



WP 20-02

미세먼지 농도의 변화 추세를 고려한 지역 유형 구분

윤은주 국토연구원 책임연구원 (yoonej@krihs.re.kr)



※ 이 Working Paper의 내용은 국토연구원의 공식 견해가 아니며, 저자 개인의 의견입니다. 연구 내용에 대하여 궁금한 점은 저자의 이메일로 문의하여 주시고, 인용 시에는 저자 및 출처를 반드시 밝혀주시기 바랍니다.

차례

01 서론	5
02 2010-2019년 도시별 미세먼지 농도 변화	9
03 미세먼지 관리를 위한 지역유형 구분	17
04 결론 및 정책제언	25

01 서론

■ 미세먼지는 신체적·정신적 건강과 경제에 부정적 영향

- 2013년 세계보건기구(World Health Organization: WHO) 산하 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer: IARC)에서 미세먼지를 1군 발암물질로 분류(IARC 2013)
- 초미세먼지는 여성과 어린이의 호흡기 및 심혈관 질환에 특히 위해성이 크며(Bell et al. 2015), 초미세먼지 농도가 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가할 때마다 천식 어린이 입원율이 3.45% 증가(Ding et al. 2015)
- 미세먼지는 정신건강에도 부정적 영향을 미치며, 미세먼지 농도 증가에 따라 자살 사고가 9~10%까지 증가하는 것으로 보고(Kim et al. 2010)
- 미세먼지로 인한 야외활동제한은 국내 관광산업에 부정적 영향을 미치며(김진옥, 한승훈 2019), 미세먼지로 인한 스모그와 시정장애는(obstruction to vision) 근로의 일시적 중단현상, 근로자의 질병과 부상 증가현상 유발(서미숙 2015)

■ 국내 미세먼지 연평균 농도는 2010년 $51.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2018년 $41.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 저감되었으나 국민이 체감하는 미세먼지는 악화

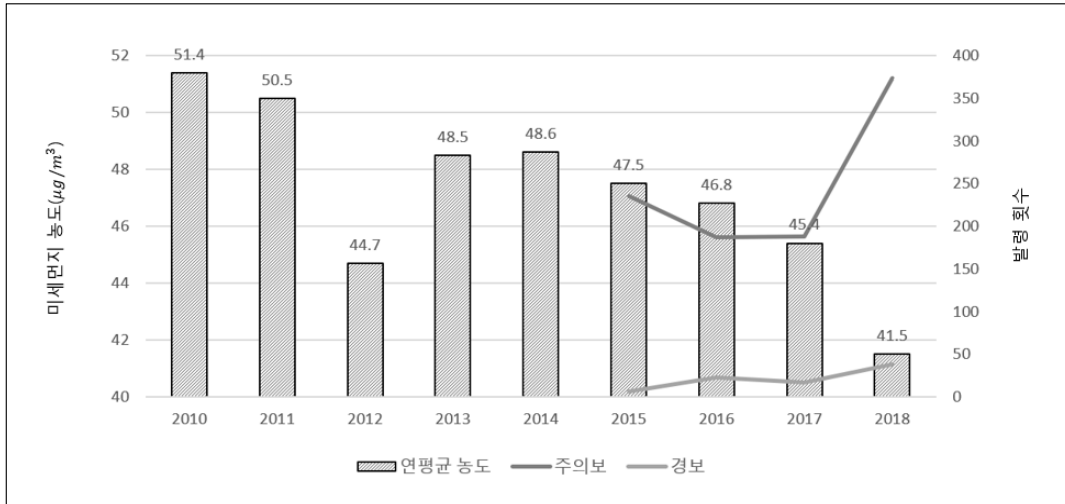
- 2018년 미세먼지의 연평균 농도는 $41.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 국내 기준 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하이나(〈그림 1〉참조)¹⁾, 여전히 세계보건기구(WHO) 권고 기준 $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 두 배 이상 높은 수치
- 2001년 이후 미세먼지가 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하는 일수는 감소하였으나, 2015년도 이후 $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 고농도 일수는 증가
 - 2015년과 2018년의 미세먼지 주의보·경보²⁾ 발령횟수를 비교하면, 주의보는 235회에서 374회로, 경보는 6회에서 38회로 각각 증가(그림 1)³⁾

1) 미세먼지(PM₁₀)에 대한 한국의 연간기준은 1993년 $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2001년 $75\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2007년 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 세계보건기구의 Interim Target 수준에 따라 단계적으로 상향 조정.

2) 한국의 경우 미세먼지(PM₁₀)가 두 시간 동안 지속적으로 $150\mu\text{g}/\text{m}^3$, $300\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과할 때, 각각 주의보와 경보를 발령.

3) 지역별 주의보·경보 발령횟수를 모두 합산함. 예를 들어, 2015년 주의보는 59일 235회 발령된 반면, 2018년 주의보는 39일 374회 발령됨. 이것은 전국수준에서의 고농도 일수는 감소한 반면, 지역수준에서의 고농도 일수는 증가한 것을 의미하며, 고농도 미세먼지가 한 번 발생하면 예전보다 광범위한 지역이 영향을 받음을 의미.

그림 1 미세먼지 연평균 농도 및 주의보·경보 횟수 변화



출처: 국가통계포털(2020) 자료를 토대로 저자 작성.

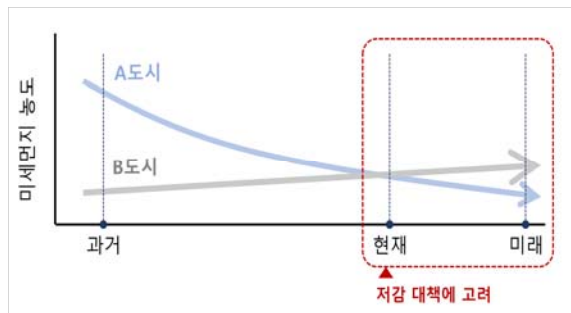
- 미세먼지 관련 뉴스는 1995년 이전 연평균 50건 미만에서 2001년 216건, 2009년 1,392건, 2016년 7월 1,977건으로 증가, 이것은 미세먼지 위험인식의 사회적 확산에 영향(Kim et al. 2020; 최충익, 김철민 2016)
- 국민의 87.2%가 건강, 실외활동 등 일상생활에서 미세먼지로 인한 불편을 체감하며(현대경제연구원 2019), 국민의 36%는 대기질이 악화된 것으로 판단(통계청 2018)

■ 지역마다 배출원, 건축물 배치와 밀도, 지형, 기후 등이 다르기 때문에 저감 추세 간 차이 존재

- 2001~2017년 사이의 광역시·도별 미세먼지 농도가 대부분 개선되어 왔으나, 지역별 추이는 상이하게 나타남
 - 수도권 내에서도 인천과 서울, 경기 간 추이가 다르며, 영남, 호남 등 남쪽 지방은 미세먼지 농도 및 고농도 빈도분을 급감(여민주, 김용표 2019)

- 지역별 추이가 다르다면, 현재 미세먼지 농도가 유사하더라도 가까운 미래에는 상이할 가능성 존재
- 미세먼지 농도 추이는 기존의 미세먼지 저감 대책의 실효성을 판단하고, 가까운 미래에 선제적으로 대응하기 위해 면밀히 파악해야 할 문제(〈그림 2〉 참조)

그림 2 미세먼지 농도 변화추세 고려의 필요성



출처: 저자 작성

■ 기존의 미세먼지 저감 정책은 직접적 배출원(특히 이동배출량)에 집중

- 정부가 수립한 미세먼지 관리 종합대책(2017)에서 전국 대상 통합적 관리체계로 전환(관계부처합동 2017), 발전, 산업, 수송, 생활부문별 배출량 관리, 주변국과의 협력 및 민감계층 보호 관련 추진과제 제시
- 미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법(2018)에서 미세먼지관리 종합계획·시행계획 수립 제시, 미세먼지 특별대책위원회, 국가 미세먼지 정보센터, 미세먼지 집중관리구역 관련 사항 포함
- 비상·상시 미세먼지 관리 강화대책(2018)은 고농도 미세먼지 비상 저감조치, 상시 미세먼지 저감방안 마련(차량 2부제, 경유차 감축, 대중교통망 확충, 옥상녹화 등)⁴⁾

■ 관련 학술 연구는 미세먼지의 발생원인 또는 영향, 미세먼지 위험 인식 평가 부문에 집중

- 국내 학술연구는 미세먼지의 원인 분석 연구(김정곤 외 2018; 임소영 외 2017; 박순애 외 2017; 부산광역시 2015; 전라북도 2017; 국립환경과학원 2007), 대도시에서의 미세먼지 건강 영향 평가 연구(Kim et al. 2018a; 2018b; 2017; 김자연 외 2018), 미세먼지 위험 및 리스크 인지에 관한 연구(최충익, 김철민 2016; 김영옥 외 2015; 김진옥, 한승훈 2019; 이선엽 외 2015) 등이 수행
- 도시별·계절별 미세먼지 농도의 공간적 분포와 광역시·도의 미세먼지 농도 경향을 분석한 사례가 있으나(성선용 2020; 여민주, 김용표 2019), 미세먼지 관리 관점에서 의미 있는 공간유형 구분을 다루지 않음

