

ORIGINAL ARTICLE

운고계 후방산란 강도와 기상변수 자료를 이용한 지표면 PM_{2.5} 농도 계산

정희정 · 엄준식^{1)*}

부산대학교 BK21 지구환경시스템 교육연구단, 지구환경시스템학부 대기과학전공, ¹⁾부산대학교 대기환경과학과

Calculations of Surface PM_{2.5} Concentrations Using Data from Ceilometer Backscatters and Meteorological Variables

Heejung Jung, Junshik Um^{1)*}

BK21 School of Earth and Environmental Systems, Division of Earth Environmental System, Atmospheric Sciences Major, Pusan National University, Busan 46241, Korea

¹⁾Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Korea

Abstract

In this study, surface particulate matter (PM_{2.5}) concentrations were calculated based on empirical equations using measurements of ceilometer backscatter intensities and meteorological variables taken over 19 months. To quantify the importance of meteorological conditions on the calculations of surface PM_{2.5} concentrations, eight different meteorological conditions were considered. For each meteorological condition, the optimal upper limit height for an integration of ceilometer backscatter intensity and coefficients for the empirical equations were determined using cross-validation processes with and without considering meteorological variables. The results showed that the optimal upper limit heights and coefficients depended heavily on the meteorological conditions, which, in turn, exhibited extensive impacts on the estimated surface PM_{2.5} concentrations. A comparison with the measurements of surface PM_{2.5} concentrations showed that the calculated surface PM_{2.5} concentrations exhibited better results (i.e., higher correlation coefficient and lower root mean square error) when considering meteorological variables for all eight meteorological conditions. Furthermore, applying optimal upper limit heights for different weather conditions revealed better results compared with a constant upper limit height (e.g., 150 m) that was used in previous studies. The impacts of vertical distributions of ceilometer backscatter intensities on the calculations of surface PM_{2.5} concentrations were also examined.

Key words : PM_{2.5} concentration, Ceilometer, Backscatter, Remote sensing, Cross-validation

1. 서론

미세먼지에 의한 대기오염은 인간의 건강에 부정적인 영향을 미칠 뿐만 아니라 사회적 문제로 대두되고 있다.

경제협력개발기구에서 2015-2060년 기간에 대해 PM_{2.5} 농도와 지상 오존으로 인한 실외 대기오염의 영향을 연구한 보고서(OECD, 2016)에 따르면, 실외 대기오염으로 인한 전 세계 조기 사망자 수가 2010년 약 300만 명에서

Received 15 Decemeber, 2021; Revised 27 December, 2021;
Accepted 3 January, 2022

*Corresponding author: Junshik Um, Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Korea
Phone : +82-51-510-2171
E-mail : jjunum@pusan.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

2060년에는 600만-900만 명에 이를 것으로 보고하였다. 또한 초미세먼지인 $PM_{2.5}$ 는 입자 직경이 $2.5 \mu m$ 미만인 물질로 입자 직경이 $10 \mu m$ 미만인 미세먼지(PM_{10})보다 상대적으로 입자 직경이 작기 때문에 폐포에 침적하여 호흡기에 미치는 영향이 미세먼지보다 더 크다 (Atkinson et al., 2015). 이러한 문제에 발맞춰 현재 관측소 기반 지표면 $PM_{2.5}$ 모니터링이 활발히 이루어지고 있으나 관측소들의 공간적 분포가 조밀하지 못하기 때문에 지상 또는 위성 기반 원격탐사 방법을 사용한 지표면 $PM_{2.5}$ 농도의 간접 도출을 통해 이러한 문제를 부분적으로 해결할 수 있다(Münkel et al., 2007).

에어로졸 광학깊이(Aerosol Optical Depth, AOD)는 태양복사가 대기의 상층에서 지표까지 도달하는 동안 에어로졸에 의해 감쇄되는 정도를 나타내는 척도이며, 지표면 $PM_{2.5}$ 농도와 높은 상관성을 보인다(Li et al., 2016). 그러나 태양복사에 의존하는 수동적 원격탐사 방법에 의한 AOD 산출은 주간 및 맑은 하늘인 조건에만 적용 가능하다. 이와 달리 라이다(lidar)와 같은 능동적 관측 기기는 구름이 존재하거나 야간에도 에어로졸 후방산란 강도의 연직 분포 관측이 가능하며, 이로부터 AOD를 산출할 수 있다. 현재 국내에서는 한반도 에어로졸 라이다 관측 네트워크(Korea Aerosol Lidar Observation Network, KALION)가 운영 중이며 라이다뿐만 아니라 운고계의 관측도 활발히 이루어지고 있다(Yeo et al., 2016). 라이다 장비는 복잡하고 비용이 비싸기 때문에 상대적으로 싸고 간단한 운고계(ceilometer)를 많이 사용한다. 운고계는 본래 운저고도를 탐지하기 위해 개발되었으나 기술의 발달과 함께 혼합층과 에어로졸 광학 특성 또한 탐지할 수 있게 되었다. 운고계의 또 다른 장점은 광학 송신기와 수신기 사이의 중첩 거리가 짧기 때문에 지표면 근처의 에어로졸 정보를 탐지하기에 적합하다(Li et al., 2017).

운고계가 관측한 지표면 근처 에어로졸 후방산란 강도를 이용하여 지표면 $PM_{2.5}$ 농도를 추정할 수 있으며, 선행연구들은 운고계 후방산란 강도 연직 분포와 지표면 입자상 물질 질량 농도 사이에서 좋은 상관관계가 있음을 보였다. Münkel et al.(2007)은 맑은 날의 운고계 후방산란 강도 자료를 이용하여 지표면 PM_{10} 농도와 에어로졸 후방산란 강도 사이에 높은 상관관계(상관계수 $R=0.83$)가 존재함을 보고했다. Li et al.(2017)은 운고

계로 관측한 후방산란 강도와 기상변수 자료를 이용하여 지표면 $PM_{2.5}$ 농도 계산 모델을 개발하였다. 주간 맑은 날, 주간 흐린 날, 야간의 3가지 조건에 대해 지표면 $PM_{2.5}$ 농도 계산 모델 결과와 관측된 한 시간 평균 $PM_{2.5}$ 농도 사이에 결정계수 R^2 은 각각 0.56, 0.34, 0.42 임을 보였다. Parde et al.(2020)은 45 m의 고정된 고도에서의 후방산란 강도 자료를 이용하여 지표면 $PM_{2.5}$ 및 PM_{10} 농도를 계산하는 선형 회귀 모델을 개발했다. 선형 회귀 모델에서 계산한 $PM_{2.5}$ (PM_{10}) 농도는 관측된 지표면 농도와 $R=0.84$ (0.82)의 강한 상관관계를 보였으나 이는 매우 제한된 관측 기간(1개월)에 대한 결과이다.

지표면 $PM_{2.5}$ 농도가 기상조건에 큰 영향을 받기 때문에(Li et al., 2017) 본 연구에서는 운고계의 후방산란 강도와 기상변수 자료를 이용하여 기상변수 유무에 따른 산출된 지표면 $PM_{2.5}$ 농도와 후방산란 강도 사이의 상관성을 도출하였다. 또한 본 연구에서는 기상조건이 지표면 $PM_{2.5}$ 농도에 미치는 영향을 정량화하기 위하여 Li et al.(2017)에서 고려한 주간 맑은 날, 주간 흐린 날, 야간의 3가지 기상조건을 더욱 세분화하여 8가지 기상조건(주간 100% 맑음, 주간 100% 흐림, 주간 부분 흐림, 주간 전체, 야간 100% 맑음, 야간 100% 흐림, 야간 부분 흐림, 야간 전체)으로 나눠서 연구를 진행하였다. 지표면 $PM_{2.5}$ 농도 계산 결과에 대한 운고계 후방산란 강도 연직 분포가 미치는 영향에 대해서도 분석하였다.

2. 자료 및 방법

2.1. 연구자료

본 연구에서 사용한 자료의 기간은 2019년 8월 13일부터 2021년 3월 3일(약 19개월)이다. 부산대학교 자연대연구실험동 옥상($35.24^{\circ}N$, $129.08^{\circ}E$)에 위치한 운고계로부터 연직 후방산란 강도와 운저고도를 관측했으며, 운고계 바로 옆에 위치한 장전동 광화학오염물질측정소에서 관측한 $PM_{2.5}$ 농도 자료와 기상변수 자료(온도, 상대습도, 풍속, 강수량)를 이용하였다. 주간과 야간을 구분하기 위하여 한국천문연구원의 일출, 일몰 자료를 이용하였다.

부산대학교 자연대연구실험동 옥상에 위치한 운고계는 Campbell SkyVUEPRO (CS135) ceilometer로 대기 중으로 근적외선 빛(파장 912 nm)의 짧은 펄스를

방출하는 라이더 방식 관측 장비이다. CS135 운고계는 지표로부터 10 km까지 5 m 연직 해상도의 후방산란 강도 연직 분포를 관측하며 단일 분할 렌즈로 설계되어 충분한 광학 신호 대 잡음 비(signal to noise ratio)를 얻을 수 있다(Campbell Scientific, 2021). 또한 약 910 nm 파장에서 수증기 보정이 다른 파장대보다 더 정확하므로 에어로졸 원격탐사에 이용 가능하다(Wiegner and Gasteiger, 2015).

