

지역 차원의 미세먼지 관리를 위한 권역 설정 및 특성에 관한 연구*

A Study on the Establishment of PM₁₀ Management Zones and Their Characteristics at the Regional Level

백정희** · 송재민***

Jeonghee Baek · Jaemin Song

요약: 효과적인 미세먼지 관리를 위해서는 미세먼지의 초월경적 특성을 고려한 지역적 차원의 관리가 필수적이다. 하지만 아직까지 미세먼지 관리 권역 식별 및 관리에 대한 연구는 매우 미비하다. 이와 같은 배경에서 본 연구는 전국을 대상으로 미세먼지 영향과 배출특성을 분석하여 미세먼지 관리 권역을 식별하는 방법을 제안하고 권역별 특성을 분석하는 것을 목적으로 한다. 본 연구에서는 마코브 체인 특성을 활용하여 미세먼지 농도 특성에 따라 지역을 구분하고 지역별 배출 특성을 분석하였다. 분석 결과, 우리나라의 시군구는 미세먼지 고위험지역, 주의지역, 관심지역의 4개 권역으로 구분되었다. 또한, 배출특성 분석결과 효과적인 배출원 관리를 위해서는 전국적으로 배출량이 많은 배출원을 중심으로 저감 대책을 시행하는 것도 중요하나 지역적 배출특성을 고려한 지역맞춤형 저감 정책이 도입되어야 함을 확인하였다. 본 연구의 결과는 향후 지역적 차원의 미세먼지 저감 및 대응 정책 설계 및 이행에 있어 기초자료로 활용될 것으로 기대되는 바이다.
핵심주제어: 미세먼지, 관리권역, 농도유사성, 마코프체인 속성, 배출특성

Abstract: Regional collaboration on particulate matter is critical for its successful management, given its transboundary characteristics. However, studies on how to design and implement regional management schemes for its management are absent. Against this backdrop, the purpose of this study is to explore methods to identify regional zones with similar concentrations of particulate matter by using Markov chain characteristics and to investigate the emission source characteristics in each zone. Therefore, we identified four regional zones in Korea: high danger zone with the highest concentration, danger zone, warning zone, and caution zone. The results from the assessment of emission characteristics in each zone indicate that each zone has different emission profiles and, furthermore, that the level of their own contribution to its PM₁₀ concentration varies across the zones, confirming the need to develop appropriate regional measures in each zone for particulate matter management.

Key Words: PM₁₀, Management Zones, Concentration, Markov-Chain Process, Emission Characteristics

* 본 논문은 백정희의 석사학위논문을 수정·보완한 것으로, 이 논문은 2019년도 서울 시립대학교 연구년 교수 연구비에 의하여 연구되었음.

** 주저자, 서울시립대학교 도시공학과 석사과정

*** 교신저자, 서울시립대학교 도시공학과 부교수

I. 서론

미세먼지(PM_{10})는 심뇌혈관 질환, 호흡기 질환의 중요한 유발원 중 하나로 세계보건기구(WHO)가 지정한 1급 발암물질이다(IARC, 2013). 우리나라의 경우 2015년 기준 연평균 미세먼지(PM_{10}) 및 초미세먼지($PM_{2.5}$) 농도는 각각 $45\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $12\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, WHO 연평균 권고기준인 $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비해 매우 높은 상황이다(WHO, 2015). 현재 미세먼지는 단순한 환경문제를 넘어 국민의 건강과 일상생활(장평린·최막중, 2018, p.142), 경제(Wu et al., 2015, p.28)에 이르기까지 우리 사회에 직·간접적으로 광범위한 영향을 미치고 있다.

미세먼지 문제 해결의 가장 큰 어려움 중 하나는 미세먼지의 초월경적 특성(transboundary characteristic)이다. 미세먼지는 백에서 수천 km까지 장거리를 이동하여 도시, 지역을 넘어 다른 국가에까지 영향을 미치기 때문이다. 미세먼지의 초월경적 특성은 단일 지자체 단위의 미세먼지 저감 노력만으로는 해당 지역의 미세먼지 저감이 쉽지 않음을 의미한다. 이에 있어 다수의 선행연구들(Bergin et al., 2005; Castells and Ravetz, 2001; Wang et al., 2016; Wu et al., 2015)이 미세먼지 기작 및 농도 등 과학적 데이터를 기반으로 효과적인 미세먼지 관리를 위한 지역 차원의 접근이 필요함을 주장하고 있다. 또한, 미세먼지 저감 달성을 위해 지역차원의 목표설정 및 관리가 이루어졌을 때 동일한 수준의 환경목표 달성이 보다 비용 효과적으로 이루어질 수 있어, 경제적 관점에서도 지역 차원의 미세먼지 관리 필요성이 제기되고 있다(Wu et al., 2015). 하지만, 지역적 차원의 미세먼지 관리를 위한 제도적 장치 없이는 자발적인 지역차원의 미세먼지 저감 협력을 기대하기는 어렵다(Wu et al., 2015; Wang et al., 2016; Xie et al., 2018).

한편, 우리나라의 경우 최근 미세먼지 심각성이 증가하면서 2019년 2월 「미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법(이하 미세먼지법)」을 제정하여 본격적으로 미세먼지를 관리하기 위한 법적 근거를 마련하였다. 이와 함

게 우리나라에서는 「대기환경보전법」 등 관련 법에 의해 미세먼지 관리 기준을 강화하고, 이에 따라 지방자치단체는 개별적으로 미세먼지 관련 조례를 제정하도록 하고 있다. 하지만, 광역시와 수도권을 제외한 나머지 지방자치단체의 대책은 아직까지 선언적 규정에 그치고 있으며 실제로 명확한 조치방안이 제시되고 있지 않은 실정이다(김남욱, 2017, p.475). 이와 같은 배경에서 환경부는 기존의 수도권 및 대도시 중심의 개별적 관리 체계에서 지역차원의 미세먼지 통합적 관리 체계구축을 계획하고 있다(환경부, 2016).

하지만 아직까지 구체적인 지역 관리 체계에 대한 논의 및 관련 연구는 거의 이루어지지 않고 있는 실정으로, 미세먼지 관리정책의 실효성 확보를 위해서는 기존의 수도권 중심에서 벗어나 전국을 대상으로 미세먼지 영향과 배출에 대한 과학적 분석을 바탕으로 한 지역 관리 기초 연구가 시급하다. 이와 같은 배경에서 본 연구는 효과적인 미세먼지 관리를 위한 지역적 관리 체계 마련을 위한 기초 연구로서, 미세먼지(PM_{10}) 영향의 광역적 특성을 규명하고 유사 농도 영향 권역 내의 미세먼지 집중배출지역과 배출원 특성을 파악하여 미세먼지 관리를 위한 지역 권역 설정방안을 모색하고 지역 관리 방안에 대한 시사점을 제시하고자 하였다.

II. 미세먼지 관련 정책 및 선행연구 고찰

1. 미세먼지 지역적 관리

미세먼지의 지역적 관리 필요성은 크게 미세먼지의 초월경적 특성을 고려한 과학적 측면과 경제적 측면에서 제기되고 있다. 우선 과학적 측면에서 미세먼지는 발생 기작이 복잡하며 도시 자체 배출뿐만 아니라 인접 도시 및 지역에서 배출된 물질에 의해 영향을 받기 때문에 미세먼지 저감을 위해서는 지역간 협력이 필수적이다(Bergin et al., 2005; Wang and

Zhao, 2018). Wang et al.(2016)은 2014년 중국에서 개최되었던 아시아-태평양 경제 공동체 행사를 위한 베이징을 중심으로 주변 지역에 위치한 도시간의 협력이 행사 기간 중의 미세먼지 저감에 절대적인 영향을 미쳤음을 실증적으로 보여주면서, 단일 지자체가 아닌 지역 차원의 협력적 미세먼지 저감 노력의 중요성을 시사하였다. 한편, 비용 효과적인 경제적 측면에서도 지역 차원의 미세먼지 관리가 필요하다. Wu et al.(2015)은 각 도시의 특성에 따라 미세먼지 한계 저감 비용(marginal reduction cost)이 상이하여 단일 도시 별 미세먼지 저감 목표가 아닌 지역적 차원의 목표 설정을 통해 가장 낮은 비용으로 미세먼지 저감이 가능한 곳에서의 저감 노력을 우선적으로 유도할 수 있다는 것을 보여주었다.

