



## 국내공정시험기준과 ISO 방법을 이용한 고정오염원 미세먼지(PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>) 측정 방법 및 입경분율 비교: 석탄화력발전소, 석유정제시설 중심으로

### Comparison of Measurement Methods and Size Fraction of Fine Particles (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>) from Stationary Emission Source Using Korean Standard and ISO: Coal Power Plant and Refinery

윤종상 · 한세현 · 정용원 · 전기준\*

인하대학교 환경공학과

(2017년 7월 10일 접수, 2017년 8월 17일 수정, 2017년 8월 22일 채택)

Jong-Sang Youn, Sehyun Han, Yong-Won Jung and Ki-Joon Jeon\*

Department of Environmental Engineering, Inha University

(Received 10 July 2017, revised 17 August 2017, accepted 22 August 2017)

#### Abstract

We report mass concentration and size fraction of TPM, PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> according to Korea standard test method (ES 01301.1 and ES 01317.1) and ISO 23210 methods. Particulate matters were sampled in large stationary emission sources such as a coal power plant and B-C oil refinery. The Korea standard test method PM mass concentrations showed 3~3.5 times larger than the cascade impactor method. On the other hand, the size fraction results showed less than 5% difference (i.e. PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>) between two methods. Moreover, the correlation coefficient ( $r^2$ ) is 0.84 between TPM results of the Korea standard test method and CleanSYS. These results suggested not only improvement of current test criteria in terms of technical and theoretical aspects. Further, additional measurements are required in various large stationary sources to compare current field data.

**Key words :** PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, Stationary emission source, Coal power plant, Standard test method

#### 1. 서 론

1990년대에 들어서는 먼지의 인체에 미치는 위해성이 높다는 사실이 밝혀지면서, 현재에는 대기 중 PM<sub>2.5</sub>

관리의 필요성이 대두되고 있으며(NIER, 2012), 최근에는 미세먼지의 위해성과 인체에 미치는 영향에 대한 연구가 활발히 진행 중이다(Chang *et al.*, 2012; Pope *et al.*, 2004). 특히 미세먼지는 호흡기 질환, 심혈관 질환, 사망률과 상관관계가 있다고 밝혀졌다(Chiu *et al.*, 2013; Brook *et al.*, 2010; Laden *et al.*, 2006).

최근 환경부는 PM<sub>2.5</sub> 대기환경기준(일평균 50 µg/m<sup>3</sup>,

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)32-860-7509, E-mail : kijeon@inha.ac.kr

연평균 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )을 신설하여 2015년부터 시행하였으나 배출사업장에 대한 대기배출허용기준이 강화된 반면 배출시설에 대한 PM<sub>2.5</sub>의 배출특성과 현황 파악은 미미한 실정이다(NIER, 2009). 또한, 실제 국내 배출사업장에 적용된 배출계수는 미국의 실측자료를 바탕으로 산정되었으며 현재 일부 국내 실측자료를 바탕으로 점진적으로 개정 중에 있다.

대형고정배출원에서 배출되는 입자상 물질은 굴뚝에서 직접 배출되는 1차 PM과 대기에서 광화학 반응 혹은 구름에서 액상 반응하여 생성되는 2차 PM으로 구성된다. 굴뚝에서 직접 배출되는 1차 PM은 필터에 포집되는 여과성(Filterable) PM과 굴뚝 조건에서 증기상으로 존재하나 대기 중으로 배출되는 즉시 냉각과 희석 과정을 통해 응축 또는 반응하여 입자상 물질로 되는 응축성(Condensable) PM으로 구분하며 응축성 PM은 PM<sub>2.5</sub>로 간주한다(Lu *et al.*, 2016; Corio and Sherwell, 2000). 현재 국내에서는 여과성 PM에 대한 공정시험기준만 존재하고 있다.

국내에서는 굴뚝 배출가스 중 미세먼지(PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>)에 대한 국내공정시험기준(ES 01317.1)으로 미국 EPA Method 201A 측정 방법이 사용되고 있다(EPA, 2014). 하지만 배출사업장에서의 현장적용에 있어 측정구 직경 크기(약 160 mm) 제한으로 인한 제약이 있으며 총먼지(TPM) 시료 채취에 비해 장시간의 시료 채취가 필요하다. 국제표준시험방법인 ISO 23210은 측정구 직경이 100 mm인 경우에 적용 가능하고 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>를 동시에 측정할 수 있는 장점이 있으나 TPM 측정에 이용할 수 없고, 시료 채취 과정의 난이도가 높은 단점이 있다(ISO, 2009).

기존에 국내에서 진행했던 대형고정배출원 연구들은 굴뚝에서의 미세먼지 측정 시 시간, 공간의 부족 및 많은 인력을 필요로 하는 제한 사항이 있어 국내공정시험기준과 ISO 23210 방법을 따로 측정하거나 한 가지 측정 방법만을 사용하여 측정하였다(Kim *et al.*, 2017; Kim and Hwang, 2016; Jang *et al.*, 2011).

