도시공간구조가 지역의 대기오염에 미치는 영향

- 통계적 모델링과 도시개발 시나리오 분석 -

정민철(주저자), 김성환(공동저자,발표자)

목 차

I. 연구의 배경 및 목적
II. 선행연구 고찰
III. 연구모형 및 분석방법
IV. 분석결과
V. 결론



I 연구의 배경 및 목적

1 연구의 배경

도시의 성장

전세계적인 도시로의 집중 현상 → 경제활동, 현대적 편의성 등 인구 집중의 가속화 예상

1970년 (36.6%) → 1990년 (42.9%) → 2015년 (54.0%) → 2025년 (??.?%)

인구집중으로 인한 否的효과 발생

- 지속가능성이 미래의 패러다임으로 등장함에 따라 정책결정자들의 의견 수립에 영향을 미치게 됨
- 도시환경이 거주민들의 삶의 질과 직접적으로 연결된다는 측면에서 관심이 증대됨

대기환경에 대한 관심 증대

- 특히 이러한 관심은 대기환경에 집중됨
- 특별한 여과장치를 거치지 않고 다양한 오염물질이 배출되어 발생하게 됨
- 오염 범위의 행정적 경계가 존재하지 않음

도시로의 인구집중은 다양한 부적효과를 발생시켰으며 특히 대기오염의 특성상 대기환경에 관심이 집중되고 있음

2 연구의 목적

연구의 주요 목적

미세먼지의 발생 요인

〈인공 발생〉

- 자동차 배기가스
- 주거, 상업 난방
- 공장
- 비산먼지
- 산불
- 폐기물 처리

〈외적 요인〉

- 동아시아發 미세먼지

〈자연 발생〉

- 흙먼지
- 꽃가루

미세먼지의 영향

〈미세먼지가 건강에 미치는 영향〉

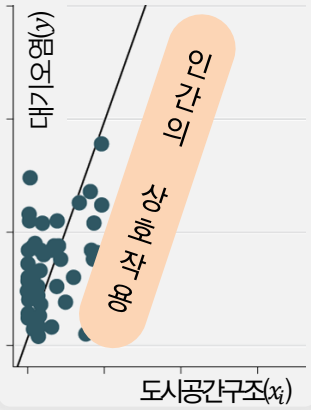


- 기관지 질환
- 뇌 질환
- 눈, 코 질환
- 피부 질환

※ 미세먼지: 미세먼지는 PM-10과 PM-2.5를 합쳐서 일컬음.
다만, 본 연구에서는 PM-2.5 보다는 PM-10에 집중하여 연구함.

도시공간구조와의 관계 규명

도시건조환경 내에서 집중적으로 발생



- 미세먼지는 인간과 주변환경과의 상호작용 결과 발생하는 것으로 도시와 농촌지역 중 인간의 활동이 활발한 도시에 집중
- 미세먼지의 발생은 자연적인 이유도 있으나 그 비율은 적음
- 한국은 2015년 기준 도시지역의 인구비율이 91.8%로 조사되어 이러한 미세먼지의 발생에 국민의 건강이 위협받을 수 있음

II 선행연구 고찰

1 미세먼지의 영향 및 현황

문제도출

미세먼지가 건강에 미치는 영향

Seo et al.(2016)

- 서울을 대상으로 PM-10과 알레르기성 질환과의 공간적 관계를 분석
- 특정 지역을 중심으로 미세먼지와 아토피 피부염 사이에 양의 인과관계가 존재

Brook et al.(2016)

- PM-2.5와 심혈관성 질환 사이에 인과적 관계가 존재함
- PM-2.5에 장·단기간 노출 시 심혈관성 질환이 유발될 수 있음

미세먼지가 인간의 건강에 부정적 영향 ↓ 도시지역 미세먼지에 대한 정교한 현황파악 필요

현황파악

특정 지역 및 계절의 미세먼지 추이

장영기(2016)

- 한국의 대도시를 대상으로 시간의 흐름에 따른 미세먼지 농도 변화를 분석
- 서울의 미세먼지 수준이 대기환경 기준을 초과하고 있음

Chai et al.(2014), Xu et al.(2017)

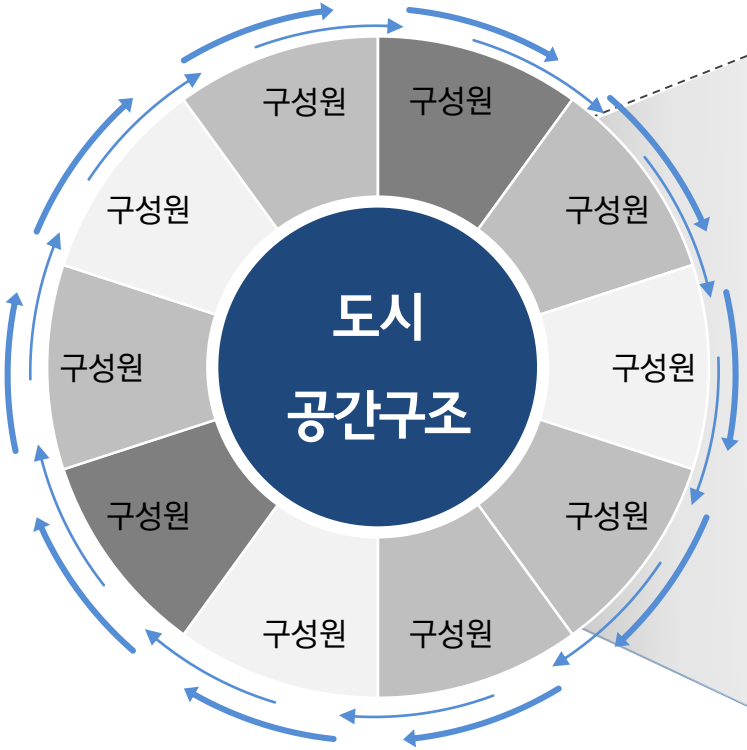
- 중국의 도시들은 공기 중 PM-10과 PM-2.5가 차지하는 비중이 높음
- 이는 WHO에서 제시한 적정기준치를 초과하는 수준임

