

Research Paper

시스템다이내믹스를 활용한 미세먼지 저감 정책이 미세먼지 농도와 건강에 미치는 영향 분석

이세호 · 강정은 · 이지윤 · 박민영 · 최지윤

부산대학교 도시공학과

An Analysis of the Effects of Fine Dust Reduction Policies on PM₁₀ Concentration and Health Using System Dynamics

Seho Lee · Jung Eun Kang · Ji-Yoon Lee · Minyeong Park · Ji Yoon Choi

Department of Urban Planning and Engineering, Pusan National University

요약: 본 연구는 시스템다이내믹스를 활용하여 미세먼지 저감 정책이 미세먼지 농도와 건강에 미치는 영향을 살펴보았다. 시스템다이내믹스는 미세먼지 발생원, 저감 정책, 미세먼지 농도, 건강영향 간의 동태적이며 순환적인 관계의 모델링을 구축할 수 있는 장점이 있다. 연구에서는 국내의 대표적 미세먼지 저감 정책인 산업부문 미세먼지 배출규제, 디젤차 규제, 전기차 확대, 공원·녹지면적 확대를 대상으로 정책 시나리오를 작성하여 현재 추세가 유지될 때와의 2030년 기준 결과를 비교하였다. 분석 결과, 전기차 지원정책은 0.21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PM₁₀ 농도 저감과 494명의 순환기계 질환자 수 감소 효과가 있었으며 전국적으로 고르게 효과가 나타났다. 산업 배출량 규제 시나리오에서는 0.22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 가장 높은 PM₁₀ 농도가 감소하였으나 전기차 지원보다 적은 질환자 수 감소 효과(358명)가 나타났는데 이는 해당 정책이 충북 단양군, 부산 사하구 등 일부 공업지역을 중심으로 높은 미세먼지 저감 효과를 보였기 때문이다. 이러한 결과는 지역의 배출원 특성에 맞는 정책 선정의 필요성을 제시하였다.

주요어: 도시계획, 미세먼지, 시스템다이내믹스, 순환기계 질환자, 정책 평가

Abstract: This study utilizes system dynamics to examine the effects of fine dust reduction policies on PM₁₀ concentration and health. System dynamics has the advantage of modeling the dynamic and circular relationship between PM₁₀ emission sources, reduction policies, PM₁₀ concentration, and health effect. The study created policy scenarios for Korea's representative fine dust reduction policies – industrial PM₁₀ emission control, diesel vehicle regulation, expansion of electric vehicles, and expansion of parks and green areas – and compared the results with the 2030 baseline if the

First Author: Seho Lee, E-mail: lshee@pusan.ac.kr, ORCID: 0009-0005-2145-9122

Corresponding Author: Jung Eun Kang, Tel: +82-51-510-2451, E-mail: jekang@pusan.ac.kr, ORCID: 0000-0002-4144-5984

Co-Authors: Ji-Yoon Lee, E-mail: wisepearl96@pusan.ac.kr, ORCID: 0000-0001-8080-6466

Minyeong Park, E-mail: pmyofficial@pusan.ac.kr, ORCID: 0009-0001-3814-4304

Ji Yoon Choi, E-mail: jrmny98@pusan.ac.kr, ORCID: 0009-0002-0898-4908

Received: 22 September, 2023. Revised: 17 October, 2023. Accepted: 18 October, 2023.

current trend is maintained. The analysis showed that the policy of supporting electric vehicles reduced PM_{10} concentration by $0.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and reduced the number of people with circulatory diseases by 494, and the effect was evenly distributed across the country. The industrial emissions regulation scenario resulted in the highest PM_{10} concentration reduction of $0.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$, but had a lower reduction in the number of people affected (358) than the EV support strategy, which could be attributed to the fact that this policy had a particularly high PM_{10} reduction effect in industrial areas such as Danyang-gun, Chungcheongbuk-do, and Sahagu, Busan. As a policy implication, this study suggests that it is necessary to apply fine dust policies tailored to the characteristics of local emission sources.

Keywords : Urban Planning, PM_{10} , System Dynamics, Cardiovascular Disease Patient, Policy Evaluation

I. 서론

산업혁명 이후 많은 도시들은 산업화와 도시화를 통해 경제적 성장과 공간적 확산을 지속해왔다. 그러나 이러한 성장의 이면에 다양한 도시문제가 발생했으며, 대표적인 도시 환경문제인 대기오염과 기후변화는 현대 도시에 큰 과제로 남아있다.

국내에서 미세먼지(72.9%)는 시민들이 가장 우려하는 대기오염 문제로 이는 방사능(47.9%), 유해화학물질(46.0%), 기후변화(45.4%)와 함께 최근 가장 주목받는 환경문제이다(Ahn & Jeon 2018). 대기 중을 떠다니는 입자상 물질인 먼지 중 입자크기가 매우 작은 미세먼지는 직경에 따라 PM_{10} (1000분의 10mm보다 작은 먼지)과 $PM_{2.5}$ (1000분의 2.5mm보다 작은 먼지)로 구분된다(KDCA & KMA 2018). 최근 10년 동안의 국내 PM_{10} 농도는 $33\sim 49\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수치를 기록하여 WHO(2023)에서 권고하는 미세먼지 농도($15\mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 2배 이상 높은 실정이다(Airkorea 2021).

미세먼지에 대한 심각성은 인간의 건강에 대한 부정적 영향에 기반한다. 미세먼지가 체내에 들어올 경우, 비염·천식과 같은 환경성질환을 유발할 수 있으며 이렇게 발생한 환경성질환은 다양한 합병증의 원인이 되며 만성적인 질병으로 이어질 수 있다(Seo & Lee 2019). 미세먼지는 대기환경 속에서 존재하여 인체에 장기간 노출이 이뤄질 수밖에 없어 환경성질환 외에도 허혈성 심장질환과 같은 순환계 질환과 뇌졸중과 같은 질환에 높은 위험성을 나타낸다(Pope et al., 2006; Lipsett et al., 2011). 미세먼지의 장기적

노출로 인하여 발생하는 심장질환·뇌질환 등은 고령자나 영유아와 같은 취약 계층에게 치명적으로 작용할 수 있다(Hwang 2019). 고령화로 인해 미세먼지에 대한 취약계층이 증가하는 우리나라의 특성상 미세먼지 저감을 위한 다양한 노력이 이루어질 필요가 있다.

미세먼지는 자연적으로 또는 화학반응으로 발생한다. 인위적 발생원으로 공장 등의 매연, 자동차 배기가스, 사업장 등에서 배출하는 비산먼지 등이 있고, 자연적 발생원으로 황사가 대표적이다. 기후변화는 지표면의 온도 증가와 함께 대기 중 미세먼지 농도 증가에 영향을 미친다는 연구가 보고(Doherty et al. 2017; Yang 2019)됨에 따라 심화되는 기후변화와 연계한 미세먼지의 지속적인 증가가 우려된다. 미세먼지는 탄소와 유사한 배출원 및 배출과정을 가지고 있어 미세먼지의 개선과 탄소중립을 동시에 달성할 수 있는 저감정책에 대한 관심도 높아지고 있다(Choi et al. 2022; Kim 2022).

