

지하역사 내 미세먼지 실시간 모니터링을 위한 광산란법 보정

Compensation of Light Scattering Method for Real-Time Monitoring of Particulate Matters in Subway Stations

김서진¹⁾ · 강호성¹⁾ · 손윤석²⁾ · 윤상렬³⁾ · 김조천^{2),3)} · 김규식⁴⁾ · 김인원^{1),*}

¹⁾건국대학교 화학공학과, ²⁾건국대학교 신기술융합학과,
³⁾건국대학교 환경공학과, ⁴⁾서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부
(2010년 5월 10일 접수, 2010년 6월 23일 수정, 2010년 8월 20일 채택)

Seo-Jin Kim¹⁾, Ho-Seong Kang¹⁾, Youn-Suk Son²⁾, Sang-Lyeor Yoon³⁾,
Jo-Chun Kim^{2),3)}, Gyu-Sik Kim⁴⁾ and In-Won Kim^{1),*}

¹⁾Department of Chemical Engineering, Konkuk University
²⁾Department of Advanced Technology Fusion, Konkuk University
³⁾Department of Environmental Engineering, Konkuk University
⁴⁾Department of Electrical and Computer Engineering, University of Seoul

(Received 10 May 2010, revised 23 June 2010, accepted 20 August 2010)

Abstract

The PM₁₀ concentrations in the underground should be monitored for the health of commuters on the underground subway system. Seoul Metro and Seoul Metropolitan Rapid Transit Corporation are measuring several air pollutants regularly. As for the measurement of PM₁₀ concentrations, instruments based on β -ray absorption method and gravimetric methods are being used. But the instruments using gravimetric method give us 20-hour-average data and the β -ray instruments can measure the PM₁₀ concentration every one hour. In order to keep the PM₁₀ concentrations under a healthy condition, the air quality of the underground platform and tunnels should be monitored and controlled continuously. The PM₁₀ instruments using light scattering method can measure the PM₁₀ concentrations every less than one minute. However, the reliability of the instruments using light scattering method is still not proved.

The purpose of this work is to study the reliability of the instruments using light scattering method to measure the PM₁₀ concentrations continuously in the underground platforms. One instrument using β -ray absorption method and two different instruments using light scattering method (LSM1, LSM2) were placed at the platform of the Jegi station of Seoul metro line Number 1 for 10 days. The correlation between the β -ray instrument and the LSM2 ($r^2=0.732$) was higher than that between the β -ray instrument and the LSM1 ($r^2=0.393$). Thus the LSM2 was chosen for further analysis. Three different regression analysis methods were tested: Linear regression analysis, Nonlinear regression analysis and Orthogonal regression analysis. When the instruments using light scattering method were used, the data

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-450-3508, E-mail : inwon@konkuk.ac.kr

measured these instruments have to be converted to actual PM₁₀ concentrations using some factors. With these analyses, the factors could be calculated successfully as linear and nonlinear forms with respect to the data. And the orthogonal regression analysis was performed better than the ordinary least squares method by 28.45% reduction of RMSE. These findings propose that the instruments using light scattering method light scattering method can be used to measure and control the PM₁₀ concentrations of the underground subway stations.

Key words : PM₁₀, Light scattering method, β -ray absorption method, Particulate matters, Real-time monitoring

1. 서 론

사회가 발전하고 도시의 인구 밀도가 증가함에 따라, 대중 교통의 이용이 늘어나고 있다. 이 중 지하철은 정체가능성이 적고 이용금액이 저렴하여, 가장 많이 이용되는 대중교통 수단이다. 하지만 대부분의 역사가 지하에 위치하여 있고, 출퇴근 시간에 유동 인구가 급증하기 때문에 이로 인한 실내공기오염이 매우 심각한 상태이다. 따라서 지하역사의 공기오염도 저감 방안에 대한 연구가 꾸준히 진행되어 왔다(Park *et al.*, 2008; Sohn *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2006; Park *et al.*, 2006; Choi *et al.*, 2004).

우리나라에서의 실내공기질은 「다중이용시설 등의 실내공기질관리법」에 따라 중량법과 베타선 흡수법을 이용하여 측정된 미세먼지(이하 'PM₁₀') 농도, NO_x 농도, CO 농도, SO₂ 농도와 O₃ 농도를 관리하고 있다(국립환경과학원, 2008). 지하역사에서 쾌적한 공기질을 유지하기 위해서는 실시간으로 실내공기질 농도를 측정하여, 농도의 변화에 따른 환기시스템 가동이 필요하다. 하지만 현재 이용하는 베타선 흡수법은 기기 측정법의 한계 때문에 최소 1시간 단위로 측정되며, 포집 후 농도를 측정하는 방식이기 때문에 실시간 데이터를 사용할 수 없어 짧은 시간에 수시로 변하는 환경의 모니터링을 위한 사용에는 부적절하다.

뉴질랜드 환경부의 발표에 의하면, 일반적으로 지금까지는 미세먼지의 농도를 측정하는 데에 있어서 중량법을 많이 이용하였다. 중량법은 24시간 주기로 미세먼지를 포집하여 무게를 재는 방식이다. 이는 베타선 흡수법에 비해 상대적으로 적은 비용이 들기는 하나 실시간 측정이 어려우며, 따라서 필요한 시간에 환기 등의 적절한 조치들이 이루어지지 못한다는 단

점이 있다. 이에 따라, 실시간 측정이 가능한 광산란법의 정확도를 확인하기 위해 New Plymouth에서 2000년 2월, 5월, 11월에 광산란법 측정기기를 이용하여 미세먼지 농도를 측정하는 실험을 수행하였다(The Ministry for the Environment, 2003). 이 외에도 2002년에 Chan에 의한 연구(Chan *et al.*, 2002a, b), 2008년에 Cheng (Cheng *et al.*, 2008)에 의한 연구 등 광산란법 방식에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있음을 알 수 있다. 이러한 광산란법 측정장비는 이동성, 저비용, 편리성 및 입자를 단기간에 측정할 수 있다는 장점을 가지고 있다(Tittarelli *et al.*, 2008).