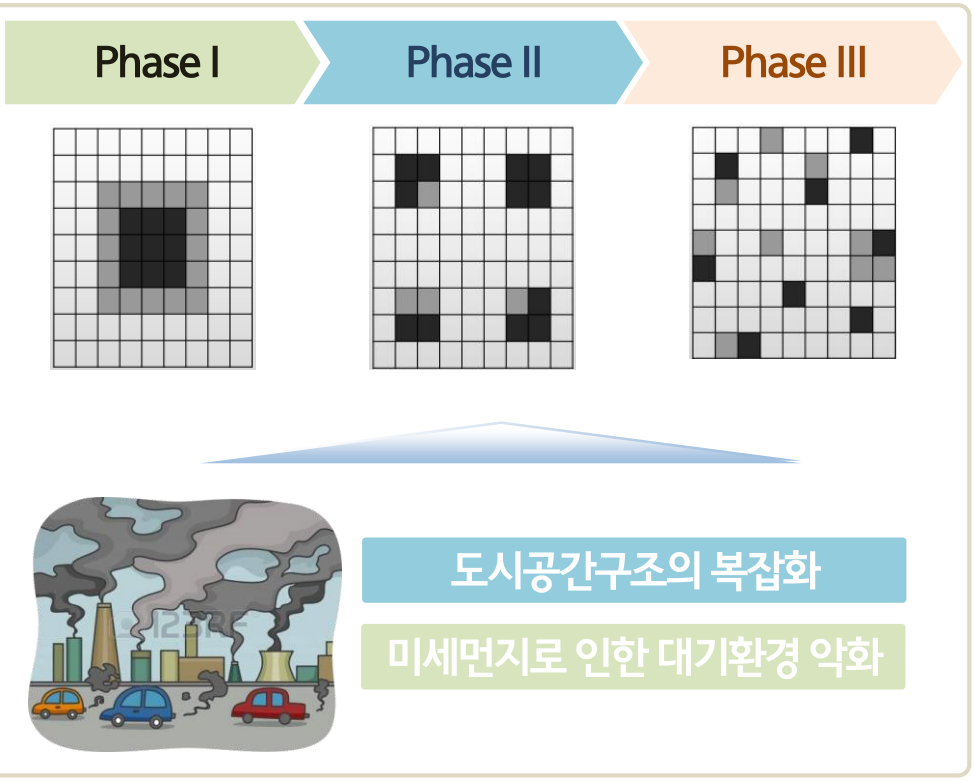
미세먼지는 기본적으로 부유물질이므로 계절 및 기후 관련 변수를 배제할 수 없음

보다 정밀한 미세먼지 분석을 위하여 특정 계절 및 특정 풍향 등을 활용한 다수의 연구가 진행중

(Harrison et al., 1997; Noble et al., 2003; Slini et al., 2006; Liu et al., 2015; Jang, 2016; 박순애.신현재, 2017)

2 도시공간구조와 미세먼지와의 관계





상관관계

- 도시 내 특정 용도지역과 미세먼지의 관계성에 초점을 맞춤
- Hussein et al.(2005): 도로 및 교통 상황과 미세먼지 관계
- Sánchez-Rodas et al.(2007): 산업화 지역에서의 PM-10분석
- Freiman et al.(2006): 녹지지대에서의 미세먼지 농도

한계 : 단순히 상관성 분석에 집중하여 요인별 영향과 크기를 산출하지 못하여 정책적으로 활용하기 어려움

인과관계

- Schweitzer and Zhou(2010) 등: 미국의 대도시권에서 스프롤 변수가 미세먼지에 미치는 영향
- Rodríguez et al.(2016): 토지피복, 경제적, 인구적, 기후적 변수를 모형에 투입하여 PM-10과의 관계 분석
- Clark et al.(2011): 도시형태, 도로밀도, 직주불일치, 인구밀도 및 인구 집중과 PM-2.5와의 관계 분석

한계 : 관련 연구가 부족 (Bereitschaft and Debbage, 2013)