우리나라의 경우에는 주로 배출원별 기여도에 대한 논의를 바탕으로 미세먼지의 지역 관리 필요성이 제기되고 있다. 김순태 등(2017)은 2015년 국내 초미세먼지($PM_{2.5}$) 일평균 농도와 대기정책지원시스템(Clean Air Policy Support System, 이하 CAPSS) 자료를 활용하여 국내외 권역별 배출 기여도를 산출하여, 국내 초미세먼지의 59%는 국외 배출원 영향, 41%는 국내 배출원으로 유발되며 특히 지역 자체에 의한 평균 기여도는 약 13%로 매우 낮게 나타났음을 보여주고 있다. 김순태 등(2017)은 이와 같은 결과를 바탕으로 효율적인 미세먼지 관리를 위해서는 지역 자체에서의 배출 감소뿐만 아니라 주변 지역과의 공동의 노력이 필요함을 제기하고 있다. 이재범 등(2017)은 2014년 수도권 지역의 미세먼지(PM_{10}) 농도에 대한 기여도 분석을 통해 국내 영향은 45%, 국외 영향은 55%이며, 국내 영향 중 수도권 자체의 영향이 30%, 비수도권영향이 15%로 나타났으며 그 중 충청권의 대형 오염원의 영향은 2%를 차지하는 것을 보였다. 김운수 등(2016)은 서울시의 2015년 10월 월평균 미세먼지(PM_{10}) 농도에 대한 지역별 배출원 기여도를 분석하여, 국외 기여가 46.52%이며, 국내 지역별 기여는 각각 서울시 자체 31.73%, 인천 2.29%, 경기 14.08%, 수도권 외 5.3%임을 밝혔다. 이와 같이 연구에 따라 국외 기여도와 국내 지역 간 상호 기여도에 대한 정확한 수치는 연구마다 차이가 있게 나타났지만, 선

행연구에서는 공통적으로 미세먼지 발생과 영향 특성을 고려할 때 각 지자체의 개별적인 노력뿐만 아니라 주변 지역과 연계한 공동의 대응 노력이 필요하다는 필요성을 제기하고 있다.

2. 미세먼지 관리 관련 정책

1) 미세먼지 관리 관련 정책¹⁾

국내 미세먼지 관리 관련 정책은 크게 미세먼지 저감과 대응 측면으로 분류할 수 있으며 이를 중앙정부와 지방자치단체 차원으로 구분하면 다음과 같다. 중앙정부는 지난 2017년 『미세먼지 관리 종합대책』을 수립함으로써 미세먼지 저감 및 적응 대책을 마련하였다. 저감 대책은 2022년까지 미세먼지 국내 배출량을 30% 저감 하는 것을 목표로 하고 있으며 미세먼지 주요 배출원을 기준으로 발전, 산업, 수송, 생활의 4개 부문으로 구분하여 부문별 단기 및 중장기 대책을 제시하였다. 노후 석탄발전소 폐지, 굴뚝 자동측정기기(TMS)부착 의무화, 노후 경유차와 화물차 저공해 추진 등이 이에 해당한다. 대응 대책의 주요 추진과제는 미세먼지 민감 계층 보호와 정책기반 강화를 주요 내용으로 한다. 미세먼지 측정소 확대와 민감계층 이용시설에 공기정화장치 설치, 대국민 교육 시행 등의 정책을 포함하고 있으며, 미세먼지 생성메커니즘 등 관련 분야 연구 능력을 강화하고 인공지능(AI) 대기질 예·경보 구축을 포함한 과학기술 기반 대응역량을 제고하여 미세먼지 대응기반을 강화하고자 한다.

미세먼지에 관한 본격적인 법제도는 2019년 2월에 『미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법(미세먼지법)』을 제정하면서 시작되었다. 미세먼지법은 미세먼지 고농도 시 자동차 운행제한, 배출시설 가동률 조정, 시차 출·퇴근 등의 대응조치 강화, 취약계층을 배려한 집중관리구역 지정과 공기정화시설 배치 지원, 미세먼지 특별대책위원회와 미세먼지 개선기획단 등

1) 관계부처합동, 2017, “미세먼지 관리 종합대책”과 국가법령정보센터(www.law.go.kr)를 참고하여 요약 및 재구성하였음.

의 미세먼지 전담조직 설치 등을 주요 내용으로 하고 있다. 또한, 미세먼지 관리 거버넌스로서 환경부를 주 부처로 지정하고, 기획재정부, 산업통산자원부, 국토교통부 등 관련 부처와의 협의를 주요 전략으로 제시하고 있다. 하지만, 이와 같은 거버넌스는 실제로 효과적으로 작동하고 있지 않아 실효성보다는 상징적 전략이라는 한계점이 있다고 비판받고 있다(김남욱, 2017).

한편, 미세먼지 문제가 심각해짐에 따라 특히 광역시를 중심으로 최근 지자체 차원의 정책들이 제안되고 있다. 서울특별시, 인천광역시, 부산광역시 등의 광역도시를 중심으로 자동차 배출가스 친환경 등급제 도입, 지역 특성에 맞는 공해차량 지정 등을 수립하였다. 충청남도, 전라남도 등의 도차원에서는 석탄화력발전소의 관리 강화, 전기자동차와 전기충전소 보급 등을 도입하였다. 각 지방자치단체의 미세먼지 관리정책을 종합하면 미세먼지 적응 대책으로는 미세먼지 마스크 보급, 시민 교육 등이 있으며, 노후 석탄화력발전소 관리, 친환경 자동차 보급, 물청소 등이 주요한 저감 대책으로 논의되고 있다.

2) 국내 대기오염 관리권역

국내 미세먼지를 포함한 대기오염물질 관리를 위한 권역은 다음 세 가지이다. 첫 번째는 2010년부터 시행되고 있는 수도권 대기관리권역으로 『수도권 대기환경개선에 관한 특별법』에 따라 수도권지역 중 대기오염이 심각하거나 수도권지역의 대기오염에 크게 영향을 미친다고 인정되는 지역이다.²⁾ 미세먼지를 포함한 질소산화물, 황산화물, 휘발성유기화합물을 대상으로 수도권 사업장 내의 배출량 총량관리, 자동차배출가스의 억제, 휘발성유기화합물배출 억제 등의 규제가 주요 내용이다.

대기환경규제지역은 대구권역, 광양만권역을 대상으로 대기질의 개선이 긴급하다고 인정하는 지역의 환경기준 달성을 위하여 1997년에 지정

2) 『수도권 대기환경개선에 관한 특별법』제2조2항.

되었다.³⁾ 주로 오존과 이산화질소를 중심으로 한 지역배출 허용량 기준 제시, 배출시설 규제 등을 주요 내용으로 삼고 있다. 그러나 미세먼지에 대한 구체적인 규제 체계를 갖고 있지 않아 미세먼지 관리의 실효성에 대한 논의가 이루어지고 있다(고경훈 등, 2018). 1999년에 지정된 대기특별대책지역은 앞서 제시한 관리지역에 비해 공간적 범위가 매우 작다. 대기특별대책 대상 지역은 울산광역시 울산·미포 및 온산 국가산업단지와 전라남도 여수시 여천국가산업단지 및 확장단지이다. 대기오염물질별 배출시설에 따른 배출허용기준을 제시하고 있으며 신규업체 입주 제한, 용도지역 관리 등이 주요 내용이다. 그러나 특별대책지역 또한 대기환경규제지역과 마찬가지로 미세먼지에 대한 고려가 없어 미세먼지 문제를 대응하기에는 다소 어려움이 있는 관리권역이다(고경훈 등, 2018).

한편, 대기오염문제가 심각해짐에 따라 정부는 『수도권 대기환경개선에 관한 특별법』을 확대 및 개정한 법안인 『대기관리권역의 대기환경개선에 관한 특별법(약칭:대기관리권역법)』을 2020년부터 시행할 계획에 있다. 대기오염문제를 체계적이고 광역적으로 관리하기 위함을 목적으로 하며 대기관리권역 지정에 대한 논의는 최근에 이루어지고 있다.

3. 미세먼지 관련 연구 동향

미세먼지 관련 국내 연구는 꾸준히 증가하고 있으나 대부분의 연구는 대기, 기상, 화학공학 등 자연과학 분야에서의 미세먼지의 화학적 특성, 확산 기작 및 제거 등에 관한 연구가 주를 이루고 있다(김순태 등, 2017; 김운수 등, 2016). 사회과학 분야에서는 주로 단순한 미세먼지의 시공간적 분포 특성과 영향 요인 분석(이종현 등, 2017; 정종철, 2014, 박충선, 2017; Li et al., 2015; Gong et al., 2017), 취약계층에 대한 미세먼지의 영향 등에 관한 연구(김동영 등, 2013; 배현주, 2010)가 주를 이루고 있다.

미세먼지의 시공간적 특성과 원인을 규명하기 위해 이종현 등(2017)은

3) 『대기환경보전법』제8조의3항.

공간패널 모형을 활용하여 대기 물질 및 기상 환경이 초미세먼지 농도에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과 풍속과 강수량이 미세먼지 농도를 낮추고 자동차 수가 많을수록 미세먼지 농도를 증가시키는 것으로 나타났다. 정종철(2014)은 서울시 행정구역 단위에서 교통량, 인구활동, 공사장과 CAPSS 데이터를 활용하여 미세먼지 발생원별 발생량 자료를 분석하여 2010과 2011년의 미세먼지 연간 평균 농도 차이를 분석하였다. 박충선(2017)은 2015년 서울시의 미세먼지 농도 변화와 기상 조건이 미세먼지 이동에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 그 결과 서울시 미세먼지 농도와 기상 조건의 관계는 통계적으로 낮은 수준의 관련성을 가졌으며 기상 조건이 아닌 토지피복, 차량 통행 및 산업활동 등의 요인이 미세먼지 농도에 영향을 미치고 있음을 보였다. 국외의 경우 Li et al.(2015)는 지리가중회귀를 활용하여 식물식재, 인구밀도, 토지이용패턴 등이 미세먼지에 미치는 영향에 대해 분석하였으며, Gong et al.(2017)은 공간지연모형을 활용하여 기상요인, 산업화, 도시화 등의 요인이 대기질에 영향을 주고 있음을 밝혔다.

