

다중 회귀 분석을 이용한 도시 내 토지이용이 대기질에 미치는 영향 분석

김근한* · 김동범** · 송영명*** · 최희선****†

*한국환경연구원 물국토연구본부 환경계획연구실 전문연구원, **내가시스템 기술연구소 연구원,
내가시스템 기술연구소 연구소장, *한국환경연구원 물국토연구본부 환경계획연구실 선임연구위원

Analysis of the Effect of Land Use in Cities on Air Quality Using Multiple Regression Analysis

Kim, Geunhan* · Kim, Dongbeom** · Song, Yongmyong*** · Choi, Hee-sun****†

*Research Specialist, Water and Land Research Group/Division for Environmental Planning, Korea Environment Institute, Sejong, Korea

**Researcher, Technical Research Institute NEGGA Co., Ltd, Seoul, Korea

***Chief Technology Officer, Technical Research Institute NEGGA Co., Ltd, Seoul, Korea

****Chief Research Fellow, Water and Land Research Group/Division for Environmental Planning, Korea Environment Institute, Sejong, Korea

ABSTRACT

Urban air quality has a major impact on public health. Therefore, planning related to land use is becoming increasingly important from the perspective of urban planning, such as creation of green space for improvement of air quality in a city. Therefore, this study examined the relationships between air quality information from Korea's air quality measurement network, sub-divided land cover map, and normalized difference vegetation index of green areas. For this purpose, buffer analysis was performed from 500 m to 5,000 m elevation, centering on the atmospheric measurement network. Multiple regression analysis was performed between the area of land cover objects included in the buffer space and the value obtained by dividing the area of green space by the normalized difference vegetation index of green space.

The corrected values of the multiple regression analysis results of NO₂ and O₃ were significant up to 5,000 m. Therefore, in this study, the total area of sub-divided land cover included in the 5,000 m buffer space and the normalized difference vegetation index of green areas were calculated in the air quality measurement network. Multiple regression analysis was performed between the calculated results and the concentrations of NO₂ and O₃ needed to obtain prediction equations. In the model, NO₂ showed a negative correlation with area of farmland, forest, grassland and NDVI of green / green areas and a positive correlation with residential and other artificial barren areas. For O₃, there was a positive correlation in paddy fields, crop fields, and forest areas. If the air pollutant prediction formula derived here is used in urban planning, it will be helpful in improving the air quality of a city.

Key words: Urban Air Quality, Land Cover, Green Area, Sub-divided Land Cover Map, Normalized Difference Vegetation Index

1. 서론

전 세계적으로 도시의 면적은 확대되고 있으며, 이러한 도시의 급속한 확장으로 산림, 초지와 같은 자연지면은

농경지, 시가지 등의 인공지면으로 변화하게 된다. 이러한 토지이용변화는 대기질에도 영향을 미치며, 도시 대기질의 변화는 공중 보건, 환경, 가시성, 기후에도 큰 영향을 미치며(Heald and Spracklen, 2015), 도시에 상주하고 있

†Corresponding author : choihs@kei.re.kr (370 Sicheong-daero, Sejong, 30147, Republic of Korea. Tel. +82-44-415-7611)

ORCID 김근한 0000-0002-4462-6991
송영명 0000-0001-6860-1687

김동범 0000-0003-3267-4352
최희선 0000-0002-4894-3214

는 사람들의 건강에도 영향을 미친다. 특히 미세먼지는 호흡기 및 심혈관 건강에 대한 부정적인 영향을 미치고 있으며(Liu et al., 2018), 오존은 만성호흡기 질환과 심혈관 질환에도 영향을 미치는 것으로 나타나고 있다(Brunekreef and Holgate, 2002).

이러한 문제 때문에 도시계획 등을 수행하는 의사결정 단계에서는 도시의 대기질을 개선하기 위해 녹지공간의 조성 등 다양한 측면에서의 노력 등을 고려하고 있다. 관련 연구들을 살펴보면 Joo and Kim (2009)은 도시 녹지가 대기질에 미치는 영향을 정량적으로 해석하기 위해 서울 종로구의 파고다 인근 대기질을 전산유체역학 모델을 활용하여 대기환경영향평가 모델을 개발하여 분석하였다. 분석 결과 도시 근린공원의 수목은 자체적으로 오염물질의 흡수 및 제거 효과는 없었지만, 토지이용적 측면에서 녹지 공간은 배출원이 거의 없고, 원활한 기류소통의 촉진 효과를 유지함으로써 대기환경 악화를 억제하는 효과가 탁월한 것으로 판단했다. Kim et al.(2019) 연구에서는 국토환경성평가지도의 환경생태적 평가등급의 분포와 대기질 측정망의 대기질 값에 대해 IDW (Inverse distance weighting) 기법을 적용하여 대기질면을 생성하고, 시군구를 기준으로 환경생태적 우수지역의 면적 분포와 대기질의 평균 값과의 관계를 살펴보았으며, 환경생태적 우수지역의 면적 비율이 높을수록 대기질의 개선효과가 나타난다고 판단했다.

Sun et al.(2016)은 중국의 대표적인 8개 도시인 칭다오, 지난, 정저우, 시안, 란저우, 장예, 지우취안, 우루무치를 선정하여 미세먼지와 토지피복/토지이용 변화와의 관계를 분석하였다. 2001년부터 2010년까지의 MODIS 영상을 통해 토지피복/토지이용 변화를 도출하고 MODIS 에어로졸을 통해 미세먼지 농도를 추정했다. 상관분석 결과 내륙지역에서 미세먼지 농도와 토지피복/토지이용 변화와의 상관관계가 높게 나타났다고 판단했다.