3 선행연구의 활용 및 본 연구의 차별성

변수 측면

미세먼지의 영향 및 현황

- 도시 및 지역을 기본 단위로 설정함
- 계절 및 기후관련 변수를 통제변수로 도입함

도시공간구조와 미세먼지와의 관계

- 토지 이용을 개념적으로 조작화 한 후 서울의 도시공간 특성을 반영할 수 있도록 변수를 구성하여 분석에 활용하였음

모형 측면

토지이용회귀모형, 인공신경망 모델, 시나리오 분석을 통한 통합적 분석 수행

Ⅰ.	**토지이용회귀모형※**
Ⅱ.	**인공신경망 모델 활용**
Ⅲ.	**시나리오 분석**

※ 도시의 물리적 구조를 나타내는 변수와 도시의 속성을 조작적으로 활용한 분석을 위해 토지이용회귀모형 도입

기존연구들에서 활용된 유의한 변수를 활용하며
{① 토지이용회귀모형과 ② 인공신경망 모델 구축}→③시나리오 분석을 수행하여 정책의사결정에 기여

III 연구모형 및 분석방법

1 연구의 범위

시간적 범위

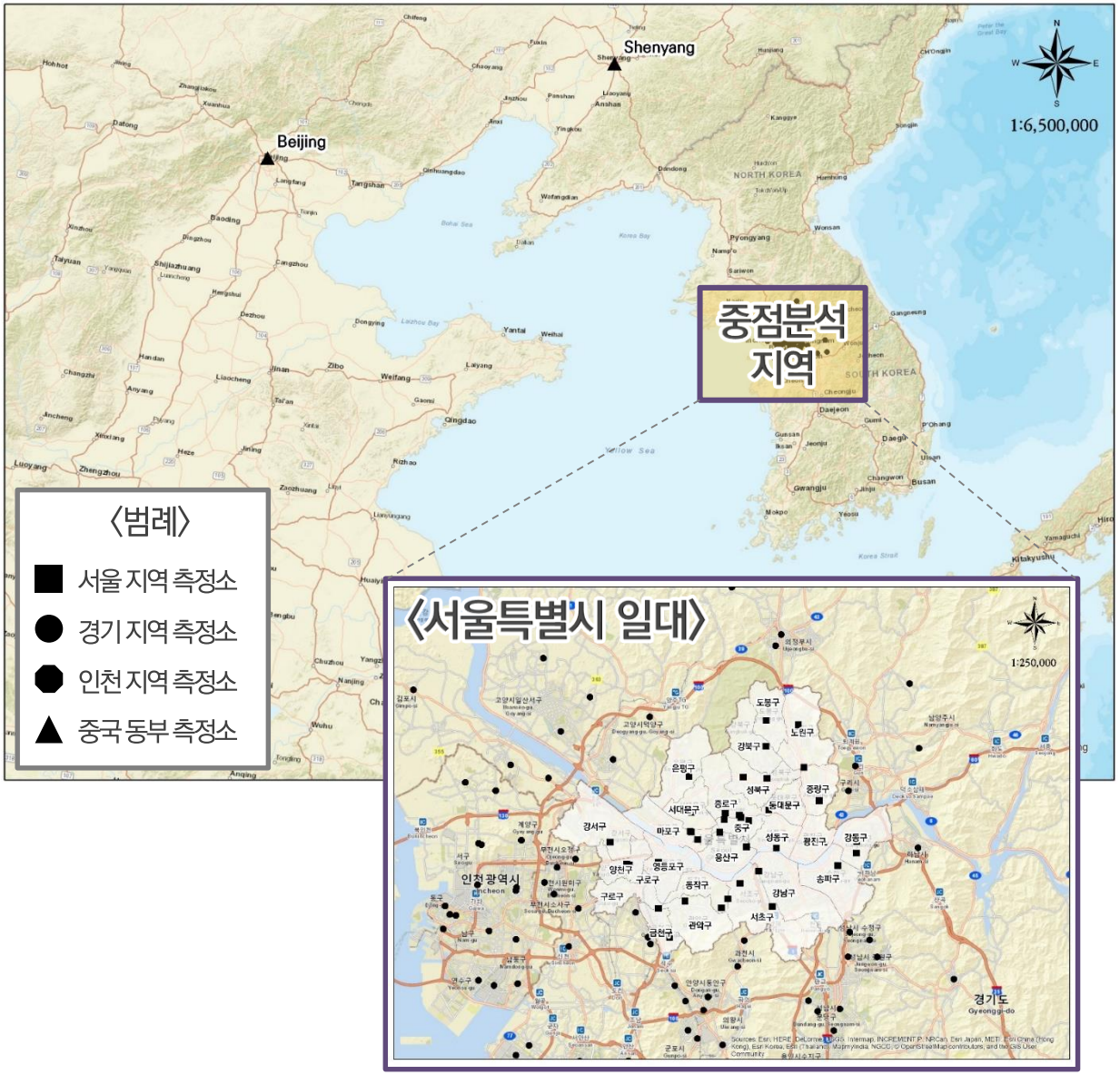
- 2010년 – 2016년
- 월별 혹은 분기별 데이터 활용

공간적 범위(중점분석지역)

- 서울특별시(25개 구) 및 인접 시군
- 외삽법의 한계를 극복
- 모형 및 시나리오 분석의 공간적 대상

배경 데이터 수집 범위

- 공간적 범위: **서울특별시**(도시대기측정망 26, 도로변대기측정망 16), **인천광역시**(도시대기측정망 16, 도로변대기측정망 3), **경기도**(도시대기측정망 76, 도로변대기측정망 7), **중국 동부**(베이징, 상하이), **서해 해상**