■ 미세먼지 문제해결을 위해 기존의 배출원 규제를 보완하기 위한 추가 조치 필요

- 미세먼지 농도가 높은 지역, 그중에서도 개선 정도가 미비했던 지역을 중심으로 배출원 규제를 보완하기 위한 추가 조치 필요
- 미세먼지 배출원의 공간적 분포와 고농도 미세먼지의 공간적 분포가 반드시 일치하지는 않음을 고려(성선용 2020)
- 미세먼지 발생 현상을 토대로 국민 체감형 저감조치를 도입하고, 정책에의 신뢰도 향상을 도모할 필요
 - 미세먼지 관련 정책 및 정보 등에 대한 신뢰도 향상은 미세먼지 농도의 저감과 더불어 국민의 야외활동 등 생활 만족도에도 긍정적 영향(Kim et al. 2020)

4) 미세먼지가 심해지는 시기인 12월에서 3월 사이의 집중저감 대책을 시행하는 제도에 대해 국민의 78.3%가 찬성하였고, 구체적으로 봄철 석탄발전소 가동중단안에 69%가, 배출가스 5등급 차량의 도심운행제한에는 72.5%가 동의함(SBS 뉴스 2019.11.17.)

■ 연구의 목적

- 본 연구는 도시별 미세먼지 농도의 저감 추세와 최근 미세먼지 농도를 고려하여 지역의 유형을 구분하고, 유형별 미세먼지 관리방향을 제언하고자 함
- 연구의 결과는 지역맞춤형 미세먼지 저감계획의 수립, 더 나아가 미세먼지예의 적응대책 등을 수립하는 데 기초자료로 활용하는 것 가능
- 구분된 지역의 유형에 따라, 배출원의 저감뿐만 아니라 기(既) 배출된 미세먼지를 흡착·흡수하는 대책, 미세먼지 측정망·정보망 구축의 우선순위, 적응 대책 등 제시 가능

02 2010-2019년 도시별 미세먼지 농도 변화

■ 데이터의 취득가능성을 고려하여 미세먼지(PM₁₀)에 한정하여 연구 진행

- 미세먼지(PM₁₀)는 10/1000mm 이하의 먼지입자로 사업장 연소, 자동차 연료 연소, 생물성 연소 과정 등 특정 배출원에서 직접 발생하는 1차적 발생인 경우가 많으며, 호흡기계 질병 악화, 폐 기능 저하 초래
- 초미세먼지(PM_{2.5})는 2.5/1000mm 이하의 먼지입자로 황산화물, 질소산화물 등이 화학반응을 통해 2차적으로 발생한 비율이 높고, 폐포에 직접 침투하여 폐질환뿐만 아니라 조기사망률의 증가 유발
- 초미세먼지는 건강에의 영향이 더 크다고 알려져 있으나 관측치가 2015년부터 제 공되어 추세분석에 한계가 존재, 향후 연구 주제로서 제안

■ 연구의 시간적 범위는 2010년 1월에서 2019년 6월의 기간으로 설정

- 연구 분석 시점에서 국립환경과학원에서 공식 확인한 최신의 대기오염도 현황 자료 활용(국가통계포털 2020)
- 과거의 미세먼지 농도 추세에 기반한 미래 예측은 2025년을 대상으로 함

■ 연구의 공간적 범위는 2010~2019년 관측치를 제공하는 69개 도시에 한정

- 국내에서는 그동안 미세먼지 관측지점을 순차적으로 확대하여 2020년 기준 398개 관측 지점 존재(AirKorea 2020)
- 2010~2019년의 미세먼지 농도 변화 추세를 분석하는데 관측치가 부족한 도시를 제외, 69개의 도시에 한정
- 대기오염도현황 자료를 기준으로, 69개 각 도시의 규모나 위계에 관계없이 하나의 관측 지점으로 처리, 특정 월의 결측치는 도시별 평균값으로 대체함

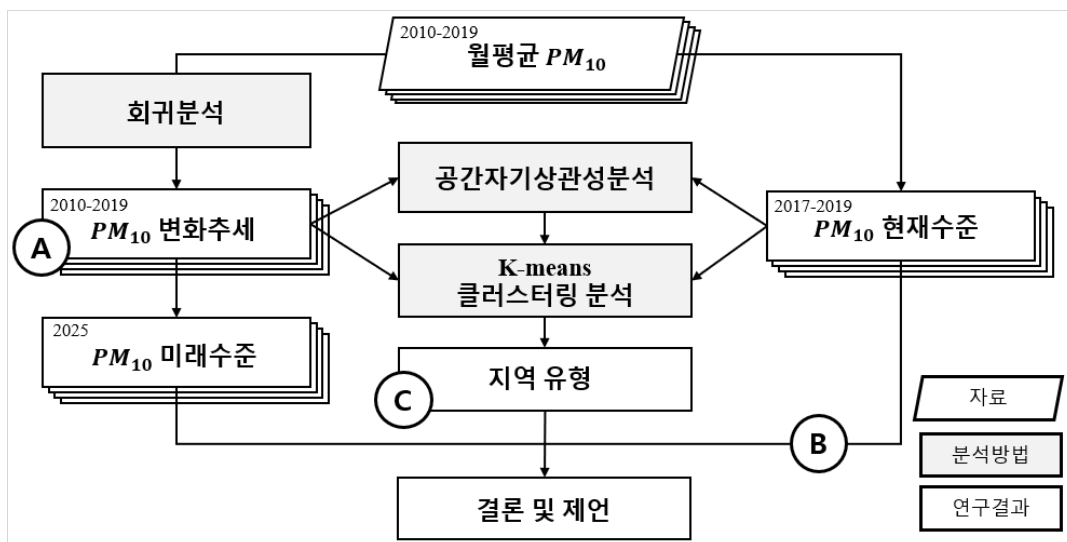
■ 연구의 내용적 흐름

- 첫째, 69개 도시에 대해 과거 10년간의 미세먼지 변화추세 분석(〈그림 3A〉 참조)
- 둘째, 변화 추세가 지속된다는 가정하에 예측된 2025년 미세먼지 수준과 현재 수준을 비교(〈그림 3B〉 참조)
- 셋째, 미세먼지 변화추세 및 현재 수준을 고려하여 미세먼지 관리를 위한 지역의 유형 구분(〈그림 3C〉 참조)

■ 도출된 지역 유형은 미세먼지 관리대책에 유의미한 공간 단위로 적용 가능

- 기존의 미세먼지 저감 정책에도 효과가 미비한 지역이 있다면, 기 발생된 미세먼지를 흡수·흡착할 수 있는 조치 등이 추가 적용될 필요
- 연구의 시·공간적, 내용적 범위는 향후 관련 관측 자료의 축적에 따라 확대 가능
 - 초미세먼지($PM_{2.5}$, PM_{10})는 본 연구의 대상인 미세먼지(PM_{10})의 발생원인과 건강에 미치는 영향이 달라 별도의 연구가 요구됨
 - 초미세먼지는 2015년부터의 관측치를 제공하고 있으므로 가까운 미래에 추가분석이 가능할 것으로 판단

그림 3 연구의 분석 흐름도



출처: 저자 작성

2010-2019년 미세먼지 농도 변화추세

■ 미세먼지 농도의 계절적 변동성에도, 장기간에 걸쳐 나타나는 추세를 분석

- 69개 도시별 월평균 미세먼지 농도데이터를 이용, 시기(年月)를 독립변수로, 미세먼지 농도를 종속변수로 하는 선형 회귀(linear regression) 도출

$$Y_i = \alpha + \beta X_i + \epsilon_i; i = 1, 2, \dots, n;$$
- 계절적 변동성이 있는 데이터에 대해 선형회귀 계수 부호 및 크기를 이용하여 증감추세를 분석한 연구 사례 존재(여민주, 김용표 2019; Chu et al. 2019; Pang et al. 2017; Du et al. 2015)
- 이상의 회귀분석은 IBM SPSS Statistics 26을 이용하여 수행

■ 69개 도시 중 11개 도시(15.9%)는 미세먼지 농도가 다소 악화되었고, 58개 도시(84.1%)는 개선(〈표 1〉, 〈그림 5〉 참조)

