

레이저흡수분광법

2025

(Laser Absorption Spectroscopy)

1.0 개요

1.1 목적

이 시험법은 레이저 (laser) 광원을 사용하여 닫힌 샘플 경로에서 광원을 흡수하거나 산란시키는 화합물의 광학 소멸을 측정함으로써, 목적 성분 가스의 농도를 자동으로 측정하는 방법을 규정한다. 이 방법은 레이저흡수분광법을 활용하여 목적 성분 가스의 농도 측정의 정확성과 일관성을 확보하는 것을 목적으로 한다.

1.2 적용범위

1.2.1 이 시험법은 환경대기 시료 및 배출가스 시료 중 온실가스의 농도를 레이저흡수분광법으로 측정하는 방법에 적용한다.

1.2.2 레이저흡수분광기술로 공동광자감쇠분광법 (CRDS), 비축형-광학공동적분투과분광법 (OA-ICOS), 광학피드백-공동강화흡수분광법 (OF-CEAS) 및 동등 이상의 성능이 있는 기기로 온실가스를 측정하는 방법에 적용한다.

1.3 간섭물질

1.3.1 입자상 물질

환경대기 시료와 배출가스 시료에 포함된 먼지 등 입자상 물질은 측정 결과에 영향을 줄 수 있다. 이러한 영향을 최소화하기 위해 시료채취부 전단에 여과재를 설치해야 한다. 여과재는 온실가스 흡착이 적은 재질, 예를 들어 스테인리스강 및 불소수지제로 된 것을 사용하는 것이 적합하다. 또한 여과재에 입자상 물질이 많이 부착되면 시료 손실이나 시료 흡입 유량 감소의 원인이 될 수 있으므로 정기적인 교체가 필요하다.

1.3.2 수분

수분은 레이저흡수분광기를 이용한 목적 성분 가스의 농도 측정에 영향을 미치는 중요한 요인으로, 시료 중 수분 함량 관리가 매우 중요하다. 정확한 목적 성분 가스의 농도를 측정하기 위해서는 시료채취 시 수분 제거 장치를 전단에 설치하여 수분을 0.1 % 이하로 제거한 상태에서 시료를 채취해야 한다. 만약 수분이 완전히 제거되지 않았다면, 수분 함량을 산출하고 이를 보정해야 한다.

2.0 용어 정의

이 시험을 조작할 때 공통적인 용어는 ES 13000 총칙 2.9 관련 용어·단어에 따른다.

2.1 가스셀 (gas cell)

시료 가스가 들어갈 수 있는 용기를 의미하며 공동 (cavity), 챔버 (chamber) 등이 포함된다. 가스셀에 조사된 단일 파장의 광원은 시료 중 목적 성분 가스에 흡광된다.

2.2 공동광자감쇠분광법 (CRDS, cavity ring-down spectroscopy)

진공 상태의 공동 (cavity)에 레이저 광원을 조사한 후, 공동 내부 목적 성분 가스의 흡수강도에 따라 광원이 소멸하는데 걸리는 시간을 계량하여 목적 성분 가스를 측정하는 방법이다. 레이저 광원이 광학 공동에 들어가면, 공동 내 반사판 사이에서 앞뒤로 반사된다. 조사된 광원이 차단되면 광원의 세기는 시간이 지남에 따라 감쇠되며 최종적으로 소멸한다. 이 감쇠 속도는 광학 공동의 손실과 공동 내 매질의 흡수와 관련이 있다. 목적 성분 가스의 농도는 광원의 세기 감쇠율을 기준으로 정량화된다.

2.3 비축형-광학공동적분투과분광법 (OA-ICOS, off-axis integrated cavity output spectroscopy)

진공 상태의 공동 (cavity)에 레이저 광원을 축방향으로 기울여 조사한 후, 목적 성분 가스에 따라 흡수되는 레이저의 강도와 시간을 계량하여 목적 성분 가스를 측정하는 방법이다. 레이저 광원이 공동 내부로 기울어진 축 방향으로 들어가면, 공동 내 반사판 사이에서 앞뒤로 반사된다. 이 과정에서 광원이 목적 성분 가스에 흡수됨에 따라

광원의 세기는 점차 감쇠한다. 감쇠 속도는 광학 공동의 손실 및 공동 내 매체의 흡수와 관련이 있으며, 이 감쇠율을 기준으로 목적 성분 가스의 농도를 정량화한다.