도시계획 분야에서의 미세먼지 관련 국내 연구는 도시공간과 미세먼지를 포함한 대기오염의 관계를 분석한 연구들이 주를 이루었다(최열 등, 2007; 김승남 등, 2009; 이원도 등, 2011; Goswami et al., 2002; Larkin et al., 2016). 최열 등(2007)은 도시공간특성요소를 인구특성, 토지이용특성, 주택건설특성, 도로교통특성, 산업경제특성으로 구분하여 패널모형을 구축하였으며 대기환경오염도와의 영향 관계를 분석하였다. 그 결과 대기오염물질에 따라 도시공간특성요소가 미치는 영향은 상이하나 녹지면적과 도시공원면적이 대기오염 저감에 중요한 요소임을 밝혔다. 김승남 등(2009)의 연구에서는 압축도시의 특성이 대기오염에 미치는 영향에 대해 분석하였으며 도시공간을 거시적인 관점으로 다핵화수준, 압축도 수준, 행정구역 형태를 구분하였으며 경로 분석을 시행하였다. 그 결과 다핵집중형 도시가 대기오염 저감에 효과적인 형태임을 밝혔다. 국외에서는 Goswami et al.(2002)가 고도, 주간선도로, 주요 미세먼지 배출원에 대한

데이터를 활용하여 도시공간 특성이 미세먼지에 미치는 영향에 대해 분석하였으며 가장 큰 영향을 주는 요인은 간선도로임을 밝혔다. Larkin et al.(2016)은 압축지수, 인구밀도, 지표, 인공조명이 미세먼지에 미치는 영향에 관해 연구하였으며 도시특성의 변화가 대기오염에 큰 영향을 미침을 밝혔다.

4. 권역 설정에 관한 연구

여러 도시가 경제적, 사회적 동질성을 지니고 있으나 정치적, 행정적인 이유로 이질적인 공간 단위를 형성하고 있어 발생하는 재원의 중복투자 및 자원의 비효율성 방지하기 위하여 환경, 교통 시설 등의 입지 등 같은 경우 지방정부 간의 협력이 요구된다(권창기·정현욱, 2016). 따라서 도시 및 환경문제 해결, 효율적인 국토 관리 등을 위하여 지역적 차원에서의 접근이 이루어지고 있으며 이에 따른 권역 설정에 관한 연구들이 진행되고 있다. 권역 설정에 관한 연구는 도시관리 측면에서 광역도시권, 대도시권 설정에 관한 연구가 주를 이루고 있으며 환경 분야 중에서는 주로 대기, 산림 분야에서 관리권역 설정에 관한 연구가 이루어져 왔으나 미세먼지의 권역 설정 연구는 현저히 부족한 실정이다. 선행연구를 살펴본 결과, 다양한 방법론을 활용하여 권역을 설정하였으며 대표적으로 활용한 방법으로는 비교적 간단한 방법인 군집분석과 GIS를 이용하여 공간 특성을 고려한 방법, 객관적이고 확률적인 방법을 활용한 마코프체인 모형 등이 있다.

군집분석을 활용한 연구는 국내 해상예보구역에 대한 고찰을 위해 한반도 해상을 구역별로 분류하거나(손고은 등, 2015), 광역적 차원에서 도시 성장관리정책 수립을 위해 지역특성의 유사성을 기반으로 대도시권 설정을 위해 활용되었다(전병혜 등, 2008). 한편, 정성관 등(2008)의 연구에서는 GIS 네트워크 기법을 활용하여 도시녹지의 관리권역을 설정하였으며, 김미현 등(2015)은 환경정의 측면에서 소외계층을 고려한 공원 확충 대상지 선정을 위해 GIS의 중첩분석을 활용하였다. 중국을 대상으로 한 미세먼지 관리 권역 설정을 위해 Xie et al.(2018) 또한 미세먼지 관련 주요

지표값을 군집분석하여 중국의 미세먼지 지역 관리를 위한 지역 설정 방법론을 제시하였다.

수학적이고 계량적인 방법을 통한 객관적인 권역설정을 위해 마코프체인 모형을 활용하여 수행한 연구도 다수 있다. 김도형·우명제(2018)는 전국 시군을 대상으로 거점도시의 영향권을 기능적 네트워크를 기준으로 설정하기 위하여 마코프체인 모형을 활용하였다. 김학열(2010)은 서울시를 대상으로 기존의 오존경보권역의 적정성을 평가하고 평상시 오존관리권역을 새롭게 설정하였는데, 그 결과 기존의 관리권역이 동일 권역으로 처리하기 어려운 점을 밝혔으며 통합전이행렬을 활용하여 오존관리권역을 새롭게 설정하면 효과적인 운영이 이루어질 것이라 밝혔다. 김학열 등(2007)의 연구에서는 서울시의 미세먼지오염에 대한 예·경보제 및 정책에 활용하기 위하여 마코프 연쇄 모형을 구축하였다. 일평균 농도를 서울시 조례에 따라 4단계의 상태를 정의하였으며 그 변화 양상을 월별로 기록하여 월별전이행렬을 구하였다. 또한 기대재귀시간을 산출하여 심각한 미세먼지오염에 노출되어 있는 자치구(중구, 은평구, 광진구, 도봉구 등)를 선별하였으며 저감 대책 및 체계적인 접근이 필요함을 역설하였다

그 외 연구들에서는 도시권 설정을 위해서 중심도시와의 거리, 도달 시간을 기준으로 권역으로 설정하거나 연계성 지표 등과 같은 지표를 개발하여 권역을 설정하였다(장환영 등, 2012; 주승민 등, 2014). 또한, 오존관리권역을 설정하기 위하여 주성분 분석을 활용하여 동질한 대기질을 나타내는 지역을 탐색하거나(유은철 등, 2004) 측정망의 위치 적정성을 평가하여 관리권역의 타당성을 분석하였다(전미경 등, 1998).

5. 소결

국내 미세먼지 발생일이 증가함에 따라 정부와 지자체 차원에서 다양한 미세먼지 저감 및 적응 대책을 제시하고 있다. 그러나 대부분 수도권 또는 광역시를 중심으로 이루어지고 있으며 배출특성을 고려하지 않고 이동오염원 관리에 중점을 두고 있다. 또한, 기존의 세 가지 대기오염관리 권역

의 경우 미세먼지를 대기오염물질로 포함하고 있는 권역도 존재하지만, 미세먼지에 대한 문제의식이 낮았던 시기에 지정되어 미세먼지에 대한 효과적인 관리는 이루어지고 있지 않다. 뿐만 아니라 권역을 지정한 기준이 “대기오염이 심각한 지역”이라는 다소 모호하거나 산업단지 위주의 좁은 공간적 범위라는 한계점이 존재한다. 이러한 기존의 관리권역의 한계와 대기오염문제의 심화로, 수도권 대기관리권역이 확대하여 『대기관리권역법』을 새롭게 제정하여 2020년부터 시행하고자 하지만 아직 관리권역에 대한 구체적인 사항은 결정되지 않았다. 따라서, 전국을 대상으로 미세먼지 지역 관리에 대한 연구가 필요하지만, 현재까지 미세먼지 관련 연구는 주로 미세먼지의 공간적 분포 특성, 도시 공간과 미세먼지의 특성 등을 중심으로 한 연구가 주를 이루고 있다.

한편, 선행연구 검토 결과 국토 관리, 성장 관리를 위한 다양한 지역 식별 방법론이 활용되고 있다. 군집분석은 비교적 계산 방법이 간단하지만, 군집의 수를 미리 정해주어야 하며 이 값에 따라 군집의 결과가 달라질 수 있다. 중첩분석은 공간적 분포의 지역적 현상을 시각화하기에 적절한 방법이지만 분석하는 레이어의 개수가 많아지면 분석에 한계가 존재한다(추장민 등, 2007). 마코프체인은 경우 계산 과정이 복잡하고 상태조건을 미리 지정해야 하는 단점이 있지만, 분석 자료의 양에 구애받지 않아 다변량 자료의 분석이 가능하다. 이와 같은 배경에서 본 연구에서는 전국을 대상으로 객관적이고 정량적인 방법인 마코프체인 특성 통해 미세먼지 영향권을 식별하고 이를 바탕으로 배출특성을 분석하여 효과적인 미세먼지 관리를 위한 체계 구축에 시사점을 제공하고자 한다. 본 연구는 미세먼지의 지역적 관리의 필요성을 제고하고 통합적 관리 측면에서 접근했다는 점에 있어서 차별성이 있다.

Ⅲ. 분석의 틀

1. 연구의 범위 및 흐름

본 연구의 공간적 범위는 전국 252개의 시군구 중 섬 지역을 제외한 248개의 시군구를 대상으로 한다. 미세먼지 농도의 공간적인 유사성을 분석하기 위하여 제주특별자치도를 포함한 4개의 섬 지역(인천광역시 옹진군, 경상북도 울릉군, 경상북도 울릉군 독도리)은 제외하였다. 시간적 범위는 배출량 최신 자료를 구득할 수 있는 2015년으로 설정하였다. 분석에 사용된 미세먼지 농도 데이터는 에어코리아(AirKorea)에서 제공하는 자료로 2015년 기준 약 270개의 측정소에서 1시간 단위로 측정된 PM_{10} 농도이다. 본 연구에서는 $PM_{2.5}$ 가 아닌 PM_{10} 만을 고려하였는데, 이는 PM_{10} 이 $PM_{2.5}$ 보다 대기 중의 화학적 반응이 상대적으로 적어 직접적인 배출량 산출이 보다 정확하기 때문이다(장영기, 2016). 미세먼지 배출량 데이터는 국립환경과학원에서 제공하는 대기정책지원시스템(Clean Air Policy Support System, 이하 CAPSS)으로 산정한 미세먼지 배출량 자료를 활용하였다. 연구의 흐름은 <그림 1>과 같다.