그러나 기존 지점을 중심으로 일정 거리 내의 세분화된 토지이용/토지피복의 구성과 함께 녹지의 식생 활력과 같은 녹지의 질과 대기질의 관계를 분석한 연구는 거의 없었다. 이러한 토지의 이용 및 녹지공간의 구성에 따른 대기질의 정보를 제공한다면 도시를 계획하는 의사결정 단계에서 큰 도움이 될 수 있을 것이라 판단된다. 따라서 본 연구에서는 대기질 측정망을 기준으로 일정거리 마다의 토지이용(토지피복)과 녹지공간의 NDVI를 활용하여 토지이용과 대기질의 관계를 파악하고, 다중 회귀 분석을 이용하여 토지이용변화에 따른 대기질의 변화를 예측할

수 있는 모델을 개발하고자 하였다.

또한, 본 연구에서는 우리나라의 대기질 측정망의 위치와 대기질 정보를 활용하여 전국에 분포하고 있는 대기측정망을 기준으로 500 m부터 5,000 m까지 버퍼를 수행하고, 해당 공간 내 포함되는 토지피복 객체들의 면적, 녹지공간의 정규 식생 지수들과 $PM_{2.5}$, PM_{10} , O_3 , NO_2 , CO , SO_2 6개 대기질과의 다중 회귀 분석을 수행하고, 각각의 모델의 수정된 R^2 값을 통해 모델의 설명력을 살펴보았으며, 이때 대기질 측정 세분류 토지피복지도, 정규 식생 지수를 활용하여 대기측정망을 중심으로 일정 공간 내에 포함된 세분류 토지피복의 구성과, 녹지지역에서의 정규 식생 지수 총량과의 관계를 살펴보려고 하였다.

2. 연구범위 및 연구방법

2.1. 데이터 구축

2.1.1. 대기질 자료 구축

대기질 자료는 환경부의 에어코리아에서 제공하는 도시대기 측정망의 6개 대기오염물질 ($PM_{2.5}$, PM_{10} , O_3 , NO_2 , CO , SO_2)의 2018년 데이터를 활용하고자 했다. 이때 연중 측정 자료 수의 75% 이상이 유효하게 나타난 전국 443개 도시대기 측정망의 대기오염물질 농도를 이용하였다(National Institute of Environmental Research, 2018). 이때 전국 443개의 도시대기 측정망의 연중 대기오염 물질 평균 농도는 Table 1과 같다.

Table 1. Average concentration of air pollutants throughout the year from air observation

Year	SO_2 (ppb)	CO (ppb)	O_3 (ppb)	NO_2 (ppb)	PM_{10} (ppb)	$PM_{2.5}$ (ppb)
2018	3.9	470.7	26.7	21.3	41.6	23.4

2.1.2. 세분류 토지피복지도

환경부의 토지피복지도는 위성영상, 항공사진과 같은 영상자료를 기반으로 지구 표면의 지형지물을 일정 기준에 따라 분류한 주제도다. 이러한 토지피복지도는 대분류, 중분류, 세분류로 구분되는데 세분류 토지피복지도는 해상도 1 m 급으로 지표면을 Fig. 1과 같이 41개 분류항목

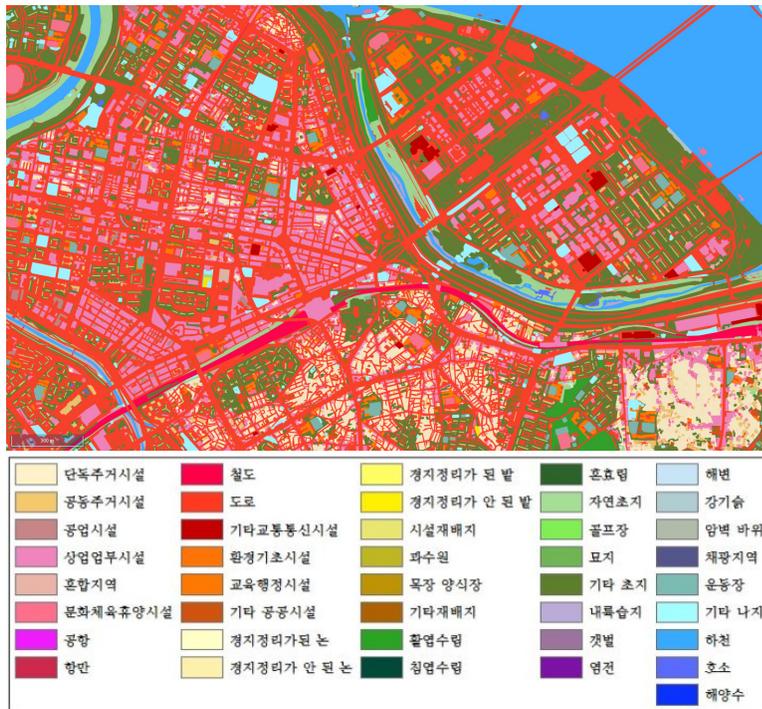


Fig. 1. Sub-divided land cover map¹⁾

으로 구분하고 있으며(Oh et al., 2016), 2019년부터 전국을 대상으로 매년 갱신하여 제공하고 있다. 그리고 우리나라 세분류 토지피복지도는 토지의 피복뿐만 아니라 토지이용의 개념까지 포함하여 토지피복 클래스를 구분하고 있어, 본 연구에 활용하기 적합한 자료라고 판단했다.

