환경영향평가 Vol. 27, No. 6(2018) pp.635~646 J. Environ. Impact Assess. 27(6): 635~646(2018) ISSN 1225-7184
https://doi.org/10.14249/eia.2018.27.6.635

Research Paper

서울시 토지피복에 따른 계절별 미세먼지 농도 차이 분석

– 산림과 시가화지역을 중심으로 –

최태영 · 문호경 · 강다인 · 차재규
국립생태원 생태연구본부 융합연구실

Analysis of the Seasonal Concentration Differences of Particulate Matter According to Land Cover of Seoul

– Focusing on Forest and Urbanized Area –

Tae-Young Choi · Ho-Gyeong Moon · Da-In Kang · Jae-Gyu Cha
National Institute of Ecology

요 약: 본 연구는 도시의 미세먼지 배출과 저감에 관련된 토지피복 유형인 산림과 시가화지역의 영향에 의한 계절별 미세먼지 농도 특성을 파악하고자 하였다. 서울시 23개 도시대기 측정소의 2016년 PM10, PM2.5 농도자료를 수집하였고, 측정소 주변 반경 3km 내 시가화지역과 산림 비율을 기준으로 3개 그룹으로 측정소를 구분하여 그룹간의 미세먼지 농도 차이를 계절별로 분석하였다. 그룹별 시가화지역과 산림의 중심값은 Group A에서 각각 53.4%, 34.6%, Group B는 61.8%, 16.5%, Group C는 76.3%, 6.7%이었다. 계절별 PM10과 PM2.5의 그룹별 농도는 산림 비율이 높은 Group A의 농도가 모든 계절에서 가장 낮았고, 시가화지역 비율이 높은 Group C의 농도는 봄부터 가을까지 가장 높았다. 이상의 그룹간 차이는 통계적으로 유의하였다. Group C 농도는 겨울철에만 Group B보다 낮아졌는데, 겨울철 Group B–C간의 차이는 통계적으로 유의하지 않았다. 계절별 고농도 그룹의 농도 대비 Group A의 농도는 PM10에서 봄, 여름, 가을, 겨울 각각 8.5%, 11.2%, 8.0%, 6.8%, PM2.5에서 3.5%, 10.0%, 4.1%, 3.3% 낮은 수치이었다. PM10과 PM2.5 모두 그룹간 농도 격차가 여름에 가장 크고, 겨울로 가면서 작아졌는데, 이는 산림의 미세먼지 저감기능이 여름에 크고, 겨울에 작기 때문인 것으로 판단되었다. 산림과 비교해 시가화지역이 미세먼지 농도에 끼치는 영향은 작았다. 본 연구를 통해 산림 비율이 높은 지역에서 미세먼지 농도가 낮은 효과가 입증되었으며, 도시의 미세먼지 관리를 위해 녹지의 기능을 규명하는 지속적인 연구가 필요하였다.

주요어: 토지피복 비율, PM10, PM2.5, K–means 군집화, 비모수 검정

First Author: Tae-Young Choi, Division of Convergence Research, Bureau of Ecological Research, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Korea, Tel: +82-41-950-5995, E-mail: ty_choi2016@nie.re.kr
Corresponding Author: Jae-Gyu Cha, Division of Convergence Research, Bureau of Ecological Research, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Korea, Tel: +82-41-950-5415, E-mail: flow@nie.re.kr
Co-Authors: Ho-Gyeong Moon, Division of Convergence Research, Bureau of Ecological Research, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Korea, Tel: +82-41-950-5425, E-mail: hoyahoya12@nie.re.kr
Da-In Kang, Division of Convergence Research, Bureau of Ecological Research, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Korea, Tel: +82-41-950-5427, E-mail: rkdekdls44@nie.re.kr
Received: 7 November, 2018. Revised: 6 December, 2018. Accepted: 7 December, 2018.

www.kci.go.kr

Abstract : This study sought to identify the characteristics of seasonal concentration differences of particulate matter influenced by land cover types associated with particulate matter emission and reductions, namely forest and urbanized regions. PM10 and PM2.5 was measured with quantitative concentration in 2016 on 23 urban air monitoring stations in Seoul, classified the stations into 3 groups based on the ratio of urbanized and forest land covers within a range of 3km around station, and analysed the differences in particulate matter concentration by season. The center values for the urbanized and forest land covers by group were 53.4% and 34.6% in Group A, 61.8% and 16.5% in Group B, and 76.3% and 6.7% in Group C. The group-specific concentration of PM10 and PM2.5 by season indicated that the concentration of Group A, with high ratio of forests, was the lowest in all seasons, and the concentration of Group C, with high ratio of urbanized regions, had the highest concentration from spring to autumn. These inter-group differences were statistically significant. The concentration of Group C was lower than Group B in the winter; however, the differences between Groups B to C in the winter were not statistically significant. Group A concentration compared to the high-concentration groups by season was lower by 8.5%, 11.2%, 8.0%, 6.8% for PM10 in the order of spring, summer, autumn and winter, and 3.5%, 10.0%, 4.1% and 3.3% for PM2.5. The inter-group concentration differences for both PM10 and PM2.5 were the highest in the summer and grew smaller in the winter, this was thought to be because the forests' ability to reduce particulate matter emissions was the most pronounced during the summer and the least pronounced during the winter. The influence of urbanized areas on particulate matter concentration was lower compared to the influence of forests. This study provided evidence that the particulate matter concentration was lower for regions with higher ratios of forests, and subsequent studies are required to identify the role of green space to manage particulate matter concentration in cities.

Keywords : Land cover ratio, PM10, PM2.5, K-means clustering, Nonparametric Test

I. 서 론

국내 미세먼지 농도는 1995년 환경부 대기오염 측정망에 의해 PM10 측정이 시작된 이후 지속적으로 감소하는 추세이지만(NIER 2017a), 최근까지 여러 연구들을 통해 미세먼지가 인체에 끼치는 위해성이 부각되면서(Dockery et al. 1993; Schwartz J et al. 1996; Bae 2014; Xing et al. 2016) 그에 대한 관심과 우려가 증가되고 있다. 관련된 연구들은 미세먼지가 질병 및 사망률과 밀접한 관련이 있음을 보고하고 있으며, 미세먼지 관리를 위한 정확한 현황 진단과 대책 마련이 시급한 상황이다.