2.4 광학피드백-공동강화흡수분광법 (OF-CEAS, optical feedback cavity enhanced absorption spectroscopy)

진공 상태의 V자형 공동 (cavity)에 레이저 광원을 조사한 후 공동 안에 있는 목적 성분 가스에 흡수되는 레이저의 강도와 시간을 계량하여 목적 성분 가스를 측정하는 방법이다. 광원부에서 조사된 레이저는 압력 제어부에 일정한 압력이 유지된 V자형 공동 내부로 들어간다. 공동 내부에서는 레이저가 반사판 사이에서 앞뒤로 반사되며 광학 경로 (Optical Path)가 확장된다. 이 광학 경로의 확장은 측정 감도를 향상시키는 역할을 한다. 공동 내에서 목적 성분 가스에 의해 레이저 신호가 감쇠되며, 감쇠된 신호의 흡수 스펙트럼을 분석하여 목적 성분 가스의 농도를 정량화한다.

3.0 분석기기 및 기구

3.1 레이저흡수분광기 (LAS, laser absorption spectrometer)

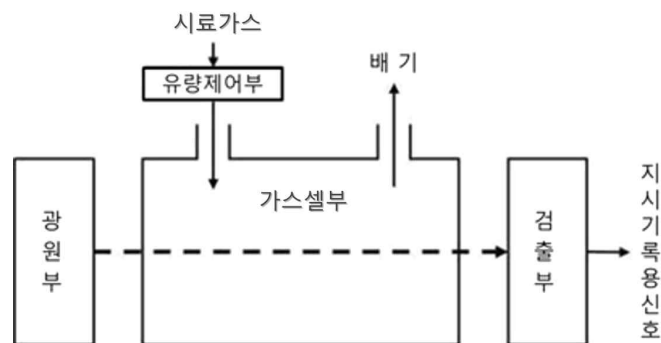


그림 1. 레이저흡수분광기의 구성 (예)

3.1.1 레이저흡수분광기는 그림 1과 같이 유량 제어부, 광원부, 가스셀부, 검출부로 구성된다.

3.1.2 가스셀 내 시간 경과에 따른 신호세기 감쇠율은 가스셀의 길이, 광학 거울의 반사율, 시료의 흡수율에 따라 달라진다.

3.1.3 모든 형태의 가스분자는 분자 고유의 흡수 스펙트럼을 가지고 있다. 레이저 흡수분광기는 비어-램버트 (Beer-Lambert) 법칙에 따라 농도에 비례하는 광원의 흡수량을 이용하는 장치이다. 그림 2와 같이 가스셀 내 광원의 강도는 시간에 따라 감소하며, 시료 유무에 따른 감쇠율의 차이를 통해 농도를 산출한다.

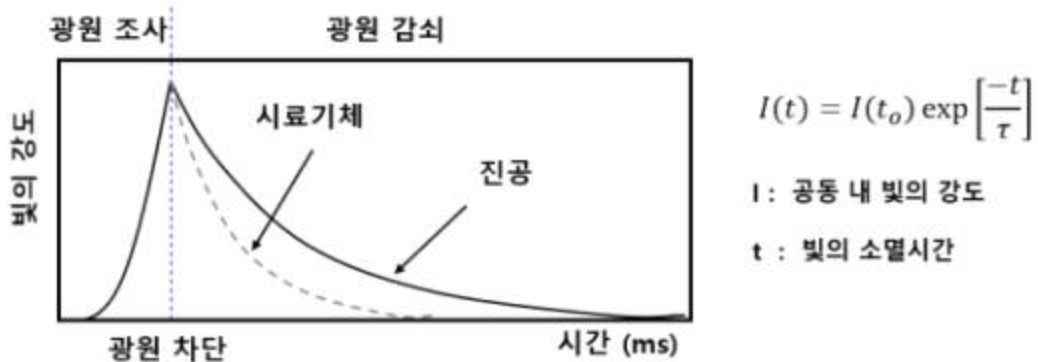


그림 2. 레이저흡수분광기의 원리

3.1.4 가스셀 내부에 해당 파장을 흡수하는 목적 성분 가스(예, CO₂, CH₄, N₂O, H₂O 등)가 존재하면 그림 3과 같이 해당 물질이 광원을 흡수하여 특정 파장대의 단일 파장 광원이 더 빠르게 소멸한다.