2 연구 질문 설정

Strategy Cascade

1 요인분석	• 서울을 포함한 그 인근 지역의 도시공간구조 중 어떠한 요소가 대기오염에 영향을 미치며 그 영향력은 어느 정도인가? • 해외에서 기인한 월경성 대기오염물질에 의한 영향은 없는가?	토지이용회귀 모형 활용
2 방법론의 정교화	• 서울과 인근지역의 도시공간구조와 대기오염의 관계를 가장 정확하게 모델링할 수 있는 방법론은 어떤 것인가?	인공신경망 모형 활용
3 의의 도출	• 대기오염으로 인한 피해를 줄이기 위한 도시계획의 수법은 압축도시인가? 혹은 도시확장인가?	시나리오 분석

3 연구방법 및 모형

Martins(2012), Cho(2014), Liu(2015), etc.

Geocoding, GIS, RDMBS, IDA

데이터 가공 → 데이터 전처리 및 이론기반 모델수립 (XLSX) → (공간)데이터베이스 생성

시나리오 분석 (압축개발 vs. 외연화)

01100
10110
11110
토지이용회귀모형
VS.
인공신경망모형

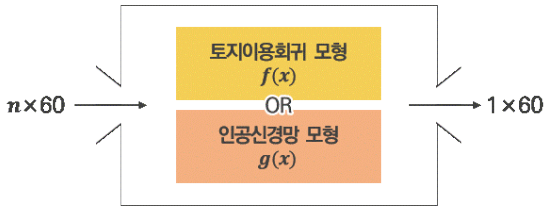
Multiple Regression

NNFitting, Parameters, Levenberg-Marquardt

모델 최적화를 위해 되먹임 기법 적용

〈시나리오 1 – 압축도시〉
- 2030 서울도시기본계획의 3도심을 중심으로 압축 개발 진행하는 것을 가정

〈시나리오 2 – 도시확장〉
- 현재 추세를 연장하여 탈서울화 현상이 지속



〈토지이용화귀모형〉

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \gamma_1 X_{pi} + \gamma_2 X_{p+1i} + \dots + \gamma_n X_{ni}$$

여기서 i는 도시공간구조 변수를 나타내며 $i = 1, 2, \dots, p-1$
한편 j는 기상 및 대기환경 관련 변수 $j = p, p+1, \dots, n(n-p$개)

〈인공신경망 모형〉

$$X_{k+1} = X_k - [J^T J + \mu I]^{-1} J^T e$$

- 여기서 J는 다변수 벡터 함수의 야코비 행렬, 는 e네트워크 오차의 벡터를 나타냄
- 위 식에서 확인할 수 있듯이 J로 표현된 야코비 행렬을 도입하여 헤시안 행렬을 계산하는 것보다 훨씬 연산이 간편

변수 설정 과정

선행연구 변수

〈도시공간구조변수〉
- 총인구, 가구, 사업체수, 필지 개수, 1인당 GDP, 고도, 기온, 소득 면적, 제조업생산지수, 주행거리 등

〈대기 및 기상 변수〉
- NO. Nox, PM-10. PM-2.5, 포름알데히드, 벤젠, 경유소비량, 중국 초미세먼지 농도 등

〈도시공간구조변수〉
- 인구수, 가구수, 사업체수, 주거면적, 공업 면적, 공원 면적, 교통량, 도로와의 거리, (도로와의 거리)^2

〈대기 및 기상 변수〉
- 기온, 강수량, 최대풍속방향, 최대 풍속, 일조시간, (t-12) PM-10, (t-24) PM-10 농도, 서해 풍향, 중국 동부 PM2.5