그간의 선행연구는 보건, 의료 부문을 중심으로 미세먼지의 건강영향에 대한 연구와 도시, 환경 부문을 중심으로 미세먼지의 발생원인과 저감정책에 대한 연구로 크게 구분하여 이루어졌다. 보건·의료의 연구에서는 미세먼지의 장·단기적인 노출에 따른 사망과 특정 질병의 발생확률의 연관성을 살펴봤으며 미세먼지 농도가 증가함에 따라 사망 및 질병 발생 위험이 증가하는 것을 확인하였다(Pope et al. 2006; Chang & Choi 2009; Bae 2014). 도시·환경 부문의 연구는 주로 미세먼지 발생원과 발생에 영향을 미치는 요소의

규명(Maeng 2014; Park & Ko 2018; Jeong & Lee 2018; Jin & Jin 2021; Ahn et al. 2022; Hur & Kang 2022)과 일부 저감정책의 효과를 분석하였다(Lee & Kim 2007; Kim & Kang 2020). 해당 연구에서는 도시 미세먼지 발생원으로 교통부문의 배기가스와 산업·발전부문의 연소를 검토하고, 현재 시행되는 미세먼지 저감정책의 적용으로 인한 향후 미세먼지 배출량의 저감 정도를 정량적으로 분석하기도 하였다. 그러나, 이러한 부문별 연구도 중요하지만, 이제는 미세먼지가 발생하는 원인을 파악하고 이를 저감할 수 있는 정책의 시행 결과로 미세먼지 저감뿐 아니라 도시민의 건강에 미치는 영향을 함께 파악하는 종합적인 형태의 연구가 필요하다.

이에 본 연구는 미세먼지 발생원, 저감정책, 미세먼지 농도, 건강영향이 동태적으로 변화하는 복잡하고 순환적인 관계를 지니고 있다는 점을 고려해 이를 전체적으로 반영할 수 있는 시스템다이나믹스를 활용하여 이들 간의 복잡한 인과관계를 인과지도로 도출하고, 미세먼지 저감을 위한 대표적인 저감정책의 효과를 미세먼지 농도와 건강영향 측면에서 살펴보고자 한다. 이때, 본 연구는 적용가능한 정책의 시뮬레이션 결과를 전국적 수준뿐 아니라 지역적으로 비교하여 살펴보고자 한다.

II. 선행연구

1. 미세먼지 배출원 및 저감정책에 관한 연구

미세먼지 배출의 인위적 요인으로 해당 지역의 화력발전소나 생산·제조시설 등 산업부문이 중요한 비중을 차지한다(Kim et al. 2022). 산업부문의 미세먼지는 주로 에너지를 사용하기 위한 연소과정에서 발생한다. 또한, 자동차 배기가스도 미세먼지 발생의 주요 원인으로 인식된다(Lee 2008). 이와 함께 인접 국가에서의 대기오염물질도 국내 미세먼지 농도에 영향을 미치는 것으로 확인되고 있다(Kim et al. 2022). 이외에도 주거용 시설 및 상업·공공기관 시설에서의 난방과 같은 비산업연소(Maeng 2014)도 중요한 발생원이 될 수 있다.

고농도 미세먼지에는 대기환경 및 기상조건도 중

요한 영향을 미치는데, Lee et al.(2018)은 한반도의 고농도 미세먼지 사례가 발생했을 때 한반도의 차고 건조한 북서풍이 약화되고 풍속이 감소됨을 확인했다. 이를 기반으로 기후변화에 따라 겨울철 한반도의 대기가 정체되어 심한 대기오염을 발생시킬 수 있는 기상조건 빈도가 증가할 것으로 예상했다. 서울시를 대상으로 한 연구(Park 2017)는 연간 미세먼지 농도변화에 강수량, 기온, 풍속이 유의미한 음의 영향을 미침을 분석하였다.

일반적으로 이산화질소 등의 환경오염 물질은 배출원과 거리가 멀어지면 그 농도가 급격하게 감소하는 반면, 미세먼지는 배출지역에 오래 머물기 때문에 고층빌딩 밀집 여부, 도시공간구조 등 다양한 물리적, 토지이용 특성이 미세먼지를 악화시킬 수 있다(Jin & Jin 2021; Ahn et al., 2022). 다수의 연구들이 다양한 도시공간적, 사회·경제적 특성의 영향을 분석하였다. Park & Ko(2018)는 서울시를 대상으로 토지이용, 교통, 주거유형, 개발 밀도 등의 도시공간 특성이 미세먼지에 어떤 영향을 미치는지 살펴보고, 버스정류소와 버스노선 많고 주도로에 인접한 지역에서 미세먼지의 농도가 더 높게 나타남을 확인했다. Maeng(2014)의 연구는 인구특성, 교통특성, 토지이용특성, 주택특성, 사업체특성 등을 고려한 회귀분석에서 미세먼지에는 자동차 수, 제조업 특성 등이 유의미하게 영향을 미침을 확인하였다. Hur & Kang (2022)은 계절별 고농도 미세먼지 발생에 영향을 미치는 기상요인(풍속, 기온, 습도)과 도시공간구조요인(인구, 토지이용, 건축-주거, 교통)을 살펴보고 있으며, 모든 계절에 녹지지역 면적이 음의 영향을 미치고, 비산먼지를 발생시키는 건축허가건수가 양의 영향을 미침을 분석하기도 했다.

교통량과 미세먼지의 관련성이 큼에 따라 교통부문에 초점을 맞춘 연구도 있다. Jin & Jin(2021)은 빅데이터를 활용하여 서울시를 대상으로 분석한 결과, 교통체증지수는 미세먼지 농도증가에 유의미한 양의 영향을 미치며 이외에도 기온, 강수량, 풍속은 음의 관계를 나타냄을 확인했다. Jeong & Lee(2018)는 서울시 도시 대기 측정망과 도로변 측정소 자료를 활용하여 측정소 주변의 토지이용과 차량 이용의 영향을

분석한 결과, 상업지역 및 교통지역은 미세먼지 농도 상승에 영향을 미치며 활엽수림 등의 식생지역은 농도감소에 유의미한 영향을 미침을 분석했다.

미세먼지 배출에 영향을 미치는 요소를 조절하는 저감정책의 효과에 대한 연구도 수행되고 있다. 교통 부문의 경우 주로 디젤차의 운행 및 자동차의 이동 제한이 중요한 정책변수로 사용될 수 있는데, Lee & Kim(2007)은 자동차 부제 등의 운행규제에 따라 서울시의 미세먼지 농도가 5.5% 저감됨을 확인했다. 또한 국내 발전 및 수송 부문에서의 미세먼지의 배출 전망 모형(KEEI-EGMS)을 구축하고, 제3차 에너지기본계획 적용, 노후차 정책, 경유/휘발유 가격정책, 친환경 자동차 보급 등의 정책 시나리오의 적용에 따른 저감 효과를 분석한 연구(Kim & Kang 2020)에서는 지역별 미세먼지 배출량의 감소 효과를 파악하였다. 분석 결과, 제3차 에너지기본계획이 실행되면 2017년 대비 2040년의 미세먼지는 수송 부문에서 최대 14.2%, 발전 부문에서 최대 22.7% 감소하는 것을 확인하였다. 또한 해당 연구에서는 수송 부문의 미세먼지 저감 효과를 정책별로 분석하였는데, 단기적으로는 배출가스 5등급 차량의 생존률을 제한하는 시나리오의 효과가 크고, 장기적으로는 친환경 자동차 보급 시나리오의 효과가 큼을 밝히기도 했다. 또한 발전 부문의 경우 지역별 감축 효과를 분석하여 지역별 차이가 있음을 밝히기도 했다.

정리하면, 선행연구는 미세먼지 발생과 확산에 영향을 미치는 도시공간 특성, 사회경제적 특성을 분석하는데 초점을 맞추고 있었다. 이러한 연구들이 주로 실증적 분석을 통해 미세먼지 발생에 영향을 미치는 요인을 도출했지만, 실제 사람들의 건강에 미치는 영향까지 고려한 연구는 수행되지 못했다. 정책효과를 분석 선행연구의 경우, 교통 및 발전 부문의 정책을 중심으로 일부 연구가 수행되었다. 이들은 특정 분야 저감정책의 효과를 정량적으로 살펴봤으나, 미세먼지 발생과 흡수에 영향을 미치는 다양한 정책이 고려되지 않았고, 분석모델에 사회경제 및 토지이용 특성 등이 종합적으로 고려되지 못했다. 또한 저감정책 효과 분석 시 주로 회귀분석 기반의 통계적 방법론을 활용하고 있었는데, 통계적 방법론은 미세먼지 발생과

저감정책의 동태적 변화를 측정하는 것에 있어 한계점이 존재한다. 이러한 이유로 동태적인 정책효과와 분석과 이를 활용한 정책 평가로 이어질 수 있는 새로운 방법론의 활용이 필요하다.