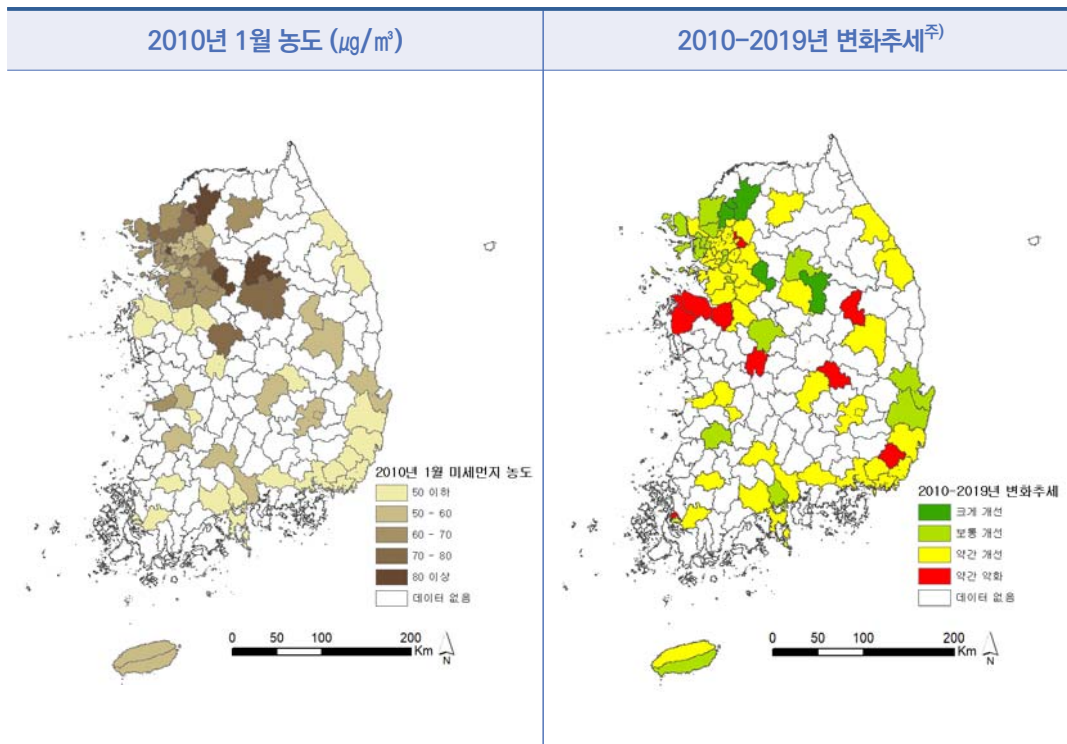
- 충청도의 천안, 아산, 당진, 서산, 대전, 경기도 하남과 구리, 경북 구미와 영주, 전남의 목포, 경남의 양산은 미세먼지 농도가 정체 또는 다소 악화
- 대전을 제외한 서울, 부산, 대구, 광주, 울산 등의 대도시는 미세먼지 농도가 정체 또는 다소 개선
- 경기도의 동두천, 양주, 이천, 포천은 미세먼지 농도가 가장 크게 개선
- 미세먼지 농도가 악화된 충남의 서산, 아산, 당진과, 크게 개선된 경기도 양주, 동두천, 포천 각각은 유사한 추세를 보일뿐만 아니라 지리적으로도 클러스터를 형성하고 있어, 배출원 또는 지형 등 공통적인 영향 인자 존재 가능
 - 예로서, 당진에 위치한 석탄화력발전단지와 현대제철 등은 대규모의 미세먼지 배출원으로서 당진 및 주변 도시의 미세먼지 농도에 직접적인 영향을 줄 수 있음

표 1 2010~2019년 도시별 미세먼지 농도 변화추세

구분	도시명	비율 (개, %)	회귀계수
크게 개선	동두천, 양주, 이천, 포천	3/5.4	-0.2 이하
보통 개선	제천, 원주, 청주, 오산, 고양, 의왕, 파주, 포항, 경주, 인천	10/14.5	-0.2 ~ -0.1
약간 개선	부천, 과천, 정읍, 광양, 서귀포, 군포, 춘천, 삼척, 울산, 성남, 안산, 용인, 김포, 여수, 하동, 부산, 대구, 남양주, 안성, 충주, 군산, 수원, 안양, 화성, 광주(경기도), 동해, 남원, 안동, 김해, 의정부, 광명, 시흥, 김천, 제주, 서울, 평택, 강릉, 익산, 영암, 순천, 진주, 광주(광역시), 전주, 창원	44/63.8	-0.1 ~ 0.0
약간 악화	천안, 구리, 아산, 서산, 구미, 영주, 대전, 하남, 목포, 양산, 당진	11/15.9	0.0 이상
총계	-	69/100	-

출처: 저자 작성.

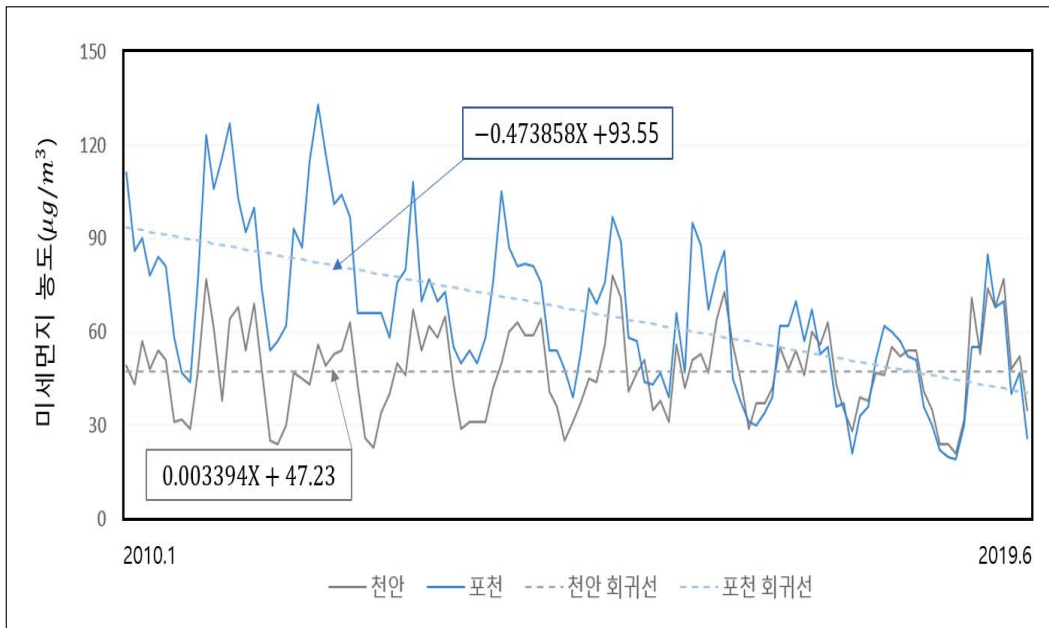
그림 5 2010년 1월 미세먼지 농도와 2010~2019년 변화추세



주: 선형회귀식 회귀계수 값에 근거

출처: 저자 작성.

그림 4 천안, 포천의 2010~2019년 미세먼지 농도 변화추세



주: 실제 관측치(실선)와 선형회귀분석결과 도출된 회귀계수와 y절편 값(점선)을 이용하여 작성.
출처: 저자 작성.

■ 가장 크게 개선된 포천과(연평균 매년 5~6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 저감) 같은 기간 정체된 천안과의 추세 비교

- 1월의 관측치를 기준으로, 포천은 2010~2012년 110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 높은 수준이었으나 2017년, 2018, 2019년에는 각각 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 감소
- 천안은 2010~2011년 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 낮았으나, 이후 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 수준을 보이다가 2019년에는 74 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 증가
- 2010년 포천은 천안보다 미세먼지 농도가 두 배 이상 높았으나, 변화추세가 상이하여 2019년에는 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 내외의 차이에 그침
- 이러한 추세가 지속된다면 가까운 미래에는 천안의 미세먼지 농도가 포천보다 높아지는 현상도 가능

현재와 2025년 미세먼지 농도 순위 비교

■ 현재의 미세먼지 농도로서 최근 3년의 평균 미세먼지 농도 적용

- 각 연도별 변동성이 존재하므로, 한 개 연도의 미세먼지 농도 평균값을 사용하는 데 따른 오류 제거를 위해 2017년 7월부터 2019년 6월까지의 3년 평균값 적용

■ 미래의 미세먼지 농도로서 도시별 회귀식으로 예측된 2025년 1월의 미세먼지 농도 적용

- 회귀식의 독립변수에 2025년 1월을 나타내는 값을 적용, 이때의 종속변수값인 미세먼지 농도 예측값 산출

■ 현재와 2025년의 각 시기에서, 69개 도시의 미세먼지 농도 순위 비교

- 현재 값은 관측치인 반면, 2025년은 예측값이므로 절대적 비교는 제외함
- 각 시기별로 미세먼지 농도가 높은 도시부터 ‘높음’, ‘보통’, ‘낮음’의 세 가지 그룹으로 구분
- ArcMap 10.7.1의 Quantile method 적용⁵⁾