〈연구 가설 검정 변수〉
- 스프롤 지수

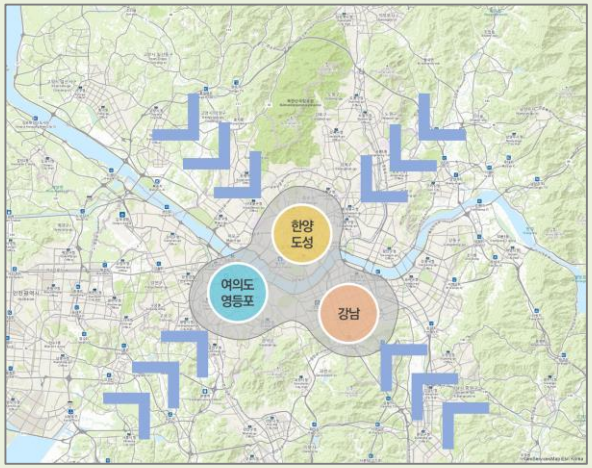
본 연구에서 활용한 변수

데이터의 설명 및 출처

데이터셋 명칭	데이터셋 설명	출처
사업체 통계 DB	· 서울시에서 매년 실시하는 사업체 조사의 주요 결과를 분석한 데이터베이스	서울시
건축물대장	· 각 건축물의 위치(지번), 구조, 용도 등 다양한 정보를 상세히 기록한 데이터	서울시
지점별일자별교통량	· 서울시내 143개 지점(2016년 기준)에서 자동으로 측정된 교통의 유입.유출량 데이터	서울시
1:25,000 수치지형도	· 지표 위의 지리적 사상들을 축약하여 표현한 지형도를 전산화하여 컴퓨팅 환경에 최적화 한 CAD 파일	국토지리정보원
연속지적도	· 전산화된 지적도 및 임야도의 도면상 경계점을 연결한 shp 파일	국토교통부
토지이용계획정보	· 필지별 지역.지구 등의 지정 여부와 행위제한 내용을 확인할 수 있는 정보	국토교통부
주민등록인구현황	· 매월 말일을 기준으로 주민등록 인구를 나타낸 지역별 데이터	행정안전부
대기환경정보	· 도시 대기 및 도로변대기센서를 통해 수집된 대기오염 데이터	서울시
기상관측정보	· ASOS와 AWS를 통해 수집된 데이터	서울시
풍력기상자원지도	· 정규 종관 관측망(GTS) 으로부터 입수된 데이터를 기반으로 1㎞×1㎞ 해상도의 풍력 기상자료 제공	국립기상과학원
GFS Analysis	· 전 지구를 28㎞ 그리드로 구분하여 각 셀에 대한 기온, 바람, 강수, 오존 농도 등을 예보	NCEP
Air Quality Data Files	· 주중 미국 영사관에서 측정된 PM-2.5의 농도 데이터를 제공	U.S. DOS

5 도시개발 시나리오 설정

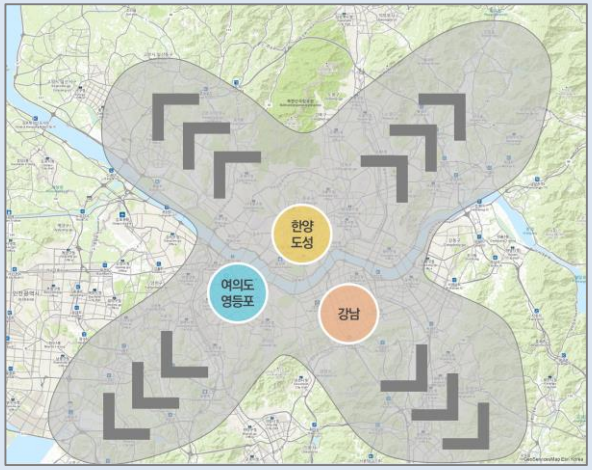
압축도시



〈기본 가정〉
- 「 2030 서울도시기본계획 」에서 제시한 3개의 도심(한양도성, 강남, 여의도·영등포)를 중심으로 압축적 개발이 진행되는 것을 가정함

〈시나리오에 따른 변수의 조작〉
- 먼저 사업체수와 주거면적, 공업면적의 경우 서울에서는 더욱 팽창할 공간이 없다는 점을 감안하여 유지
- 총인구, 가구, 공원면적, 도로와의 거리 등은 녹지 면적의 증가 등과 더불어 증가하는 것으로 가정
- 마지막으로 압축적으로 도시를 개발하면서 교통량은 감소하는 것으로 가정

도시확장



〈기본 가정〉
- 현재 추세 그대로 탈서울화 현상이 지속되는 것을 가정함

〈시나리오에 따른 변수의 조작〉
- 탈서울 현상이 가속화되더라도 서울시 주택보급율이 2015년 현재 여전히 100% 이하라는 점을 감안하여(국토교통부, 2017) 주거면적과 공업면적은 유지되는 것으로 가정
- 서울과 경기.인천권을 오가는 차량들이 많아지면서 교통량은 점점 증가할 것으로 가정하였음
- 그 외 서울의 사업체수, 총인구, 가구 등은 감소하는 시나리오를 구성

현재 시점으로부터 5년(60개월) 간 시나리오에 의거해 연구자가 의도적으로 변경시킨 검정데이터를 입력하여 시나리오 진행 예측 분포를 추정하기 위해 내삽법 중 공간통계학적 경향면을 보기에 가장 유리한 방법으로 알려진 크리깅(kriging)을 활용