도시에서 미세먼지는 다양한 요인에 의해 복합적인 영향을 받는다. 미세먼지 농도는 기상요인의 영향을 받아 강수와 풍속에 음의상관을 보이고 계절에 따라 그 영향이 다르다(Chae 2009; Park 2017). 계절별 대기 혼합고 차이, 기온역전층 발생에 의한 대기오염 물질의 정체에 의해 미세먼지 농도는 달라진다(Park et al. 2002; Lee et al. 2007). 오염물질의 장거리 이동에 따른 도시 외부 유입 미세먼지의 영향(Hatakeyama et al. 2004), 황사와 같은 중국발 오염물질의 영향(Park et al. 2012)도 미세먼지 농도의 매우 큰 증가요인이다. 도시 내부적으로는 도로나 공장 등 많은 오염원에서 미세먼지가 배출되고, 도시에서 배출된 가스상의 대기오염물질은 대기 중 반응에 의해 2차 미세먼지로 변환되어 PM2.5의 주원인이 된다. 건물이나 인구 밀도, 교통량 등과의 관련성(Weng 2006)이나, 도시열섬에 의한 농도 증가(Jonsson et al. 2004) 등이 보고되었고, 도시의 복잡한 공간 구조의 영향에 의해 미세먼지 농도는 달라진다(Fan et al. 2017). 도시 미세먼지 관리에 있어

www.kci.go.kr

이러한 환경요인의 작용에 대한 이해는 필수적이다.

현재 국내에서 발표되는 미세먼지 대책은 대부분 미세먼지를 유발하는 배출원 관리에 초점을 두고 있다(MOE 2013). 미세먼지를 유발하는 원인에 대한 관리는 사전예방적 대처로서 중요하지만 대기 중에 부유하는 미세먼지는 별도의 저감 대책이 필요하며, 부유 미세먼지의 저감을 위해 중요한 것이 녹지이다. 녹지에서 미세먼지 입자는 나무의 기공에서 일부 흡수되고 대부분은 식물체 표면에 흡착되어 강우 시 씻겨 내려가거나, 낙엽이나 가지와 함께 떨어져 나가게 된다(Nowak 1998). 수목의 미세먼지 제거량(Cai et al. 2017)과 수종별 제거 효율(Saebo et al. 2012) 등에 관한 연구결과는 지속적으로 보고되고 있으며, 수목의 제거량 계산 모델들이 개발되어 특정 공간에서 미세먼지 제거량을 추정하기도 하였다(Fuller et al. 2009). 위성영상을 활용한 연구에서 연평균 PM2.5와 NDVI가 강한 음의 상관성이 있음이 보고되었고(Wu et al. 2017), 도시산림에서 미세먼지 농도 실측결과 삼림 가장자리에서 내부로 가면서 농도가 감소하였으며(Cavanagh et al. 2009), PM2.5 제거 효과가 침엽수, 활엽수, 혼효림 등 식생 유형별로 달랐고, 계절별로도 차이가 있다는 보고도 있다(Nguyen et al. 2015). 여러 연구들에서 밝힌 바와 같이 미세먼지 저감에 대한 녹지의 효과는 분명한 것으로 보이지만 녹지가 가진 기능의 한계와 일부 부정적 결과를 언급한 연구도 있다. 식물에 흡착된 먼지 입자는 장시간 비가 오지 않을 시 포화점에 도달하고, 기공을 막아 제거효과가 약화될 수 있으며(Shackleton et al. 2011), 도로에서 녹지 내부로 유입된 미세먼지가 정체되어 외부보다 농도가 높았다는 사례도 보고되었다(Chen et al. 2015). 녹지에서 미세먼지 저감은 다양한 환경조건 의해 효과가 달라질 수 있으며, 수종별 저감능의 차이도 있어, 지역별 환경과 수종에 따라 변화하는 미세먼지 저감기능을 밝히는 것이 중요하다.

미세먼지와 녹지에 관한 많은 해외 연구사례와 달리 국내에서는 최근 가로공간에서 녹지의 미세먼지 저감능을 연구한 몇몇 사례(Hong et al. 2018; Hwang et al. 2018)만 보고될 만큼 관련 연구가 부족한 실정이다. 미세먼지에 관한 국내 연구는 대부분 배출원과 발생원인, 기상요인과의 관계, 건강 영향 등에 관한 것이 주를 이룬다. 녹지를 활용한 공기 중 미세먼지의 제거를 위해서는 지역의 기상여건과 환경조건, 도시의 공간적 특성과 식생 구성 등 다양한 변수에 의해 따라 달라지는 미세먼지 농도의 특성을 규명해야 한다.

이러한 관점에서 본 연구는 미세먼지 농도에 대한 다양한 환경변수 중 도시 내 공간적 요인의 영향을 파악하는 기초연구로서 실시하였다. 도시 내에서 미세먼지 농도에 영향을 끼치는 공간적 요인인 토지피복에 초점을 맞춰 대기오염 측정망 주변에서 미세먼지의 배출과 저감에 기여하는 토지피복 유형의 비율 차이에 의해 달라지는 미세먼지 농도 특성을 계절별로 분석하였다. 이를 통해 미세먼지 농도에 작용하는 토지피복의 영향을 파악하고자 하였다.

II. 연구방법

본 연구는 서울시 대기오염 측정망을 대상으로 각 측정소 주변 토지피복 유형 중 미세먼지 배출과 관련된 시가화지역과 저감 기능을 가진 산림 유형의 분포 비율에 따라 측정소 그룹을 구분하여 그룹간의 미세먼지 농도 차이를 분석하였다.

연구는 먼저 2016년 한 해 동안의 서울시 미세먼지 농도 변화를 살펴 미세먼지 농도의 계절적 경향을 파악하였다. 다음으로 대기오염 측정소 주변의 토지피복 자료를 구축하여 토지피복 유형의 비율을 기준으로 측정소를 그룹화하였다. 마지막으로 측정소 그룹간의 미세먼지 농도 차이에 대한 계절별 통계분석을 실시하여 그룹간 농도 차이를 규명하고, 측정소 주변 산림과 시가화지역 비율이 미세먼지 농도에 끼친 영향을 고찰하였다.

연구대상지인 서울시는 2016년 12월 기준 대기오염 측정망을 운영 중인 전국 96개 시·군 중에서 가장 많은 측정소가 조밀하게 분포한 도시이다. 서울시에는 대기오염 측정망 유형 중 도시대기 측정망이 25개소로 각 구별 1개소가 위치하고, 도로변대기 측정망이 15개소이다. 본 연구에서는 도시대기 측정망 자료

www.kci.go.kr

를 활용하였는데, 도시대기 25개 측정망 중 분석기간인 2016년에 측정소가 이전되어 주변 토지피복의 변화가 발생한 2개소를 제외하여 총 23개소를 분석대상으로 하였다.

