

연구논문

비교 실험을 통한 PM-2.5 질량농도의 측정오차 분석

정창훈* · 박진희* · 황승만**

경인여자대학 보건의료관리과*, 한국환경공단**
(2010년 2월 3일 접수, 2010년 8월 12일 승인)

Analysis of Measurement Error for PM-2.5 Mass Concentration by Inter-Comparison Study

Jung, Chang Hoon* · Park, Jin Hee* · Hwang, S. M.**

Department Health Management, Kyungin Women's College*
Korea Environmental Corporation**

(Manuscript received 3 February 2010; accepted 12 August 2010)

Abstract

In this study, inter-comparison for PM-2.5 was undertaken. The PM-2.5 mass concentrations using the gravimetric and beta-attenuation methods were compared during the winter in 2007. Two different types of conventional filter-based measurements (Cyclone type and Impactor type) were also collocated and the measurement data was compared with each other.

As a result, continuous PM-2.5 data using beta attenuation method show a comparable mass concentration with gravimetric measurement when the inlet of beta-gauge sampler is heated. The results also showed that the cyclone type shows a little high PM-2.5 concentration than Impactor type.

In all the sampling cases, the correlations between measurement methods are high.

Subsequently, this study suggests that highly correlated relationship between PM-2.5 measurement instruments can be obtained through the inter-comparison results based on filter-based gravimetric method and more intensive measurement and theoretical studies are needed in order to clarify the measurement errors for different sampler types.

Keywords : PM-2.5 sampling method, inter-comparison, gravimetric method, beta-attenuation method

I. 서론

미세먼지는 대기 중에서 끊임없이 생성, 반응 및 소멸하며, 다양한 광학적, 물리적, 화학적 특성을 가진다. 특히 최근 미세먼지가 인체에 미치는 여러 가지 요인에 관한 연구결과 입자가 작을수록 위해성이 큰 것으로 보고되면서, 현재 측정기준으로 사용하고 있는 PM-10보다 인체에 더 큰 영향을 미치는 PM-2.5에 대한 관리의 중요성이 언급되고 있다. 이러한 이유로 인해 미국 환경보호청(EPA)은 1997년 PM-10과 병행하여 PM-2.5에 대한 새로운 기준을 추가 설정하여 PM-2.5에 대한 규제를 더욱 강화하고 있다. 우리나라는 1995년 이후 PM-10에 대한 측정이 시작되었으며, 조만간 PM-2.5에 대한 기준치 설정이 이루어질 것으로 전망되고 있다. 기준치 설정과 더불어 측정방법에 따른 정확도 및 오차 분석의 중요성이 강조되면서, PM-2.5의 측정 방법에 관련한 논의가 진행되고 있다. 우리나라의 경우 대기오염 측정망에서 PM-10 측정을 위해 베타선 흡수법을 사용하고 있다(정창훈 외, 2007). 그러나, 베타선 흡수법의 경우 미세먼지 측정 방법에 대한 신뢰성 검증에 대한 많은 문제가 제기된 바 있으며(Tsai and Cheng, 1996; Chang *et al.*, 2001; Chang and Tsai, 2003) 미국을 비롯한 주요 외국사례의 경우 대부분 중량법을 기준으로 기준치를 설정하고 있다.

이러한 측면에서, 현재 PM-2.5 관리현황과 미세먼지 측정 자료에 대한 신뢰성 검증 및 PM-2.5의 위해성에 관련된 연구자료 분석 등의 기초 연구가 매우 절실한 실정이다. 특히, 향후 PM-2.5의 측정 방법을 결정하는데 있어 현재 PM-10 측정에 사용되고 있는 베타선 흡수법을 비롯한 다양한 방식의 측정 장비에 대한 측정 자료 확보 및 신뢰성을 확보하기 위한 기초 연구가 필요하다.

본 연구는 이러한 측면에서 비교실험을 통하여 장비 간 PM-2.5의 농도 경향 및 차이를 살펴보고 습도, 측정 방법 등의 조건에 따라 이러한 차이의 원인을 분석해 보려 한다. 이를 위해 먼저 PM-2.5의 미국, 유럽 등을 포함한 관리현황 조사하고, 측

정방법별 측정 장비를 선정하여 동일 장소에서 PM-2.5의 농도 분석을 실시하여 비교 검토하였다. 또한, 풍향, 기온, 습도, 유량, 채취시간 등 시료 채취조건에 따른 미세먼지 농도 변화요인을 분석하고자 하였다.

측정 장비는 저용량 포집법(Low Volume Air Sampler)에 의한 중량법을 기준으로 베타선 흡수법을 이용한 PM-2.5 측정 장비를 비교하여 미세먼지의 측정오차를 파악하였다. 중량법의 경우 유입부를 Impactor type과 Cyclone type에 대하여 비교 실험함으로써 측정 유입부의 차이에 따른 오차 발생 가능성을 검토하고자 하였다.

II. PM-2.5 관리 현황

1. 해외의 PM-2.5 관리현황

미국 환경보호청 (US EPA)은 2006년 국가 대기질 기준(NAAQS)을 개정 공표하였다. 기준안에 따르면 연 평균 PM-2.5 기준($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$)은 그대로 유지하고 24시간 PM-2.5 기준을 $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 개정하는 것이 주요 내용이다. PM-2.5 기준이 설정되는 계기는 PM-2.5에 대한 단기 노출이 사망률 증가 및 폐질환 악화, 천식 발병 및 심장 문제를 포함한 심각한 건강영향의 범위와 관련이 있다는 수많은 건강연구를 바탕으로 한다.