IV 분석결과

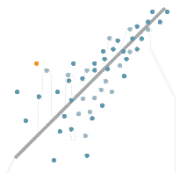
변수명		Model 1 종속변수: PM-10 (μg/m³) Coefficient	Model 2 종속변수: O³ (ppm) Coefficient	인공신경망 모델 투입 여부	비고
도시공간 구조변수	인구수	$3.27\times10^{-6***}$	$4.67\times10^{-7***}$	○	
	가구수	$1.91\times10^{-4**}$	$1.79\times10^{-6**}$	○	
	사업체수	7.31×10^{-5}	6.81×10^{-7}	×	
	주거면적	$6.53\times10^{-6*}$	2.94×10^{-6}	×	
	공업면적	$1.09\times10^{-6***}$	$1.76\times10^{-6***}$	○	
	공원면적	$-7.31\times10^{-6***}$	$-8.55\times10^{-6***}$	○	
	교통량	$2.69\times10^{-6**}$	$7.10\times10^{-6***}$	○	
	도로와의 거리	$1.29\times10^{-3**}$	$9.39\times10^{-4***}$	○	
	(도로와의 거리)²	$0.74\times10^{-5***}$	$1.47\times10^{-4**}$	○	
	스프롤 지수	$8.73\times10^{-7*}$	$6.57\times10^{-6*}$	○	
대기 및 기상변수	기온	$1.22\times10^{-1*}$	$2.01\times10^{-6***}$	○	
	강수량	$-6.24\times10^{-1***}$	$-2.24\times10^{-6**}$	○	
	서울 최대풍속방향 더미	$4.19\times10^{-1***}$	$-1.07\times10^{-6**}$	○	
	최대풍속	$-8.63\times10^{-4***}$	$-3.50\times10^{-4***}$	○	
	일조시간	1.60×10^{-6}	1.68×10^{-5}	×	
	(t-12)시간 PM-10 농도	$1.04\times10^{-1***}$	$6.53\times10^{-4*}$	○	
	(t-24)시간 PM-10 농도	$2.07\times10^{-2*}$	6.46×10^{-6}	○	
	서해지역 풍향 더미	$3.37\times10^{-1*}$	2.33×10^{-4}	×	서울특별시(2016)※3와 상반된 결과로, 추가 연구 시 보다 합리적인 변수 통제를 통해 개선 예정임
	서해지역 풍향 더미× 중국 동부 PM-2.5 농도	6.31×10^{-2}	4.14×10^{-6}	×	
Intercept		49.12	8.29×10^{-3}		
모형적합도		0.42	0.33		
RMSE		34.19	5.98×10^{-1}		

※ 주1: Model 1은 PM-10 농도를 종속변수로 둔 모델이고, Model 2는 오존 농도를 종속변수로 둔 모델임
※ 주2: 서해 지역 풍향 더미 변수는 서쪽에서 불어오는 바람인 경우 1, 나머지 풍향은 0으로 두었음
※ 주3: 초미세먼지(PM-2.5) 배출원 인벤토리 구축 및 상세모니터링 연구

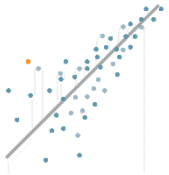
2 인공신경망 모델링 결과

LUR

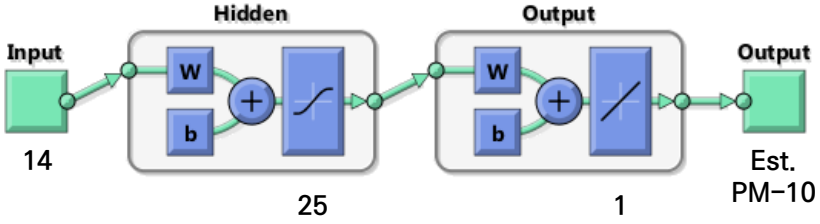
ANN(인공신경망 모형)

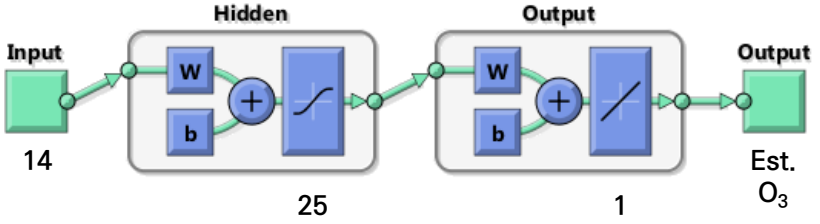


PM-10



오존(O_3)





70% : 20% : 10%

학습용 데이터로 사용 | 모델의 유효성(validation) 검정 | 검정(test)

PM-10

구분	결정계수 (R)	구분	결정계수 (R)
성능지표(Mean Squared Error)		10.1	
학습 Data	0.8045	유효성 검정 Data	0.8131
검정 Data	0.5426	전체 Data	0.7730