2. 미세먼지의 건강영향에 관한 연구

대기 중 미세먼지의 건강영향에 대해 분석한 연구는 주로 미세먼지의 노출에 의한 건강지표의 변화를 관측하는 양적인 연구로 이루어졌다. 이들(Schwartz 2001; Pope et al. 2006; Chang & Choi 2009; Bae 2014)은 미세먼지의 농도가 증가하는 정도에 따른 도시민의 사망 및 질병의 발생위험을 정량적으로 분석하기 위해 주로 통계적인 방법론을 활용하여 상관성을 분석하였다.

미세먼지의 노출에 따른 사망자 발생 및 위험성에 대해 분석한 연구로 Chang & Choi(2009)는 일정 기간 PM_{10} 에 노출되었을 때 PM_{10} 농도가 $100\mu g/m^3$ 증가 시 사망자수가 0.51% 증가하는 것을 확인하였다. 또한 미세먼지의 건강 영향을 연령집단으로 구분하여 살펴본 연구(Bae 2014)는 65세 이상 연령집단에서 $10\mu g/m^3$ 증가 시 초과사망발생위험이 0.64% 증가해 전체 연령집단에서의 0.44% 증가보다 높게 나타났다. 이를 통해 미세먼지 농도증가에 따라 취약계층의 건강 위험이 높음을 확인할 수 있었다.

미세먼지 노출에 따른 건강영향으로는 호흡기계 질환과 심혈관계 질환 심화가 대표적이다. 미세먼지의 호흡기 영향은 주로 세기관지에서 염증반응을 일으킴으로 천식, 만성기관지염 등을 악화시킬 수 있고, 최근에는 미세먼지가 심근경색, 뇌졸중, 심박동수 이상, 급사 등과 같은 심혈관계 질환만성기관지염, 기도폐쇄 등을 일으키거나 악화시킬 수 있다. 또한 미세먼지는 심근경색, 뇌졸중, 심장박동 이상, 급사 등과 같은 심혈관계질환에도 중요한 위험요인으로 알려져 있다(Shin 2007). 이에 대해 미세먼지 농도 변화에 따른 특정 질환의 발생위험을 양적으로 분석한 연구(Pope et al. 2006)에서는 단기적인 미세먼지 노출로 인한 허혈성 심장질환 및 심근경색 발병 영향을 미국 도시를 대상으로 분석을 진행하였다. 해당 선행연구의 분석 결과, 미세먼지 농도의 $20\mu g/m^3$ 의 증가가

질환 발생의 위험성이 1.3%의 증가하는 것으로 나타났다. 미세먼지 농도의 변화에 따른 인체적 민감도를 분석한 연구(Schwartz 2001)는 PM₁₀ 농도의 사분범위(IQR) 증가에 따른 피브리노겐(1.7배), 혈소판(1.27배), 백혈구(1.64배)의 변화를 관측하여 미세먼지의 건강 영향을 도출하기도 하였다.

그동안 선행연구는 주로 미세먼지와 관련성이 높은 건강 영향이 무엇이고, 어느 정도의 영향이 나타나는지에 초점을 맞추었다면 최근에는 타 분야에서 주로 다루었던 미세먼지 발생에 영향을 미치는 도시 특성이나, 의료접근성 등도 고려하려는 시도가 이루어지고 있다. Cho et al.(2013)은 서울시를 대상으로 미세먼지를 포함한 다양한 대기오염물질이 알레르기 비염·천식과 같은 환경성질환에 미치는 영향을 패널 분석모형을 활용하여 분석하였는데, 통제변수로 소득수준과 녹지면적을 포함하였다. Seo & Lee(2019)는 수도권을 대상으로 대기오염물질과 환경성질환과의 관련성을 분석한 연구에서 녹지면적과 의료기관의 수를 통제변수로 포함하여 실증분석하였다.

미세먼지의 건강영향 연구는 주로 보건·의료 분야에서 미세먼지 농도증가에 따른 질병 및 사망위험 변화에 관한 정량적인 연구로 진행되었다. 이러한 연구는 미세먼지가 인체에 미치는 영향력을 통계적, 정량적으로 살펴볼 수 있는 결과를 제시했지만, 이러한 결과가 미세먼지 문제해결에 정책적 시사점을 제공할 수 있는 타 분야 연구들과 연계될 필요가 있다. 최근 들어 도시특성을 고려한 미세먼지의 건강영향을 분석하는 연구가 이루어지기도 했으나, 이러한 연구들은 대부분 통제변수로 일부의 도시특성만을 반영하고 있어, 다양한 도시특성, 저감정책, 농도, 건강영향을 통합적으로 살펴보는 연구가 이루어질 필요가 있다.

3. 시스템다이나믹스를 활용한 미세먼지 연구

정책효과 평가 방법론 중 시스템다이나믹스는 결과 중심의 단선적인 통계적 방법론에 비해 과정 중심의 피드백 구조에 초점을 맞춘다. 시스템다이나믹스는 복잡한 인과관계로 구성된 현상이 동태적으로 어떻게 변화하는지를 실험해보는 방법론(Moon 2007)으로 미래 현상을 예측하는 동시에 정책의 투입에 따른 효

과측정이 가능해 다양한 분야에서 활용되고 있다.

미세먼지와 관련하여 시스템다이나믹스를 활용한 연구로 Hong et al.(2019)은 다양한 선행연구를 토대로 복잡한 인과관계를 가지는 미세먼지의 발생과 영향에 대한 정성적 인과지도를 작성하고자 하였다. Kim et al.(2021)도 미세먼지의 배출원과 저감정책, 공간특성 변수로 구분하여 배출원별 인과지도를 작성하고, 지자체별 실제 시행되고 있는 미세먼지 저감정책과 비교하여 시사점을 제시하고자 하였다. 국내에서 시스템다이나믹스를 활용한 연구들은 주로 정성적인 인과지도 작성을 통해 미세먼지 발생의 흐름을 설명하고자 하였고, 저감정책의 효과평가로 이어지지 않았다.

국외에서는 교통분야에서 발생하는 미세먼지 배출에 대한 미세먼지 저감 효과를 비교하기 위한 연구가 수행된 바 있다. Hosseinabad & Moraga(2017)는 멕시코시티의 미세먼지 발생 흐름을 모델로 구축하고 세금 징수액을 확대하는 방안과 대중교통 시스템의 활성화의 두 정책의 효과를 비교하였으며 분석 결과, 세금징수는 미세먼지 농도 추세를 변화시키지 못했으나, 대중교통 시스템의 활성화 정책은 미래 미세먼지의 농도를 감소 추세로 변화시키는 것으로 분석되어 정책적 시사점을 제공했다.

4. 본 연구의 차별성

미세먼지의 발생을 인위적으로 증가시킬 수 있는 사회경제적 여건, 도시공간구조적 특성, 기상특성 등이 예상됨에 따라 저감정책을 적극적으로 시행해야 하는 시점이다. 이에 본 연구의 첫 번째 차별성은 미세먼지 발생에 영향을 미치는 특성, 미세먼지와 건강영향 등 분야별로 이뤄졌던 연구를 미세먼지 발생원, 저감정책, 미세먼지 농도, 건강영향을 연계하여 통합적으로 살펴보고 저감정책의 효과를 시뮬레이션하여 정책적 시사점을 도출하는 것이다.

둘째, 본 연구는 연구목적을 달성하기 위한 방법론으로는 복잡하고 순환적인 인과관계를 인과지도로 도출하고, 정책효과도 시뮬레이션할 수 있는 시스템다이나믹스를 선택하고자 한다. 기존의 국내 선행연구들이 인과관계도 작성에 초점을 맞추었다면 본 연

구는 정책의 효과를 시뮬레이션하는 것까지 포함하였다.