<그림 1> 연구의 흐름



2. 분석 방법

1) 미세먼지 농도 자료 구축

전국 시군구의 미세먼지 농도는 2015년 기준 이용가능한 약 270개로 관측소 자료를 공간 보간하여 사용하였다. 공간 보간은 역거리가중법(Inverse Distance Weighted Method), 크리깅(Kriging), 스플라인(spline) 등이 있는데, 본 연구에서는 역거리가중법을 사용하였다. 이 방법은 실측점 사이의 값을 추정하는 방법으로 서로 인접한 사이의 점은 유사한 값을 가지며 거리가 멀어질수록 유사성이 떨어진다는 개념에 기초하여 값을 추정하는 방법으로 추정하는 방식은 식 (1)과 같다(정규용 등, 2010).

$$Z_p = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}, \quad W = \frac{1}{d_i^2} \quad (1)$$

보간 되어질 격자 값인 Z_p 은 주변 격자 값인 Z_i 에 가중치 W 를 곱하여 두 격자 사이의 거리의 제곱(d_i^2)에 반비례하여 계산된 값이다. 본 연구에서는 보간된 미세먼지 농도를 분석 방법에 따라 일평균 또는 월평균 값으로 변환하여 사용하였다.

2) 마코프체인 특성

시간에 따라 어떤 사건이 발생하는 확률이 변하는 것을 확률과정이라고 할 때, 이를 이용하여 미래의 상태변화를 추계하는 과정을 마코프 연쇄(Markov Chain) 모형이라고 한다. 산출된 미래의 확률은 과거의 상태와 무관하며 시간이 지나도 일정하다는 특성을 가진다. 따라서 현재의 상태와 오랜 시간 변화에 따른 상태변화를 기록하여 전이확률(Transition Probability)을 산출하면 특정한 시간의 상태확률을 계산할 수 있으며, 이

확률을 이용하여 상태별로 장기적인 확률 즉, 일정한 값으로 산출된 미래의 확률을 예측할 수 있다.

〈표 1〉 전이행렬과 상태정의 표

from \ to	1	2	...	j	...	m	상태	범위($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	비고 (국내 미세먼지 경보 기준)
1	P_{11}	P_{12}		P_{1j}		P_{1m}	1	$0 < S \leq 30$	좋음
2	P_{21}	P_{22}		P_{2j}		P_{2m}	2	$30 < S \leq 80$	보통
...	...	...		...		...	3	$80 < S \leq 150$	나쁨
i	P_{i1}	P_{i2}		P_{ij}		P_{im}	4	$150 < S$	매우 나쁨
...	...	...		...		...			
m	P_{m1}	P_{m2}		P_{mj}		P_{mm}			
	전이행렬						상태정의		

전이확률을 계산하는 과정은 다음과 같다. 첫째, 본 연구에서는 일평균 미세먼지 농도를 〈표 1〉과 같은 상태 1에서 상태 4까지 4개의 상태로 구분하였다. 일평균 농도가 특정 상태로부터(from) 다음날의 상태(to)로의 변화 흐름을 365일 기록하였으며 이를 상태(행)-상태(열)로 구성된 행렬로 나타냈다. 하나의 상태에서 다른 상태로 변환하는 개수를 계산하여 각 행별 총합을 구하고 각각의 셀로 나누면 상태변화에 대한 전이확률(식 (2))을 얻을 수 있다.

$$P_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_i} \quad (2)$$

여기서 n_{ij} 는 상태 i 에서 j 로 전이된 횟수

각 행의 합은 1이 되며 이렇게 계산된 행렬을 전이행렬 P 라고 한다. 전이행렬을 무한히 곱하게 되면 마코프연쇄 특성에 의해 처음 상태(from)와 마지막 상태(to)에 상관없이 모두 같은 확률을 가지도록 수렴하게 된다. 본 연구에서는 시군구별 산출된 전이확률을 바탕으로 GIS의 군집분석을 실시하여 최종 권역을 설정하였다.

3) 핫스팟 분석(Hot Spot Analysis)

배출량의 공간적 특성을 확인하기 위하여 공간통계방법 중 하나인 Getis-Ord's G_i^* 방법을 활용하였다. 이 방법은 대상이 되는 공간 단위의 값을 포함하여 기준 공간 단위인 i 와 주변 공간 단위가 전체에서 차지하는 비중을 계산하는 것으로 아래와 같은 식 (3)으로 계산할 수 있다.

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{i,j}}{S \sqrt{\frac{[n \sum_{j=1}^n w_{i,j}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{i,j}^2)^2]}{n-1}}}, \quad \bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n}, \quad S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - (\bar{X})^2} \quad (3)$$

i, j : 분석의 공간 단위, x_i, x_j : i 또는 j 지역의 속성 데이터
 $w_{i,j}$: i 와 j 지역 간 공간 가중치, n : 분석 공간 단위의 수

이렇게 산출된 G_i^* 값을 아래의 식 (4)와 같은 방법으로 Z_G (Z-score)를 구하였으며 평균은 0이고 분산은 1에 수렴하여 정규분포를 표준화한 점수와 거의 유사하다. Z_G 이 0보다 크면 정적 자기상관(Hot-spot) 영역, Z_G 가 0보다 작으면 부적 자기상관(Cold-spot) 영역을 의미한다. 이 값을 통하여 직관적으로 높은 속성 값을 가진 공간단위(Hot-spot)와 낮은 속성 값을 가지고 있는 공간단위(Cold-spot)을 확인할 수 있다.

$$Z_G = \frac{G_i^* - E[G_i^*]}{\sqrt{V[G_i^*]}} \quad (4)$$

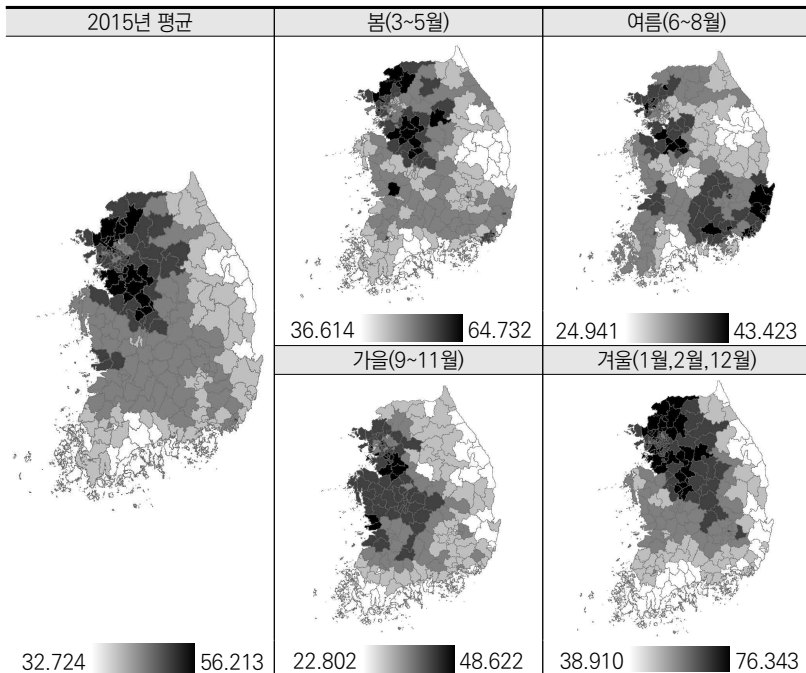
IV. 분석 결과

1. 지역별 미세먼지 농도 차이

IDW 공간보간법을 통하여 계산한 2015년 월별 전국 평균 미세먼지 농도는 약 $45\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, WHO의 일년 평균 권고 기준인 $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 비교하였을

때 매우 높은 수준이다. 월별 변화 경향을 보면 7월에서 9월까지 여름(평균 $28.63\mu\text{g}/\text{m}^3$)에 미세먼지 농도가 가장 낮고 2월부터 봄까지(평균 $59.33\mu\text{g}/\text{m}^3$) 매우 높게 나타난다. <그림 2>에서 보이는 바와 같이 계절별 평균 농도를 지역별로 비교하면 미세먼지 농도가 가장 높은 봄철에는 서울특별시를 주변으로 경기도 북쪽과 경기도 남쪽 그리고 충청남도 천안시, 아산시 일대가 미세먼지 농도가 높게 나타나고 있다. 이와 같은 수도권 및 충청남도에서 나타나는 고농도 패턴은 4계절 모두 비교적 유사하게 나타났다. 한편 여름에는 울산광역시와 부산광역시 일대를 포함한 경남권 또한 미세먼지 농도가 높게 나타났으나, 가장 높은 지역의 농도가 $43.42\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 다른 계절에 비하여 높은 수준은 아니다. 가을 또한 전국적으로 미세먼지 농도가 높았던 계절이지만 경기도 남부 지역과 한반도 서쪽 부근에 있는 충청남도, 전라북도 지역의 농도가 상대적으로 높게 나타났다. 겨울에는 연평균과 유사한 패턴으로 지역별 농도 차이를 보였다. 계절별 결과를