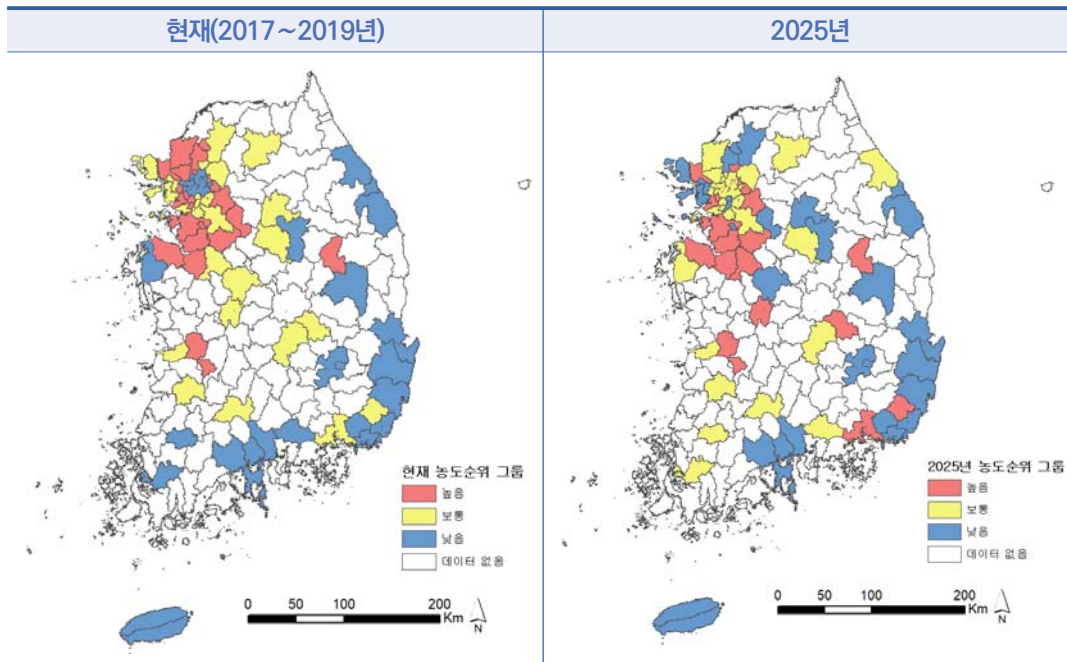
■ 현재와 비교했을 때, 2025년 26개 도시의 미세먼지 농도 순위 그룹 간 변화(〈그림 6〉, 〈표 2〉 참조)

- 과거의 변화추세가 지속된다면, 창원, 대전, 천안, 구미, 양산은 현재 ‘보통’에서 2025년 ‘높음’으로, 강릉, 영암, 광주(광역시), 서산, 진주, 목포는 현재 ‘낮음’에서 2025년에는 ‘보통’으로 변화할 수 있음
- 고양, 파주, 군포, 안양, 부천, 동두천, 양주, 이천, 오산 등 다수의 경기도 도시가 현재 ‘높음’에서 2025년 ‘보통(고양, 파주, 군포, 안양, 부천, 오산)’ 또는 ‘낮음(동두천, 양주, 이천)’으로 변화할 수 있음

■ 과거 추세가 지속된다면, 2025년 이후 60개 도시 미세먼지 평균 농도가 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로, 9개 도시는 $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 개선 가능

- 선형회귀모델의 적용 결과로, 실제의 미세먼지 농도는 예측값을 중심으로 변동성이 발생할 것임. 도시별 정확한 미세먼지 농도 값은 추가 분석 필요

⁵⁾ Quantile method는 지리정보프로그램인 ArcMap 10.7.1에서 기본적으로 제공하는 분류방법으로, 표본값(미세먼지 농도 값)을 기준으로 설정된 그룹별(‘높음’, ‘보통’, ‘낮음’)로 같은 수의 표본을 할당하는 방법임. 단, 복수의 표본값이 같은 경우, 그룹별로 할당된 표본의 수에 일부 차이가 있을 수 있음.

그림 6 현재와 2025년 미세먼지 농도 순위 그룹 간 변화

주: 현재와 2025년, 각 시기별 농도 순위에 기초하여 '높음', '보통', '낮음'으로 구분한 것으로서 도시 간 상대적 비교에 해당하며, 절대적 농도의 좋고 나쁨을 의미하지 않음.

출처: 저자 작성.

표 2 현재와 2025년 도시별 미세먼지 농도 순위 그룹

그룹	현재(2017~2019년)	2025년		
		^a 유지	^b 상승	^c 하락
높음	동두천, 양주, 이천, 오산, 고양, 파주, 군포, 안양, 부천, 의정부, 광명, 광주(경기도), 안성, 김포, 화성, 시흥, 익산, 아산, 전주, 하남, 영주, 구리, 평택, 당진	의정부, 광명, 광주(경기도), 안성, 김포, 화성, 시흥, 익산, 아산, 전주, 하남, 영주, 구리, 평택, 당진	창원, 대전, 천안, 구미, 양산	-
보통	포천, 청주, 원주, 인천, 과천, 의왕, 성남, 춘천, 정읍, 남양주, 군산, 서울, 안산, 충주, 남원, 수원, 용인, 김천, 창원, 대전, 천안, 구미, 양산	성남, 춘천, 정읍, 남양주, 군산, 서울, 안산, 충주, 남원, 수원, 용인, 김천	영암, 강릉, 광주(광역시), 서산, 진주, 목포	고양, 파주, 군포, 동두천, 부천, 안양
낮음	제천, 여수, 경주, 서귀포, 광양, 삼척, 포항, 동해, 순천, 안동, 김해, 하동, 대구, 울산, 부산, 제주, 강릉, 영암, 광주(광역시), 서산, 진주, 목포	제천, 여수, 경주, 서귀포, 광양, 삼척, 포항, 동해, 순천, 안동, 김해, 하동, 대구, 울산, 부산, 제주	-	포천, 양주, 청주, 이천, 원주, 인천, 과천, 오산, 의왕

주: 현재와 2025년 각 시기별 농도 순위에 기초하여, 미세먼지 농도가 높은 순서부터 '높음', '보통', '낮음'으로 구분한 것으로서 도시 간 상대적 비교에 해당하며, 절대적 농도의 좋고 나쁨을 의미하지 않음.

^a유지는 동일한 그룹, ^b상승은 미세먼지 농도순위가 높은 그룹으로 변경, ^c하락은 미세먼지 농도순위가 낮은 그룹으로 변경.

출처: 저자 작성.

03 미세먼지 관리를 위한 지역 유형 구분

미세먼지 농도의 공간자기상관성

■ 지역유형 구분을 위한 사전분석으로서 미세먼지 농도의 공간적 특성 분석

- 공간자기상관성 분석(spatial autocorrelation analysis)을 통해, 미세먼지 농도의 변화추세 및 현재 농도가 물리적으로 가까울수록 유사한 경향이 나타나는지 검토
 - 공간자기상관성이 높을수록 유사한 경향의 도시들이 클러스터를 이루고 있음
- 공간분석 소프트웨어인 GeoDa(geodacenter.github.io)⁶⁾를 활용하여 Global Moran's Index를 적용, 미세먼지 농도의 변화 추세, 현재 수준 각각에 대한 공간자기상관성 산출
 - 공간자기상관성 분석 시 주변에 경계를 공유하는 이웃 도시가 없는 경우 분석대상에서 제외

$$Global\ Moran's\ I = \frac{n \sum \sum W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{w \sum (X_i - \bar{X})^2}$$

n = 도시의 수

i = 중심 도시; j = i 를 제외한 나머지 도시

W_{ij} = i, j 간의 가중치 (이웃하면 1, 그렇지 않으면 0)

$\bar{X}$ = X 의 평균 값 (X 는 도시별 변화추세 또는 현재 수준)

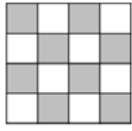
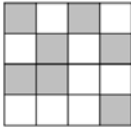
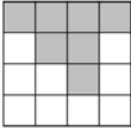
■ 미세먼지 농도의 변화 추세와 현재 수준 데이터는 높은 공간자기상관성이 나타남

- 공간자기상관성값(Global Moran's I)은 미세먼지 농도 변화추세 및 현재 농도 수준에 대해 각각 0.330, 0.604의 양수 값으로 나타남(〈표 3〉 참조)

6) GeoDa는 공간자기상관성분석, 공간회귀분석 등을 지원하는 공간데이터분석전문 무료 소프트웨어로서, 관련 홈페이지 'geodacenter.github.io'에서 GeoDa 1.14를 다운로드 받을 수 있음.