본 연구에서 후방산란 강도는 운고계 위 고도 5 m에서 200 m 사이를 5 m 연직 해상도에 대해 각 고도별로 한 시간 평균을 취해 사용하였다. PM_{2.5} 농도, 기상변수(온도, 상대습도, 풍속, 강수량) 자료 또한 한 시간 평균을 사용하였다. 강수량이 측정되거나 상대습도가 95% 이상인 경우는 강수와 안개로 판별하여 제외하였다. 또한 운고계로 관측한 운저고도가 200 m 이하인 조건은 제외하였다. 따라서 본 연구에서 흐림(cloudy)을 포함하는 100% 흐림, 부분 흐림, 전체(100% 맑음+100% 흐림+부분 흐림)에 대한 기상조건은 운저고도가 200 m 이상인 경우만 해당한다.

2.1.1. 이상값 제거

운고계 후방산란 강도 자료와 PM_{2.5} 자료를 사용하기 전에 이상값 제거 작업을 수행하였다. CS135 운고계는 후방산란 강도가 2³⁹-1보다 클 경우 2⁴⁰을 차감해서 계산하기 때문에 후방산란 강도는 -2³⁹ ~ +(2³⁹-1) 사이의 값을 가지며 단위는 1/(sr·m)이다(Campbell Scientific, 2021). 본 연구에서는 후방산란 강도가 음수이거나 1/(10⁴·sr·m)보다 큰 경우의 자료는 제거하였다. CS135 운고계는 평균적으로 약 1초 정도의 시간 해상도를 가진다. 후방산란 강도의 초 단위 관측에서 5 m에서 200 m 사이의 각 고도에 대해 후방산란 강도 관측값이 직전 후방산란 강도 관측값보다 100배 이상인 경우에 대하여 제거하였다. 이러한 과정을 통해 후방산란 강도의 이상값은 전체 자료에 대해 약 0.13%의 자료가 제거되었다.

PM_{2.5} 농도 자료는 본 연구에서 이용하는 장전동의 한 시간 평균 PM_{2.5} 농도가 인근 관측소인 부곡동과 온천동 자료에 비해 각각 3배 이상 높고 30 μg/m³ 이상 차이가 나며, 이 때 부곡동과 온천동의 PM_{2.5} 농도가 10 μg/m³ 이하로 차이 나는 경우 제거하였다. 이 결과 장전동 PM_{2.5} 농도 관측값은 전체 자료에 대해 약 0.01% 제거되었다.

2.2. 연구방법

2.2.1. 지표면 PM_{2.5} 농도 계산

거리 r 에서 운고계에 수신되는 광학 세기는 다음의 라이다 방정식으로 설명된다(Barbato et al., 2016).

$$P(r, \lambda) = P_0 \frac{c\tau}{2} A \eta \frac{O(r)}{r^2} \beta(r, \lambda) I(r) \quad (1)$$

위 식에서 λ 는 방출된 레이저 펄스의 파장이며 P_0 는 단일 레이저 펄스의 평균 세기, c 는 빛의 속도, τ 는 레이저 펄스 지속시간, A 는 광학 수신기의 면적(the area of the receiver optics), η 는 시스템 효율이다. $O(r)$ 는 방출된 레이저와 광학 수신기 시야 사이의 범위에 따른 중첩 적분, $I(r)$ 는 대기의 투과도이다. $\beta(r, \lambda)$ 는 후방산란 강도이며 본 연구에서의 단위는 1/(10⁴·sr·m)이다. 후방산란 강도는 두 성분으로 나눌 수 있으며 식 (2)와 같다.

$$\beta(r, \lambda) = \beta^m(r, \lambda) + \beta^a(r, \lambda) \quad (2)$$

여기서 $\beta^m(r, \lambda)$ 와 $\beta^a(r, \lambda)$ 는 각각 공기 분자와 에어로졸에 의한 후방산란 강도를 나타낸다. 근적외선 파장에서의 후방산란 강도는 파장이 증가함에 따라 레일리(Rayleigh) 산란이 급격하게 감소하기 때문에 공기 분자의 기여는 무시할 수 있으므로 본 연구에서는 총 후방산란 강도를 에어로졸에 의한 후방산란 강도로 간주한다.

에어로졸이 기상변수에 의해 대기 중에 잘 혼합되었다는 가정 아래 지표면 PM_{2.5} 농도와 에어로졸 연직 후방산란 강도 사이의 관계에 기초한 경험적 모델을 다음과 같이 나타낼 수 있다(Li et al., 2017).

$$PM_{2.5} = a_0 + \left(a_1 + a_2 f(RH) + \sum_{i=1}^n a_{2+i} M_i \right) \left(\int_0^z \beta(r, \lambda) dr \right)^{b_2} + \epsilon \quad (3)$$

여기서 흡습 성장 요소는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f(RH) = \frac{1}{(1 - RH)^{b_1}} \quad (4)$$

Table 1. The number of one hour averaged observation data for 8 different weather conditions

	Daytime 100% clear	Daytime 100% cloudy	Daytime partial cloudy	Daytime all	Nighttime 100% clear	Nighttime 100% cloudy	Nighttime partial cloudy	Nighttime all
Number of data	971	407	2351	3729	1531	818	2150	4499

RH 는 상대습도이며 M_i 는 지표면 온도($i=1$)와 풍속($i=2$)을 포함하는 기상변수 요소들이다. z 는 고도이며 $a_0, a_1, a_2, a_{2+i}, b_1, b_2$ 는 계수이고 ϵ 은 계산에서의 오차이다. 기상변수가 없는 모델을 수행하기 위해서는 식 (3)에서 기상요소들을 제외하여 다음과 같이 나타낸다.

$$PM_{2.5} = a_0 + a_1 \left(\int_0^z \beta(r, \lambda) dr \right)^{b_1} + \epsilon \quad (5)$$

식 (3)에서 지표면 온도(T), 상대습도(RH), 풍속(W)의 기상요소들을 포함한 식은 다음과 같다.

$$PM_{2.5} = c_0 + \left(c_1 + c_2 \frac{1}{(1 - RH)^{d_1}} + c_3 T + c_4 W \right) \left(\int_0^z \beta(r, \lambda) dr \right)^{d_2} + \epsilon \quad (6)$$

식 (6)에서 $c_0, c_1, c_2, c_3, c_4, d_1, d_2$ 는 계수이다. 본 연구에서는 운고계 후방산란 강도 관측값과 기상변수 관측값을 통해 식 (5)와 식 (6)에 있는 계수들을 결정하였다.

2.2.2. 교차검증

회귀 모델이 너무 복잡하거나 전체 자료에 대해서 회귀 모델을 개발하는 경우 과적합이 발생할 수 있다 (Santos et al., 2018). 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 교차검증(Cross-validation, CV)을 실행하였다. 약 1년 7개월 기간 동안 한 시간 평균 자료를 주간 100% 맑음(Daytime 100% clear), 주간 100% 흐림(Daytime 100% cloudy), 주간 부분 흐림(Daytime partial cloudy), 주간 전체(Daytime all), 야간 100% 맑음(Nighttime 100% clear), 야간 100% 흐림(Nighttime 100% cloudy), 야간 부분 흐림(Nighttime partial cloudy), 야간 전체(Nighttime all)의 총 8가지 기상조건

으로 나누어 지표면 $PM_{2.5}$ 농도를 계산하였다. 여기서 주간과 야간 100% 맑음은 한 시간 동안 모든 초 단위 관측 자료에서 운저고도가 관측되지 않은 자료이며, 주간과 야간 100% 흐림은 한 시간 동안 모든 초 단위 관측자료에서 운저고도가 관측된 자료이다. 주간과 야간 부분 흐림은 주간과 야간 100% 맑음과 주간과 야간 100% 흐림을 제외한 경우이며, 주간과 야간 100% 맑음과 주간과 야간 100% 흐림, 주간과 야간 부분 흐림을 모두 포함하는 것이 주간과 야간 전체이다. 기상조건별 한 시간 관측 자료의 수는 Table 1에 제시하였다. Table 1에서 자료의 수는 야간이 주간보다 많았다. 또한 주간과 야간 모두에 대해 전체, 부분 흐림, 100% 맑음, 100% 흐림 순으로 많았다. 교차검증의 방법은 각 기상조건에 대해 자료의 90%는 무작위로 훈련 자료로 선택하고 나머지 10%로 모델을 시험하는 과정을 100번 반복 실행하여 과적합에 의해 나타날 수 있는 편향된 결과를 방지하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 고도별 교차검증

식 (5)와 식 (6)에서 지표로부터 특정 고도에 대한 후방산란 강도 적분 $\left(\int_0^z \beta(r, \lambda) dr \right)$ 의 상한 고도가 되는 최적의 고도(z)를 찾기 위해 고도 10 m에서 200 m 사이를 5 m 간격으로 고도별 교차검증을 수행하였다. Fig. 1은 기상변수를 포함하지 않은 식 (5)에 대한 기상조건별 고도별 교차검증의 결과를 나타내며, Fig. 2는 기상변수를 포함한 식 (6)에 대한 기상조건별 고도별 교차검증의 결과를 나타낸다. 식 (5)와 식 (6)의 회귀 모델에서 자료의 90%는 무작위로 훈련 자료로 선택하여 회귀 모델의 계수들을 계산한다. 다음으로 식 (5)와 식 (6)에 계산된 계수들을 적용하여 훈련 자료로 선택되지 않은 나머지 10%를 독립변수에 적용하여 종속변수인 지표면 $PM_{2.5}$