2.1.3. NDVI 구축

정규 식생 지수(NDVI)는 녹색 식생의 식생 활력을 정량화하여 값으로 산출한 것이며, 식생의 상대적 분포량과 활동성을 나타내는 대표적인 식생 지표이다(Deardorff, 1978). 이러한 NDVI는 식 (1)을 통하여 산출된다.

$$NDVI = \frac{NIR - red}{NIR + red} \quad (1)$$

여기서 NIR과 red는 각각 위성영상에서의 적외파장대와 가시파장대의 적색 밴드를 의미한다. NDVI를 구축하기 위해 전국적으로 구름이 없는 2019년 5월 23일에 촬영된 Sentinel-2A 영상을 활용했다. Sentinel-2A는 유럽우주기구

(ESA: European Space Agency)의 코페르니쿠스 프로그램의 일환으로 2015년 발사된 광학 영상 위성이다. 본 위성영상은 25 km의 트랙을 따라서 촬영하며, 100 km 단위의 타일로 제공되기 때문에 동일시기의 한반도 전체에 대한 영상을 신속하게 얻을 수 있고, 또한 식생을 보다 면밀히 분석할 수 있는 Vegetation Red Edge 밴드 4개와 수증기와 구름, 해안과 에어로졸을 관측할 수 있는 4개의 밴드 정보를 제공하고 있다. 공간해상도는 가시광선과 근적외선 영역이 10 m로 정밀하다(Jung et al., 2016). NDVI는 1에 가까울수록 식생의 활력이 증가함을 나타내고, 음수값은 나지 및 수계를 의미한다.

2.2. 연구 방법

에어코리아에서 제공하는 2018년의 도시대기 측정망의 대기질 정보 중 75% 이상 유효하게 나타나는 전국의 443개 도시대기 측정망의 $PM_{2.5}$, PM_{10} , O_3 , NO_2 , CO , SO_2 의 연간 평균 대기질을 수집하였다. 이러한 443개의 도시대기 측정망마다 Fig. 2와 같이 측정망을 중심으로 500 m부터 5,000 m까지 버퍼를 설정하고, 해당 공간 내 포함되는 토지

1) 인용문헌에서 국문으로 표기된 내용을 참조하여 작성한 것으로, 지칭하는 명칭의 명확한 외국어명이 공지된 바가 없으므로, 정확한 의미 전달을 위하여 국문으로 표기함.

피복 객체들의 면적과, 녹지공간의 정규 식생 지수들에서 녹지 공간의 면적을 나눈 값을 계산 및 추출했으며, 이때 자동화된 분석을 위해 오픈 소스 기반의 공간프로그램의 함수를 활용했다. 이렇게 도출된 정형데이터를 바탕으로 각각의 대기질과 토지피복, 녹지공간의 정규 식생 지수와 녹지공간의 면적을 나눈 원단위 값과의 다중 회귀 분석을 수행했다. 다중 회귀 분석 결과 O_3 , NO_2 의 수정된 R^2 값이 다른 대기질 항목에 비해 비교적 설명력이 높게 나타났으며, O_3 , NO_2 는 4,500 m와 5,000 m까지 수정된 R^2 값이 증가하다가 정체하는 구간이 나타나는 추세를 보였다. 이에 본 연구에서는 토지피복과 녹지공간이 대기질에 미치는 영향을 분석하기 위해 대기 측정망에서 5,000 m 버퍼 공간에 포함된 세분류 토지피복과 녹지지역의 정규 식생 지수들과 O_3 , NO_2 의 대기질과의 상관분석을 수행하고, 다중 회귀 분석을 수행하여 분석 결과 도출된 계수를 이용하여 토지이용에 따른 대기질 예측 모델을 제시하고자 했다.



Fig. 2. Buffer range of 500 m interval at the air observation

3. 결과 및 고찰

3.1. 측정지점별 토지이용 현황

전국의 443개 도시대기 측정망을 기준으로 반경 500 m

를 기준으로 500 m씩 거리를 증가시키면서 버퍼공간 안에 포함된 세분류 토지피복지도의 토지피복 별 면적 현황을 살펴보았으며, 443개의 도시대기 측정망 기준으로 버퍼 공간 내 1% 이상 차지하고 있는 대표 토지피복 별 면적 현황은 Table 2와 같다.

토지피복 별 면적 현황을 살펴보면 500 m 버퍼였을 때는 단독주거, 공동주거, 공업, 상업, 도로와 같은 시가지화조 지역의 토지피복의 면적 비율이 컸으며, 버퍼 거리가 500 m에서 멀어질수록 농경지와 산림, 기타초지, 습지, 하천, 해양수 등 비 시가지 건조지역의 면적 비율이 높아짐을 알 수 있었다.

3.2. 측정지점별 토지이용과 대기 오염물질농도와의 다중 회귀 분석

SO_2 , CO , O_3 , NO_2 , PM_{10} , $PM_{2.5}$ 의 대기 오염물질의 농도와 500 m부터 5,000 m까지 500미터씩 증가하며 계산한 버퍼 공간 내에 포함된 대표 토지피복 유형(Table 2) 18개의 세분류 토지피복지도의 피복유형별 면적과, 녹지공간의 정규식생지수 전체 합에서 녹지공간의 면적을 나눈 원단위 값을 이용하여 다중 회귀 분석을 수행했다. 이때 녹지공간은 농경지, 산림, 초지를 포함하였으며, 분석은 500 m부터 500 m씩 거리를 증가시키면서 각각의 대기 오염 물질 농도를 종속변수로 설정하여 반복적으로 다중 회귀 분석을 수행했다. 이때 VIF가 10보다 큰 독립변수들은 다중공선성이 나타났다고 판단하여 모델에서 삭제하여, 다중 회귀 분석을 수행하였다.