미국 환경보호청(US EPA)은 현재 PM-2.5 NAAQS (National Ambient Air Quality Standard, 이하 NAAQS)의 이행을 위한 중요한 구성요소로서 1990년 말에 새로운 PM-2.5 측정망을 설치하고 있으며, 측정망으로부터 얻어진 자료는 PM-2.5 NAAQS 비교, 이행계획의 개발, 광역적 연무현상의 평가 및 건강영향 연구 및 다른 대기 에어로졸 연구 프로그램에 대한 지원에 사용되고 있다. 이러한 PM-2.5 측정망은 크게 FRM (Federal Registered Method) 측정망, speciation 측정망, 연속 측정망 등으로 구분할 수 있는데 FRM 측정망은 전략상 중요한 망으로 PM-2.5 질량농도를 측정하기 위하여 설계된 측정소를 말하며, PM-2.5에

관한 농도 기준은 FRM 측정망에서 중량법에 의하여 측정된 결과에 이용한다. 화학적 성분분석을 위한 측정망(Chemical Speciation Sites)은 PM-2.5 화학적 성분분석 모니터 및 FRM 샘플러의 비교분석을 포함한 충분한 실험실 및 야외 실험평가를 위해 운영중인 측정소를 말한다. 또한 IMPROVE 측정망은 미국 국립공원 및 사막지역에서 “현재의 시정 수준 및 추이를 확립하고 인위적 시정장애 오염원을 규명”하기 위하여 1987년에 시작된 모니터링 프로그램을 말하여, 주 및 지역 규제 청 (State and local agency)들은 현재 210 여 곳의 연속 모니터링 측정소를 운영 중에 있다. 연속 모니터링 측정망은 TEOM 모니터가 대부분의 도시에서 가동 중에 있으며 일부 도시에서는 베타선 흡수법 (BAM)등이 가동 중에 있다. 그밖에 PM Supersite는 SIP (State Implementation Plan) 개발활동을 지원하고, 건강영향연구 및 PM NAAQS의 검토에 필요한 정보 제공 및 진보된 시료채취 방법 (advanced sampling methods)들의 시험을 돕기 위해 구축된 대형 측정소로 1999년~2005년 사이에 8곳의 Supersite가 설치되어 현재 프로그램이 종료되었다. 유럽의 경우도 PM-2.5가 인체에 미치는 위해성에 주목하여, 관련 규제의 도입을 위해 기존 대기질 관련 여러 지침을 통합하고 PM-2.5에 대한 관리를 새로이 시행하려 하고 있다. 측정 방법에 관련하여서는 EN 14907:2005 “Standard gravimetric measurement method for the determination of the PM-2.5 mass fraction of suspended particulate matter in Ambient air”에 준하여 평가하고 있다.

2. PM-2.5 측정 오차에 관한 선행연구

캘리포니아 주 대기환경보호국(CARB)에서 수행한 연구 결과를 보면, PM-2.5에 대한 중량법과 베타선 흡수법 측정결과의 상관계수(R^2)가 매우 양호한 수준의 직선성을 보였다(Quok and McDougall, 2006). Schwab 등(2006)은 뉴욕의 도시 및 교외 지역에 대하여 TEOM, BAM등의 장비를 중량법인

FRM 장비와 비교하였으며, 연구결과 베타선 흡수법 장비의 기울기가 약 1.28정도로 중량법에 비해 높게 나오는 것으로 보고하였다.

Motallebi 등(2003)은 캘리포니아 Fresno지역에 대하여 2000-2001년 1년여 간 FRM장비와 BAM장비를 비교 측정된 결과 기울기 0.97, intercept 0.8, 상관계수(R) 0.99의 매우 높은 상관 결과를 보였다. 반면, Wu 등 (2006)에 의하면, 여러 지역에 비교 실험을 한 결과 PM10의 경우 베타선 흡수법 장비의 농도가 중량법에 비해 높게 나오나, PM-2.5의 경우는 반대의 경향을 보이는 등 연구에 따라 여러 경향을 보이고 있다(Wu *et al.*, 2006). 이와 같이 베타선 흡수법 장비와 중량법 장비간의 경향성에 관련한 연구 결과가 다양하게 나오는 것은 측정 조건, 측정 지점 및 측정 시기의 입자 특성 등이 종합적으로 영향을 미치는 것으로 판단된다. 특히, 지역에 따라 습도의 영향을 받는 정도 등이 상이하며, 이에 따른 운전 조건등도 차이가 있다. 우리나라의 경우 PM-2.5의 농도 특성 등을 파악하기 위한 여러 연구가 진행된 바 있으나(김상렬 등, 1999; 김광래 등, 2003; 한진석 등, 2004), 아직 PM-2.5의 중량법과 연속 장비와의 비교 실험 등을 통한 상관성 비교 등을 주목적으로 한 연구 결과에 대한 보고는 크게 부족한 실정이다. 이는 PM-2.5관련 기존의 많은 연구가 성분 분석 위주로 진행되었기 때문에 장시간동안의 연속장비와의 비교 실험 등이 이루어지지 않았기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 PM-2.5에 대한 베타선 흡수법과 중량법에 의한 장비의 상관성 등에 대한 지속적인 측정이 필요하다.