하지만 위와 같은 광산란법으로 측정된 수치는 미세먼지의 중량을 이용한 농도 값이 아닌, 미세먼지의 개수 및 산란 양을 이용하여 보정계수(factor)를 구하여 계산한 상대적인 값이다. 보정계수란, 미세먼지 농도의 절대값이 측정되는 것이 아니라 미세먼지 입자 개수를 측정하는 광산란법의 한계를 극복하기 위한 숫자로, 해당 환경에서의 미세먼지 입자밀도에 해당한다. 이에 측정된 값은 절대값이 아니며, 미세먼지의 입자밀도에 따라 상대적으로 많은 차이를 나타낸다. 광산란법은 다양한 간섭 요인으로 인하여 지역, 장소, 계절에 따라 상이한 차이를 나타내는 데(Kim and Jung, 1998), 상대적으로 입자밀도가 큰 철 성분 입자가 많다고 알려져 있는 지하역사 및 터널에서는 절대값에 대한 신뢰성이 매우 떨어질 것으로 사료된다(Aarnio *et al.*, 2005; Chillrud *et al.*, 2004; Adams, 2001; Furuya *et al.*, 2001).

이에 본 연구에서는 다양한 통계기법을 이용하여 광산란법과 베타선 흡수법을 이용한 실시간 측정 데이터를 비교분석 함으로써 광산란법 측정기의 지하역사 내 공기질 제어를 위한 실시간 미세먼지 측정기기로의 활용 가능성을 파악하고자 한다.

2. 실험방법 및 이론

2.1 실험 및 방법

일반적으로 실내공기질 중의 미세먼지 농도를 측정하기 위한 방식으로는 크게 소용량 공기포집법, 저용량 공기포집법, 베타선 흡수법 및 광산란법이 있다.

소용량 공기포집법과 저용량 공기포집법은 중량법으로 여과지를 이용해 포집한 입자의 무게를 측정하여 미세먼지 농도를 측정하는 방식이며, 베타선 흡수법은 일정시간 여과지 위에 미세먼지를 포집하고 포집된 미세먼지에 베타선을 투과시켜 미세먼지의 중량농도를 연속적으로 측정하는 방법이다. 광산란법은 미세먼지에 빛을 조사하면 미세먼지에 의하여 빛이 산란되고 이 양은 질량 농도와 비례한다는 원리를 이용하여 미세먼지의 농도를 측정하는 방식이다.

지하역사와 같은 공간에서 실내공기질을 유지하기 위해서는 오염물질에 대한 실시간 모니터링과 데이터의 신뢰성이 무엇보다 중요하다. 일반적으로 미세먼지의 농도 측정에 있어서 여과지 위에 포집된 미세먼지의 무게를 직접 칭량하는 중량법을 가장 신뢰

할 수 있지만 이 방법은 일정시간 이상의 시료를 채취해야만 농도 값을 구할 수 있고 매번 여지를 교체해야 되기 때문에 실시간 모니터링을 하기에는 문제점이 있다. 이에 본 연구에서는 현재까지 중량법과 비교하여 미세먼지 농도 값의 상관관계수가 높다고 조사되어진 베타선 흡수법과 이에 비해 상관관계수는 다소 떨어지지만 미세먼지의 농도를 초 단위로 실시간 모니터링 할 수 있는 광산란법을 대상으로 연구를 수행하였다(Cheng *et al.*, 2008; Jung *et al.*, 2007; Quok and Mcdougall, 2006).

베타선 흡수법의 미세먼지 측정기를 이용한 광산란법 측정기기의 보정을 위한 데이터를 수집하기 위하여, 2009년 5월 7일부터 2009년 5월 16일까지 10일간 지하철 1호선 제기역 승강장에 그림 1과 같이 베타선 흡수법과 광산란법 측정기를 각각 설치하였으며, 24시간 동안 PM₁₀ 농도를 측정하였다.

실내공기질 공정시험기준에 따르면 바닥면에서 1.2 ~ 1.5m 사이에서 시료를 채취해야 하기 때문에 미세먼지 측정기는 승강장 중앙 부분의 바닥에서 1.5m 높이에 설치되어 측정이 이루어졌다.

제기역은 2010년 3월부터 승강장 스크린도어가 가동되어, 실험기간 동안 스크린도어가 설치되지 않은 역사이다. 베타선 흡수법은 EBam (Met one instrument, USA)을 이용하였고, 광산란법은 E-Sampler (Met one instrument, USA)와 PM-326 (HCT, Korea) 장비를 이용하였으며, 이 장비들은 각각 β-ray와 LSM1, LSM2로 명명하였다.

표 1은 본 연구에 사용된 장비의 구체적 사양 및 특성을 나타내고 있다.