다중 회귀 분석 결과 500 m부터 5,000 m까지 대체적으로 R^2 와 수정된(Table 3에서 Adj로 표기) R^2 값은 증가하였다. SO_2 은 500 m일 때 0.174로 가장 낮게 나타났으며, 2000 m 버퍼일 때 0.282로 가장 높게 나타났다. CO 는 500 m일 때 0.174로 가장 낮게 나타났으며, 2,000 m 버퍼일 때 0.282로 가장 높게 나타났다. O_3 는 500 m일 때 0.376로 가장 낮게 나타났고, 4,500 m와 5,000 m까지 거의 동일한 설명력을 가질 정도로 수정된 R^2 값이 증가하였다. NO_2 은 500 m일 때 0.447로 가장 낮게 나타났으며, 4,500 m와 5,000 m가 거의 동일한 수정된 R^2 값이 나타났고, 4,500 m일 때 가장 높은 수정된 R^2 값이 나타났다. PM_{10} 은 500 m일 때 0.117로 가장 낮게 나타났으며, 2500 m 버퍼일 때 0.254까지 증가했다가 이후 버퍼 거리에서는 수정된 R^2 값이 다시 낮아졌다. 마지막으로 $PM_{2.5}$ 는 500 m

일 때 0.042로 가장 낮게 나타났으며, 2,500 m 버퍼일 때 0.295까지 증가했다가 이후 버퍼 거리에서는 수정된 R^2 값이 조금 낮아졌지만 비슷한 수준을 유지했다.

3.3. 토지이용과 O_3 , NO_2 의 농도와의 상관성 분석 결과

Table 2와 같이 토지피복(토지이용)과 대기오염물질간의 관계에 대해 높은 설명력을 보인 O_3 와 NO_2 를 선정하였으며, 4,500 m와 5,000 m까지 수정된 R^2 값이 높은 값을 보여주었다. 따라서 본 연구에서는 5,000 m를 기준으로 O_3 와 NO_2 를 선정하여 토지피복 및 토지이용과 대기오염물질 농도와의 관계를 파악하고자 하였다. 이에 다중공선성이 나타나지 않는 토지피복 인자들과 O_3 , NO_2 의 대기질과 토지피복 및 녹지공간의 NDVI 값과의 상관관계를 분석했으며 Table 4와 같은 결과를 얻었다.

NO_2 는 단독주거(111)와 높은 상관성을 나타내었으며, 논(211, 212), 밭(222), 과수원(241), 침엽수림(321), 혼효림(331), 하천(711)과 녹지공간의 정규식생지수(NDVI)

에서 녹지공간의 면적(Green)을 나눈 값과는 높은 음의 상관성을 나타내었다. 다만 활엽수림(331)은 같은 산림이지만 상관성이 낮게 나타나는 결과가 나타났다. O_3 결과를 살펴보면 단독주거(111), 기타초지(423)에서 음의 상관관계가 크게 나타났으며, 활엽수림과 혼효림, 녹지공간의 정규식생지수(NDVI)에서 녹지공간의 면적(Green)을 나눈 값에서 양의 상관관계가 나타났다. 그리고 해양수(721) 등이 양의 상관관계가 크게 나타났다.

3.4. 토지이용과 O_3 , NO_2 의 농도 간의 다중 회귀 분석 결과

NO_2 , O_3 의 오염물질 농도와 토지피복 및 녹지공간의 NDVI / 녹지공간의 면적 값과의 다중 회귀 분석을 수행했으며 Table 5와 Table 6의 같은 결과를 얻었다. NO_2 , O_3 와 토지이용/피복과의 다중 회귀 분석을 살펴보면 최종 모델에는 다중공선성에 해당하는 공동주거시설(112), 상업시설(131), 도로(154) 변수를 제외하고 단독주거

Table 2. Status of representative land cover type by distance from the measurement