III. 재료 및 실험방법

1. 측정 장소 및 기간

본 연구에서는 장비간 비교 실험을 위하여, 중량법 측정 장비와 베타선 흡수법 측정 장비를 이용하여 PM-2.5의 농도를 비교하였다. 장비 간 비교 실험은 2007년 11월 24일부터 2008년 1월 28일까지

총 2개월 여간 인천 계양구에 위치한 경인여자대학 옥상에서 시료 채취 및 분석을 실시하여 비교 검토하였다. 비교 대상 베타선 흡수법 장비는 FH C-14 (Thermo Inc., 미국, 이하 Anderson장비)와 BAM 1020 (Metone Inc., 미국, 이하 BAM장비), 그리고, 저용량 포집법에 의한 중량법 장비를 사용하였다. 중량법 장비는 24시간 간격으로 시료를 채취하였으며, 베타선 흡수법 장비는 시간당 자료를 24시간에 걸쳐 평균한 자료를 일자료로 하여 중량법 장비와 비교하였다. 본 실험에 앞서 PM-10과 PM-2.5의 경향 및 PM-10과 베타선 흡수법 장비와의 관계 등을 살펴보기 위하여 11월 6일에서 1개월 여간은 대용량 포집법(High Volume Sampler)과 베타선 흡수법에 의한 PM-10농도와 저용량 포집법을 이용한 임팩터 타입의 중량법에 의한 PM-2.5 농도를 동시에 측정하였다.

2. 측정 방법 및 장비

본 연구에서 비교한 베타선 흡수법과 저용량 포집법에 의한 중량법 장비는 모두 16.7 l/min의 유량 하에서 측정하였다. 유량은 MFC(Mass flow controller)와 임팩터용 유량 보정기를 이용하여 주기적으로 보정하였다. 중량법 장비의 유입부는 Cyclone type과 Impactor type을 동시에 측정하여 유입부에 따른 PM-2.5농도의 차이를 비교분석하려 하였다. Cyclone은 URG sampler를 사용하였고, Impactor는 PM-10 Impactor를 지난 후 WINS impactor를 통과하여 나오는 분진을 필터팩을 통하여 포집하였다. 필터는 그 중량을 각 샘플링 전후 24시간 항량 후 측정하였고, 마이크로 발란스를 이용하여 측정을 실시하였다. 항량 후 필터의 습도는 40% 전후였으며 47mm Teflon 필터를 사용하였다. 베타선 흡수법의 PM-10 질량농도 측정 시 가장 큰 문제로 제기되는 것은 주로 수분의 제어와 관련된 것으로 항량을 통하여 수분을 제거하는 중량법에 비하여, 베타선 흡수법은 실시간으로 입자의 농도를 측정하므로, 수분을 포함한 입자가 베타선 흡수법 장비에 유입될 경우 오차를 유발할 수 있

다. 이러한 문제점을 살펴보기 위하여 두 대의 베타선 흡수법 장비 중 FH C-14는 유입부를 가온하였고 BAM장비는 유입부를 가온하지 않은 채로 비교 실험하였다. 유입부(inlet)의 가온은 유입부를 40℃로 가온하여 수분에 의한 오차를 최소화하려 하였다. 기상조건은 측정지점에 설치된 AWS(자동기상관측장비)를 이용하여, 매 5분 간격으로 풍향, 풍속, 온도 및 습도를 측정하였다.

IV. 연구결과 및 고찰: PM-2.5 측정 방법 간 동시비교

1. PM-10 vs. PM-2.5 측정 비교

그림 1은 2007년 11월 5일~12월 4일 동안 1개월간 고용량 공기 포집법과 베타선 흡수법 측정 장비(Anderson, FH C-14)를 비교한 결과이다. 베타선 흡수법 장비의 경우 유입부는 약 40℃로 가온하였다. 측정 기간 동안 황사 및 안개 등으로 인한 고농도 발생일이 여러 번 관측되었다. 또한 강우 및 강설 등의 기상현상도 관측되었다. 그림 1에서 볼 수 있듯이, 두 장비 간 농도변화 추이는 매우 높은 상관관을 보이는 것으로 파악된다. 즉, 측정 기간 동안의 중량법과 베타선 흡수법의 농도 경향은 PM-10의 경우 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

그림 2는 그림 1과의 동일 측정기간 동안의 PM-10과 PM-2.5의 농도변화 추이를 보여 주고 있다. 그림 2에서 볼 수 있듯이, PM-10과 PM-2.5의 경향이 증감에 있어 어느 정도 유사한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 두 오염물질의 질량 농도의 상관도를 비교해 볼 때에도, 두 오염물질간의 오염물질은 매우 유사한 농도 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 측정결과에 따르면, 측정 기간 동안의 PM-2.5/PM-10의 질량농도비는 대략 0.63 정도이며, R²값은 0.897정도로 나타나고 있다.

2. 측정 장비별 PM-2.5 농도 비교

측정 장비별 비교실험 기간은 2007년 11월 24일에서 2008년 1월 28일까지 약 2개월간 실시하였

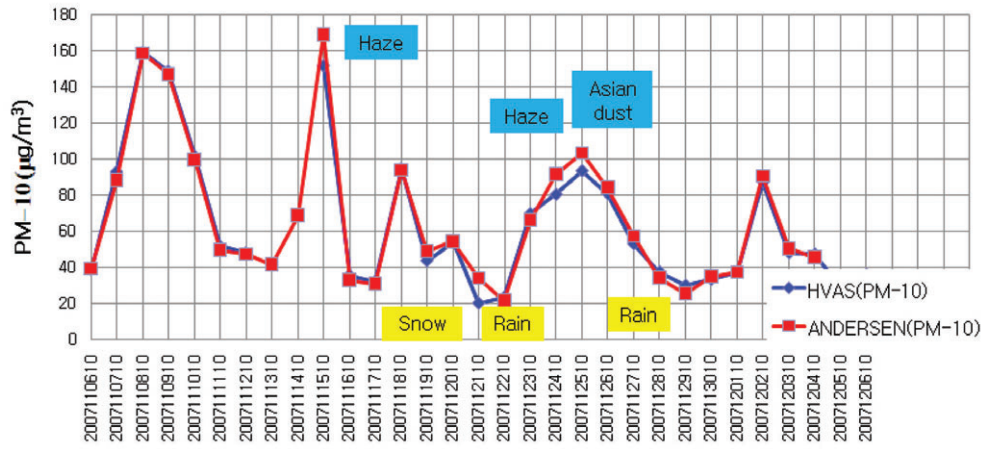


Figure 1. Comparison of the PM-10 concentration between beta ray and high volume sampler