또한, 본 연구에서는 지역별 특성에 따라 정책효과가 달라질 수 있다는 점을 고려하여 전국단위의 평균적 효과 뿐 아니라 지역별로 정책의 효과를 비교하고자 한다.

마지막으로, 미세먼지 저감정책의 효과에 관한 선행연구들은 미세먼지 농도변화에 주로 초점을 맞추어 진행되었다면, 본 연구는 미세먼지 농도변화와 함께 건강영향까지 고려하여 분석하였다. 이를 위해 미세먼지에 영향을 받는 대표적인 질환인 순환기계 질환에 초점을 맞추어 순환기계 질환자 수를 변수로 활용하였다.

III. 연구방법

1. 분석 방법

미세먼지가 발생하는 도시 공간 속 요인을 규명하는 한편, 미세먼지가 순환기계 질환에 미치는 영향을 복합적으로 분석하기 위해서는 단순한 인과관계를 도출하는 범위에서 확장하여 동태적인 관점에서 현상을 관찰할 수 있는 방법론이 필요하다. 시스템다이나믹스는 동태적이고 순환적 인과관계를 시각적으로 설명하고 이를 기반으로 시뮬레이션을 통해 동태적인 변화에 대해 접근할 수 있는 방법론이자 프레임워크의 역할을 할 수 있다(Moon 2002). 또한 시스템다이나믹스는 양적인 분석과 질적인 분석을 동시에 고려할 수 있는 방법론으로 시뮬레이션을 통해 정책에 대한 효과를 검증할 수 있는 과정이 포함되어 현상의 규명과 정책효과를 함께 관측할 수 있는 장점을 지닌다(Forrester 1994; Choi 2003).

본 연구는 미세먼지 발생과 영향의 인과지도를 구축하고, 구축된 모형을 바탕으로 미세먼지 농도와 순환기계 질환자 발생에 대한 동태적인 흐름을 추정하기 위해 Vensim DSS 프로그램을 활용하였다.

연구는 공간적으로 전국 250개 시군구를 대상으로 자료수집 및 분석이 이루어지며, 데이터는 코로나19의 영향을 배제할 수 있는 2010년부터 2019년까지의 자료를 수집했다. 시뮬레이션의 목표연도는 자료수

집이 마감되는 2019년 이후 10년 후인 2030년으로 설정하였으며, 정책투입에 따른 목표연도의 미세먼지 농도와 건강영향의 변화를 관찰하여 정책효과를 살펴보고자 한다.

구축한 시스템다이나믹스 모델을 활용하여 진행한 시뮬레이션 결과는 실제 데이터와 비교하여 제작된 알고리즘이 구조적으로 타당한지를 확인하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 실제 수집한 데이터와 시뮬레이션을 통한 데이터의 오차를 비교하는 절대 평균오차 비율(MAPE : Mean Absoulte Percentage Error)의 수식을 다음과 같이 적용하여 구축한 시스템다이나믹스 모형이 적절한지를 확인하였다(Lewis & David 1982).

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{X_i - F_i}{X_i} \right| \times 100 (\%)$$

n : Number of data years

X_i : Actual data values

F_i : Simulation data values

$0\% \leq MAPE < 10\%$: Virtually certain

$10\% \leq MAPE < 20\%$: Likely

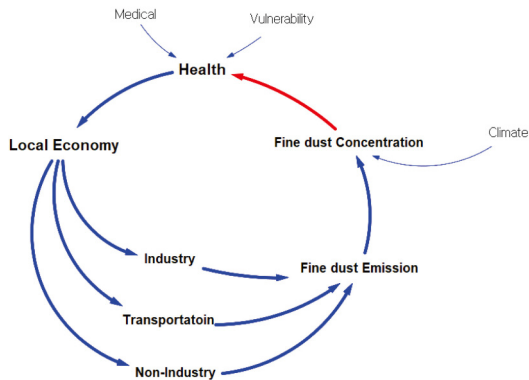
$20\% \leq MAPE < 50\%$: About as likely as not

$50\% \leq MAPE$: Unlikely

2. 인과지도 (Causal Loop Diagram)

본 연구는 시스템다이나믹스 모형을 구축하기 앞서 선행연구를 바탕으로 부문별 인과관계를 순환적인 구조로 연결하는 인과지도를 작성하였다(Figure 1).

인과지도의 중심이 되는 미세먼지 발생 관련한 순환적 인과관계는 ‘도시활동’-‘미세먼지’-‘건강’-‘지역경제’의 균형루프(Balance Loop)인 ‘B1’로 설정하였다. 국내의 미세먼지는 교통·산업·비산업 등의 분야로 구성되는 도시활동으로 농도가 증가할 수 있다. 교통부문의 미세먼지는 자동차의 이동으로 발생하며 이 경우 통행량, 디젤차 수, 경유 소비 등 다양한 변수가 미세먼지 발생에 영향을 미칠 수 있다(Kim & Moon 2014; Bae & Kim 2016; Kim 2018). 산업부문 및 비산업부문의 미세먼지 발생은 주로 에너지를 사용하기 위한 연소과정에서 발생하며 이를 도시특성변수로 활용하기 위해 공업시설, 용도별 건물 수 등의 물리적인 도시특성을 활용할 수 있다(Oh et al, 2005; Zhao

Figure 1. PM₁₀-Cardiovascular Disease Causal Loop Diagram

S et al, 2019).

또한, 미세먼지의 건강 영향에 관한 선행연구에서 확인할 수 있듯이 장기적인 미세먼지 노출은 환경성 질환과 호흡·순환기계 질환의 발생 및 악화에 영향을 미칠 수 있다. 마지막으로 시민들의 건강악화는 지역 경제에 영향을 미친다. 미세먼지 노출로 인해 도시민의 건강이 나빠지면 생산성 및 인적자본이 감소되고 이는 도시경제 활동의 축소로 이어질 수 있다(Jung 2010; Park 2021; Lee & Kang 2022).

또한 미세먼지 발생의 흐름을 파악하기 위해서는

중심이 되는 순환구조 외의 외부 영향요인을 고려할 필요가 있다. 이를 위해 도시민의 건강에 영향을 미칠 수 있는 보건·취약 인구특성, 미세먼지 농도변화에 영향을 미치는 기온·풍속·강수량 등의 기상적 요인(Hur & Kang, 2022)을 보조적인 변수로 투입하여 모형의 설명력을 강화하였다.

작성한 인과지도를 기반으로 시스템다이나믹스 시스템 흐름도를 작성하기 위해 변수를 선정하였다(Figure 2, Table 1). 변수는 선행연구를 기반으로 미세먼지 발생에 영향을 미치는 요인들을 선택했으며, 특히 미세먼지 저감정책과 연계될 수 있는 변수들 함께 고려하였다.

미세먼지 농도는 에어코리아에서 제공되는 측정소별 데이터를 기반으로 크리깅 기법을 통해 시군구 자료로 활용하였다(Table 1). 미세먼지 농도에 직접적으로 영향을 미치는 미세먼지 배출량은 도로이동, 산업, 비산업 부문별 배출량을 변수로 선정하였다. 또한 미세먼지 농도 악화에 영향을 미치는 기상변수로 기온, 풍속, 강수량을 선정하였다.