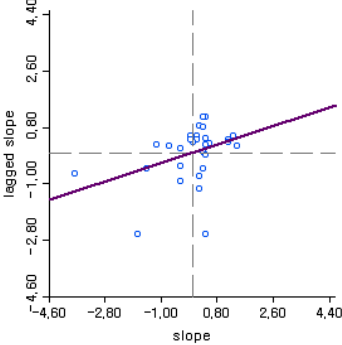
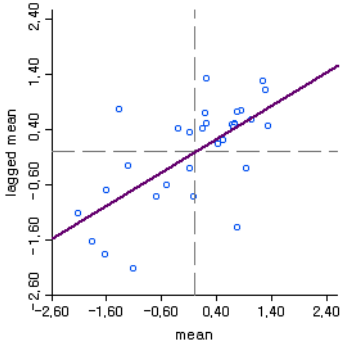
- 즉, 미세먼지 변화추세, 현재 농도 수준의 측면에서 유사한 도시들이 지리적으로 모여 있음을 의미하며, 현재 농도 수준 측면에서 그 경향성이 더 크게 나타남

표 3 Global Moran's I의 개념과 해석

	Dispersed	Random	Clustered
개념도			
Global Moran's I	< 0	0	> 0

출처: 저자 작성.

표 4 공간자기상관성 분석 결과(Global Moran's Index)

	변화추세	현재 농도 수준
도면		
값	0.330	0.604

주: Contiguity Weight 종류는 Queen contiguity로, Order of contiguity는 1로 설정.
출처: 저자 작성.

미세먼지 농도 변화추세를 고려한 지역유형

■ 미세먼지 농도의 변화 추세와 현재 수준에 기초하여 통계적으로 클러스터 구분

- GeoDa 소프트웨어를 이용하여, 상대적 구분에 효과적인 비계층적 군집방법인 k-means 클러스터 분석을 적용(Janssens et al. 2008; 권유진 외 2018)
- 클러스터를 3개, 4개, 5개로 적용한 후, 해석의 용이성과 클러스터 내 거리와 클러스터 간 거리 간 비율을 고려하여 최종적으로는 4개 클러스터 구분 선택

■ 클러스터 A, B, C, D의 미세먼지 농도 변화추세 및 현재 수준

- 4개 클러스터로 구분했을 때, 유형 내 변수 값 거리의 합(S.S)은 42.12로서, 유형 간 변수 값 거리 합 (93.8826)보다 적어, 적절히 군집된 것으로 판단(표 5), <그림 7> 참조)

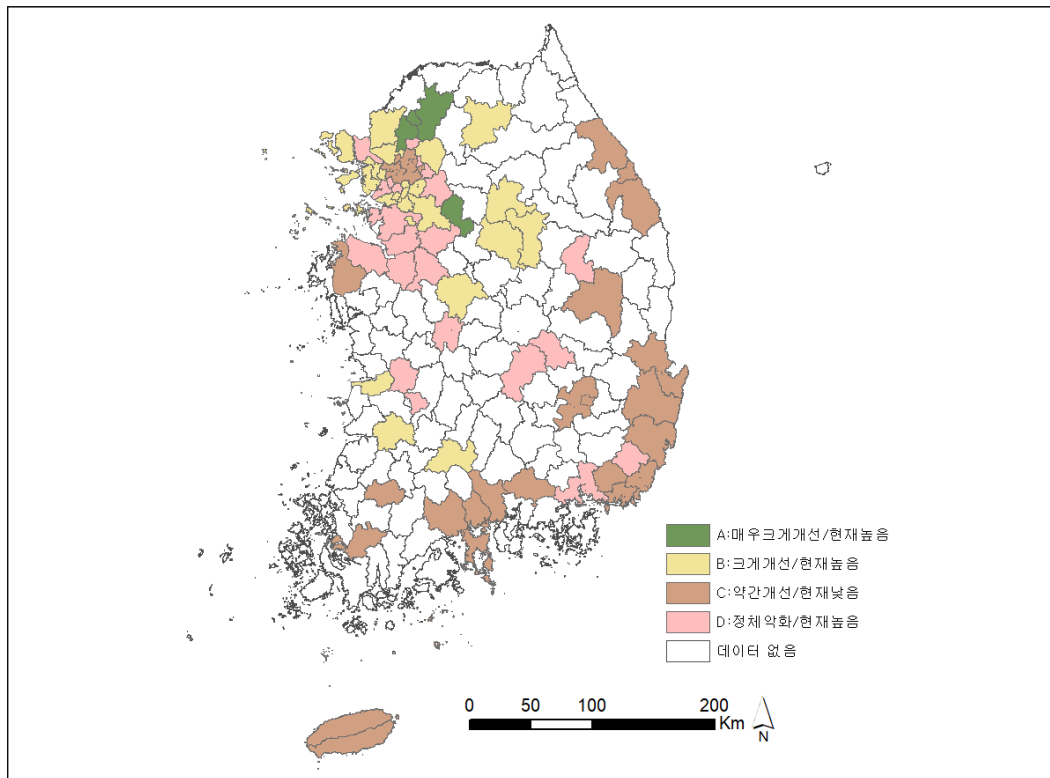
- A) 지난 10년간 매우 크게 개선되었으나 현재 미세먼지 농도 수준은 여전히 높음
- B) 지난 10년간 크게 개선되었으나 현재 미세먼지 농도 수준은 여전히 높음
- C) 지난 10년간 약간 개선되었으나 현재 미세먼지 농도 수준은 낮음
- D) 지난 10년간 정체 또는 악화되었으며 현재 미세먼지 농도 수준 역시 높음

표 5 k-means 클러스터 분석 결과 요약

클러스터	중심점		Sum of squares (S.S)			
	변화추세 (회귀기울기)	현재 농도 (3년 평균)	클러스터별	클러스터 내	클러스터 간	전체
A	매우 크게 개선 (-0.30)	현재 높음 (49.17)	6.78	42.12	93.89	136
B	크게 개선 (-0.11)	현재 높음 (46.43)	8.76			
C	약간 개선 (-0.06)	현재 낮음 (38.57)	12.01			
D	정체·악화 (-0.01)	현재 높음 (49.81)	14.57			

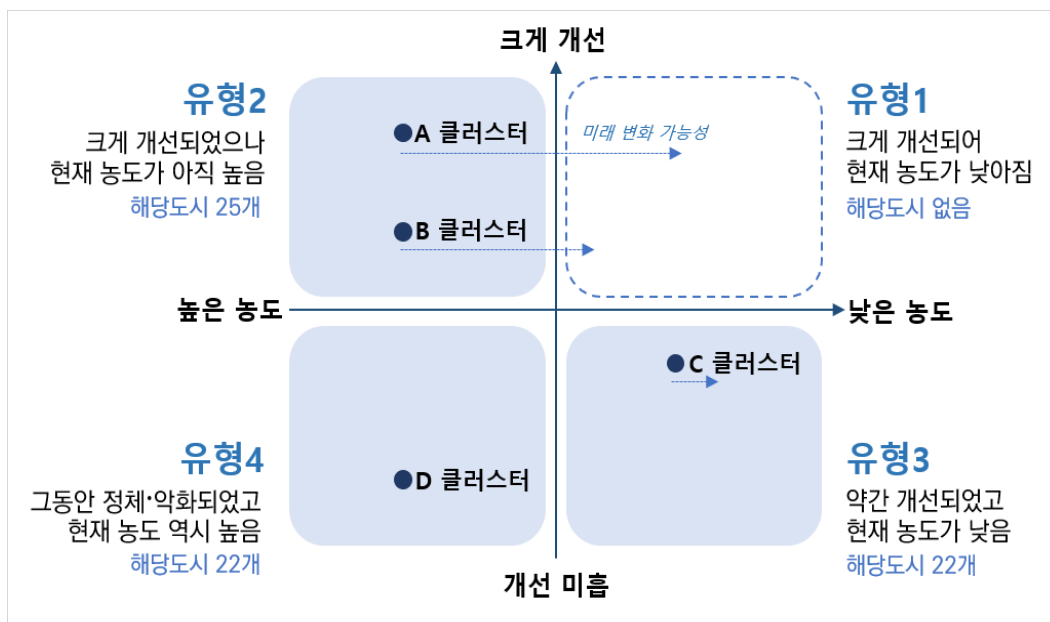
출처: 저자 작성.

그림 7 통계적으로 구분된 미세먼지 클러스터



출처: 저자 작성.

그림 8 미세먼지 관리 측면에서의 지역유형 구분



출처: 저자 작성.