		Single housings 111	Apartment housings 112	Industrial facilities 121	Commercial and office buildings 131	Roads 154	Consolidated paddy field 211	Paddy field without consolidation 212	Upland without consolidation 222	Orchards 241
500 m	Area(km ²)	27.07	12.72	8.63	34.95	109.55	6.73	5.32	15.95	1.90
	Ratio(%)	7.83	3.68	2.50	10.11	31.70	1.95	1.54	4.62	0.55
1,000 m	Area(km ²)	88.52	44.35	35.18	106.13	378.44	39.78	27.55	68.76	10.42
	Ratio(%)	6.40	3.21	2.55	7.68	27.38	2.88	1.99	4.97	0.75
1,500 m	Area(km ²)	258.73	137.89	120.19	298.41	1200.99	205.64	133.79	293.63	53.27
	Ratio(%)	4.68	2.49	2.17	5.40	21.73	3.72	2.42	5.31	0.96
2,000 m	Area(km ²)	258.73	137.89	120.19	298.41	1200.99	205.64	133.79	293.63	53.27
	Ratio(%)	4.68	2.49	2.17	5.40	21.73	3.72	2.42	5.31	0.96
2,500 m	Area(km ²)	361.80	194.72	175.16	411.08	1719.33	339.50	218.14	458.13	91.85
	Ratio(%)	4.19	2.26	2.03	4.76	19.93	3.93	2.53	5.31	1.06
3,000 m	Area(km ²)	474.83	259.19	237.82	538.45	2308.02	510.72	322.07	655.04	140.68
	Ratio(%)	3.83	2.09	1.92	4.34	18.60	4.12	2.60	5.28	1.13
3,500 m	Area(km ²)	599.20	328.86	309.32	678.12	2958.48	713.97	448.14	888.56	199.07
	Ratio(%)	3.55	1.95	1.83	4.02	17.54	4.23	2.66	5.27	1.18
4,000 m	Area(km ²)	736.26	405.91	380.94	831.87	3672.13	959.08	595.68	1159.20	264.67
	Ratio(%)	3.35	1.85	1.73	3.78	16.70	4.36	2.71	5.27	1.20
4,500 m	Area(km ²)	886.68	489.88	456.04	993.00	4444.33	1238.61	762.77	1461.46	335.45
	Ratio(%)	3.19	1.76	1.64	3.57	16.00	4.46	2.75	5.26	1.21
5,000 m	Area(km ²)	1044.28	581.42	534.21	1165.03	5272.69	1558.09	942.92	1791.89	410.33
	Ratio(%)	3.05	1.70	1.56	3.40	15.40	4.55	2.75	5.23	1.20

Table 2. Status of representative land cover type by distance from the measurement (Cont.)

		Deciduous forests 311	Coniferous forests 321	Mixed forests 331	Other grasslands 423	Inland wetlands 511	Tidal flats 521	Other artificial barrens 623	Rivers 711	Marine water 721
500 m	Area(km ²)	13.56	12.73	5.36	42.48	2.61	0.84	13.71	3.78	2.31
	Ratio(%)	3.92	3.68	1.55	12.29	0.75	0.24	3.97	1.09	0.67
1,000 m	Area(km ²)	86.61	81.07	29.81	171.27	14.70	4.98	56.62	21.11	16.97
	Ratio(%)	6.27	5.87	2.16	12.39	1.06	0.36	4.10	1.53	1.23
1,500 m	Area(km ²)	553.58	493.61	176.59	641.58	62.65	37.33	236.53	99.91	129.74
	Ratio(%)	10.02	8.93	3.19	11.61	1.13	0.68	4.28	1.81	2.35
2,000 m	Area(km ²)	553.58	493.61	176.59	641.58	62.65	37.33	236.53	99.91	129.74
	Ratio(%)	10.02	8.93	3.19	11.61	1.13	0.68	4.28	1.81	2.35
2,500 m	Area(km ²)	987.01	847.61	307.14	973.23	97.74	67.81	367.22	167.64	236.22
	Ratio(%)	11.44	9.82	3.56	11.28	1.13	0.79	4.26	1.94	2.74
3,000 m	Area(km ²)	1555.42	1291.40	485.84	1362.93	140.22	108.43	521.60	247.79	377.91
	Ratio(%)	12.53	10.41	3.92	10.98	1.13	0.87	4.20	2.00	3.05
3,500 m	Area(km ²)	2274.84	1824.00	705.38	1806.63	192.69	166.16	698.03	340.54	547.71
	Ratio(%)	13.49	10.82	4.18	10.71	1.14	0.99	4.14	2.02	3.25
4,000 m	Area(km ²)	3145.97	2453.89	958.08	2304.32	254.53	237.84	891.63	448.41	755.43
	Ratio(%)	14.31	11.16	4.36	10.48	1.16	1.08	4.05	2.04	3.44
4,500 m	Area(km ²)	4157.95	3181.03	1249.03	2866.57	325.92	324.00	1107.93	571.63	998.15
	Ratio(%)	14.97	11.45	4.50	10.32	1.17	1.17	3.99	2.06	3.59
5,000 m	Area(km ²)	5328.63	4001.17	1577.28	3483.90	408.95	420.80	1347.83	707.37	1288.18
	Ratio(%)	15.56	11.69	4.61	10.18	1.19	1.23	3.94	2.07	3.76

(111), 공업(121), 경지정리가 된 논(211), 경지정리가 안 된 논(212), 경지정리가 된 밭(222), 과수원(241), 활엽수림(311), 침엽수림(321), 혼효림(331), 기타초지(423), 내륙습지(511), 갯벌(521), 기타나지(623), 하천(711), 해양수(721), 녹지지역의 NDVI의 전체 합에서 녹지지역의 면적을 나눈 원단위 값을 이용하여 모델을 구성했다.

NO_2 의 대기오염물질 농도는 Table 5와 같이 계수가 양수인 단독주거와 기타 나지는 면적이 늘어날수록 NO_2 의 농도가 증가하고, 계수가 음수인 논, 밭, 산림, 기타초지의 면적이 늘어나고, NDVI의 원단위 값이 커질수록 NO_2 의 농도가 감소하는 것으로 예측되었다.

O_3 의 대기오염물질 농도는 Table 6과 같이 계수가 음수인 단독주거와 기타초지, 기타나지, 하천의 면적이 늘어날수록 O_3 의 농도가 감소하고, 계수가 양수인 논, 밭, 산림들의 면적이 늘어나고, NDVI의 원단위 값이 커질수록 O_3 의 농도가 커지는 것으로 예측되었다.