국내 실시간 굴뚝원격감시체계인 CleanSYS는 TPM만 측정하여 배출자료를 구축하고 있어 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 배출량 산정을 위해 직접 측정한 질량 농도 결과를 사용하여 TPM 대비 입경분율 산정이 필요한 실정이다. 굴뚝에서 보다 효율적인 먼지 측정 방법을 고찰하기 위해 본 연구에서 대형고정배출원인 화력발전소와

석유정제시설에서 국내공정시험기준과 ISO 23210 방법을 동시 측정하여 입경별 질량 농도, 입경분율을 분석하였으며 이들 자료를 CleanSYS의 TPM 측정자료와 비교하였다. 본 연구의 결과는 국내공정시험기준의 개선에 참고자료가 될 것으로 사료된다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 배출가스 중 먼지 측정 방법

현장 실측을 통한 굴뚝 미세먼지 측정은 TPM의 경우 국내공정시험기준(ES 01301.1; MOE, 2014a)을 사용하였다(그림 1a). 이 시료 채취 방법은 흡인노즐, 흡인관, 피토크, 여지홀더, 여과지 가열장치, 임핀저 트레인, 가스흡인 및 유량 측정부 등으로 구성된다. PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>는 사이클론을 이용한 EPA 201A 방법인 국내공정시험기준(ES 01317.1; MOE, 2014b)과 캐스캐이드 임팩터를 사용한 ISO 23210을 대상으로 측정을 실시하였다. ES 01317.1 방법은 굴뚝에서 발생하는 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>를 측정하기 위해 ES 01301.1 방법에 입경분리장치로 사이클론(Cyclone)을 사용하며 등속 흡인하여 측정한다(그림 1b). 필요에 따라 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 입경분리장치를 동시에 부착하여 입자 크기에 따른 질량 농도를 측정하기도 한다. 국제표준시험방법인 ISO 23210 방법은 국내 규격(Korean standard; KS)으로 인정하고 있으며, 2단 캐스캐이드 임팩터(Cascade impactor)를 이용하여 저농도(<40  $\text{mg}/\text{m}^3$ )에서 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>를 동시에 측정하는 대표적인 방법이다(그림 1c). 일반 대기에서 캐스캐이드 임팩터를 사용한 방법으로 측정하는 TPM의 질량 농도는 사용이 가능하지만 굴뚝 측정을 위한 ISO 23210 방법은 측정된 TPM 질량 농도를 사용할 수 없다고 명시하고 있다(ISO, 2009).

본 연구에서는 그림 2와 같이 국내공정시험기준과 ISO 23210 방법을 동시에 측정하여 비교 연구를 진행하였다.

시료 채취 유량은 측정시설의 가스온도, 압력, 유속 등을 고려하여 측정하였으며 시료 채취 및 중량 농도 분석을 위한 여지는 Teflon 재질의 여지(47 mm, Whatman)를 사용하였다. 국내공정시험기준을 사용한 화력발전소 굴뚝에서의 입경별 시료 채취는 TPM, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 각각의 입경별 농도를 3회씩 총 9회 측정하였으