이중 LSM1은 일반적인 광산란법 측정기기로 일정 PM₁₀ 크기 영역에서 동일한 보정계수가 이용되며, LSM2는 측정값의 정확도를 높이기 위하여 검량 시 PM₁₀의 크기 영역을 10개 구간으로 나누어 각각의 보정계수를 구하고 측정 시 각 크기 영역별로 이 보정계수가 반영되어 농도가 산정된다.



Fig. 1. PM measuring instruments in Jegi station.

Table 1. Specifications of measurement instrument.

Instrument	E-BAM	E-Sampler	PM-326
Method	β-ray absorption	Light scattering	Light scattering
Range	0 ~ 100 mg/m ³	0 ~ 65 mg/m ³	0 ~ 1 mg/m ³
Sampling flow rate	16.7 L/min	2 L/min	0.8 L/min
Sampling period	60 min	1 sec	6 sec

베타선 흡수법 장비의 특성상 공기를 포집하여 PM₁₀ 농도를 측정해야 하기 때문에 측정값을 신뢰할 수 있는 가장 짧은 포집 시간인 1시간 평균 측정 자료를 이용하였으며, 광산란법 장비는 1분 단위로 PM₁₀ 농도를 측정하였으나 베타선 흡수법과의 비교를 위해 측정된 농도 값의 1시간 단위 평균값을 이용하였다.

2.2 회귀분석

회귀분석(regression analysis)이란 변수들 간의 관련성을 규명하기 위하여 어떤 수학적 모형을 가정하고, 이 모형을 측정된 변수들의 데이터로부터 추정하는 통계적 분석 방법을 말하며, 일반적으로 이 추정된 모형을 사용하여 필요한 예측을 하거나 통계적 추론을 할 수 있게 된다(Ahn *et al.*, 2004; Seber, 1997). 최소자승법은 일련의 측정 자료에 가장 부합하는 측정값과 이론적 모델 반응값(예측값)의 차의 제곱의 합이 최소가 되도록 하는 모델변수를 결정하는 방법이다.

2.2.1 최소자승법 (Linear least squares method)

선형최소자승법은 그림 2와 같이 X를 기준으로, 회귀선으로부터의 측정값까지의 수직거리 제곱 합을 최소화하는 Y의 최적 회귀식을 추정하는 것이다(Leng *et al.*, 2007). 이 때 X축은 독립변수로서 기준이 되는 변수이고, 오차가 없다고 가정할 수 있는 예측값을 나타내며, Y축은 종속변수로서 실험값을 나타낸다(Lee and Hur, 1995).

이것을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\text{Min}_{\theta} \sum_{i=1}^n (y_{obs,i} - \hat{y}_i)^2 \tag{1}$$

여기서, \hat{y}_i 는 종속변수의 이론값, $y_{obs,i}$ 는 종속변수의 실험값이며, $\hat{y}_i = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n$, 매개변수 $\theta = [a_0, \dots, a_n]^T$ 이다.

최소자승법에서 다음과 같은 3가지 가정이 사용된다.

첫째, 독립변수인 예측값에는 오차가 포함되지 않는다.

둘째, 종속변수인 실험값의 오차는 정규분포를 따른다.

셋째, 각각의 오차는 독립적이다.

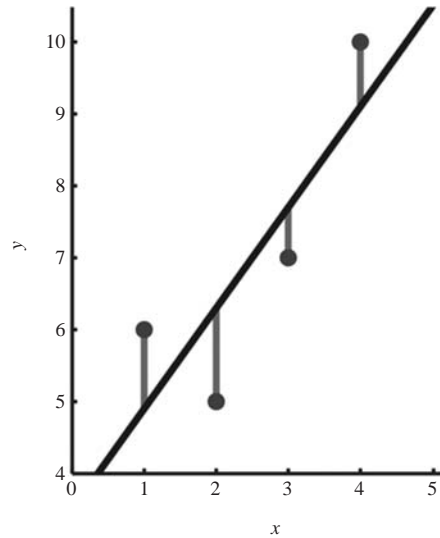


Fig. 2. The ordinary least squares regression.

일반적으로 실험을 하면 독립변수 X와 종속변수 Y는 모두 측정값으로, 모든 변수의 측정값에는 오차가 포함되어 있다. 독립변수 X의 측정오차가 허용단계를 벗어나면 최소자승법을 사용할 수 없다. 최소자승법에서 예측된 매개변수 값들은 통계학적으로 편의(bias)를 가지게 된다. 이럴 경우 직교최소자승법을 사용하여야 한다(Fox, 2002).

2.2.2 직교최소자승법

(Orthogonal least squares method)

최소자승법이 측정값들과 회귀선의 수직 혹은 수평거리를 최소화하는 것이라면, 직교최소자승법은 그림 3과 같이 회귀선과 X와 Y측정값들의 직교거리를 최소화하는 것이다.

이것을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\text{Min}_{\theta, \hat{x}, \hat{y}} \sum \left[\frac{(x_{obs,i} - \hat{x}_i)^2}{\sigma_x} + \frac{(y_{obs,i} - \hat{y}_i)^2}{\sigma_y} \right] \tag{2}$$

여기서, \hat{x}_i 는 독립변수의 이론값, $x_{obs,i}$ 는 독립변수의 실험값, \hat{y}_i 는 종속변수의 이론값, $y_{obs,i}$ 는 종속변수의 실험값이며, $y_i = f(x, \theta)$ 이고 σ_x, σ_y 는 각각 X와 Y의 표준편차(standard deviation)이다.