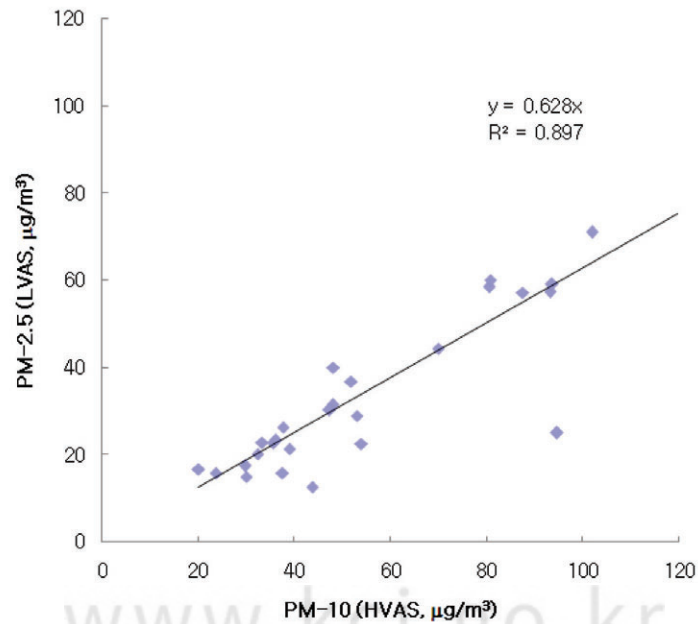
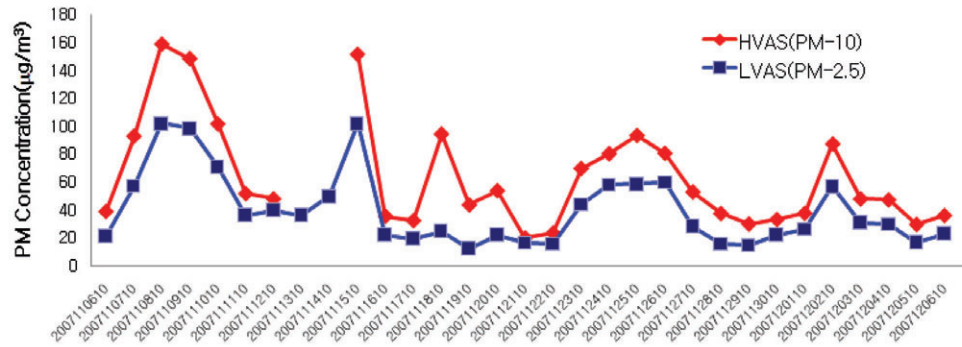


Figure 2. Comparison of the PM-10 and PM-2.5 during the sampling periods

다. 비교실험 대상 장비는 크게 중량법 장비와 베타선 흡수법 장비로 구분할 수 있는데, 중량법 장비는 다시 Cyclone type(PM-2.5 gravimetric sampler, URG)와 Impactor type(WINS Impactor, BGI) 장비를 비교 하였다. 베타선 흡수법 장비는 FH C-14(Thermo Inc.) 1대와 BAM 1020(Met one Inc.) 1대가 비교되었다.

그림 3은 측정 장비별 PM-2.5 시계열 농도변화를 보여 준다. 측정 장비 중에 베타선 흡수법 장비의 BAM 1020 장비는 유입부 가온의 효과를 비교하기 위한 실험을 위하여 유입부를 가온하지 않은 상태에서 PM-2.5의 농도를 측정하였으며, 그림 3에 그 결과를 동시에 비교하지 않았다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 PM-2.5 농도에 대하여 측정장비별 측정값을 시계열상으로 비교한 결과, 박무와 연무 등의 안개가 발생한 날에 주로 고농도 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 측정 기간 중 1회 발생한 황사 발생일의 경우 역시, 높은 PM-2.5농도 경향을 보였으나, 박무 및 연무 일의 농도가 훨씬 더 높은 사례가 많았다. 장비간의 비교 경향을 살펴보면, 장비 간 농도의 경향은 비슷한 추이를 보이고 있으나, 고농도 사례일의 장비 간 절대치의 차이가 일정정도 존재하는 것을 알 수 있다.

그림 4는 PM-2.5의 농도와 측정 기간 동안 기상청에서 발표한 인천 지역의 시정과의 관계를 보여

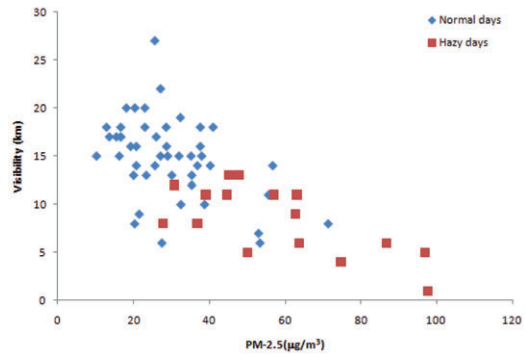


Figure 4. Relation between visibility and PM-2.5 mass concentration using Impactor type gravimetric method

주고 있다. 그림 4에서 볼 수 있듯이, 시정은 PM-2.5의 농도가 증가할 수록 감소하는 역비례의 관계를 보이는 것을 알 수 있다. 특히, 연무 및 안개가 발생한 날 시정과의 관계를 살펴보면 이들 안개 발생일에 특히 시정거리가 작고 PM-2.5 농도가 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

절대값의 차이를 보다 잘 알기 위해서는 장비 간 농도의 상관관계를 비교해 보아야 한다. 본 연구에서는 Impactor type의 장비를 기준으로 하여 다른 장비와의 PM-2.5 농도와의 관계를 살펴보고자 하였다.