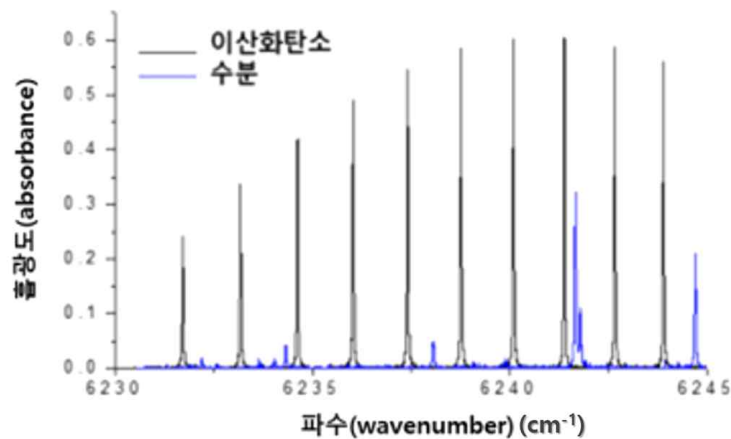


그림 3. 목적 성분 가스에 따른 흡광도 스펙트럼

3.1.5 유량 제어부

레이저흡수분광기의 부속장치로, 장비 내로 유입되는 시료가스의 유량을 제어할 수 있는 솔레노이드 밸브 등을 사용한다.

3.1.6 광원부

외부환경의 영향을 받지 않는 구조로 구성되며, 이산화탄소와 메탄, 아산화질소 등 물질에 따라 근적외선 (Near Infrared) 또는 중적외선 (Mid-Infrared)을 사용하여 목적 성분 가스의 고유 흡수 파장의 레이저광원을 가스셀 안으로 조사한다.

3.1.7 가스셀부

분석기기 내부에 시료가 들어갈 수 있는 진공상태의 용기를 의미하며, 시료가스가 유입되어 광원의 흡수가 이루어지는 부분이다. 광원부에서 가스셀부로 조사된 레이저광원은 시료가스 중 목적 성분 가스에 흡수된다. 가스셀부는 아래 그림 4~그림 6과 같이 고반사율 거울의 배치와 레이저광원의 반사 경로에 따라 공동광자감쇠분광기 (CRDS), 비축형-광학공동적분투과분광기 (OA-ICOS) 및 광학피드백-공동강화흡수분광기 (OF-CEAS)로 구분된다.

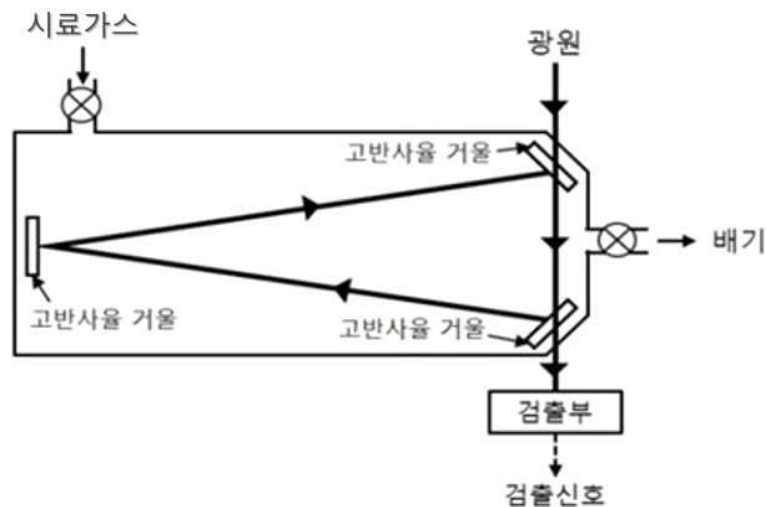


그림 4. 공동광자감쇠분광기 (CRDS) 가스셀부의 구성 (예)

