

PLANT & FOREST

# Estimation of ambient PM10 and PM2.5 concentrations in Seoul, South Korea, using empirical models based on MODIS and Landsat 8 OLI imagery

Peter Sang-Hoon Lee<sup>1\*</sup>, Jincheol Park<sup>2</sup>, Jung-young Seo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Urban Studies, Hanyang University, Seoul 04763, Korea

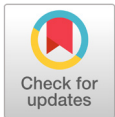
<sup>2</sup>Lab. of Green City, Hanyang University, Seoul 04763, Korea

<sup>3</sup>DNC Engineering, Yongin 16854, Korea

\*Corresponding author: [peter337@hanyang.ac.kr](mailto:peter337@hanyang.ac.kr)

## Abstract

Particulate matter (PM) is regarded as a major threat to public health and safety in urban areas. Despite a variety of efforts to systemically monitor the distribution of PM, the limited amount of sampling sites may not provide sufficient coverage over the areas where the monitoring stations are not located in close proximity. This study examined the capacity of using remotely sensed data to estimate the PM10 and PM2.5 concentrations in Seoul, South Korea. Multiple linear regression models were developed using the multispectral band data from the Moderate-resolution imaging spectro-radiometer equipped on Terra (MODIS) and Operational Land Imager equipped on Landsat 8 (Landsat 8) and meteorological parameters. Compared to MODIS-derived models ( $r^2 = 0.25$  for PM10,  $r^2 = 0.30$  for PM2.5), the Landsat 8-derived models showed improved model reliabilities ( $r^2 = 0.17$  to  $0.57$  for PM10,  $r^2 = 0.47$  to  $0.71$  for PM2.5). Landsat 8 model-derived PM concentration and ground-truth PM measurements were cross-validated to each other to examine the capability of the models for estimating the PM concentration. The modeled PM concentrations showed a stronger correlation to PM10 ( $r = 0.41$  to  $0.75$ ) than to PM2.5 ( $r = 0.14$  to  $0.82$ ). Overall, the results indicate that Landsat 8-derived models were more suitable in estimating the PM concentrations. Despite the day-to-day fluctuation in the model reliability, several models showed strong correspondences of the modeled PM concentrations to the PM measurements.



## OPEN ACCESS

**Citation:** Lee P SH, Park J, Seo J. 2020. Estimation of ambient PM10 and PM2.5 concentrations in Seoul, South Korea, using empirical models based on MODIS and Landsat 8 OLI imagery. Korean Journal of Agricultural Science 47:59-66. <https://doi.org/10.7744/kjoas.20190087>

**Received:** September 30, 2019

**Revised:** November 05, 2019

**Accepted:** December 16, 2019

**Copyright:** © 2020 Korean Journal of Agricultural Science



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Keywords:** Landsat 8, MODIS, particulate matter, remote sensing, urban forest

## Introduction

최근 공중보건 및 위생에 대한 관심이 늘어나고 있는 가운데, 대기오염물질 절감에 대한 필요성이 강조되고 있다(IPCC, 2014). 세계 여러 지역에서 규모를 불문하여 도시화가 가속되고 있는 가운데, 대기오염이 국민건강에 미치는 영향 또한 증가될 것으로 예상된다(IPCC, 2014). 특히 PM10 및 PM2.5 등 미세먼지(particulate matter, PM)가 국민건강

에 미치는 위협이 향후 더욱 증가할 것으로 예상됨에 따라 이에 대한 저감방안의 중요성 또한 높아지고 있다 (WHO, 2016).

이러한 추세에 대응하기 위하여, 산업화가 진행된 여러 지역에서는 도시대기 측정망을 설치하는 등 미세먼지를 감시 및 관리하기 위한 많은 노력이 있어왔다. 하지만, 측정장비의 설치장소를 늘리는 것에는 물리적인 한계가 있기 때문에 대규모 지역 또는 측정망 감시범위를 벗어난 지역에서 발생하는 미세먼지를 효과적으로 감시하기에는 현실적인 어려움이 따른다(Kumar et al., 2007; Tian and Chen, 2010).