〈그림 2〉 지역별 미세먼지 농도 분포 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (2015년)

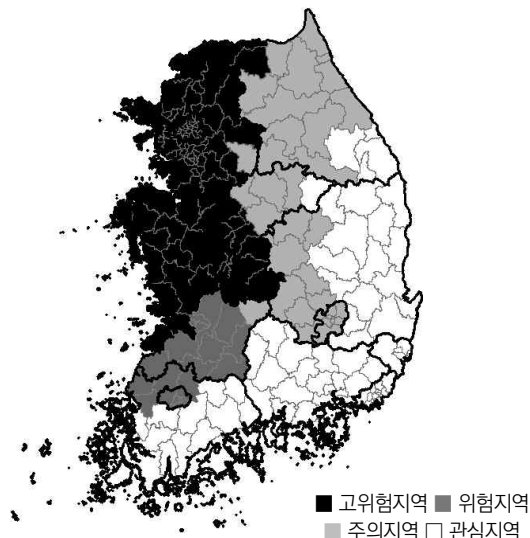


종합하면 수도권을 포함하여 충청지역의 미세먼지 농도가 높고, 반면에 한반도의 동쪽과 남쪽이 상대적으로 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한, 미세먼지 농도의 분포는 행정적 경계를 뛰어넘어 나타나는 것으로 확인되었다.

2. 농도기반 유사 영향 권역 식별 결과

시군구별 구축된 일평균 농도 데이터를 바탕으로 전이확률을 구축하였으며, 시군구별 전이확률을 GIS의 공간적 제약을 주는 군집분석을 활용하여 군집을 설정하였다. 동일한 군집이 의미하는 바는 미세먼지 농도가 $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (미세먼지 경보 기준 나쁨 단계 수준) 이상으로 가는 유사한 확률을 가진 지역들을 의미한다. 본 연구에서는 미세먼지 경보 기준 나쁨 단계 수준을 기준으로 삼고, 미세먼지 나쁨 단계 수준 이상의 상태를 중심으로 결과를 분석하였다. 분석 결과 4개의 군집이 도출되었으며 색이 진할 수록 미세먼지 경보 기준 나쁨 단계 수준($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상)으로 변화할 확률이 높아지는 지역이다(〈그림 3〉 참고). 군집에 따른 농도 특성은 다음과

〈그림 3〉 미세먼지 유사 영향권역



같다. 군집 1은 미세먼지 농도가 나쁨 상태로 머무를 확률이 가장 높은 군집이면서 연평균 농도 또한 $48.23\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 지역으로 미세먼지 관리에 가장 유의해야 할 미세먼지 고위험지역이다. 군집 2는 두 번째로 확률이 높으며 연평균 농도 $44.80\mu\text{g}/\text{m}^3$ 또한 전국 평균보다 높다. 군집 3 군집 4는 각각 $43.70\mu\text{g}/\text{m}^3$, $41.52\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며 4개의 권역의 평균 농도 차이의 통계적 유의성을 확인한 결과 유의확률 0.000으로 유의한 차이를 보였다. 본 연구에서는 군집 1을 미세먼지 「고위험지역」, 군집 2를 「위험지역」, 군집 3을 「주의지역」, 군집 4를 「관심지역」으로 설정하였다. 실제로, 분석결과 미세먼지 연평균 농도가 높은 지역일수록 WHO 권고기준인 일평균 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과한 횟수가 많은 것으로 나타났다. 특히 고위험지역 같은 경우 <표 2>에 나타난 바와 같이 평균적으로 1년 중 135일로 1/3 이상의 기간이 권고기준을 초과하였다. 연평균 농도와 WHO 권고기준일 초과 현황을 봤을 때, 기존 미세먼지 정책의 주요 대상지였던 수도권 뿐만 아니라 충청지역을 포함한 전라북도 즉, 한반도의 서쪽이 모두 미세먼지 고위험지역으로 공간적 범위를 확대하여 관리가 필요하다.

〈표 2〉 마코프체인 특성에 따른 권역별 농도 특성

구분	권역	N	평균	최소값	최대값	표준편차
2015년 평균 농도	고위험	114	48.23	43.24	56.21	2.73
	위험	19	44.80	40.35	49.34	2.26
	주의	34	43.71	39.73	45.68	1.59
	관심	81	41.53	32.72	48.85	3.11
	평균	248	45.23	32.72	56.21	4.03
일평균 농도 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상일 (WHO 권고기준)	고위험	114	135.39	96	183	20.46
	위험	19	117.94	77	159	20.43
	주의	34	110.21	84	130	11.99
	관심	81	98.46	42	146	23.30
	평균	248	119.01	42	183	26.50

3. 권역별 미세먼지 배출 특성 분석 결과

1) 미세먼지 중분류 배출원별 특성

국내 대기환경개선 종합계획 및 시행계획 등의 근거자료로 활용되는 CPASS의 대기오염배출량 자료를 바탕으로 전국 미세먼지 배출특성을 분석하였다. 대기오염물질 배출은 대분류에 따라 13가지로 분류할 수 있는데 이 중 2015년에 미세먼지를 배출한 주요 대분류 배출원은 10가지이며, 이에 따른 중분류 배출원은 41가지이다. 주요 배출원은 에너지산업연소(1), 비산업연소(2), 제조업연소(3), 생산공정(4), 도로이동오염원(7), 비도로이동오염원(8), 기타 면오염원(11), 비산먼지(12), 생물성연소(13)이다.

미세먼지 총배출량은 관심지역과 고위험지역이 각각 전체 배출량의 44.52%, 40.28%로 우리나라 전체 배출의 85% 이상을 차지하고 있다. 한편, 단위면적당 배출량은 고위험지역이 8,583kg/km²으로 가장 높게 나타났다. 관심지역은 6,326kg/km², 주의지역 3,846kg/km², 위험지역 2,254kg/km²의 순으로 나타났다. 따라서 고위험지역의 경우 미세먼지 농도도 높고 배출도 많이 하는 지역으로 집중관리가 필요하다. 전국 미세먼지 배출량의 상위 10%에 해당하는 중분류 배출원으로는 제조업연소(3)의 기타(30.53%), 비산먼지(12)의 건설공사(16.4%), 도로재비산먼지(12.4%), 나대지(4.3%) 부문이다. 해당 배출원을 중점으로 배출하는 권역은 미세먼지 고위험지역과 관심지역인데, 특히 제조업 연소(3)의 기타 부문을 관심지역에서 74% 이상이 배출되고 있다. 건설공사로 인한 배출은 미세먼지 고위험지역이 68.19%, 도로재비산먼지 또한 고위험지역이 53.41%로 배출량이 가장 많았다. 나대지 배출은 관심지역이 48.716%로 많은 배출을 하고 있다. 종합하자면 전국 미세먼지 배출량의 주요 배출원은 제조업 연소(3)의 기타부문, 건설공사로 인한 비산먼지, 도로재비산먼지, 나대지의 비산먼지(12)이며, 대부분이 고위험지역과 주의지역에서 배출되고 있다(〈표 3〉 참고).