이러한 직교최소자승법은 기준이 되는 독립변수와 종속변수에 모두 오차가 있는 경우의 최적화에 적합

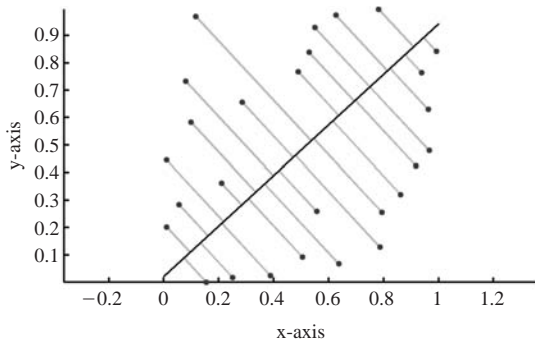


Fig. 3. The orthogonal least squares regression.

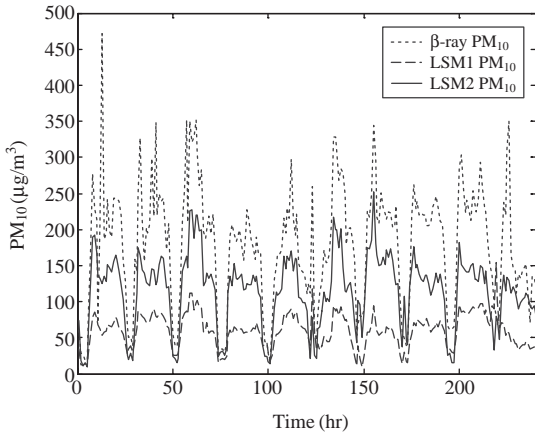


Fig. 4. Plot of the measurements of β -ray absorption method, LSM1 and LSM2.

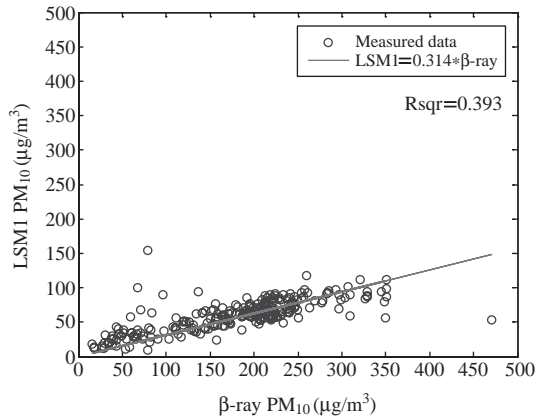
하다.

식(2)의 직교최소자승법의 해는 연속 선형화 방법(Successive linearization method), 중첩 방식(Nested method)과 비선형 프로그래밍 기법(Nonlinear programming technique)들을 사용하여 구한다.

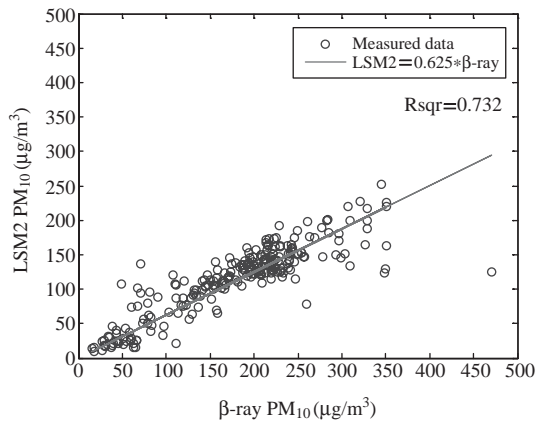
3. 결과 및 고찰

3.1 제기역 PM₁₀ 농도 측정 데이터

광산란법 보정을 위하여 베타선 흡수법은 1시간 단위로 측정된 데이터를, 광산란법은 1분 단위로 측정된 데이터를 1시간 평균으로 계산한 값을 대상으로 분석 수행하였다.



(a) Calibration of LSM1 by β -ray absorption method



(b) Calibration of LSM2 by β -ray absorption method

Fig. 5. Calibration of LSM by β -ray absorption method.

우선 광산란법 측정기 2대와 베타선 흡수법 측정기 1대의 결과 값을 그림 4에 도시하였다. 이 그래프를 보면 전체적인 경향은 비슷하나, LSM1의 측정값이 다른 두 값에 비해 낮은 것을 확인할 수 있다.

또한, 회귀분석 시 표준화점수가 2.5 이상이 되는 이상치(outlier)를 제거하지 않은 초기 측정값을 대상으로 베타선 흡수법과 광산란법을 각각 회귀분석 한 결과를 그림 5에 나타내었다. LSM1과 베타선 흡수법의 회귀분석 결과, 그림 5(a)에서 볼 수 있듯이 상관계수(r^2)가 0.393으로 매우 낮았으며, LSM2는 그림 5(b)에서 볼 수 있듯이 상관계수(r^2)가 0.732로 상대적으로 높은 것을 볼 수 있다. 이것은 광산란법 방식 측정기 보정의 기준이 되는 베타선 흡수법과의

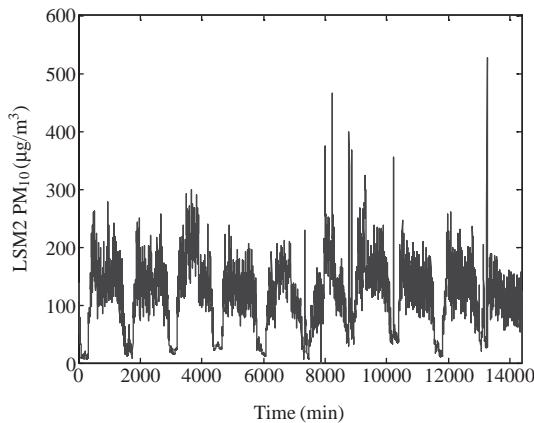


Fig. 6. Concentration of PM₁₀ using light scattering method in platform.