미세먼지 농도 자료는 한국환경공단에서 제공하는 PM10과 PM2.5에 대한 2016년 시간별 농도자료를 일평균 농도로 변환하여 사용하였다. 일별 농도에서 황사 발생일은 제거하였다. 토지피복 자료는 환경부의 2013년 중분류 토지피복도를 대분류 유형으로 변환한 후 측정소 주변 3km 버퍼 내 토지피복 유형별 비율을 추출하였다.

측정소 그룹화는 측정소 주변 시가화지역과 산림 토지피복 유형의 비율을 기준으로 K-means clustering을 실시하였다. K-means는 데이터를 서로 다른 K개의 그룹으로 분할하는 방법으로 그룹 평균과 그룹 내 자료간 거리합이 최소가 되도록 그룹 분할을 반복한다. K-means는 K의 최적개수를 추정해야하는 한계가 있는데 본 연구에서 적정 K값은 rule of thumb 방법($K \approx \sqrt{n/2}$)로 산출하여 총 3개 그룹($\sqrt{23/2} = 3.39$)으로 분류하였다(Joseph et al. 2015). 그룹별 농도 비교는 23개 대기오염 측정소 PM10과 PM2.5의 일평균 농도를 일별 표준화 변환하여 사용하였다.

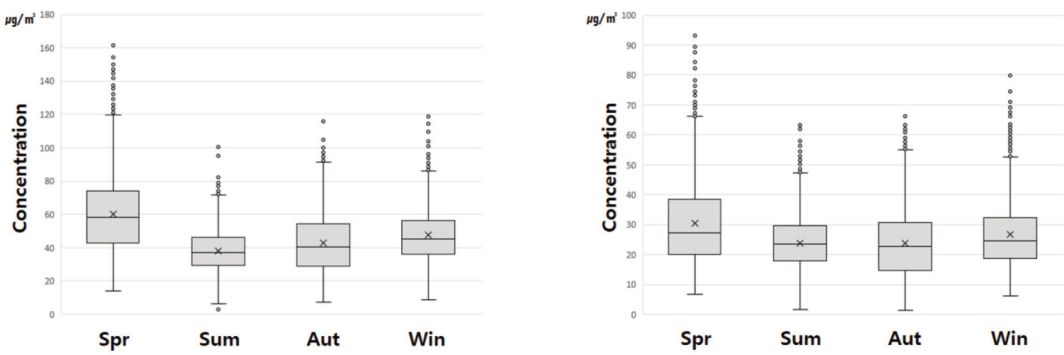
계절별 그룹별 농도의 정규성 검정 결과 정규성을 만족하지 않아 비모수 검정방법인 Kruskal-Wallis Test로 그룹간 평균 순위 비교를 실시하였다. 그룹간 차이의 통계적 유의성이 인정된 계절에 대해서는 개별 그룹간 비교를 위해 비모수 검정인 Mann-Whitney U Test를 실시하였고, Bonferroni Correction에 의한 유의수준 보정을 통해 유의성을 판단하여 두 그룹간 통계적 차이를 제시하였다. 이상의 공간자료 분석과 통계분석은 각각 Arcgis 10.3과 IBM SPSS Statistics 22를 사용하였다.

또한 토지피복 영향에 대한 세부적인 고찰을 위해 산림은 세부유형인 중분류 토지피복 유형의 비율을 산출하였고, 시가화지역은 측정소 주변 미세먼지 배출량을 국립환경과학원에서 제공하는 2014년 대기오염물질 배출량 자료를 공간자료화하여 측정소 주변 3km 버퍼 내 PM10, PM2.5의 연배출량 합계를 산출하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 계절별 평균 미세먼지 농도

서울시의 계절별 미세먼지 농도 경향을 파악하고자 23개 도시대기 측정소 일농도 자료를 활용한 계절별 평균농도 그래프를 작성하였다(Figure 1). PM10의 계절평균 농도는 최대 160㎍/㎥ 수준으로 봄철 농도가 월등히 높았고, 겨울, 가을, 여름 순으로 농도가 감소하여 계절간의 농도차이도 컸다. PM2.5는 최대 90㎍/㎥ 수준으로 역시 봄철 농도가 뚜렷하게 높았고 겨울철 농도도 높은 편이었다. 여름과 가을의 농도는 유사하게 낮았다. PM2.5의 계절간 농도 차이는 PM10보다 작았다. PM10과 PM2.5 모두 고농도인



(a) PM10 (b) PM2.5

Figure 1. Box plots of seasonal mean concentration of PM10 and PM2.5 of 23 air monitoring station in Seoul

www.kci.go.kr

Table 1. Ratio of land cover types in buffer 3km around 23 air monitoring station in Seoul

Type		Min	Max	Mean	SD
Urbanized area		48.8	87.2	65.9	11.3
Forest		1.1	37.2	17.0	12.5
Others	Grassland	1.2	11.8	6.0	2.9
	Bare land	1.8	8.2	3.7	1.6
	Waters	0.2	18.4	6.2	6.9
	Farmland	0.0	7.2	1.1	1.9
	Wetland	0.0	0.4	0.1	0.1

봄철 농도 편차가 가장 커 고농도 케이스가 빈번하였고, 저농도인 여름철은 편차가 가장 작아 비교적 일정한 수준으로 농도가 유지되었다.

서울시 미세먼지 농도는 계절별 차이가 분명하여 봄과 겨울은 고농도, 여름과 가을은 저농도 시기로 구분할 수 있었고, 황사일을 제거하였음에도 봄철의 고농도가 눈에 띄었다. 이처럼 미세먼지 농도의 계절별 특성이 달라 토지피복에 따른 농도차이에 대해 계절별 분석을 실시하였다.

2. 토지피복에 의한 대기오염 측정소 그룹 분류

측정소 주변 토지피복에 따른 그룹 분류를 위해 23개 도시대기 측정소 중심에서 반경 3km 내 대분류 토지피복 유형별 비율을 산출하였다(Table 1, Figure 2). 토지피복 유형은 대분류 유형을 시가화지역과 산림, 기타 유형으로 단순화하였다. 유형별 비율을 살펴보면 시가화지역이 평균 65.9%, 산림이 평균 17.0%로 주요 유형이었다. 기타 유형으로 초지, 나지, 수역 등은 각각 평균 6.0%, 3.7%, 6.2%로 적었다.