■ 클러스터의 특성을 고려하여 미세먼지 관리를 위한 지역 유형 구분(그림 8) 참조)

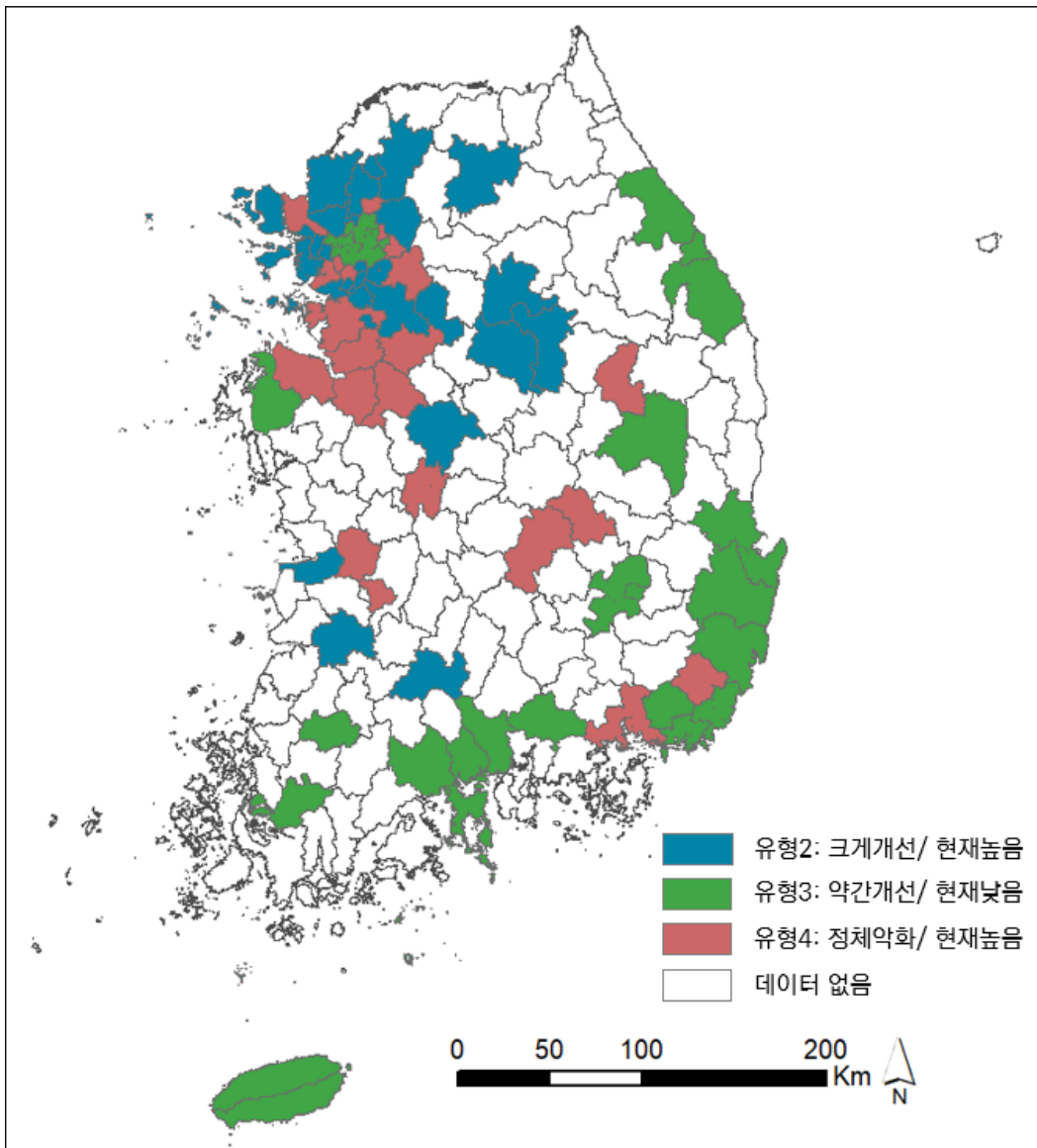
- 클러스터 A, B, C, D를 미세먼지 농도의 변화추세(상대적으로 크게 개선된, 개선이 미비한)와 현재 농도 수준(상대적으로 높은 농도, 낮은 농도)의 축으로 형성된 4개 사분면상에 배치
 - 사분면 중 가장 긍정적인 사분면(크게 개선되어 현재 농도가 낮은)을 유형 1로하고, 순차적으로 유형2, 유형3, 유형4를 명명
- 미세먼지 농도 수준을 기준으로 유형 1과 3은 긍정적 유형으로, 유형 2와 4는 부정적 유형으로 구분, 여기에 변화추세를 포함하면 관리의 우선순위는 ‘유형 4(D) > 유형 2(B) > A ≥ 유형 3(C) > 유형 1’
 - 유형 1) 그동안 미세먼지 농도가 크게 개선되어 현재 미세먼지 농도가 낮은, 가장 긍정적인 유형으로 분석 대상이 된 69개 도시 중 여기에 해당하는 도시는 없음
 - 유형 2) 클러스터 A와 B가 해당되며, 현재 미세먼지 농도가 높으나 그동안 크게 개선되어 왔기 때문에 향후 유형 1로 변화할 가능성 존재(그림 8) 화살표 참조)
 - 유형 3) 클러스터 C가 해당하며, 미세먼지 농도가 지속적으로 낮았으나 그동안의 개선 정도가 미흡하여 향후 추가 개선 가능성 낮음
 - 유형 4) 클러스터 D가 해당하며, 미세먼지 농도가 지속적으로 높았고 그동안의 개선 정도 역시 미흡하기 때문에 향후 긍정적 유형 1이나 3으로 변화할 가능성 낮음

표 6 미세먼지 지역유형별 도시

지역 유형 (변화추세 / 현재농도)		클러스터	도시	도시 수
1	크게 개선 / 현재 낮음	-	-	0
2	크게 개선 / 현재 높음	A	동두천, 이천, 양주, 포천	25
		B	인천, 수원, 성남, 부천, 안산, 고양, 과천, 남양주, 오산, 군포, 의왕, 용인, 파주, 춘천, 원주, 청주, 충주, 제천, 군산, 정읍, 남원	
3	약간 개선 / 현재 낮음	C	서울, 부산, 대구, 광주(광역시), 울산, 강릉, 동해, 삼척, 서산, 목포, 여수, 순천, 광양, 영암, 포항, 경주, 안동, 진주, 김해, 하동, 제주, 서귀포	22
4	정체·악화 / 현재 높음	D	대전, 의정부, 안양, 광명, 평택, 구리, 시흥, 하남, 안성, 김포, 화성, 광주(경기도), 천안, 아산, 당진, 전주, 익산, 김천, 구미, 영주, 창원, 양산	22
총 계				69

출처: 저자 작성.

그림 9 미세먼지 관리를 위한 지역유형



출처: 저자 작성

■ 유형 2에는 인천, 경기도 수원, 파주, 포천, 동두천 등 12개 도시, 강원도 춘천과 원주, 충청도 의 청주, 충주, 제천, 전라도의 군산, 정읍, 남원 포함

- 그동안 미세먼지가 크게 개선되어 온 유형으로, 기존에 시행된 저감대책, 기상요인의 변화 등이 긍정적으로 작용했을 가능성이 큰 것으로 판단
- 현재 미세먼지 농도 수준은 평균보다 높아 단기적으로 추가 저감 조치 필요

■ 유형 3에는 대전을 제외한 서울, 부산, 광주, 울산 등의 대도시가 포함되며, 그 외에는 여수, 경주, 강릉, 삼척 등 남해안과 동해안에 인접한 도시가 대부분

- 서울, 부산, 광주, 울산 등의 대都市는 그동안 다른 도시에 비해 미세먼지 농도가 낮았으므로 미세먼지 관리가 비교적 잘 되어 온 것으로 판단
- 인구가 밀집된 대都市를 대부분 포함하므로, 미세먼지 농도 저감에 따른 편익과 다른 지역에서의 파급효과가 클 수 있음을 고려할 필요
- 그러나 미세먼지 연평균 농도가 여전히 WHO 권고 기준보다 높고, 그동안의 개선 추세에 따라 향후 개선 가능성이 적으므로 장기적인 미세먼지 저감대책 보완 필요

■ 유형 4에는 대전, 경기도 평택, 화성, 하남 등 11개 도시, 충청도 천안, 아산, 당진, 전라도 전주와 익산, 경상도의 김천 구미 등 5개 도시 포함

- 그동안 미세먼지가 정체 또는 다소 악화되었던 유형으로 기존 미세먼지 저감대책의 실효성을 비판적으로 검토할 필요 있음
- 장기간에 걸쳐 미세먼지 농도가 높았으므로 관련 장단기 정책과 재원이 우선적·집중적으로 투자될 필요
- 충청도의 천안, 아산, 당진과 경기남부의 평택, 화성, 안성은 공간적으로도 대규모의 클러스터를 이루고 있어 공통 영향 요인에 대한 추가 분석 필요
 - 당진에는 현대제철, 당진화력발전소 등 대규모 미세먼지 배출원이 집중되어 있고, 서해안 인접 도시는 중국으로부터 유입되는 오염물질의 영향을 크게 받을 수 있음을 고려
- 경남 창원은 지리적으로 인접한 주변 지역과 다른 유형으로 구분되었는데, 이에 대한 영향 인자 규명 필요