〈표 3〉 권역별 미세먼지 배출특성

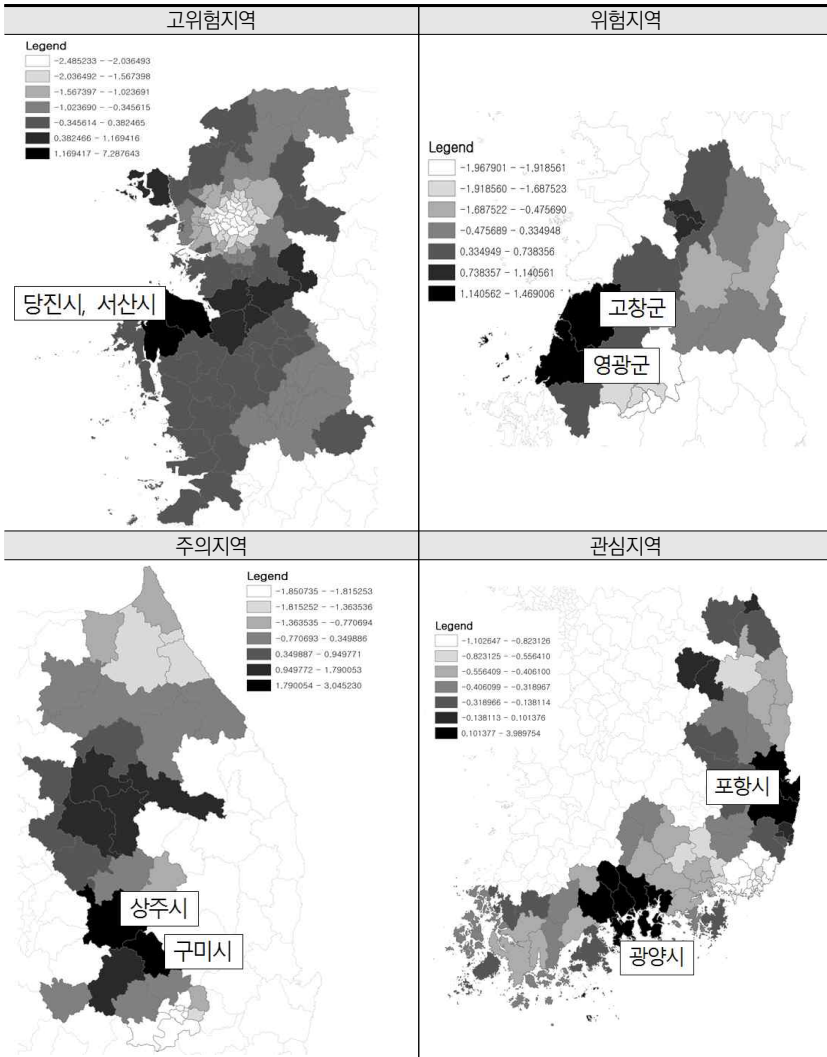
대분류	중분류	전국 비율 (%)	권역 내					
			구분	고위험지역	위험지역	주의지역	관심지역	총합계(kg)
총합계		100	kg	90,179,519	9,883,440	24,148,267	99,661,189	224,905,854
			%	40.28	4.41	10.79	44.52	100
단위면적당 배출량		100	kg /km ²	8,583	2,254	3,846	6,326	-
제조 연소	기타	30.5	kg	13,921,520	105,721	3,730,089	50,595,509	68,352,840
			%	20.36	0.154	5.45	74.02	100
비산 먼지	건설 공사	16.4	kg	25,113,748	1,443,085	3,199,518	7,068,014	36,824,365
			%	68.19	3.918	8.688	19.19	100
	도로재 비산먼지	12.0	kg	14,385,464	1,611,144	3,976,678	6,957,703	26,930,989
			%	53.41	5.982	14.76	25.83	100
	나대지	4.32	kg	3,152,618	679,451	1,134,435	4,717,987	9,684,491
			%	32.5	7.015	11.71	48.716	100

2) 권역별 집중 배출지역 및 배출원 특성

효과적인 미세먼지 배출원 관리에 있어 지역적 배출특성을 고려할 필요가 제기되고 있음에 따라(김동영 등, 2018), 본 연구에서는 앞서 미세먼지 영향 권역 식별 결과를 바탕으로 권역 내의 배출량이 많은 상위 10% 지역을 바탕으로 상위 3순위까지 해당하는 배출원을 도출하였다(부록 참고). 또한, 미세먼지 관리 패러다임이 기존의 수도권 중심에서 배출이 심한 지역을 중심으로 전환함에 따라 지역별 집중배출지역을 식별하기 위하여 핫스팟 분석을 실시하였다(〈그림 4〉 참고).

분석 결과, 미세먼지 고위험지역에서는 당진시, 서산시, 아산시 등의 일대가 집중배출지역으로 나타났다. 서울시를 중심으로 외곽 부분으로 갈수록 배출을 많이 하고 있으며 특히 7.28의 높은 G_i^* 값을 가지는 당진시 주변으로 배출이 많이 되고 있었다. 고위험지역은 미세먼지 나쁨으로 갈 확률이 높은 지역이므로 당진시를 중심으로 주변 지역과의 배출원 관리가 필요하다. 고위험지역 내의 배출량 상위 10%의 지역은 당진시, 화성시, 인천광역시 중구, 평택시, 인천광역시 서구, 의정부시, 안산시, 김포시, 파주

〈그림 4〉 배출량 핫스팟 분석결과



시, 용인시, 세종시이며 당진시의 경우 고위험지역 배출량의 18%, 전국 배출량의 7.28%를 배출하는 지역이다. 당진시의 총배출량 중 약 80%가 제조업 연소(3)의 기타 부문을 배출하고 있다. 이어서 화성시는 고위험지역 배출량의 3.5%, 전국 배출량의 1.4%를 배출하고 있으며 비산먼지(12)의 건설공사 부문이 47.3%, 도로재비산먼지가 16.7%로 비산먼지(12) 대부분류

가 약 64%로 배출의 대부분을 차지하고 있다. 이처럼 고위험지역 배출량의 상위 10%에 해당하는 지역은 대부분 제조업 연소(3), 비산먼지(12), 비도로이동오염원(8)을 중점으로 배출하고 있다.

미세먼지 위험지역에서는 구미시를 중심으로 김천시, 상주시 일대와 영월군을 중심으로 제천시와 원주시가 높은 지역적 배출을 하는 것으로 나타났다. 위험지역의 배출량 상위 10% 지역은 구미시, 영월군, 원주시로 각각 전국 배출량의 1.51%, 0.57%, 0.54%로 상대적으로 적은 양을 배출하는 지역이지만 권역 내에서는 14.05%, 5.31%의 배출을 하고 있다. 위험지역에서도 제조업 연소(3), 비산먼지(12)가 주로 배출되고 있으며 다른 권역과 다르게 생물성연소(13)의 숯가마, 농업잔재물소각 등으로 인한 배출도 이루어지고 있다.

미세먼지 주의지역은 고창군과 영광군을 중심으로 배출이 많이 되고 있으며 권역의 배출량 상위 10% 지역은 완주군, 고창군으로 전국 배출량의 0.4155%, 0.408%를 배출하였다. 위험지역과 마찬가지로 지역 총배출량은 적은 지역이지만 완주군, 고창군 모두 비산먼지(12) 배출이 많은 지역이다. 따라서 비산먼지(12)의 배출이 전국 배출량의 47%를 차지하고 있는 것을 고려해보았을 때, 적은 양이지만 주의지역의 비산먼지(12) 배출량 또한 주의해야 한다.

미세먼지 관심지역에서는 포항시와 경주시 부근과 광양시를 중심으로 순천시, 하동군, 구례군 부근이 배출량이 높은 지역으로 나타났다. 이 권역 내의 배출량 상위 10% 지역은 포항시, 광양시, 울주군, 단양군, 울산광역시 남구, 동해시, 여주시, 김해시이다. 관심지역의 배출량은 전국 배출의 약 45%로 배출량이 많은 지역으로, 특히 포항시와 광양시는 전국에서 미세먼지 배출량이 제일 높은 시군에 해당한다. 두 지역 모두 공통적으로 제조업 연소(3) 배출원에서의 배출량이 절대적으로 크게 나타나고 있다. 이뿐만 아니라 생산공정(4)의 제조업 기타 부문⁴⁾도 다른 권역에 비해 높

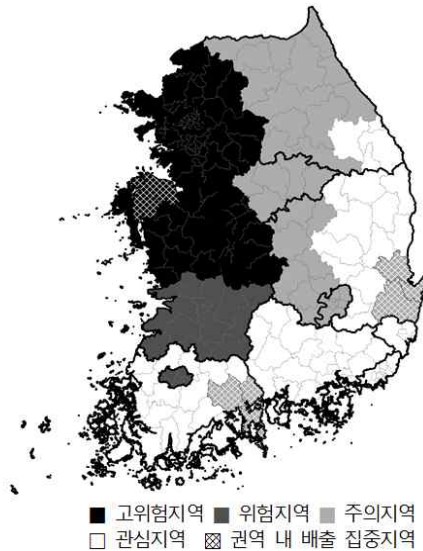
4) 생산공정의 기타 부문은 아스팔트 루핑물질 제조, 시멘트, 유리 석회의 탄소제거 공정, 건전지 제조, 원광석 추출, 광물섬유임.

은 배출량을 보이고 있다.

4. 최종 관리권역 설정 결과

앞서 미세먼지 영향 권역 식별 결과, 권역별 배출특성 분석 결과와 실질적인 정책 실현을 위해 현재 행정 경계를 고려하여 최종 미세먼지 관리권역을 <그림 5>와 같이 도출하였다. 미세먼지 영향을 바탕으로 권역 경계를 설정하였으며, 권역별 배출이 압도적으로 높은 지역을 배출 집중관리 지역으로 선정하였다.

<그림 5> 최종 미세먼지 관리권역



우선 최종 결정된 고위험지역에는 수도권, 충청남도, 충청북도 청주시가 포함되었다. 고위험지역 내의 배출 집중관리지역은 당진시, 서산시이며 제조업 연소 기타부문과 비산먼지 건설공사의 배출원 관리가 특히 요구된다. 위험지역은 전라북도와 광주광역시 포함되었으며 지역 내의 배출 집중관리지역은 존재하지 않는다. 그러나 한반도 서쪽에 위치하여 국외의 영향

과 평균 미세먼지 농도가 높은 지역으로 미세먼지 대응에 관한 관심이 필요하다. 특히, 기존의 대기오염 관리체계에서는 충청도와 전라북도의 미세먼지 문제가 중요하게 다루어지지 않았는데, 분석 결과 평균 미세먼지 농도가 비교적 높게 나타나 해당 지역에서의 미세먼지 대응 정책이 절실하다고 하겠다. 한편, 미세먼지 주의지역은 강원도, 충청북도, 경상북도의 한반도의 중심에 위치한 시군구가 해당되며, 관심지역은 한반도 동쪽에 위치한 일부 강원도와 경상북도, 경상남도, 전라남도를 포함한다. 관심지역의 경우 배출 집중지역으로 포항시 일대와 광양시 일대가 도출되었는데, 특히 광양시의 경우는 기존의 대기환경규제지역과 특별대책지역에 중복으로 해당되는 지역으로 오래전부터 배출이 많았던 지역임을 의미한다. 따라서 미세먼지 농도는 상대적으로 낮은 지역이지만 미세먼지 배출 집중지역으로 선정하여 엄격한 관리가 이루어져야 하며 제조업연소의 기타부문과 함께 비도로이동오염의 선박 부문의 배출량 감축이 필요하다.