그림 5(a)는 Impactor type의 manual 및 Sequential Sampler를 이용한 PM-2.5 중량농도

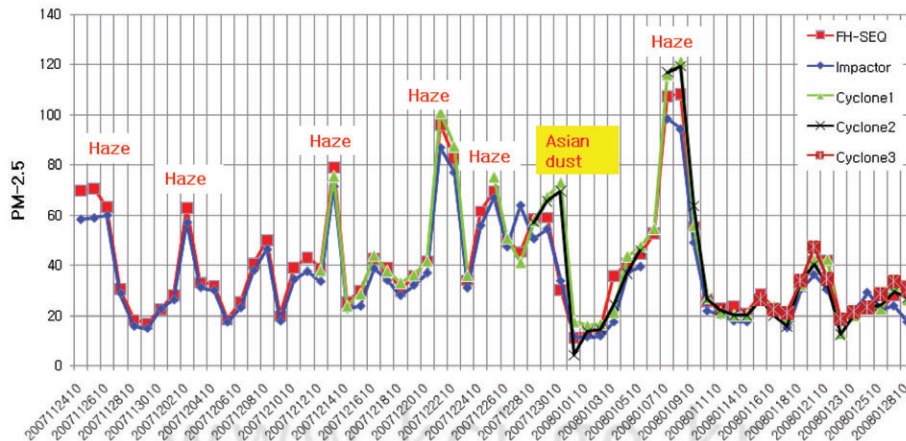
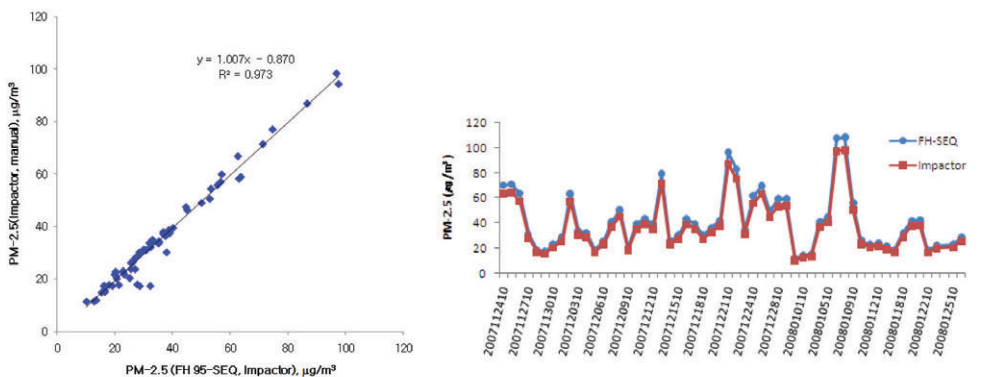
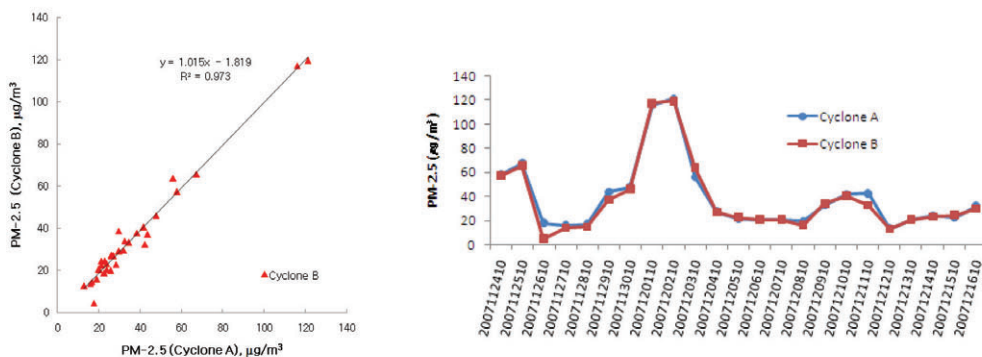


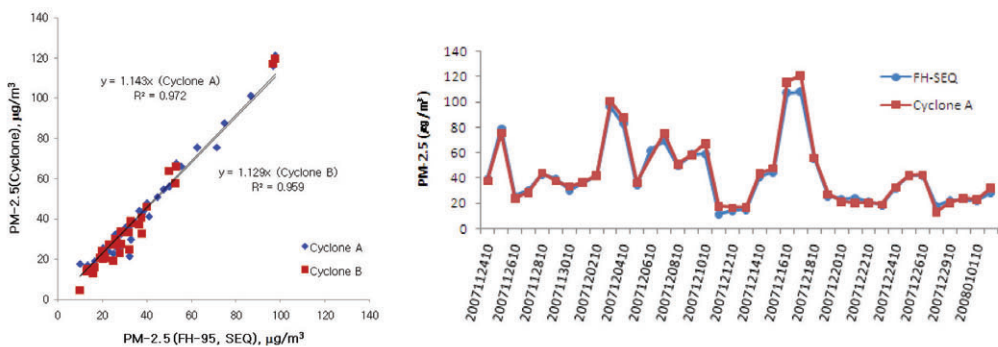
Figure 3. Trends of PM-2.5 concentration in various measurement instrument