04 결론 및 정책제언

연구 요약

■ 69개 도시의 미세먼지(PM10) 농도의 2010~2019년 변화 추세 분석 및 2025년 추정

- 지난 10년 동안 국가수준에서의 미세먼지 농도는 꾸준히 개선되었으나, 도시 수준에서는 변화추세 간 차이가 관찰
- 11개 도시의 미세먼지 농도가 정체되거나 다소 나빠진 반면, 58개 도시에서는 꾸준히 개선됨. 특히, 경기도의 동두천, 양주, 이천, 포천 등의 도시는 크게 개선되어 옴
- 과거의 변화추세가 지속된다면, 국내 26개 도시의 미세먼지 농도 순위 그룹이 변화할 것으로 예측
 - 예로서, 동두천, 양주, 이천 등은 2010년 국내에서 미세먼지가 농도가 ‘높음’이었으나, 2025년에는 ‘낮음’으로 변화할 가능성이 높음

■ 미세먼지 농도의 변화추세 및 현재 수준에 기초하여, 관리를 위한 유형 구분

- 미세먼지 농도의 변화추세와 현재 수준을 종합하여 69개 도시를 통계적으로 구분한 다음(클러스터 A, B, C, D), 관리 관점에서 4개 유형(1, 2, 3, 4)으로 재분류하였음
- 유형2(미세먼지 농도가 크게 개선되었으나 현재 높은)에 25개 도시, 유형3(미세먼지 농도가 약간 개선되었으며 현재 낮은)에 22개 도시, 유형4(미세먼지 농도가 정체·악화되어 현재 높은)에 22개 도시가 해당
- 특이사항으로서, 유형 3에는 서울, 대구, 부산, 울산, 광주 등의 대도시와 남해 및 동해에 인접한 도시가 다수 포함되며, 유형 4에는 평택, 안성, 당진, 아산 등의 도시가 공간적 클러스터를 이루고 있음

미세먼지 공간유형별 관리 방향

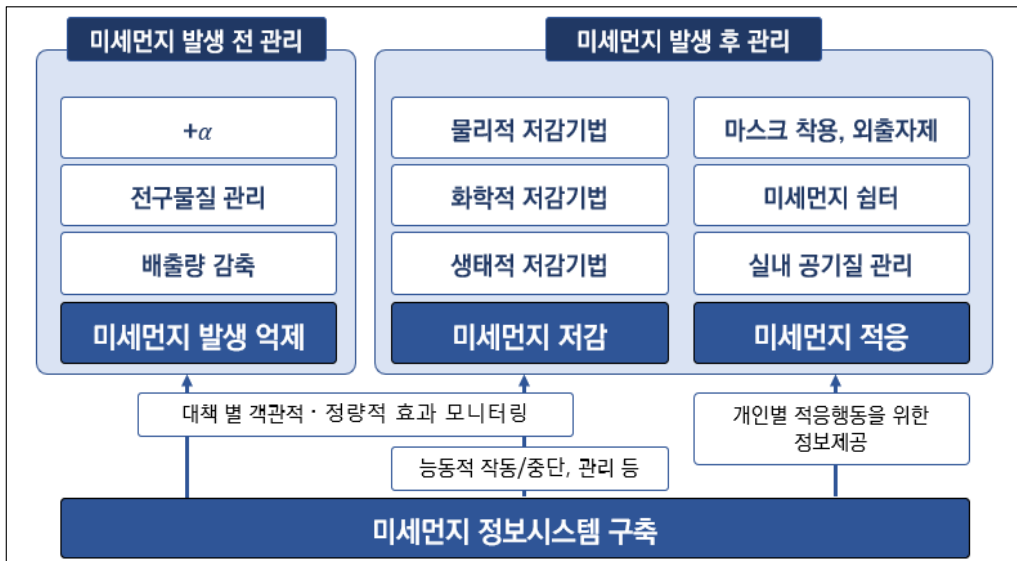
■ 기존 국가 및 지자체 단위 미세먼지 저감대책

- 국가 수준에서 배출원별 감축량을 설정하였으나 그 효과성에 대한 검토는 충분치 않으며, 일괄적 수립 및 적용으로 국민 체감과 거리가 멀다는 지적
 - 부산, 전남 지역에서 미세먼지 영향요인 검토(부산광역시 2015; 전라북도 2017)
 - 서울에서 ‘공해차량 운행 제한’, ‘미세먼지 집중관리 구역(영등포·동작·금천)’ 적용
 - 경기도 평택은 공공기관 30곳 이용하여 미세먼지 모니터링 체계 구축(평택시 공기질 서비스 2020)⁷⁾

■ 미세먼지 저감대책과 관련하여 배출량 감축을 포함한 다각적 접근 필요

- 국외 관련 사례와 국내의 기술수준을 고려하여 저감 조치는 다음과 같이 구분할 수 있음 (박종순 외 2019)
- **(미세먼지 발생 억제)** 미세먼지 발생 전 관리로서, 친환경 차량 이용, 차량2부제, 도심 내 자동차 진입 제한 등 해당
- **(발생된 미세먼지 저감)** 미세먼지 발생 후 관리로서, 생태적·화학적·물리적 기법으로 구분
 - 생태적 기법은 식물의 미세먼지 흡수·흡착 기능 이용
 - 화학적 기법은 CMA와 광촉매의 흡착·분해 기능 이용
 - 물리적 기법은 스모그프리타워 등 미세먼지 여과·집진 기능과 바람길의 배출기능 이용
- **(미세먼지 적응)** 미세먼지 발생 후 관리에 해당하나 미세먼지 저감 보다는 노출 최소화가 목표
 - 미세먼지 취약계층을 위한 미세먼지 쉼터 조성, 건축물 실내의 공기질 관리 등
- **(미세먼지 정보·제어 시스템 구축)** 미세먼지 발생 후 모니터링에 해당하며, 간이측정망을 추가 구축하여 국민 실제 체감하는 미세먼지 현황을 파악하고 실시간 제공
 - 국민에게 미세먼지 정보를 정확하게 제공함으로써, 개인별 적절한 대응 유도함
 - 미세먼지 농도 데이터를 축적하여 향후 스마트 기술과 연계 가능(저감기술의 능동적·자동적 적용 및 관리)
 - 미세먼지 발생 억제·저감대책의 정량적·객관적 효과를 모니터링

7) 평택시에서는 기존의 국가측정망에 더하여, KT와의 협업을 통해 복지센터, 도서관 등에 30개소 측정망 설치, 관련 정보를 실시간으로 제공하는 앱을 개발하여 운영하는 중임.

그림 10 미세먼지 저감대책의 구성

출처: 저자 작성.

유형별 관리방향

- 유형 1) 크게 개선되어 현재 낮은 농도: 현 수준 유지를 위한 미세먼지 관리 필요**
 꾸준히 개선되어 이미 미세먼지 농도가 좋은 유형으로, 현행 미세먼지 저감대책 유지
- 유형 2) 크게 개선되어 왔으나 현재 높은 농도: 단기적·복합적 미세먼지 관리 필요**
 가까운 미래에 유형1로 변화할 가능성이 높은 유형으로, 현행 미세먼지 저감대책의 유지 및 보완 필요
 현재 수준은 나쁜 편으로, CMA와 광촉매 등과 같이 단기적 대책, 그린인프라 또는 저영향개발기법(LID)
- 유형 3) 약간 개선되어 현재 낮은 농도: 장기적·복합적 미세먼지 관리 필요**
 대도시권 중심의 적극적 배출량 감축 정책이 효과, 그러나 잠재적인 추가 개선 가능성은 크지 않아 장기적인 보완대책이 필요.
 개발밀도가 높고 자연지역이 부족한 대도시가 포함되어 있으므로, 벽면녹화, 옥상녹화 등의 생태적 기법, CMA와 광촉매 등의 화학적 기법과 같이 구조적 변경 없이 적용 가능한 대책을 도입하고 지속가능한 운영방안 수립 필요, 인구밀도가 높아 간이측정망 등 정보제공시스템 구축 관련 높은 효용성 예상 등 복합적 기능(심미적, 생태적, 물순환 또는 열섬 등)의 대책 도입 고려
- 유형 4) 개선이 정체·악화되었고 현재 높은 농도: 우선적·집중적 미세먼지 관리 필요**
 기존 미세먼지 저감대책을 비판적으로 재검토할 필요, 장기적으로 도시 공간에 바람길 형성하여 미세먼지를 신속히 배출하는 방안 고려
 우선적으로 지역별 미세먼지 집중관리지역을 설정, 노출 저감 시설(창호부착형 환기시스템, 미세먼지 쉼터)과 물리적인 흡입시설(스모스 프리타워) 도입 필요. 간이측정망 등 정보제공시스템 구축하여 시민의 대응력을 개선하고 미세먼지 발생원인 및 취약 지역을 과학적으로 밝히기 위한 데이터 축적 필요

■ 본 연구는 미세먼지 현황에 기초한 지역 유형과 위의 미세먼지 저감대책을 연계함으로써 지역 맞춤형 미세먼지 관리의 단초를 제공하고자 하였음

- 제안된 지역의 유형과 저감대책은, 향후 지역별 미세먼지저감·관리계획 수립 시 하나의 고려사항으로서 활용 가능
 - 지금까지 적용되어 온 미세먼지 저감대책의 효과를 비판적으로 검토하거나 향후 미세먼지 발생에 대한 선제적 대응에도 활용할 수 있음
- 본 연구는 현재 미세먼지 발생원과 현상 간 메커니즘이 정확하게 밝혀지지 않았고, 현재 시행 대책이 원인 중 하나인 배출원 감축에 집중된 상황에서, 미세먼지가 발생 이후의 현상을 집중적으로 다룸
- 이것은 본 연구가 선행 연구 및 대책에 대한 보완적 성격임을 의미하는 동시에 학술적 차별성에 해당
- 그러나 최근 국내에서 가장 큰 이슈 중 하나인 미세먼지 원인에 대한 근본적 해결은 다루고 있지 않으므로, 향후에는 이를 통합적으로 고려하기 위한 추가 연구가 필요

참고문헌

관계부처 합동. 2017. 미세먼지 관리 종합대책.