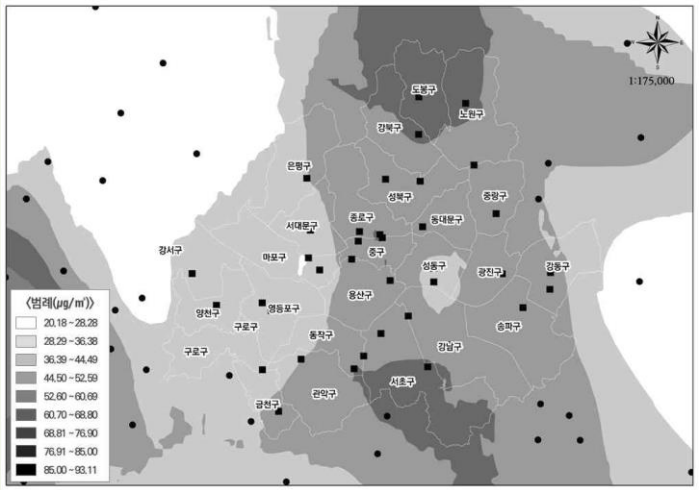
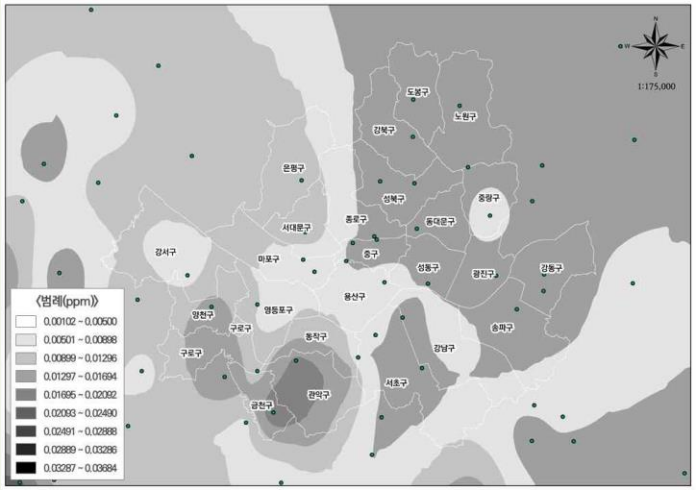
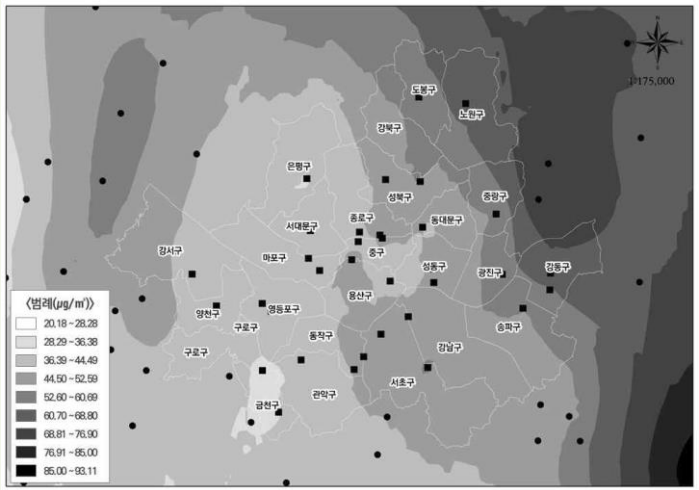
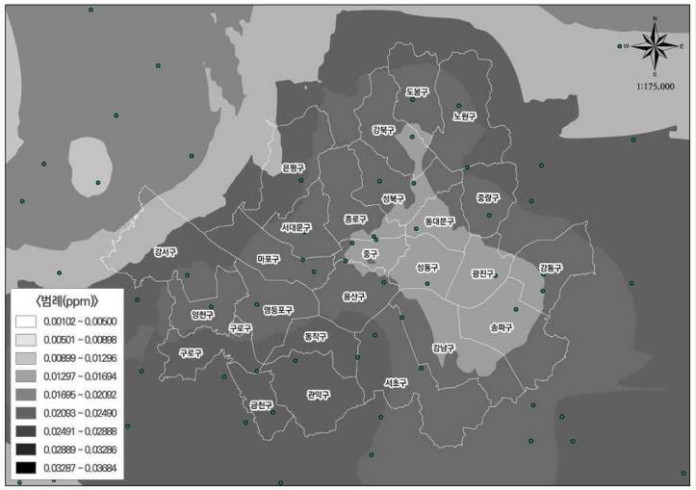
VS.
LUR: 0.42

오존(O^3)

구분	결정계수 (R)	구분	결정계수 (R)
성능지표(Mean Squared Error)		2.35×10^{-3}	
학습 Data	0.6581	유효성 검정 Data	0.5346
검정 Data	0.4387	전체 Data	0.5814

VS.
LUR: 0.33

3 도시개발 시나리오 분석 결과

	PM-10	오존(O^3)	
압축도시			• 도시 확장 시나리오 대비 대기오염물질의 밀집도가 대체로 낮음 • O_3: 서초, 강남, 여의도, 중구 등 3도심에 집적될 것으로 예상 • PM-10: 서초구, 강남구, 중구, 도봉구 등에서 농도가 높아질 것으로 예상
도시확장			• 압축도시 시나리오 대비 대기오염이 심해짐(명암의 차이 극명) • O_3: 서울 및 경기 남부 지역 전체가 영향을 받을 것으로 분석됨 • PM-10: 서울-분당, 서울-일산, 서울-남양주 등 주요 신도시 방면으로 농도가 짙어짐

V 결론

1 연구결과 및 시사점

주요 내용

1. 도시의 공간구조 중 대기오염에 영향을 미치는 유의한 요인을 도출하여 그 영향력을 분석
2. 향후 서울대도시권의 대기오염으로 인한 피해 저감을 위한 도시계획의 방향을 분석

토지이용회귀모형(LUR)

- 유의한 도시공간구조 변수를 도출하고 유의성 방향과 크기를 도출할 수 있었음
- 통제변수로 활용한 변수들의 유의성을 분석함
- 도시공간구조: 인구수, 가구수, 공업면적, 공원 면적, 교통량, 도로와의 거리, (도로와의 거리)^2 등이 유의
- 대기 및 기상 변수: 기온, 강수량, 최대 풍속의 방향, 최대 풍속, (t-12)시간 PM-10 농도
- 이러한 이론적 결과를 도시계획에 반영하기 위해서는 개별변수적보다는 통합적 접근이 요구됨