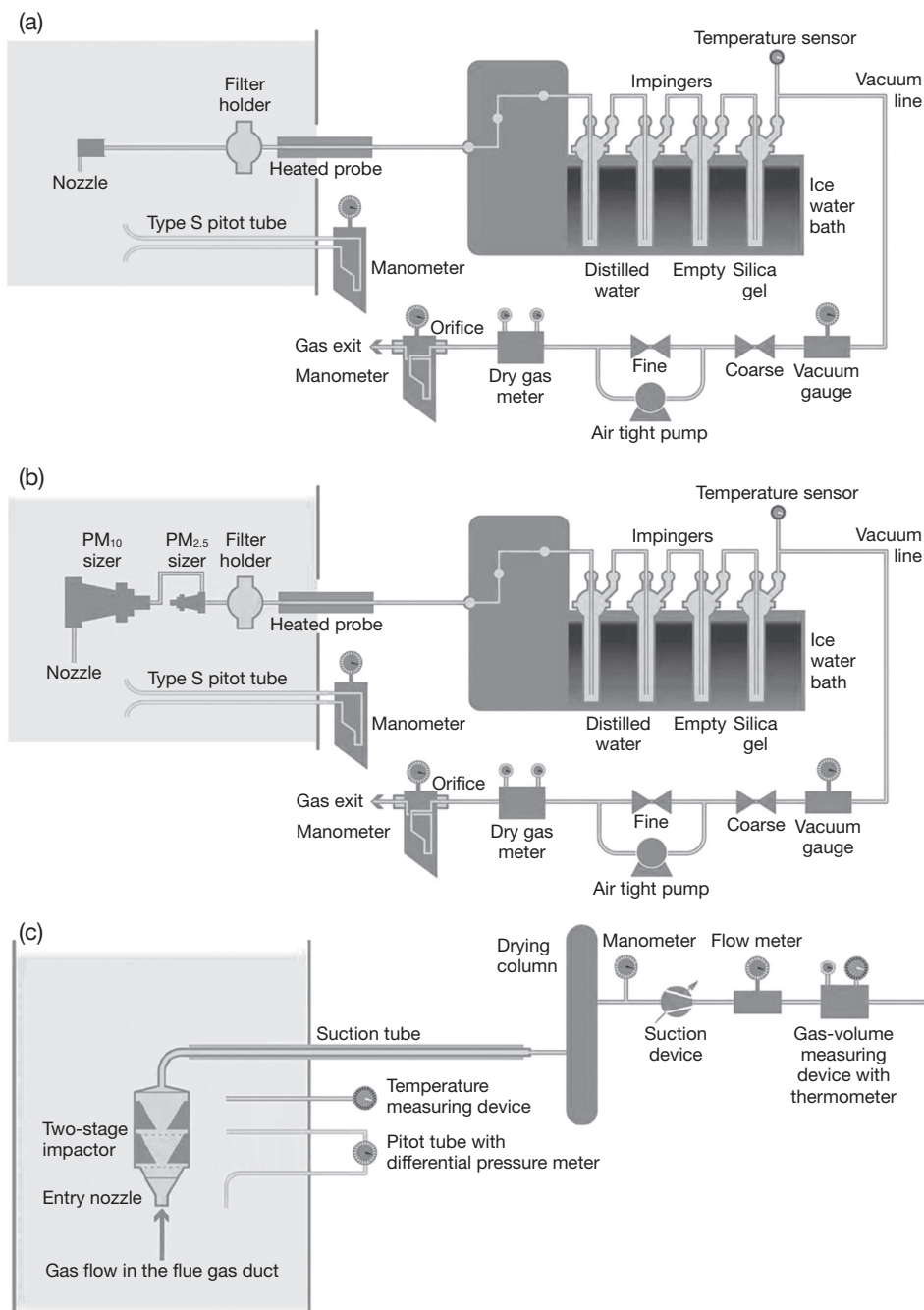


Fig. 1. Conceptual design of (a) ES 01301.1, (b) ES 01317.1 and (c) ISO 23210.

며, ISO 23210 방법은 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>가 동시 측정 가능 하지만 세척 및 준비 과정의 제한이 있어 총 9회 중 4 회 동시 측정을 진행하였다. 또한 먼지가 입경분리장

치에 충돌하여 생기는 먼지 손실을 방지하기 위해 입 경분리장치에 그리스를 도포 후 사용하였다. 석유정 제시설은 국내공정시험기준을 사용하여 TPM, PM<sub>10</sub>,

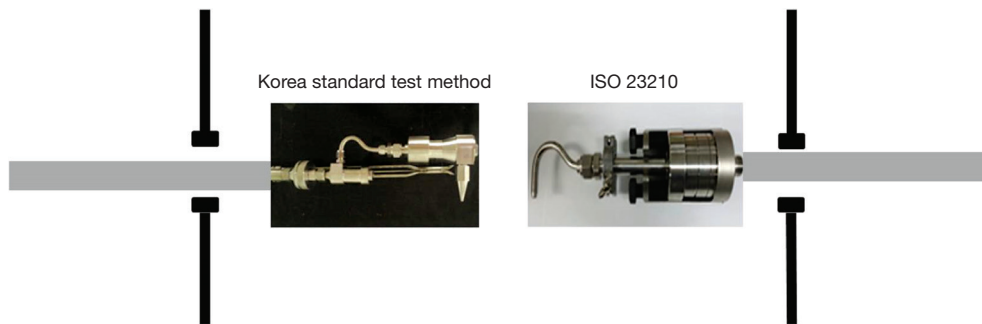


Fig. 2. Schematic diagram of simultaneous PM measurement in stack.

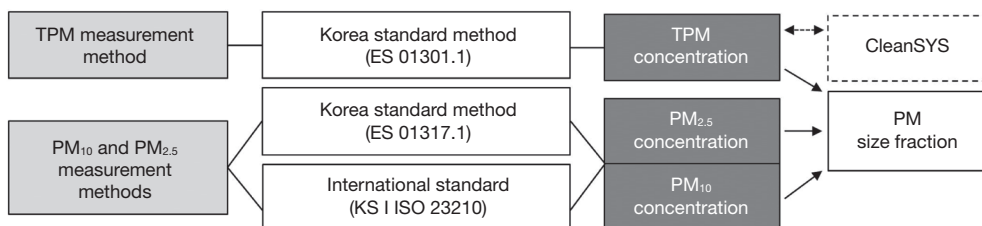


Fig. 3. Summary of stack PM measurement methods.

$PM_{2.5}$ 의 각 입경별 농도를 6회씩 총 18회 측정하였으며, ISO 23210 방법으로 2회 동시 측정하였다. 따라서, CleanSYS와의 질량 농도 및 TPM에 대한  $PM_{10}$ 과  $PM_{2.5}$ 의 입경분율에 대한 비교는 국내공정시험기준의 결과만 진행하였다.

## 2.2 연구추진 체계

고농도와 저농도 배출원에서 국내공정시험기준과 ISO 23210 두 방법 간의 동시 측정을 통한 측정 결과를 비교평가 하였으며 연구 추진체계를 그림 3에 나타냈다.

