

배출가스 중 미세먼지 (PM-10 및 PM-2.5) (Fine Particulate Matter (PM-10 and PM-2.5) in Flue Gas)

2021

1.0 개요

1.1 목적

이 시험기준은 연소시설, 폐기물소각시설 및 기타 산업공정의 배출시설을 대상으로 굴뚝 배출가스의 입자상 물질 중 공기역학적 직경이 10 μm (이하 PM-10)와 2.5 μm (이하 PM-2.5) 이하인 미세먼지에 대한 측정을 수행하는 경우에 대하여 규정한다.

1.2 적용범위

이 방법은 응축성 먼지^[1]는 고려하지 않고 여과성 먼지 (필터 또는 사이클론/필터 조합을 통과하지 못하는 물질) 측정에만 적용된다. 농도 표시는 표준상태 (0 $^{\circ}\text{C}$, 760 mmHg)의 건조배출가스 1 Sm^3 중에 함유된 먼지의 중량으로 표시한다.

1.3 적용제한

1.3.1 배출가스 온도가 260 $^{\circ}\text{C}$ 를 초과할 경우 적합하지 않을 수 있다.^[2]

1.3.2 시료채취장치 (사이클론 및 여과지홀더)의 길이 (450 mm)와 장치에 의한 가스 흐름의 영향을 최소화하기 위하여 610 mm 이상의 굴뚝 (덕트) 내경이 필요하다.^[3]

[1] 굴뚝 (덕트) 내 가스온도가 30 $^{\circ}\text{C}$ 이상일 경우 여과성 및 응축성 먼지를 고려하여야 하며, 응축성 먼지를 측정하고자 할 경우 Condenser를 비롯한 별도의 장비를 조합하여야 한다.

[2] 260 $^{\circ}\text{C}$ 이상의 경우 사이클론 재질의 변형으로 미세먼지 회수율 저감 등의 문제가 발생할 수 있다.

[3] 457.2 mm ~ 609.6 mm (18 인치 ~ 24 인치) 사이의 직경을 가진 덕트에서 노즐

1.3.3 시료채취장치 (노즐 및 사이클론)의 원활한 입출을 위한 측정공의 직경은 160 mm 이상이어야 한다.

1.3.4 습식 방지시설을 사용하는 경우 배출가스가 포화수증기 상태에서는 수분의 영향으로 측정오차가 클 수 있으므로 적합하지 않다.

1.4 측정방법의 종류

1.4.1 반자동식 채취기에 의한 방법

ES 01301.1 배출가스 중 먼지 - 반자동식 측정법을 따른다.

1.4.2 수동식 (조립) 채취기에 의한 방법

ES 01301.2 배출가스 중 먼지 - 수동식 측정법을 따른다.

1.4.3 자동식 채취기에 의한 방법

ES 01301.3 배출가스 중 먼지 - 자동식 측정법을 따른다.

2.0 용어정의 "내용 없음"

3.0 분석기기 및 기구

3.1 반자동식 채취기에 의한 방법

3.1.1 채취장치의 구성

이 방법에서 사용되는 시료채취장치는 흡입노즐, 사이클론 결합장치 (PM-10, PM-2.5), 여과지홀더, 피토크, 온도센서, 흡입관, 가열장치, 임핀저 트레인, 가스흡입 및 유량측정부 등으로 구성되며 그림 1과 같다.

과 사이클론에 관여하는 방해요소의 영향은 3 % ~ 6 % 수준이다.