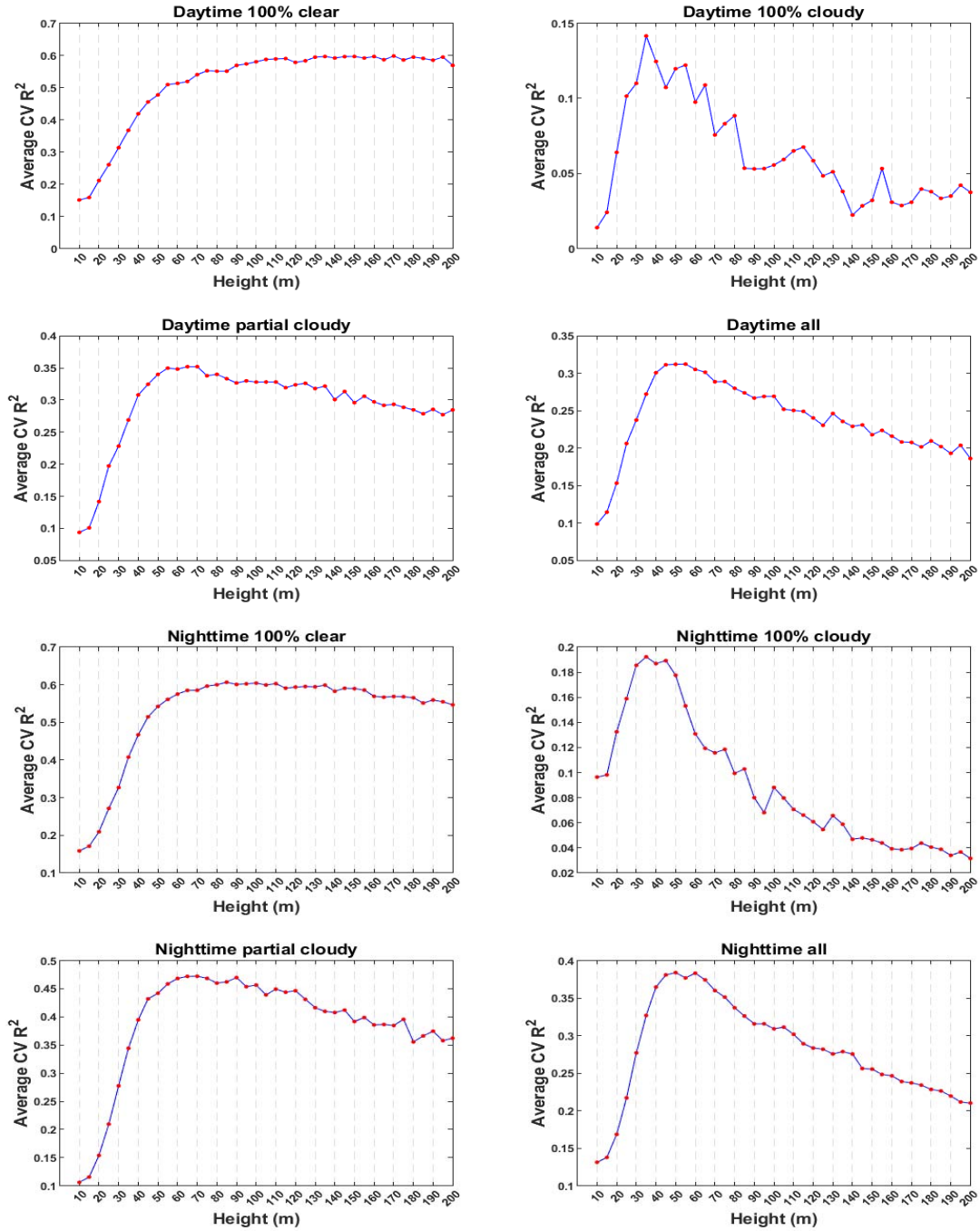


Fig. 1. Averaged CV R² (coefficient of determination of cross-validation) of the 100 independent cross-validations as a function of height for 8 different weather conditions with the model without meteorological variables (i.e., Eq. 5). Each panel shows different weather conditions.

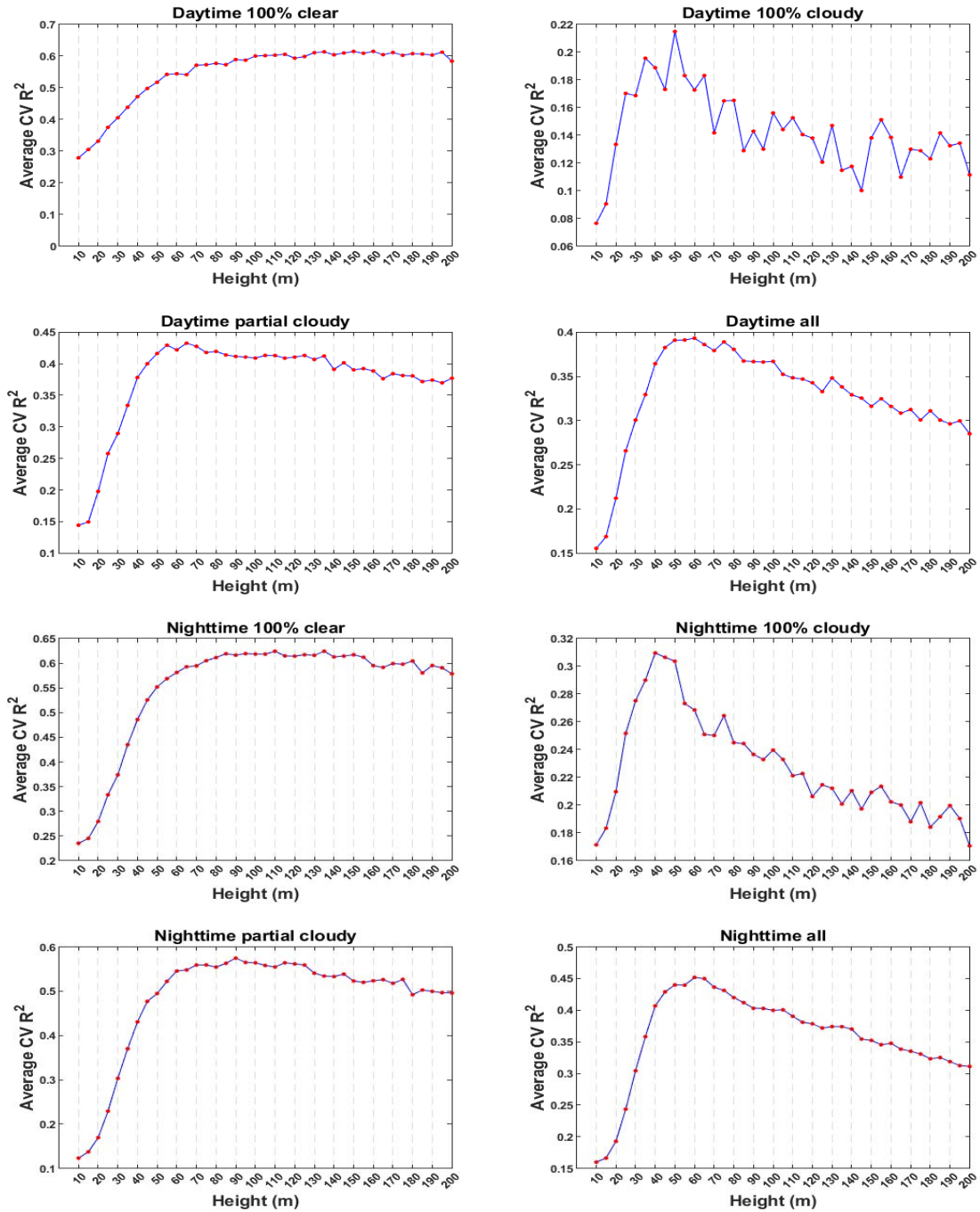


Fig. 2. Same as Fig. 1, but for the model with meteorological variables (i.e., Eq. 6).

Table 2. The determined optimal heights for 8 different weather conditions without meteorological variables (Eq. 5) and with meteorological variables (Eq. 6)

Model	Daytime 100% clear	Daytime 100% cloudy	Daytime partial cloudy	Daytime all	Nighttime 100% clear	Nighttime 100% cloudy	Nighttime partial cloudy	Nighttime all
Without meteorological variables (Eq. 5)	150 m	35 m	70 m	55 m	85 m	35 m	70 m	60 m
With meteorological variables (Eq. 6)	160 m	50 m	65 m	60 m	110 m	40 m	90 m	60 m

농도를 계산하는 것이 1번의 교차검증이다. 이 1번의 교차검증에 대한 결정계수가 CV R²이다. 본 연구에서는 100번의 교차검증을 실행했으므로 Fig. 1과 Fig. 2에 나타난 값들은 CV R² 100개의 값들에 대한 평균을 나타낸다. Fig. 1과 Fig. 2에서 주간과 야간 100% 맑음의 경우, 고도가 증가함에 따라 평균값이 점차 증가하다 약 90 m 고도 이상부터 값이 일정하게 나타남을 알 수 있다. 반면, 주간과 야간 100% 흐림의 경우에 대해서는 약 40 m 고도에서 최댓값을 보이며 이후 고도가 증가할수록 값이 감소함을 알 수 있다. 주간과 야간 부분 흐림이나 주간과 야간 전체의 경우는 주간과 야간 100% 흐림과 비슷한 경향을 나타내고 있다. Table 2는 Fig. 1과 Fig. 2에서 각 기상조건에 대해 100번 CV R²의 평균값이 가장 높은 고도(최적의 고도)를 정리한 것이다. 기상조건에 따라 최적의 고도는 다르게 나타났다. 주간과 야간 100% 맑음의 경우 대부분 약 100 m 이상으로 최적의 고도가 제일 높게 계산되었고 주간과 야간 100% 흐림은 약 40 m로 최적의 고도가 가장 낮게 계산되었다. 이는 Li et al.(2017)에서 주간 맑은 날, 주간 흐린 날, 야간의 모든 기상조건에 대해 후방산란 강도 적분의 상한 고도를 150 m로 일괄 적용한 것과는 다른 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 Table 2에 보인 최적의 고도들을 각 기상조건별 식 (5)와 식 (6)의 후방산란 강도 적분 상한 고도로 적용하였다.