이 한계점을 극복하기 위해 위성영상 기반 원격탐사기법을 활용한 미세먼지 관련 연구들이 진행되어왔다. 미국 항공우주국(NASA)는 2000년대 초반부터 지금까지 Terra와 Landsat 8 등 다중분광센서를 탑재한 인공위성들을 운영 중에 있는데(Levy et al., 2013; Remer et al., 2013; NASA, 2017), 전지구적 및 대규모 지역의 탐사에는 Terra위성에 탑재된 중해상도 분광센서(MODIS)로부터 획득된 10 km 및 3 km 공간해상도 영상이 주로 사용되어왔다. 특히 MODIS 영상 기반 전처리 및 보정이 된 산출물인 에어로졸광학두께(aerosol optical depth, AOD)는 지표면 에어로졸 농도에 대한 여러 연구에 활용되어왔다(Remer et al., 2008; Levy et al., 2013; Munchak et al., 2013; Remer et al., 2013; Li, 2015; Seo et al., 2015; Chen et al., 2017; NASA, 2017). 하지만 MODIS의 낮은 공간해상도는 소규모 도심지역을 탐사하는 것에 있어서는 그 자료정확성에 있어서 비교적 적합하지 않은 경우도 발견된다. 이를 개선하기 위하여 Landsat 8의 30 m 공간해상도 영상 등 고해상도 영상을 활용한 도심지역 대상 대기질 관련 연구들이 최근 늘어나고 있다(Sobrino et al., 2004; Nadzri et al., 2010; Chen et al., 2014; Saleh and Hasan, 2014; Sun et al., 2016; Yun et al., 2018).

이러한 추세에 맞추어 고해상도 위성영상을 활용한 국내 도심지역 대기질 및 미세먼지 관련 연구의 중요성 또한 조명될 필요가 있는 시점이다. 본 연구는 공간해상도가 상이한 MODIS와 Landsat 8의 위성영상을 활용하여 서울지역의 미세먼지 농도를 더 효과적으로 추정하는 수치모델을 개발하고자 하였다.

## Materials and Methods

### 연구대상 및 미세먼지 지상측정자료

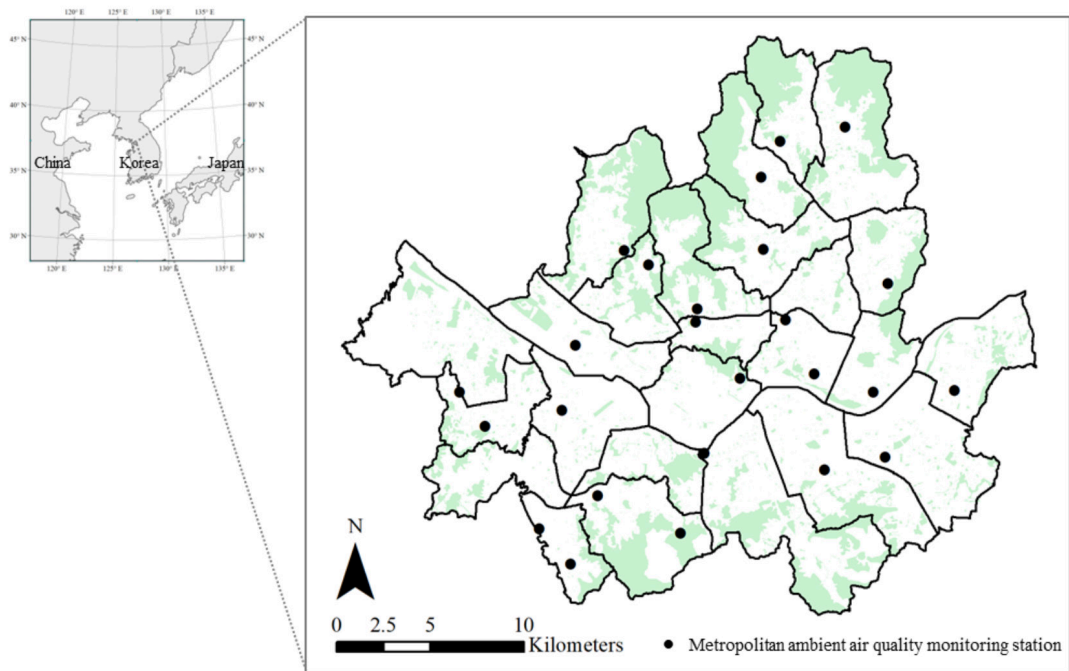
본 연구는 서울을 연구대상지역으로 선정하였다. 서울에서는 높은 인구밀도에서 비롯된 차량매연 및 분진 등 비점오염원에 기인한 대기오염물질 농도가 증가 추세를 보이고 있다(NIER, 2015; KOSIS, 2018). 연구지역은 25개의 행정구역(구)으로 나뉘며 각 구의 대기질 측정소가 모여 서울지역 도시대기측정망을 형성한다. 각 측정소는 실시간으로 일산화탄소, 이산화황, 이산화질소, 오존, PM10 및 PM2.5의 농도를 측정하며, 각 측정값은 보정되어 시간당 평균값의 형태로 제공된다(Fig. 1) (AirKorea, 2019). 가장 최근에 보여진 서울지역 미세먼지의 시공간적 변화추이를 조사하기 위해 연구대상기간은 2017년 8월 1일부터 2019년 7월 31일까지로 설정되었으며, 서울시 보건환경연구원에서 운영하는 에어코리아(AirKorea, <http://www.airkorea.or.kr/web>)로부터 시간평균 PM10 및 PM2.5 농도 자료를 수집하였다(<https://www.airkorea.or.kr>).