국가통계포털. 2020. 대기오염현황: 미세먼지(PM10) 월별 도시별 대기오염도. <http://kosis.kr/index/index.do> (2020년 3월 5일 검색).

국립환경과학원. 2007. 수도권지역 미세먼지 오염현상 해석 및 장애 예측 - 최종보고서. 서울: 이화여자대학교 산학협력단

국토연구원. 2020. 도시의 적(敵) 미세먼지, 줄일 수 있을까?. 국토이슈리포트 11호. 세종: 국토연구원.

권유진, 안세걸, 이동근, 윤은주, 성선용, 이기승. 2018. 열수지를 활용한 서울시 열환경 개선을 위한 공간유형화. 국토계획 제53권 제7호: 109-126.

김영옥, 이현승, 장유진, 이혜진. 2015. 언론은 미세먼지 위험을 어떻게 구성하는가?. 한국언론학보 제59권 제2호: 121-154.

김자연, 김호, 정권. 2018. 서울시의 시간별 미세먼지 농도변화와 응급실 방문과의 연관성. 대한공공의학회지 제2권 제1호: 57-71.

김진옥, 한승훈. 2019. 자연기반 야외활동 참여자의 가치가 미세먼지위험지각과 책임귀인을 통해 환경정책지지에 미치는 영향. 관광연구저널 제33권 제3권: 5-20.

김정곤, 경대승, 이성희. 2018. 미세먼지 저감 도시 조성기법 및 사례 연구. 대전: 한국토지주택공사.

박순애, 신현재. 2017. 한국의 초미세먼지(PM2.5)의 영향요인 분석: 풍향을 고려한 계절성 원인을 중심으로. 환경정책 제25권 제1호: 227-248

부산광역시. 2015. 부산광역시 미세먼지 발생원별 저감대책, 부산: 부산광역시.

서미숙. 2015. 미세먼지 농도가 경제활동시간에 미치는 영향. 여성경제연구 제12권 제1호: 75-100.

성선용. 2020. 미세먼지 농도의 공간적 현황 및 잠재영향인자를 고려한 환경계획적 대응 방향. 한국환경복원기술학회 제23권 제1호: 89-96.

여민주, 김용표. 2019. 우리나라 미세먼지 농도 추이와 고농도 발생 현황. 한국대기환경학회지 제35권 제2호: 249-264.

이선엽, 유솔, 이동재, 송현선, 김보경, 윤동민, 김성렬. 2015. 한국 성인들의 초미세먼지 특성과 위해성에 대한 인지수준 평가. 한국생활환경학회지 제22권 제3호: 398-406.

임소영, 조재한. 2017. 미세먼지 추이의 국별·지역별 비교와 정책 시사점. 세종: ㈜유성사.

전라북도. 2017. 빅데이터 활용 전라북도 미세먼지 원인분석. 전주: 한국국토정보공사.

최충익, 김철민. 2016. 미세먼지 정책의 경로의존성과 위험의 사회적 확산. 한국지역개발학회지 제28권 제5호: 89-108.

통계청. 2018. 2018년 사회조사 결과. 11월 5일. 보도자료.

평택시 공기질 서비스. 2020. http://www.ktbiz5g.co.kr/GG_PT/forecast/index.html (2020년 3월 12일 검색).

AirKorea. 2020. 측정망정보. <https://www.airkorea.or.kr/web> (2020년 3월 4일 검색).

Bell, M. L., Son, J. Y., Peng, R. D., Wang, Y., and Dominici, F. 2015. Ambient PM2.5 and Risk of

Hospital Admissions: Do Risks Differ for Men and Women? *Epidemiology*, Epub ahead: PMID 25906368.

Chu, H., Venevsky, S., Wu, C., and Wang, M. 2019. NDVI-based vegetation dynamics and its response to climate changes at Amur-Heilongjiang River Basin from 1982 to 2015. *Science of the Total Environment* 650: 2051-2062.

Ding, L., Zhu, D., and Peng, D. 2015. Meta-analysis of the relationship between particulate matter (PM10 and PM2.5) and asthma hospital admissions in children. *Zhonghua Er Ke Za Zhi* 53, no.2: 129-135.

Du, J., Shu, J., Yin, J., Yuan, X., Jiaerheng, A., Xiong, S., He, P., and Liu, W. 2015. Analysis on spatio-temporal trends and drivers in vegetation growth during recent decades in Xinjiang, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 38: 216-228.

International Agency for Research on Cancer(IARC). 2013. IARC: Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths. Press release. France

Janssens, W., De Pelsmacker, P., Wijnen, K., and Van Kenhove, P. 2008. *Marketing research with SPSS*. Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall.

KBS 뉴스. 2019. 미세먼지 '나쁨' 때만 호들갑?...세상에 ' 좋음' 미세먼지는 없다. 11월 11일, <http://news.kbs.co.kr/news/view.do?ncd=4321057&ref=A> (2020년 3월 10일 검색)

Kim, B., Yoon, E. J., Kim, S., and Lee, D. K. 2020. The effects of risk perceptions related to particulate matter on outdoor activity satisfaction in South Korea. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17: 1613

Kim J., Kim, H., and Kweon, J. 2018b. Association between hourly differences of Particulate matters concentration and Emergency department visits in Seoul. *Public Health Aff.* 2, no.1:57-71.

Kim O. J., Kim, S. Y., and Kim, H. 2017. Association between Long-Term Exposure to Particulate Matter Air Pollution and Mortality in a South Korean National Cohort: Comparison across Different Exposure Assessment Approaches. *Int J Environ Res Public Health* 14, no.10: 1103.

Kim, T. Y., Kim, H., Yi, S. M., Cheong, J. P., and Heo, J. 2018a. Short-term Effects of Ambient PM2.5 and PM2.5-10 on Mortality in Major Cities of Korea. *Aerosol and Air Quality Research* 18: 1853-1862.

Kim, C., Jung, S. H., Kang, D. R., Kim, H. C., Moon, K. T., Hur, N. W., Shin, D. C., and Suh, I. 2010. Ambient Particulate Matter as a Risk Factor for Suicide. *The American Journal of Psychiatry* 167, no.9: 1100-1107.

Pang, G., Wang, X., and Yang, M. 2017. Using the NDVI to identify variations in, and responses of, vegetation to climate change on the Tibetan Plateau from 1982 to 2012. *Quaternary International* 444: 87-96.

SBS 뉴스. 2019. 국민 80% “매년 12월~2월 미세먼지 집중 저감책 원한다” 11월 17일, <https://cnbc.sbs.co.kr/article/10000962547?division=NAVER> (2020년 3월 10일 검색)

국토연구원 Working Paper는 다양한 국토 현안에 대하여 시의성 있고 활용도 높은 대안을 제시할 목적으로 실험정신을 가지고 작성한 짧은 연구물입니다. 투고된 원고는 정해진 절차를 거쳐 발간되며, 외부 연구자의 투고도 가능합니다. 공유하고 싶은 새로운 이론이나 연구방법론, 국토 현안이나 정책에 대한 찬반 논의, 국내외 사례 연구나 비교연구, 창의적 제안 등 국토분야 이론과 정책에 도움이 될 어떠한 연구도 환영합니다.

투고를 원하시는 분은 국토연구원 연구기획·평가팀(044-960-0582, jhkim@krihs.re.kr)으로 연락주십시오. 채택된 원고에 대해서는 소정의 원고료를 드립니다.

WP 20-02

미세먼지 농도의 변화 추세를 고려한 공간 유형 구분

연 구 진 윤은주
발 행 일 2020년 7월 9일
발 행 인 강현수
발 행 처 국토연구원
홈 페이지 <http://www.krihs.re.kr>

© 2020, 국토연구원

이 연구보고서의 내용은 국토연구원의 자체 연구물로서 정부의 정책이나 견해와는 상관없습니다.

이 연구보고서는 한국출판인협회에서 제공한 KoPub 서체와 대한인쇄문화협회가 제공한 바른바탕체가 적용되어 있습니다.