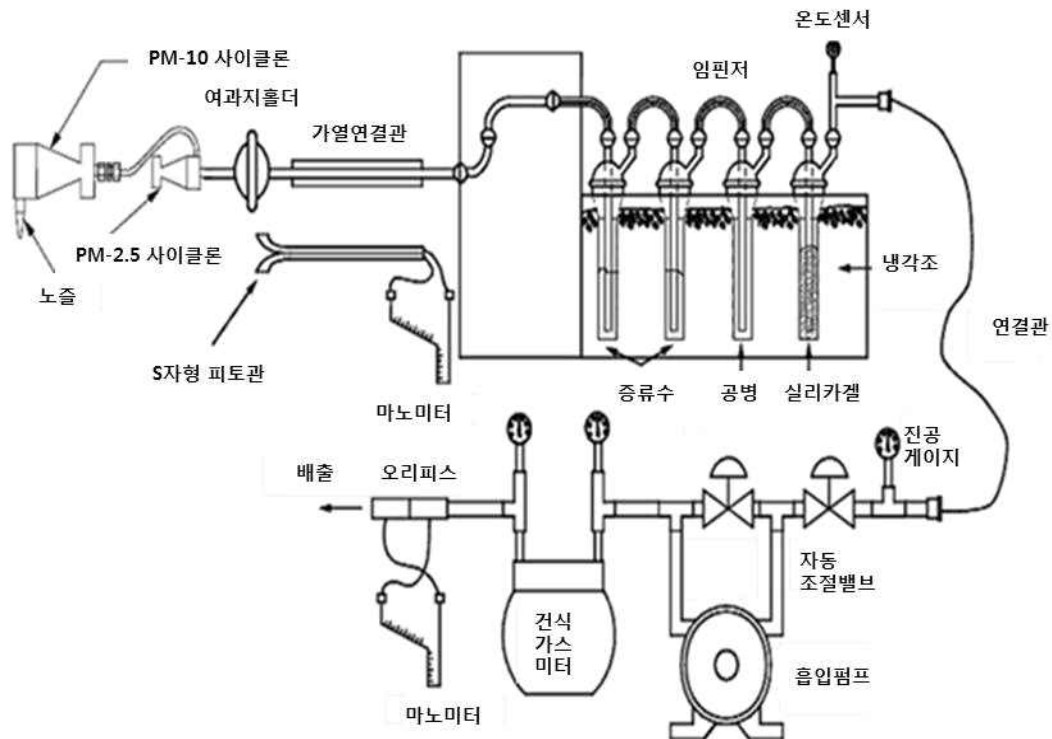


그림 1. 미세먼지 시료채취장치

3.1.1.1 흡입노즐

흡입노즐은 스테인리스강 또는 불소수지로 코팅된 스테인리스강 재질이어야 하며, 다음과 같은 조건을 만족시키는 것이어야 한다.

3.1.1.1.1 흡입노즐의 내경 (d)은 0.1 mm 단위까지의 수준으로 하며, PM-10용 흡입노즐의 내경은 3.18 mm ~ 9.90 mm, PM-2.5의 경우 3.18 mm ~ 5.08 mm 범위에서 흡입노즐을 선택한다.

3.1.1.1.2 흡입노즐 끝은 뾰족하고 점점 가늘어지는 노즐이어야 하며, 꼭짓점은 30° 이하의 예각이 되도록 하고 매끈한 반구모양으로 한다.

3.1.1.1.3 흡입노즐 내외면은 매끄럽게 되어야 하며 흡입노즐은 급격한 단면의 변화와 굴곡이 없어야 한다.

3.1.1.2 사이클론 결합장치

사이클론은 스테인리스강 재질이어야 하며 내부의 O-ring은 플루오로수지 재질로써 변형 없는 한계온도는 205 ℃이므로 주의한다. 배출가스 온도가 205 ℃를 초과할 경우 스테인리스강 재질의 O-ring으로 교체하여 사용한다. 사이클론 구성은 그림 2와 같이 PM-10 사이클론(①), 연결부(②), PM-2.5 사이클론(③)으로 이루어져 있으며 측정 항목에 따라 표 1의 장비구성과 같이 사이클론을 연결한 후 여과지홀더(④)에 결합하여 시료채취를 실시한다. 입경별 사이클론의 최소 및 최대 절단직경 및 PM-10, PM-2.5 측정 장비 구성은 표 1과 같다.