### 위성자료

본 연구에서는 서로 다른 공간해상도의 자료를 제공하는 MODIS와 Landsat 8의 영상자료를 비교하여 연구 대상지에 적용 가능한 미세먼지 농도 추정 방법론을 개발하고자 하였다. MODIS 영상은 3 km의 공간해상도

를 가진 Collection 6 Level 2 aerosol products (MOD04\_3K)를 NASA에서 운용하는 LAADS (<https://ladsweb.modap-s.eosdis.nasa.gov>)를 통하여 취득하였다. MODIS AOD값을 구하기 위한 파라미터는 ‘retrieved AOT at 0.46, 0.55, 0.66  $\mu\text{m}$ ’를 선택하였다.

Landsat 8 영상은 30 m의 공간해상도를 가진 Standard Level 1 product (LC08\_L1XX)를 미국지질조사국 (USGS, 2019)에서 운용하는 EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov>)를 통하여 취득하였다. AOD값 산출에는 여섯 개 다중분광밴드(band 2, 3, 4, 5, 6, 7)로부터의 화소자료를 사용하였고, 전처리방법은 Moran et al. (1992)과 Chavez (1996)의 연구에서 제시된 radiometric correction과 simple dark object subtraction 및 Sobrino et al. (2004), Nadzri et al. (2010), Saleh and Hasan (2014)의 연구에서 제시된 대기보정알고리즘을 적용하였다. NASA의 기술보고서에서 제시된 방법에 따라 과대모의된 비정상적 AOD값을 가진 영상은 제외하였다(Remer et al., 2013). 각 위성자료의 시간적 범위는 2017년 8월 1일부터 2019년 7월 31일까지로 설정되었다. 영상처리 소프트웨어는 ENVI version 5.1 (Exelis Visual Information Solutions, Boulder, Colorado, USA)와 ArcMap version 10.2 (Environmental Systems Research Institute, Redlands, California, USA)가 사용되었다.



**Fig. 1.** Study area in this study and the locations of ambient air quality monitoring stations and urban forests (green) (AirKorea, 2019; Seoul metropolitan government, 2019).

## 기상자료

기상조건이 PM농도에 미치는 영향을 조사하기 위하여 25개 구 자동기상관측장비에서 측정된 시간평균 풍속(m/s), 풍향(0 - 360°), 기온(°C), 상대습도(%)를 기상청 기상자료개방포털(KMA, 2019)을 통하여 수집하였다. 연구대상기간은 2017년 8월 1일부터 2019년 7월 31일까지로 설정되었다.