3.2. 다양한 기상조건에서의 모의 결과

지표면 PM_{2.5} 농도 계산에서 기상변수 적용 유무에 따른 지표면 PM_{2.5} 농도 계산 결과를 평가하기 위하여 최적의 고도(Table 2)를 적용한 식 (5)와 식 (6)에 대해 100

번 CV R²을 비교한 결과를 Fig. 3에 보인다. 주간 100% 맑음의 경우 식 (5)에 대한 CV R²의 평균은 0.60이며 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error, RMSE)의 평균은 6.69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다. 주간 100% 맑음의 경우 식 (6)에 대한 CV R² 평균은 0.61이고 RMSE 평균은 6.64 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 비슷한 결과를 나타내고 있다. 주간 100% 맑은 날에 대해서는 AOD 수동적 원격탐사가 가능하기 때문에 이를 이용한 다른 선행연구의 결과와 비교할 수 있다. 앞의 결과는 Li et al.(2016)이 개발한 AOD와 운고계 후방산란 강도를 결합한 비선형 모델(CV R²=0.60, RMSE=5.83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)의 결과와 유사하고, AOD만을 이용한 모델의 결과보다는 더 좋은 결과를 보였다(CV R²=0.40, RMSE=7.14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; Li et al., 2016). 야간 100% 맑음의 경우 식 (5)에 대한 CV R²의 평균은 0.61, RMSE의 평균은 7.27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며 식 (6)에 대한 CV R²의 평균은 0.62, RMSE의 평균은 7.09 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다. 주간과 야간 100% 맑음에 대해서는 기상변수 유무에 따른 CV R²의 평균의 차이가 약 0.01로 매우 작으며 이는 Fig. 3에서도 확인할 수 있다.

주간과 야간 100% 흐림, 주간과 야간 부분 흐림, 주간과 야간 전체에 대해서는 기상변수를 포함하지 않은 모델보다 기상변수를 포함한 모델에서의 CV R² 값이 대체로 큰 것을 알 수 있다. 주간 100% 흐림에서는 식 (5)에 대한 CV R² 평균은 0.14이며, 식 (6)에 대한 CV R² 평균은 0.21로 결과가 더 좋은 것을 알 수 있다. 야간 100% 흐림에 대해서도 식 (5)(CV R²=0.19)의 결과보다 식 (6)(CV R²=0.31)의 결과가 더 좋게 나타났다. 주간 부분 흐림에 대해 식 (5)와 식 (6)에 대한 CV R²의 평균값은 각각 0.35와 0.43이고, 야간 부분 흐림에 대해서도 CV

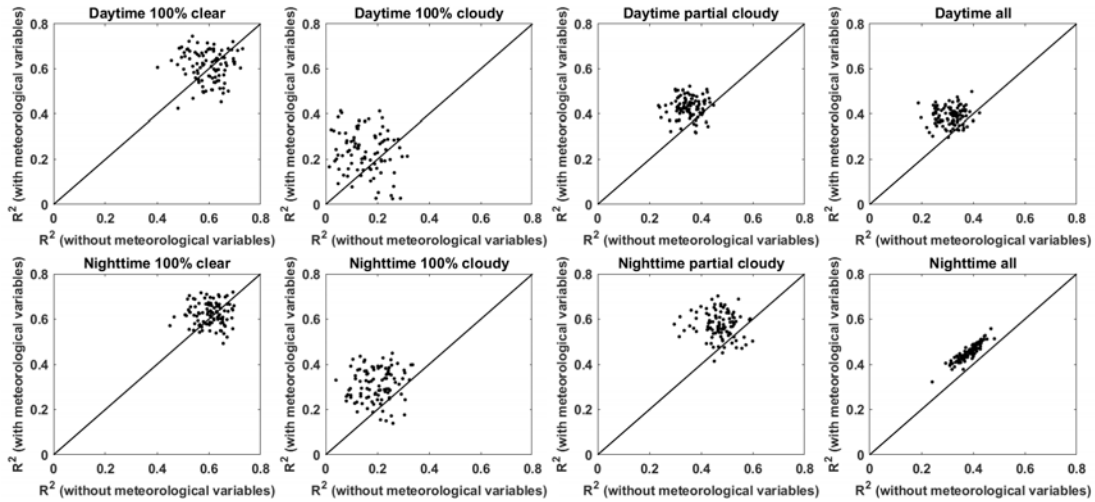


Fig. 3. A comparison between the CV R^2 of the 100 independent cross-validations with applying the determined optimal heights on Eq. 5 (i.e., without meteorological variables) and with those with applying the determined optimal heights on Eq. 6 (i.e., with meteorological variables). Each panel indicates different weather conditions.

R^2 의 평균값이 각각 0.47과 0.57로 기상변수를 포함하였을 경우의 값이 더 증가하였다. 주간 전체에서도 마찬가지로 식 (5)와 식 (6)에 대한 CV R^2 의 평균값은 각각 0.31과 0.39이며, 야간 전체에 대해서도 CV R^2 의 평균값이 각각 0.38과 0.45로 기상변수를 포함한 모델에서의 결과가 더 좋은 것을 알 수 있다.

야간 전체의 경우, 다른 기상조건들과 달리 CV R^2 의 분포가 선형적으로 나타났는데 이는 식 (5)와 식 (6)에 대한 결정된 최적의 고도가 60 m로 같기 때문이다 (Table 2). 지표면 $PM_{2.5}$ 농도 계산에서 기상변수 적용 유무에 따른 지표면 $PM_{2.5}$ 농도 계산 결과, 8가지 기상조건 모두에서 기상변수를 포함한 모델이 기상변수를 포함하지 않은 모델보다 CV R^2 평균값이 더 높은 것을 알 수 있었다.

3.3. 계산한 $PM_{2.5}$ 농도와 측정된 $PM_{2.5}$ 농도의 비교

식 (5)와 식 (6)에 사용될 가장 적합한 계수(즉, $a_0, a_1, b_1, c_0, c_1, c_2, c_3, c_4, d_1, d_2$)들을 찾기 위하여 100번의 독립적인 교차검증을 실행하였으며 CV R^2 의 중간값 (median)에 제일 가까운 값일 때의 계수들을 선택하였다. 기상변수를 포함하지 않는 경우(식 (5))와 기상변수

를 포함한 경우(식 (6))에 대해 계산한 최적의 계수들은 각각 Table 3과 Table 4에 정리하였다.

Fig. 4는 8개의 기상조건별로 측정된 $PM_{2.5}$ 농도 (measured $PM_{2.5}$)와 각 기상조건에 대해 계산한 최적의 고도(Table 2)와 계수(Table 3)들을 식 (5)(즉, 기상변수를 고려하지 않은 경우)에 적용하여 계산한 $PM_{2.5}$ 농도 (calculated $PM_{2.5}$)와의 비교이다. Fig. 4에서 주간의 경우(윗 행) 상관계수 값이 주간 100% 맑음($R=0.77$), 주간 부분 흐림($R=0.59$), 주간 전체($R=0.56$), 주간 100% 흐림($R=0.37$) 순으로 높았다. 야간의 경우(아래 행) 주간의 경우와 마찬가지로 R 값이 야간 100% 맑음 ($R=0.78$), 야간 부분 흐림($R=0.69$), 야간 전체($R=0.62$), 야간 100% 흐림($R=0.45$) 순으로 높았다. 주간과 야간에서 R 값이 제일 크고 RMSE 값이 제일 작은 결과를 보였던 것은 100% 맑음이다. 주간 100% 맑음의 R은 0.77, RMSE는 $6.82 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며 야간 100% 맑음의 R은 0.78, RMSE는 $7.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 다른 주간과 야간 기상조건들보다 R 값은 크고 반면 RMSE 값은 작았다. R 값이 제일 낮았던 주간과 야간 100% 흐림의 경우, 측정된 $PM_{2.5}$ 농도가 약 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 기준으로 저농도일 때 과대 모의를 하였으며 고농도일 때 과소 모의를 보였다.