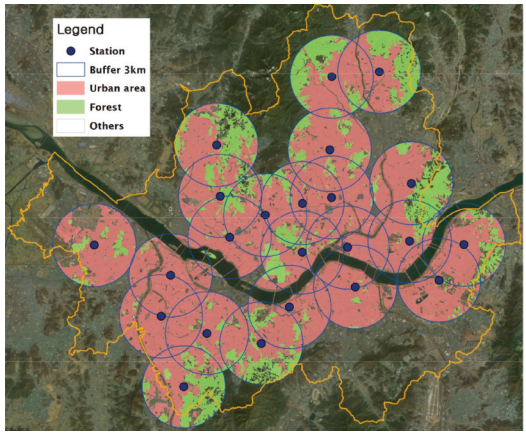
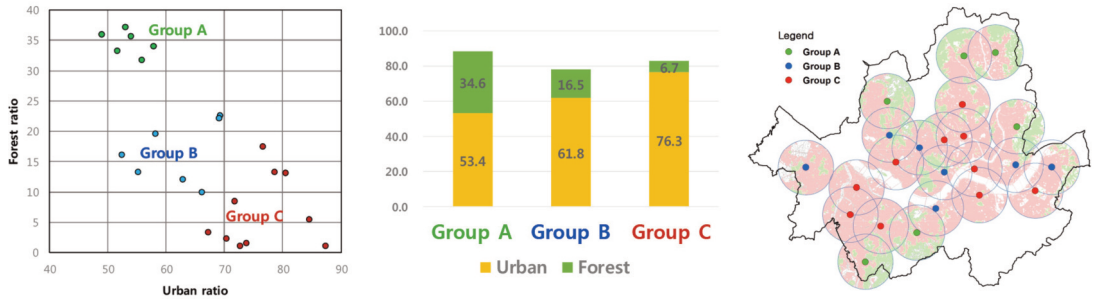


Figure 2. Map of land cover types in buffer 3km around 23 air monitoring station in Seoul

각 측정소별 시가화지역과 산림 토지피복 유형의 비율을 기준으로 K-means clustering을 실시하여 총 3개의 측정소 그룹을 구분하였다(Figure 3). Group A는 6개의 측정소가 포함되어 타 군집과 분포가 명확히 구분되었다. 군집 중심인 토지피복 비율의 평균이 산림 34.6%, 시가화지역 53.4%로 산림 비



(a) Scatter plot of clustered station group (b) Cluster centroid values of each land cover type by group (c) Map of clustered station group

Figure 3. Results of K-means clustering based on forest and urbanized area ratio around air monitoring station

www.kci.go.kr

Table 2. Statistical comparison of PM10 concentration between 3 station groups

Season	Group	PM10(㎍/㎥) Mean±SD	Kruskal-Wallis H[a]	Paired Comparison[b]		
				A-B	A-C	B-C
Spring	A	56.8±22.5	H=172.501 p<0.001	Z=-8.988 p<0.001	Z=-12.995 p<0.001	Z=3.554 p<0.001
	B	60.5±23.1				
	C	62.1±23.7				
Summer	A	35.0±13.8	H=235.427 p<0.001	Z=-11.973 p<0.001	Z=-14.603 p<0.001	Z=2.909 p=0.004
	B	38.5±14.4				
	C	39.4±14.8				
Autumn	A	40.4±18.0	H=200.356 p<0.001	Z=-9.171 p<0.001	Z=-14.180 p<0.001	Z=4.215 p<0.001
	B	43.0±18.6				
	C	43.9±18.5				
Winter	A	45.5±15.0	H=137.873 p<0.001	Z=-10.432 p<0.001	Z=-10.260 p<0.001	Z=2.124 p=0.034
	B	48.8±16.2				
	C	48.1±15.4				

a: Statistical analysis was performed with standardized data of daily PM concentration of 23 station. The data was tested for normality using a Kolomogorov-Smirnov Test

b: Statistical analysis was performed using Mann-Whitney U Test and α= 0.017 adjusted by Bonferroni correction method

율이 우세한 그룹이었고, 전체적으로 서울시 외곽의 대규모 산림과 인접하여 위치하였다. Group B는 7개의 측정소가 포함되었고, 군집 중심은 산림 16.5%, 시가화지역 61.8%로 Group A보다 산림은 좁고, 시가화지역은 넓었다. 주로 도시 외곽 산림을 일부 포함하거나 내부 산림과 인접한 지역에 분포하였다. Group C는 10개 측정소가 포함되었고, 군집 중심은 산림 6.7%, 시가화지역 76.3%인 시가화지역이 우세한 그룹이었다. 전체적으로 산림이 적은 시가화지역 중심에 위치하였다.

3. 계절별 그룹간 미세먼지 농도 차이 분석

PM10에 대하여 계절별 그룹별 평균 농도와 그룹간 농도차이에 대한 통계분석 결과를 제시하였다(Table 2). 세 그룹간 농도 차이는 비모수 검정인 Kruskal-Wallis Test를 계절별로 실시하였고 유의성이 인정된 계절에 대해 Mann-Whitney U Test로 개별 그룹간 차이를 검정하였다.

계절별 그룹별 PM10 평균 농도를 살펴보면 산림 비율이 높은 Group A의 농도는 전 계절에서 가장 낮았고, Group B, Group C 순으로 농도가 증가하여, 시가화지역이 우세한 Group C의 농도가 가장 높았다. 단, 겨울철은 예외로, Group B의 농도가 Group C보다 높았다. Group A의 농도는 계절별 고농도 그룹의 농도 대비 봄, 여름, 가을, 겨울 각각 8.5%, 11.2%, 8.0%, 6.8% 낮은 수치이었다. 미세먼지 저감 기능을 가진 산림 비율이 높은 그룹의 농도는 낮고, 미세먼지 배출원이 있는 시기화지역의 비율이 높은 그룹의 농도는 높게 나타나 미세먼지 배출과 저감에 영향을 주는 토지피복의 비율에 따라 미세먼지 농도가 달라지는 것으로 판단되었다.

그룹간 평균농도 차이가 계절별로 일관성 있는 경향을 나타내었지만 실제 수치차이는 크지 않았다. 반면 그룹 내 표준편차가 전반적으로 높아 그룹별 농도에 대한 평균의 대표성이 낮은 편이었다. 표준편차가 높은 것은 분석기간 동안 그룹 내 측정소간 일농도 차이가 크거나 개별 측정소의 일별 농도변화가 크다는 두 가지 이유를 생각할 수 있다. 미세먼지 농도는 서울이라는 한정된 공간에서 측정소 전체적으로 유사한 증감 패턴을 나타내지만 일별로 증감의 변화량이 크기 때문에 높은 표준편차는 후자의 영향이 크다고 할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 일별 농도 변화에 의한 높은 편차를 해소하기 위해 23개 측정소 농도를 일별 표준화하여 통계분석을 실시하였다.