3.5. O_3 , NO_2 의 농도 예측식

토지피복(토지이용)과 NO_2 와 O_3 의 농도 간 다중 회귀 분석 결과 다음과 같은 NO_2 와 O_3 의 농도 예측식을 얻었다. NO_2 예측식을 살펴보면 NO_2 의 농도 예측치는 5,000 m 버퍼 공간 내에 포함된 토지피복 유형 중 단독주거 면적과 기타나지의 면적이 증가할수록 NO_2 의 농도는 증가하며, 이때 단독주거 면적보다 기타나지의 면적이 NO_2 의 농도에 더 영향을 미침을 예측식을 통해 추론할 수 있다. 또한 같은 산림이라 하더라도 혼효림 > 침엽수림 > 활엽수림 순으로 NO_2 의 농도를 저감하는데 더 영향을 미치고, 경지정리가 된 논, 경지정리가 된 밭, 과수원, 내륙습지, 해양수 등도 NO_2 농도를 저감하는데 도움이 될 것으로 예측되었다. NO_2 예측식의 R^2 은 0.723, 수정된 R^2 은 0.684로 설명력이 68.4% 있다고 해석되었다.

Table 3. R² and adjusted R² of multiple regression analysis by distance from the measurement

		SO ₂	CO	O ₃	NO ₂	PM ₁₀	PM _{2.5}
500 m	R ²	0.249	0.264	0.448	0.511	0.218	0.167
	Adj. R ²	0.174	0.168	0.376	0.447	0.117	0.042
1,000 m	R ²	0.291	0.284	0.535	0.602	0.271	0.264
	Adj. R ²	0.216	0.188	0.473	0.549	0.175	0.151
1,500 m	R ²	0.332	0.295	0.562	0.665	0.329	0.349
	Adj. R ²	0.260	0.195	0.501	0.618	0.235	0.243
2,000 m	R ²	0.352	0.316	0.583	0.683	0.342	0.389
	Adj. R ²	0.282	0.218	0.524	0.639	0.250	0.289
2,500 m	R ²	0.291	0.338	0.586	0.708	0.346	0.394
	Adj. R ²	0.216	0.244	0.528	0.667	0.254	0.295
3,000 m	R ²	0.338	0.351	0.595	0.712	0.338	0.381
	Adj. R ²	0.267	0.258	0.539	0.671	0.245	0.280
3,500 m	R ²	0.335	0.356	0.604	0.716	0.332	0.375
	Adj. R ²	0.264	0.264	0.548	0.676	0.239	0.274
4,000 m	R ²	0.328	0.360	0.609	0.721	0.322	0.377
	Adj. R ²	0.256	0.269	0.555	0.681	0.227	0.276
4,500 m	R ²	0.325	0.371	0.613	0.724	0.318	0.380
	Adj. R ²	0.252	0.281	0.559	0.685	0.223	0.279
5,000 m	R ²	0.320	0.387	0.614	0.723	0.326	0.380
	Adj. R ²	0.245	0.300	0.560	0.684	0.232	0.279

NO₂ = 2.171E-008 X 단독주거(111) -4.300E-007 X 공업(121) -5.536E-007 X 경지정리가 된 논(211) -2.824E-007 X 경지정리가 안된 논(212) -5.307E-007 X 경지정리가 된 밭(222) -9.470E-007 X 과수원(241) -1.463E-007 X 활엽수림(311) -5.875E-007 X 침엽수림(321) -7.382E-007 X 혼효림(331) -1.313E-007 X 기타초지(423) -6.469E-007 X 내륙습지(511) -2.714E-007 X 갯벌(521) + 3.886E-007 X 기타나지(623) -2.262E-007 X 하천(711) -5.061E-007 X 해양수(721) -306.287 X GreenNDVI/GreenArea + 39.875

O₃ 예측식을 살펴보면 O₃의 농도 예측치는 5,000 m 버퍼 공간 내에 포함된 토지피복 유형 중 단독주거, 기타초지, 기타나지, 하천의 면적이 증가할수록 O₃의 농도는 감소하는 것으로 예측되었으며, 이때 혼효림 > 침엽수림 > 활엽수림 순으로 O₃의 농도에 더 영향을 미치는 것으로 예측식을 통해 추론할 수 있다. O₃ 예측식의 R²은 0.614 수정된 R²은 0.560로 설명력이 56.0% 있다고 해석되었다.

Table 4. Correlation coefficient from air pollution concentration, land cover and NDVI of green space

	Single housings 111	Industrial facilities 121	Consolidated paddy field 211	Paddy field without consolidation 212	Upland without consolidation 222	Orchards 241	Deciduous forests 311	Coniferous forests 321	Mixed forests 331
NO ₂	0.48***	0.14**	-0.32***	-0.32***	-0.37***	-0.28***	-0.04	-0.53***	-0.33***
O ₃	-0.4***	-0.08	0.17***	0.18***	0.24***	0.21***	0	0.38***	0.27***
	Other grasslands 423	Inland wetlands 511	Tidal flats 521	Other artificial barrens 623	Rivers 711	Marine water 721		NDVI/ Green	
NO ₂	0.26***	-0.23***	-0.15***	0.21***	0.23***	-0.27***		-0.335**	
O ₃	-0.38***	0.14***	0.22***	-0.22***	-0.32***	0.45***		0.298**	