### MODIS AOD기반 미세먼지 농도 추정모델

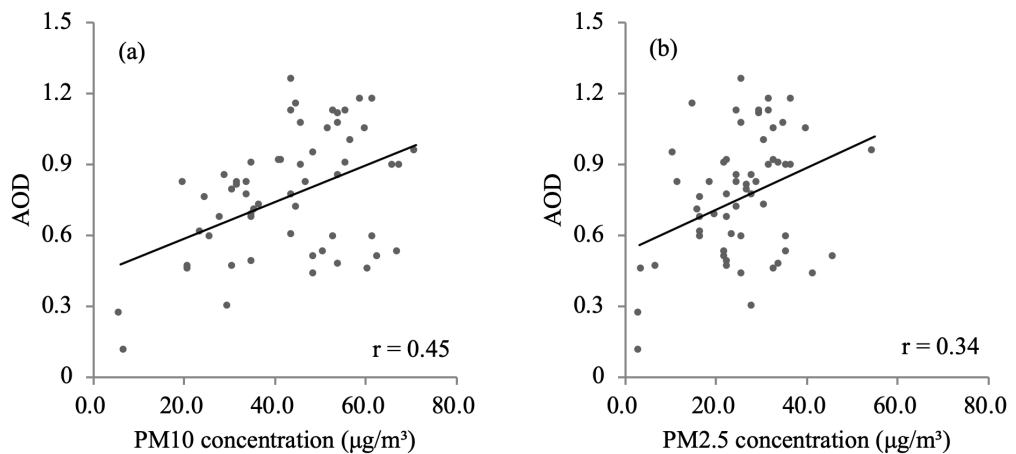
수집된 자료에 기존의 MODIS 영상 기반 미세먼지 농도 추정 모델들에서 제시된 모델링 방법을 적용하였다(Seo et al., 2015). PM10 및 PM2.5 농도 추정치를 산출하기 위해 MODIS AOD 및 해당 MODIS 영상 촬영 시간과 동일한 시간대의 기상요소별 시간평균관측값을 예측변수로 사용하여 다중선형회귀모델을 개발하였다. 모델링에는 소프트웨어 SPSS Statistics version 25 (International Business Machines, Armonk, New York, USA)를 사용하였다.

### Landsat 8 AOD 기반 일일 미세먼지 농도 추정모델

수집된 자료에 기존의 Landsat 8 영상 기반 미세먼지 농도 추정 모델들에서 제시된 모델링 방법을 적용하였다(Sobrino et al., 2004; Nadzri et al., 2010; Saleh and Hasan, 2014; Lee and Park, 2019). PM10 및 PM2.5 농도 추정치를 산출하기 위해 Landsat 8 AOD 및 해당 영상과 동일한 시간대의 기상요소별 시간평균관측값을 예측변수로 사용하여 다중선형회귀모델을 개발하였다. 교차검정을 통하여 모델의 설명력을 평가하기 위해 25개 구 중 20개 구의 미세먼지 농도 측정값은 훈련자료로, 나머지 5개 구(강동, 관악, 노원, 동대문, 성동)의 미세먼지 농도 측정값은 검증자료로 설정하였다. Landsat 8 모델에서 산출된 PM10 및 PM2.5 농도 추정치를 각 도시대기측정소와 시공간적으로 일치시킨 후 각 미세먼지 농도 측정값과 비교하여 상관관계를 구하였다.

## Results and Discussion

MODIS AOD와 각 도시대기측정소의 PM10 및 PM2.5 농도 측정값 사이의 상관관계를 분석하기 위하여 각 변수들간의 선형 경향성을 도출하였다(Fig. 2). AOD는 PM10 농도 측정값과 양의 상관관계를 보였고 (Pearson's correlation coefficient  $r = 0.45$ ,  $p < 0.001$ ,  $n = 58$ ), PM2.5 농도 측정값과도 양의 상관관계를 보였다 ( $r = 0.34$ ,  $p = 0.01$ ,  $n = 59$ ) (Fig. 2). MODIS AOD는 PM10 농도 측정값과 더 강한 양의 상관관계를 보였다(Fig. 2).



**Fig. 2.** Correlations between the observed (a) PM10 and (b) PM2.5 concentrations and AOD retrieved from MODIS data. PM, particulate matter.