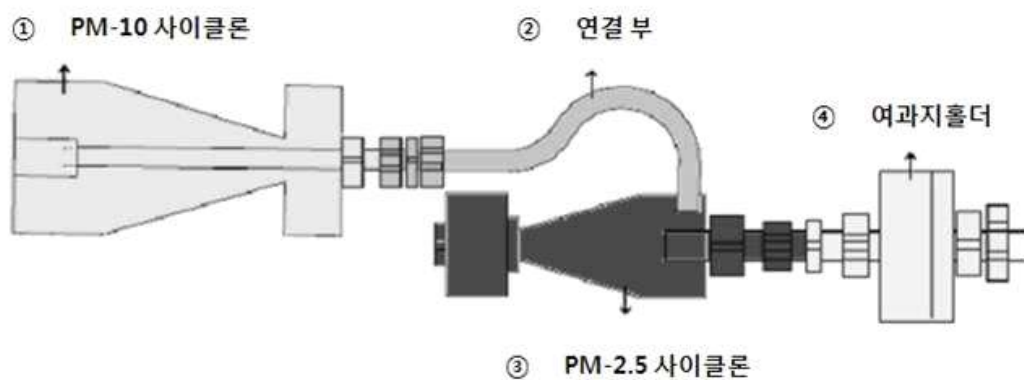


그림 2. 사이클론 결합장치 및 여과지홀더

표 1. 사이클론 절단 직경(D50) 및 측정 장비 구성

사이클론	최소 절단직경 (μm)	최대 절단직경 (μm)	측정장비 구성
PM-10	9	11	①+④
PM-2.5	2.25	2.75	①+②+③+④

(* 사이클론 절단직경은 EPA Method 201A에 제시된 기준임)

3.1.1.3 여과지홀더

여과지홀더는 스테인리스강 재질을 사용한다. 여과지가 파손되지 않으면서 공기가 새지 않게 하기 위하여 O-ring, 가스켓, 스크린이 포함되어 있다. 여과지는 일반적으로 직경 25, 47, 63, 76, 90, 101, 110 mm의 크기가 지원되며, 주로 47 mm를 사용한다. 여

과지홀더는 여과지가 파손되지 않으면서 공기가 새지 않고 여과지 교체 작업이 용이해야 한다.

3.1.1.4 피토관

피토관 (Pitot tube)은 반드시 내열성이 있는 스테인리스강 재질이어야 하며, 피토관 계수가 정해진 L형 피토관 (C: 1.0 전후) 또는 S형 피토관 (C: 0.84 전후)으로서 배출가스 유속을 지속적으로 측정하기 위하여 흡입관에 부착하여 사용한다. 단, 시료채취 항목에 따라 피토관 길이는 달라지므로, 항목에 맞게 교체하여야 한다.

흡입관, 차압게이지, 임펄스 트레인 및 냉각 상자, 가스흡입 및 유량측정부 등은 ES 01301.1 배출가스 중 먼지 - 반자동식 측정법의 3.0과 동일

3.1.2 시험용 기구 및 기기

ES 01301.1 배출가스 중 먼지 - 반자동식 측정법의 3.9.2를 따른다.

4.0 시약 및 표준용액

4.1 시약

4.1.1 원형 여과지

여과지는 석영, 플루오린수지, 유리섬유 재질로 채취 효율이 99.95 % 이상이어야 한다.[4] 압력손실, 반응성이 낮고 흡습성이 적은 것이 좋다. 그리고 취급하기 쉽고 충분한 강도를 가지며 분석에 방해되는 물질을 함유하지 않아야 한다. 직경은 여과지홀더 크기에 적합한 것을 선택한다.

4.1.1.1 시료채취 목적에 따라 다양한 여과지 특성을 고려하여 선택할 수 있다. 중량농도 및 중금속을 분석할 경우 폴리테트라플루오로에틸렌 (PTFE, polytetrafluoroethylene; 테플론) 재질의 여과지를 권하며, 석영여과지는 OC/EC 분석에 권한다.

[4] 기준물질 0.3 μm 다이옥틸프탈레이트로 실험하여 0.05 % 이상 침투되지 않아야 한다.

4.1.2 나머지 시약은 ES 01301.1 배출가스 중 먼지 - 반자동식 측정법의 4.2를 따른다.

4.2 표준용액 "내용 없음"

5.0 시료채취 및 관리

5.1 측정위치, 측정공 및 측정 작업대, 측정점

5.1.1 측정위치

ES 01301.1 배출가스 중 먼지 - 반자동식 측정법의 5.1을 따른다.

5.1.2 측정공 및 측정 작업대

ES 01301.1 배출가스 중 먼지 - 반자동식 측정법의 5.3을 따른다.

5.1.3 측정점

ES 01301.1 배출가스 중 먼지 - 반자동식 측정법의 5.4를 따른다.

5.2 배출가스 온도 측정

ES 01301.1 배출가스 중 먼지 - 반자동식 측정법의 7.2.1을 따른다.