Table 3. The determined coefficients for Eq. (5)

	a_0	a_1	b_1
Daytime 100% clear	-88.18	100	0.18
Daytime 100% cloudy	-75.93	100	0.08
Daytime partial cloudy	-78.88	100	0.15
Daytime all	-76.38	100	0.13
Nighttime 100% clear	-14.35	32.31	0.54
Nighttime 100% cloudy	-73.18	100	0.1
Nighttime partial cloudy	-7.72	26.97	0.6
Nighttime all	-77.61	100	0.16

Table 4. The determined coefficients for Eq. (6)

	c_0	c_1	c_2	c_3	c_4	d_1	d_2
Daytime 100% clear	-86.32	100	-0.89	0.02	-1	1	0.19
Daytime 100% cloudy	-37.37	78.1	-9.97	-0.21	-2.52	0.21	0.1
Daytime partial cloudy	-62.49	99.62	-10	0.13	-2.26	0.4	0.19
Daytime all	-65.75	100	-6.3	0.13	-2.37	0.54	0.16
Nighttime 100% clear	-11.9	29.57	-0.45	-0.07	0.93	1	0.59
Nighttime 100% cloudy	-27.07	71.93	-10	-0.21	-2.34	0.29	0.19
Nighttime partial cloudy	4.31	27.53	-10	-0.09	-1.39	0.23	1
Nighttime all	-63.86	100	-7.32	0.01	-2.34	0.43	0.2

Fig. 5는 8개의 기상조건별로 측정된 PM_{2.5} 농도 (measured PM_{2.5})와 각 기상조건에 대해 계산한 최적의 고도(Table 2)와 계수(Table 4)들을 식 (6)(즉, 기상변수를 고려한 경우)에 적용하여 계산한 PM_{2.5} 농도 (calculated PM_{2.5})와의 비교이다. 모든 8가지 기상조건에 대하여 기상변수를 포함하지 않은 모델에서 계산한 PM_{2.5} 농도의 결과(Fig. 4)보다 R이 증가하고 RMSE가 감소하였다. Fig. 5에서 주간인 경우 R 값이 주간 100% 맑음(R=0.78), 주간 부분 흐림(R=0.66), 주간 전체(R=0.63), 주간 100% 흐림(R=0.47) 순으로 높았다. 야간의 경우 R 값이 야간 100% 맑음(R=0.79), 야간 부분 흐림(R=0.76), 야간 전체(R=0.67), 야간 100% 흐림(R=0.57) 순으로 높았다. 이는 기상변수를 적용하지 않은 경우(Fig. 4)와 같은 경향성을 보임을 알 수 있다. 주

간과 야간 100% 맑음의 경우에 대해서는 기상변수 유무에 따른 R 값의 차이가 약 0.01로 작았으며 주간과 야간 100% 흐린 경우에 대해서는 기상변수 유무에 따른 R 값의 차이가 제일 크게 나타났다. 주간 100% 흐린 경우는 R 값이 0.37에서 0.47로 증가했으며, 야간 100% 흐린 경우는 R 값이 0.45에서 0.57로 증가하였다. 이는 본 연구에서 고려한 모든 8개의 기상조건에 대해 기상변수를 포함한 경우가 기상변수를 포함하지 않은 경우보다 더 효과적임을 의미한다.

야간에는 태양광에 의한 오염이 없기 때문에 주간보다 후방산란 강도의 신호 대 잡음 비가 더 좋다. 이는 Fig. 4와 Fig. 5에서 100% 맑음, 100% 흐림, 부분 흐림, 전체에 대해 주간인 조건보다 야간인 조건에 대해 R 값이 더 높은 것으로 알 수 있다. 또한 모든 8가지 기상조건에

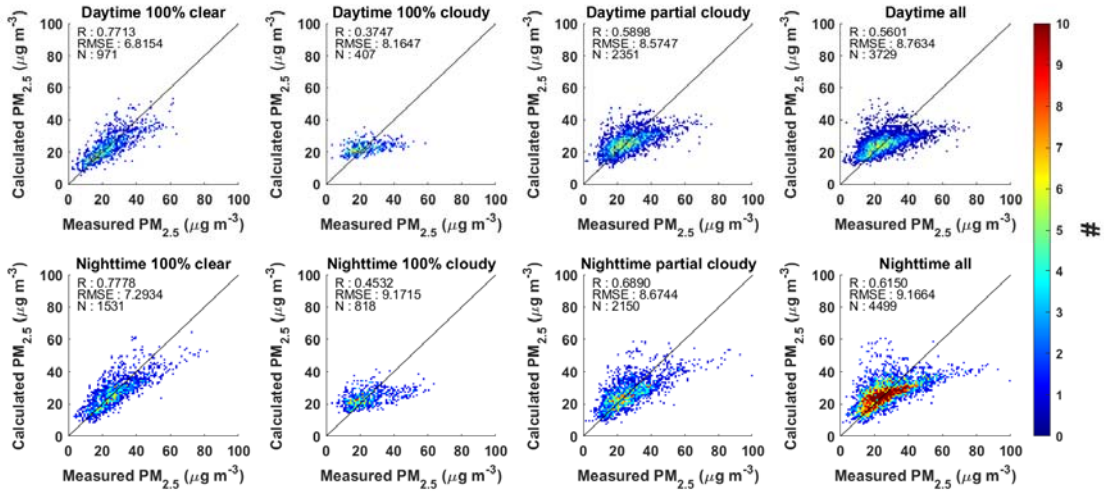


Fig. 4. Comparisons between the measured $PM_{2.5}$ and the calculated $PM_{2.5}$ for each weather condition. The calculated $PM_{2.5}$ is calculated by applying optimal heights (Table 2) and coefficients (Table 3) when meteorological variables are not taken into account (Eq. 5). The R, RMSE, and N indicate correlation coefficient, root mean square error, number of data, respectively.

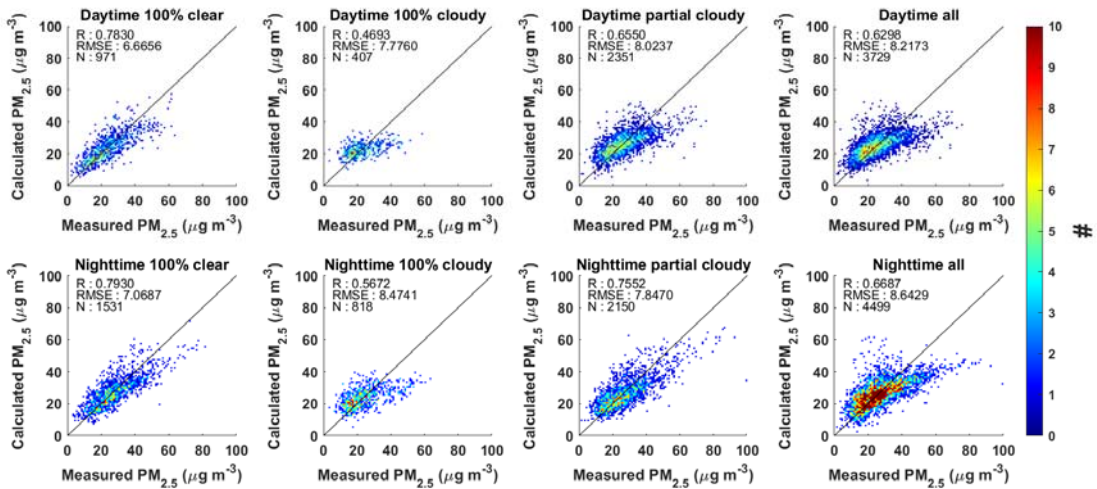


Fig. 5. Same as Fig. 4, but the calculated $PM_{2.5}$ is calculated by applying optimal heights (Table 2) and coefficients (Table 4) when meteorological variables are taken into account (Eq. 6).

대해 기상변수를 포함한 경우(Fig. 5)가 기상변수를 포함하지 않은 경우(Fig. 4)보다 지표면 $PM_{2.5}$ 농도 계산 시 더 좋은 결과를 보인다.

3.3.1. 150 m와 최적의 고도에서 계산한 $PM_{2.5}$ 농도와 측정된 $PM_{2.5}$ 농도 비교

본 연구에서는 식 (5)와 식 (6)에 사용되는 후방산란 강도 적분의 상한 고도를 8가지 기상조건에 대한 고도별 교차검증을 통해 기상조건별로 최적의 고도를 결정하였다. 반면, Li et al.(2017)은 식 (5)와 식 (6)의 후방산란 강도 적분 상한 고도를 150 m로 일괄 적용하여 지표면

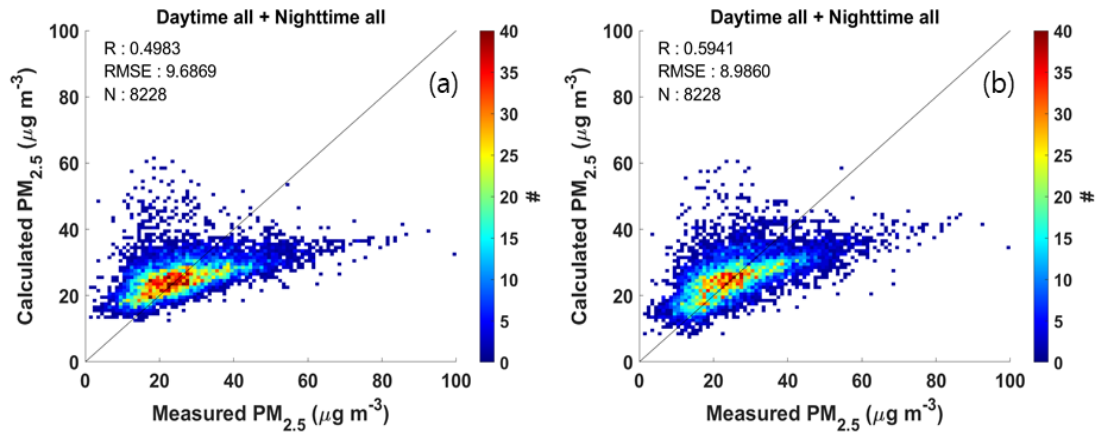


Fig. 6. Comparisons between the measured PM_{2.5} and the calculated PM_{2.5} for daytime all and nighttime all (a) with the 150 m upper limit height for the integration of backscatter intensity and (b) with the optimal upper limit height for the integration of backscatter intensity. For these comparisons meteorological variables are not considered (i.e., Eq. 5).