PM농도 추정치를 산출하기 위한 다중선형회귀모델을 개발하기 위해 MODIS AOD 및 시간평균 풍속(wind speed, WS), 풍향(wind direction, WD), 상대습도(relative humidity, RH), 기온(temperature, T)을 예측변수로 사용하였다. 각 모델, 모델별 변수 및 설명력은 Table 1과 Table 2에 요약하였다. PM10 모델에서 통계적으로 유의한 변수는 AOD였으며, PM2.5 모델에서 유의한 변수는 풍향, 풍속 및 상대습도로 나타났다(Tables 1 and 2). 하지만, PM10 농도추정치에 대한 모델 설명력(M1) ( $r^2 = 0.25$ ,  $n = 58$ )과 PM2.5 농도 추정치에 대한 모델 설명력(M2) ( $r^2 = 0.30$ ,  $n = 59$ )은 미세먼지 농도를 추정하기에 적합하지 않은 것으로 판단되었다. 이러한 경향성은 센서 및 공간해상도별 에어로졸 탐지 능력의 차이에 대한 선행연구들의 결과와 비슷하였다(Munchak et al., 2013; Remer et al., 2013). 낮은 공간해상도를 가진 센서에서는 높은 공간해상도를 가진 센서가 탐지할 수 있는 에어로졸 광학정보가 누락될 가능성이 있다. 따라서, 상대적으로 높은 공간해상도를 가진 영상을 활용하여 미세먼지 농도에 대한 더 정확한 추정치를 얻을 수 있는지 확인하기 위해 Landsat 8 기반 모델을 개발하였다. 미세먼지 농도 추정치를 산출하기 위한 모델을 개발하기 위해 Landsat 8 AOD 및 기상요소별 시간평균관측값을 예측변수로 사용하였으며, 자세한 내용은 다음의 Table 3와 같다. PM10 농도추정모델의 설명력( $r^2$ )은 0.17부터 0.57로 나타났고, PM2.5 농도추정 모델의 설명력( $r^2$ )은 0.47부터 0.71로 나타났다(Table 3). 미세먼지 농도 측정값에 대하여 모델로부터 산출된 미세먼지 농도 추정치가 가지는 설명력은 영상 획득일별로 차이가 나타났지만, 전반적인 모델 설명력 및 교차검정 결과는 Landsat 8 기반 모델이 MODIS 기반 모델보다 효과적인 것으로 나타났다(Table 3; Fig. 3).

**Table 1.** Multiple linear regression models for estimating PM10 and PM2.5 concentrations based on MODIS-derived AOD and meteorological factors.

Model	Particle size	Multiple linear regression model	$r^2$
M1	PM10	$PM10 = \beta_0 + \beta(AOD) + \beta(T) + \beta(WD) + \beta(WS) + \beta(RH)$	0.25 (n = 58)
M2	PM2.5	$PM2.5 = \beta_0 + \beta(AOD) + \beta(T) + \beta(WD) + \beta(WS) + \beta(RH)$	0.30 (n = 59)

PM, particulate matter;  $\beta$ , estimated coefficients of the model; AOD, aerosol optical depth; T, temperature; WD, wind direction; WS, wind speed; RH, relative humidity.

**Table 2.** The estimated coefficients of the multiple linear regression models for estimating PM10 and PM2.5 concentrations based on MODIS-derived AOD and meteorological factors derived from Table 1.

Model parameter	PM10			PM2.5			
	Estimate	Standard error	p-value	Model parameter	Estimate	Standard error	p-value
Intercept	11.372	15.064	0.454	Intercept	- 1.844	9.773	0.851
AOD	20.710	8.890	0.024	AOD	5.742	5.556	0.306
T	0.053	0.509	0.917	T	0.244	0.329	0.461
WD	0.027	0.020	0.190	WD	0.029	0.012	0.022
WS	- 4.183	3.957	0.295	WS	- 5.745	2.519	0.027
RH	0.20	0.159	0.216	RH	0.269	0.102	0.011