상관성이 LSM2가 높다는 것을 보여주며, 따라서 상관성이 높고 상대적으로 측정 오류가 적은 LSM2의 측정값을 본 연구에서 광산란법 데이터로 이용하였다.

그림 6은 광산란법 측정기를 이용하여 측정된 제기동 승강장의 연속 측정된 데이터를 나타내고 있고, 열차의 진출입에 따라 PM₁₀ 농도 값이 순간적으로 크게 변하는 것을 확인할 수 있다. 이는 광산란법의 유량이 베타선 흡수법의 유량보다 상대적으로 매우 적어, 열차의 진출입시에 생성되는 열차풍에 의한 공기 유동의 순간적인 변화가 측정장비의 유입 유량에 상당히 많은 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다. 그러나, 이러한 승강장 내에서 미세먼지 측정 시에 발생하는 열차풍에 의한 영향은 향후 승강장에 스크린도어가 설치되면 그 영향이 매우 적을 것으로 사료된다.

3. 2 선형회귀분석을 이용한 보정

베타선 흡수법과 광산란법에서 얻어진 1시간 평균 데이터를 이용하여 선형회귀분석을 실시하면, 식(3)과 같은 회귀분석 식(그림 7. 실선)이 얻어진다.

$$(LSM2)=0.645 \times (\beta\text{-ray})+1.260 \quad (3)$$

이 때, 상수 1.260은 두 방식에 따른 값의 차이일 뿐, T-test 결과를 살펴보면 유효 T-value인 2.344보다 작은 수치인 0.516으로 통계적으로 유효한 수치가 아

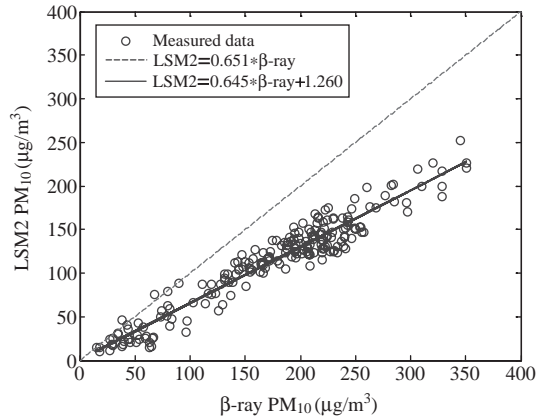


Fig. 7. Results of the linear regression analysis.

니다. 따라서 상수를 제거한 후 다시 분석하면, 식(4)와 같은 회귀분석 식(그림 7. 점선)이 얻어진다.

$$(LSM2)=0.651 \times (\beta\text{-ray}) \quad (4)$$

이 때, 베타선 흡수법과 광산란법의 상관계수(correlation coefficient)는 0.953으로 상관성이 매우 높은 것으로 나타나며, 상관계수(r^2)는 0.925로 두 측정값이 유사한 것으로 확인된다. 이는 Chan이 수행한 고용량 공기포집법과 광산란법 방식의 회귀분석 결과(Chan *et al.*, 2002a), 상관계수(r^2)가 약 0.92인 것과 비교했을 때 거의 비슷한 수치로 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

Braniš(2006)는 계절별로 베타선 흡수법과 광산란법 방식간의 여름철 상관계수(r^2)는 0.73, 겨울철 상관계수(r^2)는 0.97로서 여름철에 비하여 겨울철의 상관계수가 높은 것을 확인하였다.

3. 3 비선형회귀분석을 이용한 보정

위의 선형회귀분석을 통한 1차식의 생성보다 더 적합한 모델을 찾기 위해 비선형 회귀분석을 실시하였다. 분석 결과, 다음과 같은 회귀식이 얻어진다.

$$(LSM2)=0.862 \times (\beta\text{-ray})^{0.948} \quad (5)$$

비선형 회귀분석의 결과, 상관계수(r^2)는 0.940으로, 그림 8과 같이 선형회귀분석 결과보다 약간 더 적합하나 거의 비슷한 것을 볼 수 있다.

직접적인 미세먼지의 질량농도가 아닌 미세먼지에

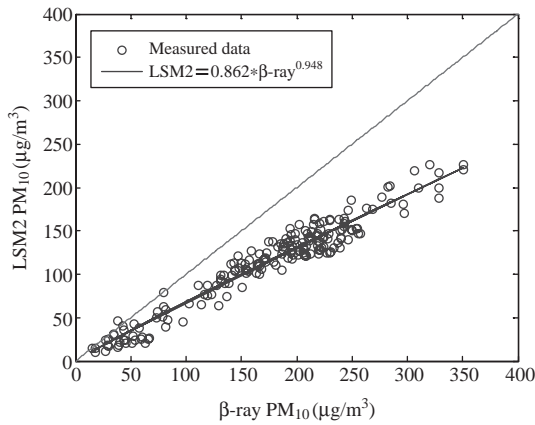


Fig. 8. Results of the nonlinear regression analysis.