*** ; P<0.01, ** ; P<0.05, * ; P<0.1

Table 5. The results of multiple regression analysis of NO_2

Model	Unstandardized coefficients		Standardized coefficients	t	P-value	Multicollinearity	
	B	STDV.	Beta			Tolerance	VIF
(Intercept)	39.875	4.038		9.876	.000		
Single housings(111)	2.171E-008	.000	.006	.089	.929	.249	4.008
Industrial facilities(121)	-4.300E-007	.000	-.087	-1.984	.048	.608	1.644
Consolidated paddy field(211)	-5.536E-007	.000	-.293	-5.394	.000	.392	2.549
Paddy field without consolidation(212)	-2.824E-007	.000	-.080	-1.543	.124	.434	2.302
Upland without consolidation(222)	-5.307E-007	.000	-.170	-3.244	.001	.420	2.383
Orchards(241)	-9.470E-007	.000	-.192	-5.184	.000	.843	1.186
Deciduous forests(311)	-1.463E-007	.000	-.140	-2.118	.035	.263	3.796
Coniferous forests(321)	-5.875E-007	.000	-.392	-8.417	.000	.534	1.874
Mixed forests(331)	-7.382E-007	.000	-.201	-4.505	.000	.583	1.714
Other grasslands(423)	-1.313E-007	.000	-.041	-.749	.455	.378	2.649
Inland wetlands(511)	-6.469E-007	.000	-.081	-2.104	.036	.779	1.283
Tidal flats(521)	-2.714E-007	.000	-.087	-2.097	.037	.668	1.498
Other artificial barrens(623)	3.886E-007	.000	.074	1.655	.099	.572	1.749
Rivers(711)	-2.262E-007	.000	-.058	-1.393	.164	.657	1.522
Marine water(721)	-5.061E-007	.000	-.398	-6.251	.000	.285	3.509
GreenNDVI/GreenArea	-306.287	268.010	-.057	-1.143	.254	.458	2.184

Table 6. The results of multiple regression analysis of O_3

Model	Unstandardized coefficients		Standardized coefficients	t	P-value	Multicollinearity	
	B	STDV.	Beta			Tolerance	VIF
(Intercept)	23.681	2.818		8.402	.000		
Single housings(111)	-2.440E-007	.000	-.109	-1.434	.153	.247	4.047
Industrial facilities(121)	1.511E-007	.000	.048	1.000	.318	.608	1.645
Consolidated paddy field(211)	1.751E-007	.000	.159	2.594	.010	.380	2.633
Paddy field without consolidation(212)	8.966E-008	.000	.041	.705	.481	.430	2.325
Upland without consolidation(222)	1.865E-007	.000	.096	1.639	.102	.417	2.395
Orchards(241)	4.353E-007	.000	.143	3.466	.001	.845	1.183
Deciduous forests(311)	1.108E-008	.000	.017	.230	.818	.259	3.856
Coniferous forests(321)	2.096E-007	.000	.227	4.324	.000	.518	1.929
Mixed forests(331)	2.959E-007	.000	.131	2.589	.010	.563	1.776
Other grasslands(423)	-1.733E-007	.000	-.089	-1.442	.150	.376	2.657
Inland wetlands(511)	2.184E-007	.000	.044	1.014	.311	.775	1.290
Tidal flats(521)	1.356E-007	.000	.070	1.507	.133	.671	1.491
Other artificial barrens(623)	-3.201E-007	.000	-.099	-1.968	.050	.561	1.784
Rivers(711)	-1.889E-007	.000	-.078	-1.666	.097	.654	1.529
Marine water(721)	3.192E-007	.000	.401	5.672	.000	.286	3.492
GreenNDVI/GreenArea	97.885	186.048	.030	.526	.599	.453	2.206

$$O_3 = -2.440E-007 \times \text{단독주거}(111) + 1.511E-007 \times \text{공업}(121) + 1.751E-007 \times \text{경지정리가 된 논}(211) + 8.966E-008 \times \text{경지정리가 안된 논}(212) + 1.865E-007 \times \text{경지정리가 된 밭}(222) + 4.353E-007 \times \text{과수원}(241) + 1.108E-008 \times \text{활엽수림}(311) + 2.096E-007 \times \text{침엽수림}(321) + 2.959E-007 \times \text{혼효림}(331) - 1.733E-007 \times \text{기타초지}(423) + 2.184E-007 \times \text{내륙습지}(511) + 1.356E-007 \times \text{갯벌}(521) - 3.201E-007 \times \text{기타나지}(623) - 1.889E-007 \times \text{하천}(711) + 3.192E-007 \times \text{해양수}(721) + 97.885 \times \text{GreenNDVI/GreenArea} + 23.681$$

이러한 수식을 활용하여 측정망 인근 5,000 m 이내에 논, 밭, 산림지역이 개발지역으로 변경된다면 해당 모델의 예측식을 활용하여 NO_2 의 농도 증가를 추론할 수 있으며, O_3 의 농도 감소를 예측할 수 있을 것이며, 이러한 도시계획 단계에서의 도시의 토지이용 및 토지피복의 변화에 따른 대기질의 변화 예측 자료의 제공은 의사결정 단계에 큰 도움이 될 수 있으리라 판단된다.

4. 고찰 및 결론

본 연구는 도시대기 측정망을 중심으로 일정 버퍼공간 내 포함된 세분화된 토지피복이 대기오염물질 농도에 영향을 미치는지 분석했다는 점에서 기존의 연구와 차별화되었으며, 이러한 분석은 도시 공간 내 토지이용 및 토지피복을 고려하는 계획단계의 의사결정에 큰 도움을 줄 수 있다. 특히 특정 대기 오염물질이 영향을 미치는 거리와 버퍼공간과 대기 오염물질의 농도를 예측할 수 있는 토지피복 유형을 검토했다는 측면에서 중요한 의미가 있다.