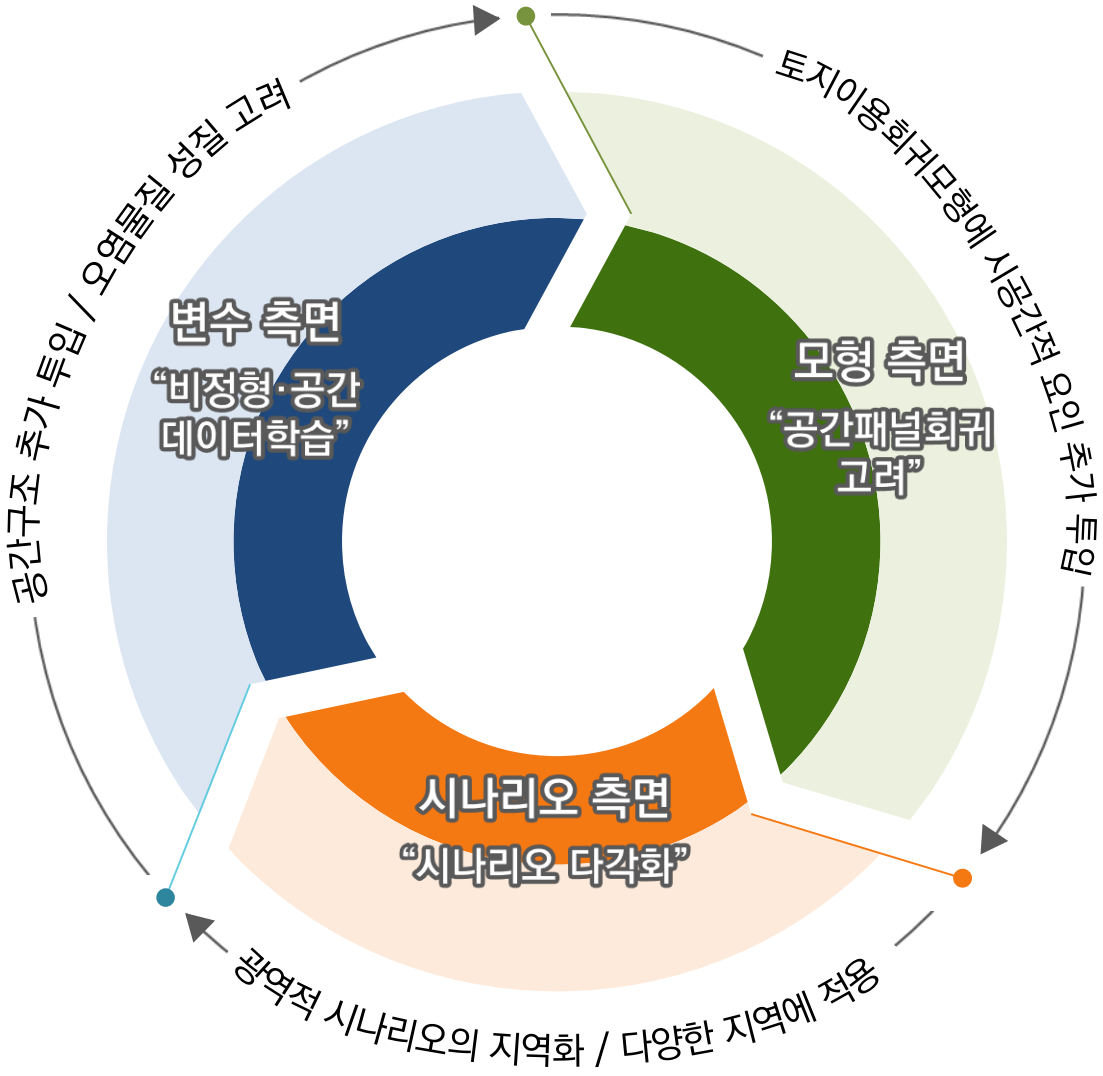
인공신경망(ANN)모형

- 모델링의 결과로 도출된 통계적 수치들을 기초로 판단했을 때 통계적으로 서울과 인근지역의 도시공간구조와 대기오염의 관계를 보다 정확히 모델링할 수 있는 방법론으로 밝혀짐
- 다만 인공신경망 방법론은 개별 도시공간구조변수가 대기오염에 미치는 영향의 방향과 통계적 유의성을 확인할 수 없음
- 이를 활용하기 위해서는 시각화 도구가 필수적이라 할 수 있음
- 따라서 모형의 선택은 연구자가 추구하는 목적에 따라 달라질 수 있음

시나리오 분석 (압축 도시 vs. 도시 확장)

- 분석 결과에 따르면 대기오염으로 인한 피해를 최소화하기 위해서는 도시의 스프롤 현상을 최소화 한 압축 도시를 지향하여야 함
- 그러나 최근 설문조사 및 통계자료에 의하면 '脫서울화 현상'이 지속되고 있어 이에 대한 대책을 강구해야 할 것으로 판단됨
- 단기적으로는 도시 재생 등을 통하여 외연적인 확산을 막는 것이 필요
- 하지만 보다 근본적인 차원에서는 광역적 차원에서의 압축도시를 고려해야 하며 이를 위해 인접 지역과의 협업이 필요함

2 향후 연구계획


토지이용회귀모형에 시공간적 요인 추가 투입
광역적 시나리오의 지역화 / 다양한 지역에 적용
공간구조 추가 투입 / 오염물질 성질 고려
변수 측면
"비정형·공간 데이터학습"
모형 측면
"공간패널회귀 고려"
시나리오 측면
"시나리오 다각화"

감사합니다