미세먼지 배출량에 영향을 미치는 산업부문의 변수는 선행연구를 기반으로 공장등록 수, 제조업체

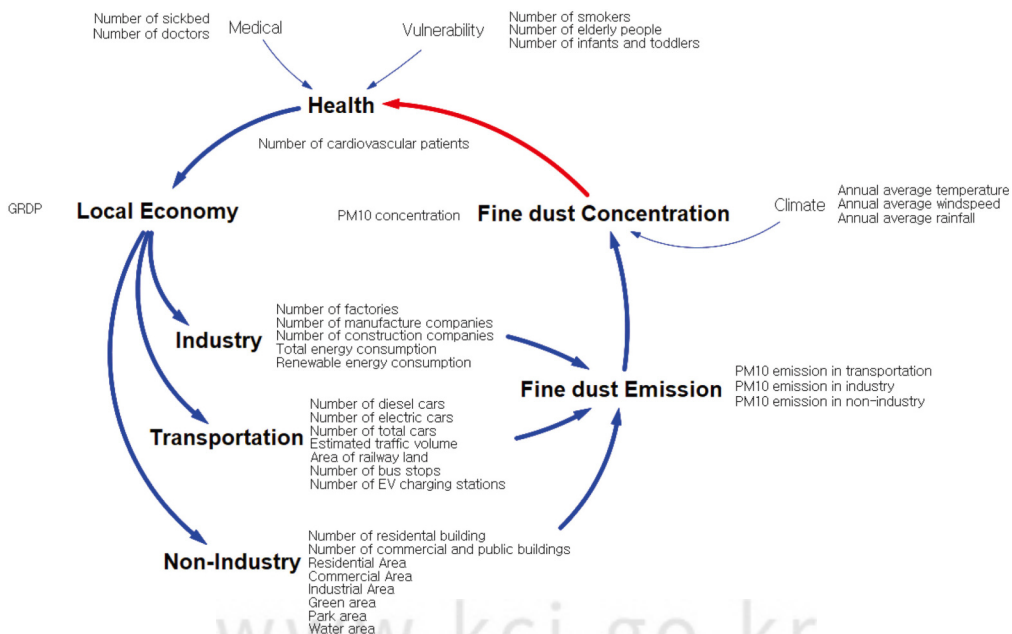


Figure 2. Selection of variables based on Causal Loop Diagram

Table 1. List of variables to be used in the study

Category	Variables	Source
Health	Number of cardiovascular patients	National Health Insurance Service
Medical	Number of sickbeds	
	Number of doctors	
Vulnerability	Number of smokers	Statistics Korea
	Number of elderly people	
	Number of infants and toddlers	
Climate	Annual average temperature	Airkorea
	Annual average windspeed	
	Annual average rainfall	
Air Pollution	Annual average PM ₁₀ concentration	National Air Emission Inventory and Research Center
	PM ₁₀ emission in transportation	
	PM ₁₀ emission in industry	
	PM ₁₀ emission in non-industry	
Transportation	Number of diesel cars	Ministry of Land, Infrastructure and Transport
	Number of electric cars	
	Number of cars (total)	
	Number of bus stops	
	Estimated traffic volume	Korea Transport DB
	Area of railway land	Statistics Korea
	Number of EV charging stations	KEPCO Energy Marketplace
Industry	Number of factories	Korea Industrial Complex Corporation
	Number of manufacture companies	Statistics Korea
	Number of construction companies	
Non-industry	Number of residential buildings	Building Life History Management System
	Number of commercial and public buildings	
	Area of residential land	Statistics Korea
	Area of commercial land	
	Area of industrial land	
	Area of green space	National Spatial Data Infrastructure Portal
	Area of park	
	Area of water	Environmental Geographic Information Service
Local economy	GRDP	Local finance Integrated Open System
	Environmental expenditure	
Energy	Total energy consumption	Korea Energy Economics Institute
	Renewable energy consumption	

수, 건설업체 수가 포함되었으며 에너지 연소를 반영할 수 있는 에너지 소비량과 신재생 에너지 소비량을 선정하였다.

교통부문의 변수는 미세먼지 배출에 양의 영향을 미치는 디젤차량대수, 자동차등록대수, 추정통행량, 철도용지 면적과 음의 영향을 미치는 전기차량대수,

버스정류장수 및 전기차 충전소수를 포함시켰다. 비산업부문은 건축물 미세먼지와 관련 있는 주거용도 건물수, 상업 및 공공용도 건물수와 함께 도시지역의 용도별 면적이 선정되었고, 미세먼지 배출에 음의 영향을 미치는 토지이용인 녹지면적·공원면적·수계면적이 포함되었다. 산업, 교통, 비산업 부문에 영향을

Table 2. List of fine dust reduction policies by government and local governments

Category		Contents of policy
Government	Ministry of Environment (2019)	- Expanding cap-and-trade nationwide - Strengthening the reduction of older diesel vehicles - expanding the adoption of low-emission vehicles - Eco-friendly energy conversion (medium to long term)
	Seoul (2019)	- Supporting the conversion of diesel vehicles to LPG and EVs - Replace boilers with low-Nox burners
Local government	Busan (2018)	- Scrapping older diesel vehicles and installing diesel particulate filters(DPF) on vehicles - Support for electric and hydrogen vehicles to increase green vehicle - Creating climate-resilient urban forests
	Cheongju (2021)	- Manage air pollutant emitting facilities - Expanding the adoption of green cars - Expanding Green Infrastructure - Strengthen management of PM10 and PM2.5 around life
	Daegu (2016)	- Expansion of automobile low-emission projects - Support for early scrapping of diesel vehicles

미칠 뿐 아니라 미세먼지의 건강 영향 발생 시 부정적 영향을 받게 되는 지역경제 부문은 GRDP와 환경부문의 세출을 변수로 포함시켰다. 미세먼지 농도변화에 직접적 영향을 받는 건강변수로 순환기계 질환자수를 변수로 선정하였으며, 국민건강보험공단에서 제공되는 심혈관계 질환 입원자 수를 자료로 활용하였다.

순환기계 질환은 많은 선행연구에서 미세먼지 심화로 큰 영향을 받는 질환으로 분석되어 있으며, 국내에서 사망원인 2위에 해당할 만큼 그 중요성이 커지고 있는 질환이다(Statistics Korea 2022). 미세먼지의 건강영향인 순환기계 질환자 수에 영향을 미칠 수 있는 추가적인 부문으로 취약인구특성과 보건이 반영되었다. 환자수 증가에 영향을 미치는 취약인구 특성에는 흡연자수, 고령인구수, 영유아수가 포함되었으며 환자에 음의 영향을 미치는 보건특성에는 병상수와 의료인력수가 변수로 선정되었다.

3. 정책효과 시뮬레이션을 위한 미세먼지 저감정책 선정 및 시나리오

본 연구에서는 인과지도와 수집한 데이터를 바탕으로 시스템다이내믹스 시스템 흐름도를 작성하여 모형을 구축한 후, 미세먼지 저감 정책을 설정하여 정책이 없을 때(do-not policy)의 행태분석과의 비교를 통해 정책적용의 효과를 정량적으로 살펴보고자

한다(Table 2).

정책 시뮬레이션 시나리오 선정을 위해 국내에서 채택하고 있는 미세먼지 저감정책을 살펴보았다. 우선, 정부 차원에서 환경부(2019)는 미세먼지 관리 종합계획을 통해 2024년까지 2016년 대비 총 20%의 대기오염물질 감축을 목표로 하고 있으며 산업·수송·발전·농업 및 생활부문으로 분야를 구분하여 과제를 제시하였다. 산업부문에서는 미세먼지 다량배출지역을 대기관리권역으로 지정하여 배출량 총량제를 통한 관리를 계획하였으며 사업장 배출기준을 평균 30% 강화하여 오염물질의 배출을 규제하였다. 수송에서는 노후경유차 감축 강화 및 저공해차 보급 확대를 과제로 하였다. 노후경유차의 경우 2019년까지 2년 동안 약 15% 폐차가 이루어진 사실을 확인할 수 있으며 지속적인 폐차 지원 방안을 제시하고 있다. 저공해차 보급의 경우 100만 대의 전기차 보급 및 1.5만 대의 전기차 충전소 확충을 통해 2019년 대비 약 10~15배의 보급 및 인프라 확대를 제시하였다. 발전부문에서는 2030년까지 재생에너지의 발전 비중을 7.6%에서 약 20%까지 확대를 목표로 하였으며 농업 및 생활에서는 영농폐기물의 불법소각 방지를 위한 관리 강화가 이뤄지고 22년까지 가정용 노후보일러의 약 25%를 친환경보일러로 교체하는 것을 목표로 설정하였다. 이 외에도 산림청(2018)에서는 미세먼지 저감을 위한 도시 인프라 구축방안을 제시하기도 하였다.