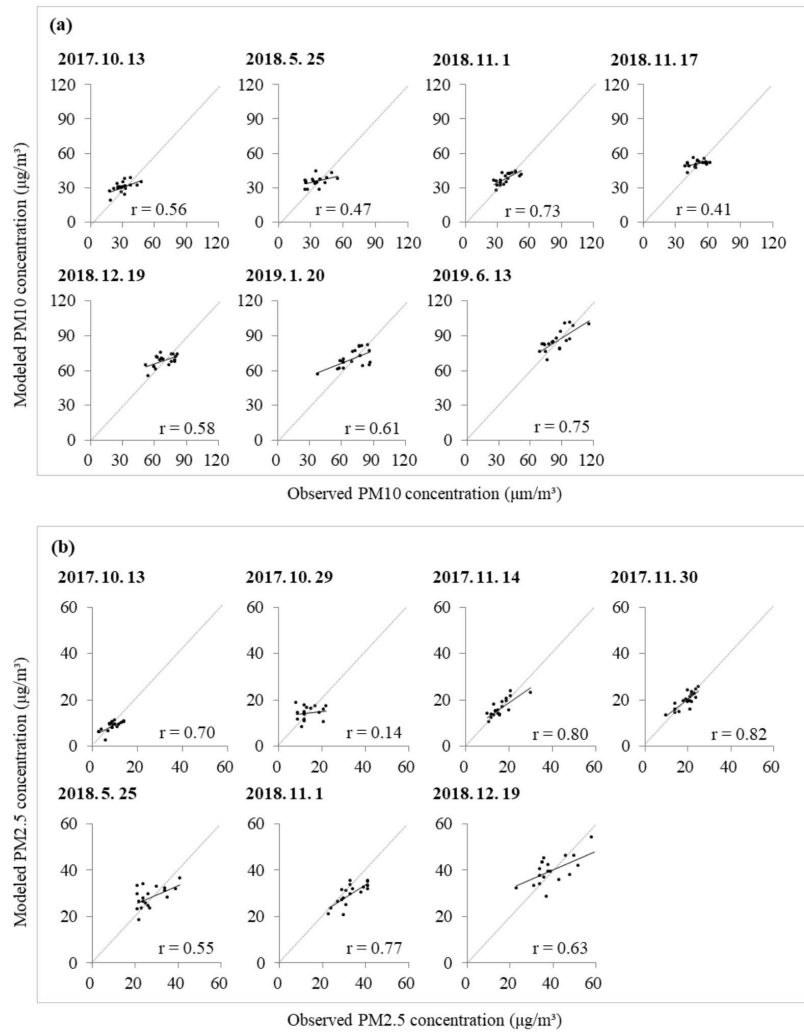
PM, particulate matter; AOD, aerosol optical depth; T, temperature; WD, wind direction; WS, wind speed; RH, relative humidity.



**Table 3.** Single-day models for estimating PM concentrations based on AOD derived from high-resolution sensors (n = 25).

Particle size	Date (yymmdd)	Model r <sup>2</sup>	CV r	Multiple linear regression model
PM10	171013	0.33	0.56	41.537 - 461.264 (b3AOD) + 261.194 (b4AOD) + 394.037 (b7AOD) + 3.111 (T)
	180525	0.57	0.47	202.892 + 415.25 (b2AOD) + 461.316 (b6AOD) - 584.025 (b7AOD) - 6.926 (T)
	181101	0.54	0.73	127.478 - 83.517 (b3AOD) + 299.799 (b5AOD) - 631.601 (b6AOD) - 2.478 (T) + 6.114 (WS)
	181117	0.23	0.41	87.181 - 239.706 (b2AOD) + 240.511 (b4AOD) + 119.526 (b5AOD) - 153.162 (b6AOD)
	181219	0.37	0.58	683.227 - 8336.853 (b3AOD) + 5512.684 (b4AOD) - 3056.921 (b5AOD) + 3025.297 (b6AOD)
	190120	0.17	0.61	71.157 - 227.793 (b3AOD) + 342.773 (b5AOD) - 167.974 (b6AOD) + 3.079 (T)
	190613	0.23	0.75	58.486 - 121.041 (b2AOD) - 50.751 (b6AOD) + 119.034 (b7AOD) + 3.411 (WS)
PM2.5	171013	0.62	0.91	5.695 + 159.165 (b2AOD) - 432.217 (b3AOD) + 71.195 (b4AOD) - 456.417 (b6AOD) + 1041.615 (b7AOD) + 2.026 (T) + 3.429 (WS)
	171029	0.59	-0.58	188.673 - 477.249 (b2AOD) + 692.353 (b3AOD) + 91.872 (b5AOD) - 93.151 (b6AOD) - 228.457 (b7AOD) - 9.189 (T) + 1.221 (WS)
	171114	0.67	-0.44	-519.788 + 517.754 (b2AOD) - 486.607 (b3AOD) + 892.421 (b4AOD) + 121.813 (b5AOD) - 190.384 (b6AOD) - 6.853 (T) - 4.82 (WS)
	171130	0.47	-0.23	7.793 - 36.685 (b2AOD) - 15.003 (b3AOD) + 56.616 (b4AOD) - 8.114 (b5AOD) - 5.73 (b7AOD) - 0.613 (T) - 1.032 (WS)
	180525	0.54	0.52	31.98 + 128.98 (b2AOD) + 112.351 (b3AOD) + 24.108 (b5AOD) + 187.044 (b6AOD) - 293.63 (b7AOD) - 1.35 (T) - 2.305 (WS)
	181101	0.71	0.33	37.241 + 303.283 (b2AOD) - 324.199 (b3AOD) + 136.29 (b5AOD) - 695.947 (b6AOD) + 718.58 (b7AOD) - 2.06 (T) - 1.233 (WS)
	181219	0.48	0.1	0.49 + 6648.219 (b2AOD) - 7973.66 (b3AOD) - 200.5 (b4AOD) - 367.399 (b6AOD) + 2017.869 (b7AOD) + 2.504 (T) + 3.643 (WS)