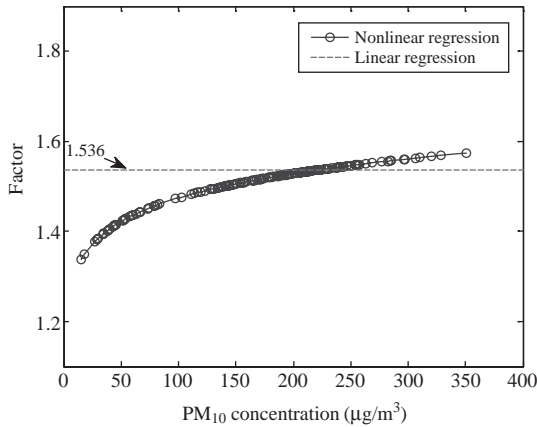
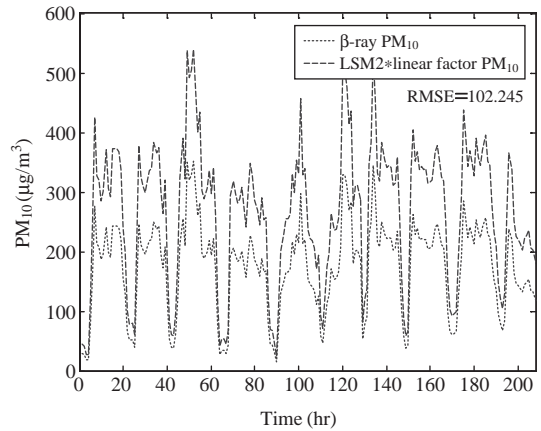


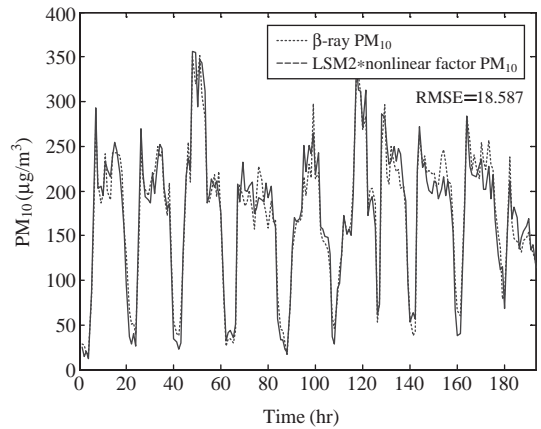
Fig. 9. The factor for PM_{10} density.

의한 빛의 산란량을 측정하는 광산란법의 특징 상, 농도 계산에 있어서 밀도 보정계수가 필요하게 된다. 선형회귀분석의 경우 이 보정계수가 상수인 데에 비해 비선형 회귀분석의 경우 그림 9와 같이 농도에 따라 변하는 값으로 보다 더 정확한 보정이 가능하다. 광산란법 방식을 사용했을 경우에 미세먼지 중량의 계산은 측정된 개수에 밀도를 곱해 계산하게 되는데 이 중량의 변화에 따라 보정계수 값을 다르게 지정해준다면 모니터링 되는 농도 역시 변화하여 계산된다.

그림 9의 직선은 선형회귀분석 결과 계산된 보정계수로 PM_{10} 농도 변화와 무관하게 1.536이고, 곡선



(a) Compensation using linear factor



(b) Compensation using nonlinear factor

Fig. 10. Compensation using factor.

은 비선형 회귀분석 결과 계산된 보정계수로 PM_{10} 농도의 변화에 따라 변화된다.

이 두 보정계수를 이용하여 보정된 광산란법 측정 데이터를 그림 10에 나타내었다. 선형 보정계수를 이용한 그림 10(a)를 보면 두 데이터 간에 차이가 있으며 RMSE(Root Mean Squared Error)가 102.245인 것에 비해, 비선형 보정계수를 이용한 그림 10(b)를 보면 두 데이터가 매우 유사하며 RMSE 역시 18.587로 상대적으로 매우 작은 것을 알 수 있다. 이는 비선형 회귀분석을 이용하여 계산된 보정계수가 광산란법 측정 보정에 보다 더 적합한 것을 보여주는 결과이다.

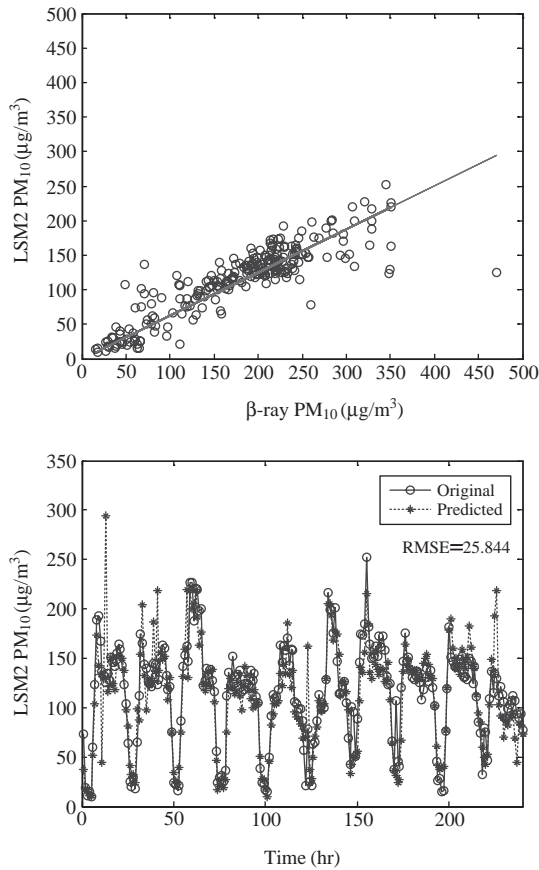


Fig. 11. Compensation using ordinary least squares method.