세 그룹간 농도 차이에 대한 Kruskal-Wallis Test 결과 모든 계절에서 그룹간 농도 차이가 통계적으로

www.kci.go.kr

Table 3. Statistical comparison of PM2.5 concentration between 3 station groups

Season	Group	PM2.5(㎍/㎥) Mean±SD	Kruskal-Wallis H[a]	Paired Comparison[b]		
				A-B	A-C	B-C
Spring	A	29.9±14.4	H=61.732 p<0.001	Z=-3.653 p<0.001	Z=-7.713 p<0.001	Z=4.160 p<0.001
	B	30.2±13.6				
	C	31.0±13.9				
Summer	A	22.5±10.0	H=245.544 p<0.001	Z=-6.414 p<0.001	Z=-15.805 p<0.001	Z=9.772
	B	23.5±10.0				
	C	25.0±10.4				
Autumn	A	23.3±11.8	H=43.417 p<0.001	Z=-3.175 p<0.001	Z=-6.932 p<0.001	Z=2.514 p=0.012
	B	23.9±11.8				
	C	24.3±11.6				
Winter	A	26.1±10.7	H=18.751 p<0.001	Z=-3.097 p=0.001	Z=-4.333 p<0.001	Z=0.633 p=0.527
	B	27.0±11.2				
	C	26.8±10.9				

a: Statistical analysis was performed with standardized data of daily PM concentration of 23 station. The data was tested for normality using a Kolomogorov-Smirnov Test

b: Statistical analysis was performed using Mann-Whitney U Test and α= 0.017 adjusted by Bonferroni correction method

유의하였다(p〈0.001). 개별 그룹간 차이에 대한 Mann-Whitney U Test 결과 겨울철 Group B-C의 차이를 제외한 모든 계절의 그룹간 분석 유의확률이 Bonferroni 방법으로 조정된 유의수준 0.017보다 낮아 개별 그룹간 차이에 대한 통계적 유의성이 인정되었다. 종합하면 산림 비율이 높은 Group A의 PM10 농도는 모든 계절에서 Group B, C보다 통계적으로 유의하게 낮았다. 시가화지역이 가장 우세한 Group C는 겨울철만 Group B보다 낮았으나 그 차이는 통계적으로 유의하지 않았고(p=0.034), 나머지 계절에서 Group A, B보다 유의하게 높았다.

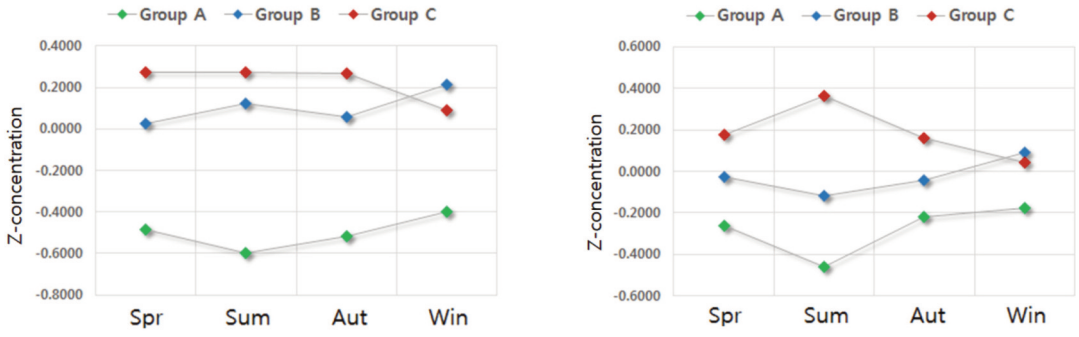
PM2.5에 대하여 계절별 그룹별 평균 농도와 그룹간 농도차이에 대한 통계분석 결과를 제시하였다(Table 3). 통계분석은 PM10과 동일한 방식으로 실시하였다.

계절별 그룹별 PM2.5 평균 농도는 Group A 농도가 전 계절에서 가장 낮았고, Group B, Group C 순으로 농도가 증가하여, Group C의 농도가 가장 높았다. 단, PM2.5에서도 겨울철 Group B의 농도가 Group C보다 높았다. Group A의 농도는 계절별 고농도 그룹의 농도 대비 봄, 여름, 가을, 겨울 각각 3.5%, 10.0%, 4.1%, 3.3% 낮은 수치이었다. PM10과 마찬가지로 미세먼지 배출과 저감에 영향을 주는 측정소 주변의 토지피복 비율에 따라 미세먼지 농도가 달라지는 것으로 판단되었다.

세 그룹간 농도 차이에 대한 Kruskal-Wallis Test 결과 모든 계절에서 그룹간 농도 차이가 통계적으로 유의하였다(p〈0.001). 개별 그룹간 차이에 대한 Mann-Whitney U Test 결과 겨울철 Group B-C의 차이를 제외한 모든 계절의 그룹간 분석 유의확률이 Bonferroni 방법으로 조정된 유의수준 0.017보다 낮아 개별 그룹간 차이에 대한 통계적 유의성이 인정되었다. 이상의 통계분석 결과도 PM10 결과와 경향이 유사하였다. 산림 비율이 높은 Group A는 모든 계절에서 PM2.5 농도가 Group B, C보다 통계적으로 유의하게 낮았다. 시가화지역의 비율이 높은 Group C는 겨울철만 Group B보다 낮았으나 그 차이는 통계적으로 유의하지 않았고(p=0.527), 나머지 계절에서 Group A, B보다 유의하게 높았다.

이상의 분석결과 산림 비율이 높은 그룹의 농도는 낮고 시가화지역 비율이 높은 그룹의 농도는 높은 그룹간 농도차의 통계적 유의성이 입증되었다. 그러나 그룹간 농도 차이의 계절적 경향을 좀 더 명확히 살펴보고자 표준화된 미세먼지 농도값을 활용한 계절별 그룹별 평균 농도 그래프를 작성하였다(Figure 4). PM10의 그룹별 농도는 전 계절에서 Group A의

www.kci.go.kr



(a) PM10 (b) PM2.5

Figure 4. Comparison of seasonal mean standardized PM concentration by group

농도가 Group B, C보다 큰 차이로 낮았고, Group B와 C간의 차이는 작았다. 계절에 따른 그룹간 농도 차이는 여름철에 가장 컸고, 겨울철에 가장 작았다. 봄철과 가을철의 그룹간 농도 차이는 유사하였다. PM2.5의 그룹별 농도는 전 계절에서 Group A의 농도가 Group B, C보다 낮았고, 계절별 그룹간 농도 차이도 여름철에 차이가 가장 크고, 겨울철에 가장 작아 PM10과 유사한 결과를 나타내었다.