PM, particulate matter; CV, coefficient of cross-validation from the correlation analysis between particulate matter measurements and modeled estimate; b, band-specific aerosol optical depth value (band 2 - 7); AOD, aerosol optical depth; T, temperature; WS, wind speed.



**Fig. 3.** Correlations between the observed (a) PM10 and (b) PM2.5 concentrations and modeled PM10 and PM2.5 concentrations derived from Landsat 8 data. PM, particulate matter.

에어로졸 연구를 목적으로 전처리 및 보정을 거친 최종 산출물인 MODIS 영상과는 달리, Landsat 8 영상은 그 활용에 있어서 최적의 알고리즘을 개발하기 위한 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단되었다. 본 연구에서 Landsat 8 영상을 활용하여 도출한 결과 및 실험적인 방법론은 향후 원격탐사기법을 활용한 도심지역 미세먼지 농도 추정에 있어서 도움이 될 것으로 판단된다.

## Acknowledgements

이 논문은 한양대학교 교내연구지원사업으로 연구되었음(HY-2017).

## Authors Information

Peter Sang-Hoon Lee, <https://orcid.org/0000-0003-4438-7529>

Jincheol Park, <https://orcid.org/0000-0001-9377-7676>

Jung-young Seo, DNC Engineering, CEO

## References

- AirKorea. 2019. Latest hourly ambient air quality data archive. Accessed in [https://www.airkorea.or.kr/web/last\\_amb\\_hour\\_data](https://www.airkorea.or.kr/web/last_amb_hour_data) on 6 August 2019. [in Korean]
- Chavez PS. 1996. Image-based atmospheric correction – revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 62:1025-1036.
- Chen W, Fan A, Yan L. 2017. Performance of MODIS C6 aerosol product during frequent haze-fog events: A case study of Beijing. *Remote Sensing* 9:496. doi:10.3390/rs9050496.
- Chen Y, Han W, Chen S, Tong L. 2014. Estimating ground-level PM2.5 concentration using Landsat 8 in Chengdu, China. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* 9259:925917. doi:10.1117/12.2068886.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2014. *Climate change 2014: Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* edited by Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Farahani E, Kadner S, Seyboth K, Adler A, Baum I, Brunner S, Eickemeier P, Kriemann B, Savolainen J, Schlömer S, von Stechow C, Zwickel T, Minx JC. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.
- KMA (Korean Meteorological Administration). 2019. Meteorological dataset archive. Accessed in <https://data.kma.go.kr/> on 5 August 2019. [in Korean]
- KOSIS (Korean Statistical Information Service). 2018. Administrative division statistics. Accessed in [http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT\\_1ZGA17&conn\\_p-ath=l2](http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1ZGA17&conn_p-ath=l2) on 12 September 2019. [in Korean]
- Kumar N, Chu A, Foster A. 2007. An empirical relationship between PM2.5 and aerosol optical depth in Delhi Metropolitan. *Atmospheric Environment* 41:4492-4503.
- Lee S, Park J. 2019. Correlation between urban forest and satellite-borne imagery-based ambient particulate matter across Seoul, South Korea. *Journal of Agriculture and Life Science* 53:1-11. doi:10.14397/jals.2019.53.6.1.
- Levy RC, Mattoo S, Munchak LA, Remer LA, Sayer AM, Patadia F, Hsu NC. 2013. The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean. *Atmospheric Measurement Techniques* 6:2989-3034.
- Li R. 2015. Estimating ground-level PM2.5 using fine-resolution satellite data in the megacity of Beijing, China. *Aerosol and Air Quality Research* 15:1347-1356. doi:10.4209/aaqr.2015.01.0009.
- Moran M, Jackson R, Slater P, Teillet P. 1992. Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output. *Remote Sensing of Environment* 41:169-184.