Table 3. List of virtual scenarios for policy simulation

Scenarios	Category	Policy variable	Contents
Do-not policy	-	-	- Results when the current trend is maintained
Policy 1	Transportation	- Number of electric cars	- 10x increase in electric cars by 2030
		- Number of EV charging stations	- 15x increase in EV charging stations by 2030
Policy 2	Transportation	- Number of diesel cars	- 55% reduction in diesel cars by 2030
Policy 3		- PM ₁₀ emission in industry	- 30% reduction in PM ₁₀ emission in industry by 2030
Policy 4	Land use	- Area of green space - Area of park	- 2x increase in area of green space: park by 2030

지역별 미세먼지 저감대책은 정부가 제시한 방향성을 유지하면서 지역별 여건을 반영하고자 했다. 서울시(2019)는 생활권 미세먼지 저감을 위한 그물망 관리체계를 구축하기 위해 교통·가정 및 건물·점오염원 분야에서의 미세먼지 저감 대안을 제시하였다. 해당 정책에서 주목하는 과제는 자동차의 배출가스 규제를 통해 미세먼지를 저감하는 한편, 전기차 등과 가정·사업체의 보일러·버너 교체와 같이 친환경적 시스템 전환을 제시하였다.

부산광역시(2018)는 친환경 자동차 보급확대와 함께 공기정화장치 및 학교 숲 조성을 주요 대책으로 수립하였다. 또한 부산시에서는 2022년까지 2019년 기준 경유차의 약 10%에 해당하는 노후 경유차의 폐차를 시행하였으며 최근에는 공원면적 대비 약 0.3%의 규모의 도시숲 조성을 목표로 설정하고 사업을 진행하고 있다.

청주시(2021)는 ‘미세먼지 걱정 없는 청정도시 청주’라는 비전 아래 ‘사업장 관리’, ‘이동오염원 관리’, ‘생활주변 배출원 관리’, ‘그린인프라 조성’, ‘시민 건강보호 및 참여’, ‘관리 기반 확충 및 대내·외 협력’의 6대 분야에 대해 다양한 대기질 개선 정책을 시행하고 있었으며, 미세먼지 저감대책 수립에 앞서 지역 미세먼지 배출원 조사를 통해 기존 추세를 유지했을 때의 미세먼지 배출량을 전망하여 2025년 기준 예측량 대비 약 15%의 PM₁₀ 배출량 삭감을 목표로 하고 있다. 탄소포인트제와 같은 저탄소 녹색도시 정책과 연계하여 미세먼지 저감 정책을 제시하였다.

대구시(2016)의 경우 지역 미세먼지 농도에 따른 전략을 제시하였으며 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하의 농도를 기록할 경우, 지역 내 오염원에 따라 맞춤 대책을 마련하

였다. 대구시의 미세먼지 전략은 교통·산업단지 등의 주요 배출원과 함께 사업·다중이용시설과 같이 실내·외적으로 발생하는 비산먼지를 관리하기 위한 전략으로 구분된다. 교통분야에서는 전기차 보급, 경유차 폐차와 같은 전략을 제시하고 있으며 이외에도 도로에서 발생하는 비산먼지를 고려하여 물청소를 통한 미세먼지 저감을 추가적인 대안으로 제시하였다.

현재 국내에서 시행되는 미세먼지 저감정책을 정리하면 정부와 지자체 모두 미세먼지 발생원별 배출량의 저감과 분야별 친환경 시스템의 전환을 기반으로 전략을 수립하고 있으며 대부분 산업·교통 분야에서의 배출 규제 및 친환경 요소 지원과 미세먼지 저감 숲 및 공원 조성 등 같은 녹색 인프라 조성을 통한 토지이용 분야의 전략을 제시하고 있다. 이러한 미세먼지 저감정책을 기반으로 본 연구는 ‘친환경적 시스템 전환’, ‘규제를 통한 미세먼지 저감’, ‘미세먼지 흡수원 확대’의 3가지의 정책 방향을 설정하였다. 이후 수집한 자료를 바탕으로 시뮬레이션을 위해 ‘전기차량대수·전기차 충전소 수’, ‘디젤차량대수’, ‘산업부문 PM₁₀ 배출량’, ‘녹지면적’을 정책변수로 선정하여 가상 시나리오를 구성하였다(Table 3). 정책 시나리오는 전국 기준 정책을 시행하는 환경부(2019)의 미세먼지 관리 종합계획 분야별 목표에 맞춰 정책 대안 1·2·3의 시나리오를 설정하였으며 정책대안 4는 산림청 및 부산시·청주시에서 제시하는 그린 인프라 전략에 맞춰 시나리오를 구성하였다.

Policy 1(정책대안 1)은 전기차 보급을 지원하는 정책으로 본 연구에서는 ‘전기차량대수’와 ‘전기차 충전소 수’를 정책변수로 선정하였다. 환경부는 저공해차 확대 전략으로 전기차는 10배, 전기차 충전소는 15배

증가의 목표치를 제시하고 있다. 이를 반영하여 해당 정책 시나리오에선 전기차 대수는 매년 25%씩 증가하여 2030년까지 10배 증가하는 것을 가정했으며, 전기차 충전소 수는 매년 31%씩 증가하여 2030년까지 15배 증가하는 것을 가정하였다.

Policy 2(정책대안 2)는 노후 경유차의 폐차를 통한 미세먼지 저감전략으로 전국 노후 경유차가 2년 동안 약 15% 폐차가 이루어졌다는 환경부의 보고를 참고하였을 때 2030년까지 매년 8%의 노후 경유차가 폐차하여 약 55%의 경유차 감소가 이루어진 것을 가정하였다.

Policy 3(정책대안 3)은 산업부문의 배출량 규제 정책 시나리오다. 환경부에서는 배출량 총량제 및 사업장 오염물질 배출기준 강화를 통해 직접적인 배출을 규제하고 있으며 이 중 사업장 배출기준의 경우 20년부터 평균 30% 강화를 목표로 하였다. 배출기준 강화에 비례하여 산업부문 배출량이 감소하는 것을 고려하여 해당 시나리오에서는 2030년까지 30%의 산업부문 PM_{10} 배출량 감소를 가정하였다.

마지막 Policy 4(정책대안 4)는 미세먼지 흡수원을 확대하는 방안으로 공원과 녹지면적을 확장하는 전략으로 정부 및 지자체의 그린 인프라 확충 전략을 적용

한 시나리오다. 구체적인 수치는 1인당 생활권 면적을 2년 동안 $10.07m^3$ 에서 약 20%($12.43m^3$) 증가하는 것을 목표로 하는 목표(Korea Forest Service 2018)를 고려하여 2030년까지 2배의 면적 확대가 이루어지는 것을 가정하였다.

IV. 분석결과

1. 시스템 흐름도 (Stock & Flow Diagram)

본 연구는 작성한 인과지도 및 인과지도를 기반으로 수집한 자료를 바탕으로 미세먼지 발생의 시스템 흐름도를 작성하여 시뮬레이션 모형을 구축하였다 (Figure 3).