본 연구에서 선정한 시료 채취 지점은  $PM_{2.5}$  배출량이 가장 많은 에너지산업연소 중 공공발전시설의 화력발전소(유연탄 사용)와 화력발전소에 비해 비교적 저농도 배출시설인 석유정제시설(B-C유 사용)을 측정대상배출시설로 선정하였다. 본 연구에서 선정한 먼지배출시설은 효과적인 대기오염물질 저감을 위해 화력발전소는 탈황(Fuel gas desulfurization; FGD), 탈질(Selective catalytic reduction; SCR), 집진 장치를 사용하고 있으며 석유정제시설은 집진 장치만 사용하였다.

Table 1. Summary of sampling sites.

| Plant       | Fuel                           | Capacity                 | Prevention facilities |
|-------------|--------------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Power plant | Coal                           | 870 MW                   | SCR, ESP, FGD         |
| Refinery    | B-C oil (0.3%)<br>Fuel gas 10% | 10885 kg/hr <sup>3</sup> | ESP                   |

화력발전소와 석유정제시설 모두 먼지 제거를 위한 집진 장치로 전기집진장치(Electrostatic Precipitator; ESP)를 사용하였다(표 1).

본 연구에서 사용한 동시 측정의 경우 굴뚝에서 배출되는 먼지의 농도가 안정화 되었을 때 비교적 일정하다는 전제하에 측정을 실시하였으며, 두 개의 측정소 중 화력발전소에서 30분 간격으로 실시간 측정된 CleanSYS의  $SO_x$ ,  $NO_x$ , 유속, 온도를 그림 4에 나타내었다.  $SO_x$ ,  $NO_x$ , 유속, 온도의 평균은 각각 26.2 ppm, 23.1 ppm, 23.1 m/s, 88.5°C로 나타났으며, 각 변수의 상대적 차이를 나타내는 변동계수의 경우 각각 9.9%, 2.2%, 1.9%, 1.9%로 나타났다.  $SO_x$ 는 다른 인자들보

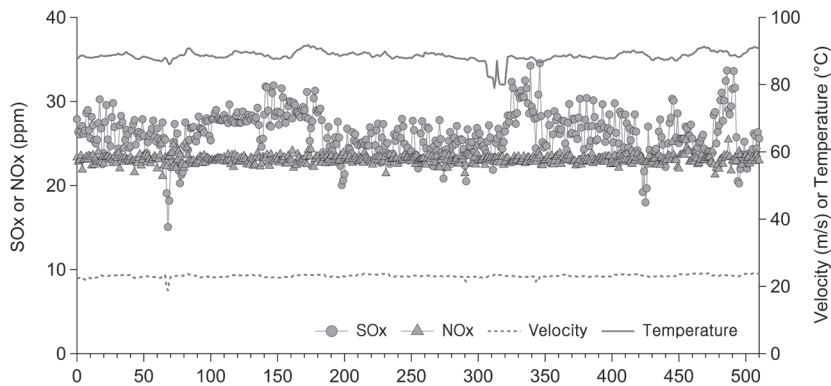


Fig. 4. CleanSYS SOx, NOx, velocity, and temperature data collected every 30 minutes from power plant.

다 변동계수가 큰 것으로 나타났지만 비교적 일정한 범위(20~30 ppm) 내에서 농도를 유지하고 있다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 입경별 질량 농도

국내공정시험기준과 국제표준시험방법의 입경별 질량 농도 비교를 위해 고농도 배출원인 화력발전소와 저농도 배출원인 석유정제시설에서 동시 측정을 진행하였다. TPM, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 질량 농도의 보정을 위해 표준 산소 농도 배출허용기준(MOE, 2015)에서 제시한 유연탄사용시설 6%, 석유정제시설 4%를 사용하였다.

그림 5는 화력발전시설에서의 국내공정시험기준을 사용한 TPM, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 실측 농도와 ISO 23210 방법을 사용하여 측정한 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 농도를 나타내었으며, 각 시료 포집시간 동안의 CleanSYS 먼지 농도 평균값도 제시하였다. 유연탄(황 함유량 0.54%)을 사용하는 화력발전소의 경우 발전시설 1곳에서 3번의 측정을 진행하였다. 2차 측정에서 국내공정시험기준으로 PM<sub>10</sub>, TPM, PM<sub>2.5</sub> 순으로 진행하였는데, 측정 농도가 역전되는 사례가 발생하였다. 이를 확인하기 위해 측정 이후 CleanSYS 측정 결과를 검토하였으며, CleanSYS 먼지 농도의 증감에 따른 TPM, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 경향성을 확인하였다. 이에 최종 입경별 농도 비교는 1차와 3차 측정자료만 대상으로 하였다. 국내공정시험기준을 사용

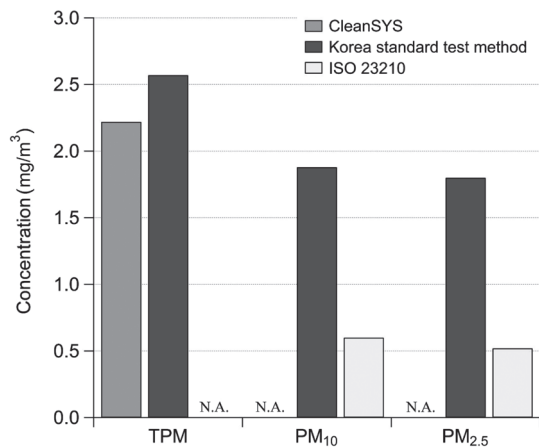


Fig. 5. Comparison PM mass concentration between Korea standard test method and ISO 23210 method (power plant).