- Munchak LA, Levy RC, Mattoo S, Remer LA, Holben BN, Schafer JS, Hostetler CA, Ferrare RA. 2013. MODIS 3 km aerosol product: Applications over land in an urban/suburban region. *Atmospheric Measurement Techniques* 6:1747-1759.
- Nadzri O, Mat Jafri MZ, Lim HS. 2010. Estimating particulate matter concentration over arid region using satellite remote sensing: A case study in Makkah, Saudi Arabia. *Modern Applied Science* 4. Science 4:131. doi:10.5539/mas.v4n11p131.
- NASA (National Aeronautics and Space Administration). 2017. Earth science mission profile 1997-2023. Earth Observing System Project Science Office. Accessed in <https://eospo.nasa.gov/content/nasas-earth-observing-system-project-science-office> on 11 September 2019.
- NIER (National Institute of Environmental Research). 2015. Megacity air pollution studies – Seoul (MAPS-Seoul). Accessed in [https://espo.nasa.gov/sites/default/files/document-s/MAPS-Seoul\\_White%20Paper\\_26%20Feb%202015\\_Final.pdf](https://espo.nasa.gov/sites/default/files/document-s/MAPS-Seoul_White%20Paper_26%20Feb%202015_Final.pdf) on 20 August 2019. [in Korean]
- Remer LA, Kleidman RG, Levy RC, Kaufman YJ, Tanré D, Mattoo S, Martins JV, Ichoku C, Koren I, Yu H, Holben BN. 2008. Global aerosol climatology from the MODIS satellite sensors. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 113: D14S07. doi:10.1029/2007JD009661.
- Remer LA, Mattoo S, Levy RC, Munchak LA. 2013. MODIS 3 km aerosol product: Algorithm and global perspective. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions* 6:69-112.
- Saleh SAH, Hasan G. 2014. Estimation of PM<sub>10</sub> concentration using ground measurements and Landsat 8 OLI satellite image. *Journal of Geophysics and Remote Sensing* 3:2169. doi:10.4172/2169-0049.1000120.
- Seo S, Kim J, Lee H, Jeong U, Kim W, Holben B, Kim SW, Song C, Lim J. 2015. Estimation of PM<sub>10</sub> concentrations over Seoul using multiple empirical models with AERONET and MODIS data collected during the DRAGON-Asia campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15:319-334. doi:10.5194/acp-15-319-2015.
- Seoul Metropolitan Government. 2019. Seoul city green space geospatial information (datum: ITRF2000). Accessed in <http://data.seoul.go.kr/dataList/datasetView.do?infd=OA-13163&srvType=S&serviceKind=1&currentPageNo=1> on 22 August 2019. [in Korean]
- Sobrino J, Jiménez-Muñoz JC, Paolini L. 2004. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment* 90:434-440.
- Sun L, Wei J, Bilal M, Tian X, Jia C, Guo Y, Mi X. 2016. Aerosol optical depth retrieval over bright areas using Landsat 8 OLI Images. *Remote Sensing* 8:23. doi:10.3390/rs8010023.
- Tian J, Chen D. 2010. Spectral, spatial, and temporal sensitivity of correlating MODIS aerosol optical depth with ground-based fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) across southern Ontario. *Canadian Journal of Remote Sensing* 36:119-128.
- USGS (United States Geological Survey). 2019. Landsat 8 data users handbook. USGS Landsat Missions. LSDS-1574 version 4.0. Accessed in <https://www.usgs.gov/media/files/-landsat-8-data-users-handbook> on 8 August 2019.
- WHO (World Health Organization). 2016. Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease. World Health Organization. Accessed in <https://apps.who.int/iris/handle/10665/250141> on 10 September 2019.
- Yun G, Zuo S, Dai S, Song X, Xu C, Liao Y, Zhao P, Chang W, Chen Q, Li Y, Tang J, Man W, Ren Y. 2018. Individual and interactive influences of anthropogenic and ecological factors on forest PM<sub>2.5</sub> concentrations at an urban scale. *Remote Sensing* 10:521. doi:10.3390/rs10040521.