V. 결론 및 시사점

정부와 지방자치단체는 미세먼지 대응 및 저감을 위한 다양한 대책을 도입하고 있다. 그러나 미세먼지의 발생 및 영향이 초월경적인 특징을 가지고 있음에도 불구하고 아직 광역시, 수도권을 중심으로 대책이 마련되고 있거나 배출특성을 고려하지 않은 도 차원의 공통적인 저감 대책이 시행되고 있다. 이러한 배경에서 본 연구는 기존의 수도권 중심의 대기오염 관리권역과 달리 계량적이고 객관적인 방법을 통해 전국을 대상으로 미세먼지 영향과 배출특성을 분석하여 미세먼지 정책의 실효성 확보를 위한 미세먼지 관리 권역 설정을 처음으로 시도하였다는 점에서 기존 연구와 차별된다.

본 연구에서 시군구 미세먼지 농도 데이터를 바탕으로 고농도로 전이될 전이확률을 기반으로 식별된 미세먼지 권역과 권역별 미세먼지 배출특성

은 다음과 같다. 미세먼지 권역은 미세먼지 영향과 배출특성을 고려했을 때 4개의 권역으로 나눌 수 있는데, 고위험지역(수도권, 충청남도, 충청북도 청주시), 위험지역(전라북도와 광주광역시, 주의지역은 강원도와 충청북도, 일부 경상북도와 대구광역시), 관심지역(한반도 동쪽에 위치한 일부 강원도와 경상북도, 경상남도, 전라남도) 및 주의지역(그 외지역)으로 구분된다. 한편, 각 권역 내 배출집중지역은 당진시와 서산시, 포항시와 경주시, 광양시와 순천시, 여수시가 이에 해당한다. 한편, 미세먼지 배출특성 분석 결과, 전국적으로 미세먼지의 주요한 배출원은 제조업 연소(3)와 비산먼지(12)로 노후 석탄화력발전소 관리 및 비산먼지 제거를 위한 사업장, 도로 관리가 중요하다고 하겠다. 하지만 이 외 배출원의 경우 지역에 따라 기여도가 상이하어 지역별 맞춤형 대책이 필요하다. 고위험지역에서는 건설공사 시 배출되는 비산먼지(12), 건설장비에서 배출되는 비도로이동오염원(8), 위험지역에서는 축산 활동으로 배출되는 비산먼지(12), 주의지역에서는 생물성연소(13)의 숯가마, 농업잔재물소각, 관심지역에서는 생산공정(4)의 제조업 기타 부문이 관리되어야 할 배출원으로 나타났다.

이와 같은 연구 결과를 바탕으로 향후 지역차원의 미세먼지 권역 관리를 위해 다음 사항에 대한 고려가 필요하다. 우선 전국 차원에서 배출량이 많은 배출원 중심의 저감 대책도 중요하나, 권역별 배출특성을 고려하여 세부적인 지역차원의 저감 정책을 수립하고 주요 배출원에 대해서는 단일 사업장 기반 외에 지역 단위의 배출량 총량 규제 목표 설정이 필요하다. 각 권역별 미세먼지 관리 방안에 대한 제언은 다음과 같다. 고위험지역은 기존에 수도권 지역에서 이루어지고 있는 건설공사장의 비산먼지 관리를 확대하여 전 권역에 걸친 관리가 필요하며, 미세먼지 농도가 전국에서 가장 높은 지역으로 취약계층에 대한 보호 서비스를 강화해야 한다. 위험지역은 미세먼지 농도가 높음에도 불구하고 미세먼지 데이터 측정을 위한 측정소 설치 밀도가 전국에서 가장 낮게 나타나고 있다. 따라서 권역 내 측정소의 보완이 필요하며, 상대적으로 수도권에 비하여 미세먼지 농도 위해성에 대한 관심 및 정책이 부족하여 미세먼지 대응책 보완이 필요하다.

다. 또한, 축산 활동으로 발생하는 비산먼지 저감을 위해 노후 농기계 관리, 화학비료 사용 감축 정책 도입이 필요하다. 주의지역의 경우, 생물성 연소의 배출이 다른 권역보다 높게 나타나 불법 소각을 차단하기 위해 파쇄 사업을 지원하거나 지역 주민들을 대상으로 하는 소각 교육 시행이 필요하다. 또한, 위험지역과 마찬가지로 미세먼지 측정소가 현저히 부족하여 추후 과학적 연구 토대 마련을 위한 권역 내 측정소 설치 보완이 필요하다. 마지막으로 관심지역의 경우 제조업 연소 비중이 매우 높은 지역으로 배출량총량관리 및 사업장에 굴뚝자동측정기 설치 의무화 등의 배출원 관리를 위한 대책이 필요하다.

미세먼지는 단순한 환경문제가 아니라 국민의 건강과 경제에 까지 그 파급효과가 크다. 또한 미세먼지는 일상 생활에서 국민의 체감 영향 또한 다른 어떤 환경 오염보다 크다. 이에 있어 효과적인 미세먼지 관리를 위해서는 기존의 수도권 중심 대기오염 관리에서 확장해서 전국 대상의 지역적 차원의 접근이 필요하다. 이를 위한 지역적 관리 토대 마련을 위해서는 객관적인 권역 식별에 대한 심도 깊은 연구가 지속적으로 이루어질 필요가 있다. 이에 있어 본 연구의 방법 및 결과는 향후 대기질 예·경보 권역 설정, 대기질 관리를 위한 측정망 구축, 권역 내 배출원 관리를 위한 권역별 배출 목표량 설정 등 미세먼지의 정책 설계와 실행에 있어 유용하게 활용될 것으로 기대되는 바이다.

■ 참고문헌 ■

- 관계부처합동, 2017.9.26., “미세먼지 관리 종합대책,” 보도자료.
국립환경과학원, 2017, 『대기환경연보 2016』, (NIER-GP: 2017-078), 인천: 국립환경과학원.
고경훈·김종호·김태영·왕재선·임채홍·백재환, 2018, 『미세먼지 대응관리체계 효율화 방안연구』, 서울: 행정안전부.
권창기·정현욱, 2007, “대도시 광역권 설정과 권역별 공간 특성 비교,” 『국토연구』, 52, pp.39-58, DOI: 10.15793/kspr.2007.52..003.

- 김남옥, 2017, “지방자치단체의 미세먼지 오염방지 및 저감 법제에 관한 개선방안,” 『유럽헌법연구』, 25, pp.453-486.
- 김도형·우명제, 2018, “지역 거점도시 식별 및 상호작용에 따른 영향권역 설정에 관한 연구,” 『국토계획』, 53(7), pp.5-22.
- 김동영·최민애·윤보미, 2018, 『미세먼지 개선을 위해 시급한 사업장 배출시설 관리』, (이슈&진단: no.316), 경기: 경기연구원.
- 김동영·최민애·한용희, 2013, 『수도권 대기오염에 의한 건강위해 취약지역의 평가』, (정책연구: 2013-64), 경기: 경기개발연구원.
- 김미현·안민우·조남옥, 2015, “환경형평성을 고려한 서울시 공원입지 분석 : ArcGIS의 중첩분석 및 점근성 분석기법의 응용,” 『지방행정연구』 29(2), pp.77-105.
- 김순태·배창한·김은혜·김민아·김옥길, 2017, 『수도권 대기개선 대책 효과 분석 연구』, 세종: 환경부.
- 김승남·안건혁·이경환, 2009, “압축도시 공간구조 특성이 교통에너지 소비와 대기오염 농도에 미치는 영향,” 『국토계획』, 44(2), pp.233-248.
- 김운수·최유진·김정아, 2016, 『초미세먼지(PM2.5) 배출원 인벤토리 구축 및 상세모니터링 연구』, 서울: 서울특별시.
- 김학열·김운수, 2007, “마이크로연쇄를 이용한 도시대기오염예측에 관한 연구 ; 서울시 미세먼지를 중심으로,” 『국토계획』, 42(1), pp.127-136.
- 김학열, 2010, “서울시 오존관리권역의 설정에 관한 연구,” 『도시행정학보』, 27(2), pp.47-64
- 대기환경보존법, 2019, 법률 제16266호, 2019.1.15., 일부개정.
- 박충선, 2017, “2015년 서울시 미세먼지 농도의 변화와 기상 조건과의 관련성,” 『사진지리학회지』, 27(2), pp.47-64, DOI: 10.35149/jakpg.2017.27.2.004.
- 배현주, 2010, “대기질 개선과 저소득층 어린이 건강보호 효과,” 『한국환경보건학회지』, 36(3), pp.182-190.
- 손고은·변재영·이종호, 2015, “군집분석을 이용한 한반도 해상 특성 분석 및 구역 분류,” 『Journal of The Korean Data Analysis Society』, 17(4), pp.2129-2138.
- 수도권 대기환경개선에 관한 특별법, 2018, 법률 제15274호. 2017.12.19., 일부개정.
- 유은철·박옥현, 2004, “부산지역 오존 및 이산화질소 농도의 공간분포해석에 따른 대기 오염측정망 배치연구,” 『한국대기환경학회지』, 20(5), pp.583-591.
- 이원도·원종서·조창현, 2011, “대기오염지수와 도시공간구조 특성에 관한 연구: 서울시 토지이용과 교통자료를 바탕으로,” 『한국경제지리학회지』, 14(2), pp.143-156, DOI: 10.23841/egsk.2011.14.2.143.
- 이재범·임용재·최기철·남기표·이한솔·이용미 등, 2017, 『대기질 예보 권역에 대한 배출원별 지역 간 정량적 기여도 평가 연구(I)』, (NIER-RP2017-149), 인천: 국립환경과학원.
- 이종현·김영민·김용구, 2017, “공간패널모형을 이용한 국내 초미세먼지 농도에 대한 분