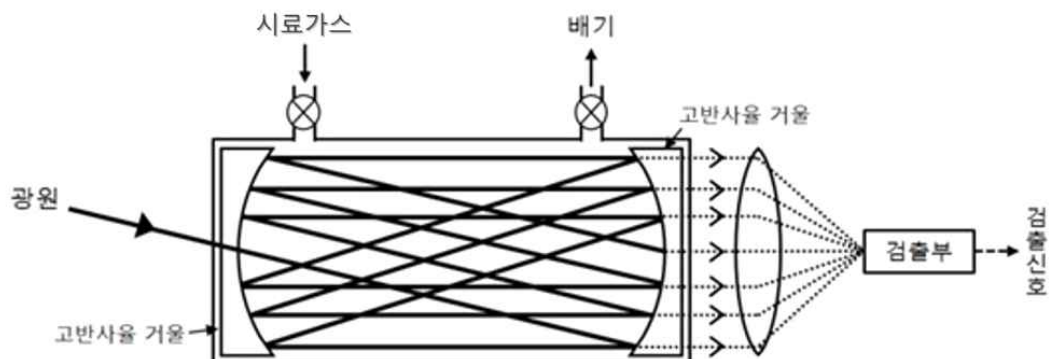


그림 5. 비축형-광학공동적분투과분광기 (OA-ICOS) 가스셀부의 구성 (예)

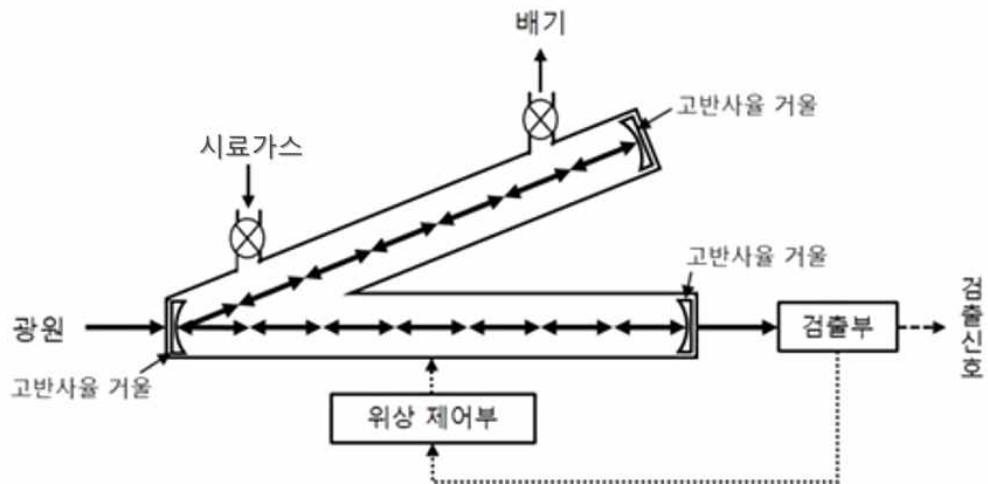


그림 6. 광학피드백-공동강화흡수분광기 (OF-CEAS) 가스셀부의 구성 (예)

3.1.8 고반사율 거울

가스셀 내부에 위치하여 다중반사를 통해 레이저광원의 유효 흡수 길이를 확장시켜 시료가스 중 목적 성분 가스의 흡수를 증대한다.

3.1.9 위상 제어부

가스셀 내부의 압력을 조절하여 레이저광원의 굴절률을 조정하고, 이를 통해 조사된 광원과 반사되는 레이저광원의 위상을 일정하게 유지시킨다.

3.1.10 검출부

가스셀 내에서 목적 성분 가스의 흡수로 감쇠된 레이저광원의 세기를 검출하고, 그 세기에 비례한 수준의 전기신호로 변환하는 부분이다. 진공으로 밀봉된 검출기를 사용하며, 이산화탄소와 메탄은 InGaAs 검출기를, 아산화질소의 경우 HgCdTe(MCT) 검출기나 InGaAs 검출기를 주로 사용한다. 바탕신호잡음과 온도 변화의 영향을 최소화하기 위해 일정한 온도로 유지한다.