분석하고자 하는 목적변수로는 연구의 목적에 맞춰 PM_{10} 농도와 순환기계 질환자 수로 설정하여 순환적 인과구조에 따른 변화를 관측할 수 있게 구성하였다. 또한 목적변수가 되는 PM_{10} 농도와 순환기계 질환자 수를 연결 짓는 지역경제 변수인 GRDP와 환경부문 세출을 중심으로 순환형 구조를 설정하였다. 마지막으로 투입한 변수들에 대한 시계열적 변화를 모형에 반영하기 위하여 시스템 변수를 활용하여 변수의 유입·유출 요소를 설정하여 미세먼지 발생 흐름

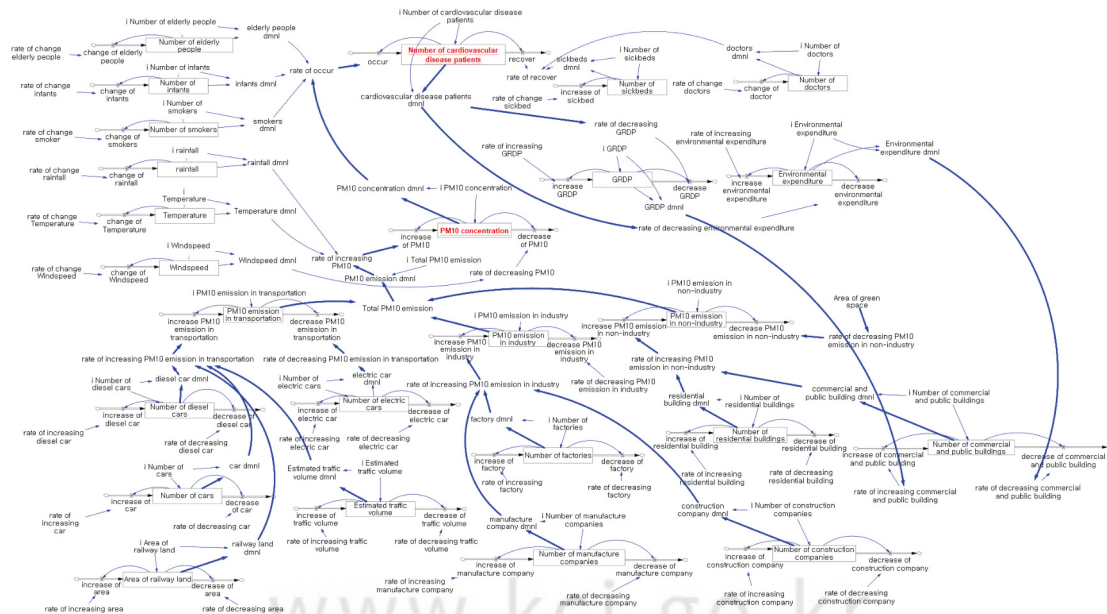


Figure 3. PM_{10} -Cardiovascular Disease Stock & Flow Diagram

Table 4. Results of comparing fine dust (PM₁₀) concentrations by policy

Scenarios	Policy 1 (Increase of electric car)	Policy 2 (Regulation of diesel car)	Policy 3 (Regulation of emissions in industry)	Policy 4 (Increase of green area)
Do-not policy (Keep trend)	27.63	27.63	27.63	27.63
Policy	27.42	27.55	27.41	27.62
Policy Effect ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	-0.21	-0.08	-0.22	-0.01

을 예측할 수 있는 알고리즘을 구축하였다.

이후 정책 시뮬레이션 진행에 있어서는 자료수집이 종료된 2020년부터 2030년까지의 기간을 분석하였다. 정책효과 평가에는 전국 미세먼지 농도 및 순환기계 질환자 수에 대한 정책대안별 목적변수의 감소추세 및 감소율을 비교하여 대안별로 효과적인 정책을 파악하였으며 정책대안별 효과를 지역별로 분석하여 정책대안에 따른 미세먼지 저감 효과 및 건강 영향에 대해 ArcGIS Pro로 지도화하여 비교하였으며 각 정책효과에 대한 상위 집단을 군집화하여 지역별 미세먼지 배출원에 대한 지역별 특징을 규명하고자 하였다.

2. 정책 시뮬레이션

1) 미세먼지(PM₁₀) 농도 저감 효과

시뮬레이션 결과의 정확성을 확보하여 정책평가의 타당성을 확보하기 위해 개발된 모형의 절대 평균오차 비율(MAPE)을 검토하였다. MAPE는 전국 평균 4.64%로 분석 방법의 기준에서 보듯 매우 정확한 예측의 기준을 만족하였다.

앞서 언급된 대로 본 연구에서는 전기차 지원(대안 1), 디젤차 규제(대안 2), PM₁₀ 산업 배출 규제(대안 3), 공원·녹지 확대(대안 4)를 선정하여 현재 시행 중인 미세먼지 저감 전략의 목표치에 맞춰 정책 시나리오를 설정하였다. 최종결과는 2030년 기준으로 측정하였다. PM₁₀ 농도의 추세를 정책대안별로 도출한 결과는 다음과 같다(Table 4).

전국적으로 살펴보면 PM₁₀의 저감 효과가 가장 높은 정책은 산업부문에서 미세먼지 배출을 규제하는 정책대안 3으로 나타났다. 이 정책은 현재 추세가 유

지되는 행태분석 대비 0.22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 미세먼지가 저감되는 효과를 나타냈다. 다음으로 효과가 높은 정책은 전기차 지원 정책으로 현재 추세 유지와 비교해 0.21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 미세먼지 저감 효과를 나타냈다.

다음으로 디젤차 규제, 공원·녹지면적 확장의 순서로 미세먼지의 저감 효과가 높은 것을 확인할 수 있었으며 이들은 각각 0.08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 정책효과를 관측하였다. 공원·녹지면적 확장 전략의 경우 다른 전략과 비교하여 적은 효과를 보이고 있으며 이는 현재 진행 중인 미세먼지 흡수원 조성 사업 자체가 소규모로 시행되어 미세먼지 흡수 효과가 적은 것으로 해석할 수 있다.

정책대안별 PM₁₀ 농도 저감 효과는 지역별로도 차이가 있었다(Figure 4). 농도 저감 효과가 가장 높았던 정책대안 3(산업부문 배출량 규제)의 지역별 효과를 비교해보면, 저감 효과가 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상으로 매우 큰 지역들이 16곳 정도 나타나고 있었으며 전국적으로 특정한 지역에 분포하고 있었다. 대표적으로 정책대안 3의 효과가 크게 나타난 지역은 충북 단양군, 전북 전주시 덕진구, 세종특별자치시, 대전 대덕구, 부산 사하구·강서구 등으로 나타났다. 해당 지역들은 대규모 공업단지나 미세먼지 배출 유발공정을 진행하는 공장들이 다수 입지하고 있는 지역으로 대전 대덕구(1,274개), 전주시 덕진구(1,013개) 및 부산 사하구(1,443개)·강서구(4,461개)의 경우 전국 평균 공장 수(888개) 지역과 비교해 1.5배~3배의 공장 수를 가지고 있어 산업 배출규제의 효과가 뚜렷하게 나타났다. 충북 단양군의 경우, 공장 수(103개)는 적었으나, 대부분 시멘트 공장과 같은 미세먼지 다배출 시설이고, 산업부문 배출량의 규모(88만kg)가 전국 평균(4만

kg)과 비교하여 20배 이상으로 산업부문 배출규제의 효과가 크게 나타났다. 세종시는 공장 수(805개)와 산업부문 배출량(2,8만kg)의 규모는 전국 평균보다 작으나, 특별자치시로 지정된 2012년(0.4만kg) 이후 산업부문의 미세먼지 배출량의 증가 폭이 매우 높게 나타나 정책대안 3 적용 시 상대적 효과가 높게 나타난 것으로 판단된다.