- 석, "『한국데이터정보과학회지』, 28(3), pp.473-481, DOI: 10.7465/jkdi.2017.28.3.473.
- 장영기, 2016, "미세먼지 오염의 현황과 문제점," 『환경논총』, 58, pp.4-13.
- 장환영·문태현, 2012, "연계성에 따른 지방 광역도시권의 설정과 발전 방향," 『국토계획』, 47(1), pp.5-18.
- 전미경·임동순·권용식·박진훈, 1998, 『경기도 대기오염 측정망의 적정성과 개선방안 연구』, (연구보고서; 98-08), 경기: 경기개발연구원.
- 전병혜·이명훈·옥석문, 2008, "도시의 성장과 쇠퇴측면에서 본 서울대도시권의 지역유행특성에 관한 연구," 『국토계획』, 43(5), pp.153-164.
- 장평린·최막중, 2018, "미세먼지가 옥외 여가활동에 미치는 영향," 『국토계획』, 53(3), pp.133-143.
- 정규용·한기봉·민병근·강인준, 2010, "공간 보간법에 따른 기온 분포 비교," 『대한토목학회 학술대회 논문집』, 송도컨벤시아, 10, pp.1151-1153.
- 정성관·이우성, 2008, "환경도시 건설을 위한 도시녹지의 관리권역 설정: 창원시를 대상으로," 『한국조경학회지』, 35(6), pp.64-73.
- 정종철, 2014, "서울시 PM10 공간분포 분석과 시계열 변화," 『지리정보학회지』, 17(1), pp.61-69, DOI: 10.11108/kagis.2014.17.1.061.
- 주승민·최진호·김봉준, 2014, "GIS 네트워크 분석을 활용한 대구광역시 광역도시권역 경계설정에 관한 연구," 『한국지적학회지』, 30(3), pp.85-95.
- 최열·문설희·임하경, 2007, "도시특성 요소가 대기오염에 미치는 영향에 관한 연구: 패널모형을 이용하여," 『국토계획』, 42(3), pp.191-202.
- 추장민·박정임·전성우·배현주·신지영·임유라 등, 2007, 『도시지역 저소득계층 보호를 위한 환경정책연구』, (경제·인문사회연구회 협동연구총서; 07-25-01 KEI 연구보고서; 2007-RE-02), 서울: 한국환경정책·평가연구원.
- 환경부, 2015, 『대기환경규제지역 관리제도 평가 및 개선방안 연구』, 세종: 환경부.
- _____, 2016, 『바로 알면 보인다. 미세먼지, 도대체 뭘까?』, 세종: 환경부 대변인실.
- Bergin, M. S., J. J. West, T. J. Keating, and A. G. Russell, 2005, "Regional atmospheric pollution and transboundary air quality management," *Annual Review of Environment and Resources*, 30, pp.1-37, DOI: 10.1146/annurev.energy.30.050504.144138.
- Castells, N. and J. Ravetz, 2001, "Science and policy in international environmental agreements: Lessons from the European experience on transboundary air pollution," *International Environmental Agreements*, 1(4), pp.405-425.
- Gong, Z. and X. Zhang, 2017, "Assessment of urban air pollution and spatial spillover effects in China: Cases of 113 key environmental protection cities," *Journal of Resources and Ecology*, 8(6), pp.584-594, DOI: 10.5814/j.issn.1674-

764x.2017.06.004.

- Goswami, E., T. Larson, T. Lumley, and L. J. Sally Liu, 2002, "Spatial characteristics of fine particulate matter: Identifying representative monitoring locations in Seattle, Washington," *Journal of the Air & Waste Management Association*, 52, pp.324-333, DOI: 10.1080/10473289.2002.10470778.
- Larkin, A., A. Donkelaar, J. Geddes, R. Martin, and P. Hystad, 2016, "Relationships between change in urban characteristics and air quality in East Asia from 2000 to 2010," *Environmental Science Technology*, 50(17), pp.9142-9149, DOI: 10.1021/acs.est.6b02549.
- Li, W. and J. Wu, 2015, "Linking urban structure and air quality: A geographically weighted regression model for PM_{2.5} concentrations in Beijing," *The 14th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management 2015 (CUPUM 2015)*, MIT, Cambridge.
- International Agency for Research on Cancer (IARC), 2013, *Air pollution and cancer*, Lyon, Fr.: IARC, World Health Organization.
- Wang, H. and L. Zhao, 2018, "A joint prevention and control mechanism for air pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei region in china based on long-term and massive data mining of pollutant concentration," *Atmospheric Environment*, 174, pp.25-42, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2017.11.027.
- Wang, H., L. Zhao, Y. Xie, and Q. Hu, 2016, "'APEC blue"—The effects and implications of joint pollution prevention and control program," *Science of the Total Environment*, 553, pp.429-438, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.02.122.
- Wu, D., Y. Xu, and S. Zhang, 2015, "Will joint regional air pollution control be more cost-effective? An empirical study of China's Beijing-Tianjin-Hebei region," *Journal of Environmental Management*, 149, pp.27-36, DOI: 10.1016/j.jenvman.2014.09.032.
- Xie, Y., L. Zhao, J. Xue, H. O. Gao, H., Li, and R. Jiang et al., 2018, "Methods for defining the scopes and priorities for joint prevention and control of air pollution regions based on data-mining technologies," *Journal of Cleaner Production*, 185, pp.912-921, DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.101.
- 국가법령정보센터, www.law.go.kr, [2019.4.23]
- WHO Global Urban Ambient Air Pollution Database, 2015, https://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/cities/en/, [2019.5.20]

■ 부록 ■ 권역별 미세먼지 상위 배출지역 및 배출원

배출량 상위지역		권역 내		상위 배출원				전국 비율(%)
		총량 (kg)	비율(%)	구분	1순위	2순위	3순위	
고 위험 지역	당진시	16,322,378	18.1	중분류	기타	기타 제조업	공공발전시설	7.29
				비율(%)	79.08	7.91	3.28	
	화성시	3,153,843	3.5	중분류	건설공사	도로재	건설장비	1.41
				비율(%)	47.3	16.7	8.08	
	인천 중구	2,291,893	2.54	중분류	건설공사	건설장비	선박	1.02
				비율(%)	70.38	9.76	9.52	
위험 지역	완주군	930,133	9.411	중분류	비포장도로	도로재	축산	0.415
				비율(%)	29.9	18.17	10.62	
	고창군	913,468	9.242	중분류	비포장도로	축산	농업	0.408
				비율(%)	26.72	22.21	15.82	
주의 지역	구미시	3,393,525	14.05	중분류	기타	건설공사	도로재	1.51
				비율(%)	61.06	11.53	7.23	
	영월군	1,281,191	5.31	중분류	연소시설	비포장도로	숯가마	0.57
				비율(%)	59.47	9.79	6.6	
	원주시	1,230,726	5.1	중분류	건설공사	도로재	농업잔재물 소각	0.54
				비율(%)	21.39	19.29	19.07	
관심 지역	포항시	26,461,796	26.55	중분류	기타	기타제조업	건설공사	11.82
				비율(%)	92.02	5.21	0.62	
	광양시	21,165,213	21.23	대분류	3	4	8	9.45
				중분류	기타	기타제조업	선박	
	울주군	2,904,513	2.914	비율(%)	85.51	9.81	1.5	
				대분류	3	12	8	1.29
				중분류	기타	건설공사	선박	
				비율(%)	51	13.32	8.82	

백정희: 성신여자대학교 지리학과를 졸업하고, 서울시립대학교 도시공학과 석사학위를 취득하였으며, 현재 인천연구원 초빙연구원으로 재직 중이다. 주요 관심분야는 도시 환경, 환경 정책, 환경정의 등이다 (gleejh43@naver.com).

송재민: 서울대학교 지구환경시스템 공학부를 졸업하고 미국 MIT Engineering System Division에서 박사학위를 취득하였으며, 현재 서울시립대학교 도시공학과 부교수로 재직 중이다. 주요 관심분야는 도시 시스템 분석, 회복탄력적 도시, 개발도상국의 지속가능한 도시 개발이다 (jmsong@uos.ac.kr).

투 고 일: 2019년 08월 27일
심 사 일: 2019년 09월 03일
게재확정일: 2019년 09월 10일