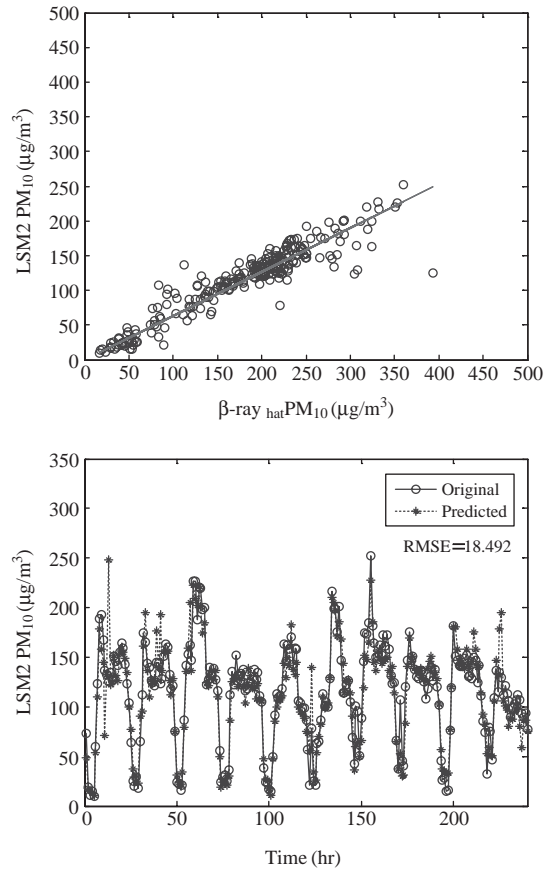


Fig. 12. Compensation using orthogonal least squares method.

3. 4 직교최소자승법을 이용한 보정

최소자승법은 독립변수에는 오차가 없다는 가정 하에 사용하는 방법으로, 본 연구와 같이 기준이 되는 실험값(베타선 흡수법) 또한 오류를 포함하고 있는 경우에는 적합하지 않을 수 있다. 따라서, 종속변수(Y)뿐 아니라 독립변수(X)에도 오차가 있을 경우에 양 변수의 오차를 모두 보정하는 직교최소자승법(Orthogonal Least Squares Method)을 이용하여 연구를 수행하였다.

그림 11과 같이, 최소자승법을 이용하면 데이터 오류 보정이 좋지 못할 뿐 아니라, 오히려 독립변수 기준으로 오차가 증가되는 결과를 가져올 수 있다. 베타선 흡수법 방식의 실험데이터와 광산란법 방식을 이용한 실험데이터 모두 이론이 아닌 실험을 통한 측

정값이기 때문에 직교최소자승법을 이용하여 오류를 보정하는 것이 적합할 것이다(채경철, 1990). 그 결과, 그림 12와 같이 데이터의 오류가 많이 보정되어 회귀선에 매우 근접하게 되었으며, 이 보정 식을 이용하여 광산란법을 이용하여 측정된 데이터를 보정하면 베타선 흡수법에서 얻어진 측정값과 매우 유사한 결과 값을 얻을 수 있는 것을 확인할 수 있다.

최소자승법을 이용하였을 경우 RMSE는 25.844였으나, 직교최소자승법 이용 시 RMSE는 18.492로 약 28.45% 감소했다. 이에 따라, 양 측정값의 오류를 모두 고려하였을 때 결과의 정확도가 높아지는 것을 알 수 있다. 이러한 보정 식을 이용해 실제 광산란법을 이용하여 측정된 데이터를 실시간으로 보정하고, 수정된 데이터를 모니터링 함으로써 보다 정확한 값

을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

기존의 베타산 흡수법 장비는 1시간 이내의 실시간 측정이 어려우며 가격이 비싸다는 단점을 가지고 있다. 이에 본 연구에서는 상대적으로 가격이 저렴하고 실시간 측정이 가능하며, 단시간의 측정에도 측정 오류가 적고 비교적 정확한 광산란법 이용의 가능성을 확인하였다.

서울 지하철 1호선의 제기동역 승강장에 베타산 흡수법 장비 1대와 광산란법 장비 2대를 설치하여 10일간 측정된 데이터를 사용하였으며, 그 중 베타산 흡수법과의 회귀분석 결과 상관계수(r^2)가 0.732으로 더 높은 PM-326(LSM2)을 선택하여 분석하였다.

선형회귀분석 및 비선형회귀분석 결과, 비선형회귀 분석의 베타산 흡수법과 광산란법의 상관계수(r^2)가 0.940으로 더 높았으며, 이는 광산란법의 미세먼지 농도 계산 시 이용되는 보정계수를 중량에 따라 변화시켜 준다면 더 정확한 보정이 가능함을 보여준다. 또한, 직교최소자승법을 이용한 보정 시 RSME가 18.492로 최소자승법을 이용했을 때보다 더 정확한 보정이 가능함을 확인할 수 있었다.

각 장비의 특성을 고려하여 보다 오차가 적은 데이터를 이용하기 위한 장비의 보정에 대한 연구가 계속된다면, 광산란법 장비를 사용한 지하역사 내 미세먼지 농도의 실시간 측정이 가능하게 될 것이다. 이를 통해 실시간 미세먼지 농도에 따라 환기 시스템 운용이 이루어진다면 현재보다 쾌적한 공기를 유지할 수 있을 것이며, 시스템의 효율이 증대될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 서울시 과제(CS070160)의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

국립환경과학원 환경건강연구부(2008) 실내공기질 공정시

협기준 개선 연구.