5.3 수분량 측정

ES 01301.1 배출가스 중 먼지 - 반자동식 측정법의 7.2.2를 따른다.

5.4 측정준비

5.4.1 측정용 여과지 전처리의 경우 테플론 여과지는 데시케이터에서 일반 대기압 하

에서 적어도 24 시간 이상 건조시키며 6 시간의 간격을 두고 질량의 차이가 0.1 mg일 때까지 정밀하게 단다. 이때, 데시케이터 조건은 온도 (20 ± 5.6) °C, 상대습도 (35 ± 5) %이다. 석영여과지는 건조기 (110 ± 5) °C에서 (2 ~ 3) 시간 건조시킨 후, 2 시간 이상 데시케이터에서 실온까지 냉각한 후 여과지의 무게를 정밀히 달아 사용할 수 있다. 여과지 무게는 1 분 간격으로 3 회를 0.1 mg까지 정밀하게 달아 그 평균값을 여지의 무게로 한다. 각 여과지의 무게를 칭량하는 동안 정확성을 향상시키기 위하여 여과지는 상대습도가 50 % 이상인 질량 측정 실험실 환경에 2 분 이상 노출되지 않도록 하고, 전처리가 완료된 여과지는 채취면의 방향을 확인한 후 여과지홀더에 끼운다.

5.4.2 임핀저 트레이인 중 첫 번째와 두 번째에는 각각 100 mg의 물 (또는 과산화수소)을 채우고 세 번째는 빈병 그리고 네 번째 임핀저에는 미리 무게를 단 200 g ~ 300 g의 실리카겔을 넣는다.

5.4.3 임핀저 트레이인을 통과하는 배출가스의 온도가 높을 경우는 임핀저 주위에 잘게 부순 얼음을 채워 넣는다.

5.4.4 시료채취를 하기 전에 구성장비에서 누출 여부 (leak check)를 확인한다.

5.5 시료채취

5.5.1 5.1.3과 같이 측정점 수를 선정한다.

5.5.2 5.2와 같이 배출가스의 온도를 측정하고, 배출가스의 조성을 조사한다.

5.5.3 채취된 가스에서 응축을 통한 수분 발생을 예방하기 위하여 사전에 시료채취관을 예열 (preheat)해야 한다. (배출가스온도 ± 10 °C)

5.5.4 5.3과 같이 배출가스의 수분량을 측정한다.

5.5.5 매 채취점마다 배출가스의 정압과 동압을 각각 측정한다. 피토관을 측정공에서 굴뚝 내의 측정점까지 삽입하여 전압공을 배출가스 흐름 방향에 바로 직면시킨 후 압력계 (경사마노미터)로 동압을 측정한다. 동압은 원칙적으로 0.1 mmH₂O의 단위까지 읽는다. 이때, 피토관의 배출가스 흐름방향에 대한 편차를 10° 이하가 되어야 한다.

5.5.6 흡입펌프의 흡입 능력을 감안해 최적의 노즐을 선정하고, 필요 유량 확보를 위한 시간을 결정한다. 배출가스의 흡입은 노즐로부터 흡입되는 가스의 유속과 측정점의 배출가스 유속이 일치하도록 등속흡입을 행하여 시료를 채취한다.

측정유량은 그림 3과 같이 두 가지 (PM-10, PM-2.5)의 유량비 곡선 (performance curves)을 적용하며, 이는 배출가스 온도에 따른 각각의 유량비에 맞춰서 가스 채취 유량비를 결정한다. 단, 사전조사 유무, 측정지점에 따라 유량을 조절할 수 있다. (유량비 곡선은 EPA Method 201A에 제시된 기준임)