(a) Impactor vs. Impactor



(b) Cyclone vs. Cyclone



(c) Impactor vs. Cyclone

Figure 5. Comparison of the PM-2.5 mass concentration in different type of samplers

를 상관관계와 시간에 따른 농도에 대하여 비교한 것이다. 그림 5에서 볼 수 있듯이, 측정기간 동안 Impactor type의 manual 및 sequential 방식의 Sampler를 이용한 PM-2.5 중량 농도를 비교한 결과, R²가 0.973이고 기울기가 1.007(절편-

0.870)로 나타나 두 장비 간 매우 높은 상관을 나타내고 있음을 볼 수 있다. 이는 본 연구에서 측정된 PM-2.5 중량법 측정 결과가 일정 수준 이상의 재현성을 나타내고 있음을 보여 주는 것이다.

그림 5(b)은 Cyclone type의 두 측정 장비간 PM

중량농도를 상관관계와 시간에 따른 농도에 대하여 비교한 것이다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 Impactor type과 마찬가지로 측정기간 동안 Cyclone type의 중량법 Sampler를 이용하여 PM-2.5 중량 농도를 비교한 결과 R²가 0.973이고 기울기가 1.015(절편-1.819)로 장비 간 상관성이 매우 높은 것을 알 수 있다. 이는 본 연구를 통해 측정된 결과가 높은 신뢰성을 가지고 있음을 보여주는 것이다.

Impactor type과 Cyclone type의 측정 장비를 비교해 보았을 때 측정 결과의 차이를 살펴보기 위하여 동일 기간에 측정된 자료를 비교하여 보았다.

그림 5(c)는 Impactor type(Sequential)과 Cyclone type의 PM-2.5 중량농도를 상관관계와

시간에 따른 농도에 대하여 비교한 것이다. 측정기간 동안 Impactor type(Sequential)의 PM-2.5 중량 농도를 바탕으로 Cyclone type(2대)의 PM-2.5 중량농도를 비교한 결과, Impactor type에 대한 Cyclone A와 Cyclone B의 기울기는 각각 1.143(R²는 0.972), 1.129(R²는 0.959)로 장비 간 상관성이 매우 높게 나타났으며, Impactor type에 비해 상대적으로 Cyclone type의 PM-2.5 중량농도가 다소 높게 나타난 것으로 평가된다. 이와같이 장비간 측정 농도의 차이가 발생하는 원인에 대해서는 보다 근본적이며 장기적인 측정 및 분석이 필요할 것으로 사료된다.

다만, 측정 장비의 절단입경이 똑같은 2.5 μ m이

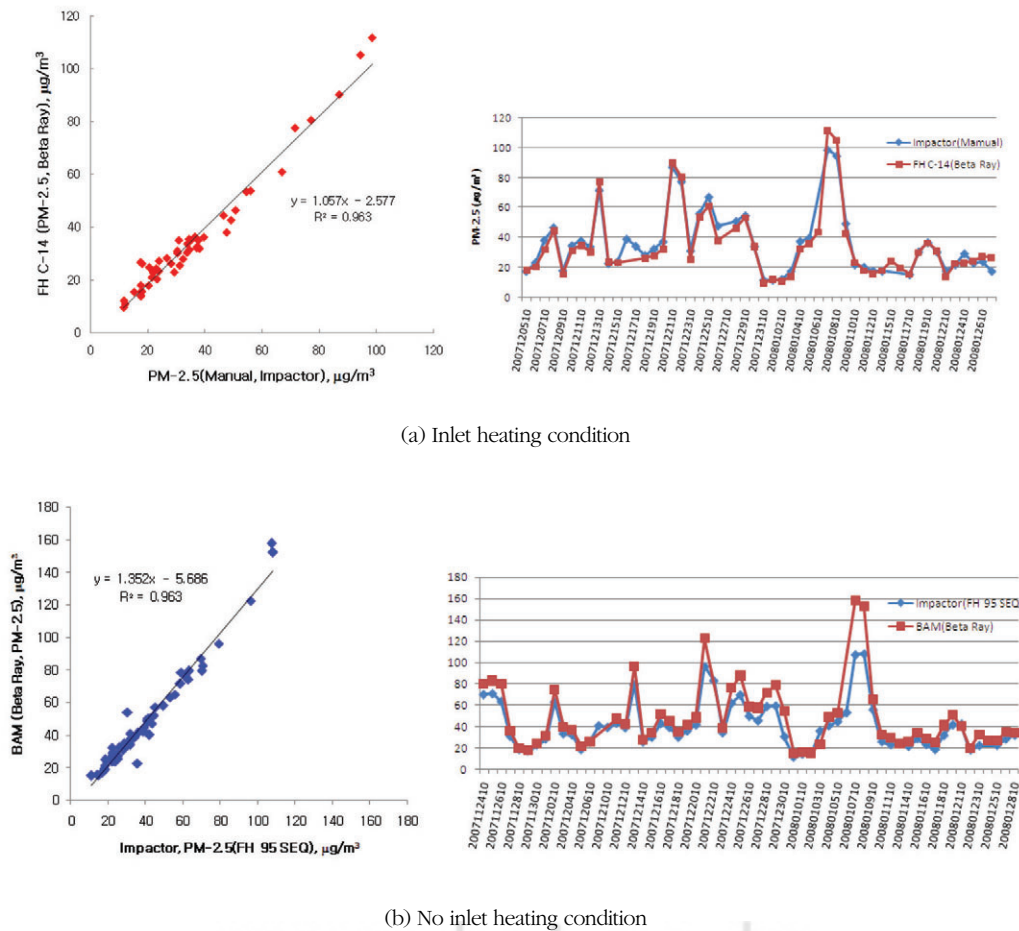


Figure 6. Comparison of the PM-2.5 concentration between beta ray and gravitational sampler(manual, impactor) under the different inlet heating condition

라 하더라도, 장비의 분리 효율 곡선의 차이 및 유입되는 대기 입자의 크기 분포 특성 등에 의하여 실제 포집되는 농도는 차이를 보일 가능성이 있다.