3.2 시료채취장치

시료의 연속적인 도입을 위하여 시료채취 장치를 사용한다. 시료채취 장치는 가스

채취구, 가스 흡입펌프, 여과재, 제습기, 트랩, 건조기, 압력계, 압력조절기, 유량계, 유량 조절기, 각종 배관·계통변환기 등을 시료의 종류와 상태에 따라 필요한 것을 조합하여 연결한 것이다.

측정가스의 유량과 온도 허용범위는 사용 목적에 따라 다르지만 펌프로 유입되는 시료는 5 L/min~10 L/min의 유량으로 조절한다. 허용 온도범위는 정해진 유량으로 가스를 도입할 때 원칙적으로 0 ℃~50 ℃ 사이로 한다.

시료채취장치는 측정을 방해하는 각종 고형 부유물이나 액체 부유물 등을 충분히 제거하여, 분광기의 성능을 유지할 수 있도록 만들어야 한다.

3.2.1 시료 채취 및 처리 장치

3.2.1.1 시료 채취 및 처리 장치는 주로 여과재, 시료채취 라인, 흡입펌프, 압력조절기, 온도 균형 장비, 제습 장치 등이 포함된다.

3.2.1.2 시료를 채취하고 온도 균형을 맞추고 압력제어, 수분제거, 건조 과정을 수행한다.

3.2.1.3 시료는 흡입펌프가 흡입하고, 여과재에서 여과되며, 대부분의 수분을 시료 제습 장치가 제거한다.

3.2.1.4 이후 레이저흡수분광기의 압력 및 유량 제어 장치를 거쳐 시료 및 표준가스 선택장치로 들어간다.

3.2.2 펌프와 유량계측 시스템

펌프로 유입되는 시료는 유량 조절기를 통해 5 L/min~10 L/min의 유량으로 조절한다. 이 때 공동분배관의 사용 여부와 분배관 길이에 따른 압력손실 등을 고려해 펌프의 종류와 유입 유량을 결정한다.

3.2.3 여과재

3.2.3.1 여과재는 유로의 막힘과 시료의 오염에 따른 측정 오차의 발생 등, 분석기의 성능에 영향을 미칠 수 있는 시료대기 중에 함유되어 있는 분진을 제거하기 위한 것으로 스테인리스강 필터 및 불소수지제 필터 등을 사용한다.

3.2.3.2 여과재는 분진 부착량이 많아지면 시료 손실이나 시료 흡입 유량 감소의 원인이 될 수 있으므로 정기적으로 교체 또는 세척한다.

3.3 성능 요구사항

3.3.1 시료 채취 및 처리 장치의 성능 요구사항

3.3.1.1 시료채취 유입구에서 레이저흡수분광기 본체까지 시료의 체류 시간은 5분을 초과하지 않아야 한다.

3.3.1.2 분광기로 도입되는 가스는 크기가 $0.2\ \mu\text{m} \sim 2\ \mu\text{m}$ 이상인 입자를 제거할 수 있어야 하며, 고효율 미립자 공기 (HEPA, high efficiency particulate air) 필터 또는 폴리테트라플루오로에틸렌 (PTFE, polytetrafluoroethylene) 필터를 사용하는 것이 좋다.

3.3.1.3 제습 장치는 흡착이나 화학 반응이 없는 스테인리스강 또는 경질 유리를 사용하는 것이 좋다. 제습 장치는 시료의 수분 함량을 0.1 % 이하로 제거해야 한다.

3.3.1.4 시료채취 라인은 오염이나 흡착이 없어야 한다. 장시간 옥외에 두기 때문에 노화와 부식에 강해야 한다.

3.3.1.5 시료채취 펌프는 폴리테트라플루오로에틸렌 재질로 하며, 오일을 사용하지 않는 다이어프램 펌프여야 한다. 펌프의 유량은 $5\ \text{L/min}$ 이상이어야 한다. 시료채취 펌프 뒷면의 라인은 스테인리스강 등으로 만들어야 한다.

3.3.2 시료 및 표준가스 선택장치

3.3.2.1 레이저흡수분광기에 들어가기 위해 시료 또는 표준가스를 설정하고 선택하는데 사용된다.