하여 측정한 경우 TPM, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 질량 농도는 각각 2.57 mg/m<sup>3</sup>, 1.88 mg/m<sup>3</sup>, 1.80 mg/m<sup>3</sup>였다. 반면 ISO 23210 방법의 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 질량 농도는 0.62 mg/m<sup>3</sup>, 0.58 mg/m<sup>3</sup>로 국내공정시험기준의 결과와 비교했을 때 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 모두 약 3배 낮은 결과를 나타냈다. 또한, 국내공정시험기준의 TPM 질량 농도(2.57 mg/m<sup>3</sup>)는 측정시간 동안의 CleanSYS의 평균 먼지 농도(2.22 mg/m<sup>3</sup>)보다 약 1.2배 높은 결과를 보였다.

화력발전소에 비해 저농도 배출원인 석유정제시설에서도 입경별 질량 농도를 측정하였으며, 그림 6에 입경별 질량 농도를 나타내었다. 석유정제시설의 경우



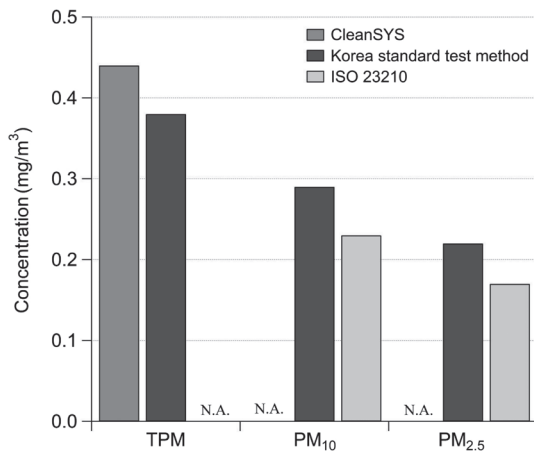


Fig. 6. Comparison PM mass concentration between Korea standard test method and ISO 23210 method (refinery).

국내공정시험기준의 결과 TPM, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 농도는 각각 0.38 mg/m³, 0.29 mg/m³, 0.22 mg/m³이었다. ISO 23210의 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 농도는 각각 0.23 mg/m³, 0.17 mg/m³로 국내공정시험기준 결과보다 약 1.2~1.3배 낮게 나타났다. 국내공정시험기준의 TPM 농도(0.38 mg/m³)와 CleanSYS 먼지 평균 농도(0.44 mg/m³)를 비교했을 때 화력발전소와는 반대로 CleanSYS의 평균 먼지 농도가 약 1.2배 높게 나타났다.

두 시험기준 간의 입경별 농도 차이는 석유정제시설(1.2~1.3배)이 화력발전소(약 3배)보다 작게 나타났다. 이는 저농도 배출원의 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 질량 농도 측정에 국내공정시험기준과 ISO 23210 방법을 함께 사용할 수 있음을 의미한다. 굴뚝에서 배출되는 먼지 측정을 위한 국내공정시험기준에 국제표준시험방법이 추가될 경우 저농도 배출원에서 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 질량 농도 측정을 동시에 진행할 수 있다는 장점이 있다.

## 3.2 입경별 분율

### 3.2.1 굴뚝 미세먼지 동시 측정 방법의 입경분율 비교

본 연구에서 시행한 화력발전소에서의 입경별 질량 농도 측정 결과를 이용하여 국내공정시험기준의 PM<sub>10</sub>/TPM, PM<sub>2.5</sub>/TPM, PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>과 ISO 23210 방법의 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>에 대한 입경분율을 비교하였다(그림 7). 국

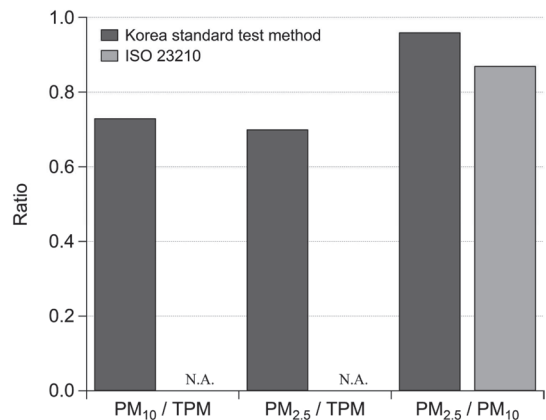


Fig. 7. Size fractions (PM<sub>10</sub>/TPM, PM<sub>2.5</sub>/TPM, and PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>) by Korea standard test method and ISO 23210 method from power plant.