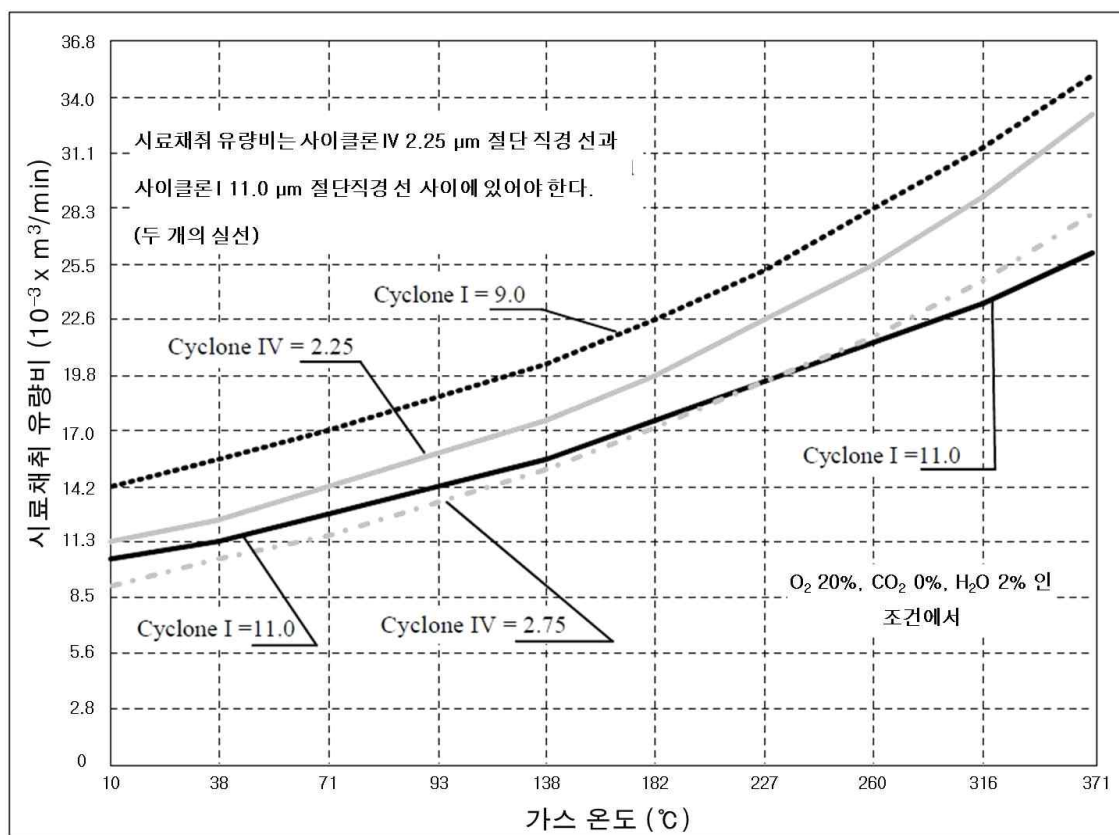


그림 3. PM-10과 PM-2.5 사이클론 사용에 의한 유량비 곡선

한 채취점에서의 채취시간은 항목별로 그림 3에서 가스온도가 고려된 유량비에 적정하게 정하고 모든 채취점에서 채취시간을 동일하게 한다. 시료채취 중에 굴뚝 내 배출가스 온도, 건식 가스미터의 입구 및 출구온도, 여과지홀더 온도, 최종 임핀저 통과 후의 가스온도, 진공 게이지압 등을 기록하고 채취가 끝날 때마다 측정점에서의 가스시료 채취량을 기록해 둔다.

5.5.7 ES 01301.1 배출가스 중 먼지 - 반자동식 측정법의 5.6.14의 등속흡입계수 식을 이용하여 등속흡입계수를 구하고 그 값이 90 % ~ 110 % 범위 내에 들지 않는 경우에는 시료를 다시 채취한다.

5.6 시료회수

5.6.1 시료채취가 모두 끝나면 시료채취장치가 굴뚝 벽면이나 기타 외벽에 긁히거나 부딪히지 않도록 주의하여 측정공으로부터 분리한다. 장치를 실온냉각한 후 사이클론 결합장치에 붙은 먼지를 닦아내고 마개를 한다.

5.6.2 시료채취장치를 바람이 불지 않는 깨끗한 장소로 옮겨 여과지홀더와 사이클론 결합장치를 분리한다.

5.6.3 다음과 같이 각 시료보관용기에 시료를 넣는다.

5.6.3.1 보관용기 1: 여과지홀더에서 조심스럽게 여과지를 분리하여 페트리접시 용기에 넣는다.

5.6.3.2 보관용기 2: 여과지홀더의 내부에 붙은 입자상 물질을 아세톤으로 세척하여 그 세척액을 용기에 넣는다 (현장바탕시험을 위해 아세톤의 일부를 남겨둔다).