3.3.2.2 시료 및 표준가스 선택장치는 레이저흡수분광기의 측정 프로그램으로 조정 및 전환이 가능하거나 레귤레이터를 통한 가스 분배가 가능해야 한다.

3.3.3 데이터 수집 및 처리장치

3.3.3.1 레이저흡수분광기는 기기 워밍업이 끝난 후부터 모든 데이터를 자동 저장해야 한다.

3.3.3.2 데이터 수집 및 처리장치는 원자료를 2개월 이상 저장할 수 있는 메모리를 탑재해야 한다.

3.3.3.3 데이터 수집 시작과 끝의 날짜 및 시간 설정이 가능해야 한다.

3.3.3.4 데이터 처리 및 수집장치에서 제공되는 데이터는 텍스트 형태로 제공되며 스프레드시트를 이용하여 파일 열기 및 편집이 가능해야 한다.

3.3.3.5 측정 데이터는 기본 측정값 외에 기기정보(온도, 압력 등), 시간정보, 레이저에 대한 정보 등을 포함해 저장해야 한다.

3.3.3.6 데이터 수집 및 처리장치에서 생성된 데이터는 외부 소프트웨어와 연동하여 검정곡선의 기울기와 절편 등을 보정할 수 있어야 한다.

3.4 표시사항

측정기에는 다음 사항을 표시해야 한다. 단, 이들의 표시는 측정기에 분산하여 표시하여도 좋다.

3.4.1 제조업자명 또는 등록상표

3.4.2 제조업자가 부여한 측정기 모델명

3.4.3 제조번호

3.4.4 제조연월일

3.4.5 측정방법

3.4.6 측정범위

3.4.7 측정기 사용상 주의사항

3.4.8 전원의 종류, 전압 (V), 주파수 (Hz), 및 소요전력 (W) 또는 피상전력 (VA)

3.4.9 필요시 전송출력의 종류 및 사용서에 기재한 시험성적서를 첨부할 것

4.0 인증표준물질 (certified reference material)

측정기의 교정, 측정 방법의 평가 또는 목적 성분 가스의 물질량을 결정하기 위해 사용하는 균질한 소재나 물질로, 농도에 대한 정확한 인증값과 일정한 신뢰 수준에서 측정불확도가 표시된 인증서를 포함한 표준물질을 의미한다.

4.1 표준가스 (reference gas)

측정기를 교정하기 위해 사용하는 가스 상태의 인증표준물질로, 목적 성분 가스를 바탕가스(공기)로 희석하여 제조된 가스를 뜻한다. 표준가스는 소급성이 명시된 농도 ($\mu\text{mol/mol}$ 수준)의 인증표준물질을 구입하여 측정 농도범위에 맞게 희석하지 않고 그대로 사용한다.

4.1.1 제로가스 (zero gas)

측정·분석 방법 또는 측정기에서 측정범위의 바탕 시험값을 확인하기 위한 가스를 뜻한다. 제로가스는 목적 성분 가스의 농도가 측정기기의 검출한계 이하인 정제 공기 또는 질소, 산소, 아르곤을 대기질 조성으로 제조한 가스를 사용한다.

4.1.2 스패가스 (span gas)

표준가스를 통해 공기 중의 목적 성분 가스의 농도를 확인한 가스로, 측정기의 측정 범위 교정과 성능시험(반복성, 스패 드리프트, 안정성 등)에 사용한다. 목적 성분 가스의 농도가 각 측정범위의 80 %~100 % 수준이 함유되도록 조제한 표준가스이다.

4.1.3 중간점 표준가스

교정에 사용하는 기준 가스로, 분광기의 각 측정범위의 40 %~60 % 수준에 해당하는 표준가스이다.