도시대기 측정망을 중심으로 500 m에서 5,000 m까지 버퍼를 수행하고, 해당 버퍼공간 내 1% 이상 차지하는 대표 토지피복의 18개 유형과 도시 대기측정망에서 수집된 ($PM_{2.5}$, PM_{10} , O_3 , NO_2 , CO , SO_2)의 연간 평균 농도 값 사이의 다중 회귀 분석을 수행했다. 이때 설명력이 우수한 NO_2 , O_3 의 5,000 m를 기준으로 회귀분석을 수행하여 토지피복과 NO_2 , O_3 의 농도 값을 예측할 수 있는 모델을 구축했다. 모델의 구축 결과 NO_2 는 농경지, 산림, 초지 지역과 NDVI의 원단위 값과의 음의 상관관계가 나타났으며, 주거지역과 기타나지 지역에서 양의 상관관계가 나타났다. 즉 녹지공간이 나타나는 지역에서 NO_2 가 낮게 나타날 수 있음을 확인 할 수 있었다. 다만 O_3 의 경우는 녹지공간이 나타나는 논, 밭, 산림지역에서 높게 나타남을

확인할 수 있었다. 구축한 모델의 설명력은 NO_2 의 경우 68.4%의 설명력을 나타냈으며, O_3 의 56.0%의 설명력을 나타냈다.

본 연구에서는 녹지공간의 구성에 따라 NO_2 의 농도는 감소할 것이며, O_3 의 농도가 증가할 것으로 예측되었으나, 침엽수림의 경우 설명력이 부족하게 나타났으며, NO_2 의 농도와 관련이 높을 것 같은 시가화건조 지역 내 공동주거시설, 상업지역, 도로 등 많은 토지피복 유형들이 다중공선성이 나타남에 따라 분석 모델 구축에 활용하지 못했다. 그리고 수집된 $PM_{2.5}$, PM_{10} , O_3 , NO_2 , CO , SO_2 의 농도와 토지이용과의 다중 회귀 분석 결과 O_3 , NO_2 의 설명력은 높게 나타나지만 다른 대기 오염물질의 농도와 토지이용과의 관계는 설명력이 부족하게 나타났다. 향후 연구에서는 이러한 분석 결과가 나타난 원인에 대한 추가적인 분석이 필요할 것으로 판단된다. 풍향 및 풍속 등 오염물질의 확산 시 주된 영향을 주는 요인들을 포함하여 추가 분석할 필요가 있을 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서는 다중 회귀 분석을 통해 토지이용 및 NDVI의 원단위 값과 대기 오염물질 농도와의 관계를 파악하고 농도를 예측하는 모델을 구축하였으나 향후 연구에서는 최신 활발히 연구되고 있는 XAI (Explainable AI) 등 다양한 분석 기법의 적용이 필요하다고 판단된다.

사사

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원(과제번호 21UMRG-B158194-02)을 받아 한국환경연구원이 수행한 “온실가스 저감을 위한 국토도시공간 계획 및 관리기술 개발(2021-010(R))” 사업의 일부 내용을 발췌하여 논문화하였습니다.

References

B. Brunekreef, ST. Holgate. 2002. Air pollution and health. *Lancet* 360: 1233.

Heald CL, Spracklen DV. 2015. Land use change impacts on air quality and climate. *Chemical Reviews* 115(10): 4476-4496.

H. Liu, Y. Tian, Y. Cao, J. Song, C. Huang, X. Xiang, Li. Man, Hu Yonghua. 2018. Fine particulate air pollution and hospital admissions and readmissions for

- acute myocardial infarction in 26 Chinese cities. *Chemosphere* 192: 282-288.
- Joo HY, Kim SC. 2009. Impacts of Urban Green Spaces on Air Quality. *Korean Chemical Engineering Research* 47(3): 386-393.
- Kim GH, Kang SN, Han JY. 2019. Correlation Analysis of Environmental and Ecological Assessment Rating and Atmospheric Pollutant Concentration. *Journal of the Korean Cartographic Association* 20(1): 107-115.
- Li X, Zhou W, Ouyang Z, Xu W, Zheng H. 2012. Spatial pattern of greenspace affects land surface temperature: evidence from the heavily urbanized Beijing metropolitan area, China. *Landscape ecology* 27: 887-898.
- National Institute of Environmental Research. 2018. 「Annual report of air quality in Korea 2017」.
- Oh KY, Lee MJ, No WY. 2016. A Study on the Improvement of Sub-divided Land Cover Map Classification System -Based on the Land Cover Map by Ministry of Environment-. *Korean Journal of Remote Sensing* 32(2): 105-118.
- Sun L, Wei J, Duan D, Guo Y, Yang D, Jia C, Mi X. 2016. Impact of land-use and land-cover change on urban air quality in representative cities of China. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phy.* 142: 43-54.
- Yao L, Li T, Xu M, Xu Y. 2020. How the landscape features of urban green space impact seasonal land surface temperatures at a city-block-scale: An urban heat island study in Beijing, China. *Urban Forestry & Urban Greening* 52: 126-704.
- Zhang J, Wang Y, Li Y. A. 2006. C++ program for retrieving land surface temperature from the data of Landsat TM/ETM Band 6. *Computers & Geosciences* 32: 1796-1805.