5.6.3.3 보관용기 3: 네 번째 임편저에 들어 있는 실리카겔을 용기에 옮겨 넣고 마개를 한다.

[주 1] 시료보관용기를 운반 중에는 반드시 가장 위쪽에 위치하도록 한다. 또한, 시료 보관용기 아래 부분을 차갑게 (얼음, 드라이아이스 등)하여 운반하거나 보관하지 않는다. 또한 용기내의 아세톤 양을 확인하고 운송도중 누수여부를 확인한다. 만약, 누출량이 뚜렷하게 나타나는 경우, 시료채취의 결과물은 무효처리한다.

5.6.3.4 첫 번째, 두 번째 및 세 번째 임편저에 들어 있는 물을 ± 1 mL까지 측정하거나 혹은 저울을 이용해 ± 0.5 g 이내까지 측정한다. (임편저법 사용에 따른 수분량 계산 시 필요)

5.6.3.5 보관용기 3의 실리카겔은 0.5 g까지 무게를 단다. 채취 전후의 실리카겔 무게

차와 임핀저 내의 물 부피 차의 합이 채취된 물의 총량이다. (임핀저법 사용에 따른 수분량 계산 시 필요)

6.0 정도보증/정도관리(QA/QC) "내용 없음"

7.0 분석절차

7.1 테플론 재질의 여과지를 사용할 경우

7.1.1 보관용기 1의 시료를 5.4.1과 동일한 방법으로 데시케이터 내에서 건조시킨 후 무게를 0.1 mg까지 정밀하게 단다.

7.1.2 보관용기 2의 세척액을 비커에 옮기고 방치하여 아세톤을 증발시킨 다음, 데시케이터 내에서 24 시간 동안 건조시켜 무게를 0.1 mg까지 정밀하게 단다. 현장바탕시험 세척액은 시료 회수에 사용된 양과 같은 양의 아세톤을 사용하여 위와 같은 방법으로 행한다.

7.1.3 채취된 미세먼지량은 다음과 같이 구한다.

$$m_d = m_1 + m_2 - m_b \quad (\text{식 1})$$

여기서, m_d : 채취된 미세먼지량 (mg)

m_1 : 보관용기 1의 미세먼지 시료 무게 (채취 전후의 여과지 무게 차) (mg)

m_2 : 보관용기 2의 미세먼지 시료 무게 (mg)

m_b : 현장바탕시험 시 불순물 무게 (현장바탕시험 세척액 분석 전후 무게 차) (mg)

7.2 석영 재질의 여과지를 사용할 경우

7.2.1 보관용기 1의 시료를 $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ (배출가스온도가 $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ 이상일 경우 배출가스온도와 동일하게 건조)에서 2 시간 ~ 3 시간 건조시킨 후, 2 시간 이상 방치한 후 5.4.1에 따라 무게를 단다.

7.2.2 이후의 분석은 7.1의 7.1.2 ~ 7.1.3과 동일하게 한다.

8.0 결과보고

8.1 농도의 계산

배출가스 중의 PM-10, PM-2.5 농도는 표준상태 (0 °C, 760 mmHg)로 환산한 건조 배출가스 1 m³ 중에 포함되어 있는 먼지의 무게로 표시하며 다음 식에 의해 소수점 둘째 자리까지 계산하고 소수점 첫째 자리로 표기한다.

$$C_n = \frac{m_d}{V_m' \times \frac{273}{273 + \theta_m} \times \frac{P_a + \Delta H / 13.6}{760}} \times 10^3 \quad (\text{식 } 2)$$

여기서, C_n : PM-10, PM-2.5 농도 (mg/Sm³)

m_d : 채취된 먼지량 (mg)

V_m' : 건식가스미터에서 읽은 가스시료 채취량 (L)

θ_m : 건식가스미터의 평균온도 (°C)

P_a : 측정공 위치에서의 대기압 (mmHg)

ΔH : 오리피스 압력차 (mmH₂O)

8.2 측정값의 기록

이상의 방법에 의하여 측정 또는 계산하여 얻은 결과는 다음과 같이 정리하여 기록해 두어야 한다.