이러한 그룹간 농도 격차의 계절적 차이는 측정소 주변 토지피복의 영향이 계절 변화에 따라 여름에 증가했다가 겨울로 가면서 감소하기 때문으로 판단되었다. 이를 산림 내 수목이 잎이 발생해서 낙엽으로 소멸해가는 일련의 과정으로 생각해 보면 Yin et al.(2011)이 도시공원을 대상으로 한 연구에서 제시한 바와 같이 여름철에는 수목의 잎 성장이 완성되어 미세먼지의 저감기능이 강화되기 때문에 그룹간 격차가 커지고, 겨울철에는 낙엽수의 잎이 탈락되어 산림의 저감기능이 약화되기 때문에 그룹간 격차가 작아지는 것으로 판단되었다.

또한 산림 세부 유형의 비율에 따른 영향을 살펴보기 위하여 그룹별 산림 중분류 토지피복 유형의 평균 비율 그래프를 작성하였다(Figure 5). 산림 중분류 유형은 활엽수림, 침엽수림, 혼효림의 3가지 유형으로 구성되어 있으며 서울 도시대기 측정소 주변의 산림은 전 그룹에서 활엽수림 비율이 크게 높았다. 서울의 활엽수림은 낙엽수이기 때문에 겨울철에 측정소 주변 산림의 상당 부분이 잎이 없는 상태가 되므로 겨울철 산림의 미세먼지 저감 기능이 약화될 것으로 판단되었다.

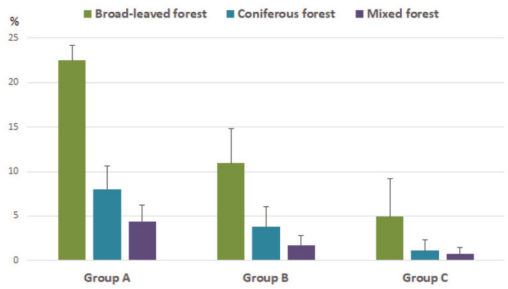
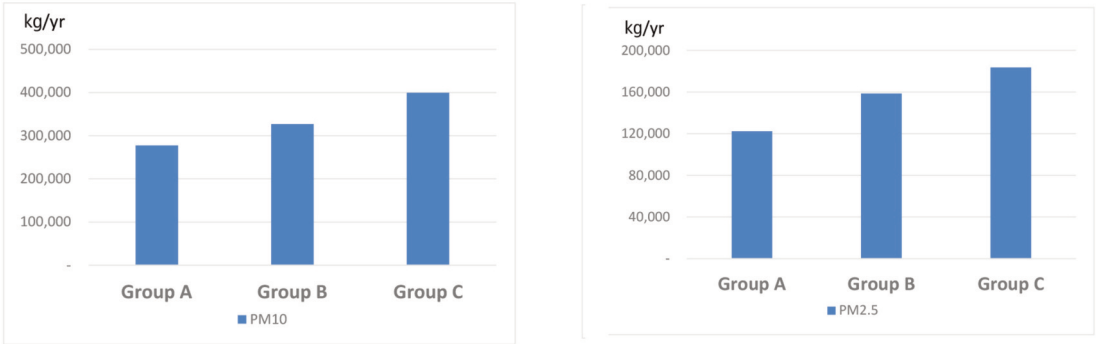


Figure 5. Area ratio of detailed forest land cover types by group

한편 측정소 주변 시가화지역 비율에 따른 농도차이에 대해서 시가화지역 내 미세먼지 배출량에 의한 영향을 살펴보기 위해 PM10, PM2.5의 그룹별 연 배출총량을 그래프로 나타내었다(Figure 6). PM10과 PM2.5 배출량은 모두 그룹 C가 가장 많고, B, A순으로 감소하여 시가화지역 비율이 높은 그룹에서 배출량도 많았다. 배출량이 많은 그룹 C는 미세먼지 농도가 높고, 배출량 적은 그룹 A의 농도는 낮기 때문에 그룹별 농도 차이는 시가화지역 면적과 함께 그에 비례하는 배출량의 영향을 받았다.

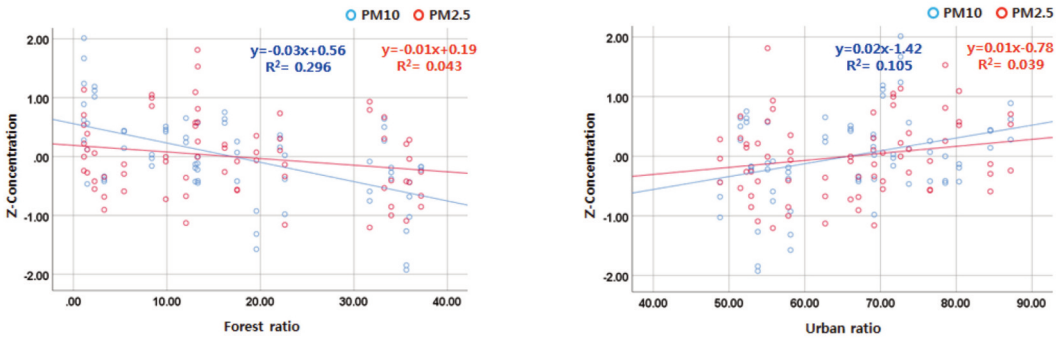
그러나 PM2.5 농도에 대한 국내외 배출 기여도를 평가한 연구에서 국내 배출량의 기여도를 약 40% 수준으로 제시하였으며, 특히 서울시의 자체 배출에 의한 기여도를 12%로 추정한 바 있다(NIER 2017b). 그 외의 기여율은 국외 장거리 이동에 의한 유입, 국내

www.kci.go.kr



(a) PM10 (b) PM2.5

Figure 6. Annual sum of PM10, PM2.5 emissions by group



(a) Forest (b) Urbanized area

Figure 7. Comparison of relationships between land cover (forest, urbanized area) ratio and particulate matter (PM10, PM2.5) concentration in spring

지역간 유입 영향 등으로 볼 수 있다. 미세먼지 농도는 지역 내 배출량뿐만 아니라 다양한 배출요인의 복합적인 작용에 의해 결정되며, 배출량 또는 시가화지역 면적으로 설명될 수 있는 미세먼지 농도 차이는 부분적이라 할 수 있다.