내공정시험기준을 적용하여 측정한 결과 입경분율은 PM<sub>10</sub>/TPM, PM<sub>2.5</sub>/TPM, PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 각각 0.73, 0.70, 0.96으로 나타났다. ISO 23210 방법은 TPM을 측정할 수 없어 TPM에 대한 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 입경분율은 산정하지 않고 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>만 산정하였다. 두 시험 방법의 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 질량 농도 차이는 약 3배였지만 입경분율 비교에서 ISO 23210 방법의 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>은 0.92로 국내공정시험기준의 결과(0.96)보다 약 4% 작은 결과로 유사한 결과를 나타냈다. 이는 ISO 23210 방법으로 고농도 배출원에서 측정한 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 질량 농도 사용은 불가능하지만 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 입경분율의 사용은 가능할 것으로 사료된다.

석유 정제시설에서의 입경분율 산정 결과는 그림 8에 나타내었다. 국내공정시험기준의 입경분율은 PM<sub>10</sub>/TPM, PM<sub>2.5</sub>/TPM, PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 각각 0.76, 0.58, 0.76으로 산정되었으며, ISO 23210 방법의 경우 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>이 0.74로 나타났다. 화력발전소에서의 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 입경분율 결과와 유사하게 석유정제시설에서 두 시험 방법 간 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 입경분율은 그 차이가 약 1~5% 미만으로 매우 유사하게 나타났다.

이러한 측정 결과들을 종합하여 검토하면, ISO 23210 방법의 경우 고농도 배출원에서 먼지 입경별 질량 농도의 사용에는 의문점은 갖고 있지만 입경분율의 사용은 가능할 것으로 사료되며, 저농도 배출원의 경우 질량 농도 결과뿐 아니라 입경분율의 사용도 가능

할 것으로 보인다. 하지만, 본 연구의 측정 데이터 수가 통계적으로 유의미한 결과를 보여주기에는 부족한 점이 있어 향후 다양한 대형고정배출원에서의 추가적인 동시 측정을 통한 자료구축이 필요할 것으로 사료된다.

### 3.2.2 국내외 자료와의 입경분율 비교

본 연구에서 국내공정시험기준을 사용한 입경분율 결과를 국내외 자료와 비교하여 표 2에 제시하였다. 국내 자료는 환경부 대기오염물질 통합관리시스템 (CAPSS) 자료를 사용하였으며, 국외 자료는 US EPA AP-42 (EPA, 2015)와 EEA CORINAIR (EEA, 2013) 배

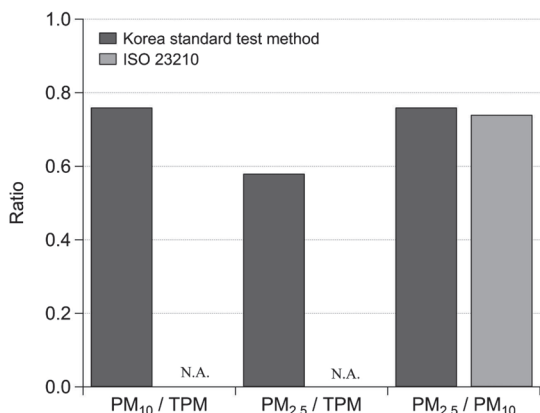


Fig. 8. Korea standard test method and ISO 23210 method PM size fractions (PM<sub>10</sub>/TPM, PM<sub>2.5</sub>/TPM, and PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>) from refinery.

출량 자료를 사용하였다. PM<sub>10</sub>/TSP는 본 연구에서 진행한 화력발전소와 석유정제시설의 입경분율이 각각 73.1%, 85.3%로 나타났지만, 국내외 자료의 경우 이보다 작은 59%~75%로 나타났다. 본 연구의 측정장소의 경우 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 이상의 입자는 방지시설에서 대부분 제거된 것으로 사료된다. 이러한 경향은 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 결과에서 두드러지게 나타나는데, 국내외 자료가 약 38%~80%의 분율을 보인 데 반해 화력발전소와 석유정제시설의 결과는 모두 90%가 넘는 입경분율을 보였다. 이는 PM<sub>10</sub> 입자의 대부분이 PM<sub>2.5</sub> 입자가 차지하고 있다는 것을 의미하는데, 본 연구는 방지시설이 잘 갖춰진 장소에서 시료 채취를 진행한 반면 국내외 참고 자료는 방지시설이 잘 갖춰지지 않은 상태에서 측정되었기 때문에 사료된다.

### 3.3 TPM 측정 결과와 CleanSYS 자료 비교

국내 대기오염 공정시험기준의 47 mm 원형 여지를 이용한 화력발전소에서 국내공정시험기준으로 TPM을 측정한 결과와 측정시간 동안 CleanSYS 먼지 농도 평균값의 상대적 차이를 비교하여 표 3에 나타내었다. ISO 23210 방법은 TPM의 질량 농도의 직접적인 측정이 불가능하여 CleanSYS 먼지 농도와 직접적인 비교에서는 제외하였다. 하지만, 본 연구 측정 자료의 부족함을 보완하기 위해 국내공정시험기준을 사용하여 2 곳의 화력발전소에서 TPM을 측정한 선행연구 결과 (INI, 2016)를 포함하여 총 3곳의 TPM 측정 결과를 CleanSYS 먼지 측정 결과와 비교하였다. 3곳의 시료