측정기간 동안 Impactor type(manual)의 PM-2.5 중량 농도를 기준으로 베타선 흡수법으로 측정된 PM-2.5 농도를 비교한 결과, 그림 6(a)와 같이 기울기 1.057(절편 -2.577), R^2 값이 0.963으로 높은 상관관을 나타내고 있다. 그림 6(a)에서 수분에 의한 측정오차를 줄이기 위해 베타선 흡수법 측정 장비는 유입부의 온도를 40℃로 가온한 것이다. 이는 PM-2.5의 측정오차의 경우, 베타선 흡수법과 중량법 장비의 차이가 크게 나타나지 않음을 보여주고 있다. 물론 그림 6(a)에서 볼 수 있듯이 농도가 높은 고농도 사례에 베타선 흡수법의 농도가 약간 높은 경향을 보이는 것처럼 보이는 등의 사례별 농도에 의한 오차 발생 가능성이 존재하는 것을 알 수 있다. 그러나, 적어도 주어진 측정 자료에서의 장비간 상관관계 및 동시간대의 측정경향은 매우 높게 나오는 것을 알 수 있다.

그림 6(b)는 베타선 흡수법의 유입부 가온의 영향을 정량적으로 파악하기 위하여 유입부를 가온하지 않은 베타선 흡수법과 Impactor type(sequential)의 중량법간 PM-2.5 농도를 상관관계와 시간에 따른 농도에 대하여 비교한 것이다. 베타선 흡수법 측정 장비인 BAM1020의 유입부를 가온하지 않고 Impactor type(Sequential)의 PM-2.5 농도와 비교하였다. PM-10의 경우 유입부를 가온한 경우와 가온하지 않은 경우의 농도는 여름철 습도가 높은 사례의 경우 40~50%의 차이를 보였다(정창훈 외, 2007). 이는 PM-10과 PM-2.5의 경우 유입부 가

온에 의한 농도 개선 효과가 매우 뚜렷한 것을 보여 주는 것이다. 유입부를 가온할 경우, 가온 온도 등에 따라, 휘발성 물질 등이 가온에 의하여 휘발됨으로 인해 실제 중량 농도보다 더 적은 질량 농도를 보일 수 있는 가능성이 있다. PM-10에 대한 장기적인 측정 결과 우리나라의 측정 조건에서 그러한 경향은 보이지 않았다(정창훈 외, 2008). PM-2.5에 관련하여서는 이러한 측정 오차의 문제가 더 민감하게 발생할 수 있다. 본 연구의 측정 결과를 종합해 보았을 때에는 기울기가 1.352 (절편 -5.686), R^2 가 0.963으로 나타나 상대적으로 유입부를 가온하지 않은 베타선 흡수법 측정 장비의 PM-2.5 농도가 매우 높게 나타나는 것으로 평가된다.

V. 결론

본 연구에서는 PM-2.5의 장비간 비교 실험을 통하여, 중량법 측정 장비와 베타선 흡수법 측정 장비를 이용하여 2007년 11월 24일부터 2008년 1월 28일까지 2개월 여간 인천 계양구에 위치한 경인여자 대학 옥상에서 PM-2.5의 농도를 비교하였다. 저용량 포집법에 의한 중량법 장비를 사용 시 cyclone type과 impactor type의 유입부를 동시에 측정하여 농도의 변화를 분석하였다. 표 1에서 볼 수 있듯이, 동일 측정방법인 Impactor 및 Cyclone간 측정 결과를 비교하였을 때에는 기울기가 각각 1.007과 1.015로 매우 근사한 값을 보였으나, Impactor와 Cyclone을 비교하여 보았을 경우, 두 Cyclone이 각각 1.129와 1.143으로 Cyclone이 다소 높은 농도를 보이는 것으로 나타났다. 그러나 이에 대한 보다

Table 1. Summary of the PM-2.5 comparison results

Conditions	X	Y	Slope	Intercept	R^2
Impactor vs. Impactor	FH-95 (Seq)	Impactor (manual)	1.007	-0.87	0.973
Cyclone vs. Cyclone	Cyclone A	Cyclone B	1.015	-1.819	0.973
Impactor vs. Cyclone	FH-95 (Seq)	Cyclone A	1.129 ~1.143	-	0.959~0.972
Inlet heating (Gravimetric method vs. Beta Ray)	FH-95 (Seq)	FH C-14 (Beta Ray)	1.057	-2.577	0.963
Without heating (Gravimetric method vs. Beta Ray)	FH-95 (Seq)	BAM (Beta Ray)	1.352	-5.686	0.963

정확한 결론은 보다 장기간의 면밀한 실험을 통하여 검증되어야 할 것으로 보인다. 또 유입부를 가운하지 않았을 경우의 기울기는 1.352로 가운하였을 경우에 비해 최고 30여 %이상 농도가 과도하게 측정되는 것을 알 수 있다. 이와 같이 PM-2.5의 중량법 장비 간 농도 경향을 비교해 본 결과 장비 간 비슷한 경향을 보이고 있으나 측정 장비에 따라 PM-2.5의 절대농도는 차이를 보였으며, 유입부 가운 여부에 따른 동시 측정결과 베타선 흡수법의 PM-2.5 농도는 가운 조건에 따라 절대값에 차이를 보였다. 그러나 이러한 측정 장비간의 절대치의 차이에도 불구하고 각 장비 간에는 높은 상관관계를 보였다.