측정소 주변 산림과 시가화지역 비율이 미세먼지 농도에 끼치는 영향력을 비교해보기 위해 봄철 미세먼지 농도에 대한 산림 및 시가화지역 비율의 관계성을 분석하였다(Figure 7). 시가화지역의 결정계수(R^2)는 PM10과 PM2.5가 각각 0.105, 0.039이었고, 산림은 각각 0.296, 0.043으로 시가화지역에 비해 산림의 설명력이 높았다. 특히 PM10에 대한 산림의 설명력은 시가화지역보다 약 3배정도 더 컸다. 따라서 그룹간 농도 차이는 시가화지역 비율의 증가보다 산림 비율의 증가에 더 큰 영향을 받았다고 할 수 있다. 그룹별 농도차이는 주변 산림 비율과 시가화지역 비율 또는 배출량의 영향에 의한 종합적인 결과로 볼 수 있지만, 그룹 내 배출량의 기여도가 부분적이고, 외부 유입의 영향도 크기 때문에 시가화지역 비율에 의한 농도 증가 영향이 상대적으로 낮게 나타난 것으로 판단된다. 산림은 시가화지역보다 면적은 크게 작지만 미세먼지에 대한 영향력은 높게 나타나 도시 미세먼지 농도에 대한 중요한 조절요인으로 사료된다. 다만 낮은 결정계수가 말해주듯 산림과 시가화지역 토지피복 이외에 다른 환경요인들이 미세먼지 농도에 끼치는 영향도 클 것이므로 이에 대한 규명이 필요하며, PM10과 PM2.5에 대한 작용도 다를 것으로 사료되어 추후 연구가 필요하였다.

www.kci.go.kr

IV. 결 론

본 연구는 도시에서 미세먼지의 배출과 저감에 기여하는 토지피복 유형인 시가화지역과 산림 유형의 영향에 따른 계절별 미세먼지 농도 특성을 파악하고자 하였으며, 대기오염 측정소 주변 두 피복유형의 비율을 기준으로 측정소를 그룹화하고, 그룹간의 미세먼지 농도 차이를 계절별로 분석하였다. 분석 결과는 다음과 같다.

첫째, 서울시의 미세먼지 평균 농도는 계절별 뚜렷한 차이를 나타내었다. PM10과 PM2.5 모두 봄철 농도가 월등히 높았고, 겨울철도 고농도를 나타내었으며, 여름철 농도가 가장 낮았다.

둘째, 23개 도시대기 측정망 주변 버퍼 3km 내 토지피복은 시가화지역의 평균이 65.9%, 산림은 17.0%이었다. 두 유형의 비율을 기준으로 측정소를 그룹화한 결과 총 3개 그룹으로 구분되었다. 그룹별 시가화지역과 산림의 중심값은 Group A에서 각각 53.4%, 34.6%, Group B는 61.8%, 16.5%, Group C는 76.3%, 6.7%이었다.

셋째, PM10과 PM2.5의 계절별 그룹간 농도차이에 대한 통계분석 결과 전 계절에서 산림 비율이 높은 Group A의 농도가 가장 낮았다. 산림 비율이 낮고, 시가화지역 비율이 높은 Group C는 봄부터 가을까지 가장 높은 농도를 나타내었고, 겨울철에만 Group B보다 낮아졌는데, 겨울철 Group B-C간의 차이는 통계적으로 유의하지 않았다. 계절별 고농도 그룹의 농도 대비 Group A의 농도는 PM10에서 봄, 여름, 가을, 겨울 각각 8.5%, 11.2%, 8.0%, 6.8%, PM2.5에서 3.5%, 10.0%, 4.1%, 3.3% 낮은 수치이었다.

넷째, PM10과 PM2.5 모두 그룹간 농도 격차가 여름에 가장 크고, 겨울로 가면서 작아졌는데, 이는 낙엽활엽수 비율이 높은 측정소 주변 산림에서 계절별 수목의 잎 생장과정에 따라 미세먼지 저감기능이 달라졌기 때문으로 판단되었다.

다섯째, 미세먼지 농도 변화에 대한 주변 토지피복의 영향 중 배출량과 비례하는 시가화지역 비율의 영향은 부분적인 것으로 판단되었고, 산림 비율의 증가에 의한 영향력이 더 큰 것으로 나타났다.

미세먼지는 다양한 환경요인의 영향을 받는데, 본 연구는 도시 미세먼지 농도가 주변 토지피복의 미세먼지 배출 및 저감 영향에 따라 달라졌음을 제시하였다. 또한 계절에 따른 토지피복의 미세먼지 영향 차이가 계절별 산림 수목의 생장과 관련이 있고, 시가화지역보다 산림이 미세먼지 농도에 끼치는 영향이 더 컸음을 제시하였다. 주변에 산림 비율이 높은 지역의 미세먼지 농도가 낮게 나타난 연구의 결과는 산림의 저감 기능이 작용했기 때문으로 판단되며, 도시의 미세먼지 관리에 있어 녹지의 중요성을 알려주는 결과이다.

본 연구는 서울이라는 한정된 공간을 대상으로 1년이란 짧은 기간 동안 측정된 자료를 분석하였고, 측정소 주변의 다양한 토지피복을 산림과 시가화지역으로 한정하여, 분석 범위를 반경 3km로 한정한 한계가 있다. 따라서 다양한 대상지와 요인 및 기간, 범위를 달리한 추가적인 연구가 필요하다. 또한 본 연구에서 고려되지 못한 기상요인, 세부적인 공간 특성, 산림식생특성이나 산림 외 조성녹지의 분포 등 다양한 환경요인을 반영한 연구가 필요하며, 이러한 환경요인의 시기적, 지역적 작용 양상을 규명하는 것이 중요하다. 본 연구는 미세먼지에 영향을 끼치는 도시 내 공간적 요인인 토지피복의 계절적 작용 양상을 규명하고자 하는 시도로서 수행되었다. 향후 환경요인들의 상세한 시공간적 특성을 복합적으로 고려한 후속 연구들이 지속된다면 녹지를 활용한 효과적인 미세먼지 관리가 가능할 것으로 기대한다.