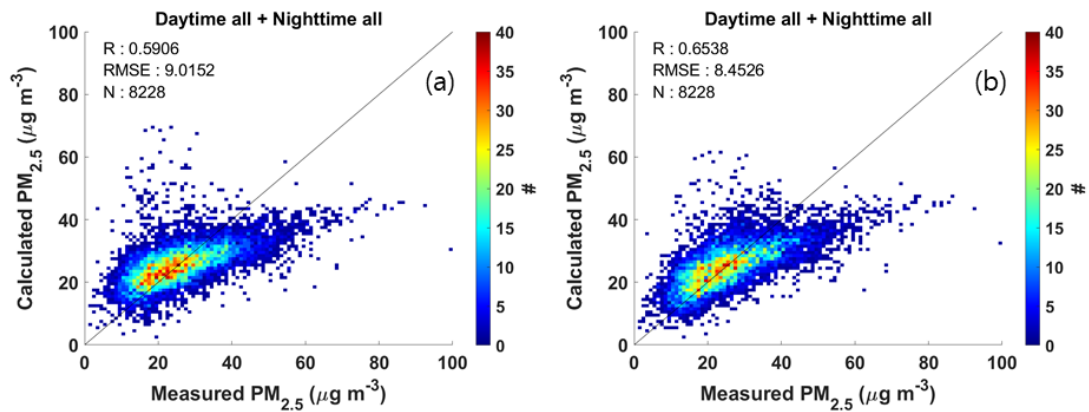


Fig. 7. Same as Fig. 6, but with considering meteorological variables (i.e., Eq. 6).

PM_{2.5} 농도를 계산하였다. 이에 본 연구에서는 기상조건 별로 다른 최적의 고도를 적용하여 계산한 지표면 PM_{2.5} 농도와 선행연구 방법에 따라 계산한 지표면 PM_{2.5} 농도를 비교하여 기상조건별 최적의 고도 산출의 중요성을 확인하였다.

Fig. 6과 Fig. 7은 주간 전체와 야간 전체를 결합한 결과이다. Fig. 6은 기상변수를 포함하지 않은 경우에 대해 계산한 PM_{2.5} 농도(calculated PM_{2.5})와 측정된 PM_{2.5} 농도(measured PM_{2.5}) 사이의 비교이다. Fig. 6-(a)는 후

방산란 강도 적분 상한 고도를 150 m로 적용하였으며 Fig. 6-(b)는 후방산란 강도 적분 상한 고도를 최적의 고도(Table 2)로 적용하였다. Fig. 7은 기상변수를 포함한 경우에 대해 계산한 PM_{2.5} 농도(calculated PM_{2.5})와 측정된 PM_{2.5} 농도(measured PM_{2.5}) 사이의 비교이다. Fig. 7-(a)는 후방산란 강도 적분 상한 고도를 150 m로 적용하였으며 Fig. 7-(b)는 후방산란 강도 적분 상한 고도를 최적의 고도(Table 2)로 적용하였다. Fig. 6-(a)와 Fig. 6-(b), Fig. 7-(a)와 Fig. 7-(b)를 각각 비교했을 때

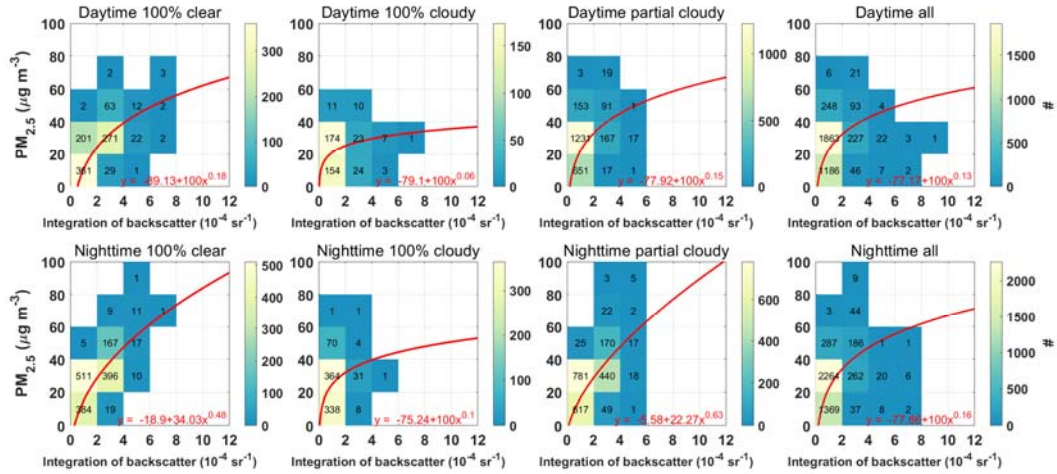


Fig. 8. Comparisons between the integration of backscatters and the measured $PM_{2.5}$ concentrations for 8 different meteorological conditions. In each panel, the best fitting curve and equation are shown with red. The integration of backscatters and the measured $PM_{2.5}$ concentrations are divided into every $2/(10^4 \cdot sr)$ and $20 \mu g/m^3$ domains, respectively. In each domain, the number of data within the domain is embedded.

최적의 고도를 적용(Fig. 6-(b), Fig. 7-(b))한 경우가 150 m로 일괄 적용(Fig. 6-(a), Fig. 7-(a))한 경우보다 더 큰 R 값과 작은 RMSE 값을 보인다. 기상변수를 포함하지 않은 경우(Fig. 6) 최적의 고도를 적용하면 150 m 일괄 적용 시보다 R은 0.50에서 0.59로 증가하고 RMSE는 $0.7 \mu g/m^3$ 감소하였다. 기상변수를 포함한 경우(Fig. 7)에 대해 R은 0.59에서 0.65로 증가하고 RMSE는 $0.57 \mu g/m^3$ 감소하였다. 이를 통해 모든 기상조건에 대해 후방산란 강도 적분 상한 고도를 150 m로 일괄 적용하는 것보다 각 기상조건에 대한 최적의 고도를 적용하여 계산한 $PM_{2.5}$ 농도가 측정된 $PM_{2.5}$ 농도와 비교 시 더 좋은 결과를 보임을 알 수 있다.

3.4. 지표면 $PM_{2.5}$ 농도 계산에 대한 후방산란 강도 연직 분포의 영향 분석

앞서 2.2.1 절에서 지표면 $PM_{2.5}$ 농도와 에어로졸 후방산란 강도 사이의 관계에 기초한 경험적 모델인 식 (5)와 식 (6)를 사용하였다. 이 식들에서 $PM_{2.5}$ 농도는 지표면 근처에 대한 측정인 반면, 후방산란 강도는 지표면에서 특정 고도(z)까지의 적분($\int_0^z \beta(r, \lambda) dr$) 값이다. Table 2에 제시되어있듯이 최적의 고도는 기상조건에 따라 35

m에서 160 m까지 다양하게 나타남을 알 수 있다. 에어로졸 연직 후방산란 강도는 지상 $PM_{2.5}$ 농도 관측에 영향을 미치지 않는 높은 고도에 존재하는 $PM_{2.5}$ 농도에도 영향을 받기 때문에 지표면 $PM_{2.5}$ 농도 계산에 오차를 야기할 수 있다. 따라서 이러한 관계를 파악하기 위해 지표면 $PM_{2.5}$ 농도와 후방산란 강도 적분 사이의 관계를 기반으로 후방산란 강도의 연직 분포를 분석하였다. 기상변수 유무에 따른 기상조건별 최적의 고도 사이에 차이가 크지 않기 때문에(Table 2) 여기서는 기상변수를 포함한 경우에 대한 분석을 진행하였다.

Fig. 8은 8개의 기상조건에 대한 지표면 $PM_{2.5}$ 농도와 후방산란 강도 적분 사이의 구간별 개수와 최고 맞춤 곡선(best fitting curve)을 나타낸다. 관측된 $PM_{2.5}$ 농도의 분포를 보았을 때, 주간보다 야간에서 고농도가 더 많이 나타났다. 이는 야간에 지표면이 복사냉각이 되면서 정적으로 안정된 공기가 형성되고 연직으로의 난기류가 억제되면서 형성된 안정경계층(Stull, 1988) 내에 $PM_{2.5}$ 농도가 존재하기 때문이다. 고농도가 많이 나타난 야간 100% 맑음과 야간 부분 흐림의 경우 최고 맞춤 곡선이 다른 기상조건들보다 선형적인 관계를 가지는 것을 알 수 있다. 후방산란 강도 적분 상한 고도(Table 2)가 낮게 나타난 주간과 야간 100% 흐림은 다른 기상조건들에

비해 후방산란 강도 적분 범위가 0과 2/(10⁴·sr) 사이인 낮은 값에 대해 수 밀도가 높았다. PM_{2.5} 농도와 후방산란 강도 적분의 사이에서 후방산란 강도 연직 분포를 설명하기 위해 Fig. 8에서 모든 기상조건에 대해 관측자료가 존재하며 관측개수가 비교적 많은 구간에 대해 분석을 진행하였다. 이는 Fig. 9의 영역 1, 2, 3, 6, 7, 8에 해당한다. 영역 1, 2, 3은 후방산란 강도 적분 값이 모두 0 이상 2/(10⁴·sr) 미만이며 지표면 PM_{2.5} 농도는 각각 0 이상 20 µg/m³ 미만, 20 이상 40 µg/m³ 미만, 40 이상 60 µg/m³ 미만이다. 영역 6, 7, 8은 후방산란 강도 적분 값이 모두 2 이상 4/(10⁴·sr) 미만이며 지표면 PM_{2.5} 농도는 각각 0 이상 20 µg/m³ 미만, 20 이상 40 µg/m³ 미만, 40 이상 60 µg/m³ 미만이다. 모든 8가지 기상조건에서 최적의 고도(Table 2)가 높았던 주간과 야간 100% 맑음과 최적의 고도(Table 2)가 낮게 나타난 주간과 야간 100% 흐림 조건에 대해 비교를 수행하였다.