- 채경철(1990) 직교 회귀의 역학적 고찰, 응용통계연구, 3(1), 1047-1058.
- Aarnio, P., T. Yli-Tuomi, A. Kousa, T. Mäkelä, A. Hirsikko, K. Hämeri, M. Räisänen, R. Hillamo, T. Koskentalo, and M. Jantunen (2005) The concentrations and composition of and exposure to fine particle (PM_{2.5}) in the Helsinki subway system, Atmospheric Environment, 39, 5059-5066.
- Adams, H.S. (2001) Exposure assessment of urban transport user to particulate air pollution, Ph. D., Imperial College London, Department of Environmental Science and Technology, University of London.
- Ahn, Y.J., W.T. Kwon, and Y.W. Kim (2004) Estimation of tool life by simple & multiple linear regression analysis of Si₃N₄ ceramic cutting tools, Transaction of the Korean Society of Machine Tool Engineers, 13(4), 23-29.
- Braniš, M. (2006) The contribution of ambient sources to particulate pollution in spaces and trains of the Prague underground transport system, Atmospheric Environment, 40, 348-356.
- Chan, L.Y., W.L. Lau, S.C. Lee, and C.Y. Chan (2002a) Commuter exposure to particulate matter in public transportation modes in Hong Kong, Atmospheric Environment, 36(21), 3363-3373.
- Chan, L.Y., W.L. Lau, S.C. Zou, Z.X. Cao, and S.C. Lai (2002b) Exposure level of carbon monoxide and respirable suspended particulate in public transportation modes while commuting in urban area of Guangzhou, China, Atmospheric Environment, 36(38), 5831-5840.
- Cheng, Y.H., Y.L. Lin, and C.C. Liu (2008) Level of PM₁₀ and PM_{2.5} in Taipei Transit System, Atmospheric Environment, 42(31), 7242-7249.
- Chillrud, S.N.D. Epstein, J.M. Ross, S.N. Sax, D. Pederson, J.D. Spengler, and P.L. Kinney (2004) Elevated airborne exposures of teenagers to manganese, chromium, and iron from steel dust and New York City's subway system, Environmental Science and Technology, 38(3), 732-737.
- Choi, H.W., I.J. Hwang, S.D. Kim, and D.S. Kim (2004) Determination of source contribution based on aerosol number and mass concentration in the Seoul Subway Station, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 20(1), 17-31. (in Korean with English abstract)
- Fox, J. (2002) Nonlinear regression and nonlinear least squares, Appendix to an R and S-PLUS companion to applied

- regression.
- Furuya, K., Y. Kudo, K. Okinagua, M. Yamuki, K. Takahashi, Y. Araki, and Y. Hisamatsu (2001) Seasonal variation and their characterization of suspended particulate matter in the air of subway stations, *Journal of Trace and Microprobe Technique*, 19(4), 469-485.
- Jung, C.H., Y.S. Cho, S.M. Hwang, Y.G. Jung, J.C. Ryu, and D.S. Shin (2007) Analysis of measurement error for PM-10 mass concentration by inter-comparison study, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 23(6), 689-698. (in Korean with English abstract)
- Kim, M.Y. and I.H. Jung (1998) The measurement of airborne particulate matter using different methods at City Hall Station of Subway in Seoul, *Journal of the Korean Society for Environment Analysis*, 1(3), 227-238.
- Kim, N.J., S.S. Lee, J.S. Jeon, J.H. Kim, and M.H. Kim (2006) Evaluation of factors to affect PM₁₀ concentration in Subway Station, *Proceeding of the 43rd Meeting of Korean Society for Atmospheric Environment*, 571-572.
- Lee, M.K. and H.S. Hur (1995) Performance evaluation of linear regression, back-propagation neural network, and linear hebbian neural network for fitting linear functions, *The Korean Operations Research and Management Science Society*, 20(3), 17-29.
- Leng, L., T. Zhang, L. Kleinman, and W. Zhu (2007) Ordinary least square regression, orthogonal regression, geometric mean regression and their applications in aerosol science, *Journal of Physics*, 78, 1-5.
- Park, H.M., C.M. Lee, Y.M. Noh, Y.S. Kim, and D.S. Park (2006) A study on the indoor air quality of Seoul subway passenger cabin, *Proceeding of the 41st Meeting of Korean Society for Atmospheric Environment*, 557-558.
- Park, M.S., H.M. Pyo, J.R. Shon, and S.H. Byeon (2008) A study on the sound level exposure at Seoul Metro, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 5(3), 251-257. (in Korean with English abstract)
- Quok, M. and M. McDougall (2006) Comparison of the ARB continuous PM-2.5 monitoring network to the PM2.5 federal reference method network, *California Air Resources Boards Report*, 1-21.
- Seber, G.A.F. (1997) *Linear Regression Analysis*, John Wiley & Sons, New York, 80-130.
- Shon, J.R., J.C. Kim, M.Y. Kim, Y.S. Son, and Y. Sunwoo (2008) Particulate behavior in subway airspace, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 2-1, 54-59.
- The Ministry for the Environment (2003) *Monitoring of PM10 in New Zealand*, Air Quality Technical Report, 40.
- Tittarelli, A., A. Borgini, M. Bertoldi, E. De Saeger, A. Rupprecht, R. Stefanoni, G. Tagliabue, P. Contiero, and P. Crosignani (2008) Estimation of particle mass concentration in ambient air using a particle counter, *Atmospheric Environment*, 42, 8543-8548.