관법의 경우 먼지 시료채취 전에 비교적 짧은 시간 동안 수분량을 측정함으로 이를 전체 먼지 시료채취기간에 적용하는 경우, 배출가스 수분함량의 시간적 변동을 충분히 반영하지 못할 가능성이 있다. 이에 먼지 시료채취 및 수분량 측정시간을 일치시킬 수 있는 임핀저법은 수분량의 시간적 대표성과 측정결과의 재현성을 향상시키는 방안으로 판단된다.

4) 동일한 시료채취 시간 및 먼지 포집량을 가정하여 기준 온도와 수분함량을 달리하여 계산한 결과, 최종 먼지 농도는 약 7~8% 정도의 오차가 발생하였다. 이는 동일한 먼지 질량이 포집되었다고 하더라도 기준 온도와 수분량의 적용조건에 따라 최종 농도 산정값이 달라질 수 있음을 의미한다. 이에 측정자의 숙련도나 장비의 측정 성능과 별개로, 시험기준의 계산조건 및 측정방법 자체에서 발생할 수 있는 체계적 차이를 최소화할 필요가 있다.

향후 현재의 배출가스 중 먼지 측정에 관한 대기오염공정시험기준이 안고 있는 불확도를 해소하기 위해 관계식을 재정립하고, 대기오염물질 측정의 기준 상태를 국제 기준과 동일한 20℃, 1기압으로 변경하거나 정확한 보정식의 적용, 예측 수분량을 반영한 등속흡입속도 결정 방식의 도입 등 시험법의 개정이 필요함을 제시한다.

REFERENCES

International Organization for Standardization (ISO), 2009, Stationary source emissions - determination of PM10/PM2.5 mass concentration in flue gas - measurementat low concentrations by use of impactor, ISO 23210, Paris, France, https://www.iso.org

Japanese Standards Association (JSA), 2013, JIS Z 8808: 2013 Methods of measuring dust concentration in flue gas, JIS Z 8808, Tokyo, Japan, https://webdesk.jsa.or.jp

Jo, G., Seo, D., Kim, S., Kim, N., Seo., G., Bae, S., Cho, Y., 2019, Study on the measurement process of particulate matter and the improvement of emission allowance standard in air discharge facility, Int. J. of Policy Studies, 27(1), 79-106.

Kim, D. S., 2013, Air pollution history, regulatory change, and remedial measures of the current regulatory regimes in Korea, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 29(4), 353-368.

Kim, K. C., Lee, C. S., Choi, D. Y., Joo, H. S., Hong, Y. D., Kim, S. T., Lee, G. W., Park, J. S., Park, J. M., Han, J. S., 2023, Historical changes of air quality standards and air pollution of Korea, and challenges for their improvements, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 39(5), 807-829.

Kim, K. H., Bae, M. S., 2013, Current status prospects of standard methods for the measurements of air pollution in Korea, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 29(4), 439-446.

Kim, S. C., 2006, Improvement of the environmental official testing method to a international level, J. of the Korean Soc. for Environ. Anal., 9(4), 215-221.

Kim, Y. H., 2020, A Study on the measurement of mositure content in emission gas, Master's Thesis, Hanbat National University, Daejon, Korea, https://www.hanbat.ac.kr

Korea Environmental Technology Research Institute (KETRI), 1996, 50 years of environmental history in Korea, KETRI/1996/RE-26, Seoul, Korea, https://www.keiti.re.kr

Lee, S. W., Choi, I. Y., Park, B. K., Baek, D. H., Hwang, W. J., Jo, B. C., Dinh, T, Kim, J. C., 2024, A Case study on the long-term field performance of a frost-based moisture pretreatment device for sensor-based telemonitoring system, J. of the Korean Soc. for Environ. Anal., 40(6), 733-748.

National Law Information Center (NLIS), 2026, Standard test methods for air pollution, 2026-17, Sejong-si, Korea, https://www.law.go.kr

National Institute of Environmental Research (NIER), 2012, A Study for arrangement of Korea air pollutants standard method in stack fine particles, NEIR-RP2012-292, Incheon, Korea.

National Institute of Environmental Research (NIER), 2024, ES 01321.1 Determination of moisture content in stationary source emissions, Notification No. 2024-34, Incheon, Korea.

National Institute of Environmental Research (NIER), 2025, Official air pollution test method - Particulate matter in flue gas(ES 01301.a), Public Notice No. 2025-28, Incheon, Korea.

Song, G. W., 2026, A Study on the improvement of measurement methods for particulate matter in stack, Master's Thesis, Gyeongsang National University, Jinju, Korea.

Song, J. H., Cha, S. D., 2011, A Study on the comparison of measurement methods of dust in stack gas, Proceedings of the 2011 Fall Conference of the Korean Society for Atmospheric Environment.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2020, Method 5—Determination of particulate matter emissions from stationary sources, 40 CFR Part 60, Appendix A-3, Washinton D.C., USA, https://www.epa.gov

Yang, Y. M., 2018, A Study on the accuracy improvement of dust sampling system for exhaust gas, Master's Thesis, Korea Polytechnic University, Siheung-si, Korea, https://www.tukorea.ac.kr/

Youn, J. S., Han, S., Jung, Y. W., Jeon, K. J., 2017, Comparison of measurement methods and size fraction of fine particles (PM10, PM2.5) from stationary emission source using Korean standard and ISO: Coal power plant and refinery, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 33(4), 342-350.

• Graduate student. Geun-Woo Song
Department of Environmental Engineering, Gyeongsang National University
woogsong@gmail.com
• Professor. Jeong-Ho Park
Department of Environmental Engineering, Gyeongsang National University
pjh3345@gnu.ac.kr