사 사

본 연구는 국립생태원 자체연구과제(NIE-기반연구-2018-08)의 일환으로 수행되었으며, 한국환경생태학회 학술대회논문집28(2)에 일부 소개된 내용을 수정 및 발전시켰습니다.

References

www.kci.go.kr

Bae HJ. 2014. Effects of short-term exposure to

PM10 and PM2.5 on mortality in Seoul. J. Environ. Health. 40(5): 346-354. [Korean Literature]

Cavanagh JE, Zawar-Reza P, Gaines Wilson J. 2009. Spatial attenuation of ambient particulate matter air pollution within an urbanized native forest patch. urban for. urban green. 8(1): 21-30.

Chae HJ. 2009. Effect on the PM10 Concentration by Wind Velocity and Wind Direction. J. Environ. Sanit. Eng. 24(3): 37-54. [Korean Literature]

Chen J, Yu X, Sun F, Lun X, Fu Y, Jia G, Zhang Z, Liu X, Mo L, Bi H. 2015. The concentrations and reduction of airborne particulate matter (PM10, PM2.5, PM1) at shelterbelt site in Beijing. Atmosphere. 6: 650-676.

Cai M, Xin Z, Yu X. 2017. Spatio-temporal variations in PM leaf deposition: A meta-analysis. Environ. Pollut. 231: 207-218.

Dockery DW, Pope CA, Xu X, Spengler JD, Ware JH, Fay ME, Ferris BG, Speizer FE. 1993. An association between air pollution and mortality in six US cities. N. Engl. J. Med. 329(24): 1753-1759.

Fuller M, Bai S, Eisinger D, Niemeier D. 2009. Practical Mitigation Measures for Diesel Particulate Matter: Near-Road Vegetation Barriers. University of California, Davis 30.

Fan S, Li X, Han J, Cao Y, Dong L. 2017. Field assessment of the impacts of landscape structure on different-sized airborne particles in residential areas of Beijing, China. Atmospheric Environ. 166: 192-203.

Hatakeyama S, Takami A, Sakamaki F, Mukai H, Sugimoto N, Shimizu A, Bandow H. 2004. Aerial measurement of air pollutants and aerosols during 20-22 March 2001 over the East China Sea. J. Geophys. Res. Atmospheres. 109: D13.

Hong S, Kang R, An M, Kim J, Jung E. 2018. Study on the Impact of Roadside Forests on Particulate Matter between Road and Public Openspace in front of Building Site: Case of Openspace of Busan City hall in Korea. Korean J. Environ. Ecol. 32(3): 323-331. [Korean Literature]

Hwang K, Han B, Kwark J, Park S. 2018. A Study on Decreasing Effects of Ultra-fine Particles(PM2.5) by Structures in a Roadside Buffer Green: A Buffer Green in Songpa-gu, Seoul. J. KILA. 46(4): 61-75. [Korean Literature]

Jonsson P, Bennet C, Eliasson I, Lindgren ES. 2004. Suspended particulate matter and its relations to the urban climate in Dar es Salaam, Tanzania. Atmos. Environ. 38: 4175-4181.

Joseph W, Jeberson W, Jeberson K. 2015. Count based K-Means Clustering Algorithm. Int. J. Curr. Eng. Technol. 5(2): 1249-1253.

Lee SB, Bae GN, Park SM, Jung SG. 2007. Black Carbon Pollution Level at a Roadside of Seoul in Spring. J. KOSAE. 23(4): 466-477. [Korean Literature]

MOE(Ministry of Environment). 2013. Basic Plan on the 2nd stage Metropolitan Area Air Quality Management. Ministry of Environment. 1-107. [Korean Literature]

Nowak DJ, McHale PJ, Ibarra M, Crane D, Stevens J, Luley C. 1998. Modeling the effects of urban vegetation on air pollution. S.E. Gryning, N. Chaumerliac (eds.), Air pollution modeling and its application XII. Plenum Press, New York. 399-407.

www.kci.go.kr

Nguyen T, Yu XX, Zhang ZM, Liu MM, Liu XH. 2015. Relationship between types of urban forest and PM2.5 capture at three growth stages of leaves. J. Environ. Sci. 27: 33-41.

NIER(National Institute of Environmental Research). 2017a. Annual report of air quality in Korea 2016, National Institute of Environmental Research. 1-384. [Korean Literature]

NIER(National Institute of Environmental Research). 2017b. A Study on Quantitative Estimation of Sources and Regional Contributions to Air Quality on Forecasting Areas(I), National Institute of Environmental Research. 1-34. [Korean Literature]

Park SS, Kim YJ, Fung K. 2002. PM2.5 carbon measurements in two urban areas: Seoul and Kwangju, Korea. Atmospheric Environ. 36(8): 1287-1297.

Park SY, Kim YJ, Kim CH. 2012. Characteristics of Long-Range Transport of Air Pollutants due to Different Transport Patterns over Northeast Asia. J. KOSAE. 28(2): 142-158. [Korean Literature]

Park CS. 2017. Variations of PM10 concentration in Seoul during 2015 and relationships to weather condition. J. Photo Geogr. 27(2): 47-64. [Korean Literature]

Schwartz J, Dockery DW, Neas LM. 1996. Is daily mortality associated specifically with fine particles. J. Air Waste Manage. Assoc. 46(10): 927-939.

Shackleton K, Bell N, Smith H, Davies L. 2011. The role of shrubs and perennials in the capture and mitigation of particulate air pollution in London. Imperial College London. 1-32.

Saebo A, Popek R, Nawrot B, Hanslin HM, Gawronska H, Gawronski SW. 2012. Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces. Sci. Total Environ. 427: 347-354.

Weng Q, Yang S. 2006. Urban Air Pollution Patterns, Land Use, and Thermal Landscape: An Examination of the Linkage Using GIS. Environ. Monit. Assess. 117: 463-489.

Wu CD, Chen YC, Pan WC, Zeng YT, Chen MJ, Guo YL, Lung SCC. 2017. Land-use regression with long-term satellite-based greenness index and culture-specific sources to model PM2.5 spatial-temporal variability. Environ. Pollut. 224: 148-157.

Xing YF, Xu YH, Shi MH, Lian YX. 2016. The impact of PM2.5 on the human respiratory system. J. Thoracic Dis. 8(1): E69 -E74.

Yin S, Shen Z, Zhou P, Zou X, Che S, Wang W. 2011. Quantifying air pollution attenuation within urban parks: an experimental approach in Shanghai, China. Environ. Pollut. 159: 2155-2163.

www.kci.go.kr