8.2.1 측정일시

8.2.2 측정대상의 조건

8.2.2.1 발생원의 종류

8.2.2.2 발생원의 사용 상황

8.2.2.3 측정위치

8.2.2.4 굴뚝의 형상 위치 및 대략 치수

8.2.2.5 측정점의 수 및 위치

8.2.3 배출가스의 조건

8.2.3.1 배출가스의 온도 (θ_s)

8.2.3.2 배출가스 수분량 (X_w)

8.2.3.3 배출가스 정압 (P_s)

8.2.3.4 배출가스 유속 (V)

8.2.3.5 습한 배출가스의 유량 (V_m)

8.2.3.6 건조가스의 유량 (V_m)

8.2.4 시료의 채취조건

8.2.4.1 채취기의 종류, 재질, 치수

8.2.4.2 농도 측정방법 (채취방법, 흡입노즐, 먼지채취부의 배치, 먼지의 건조 조건)

8.2.4.3 등속흡입 유량 (q_m)

8.2.4.4 흡입시간 (t)

8.2.4.5 흡입가스량 (V_m)

8.2.4.6 채취된 미세먼지량 (m_d)

8.2.5 입경별 먼지 농도 (C_n)

8.2.6 측정자 성명

9.0 참고자료

9.1 대기오염공정시험기준 ES 01301.1, 배출가스 중 먼지 - 반자동식 측정법, 국립환경과학원, (2020)

9.2 “굴뚝 배출가스 중 미세먼지(PM-2.5 & PM-10) 측정 분석방법 자료집”, 국립환경과학원, (2011)

9.3 United States Environmental Protection Agency (US EPA) Method 1, “Sample and velocity traverses for stationary sources”, US EPA, (2020)

9.4 United States Environmental Protection Agency (US EPA) Method 2, “Determination of Stack Gas Velocity and Volumetric Flow Rate (Type S Pitot Tube)”, US EPA, (2017)

9.5 United States Environmental Protection Agency (US EPA) Method 5, “Determination of particulate matter emissions from stationary sources”, US EPA, (2019)

9.6 United States Environmental Protection Agency (US EPA) Method 5L, “Determination of Low Level Particulate Matter Emissions From Stationary Sources”, US EPA, (2019)

9.7 United States Environmental Protection Agency (US EPA) Method 17, “Determination of particulate matter emissions from stationary sources”, US EPA, (2017)

9.8 United States Environmental Protection Agency (US EPA) Method 201A, "Determination of PM10 and PM2.5 emissions from stationary sources (Constant Sampling Rate Procedure)", US EPA, (2020)

9.9 United States Environmental Protection Agency (US EPA) Method 202, "Dry Impinger Method for Determining Condensable Particulate Emissions from Stationary Sources)", US EPA, (2017)

9.10 United States Environmental Protection Agency (US EPA), "Summary of Public Comments and Responses for : Methods for Measurement of Filterable PM10 and PM2.5 and Measurement of Condensable Particulate Matter Emissions from Stationary Sources", US EPA, (2010)

10.0 부록

표 2. 시험기준 요약표

배출가스 중 미세먼지 (PM-10 및 PM-2.5) (Fine Particulate Matter (PM-10 and PM-2.5) in Flue Gas)	
분자식 및 특징:	해당 없음, 공기역학적 직경이 10 μm (이하 PM-10)와 2.5 μm (이하 PM-2.5) 이하인 미세먼지
정량범위:	0.1 mg/Sm ³ 이상
간섭물질:	배출가스 온도가 260 $^{\circ}\text{C}$ 초과할 경우 적합하지 않음
시료채취	
방법:	여과지 채취법 (반자동식, 수동식, 자동식)
흡수액:	해당 없음
흡입속도:	등속흡입
표준채취량:	400 L 이상 또는 40 분 이상
이동:	상온
보관:	상온
분석용 시료용액:	해당 없음
Blank:	바탕시험용 여과지
측정	
방법:	중량법
물질:	먼지
표준물질:	해당 없음
검정곡선:	해당 없음
분석저울:	0.1 mg까지 측정할 수 있는 저울
정도관리	
주기:	해당 없음
방법검출한계:	해당 없음
정밀도:	해당 없음
정확도:	해당 없음
검정곡선:	해당 없음
방법바탕시료:	해당 없음