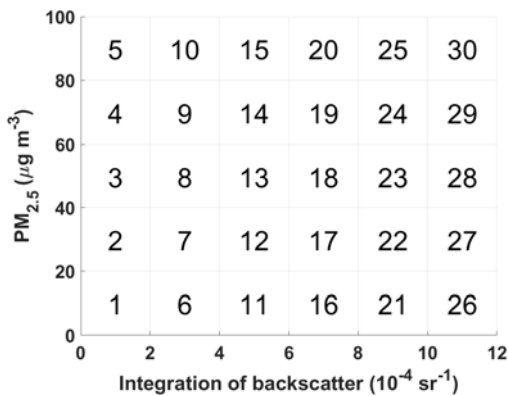


Fig. 9. The domain numbers of the given PM_{2.5} and integration of backscatter ranges. For example, domain number 12 indicates the domain that has an integration of backscatter between 4 and 6/(10⁴·sr) and PM_{2.5} concentration between 20 and 40 µg/m³.

Fig. 10은 Fig. 9의 영역 1, 2, 3, 6, 7, 8에 해당하는 기상조건별 후방산란 강도의 평균 연직 분포이다. 각 영역에 대해 주간 100% 맑음(빨강), 주간 100% 흐림(파랑), 야간 100% 맑음(녹색), 야간 100% 흐림(회색)의 4가지 기상조건과 해당 지표면 PM_{2.5} 농도의 평균과 표준편차를 보인다. 점선 수평선은 기상조건별 최적의 고도

(Table 2)이다. 모든 영역에 대해 100% 맑음의 경우보다 100% 흐림의 경우가 후방산란 강도의 평균 연직 분포 값이 크게 나타났다. 지표면 PM_{2.5} 농도와 후방산란 강도 적분 사이의 회귀에서 종속변수인 지표면 PM_{2.5} 농도에 대해 특정 범위의 값을 얻기 위해서는 독립변수인 후방산란 강도 적분 값의 범위도 일정해야 한다. 이러한 관계를 기반으로 후방산란 강도의 평균 연직 분포 값이 작게 나타나는 100% 맑음에 대해서는 후방산란 강도 적분 상한 고도(최적의 고도)가 높게 계산되었고 후방산란 강도의 평균 연직 분포 값이 크게 나타나는 100% 흐림에 대해서는 후방산란 강도 적분 상한 고도(최적의 고도)가 낮게 계산되었다.

영역 1, 2, 3은 후방산란 강도 적분 값이 0 이상 2/(10⁴·sr) 미만이며 영역 숫자가 커질수록 지표면 PM_{2.5} 농도 범위는 높아진다. 영역 1에서 3으로 이동할수록 지표면 PM_{2.5} 농도는 증가하며 평균 후방산란 강도 연직 분포와 평균 후방산란 강도 최댓값 또한 증가하는 것을 알 수 있다. 영역 1, 2, 3에서는 주간과 야간 100% 맑음과 100% 흐림 모두 평균 후방산란 강도 최댓값이 20 m에서 30 m 사이에 존재하는 것을 알 수 있다. 영역 6, 7, 8은 주간과 야간 100% 맑음과 100% 흐림의 후방산란 강도 연직 분포가 다르게 나타났으며, 주간과 야간 100% 맑음은 후방산란 강도 최댓값이 20 m에서 30 m 사이에 있었지만 주간과 야간 100% 흐림은 대부분 고도가 높아질수록 후방산란 강도 값이 커지는 경향을 보였다. 특히 영역 6에서 이러한 현상이 뚜렷하게 나타나는데 지표면 PM_{2.5} 농도 평균은 20 µg/m³ 미만이고 최적의 고도(수평선)까지의 후방산란 강도 적분 값은 큰 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 4와 Fig. 5의 주간과 야간 100% 흐림에서 지표면 PM_{2.5} 농도가 약 20 µg/m³ 보다 낮을 때 과대 모의한 것으로 해석할 수 있다. 영역 7과 8의 경우 후방산란 강도 적분 값이 영역 6보다 작기 때문에 Fig. 4와 Fig. 5에서 지표면 PM_{2.5} 농도가 약 20 µg/m³ 이상일 때는 과소 모의하는 결과를 보였다.

주간과 야간 100% 흐림은 주간과 야간 100% 맑음보다 후방산란 강도의 평균 연직 분포 값이 크게 나타났다. 특정 범위의 지표면 PM_{2.5} 농도를 도출하기 위해 상대적으로 후방산란 강도의 평균 연직 분포가 큰 주간과 야간 100% 흐림이 최적의 고도(Table 2)가 낮게 결정되었다. 이로 인해 주간과 야간 100% 맑음보다 후방산란 강도

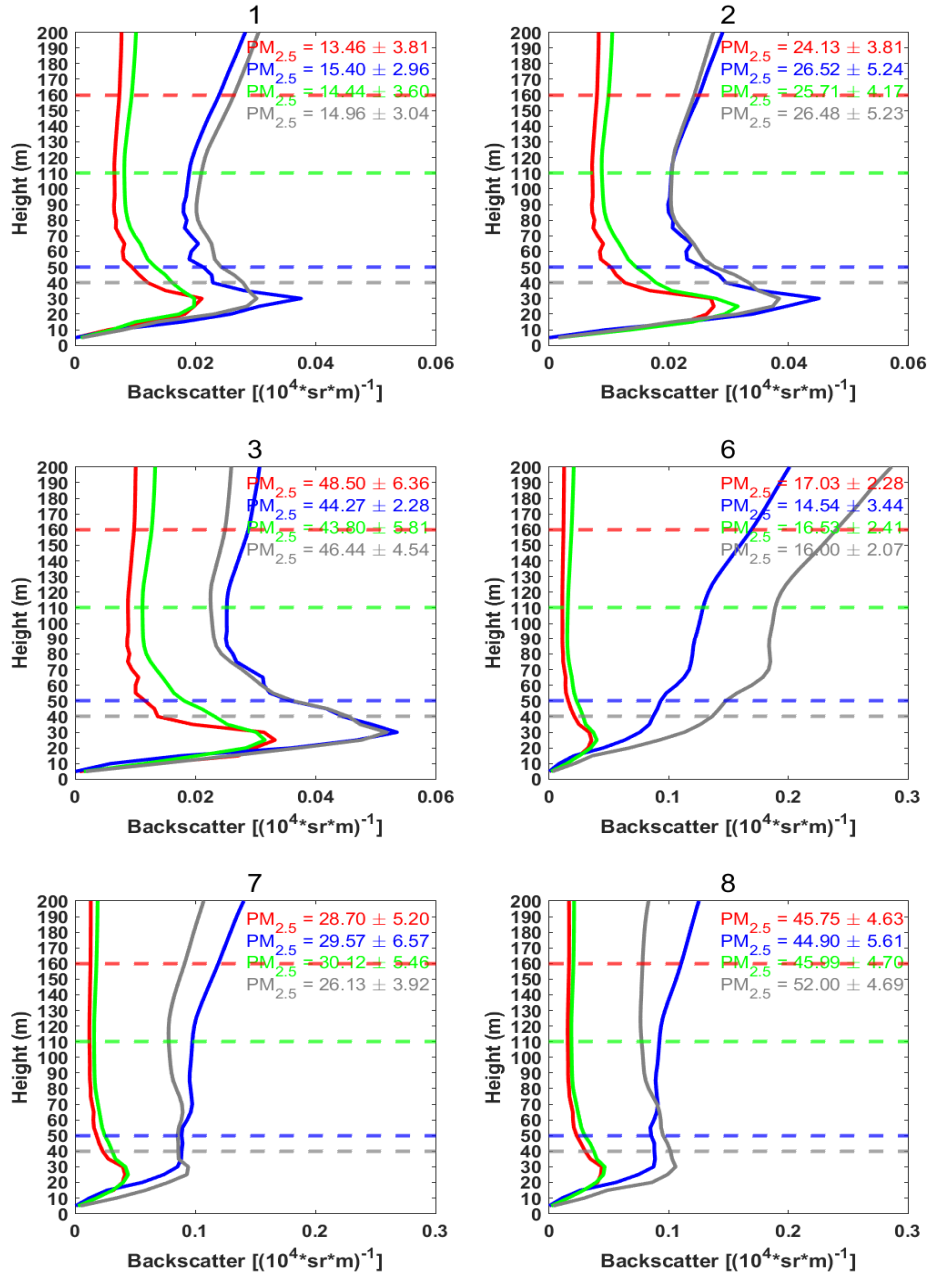


Fig. 10. Average vertical distributions of backscatter intensity of the domain numbers 1, 2, 3, 6, 7, and 8 in Fig. 9. Four different weather conditions of the daytime 100% clear (red), daytime 100% cloudy (blue), nighttime 100% clear (green), and nighttime 100% cloudy (gray) are shown. In each panel, the average and standard deviation of the PM_{2.5} concentrations for each weather condition are embedded with the corresponding color. The dotted horizontal lines indicate the optimal heights for each weather condition.

적분 값이 고르게 분포하지 못하고(Fig. 8), 지표면 PM_{2.5} 농도가 약 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 기준으로 낮을 때는 과대 모의를 하였고 높을 때는 과소 모의하는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 4와 Fig. 5). 위의 결과들을 바탕으로 후방산란 강도의 연직 분포의 변화가 기상조건별로 상이한 최적의 고도 결정의 원인을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 약 1년 7개월 기간(2019년 8월 13일 - 2021년 3월 3일) 동안의 운고계 후방산란 강도와 기상변수(온도, 상대습도, 풍속, 강수량) 자료를 이용하여 지표면 PM_{2.5} 농도를 계산하고 산출된 결과를 지표면 PM_{2.5} 농도 관측자료와 비교 연구를 수행하였다. 지표면 PM_{2.5} 농도와 운고계 후방산란 강도 사이의 회귀에서 기상조건에 따른 PM_{2.5} 농도 변화가 크기 때문에 8가지 기상조건(주간 100% 맑음, 주간 100% 흐림, 주간 부분 흐림, 주간 전체, 야간 100% 맑음, 야간 100% 흐림, 야간 부분 흐림, 야간 전체)으로 상세히 나눠 모의를 수행하였다. 또한 모의를 수행할 때 과적합에 의해 나타날 수 있는 편향된 결과를 방지하기 위하여 교차검증을 하였다. 교차검증을 통해 최적의 고도와 최적의 계수를 계산하였고, 이 값들을 지표면 PM_{2.5} 농도 계산에 적용하여 지표면 PM_{2.5} 농도와와의 상관성에 대해 연구하였다. 본 연구 결과의 요약은 다음과 같다.