Table 2. Summary of TPM, PM<sub>10</sub>, and PM<sub>2.5</sub> size fraction (this study, CAPSS, US EPA, and EEA CORINAIR).

| Sources                  | Fuel               | Prevention facilities | PM <sub>10</sub> /TPM | PM <sub>2.5</sub> /TPM | PM <sub>2.5</sub> /PM <sub>10</sub> |
|--------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------------------|
| Power plant (this study) | Coal               | SCR, ESP, FGD         | 0.73                  | 0.70                   | 0.96                                |
| Refinery (this study)    | B-C: 90%, F/G: 10% | EP                    | 0.85                  | 0.79                   | 0.92                                |
| CAPSS                    | B-C: 0.3%          | —                     | 0.59                  | 0.23                   | 0.38                                |
| U.S. EPA (AP-42)         | B-C                | Uncontrolled          | 0.71                  | 0.52                   | 0.73                                |
|                          |                    | EP                    | 0.63                  | 0.41                   | 0.65                                |
| EU CORINAIR              | B-C                | Uncontrolled          | 0.75                  | 0.60                   | 0.80                                |

Table 3. Comparison between TPM and CleanSYS using data from this study and past studies.

| Site                        | # of samples | Measured TPM (mg/m <sup>3</sup> ) | CleanSYS (mg/m <sup>3</sup> ) | Measured TPM / CleanSYS |
|-----------------------------|--------------|-----------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| Power plant (This study)    | N = 3        | 2.17                              | 2.19                          | 0.99                    |
| Power plant (Past study #1) | N = 6        | 1.53                              | 1.57                          | 0.97                    |
| Power plant (Past study #2) | N = 5        | 4.41                              | 5.64                          | 0.78                    |

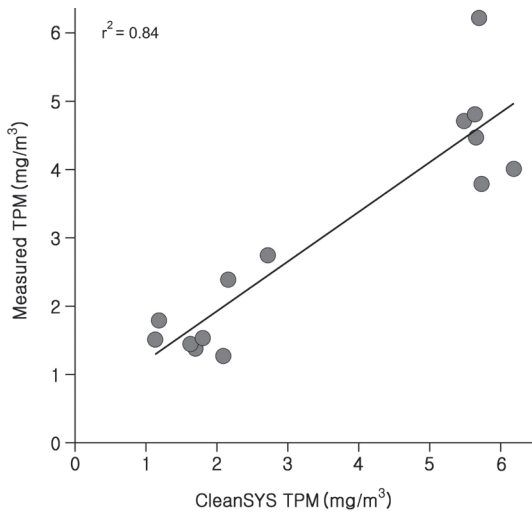


Fig. 9. Relationship between TPM and CleanSYS mass concentrations (n = 14).

채취 지점의 TPM 측정 결과는 CleanSYS 먼지 농도와 매우 유사한 결과를 보였다. 본 연구에서 측정했던 TPM은 2.17 mg/m<sup>3</sup>로 동일한 시간 CleanSYS 먼지 농도 평균값 2.19 mg/m<sup>3</sup>보다 약 1% 작게 측정되었다. 선행연구 1과 2의 결과도 TPM 측정값이 CleanSYS 먼지 측정 결과보다 각각 3%, 22% 작게 측정되어 선행연구 결과 역시 작은 차이를 보였다. 본 연구와 선행연구의 시료 채취 횟수는 총 14회로 TPM 측정 결과와 CleanSYS 결과의 상관관계를 그래프로 나타내었을 때, 시료 채취 지점별 상대적인 질량 농도의 차이는 있지만 상관계수( $r^2$ )는 0.84로 매우 높은 상관관계를 보였다(그림 9). 이는 현재 TPM 측정에 사용하고 있는 국내공정시험기준과 CleanSYS의 먼지 측정자료 간의 신뢰성을 보여주고 있으며, CleanSYS 먼지 측정자료와 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 측정자료 간의 직접적인 비교도 가능할 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 굴뚝 미세먼지 측정 방법을 조사하고, 각 국내공정시험기준과 ISO 23210 방법에 해당하는 입경분리장치의 장단점의 비교를 위해 같은 장소에서 같은 시간 동안 두 시험기준을 사용하여 동시 측정

을 진행하였으며 측정 결과를 통해 국내공정시험기준의 개선점을 고찰하였다.

국내공정시험기준은 배출가스 중 먼지 농도가 고농도일 경우에 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 사이클론 결합장치를 이용하여 1회 샘플링으로 여지시료 측량, 아세톤 세척 방법의 시료회수 등을 통해 TPM, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 농도를 동시에 측정할 수 있으나 정량적인 농도평가가 쉽지 않아, 저농도 조건에서는 적용하기가 어려웠다. 또한 CleanSYS 자료와 실측 TPM을 연계하여 농도 비교가 가능하지만 160 mm 이상의 측정공의 사이즈 문제로 입경별 측정을 따로 진행해야 한다는 제한사항이 존재했다. 국제표준시험방법은 국내공정시험과 달리 작은 측정공에서 PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>의 농도를 동시에 측정 가능하였지만, TPM 질량 농도를 직접적으로 측정할 수 없는 단점이 있어 PM<sub>10</sub>/TPM, PM<sub>2.5</sub>/TPM의 입경분율 산정과 CleanSYS 자료와 연계 사용이 불가능한 단점이 있었다.