이는 기준법 장비를 중심으로 장비 간 상관식의 도출이 가능하다는 것을 보여준다. PM-2.5등 입자상 물질의 측정에 있어, 측정 장비의 오차원인은 유량 보정, 베타선 흡수법의 경우 유입부 가운이 중요한 원인으로 작용한다. 정확한 측정 장비의 오차 보정을 위해서는 대기오염 측정망 장비의 주기적 관리(유량, 가운상태) 뿐 아니라 측정망 자료와 중량법과의 직접적 비교를 통한 주기적인 보정이 필요한 것으로 사료된다.

VI. 제한사항과 제언

PM-2.5 중량농도는 기상조건, 측정지점 입자의 특성 등 여러 조건과 실험사항에 따라 달라질 수 있는 여지가 있기 때문에 추후 지속적인 비교실험이 진행되어야 할 것으로 보인다. 결론적으로 이상의 연구결과를 볼 때 PM-2.5의 효율적 관리를 위해서는 먼저, 베타선 흡수법 등의 PM-2.5 측정 장비간 측정오차 및 측정오차가 농도에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 중량법을 기준법(reference method)으로 한 PM-2.5 기준 측정방법이 마련되어야 하며, 또한 중량법과의 지속적인 확인 작업 및 주기적인 검 교정 작업이 수행되어야 한다. 또, 측정 장비의 유량의 보정을 포함한 구체적인 PM-2.5 검정 매뉴얼(manual)의 개발이 필요하다. PM-2.5의 수분제어와 관련된 유입부의 가운방식에 대한

보다 정량화된 연구가 필요하며, 기온 및 습도에 따른 미세먼지의 측정오차 파악을 위해서는 장기간의 비교 실험을 통하여 지속적으로 자료를 확보하여야 할 것으로 사료된다. 그밖에 Impactor와 Cyclone 등 입자 포집 방식 유입부에 따른 농도의 차이는 본 연구 결과로서 명확히 오차발생의 원인이라고 단정할 수 없으나, 분리 효율등과 유입 입자의 크기분포 등에 의한 차이가 발생될 가능성이 있으므로 이에 대한 이론적 및 실험적 연구가 추후 보완되어야 한다. 마지막으로 황사, 연무 등의 고농도 사례 및 기상현상, 지역에 따른 입자의 특성에 따른 측정 장비간의 오차 발생 등을 검증하기 위해서는 여러 지점에서의 계절을 포함한 지속적인 장기적인 비교 관측과 분석이 필요할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 환경관리공단 연구 용역의 지원을 받았습니다.

참고문헌

- 김상렬, 정장표, 이승목, 1999, 부산시의 PM-2.5 특성과 지역 기준 달성도 평가, 1999년 대기환경학회 추계 학술대회 논문집, 28-29.
- 김광래, 김영두, 차영섭, 윤중섭, 김민영, 이재영, 김신도, 2003, 서울지역의 TSP, PM10, PM2.5의 농도 변화에 관한 연구, 2003년 대기환경학회 추계 학술대회 논문집, 343-344.
- 정창훈, 조용성, 황승만, 정용국, 유재천, 신동석, 2007, 비교 측정을 통한 PM-10 질량농도의 오차 분석, 한국대기환경학회지, 23(6), 689-698.
- 한진석, 공부주, 장건우, 신선아, 안준영, 이석조, 길혜경, 이승민, 오근찬, 이호범, 변종환, 송영철, 2004, 우리나라 지역별 PM-2.5 에어로졸 특성, 2004년 대기환경학회 추계 학술대

- 회 논문집, 331-332.
- Chang, C. T., C. J. Tsai, Lee C. T., Chang S. Y., Cheng M. T., and H. M. Chein, 2001, Differences in PM-10 concentrations measured by beta gauge monitor and high-vol sampler, *Atmos. Env.*, 35, 5741-5748.
- Chang, C. T. and C. J. Tsai, 2003, A model for the relative humidity effect on the readings of the PM-10 beta-gauge monitor, *Journal of Aerosol Science*, 34(12), 1685-1697.
- Motallebi, N., C. A. Taylor, Jr., K. Turkiewicz, and B. E. Croes, 2003, Particulate Matter in California: Part 1-Intercomparison of Several PM2.5, PM10-2.5, and PM10 Monitoring Networks, *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 53(12), 1509-1516.
- Quok, M. and M. McDougall, 2006, Comparison of the ARB continuous PM-2.5 monitoring network to the PM-2.5 federal reference method network, California Air Resources Boards Report, 1-21.
- Schwab, J. J., H. D. Felton, O. V. Rattigan, and K. L. Demerjian, 2006, New York State Urban and Rural Measurements of Continuous PM2.5 Mass by FDMS, TEOM, and BAM, *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 56(4), 372-383.
- Tsai, C. J. and Y. H. Cheng, 1996, Comparison of two ambient beta gauge PM-10 samplers, *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 46(2), 142-147.
- Wu, J, A. W. Winer, and R. J. Delfino, 2006, Exposure assessment of particulate matter air pollution before, during, and after the 2003 Southern California wildfires, *Atmospheric Environment*, 40(18), 3333-3348.

최종원고채택 10. 08. 13