1) 기상변수를 포함하지 않은 식 (5)와 기상변수를 포함한 식 (6)의 독립변수인 후방산란 강도 적분 상한 고도(최적의 고도)를 계산하기 위해 각 기상조건에 대해 고도별 교차검증을 수행하였다. 식 (5)와 식 (6) 모두에 대해 주간과 야간 100% 맑음에서 최적의 고도가 가장 높게 결정되었으며 주간과 야간 100% 흐림에서 최적의 고도가 가장 낮게 결정되었다.

2) 최적의 고도를 적용하여 기상변수를 포함하지 않은 식과 기상변수를 포함한 식에 대해 100번의 독립적인 교차검증을 실행하였고 CV R²을 비교하였다. 각 기상조건에 대한 CV R²(주간, 야간)의 평균값을 비교하였을 때 100% 맑음(0.61, 0.62), 부분 흐림(0.43, 0.57), 전체(0.39, 0.45), 100% 흐림(0.21, 0.31) 순으로 높았다. 또한 모든 기상조건에 대해 기상변수를 포함한 경우가 기상변수를 포함하지 않은 경우보다 CV R² 평균값이 높았

다. 기상변수 유무에 따른 CV R² 평균값의 차이는 주간과 야간 100% 맑음이 약 0.01로 제일 작았으며 주간과 야간 100% 흐림에서 차이가 제일 컸다. 이는 주간 100% 흐림은 약 0.07 증가하였고 야간 100% 흐림은 약 0.12 만큼 증가하였다.

3) 식 (5)와 식 (6)의 가장 적합한 계수(즉, $a_0, a_1, b_1, c_0, c_1, c_2, c_3, c_4, d_1, d_2$)들을 찾기 위하여 100번의 독립적인 교차검증을 실행하였으며 CV R²의 중간값에 제일 가까운 값을 계수들로 선택하였다. 결정된 최적의 계수들을 식들에 적용하여 계산한 PM_{2.5} 농도와 관측된 PM_{2.5} 농도를 비교하였다. 식 (5)와 식 (6) 모두에 대해 R(주간, 야간) 값은 100% 맑음(0.78, 0.79), 부분 흐림(0.66, 0.76), 전체(0.63, 0.67), 100% 흐림(0.47, 0.57) 순으로 높았다. 또한 야간에는 태양광에 의한 오염이 없기 때문에 야간이 주간보다 R 값이 높은 것을 확인할 수 있었다. 모든 8가지 기상조건에 대해 기상변수를 포함한 경우가 기상변수를 포함하지 않은 경우보다 R 값이 크고 RMSE 값이 작아 계산 결과가 더 좋음을 알 수 있다. 또한 식 (5)와 식 (6)의 후방산란 강도 적분 상한 고도를 본 연구에서 계산한 최적의 고도와 150 m로 일괄 적용한 방법을 추가 비교한 결과 모든 기상조건에 대해 후방산란 강도 적분 상한 고도를 150 m로 일괄 적용하는 것보다 각 기상조건에 대해 최적의 고도를 적용하여 계산할 때 지표면 PM_{2.5} 농도와와의 상관성이 더 높음을 보였다.

4) 지표면 PM_{2.5} 농도 계산에서 후방산란 강도 적분과 지표면 PM_{2.5} 농도 사이의 관계를 파악하기 위해 후방산란 강도 적분과 PM_{2.5} 농도를 구간별로 영역을 나눠 분석하였다. 분석을 위해 최적의 고도가 높게 결정된 주간과 야간 100% 맑음과 최적의 고도가 낮게 결정된 주간과 야간 100% 흐림에서 특정 영역(Fig. 9의 영역 1, 2, 3, 6, 7, 8)에 대한 후방산란 강도의 평균 연직 분포를 비교하였다. 주간과 야간 100% 흐림은 주간과 야간 100% 맑음보다 후방산란 강도의 평균 연직 분포가 크고 다양하게 나타났다. 따라서 일정한 후방산란 강도 적분 값을 얻기 위해 최적의 고도가 낮게 결정되었다. 이로 인해 후방산란 강도 적분 값이 고르게 분포하지 못하고 다른 기상조건보다 지표면 PM_{2.5} 농도와와의 상관성이 낮았다.

본 연구는 운고계 후방산란 강도와 지표면 PM_{2.5} 농도와의 연관성을 기반으로 8가지 기상조건에 대해 지표면 PM_{2.5} 농도 계산을 수행하였다. 운고계의 후방산란 강도

적분 값과 지표면 $PM_{2.5}$ 농도 사이에는 강한 연관성이 있음을 보였고 이는 기상조건별로 상이함을 보였다. 또한 후방산란 강도 적분 값을 이용하는 것보다 기상변수를 함께 적용하여 지표면 $PM_{2.5}$ 농도 계산을 수행했을 때 모의 결과가 더 좋은 것을 알 수 있었다. 기상조건에 따라 후방산란 강도의 평균 연직 분포들은 다르게 나타났다. 따라서 후방산란 강도 적분의 상한 고도를 기상조건별 최적의 고도로 적용하는 것이 모든 기상조건에 대해 150 m로 일괄 적용하는 것보다 지표면 $PM_{2.5}$ 농도 계산 시 더 좋은 결과를 보였다. 본 연구에서 고려한 8가지 기상 조건 중 주간과 야간 100% 흐림은 관측자료의 수가 가장 적었고 다른 기상조건들에 비해 계산한 지표면 $PM_{2.5}$ 농도와 관측된 지표면 $PM_{2.5}$ 농도와의 비교에서 가장 낮은 상관성을 보였다. 계절적 변동성, 일 변동성, 대기경계층의 발달과 소멸에 따른 영향 등을 살펴보기 위해서는 향후 더 많은 기간의 자료를 사용한 연구가 필요하다.

감사의 글

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- Atkinson, R. W., Mills, I. C., Walton, H. A., Anderson, H. R., 2015, Fine particle components and health—a systematic review and meta-analysis of epidemiological time series studies of daily mortality and hospital admissions, *J. Exposure Sci. Environ. Epidemiol.*, 25, 208-214.
- Barbato, G., Zollo, A. L., Mercogliano, P., 2016, Analysis of the planetary boundary layer using CS135 ceilometer, 2016 IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace), IEEE, 124-129.
- Campbell Scientific, 2021, <https://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/skyvuepro.pdf>.
- Li, S., Joseph, E., Min, Q., 2016, Remote sensing of ground-level $PM_{2.5}$ combining AOD and backscattering profile, *Remote Sensing of Environment*, 183, 120-128.
- Li, S., Joseph, E., Min, Q., Yin, B., Sakai, R., Payne, M. K., 2017, Remote sensing of $PM_{2.5}$ during cloudy and nighttime periods using ceilometer backscatter, *Atmos. Meas. Tech.*, 10, 2093-2104.
- Münkel, C., Eresmaa, N., Räsänen, J., Karppinen, A., 2007, Retrieval of mixing height and dust concentration with lidar ceilometer. *Boundary-layer meteorology*, 124, 117-128.
- OECD, 2016, The economic consequences of outdoor air pollution, 1st ed., OECD publishing, Paris, 6-7.
- Parde, A. N., Ghude, S. D., Pithani, P., Dhangar, N. G., Nivdange, S., Krishna, G., Lal, D., Jenamani, R., Singh, P., Jena, C., Karumuri, R., Safai, P., Chate, D., 2020, Estimation of Surface Particulate Matter ($PM_{2.5}$ and PM_{10}) Mass Concentrations from Ceilometer Backscattered Profiles, *Aerosol and Air Qual. Res.*, 20, 1640-1650.
- Santos, M. S., Soares, J. P., Abreu, P. H., Araujo, H., Santos, J., 2018, Cross-validation for imbalanced datasets: Avoiding overoptimistic and overfitting approaches, *IEEE Comput. Intell. Mag.*, 13, 59-76.
- Stull, B., 1988, An Introduction to boundary layer meteorology, 1st ed., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 15-16.
- Wiegner, M., Gasteiger, J., 2015, Correction of water vapor absorption for aerosol remote sensing with ceilometers, *Atmos. Meas. Tech.*, 8, 3971-3984.
- Yeo, H., Kim, S. W., Lee, C., Kim, D., Kim, B. G., Kim, S., Nam, H., Noh, Y. M., Park, S., Park, C. B., Seo, K., Choi, J. Y., Lee, M. I., Lee, E., 2016, The KALION automated aerosol type classification and mass concentration calculation algorithm. *Kor. J. Remote sens.*, 32, 119-131.

-
- Master's course. Hee-Jung Jung
BK21 School of Earth and Environmental Systems, Division of Earth Environmental Systems, Atmospheric Sciences Major, Pusan National University
heejj@pusan.ac.kr
 - Professor. Jun-Shik Um
Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University
jjunum@pusan.ac.kr