4.2 교정용 가스

- 4.2.1 분광기의 교정은 농도를 알고 있는 교정용 가스를 사용한다. 교정용 가스로는 제로가스 (zero gas)와 스패가스 (span gas), 중간점 표준가스가 있다.
- 4.2.2 교정용 가스는 성분농도가 안정적이고, 교정치의 정확도가 확보된 신뢰성이 있는 것이어야 한다. 특히 고압용기에 저장된 것은 충전압력이 떨어져도 성분농도가 변하지 않는 것이어야 한다.
- 4.2.3 교정용 가스로는 목적 성분과 공기 등 다른 가스를 혼합한 두 성분 혼합가스를 많이 사용하지만, 분광기의 사용 목적에 따라 두 성분 혼합가스나 여러 성분 혼합가스를 사용할 수 있다.
- 4.2.4 혼합가스를 조제할 때 목적 성분 가스의 농도가 0.1 % 이하일 때는 용기표면의 가스흡착 영향을 제거할 수 있는 방법을 충분히 검토해야 한다.
- 4.2.5 교정치의 결정에는 필요에 따라 각종 분석법에 병용하여 충분히 신뢰성이 있도록 한다.

5.0 시료채취 및 관리

5.1 시료채취 조작

시료채취 조작은 다음과 같이 한다.

- 5.1.1 여과재의 상태, 입력시간 및 날짜를 확인한다.
- 5.1.2 시료 측정 장소별로 고유번호를 부여하여 측정 시 기록 등을 구별한다.
- 5.1.3 시료 도입부에서 시료의 누출 여부와 측정기의 유량과 압력을 확인한다.
- 5.1.4 전원을 켜고 분석물질 농도의 지시값이 안정될 때까지 충분히 예열한다.
- 5.1.5 측정기의 여러 가동 수치를 빠르게 조절하기 위해 제조사의 취급 설명서를

따른다.

5.1.6 시료를 채취하여 기록장치로 농도를 기록한다.

5.1.7 시료채취 및 측정 중간에도 측정기의 상태를 확인하여 고장 등 긴급한 상황 발생 시에는 신속한 조치를 취해야 한다.

5.2 장치의 설치

5.2.1 부식성 가스가 없고 먼지가 적은 곳이어야 한다.

5.2.2 측정 파수 범위에 흡수를 나타내는 가스가 적은 곳이어야 한다.

5.2.3 상대습도는 60 % 이하이고 변화가 적은 곳이어야 한다.

5.2.4 실온은 1 ℃ ~ 35 ℃로서 온도 변화가 적은 곳이어야 한다.

5.2.5 직사광선이 닿지 않아야 한다.

5.2.6 진동이 적은 곳이어야 한다.

5.2.7 전원의 전압 및 주파수의 변동이 적은 곳이어야 한다.

5.2.8 전자 유도의 영향을 주는 장치가 근처에 없어야 한다.

5.2.9 전원에 고주파나 스파이크 상태의 잡음이 적은 곳이어야 한다.

5.3 측정조작

5.3.1 장치의 취급은 취급 설명서 등을 따른다. 장치를 사용할 때는 사전에 정해진 기준에 따라 장치 점검을 하고 이상이 없다는 것을 확인한 후 전원을 켜고 예비 운전을 통해 장치를 안정화한다.

5.3.2 표준가스를 주입하여 측정값의 정확도를 검증하며, 반복 정밀도 등이 설정된 범위 내에 있는지 확인한다.

6.0 정도보증/정도관리 (QA/QC)

6.1 측정의 정도관리

6.1.1 측정품질요소 관리

측정품질 요소는 측정 시마다 관리해야 하는 항목과 교정 주기에 따라 주기적으로 관리해야 하는 항목으로 나뉜다. 다음의 품질요소에 대해 주기적으로 실험을 실시하고, 관리 기록한다. 측정품질 요소는 다음과 같다.

6.1.1.1 시료 측정의 반복성

6.1.1.2 바탕시험 값 측정의 반복성

6.1.1.3 교정범위 값 측정의 반복성

6.1.1.4 측정기의 직선성

6.1.1.5 교정주기 내의 변동성

6.1.1.6 교정용 표준가스 농도 값의 불확실성

6.1.1.7 유량 안정성

6.1.2 측정기의 유지관리

레이저흡수분광기의 측정기 내부의 중요한 부품의 성능을 조사하고 필요에 따라 교체한다. 점검 결과를 품질요소와 함께 기록한다. 유지관리에 요구되는 정도관리 요소는 다음과 같다.