국내공정시험기준과 ISO 23210 방법의 비교평가 결과 시험기준 간 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub>의 입경분율 차이는 고농도와 저농도 배출원 모두 작게 나타났다. 입경별 질량 농도의 결과는 고농도 배출원에서 두 시험기준 간 차이가 매우 큰 반면 저농도 배출원에서는 유사하게 나타났다. 따라서, 향후 먼지(TPM, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>) 배출의 효과적인 관리 및 보다 정확한 배출량 산정을 위해 현재 굴뚝 미세먼지 측정의 공정시험기준은 기술적·이론적인 측면에서 다소 보완이 필요할 것으로 보이며, 국내 실정을 고려한 측정 방법에 대한 지침 마련 등이 필요할 것으로 사료된다. 또한, 국내 다양한 배출원에서 적용하기 위해 측정 방법들 간의 동시 측정을 통한 비교평가가 추가적으로 수행되어 측정자료의 정확도 및 신뢰성을 향상시키는 방안이 모색되어야 할 것이다.

#### 감사의 글

이 성과는 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단-신진연구지원사업의 지원을 받아 수행된 연구이며(NRF-2017R1C1B1008811), 국립환경과학원의 “측정구 형태를 고려한 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 시료 채취관 개선에 관한 연구” 과제로 수행되었습니다.



## References

- Brook, R.D., S. Rajagopalan, C.A. Pope, J.R. Brook, A. Bhatnagar, A.V. Diez-Roux, F. Holguin, Y. Hong, R.V. Luepker, M.A. Mittleman, and A. Peters (2010) Particulate matter air pollution and cardiovascular disease, *Circulation*, 121(21), 2331-2378.
- Chang, C.J., H.H. Yang, C.A. Chang, and H.Y. Tsai (2012) Relationship between air pollution and outpatient visits for nonspecific conjunctivitis. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 53(1), 429-433.
- Chiu, H.F., C.Y. Peng, T.N. Wu, and C.Y. Yang (2013) Short-term effects of fine particulate air pollution on ischemic heart disease hospitalizations in Taipei: a case-crossover study, *Aerosol Air Quality Research*, 13, 1563-1569.
- Corio, L.A. and J. Sherwell (2000) In-stack condensable particulate matter measurements and issues. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 50(2), 207-218.
- EEA (2013) EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook.
- IDI (2016) Incheon <Blue Sky Council> research of atmospheric environment improvement.
- ISO (2009) Stationary source emissions - determination of  $PM_{10}/PM_{2.5}$  mass concentration in flue gas - measurement at low concentrations by use of impactor.
- Jang, K., H. Kim, Y. Lee, D. Song, N. Jung, S. Kim, J. Hong, S. Lee, and J. Han (2011) Estimating PM Emission Factor from Coal-Fired Power Plants in Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 27(5), 485-493. (in Korean with English abstract)
- Kim, J. and I. Hwang (2016) The characterization of  $PM$ ,  $PM_{10}$ , and  $PM_{2.5}$  from stationary sources, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(6), 603-612. (in Korean with English abstract)
- Kim, J., S. Heo, H. Kim, M. Jo, S. Lim, S. Lee, and D. Kang (2017) A study on emission characteristics of air pollutants from the use of solid fuel, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(2), 77-86. (in Korean with English abstract)
- Laden, F., J. Schwartz, F.E. Speizer, and D.W. Dockery (2006). Reduction in fine particulate air pollution and mortality: extended follow-up of the Harvard Six Cities study. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 173(6), 667-672.
- Lu, H.Y., S.L. Lin, J.K. Mwangi, L.C. Wang, and H.Y. Lin (2016) Characteristics and source apportionment of atmospheric  $PM_{2.5}$  at a coastal city in southern Taiwan. *Aerosol Air Quality Research*, 16, 1022-1034.
- MOE (2014a) Air pollution standard process test, Measurement method of total particulate matter, ES 01301.1.
- MOE (2014b) Air pollution standard process test, Measurement method of  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$ , ES 01317.1.
- MOE (2015) Enforcement Rule of the Clean Air Conservation ACT.
- NIER (2009) Research for  $PM_{2.5}$  emission criteria establishment.
- NIER (2012) Analysis  $PM_{2.5}$  reduction efficiency and development of future management.
- NIER (2015) Improvement of  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  sample-inlet design with the type and shape of sampling port.
- Pope, III, C.A., R.T. Burnett, G.D. Thurston, M.J. Thun, E.E. Calle, D. Krewski, and J.J. Godleski (2004) Cardiovascular mortality and long-term exposure to particulate air pollution: epidemiological evidence of general pathophysiological pathways of disease, *Circulation*, 109, 71-77.
- U.S EPA (2014) Method 201A-Determination of  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  emissions from stationary sources.
- U.S EPA (2015) Compilation of air pollutant emission factor (AP-42), Vol.I, Section 5.1 Petroleum refining (final section: April 2011).