6.1.2.1 시료 여과재 교체 상태

6.1.2.2 시료 대기의 유량 점검

6.1.2.3 시료 온도, 압력 점검

6.1.2.4 자료수집장치 기록/전송상태 확인

6.1.2.5 검출기의 안정성 점검

6.1.2.6 교정용 표준가스를 사용한 주기적인 측정기 교정

6.2 교정 절차

측정기의 각 부분을 점검한다. 특히 가스가 새는지 확인하고 순서에 따라 전원을 켜고 기기 매뉴얼에 따라서 시료대기 유량 및 기타 측정 조건을 조정한다. 측정기가 정상 상태에 도달하면 다음 방법에 따라 측정기를 교정한다.

6.2.1 제로가스를 설정 유량으로 도입해서 지시값이 안정된 시점에서 제로 교정을 실시한다.

6.2.2 분광기 각 측정범위 내 해당 농도의 중간점 표준가스와 스펠가스를 순차적으로 설정 유량으로 도입하고 지시값이 안정된 시점에서 스펠 교정을 실시한다.

6.2.3 필요에 따라 제로 및 스펠 교정값이 각각 일치할 때까지 반복 수행한다.

6.2.4 교정주기는 원칙적으로 월 1회 이상으로 한다.

6.2.5 제로 및 스펠 교정값을 외부 소프트웨어와 연동하여 검정곡선의 기울기와 절편 등을 보정하고, 생성된 데이터에 적용한다. 다만, 프로그램에서 산출된 보정 이외의 임의 조작은 하지 않는다.

7.0 분석 절차

7.1 시료 (흡광) 스펙트럼의 생성

7.1.1 광원의 정확한 소멸시간 측정에 알맞은 흡수 스펙트럼을 선택해야 한다. 각 파장의 감쇠는 목적 성분 가스의 흡수 파장 범위의 흡수 스펙트럼에 영향을 받는다.

7.1.2 레이저흡수분광기의 가스셀 내부 전체는 시료로 채워져야 한다.

7.1.3 최소 5분 이상의 시간 해상도가 있는 시료 스펙트럼을 생성한다.

7.1.4 시료의 스펙트럼 생성 시 측정 환경 조건(압력, 상대습도, 기온, 풍속, 풍향 등의 기상조건)을 기록한다.

8.0 결과보고

8.1 측정결과 보고

시료에 함유되어 있는 목적 성분 가스의 측정 결과를 보고하는 경우에 다음 목록의 자료를 함께 보고해야 한다.

8.1.1 시료 관련자료

시료측정일시, 시료측정장소 등

8.1.2 측정방법 개요

시료 채취 유속, 총량, 시간, 기상요소(기온, 기압, 습도, 풍속, 풍향 등), 주변 환경(4방위 개방여부, 주변 건물, 지표면 상태 등) 요소를 작성한다.

8.1.3 측정 결과

8.2 측정량의 표시

8.2.1 측정량은 수분을 제외한 건조공기 중 목적 성분 가스의 물질량 분율이며, 측정 단위는 $\mu\text{mol/mol}$ (ppm) 또는 nmol/mol (ppb)을 사용한다.

9.0 참고 자료

9.1 ASTM D 7941/D7941M, "Standard Test Method for Hydrogen Purity

Analysis Using a Continuous Wave Cavity Ring-Down Spectroscopy Analyzer”, ASTM international(2014).

9.2 GB/T 34415, “Cavity Ring-Down Spectroscopy system for measurement of atmospheric carbon dioxide”, GB(2017).

9.3 GB/T 33672, “Cavity Ring-Down Spectroscopy system for measurement of atmospheric methane”, GB(2017).

9.4 Andrew Crotwell, Haeyoung Lee and Martin Steinbacher, “20th WMO/IAEA Meeting on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases and Related Measurement Techniques (GGMT-2019)”, WMO/GAW(2019).

9.5 국립환경과학원고시 제2024-28호 “온실가스공정시험기준 ES 13401.1 환경대기 중 이산화탄소-가스크로마토그래피”, 국립환경과학원(2024).

9.6 “EPA Handbook: Optical and Remote Sensing for Measurement and Monitoring of Emissions Flux of Gases and Particulate Matter“, US EPA (2018).

10.0 부록 “내용 없음”