교통부문의 주요 정책인 전기차 확대 정책(정책 대안 1)은 미세먼지 저감 효과가 $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 지역이

11곳 나왔으며, $0.5\sim 1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 인 지역이 9곳, $0.3\sim 0.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 인 지역이 17곳으로 나타났다. 전기차 보급 확대에 의한 미세먼지 저감 효과가 높은 지역 중 하나인 제주 서귀포시의 경우 $4.81\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 저감 효과가 나타났으며 해당 지역에서의 전기차 등록대수(7,447대)가 전국 평균(3,237대)보다 많으며 자동차 등록대수 대비 전기차 비중 또한 전국 평균(3.42%)의 2배 이상의 수치(7.10%)를 기록하여 정책 대안 1에 대한 미세먼지 저감 효과가 높게 나타난 것을 확인할 수 있다.

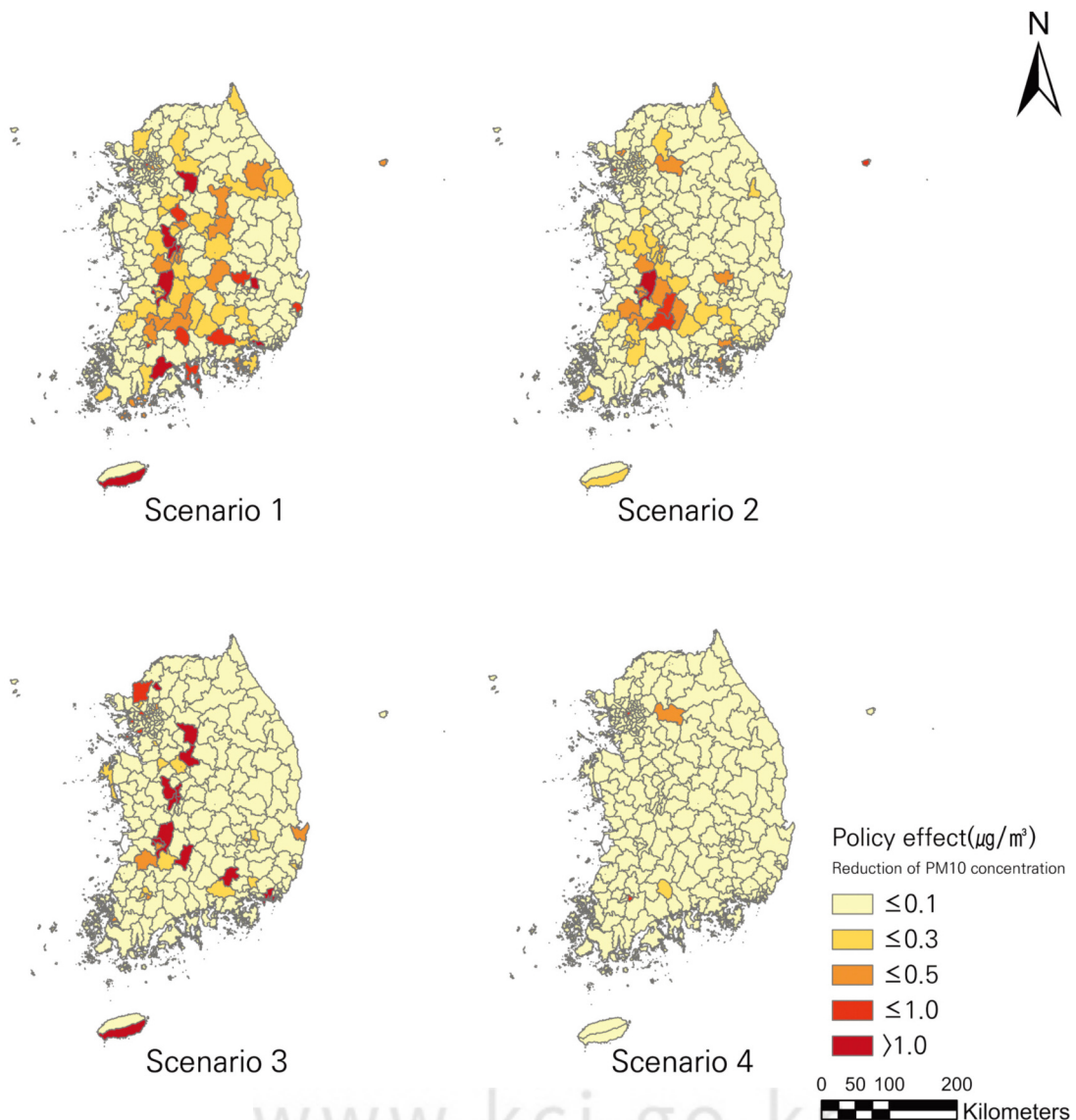


Figure 4. Regional comparison of the effect of reducing the concentration of PM₁₀

Table 5. Results of comparing cardiovascular disease patients by policy

Scenarios	Policy 1 (Increase of electric car)	Policy 2 (Regulation of diesel car)	Policy 3 (Regulation of emissions in industry)	Policy 4 (Increase of green area)
Do-not policy (keep trend)	1,368,206	1,368,206	1,368,206	1,368,206
Policy	1,367,712	1,367,917	1,367,848	1,368,109
Policy Effect (people unit)	-494	-289	-358	-97

디젤차를 규제하는 정책대안 2는 미세먼지 저감 효과가 $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 큰 지역이 1개소(전북 완주군), $0.5\sim 1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 인 지역이 5개소로 나타났다. 정책대안 2의 효과가 가장 높았던 전북 완주군에서의 디젤차 등록대수(2.8만대)는 전국 평균 디젤차 등록대수(3.9만대)와 비교하여 절대적인 수치는 적었으나 지역별 자동차 등록대수 대비 디젤차 비중으로 비교하였을 때는 전국 평균(42.06%)보다 높은 수치(52.74%)를 보여 디젤차 규제에 따른 정책효과가 높음을 확인하였다. 정책효과가 가장 높게 나타났던 완주군 외의 지역을 살펴봤을 때, 인천 연수구(7.8만대)와 같이 디젤차 등록대수가 전국 평균보다 많거나 전북 남원시(2.5만대, 디젤차 비율 57%), 경북 울릉군(0.3만대, 디젤차 비율 56.8%), 전북 장수군(0.8만대, 디젤차 비율 64.0%) 등 지역의 디젤차 등록 비중이 높은 지역에서 미세먼지 저감 효과가 높게 나타났다.

마지막으로 녹지 및 공원 면적을 확충하여 미세먼지 흡수원을 확장하는 정책대안 4의 경우 저감 효과가 $0.5\sim 1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 인 지역이 2곳 나타났으며, 2곳의 지역에서 $0.1\sim 0.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 저감 효과가 나타났다. 녹지정책에 대한 효과가 높게 나타난 지역은 대부분 행정구역 면적 대비 녹지면적의 비율이 높은 지역으로 약 $0.81\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 저감 효과가 나타난 광주 동구의 경우 행정구역 면적 대비 녹지면적이 80%에 가까운 비율을 보여 다른 정책대안과 비교해 정책대안 4에 대한 효과가 뚜렷하게 관측되었다.

정책별 시뮬레이션을 통한 미세먼지 저감 효과를 정리하면, 전국 평균으로는 산업부문 PM_{10} 배출량을 규제하는 정책 대안이 가장 높은 저감 효과를 보였으나 지역별로는 공장단지가 있는 지역을 중심으로 정

책효과가 높게 나타났다. 반면 전기차 지원정책은 전국 평균으로는 두 번째로 높은 저감 효과를 보였으나 많은 지역에서 높은 저감 효과를 나타내고 있었다. 이는 산업 배출량의 규제 전략이 특정 지역을 중심으로 효과가 높은 지역 맞춤형 정책으로 적용할 수 있음을 제시할 수 있는 것과 함께 전기차 지원 전략과 같이 전국에서 공통으로 시행할 수 있는 미세먼지 저감 전략을 제시할 수 있음을 시사한다.

2) 순환기계 질환자 수 감소 효과

순환기계 질환자 영향 시뮬레이션 결과의 정확성을 검증하는 MAPE는 5.68%로 매우 정확한 시뮬레이션 결과를 나타냈다. 정책대안별 정책효과는 현재 추세가 유지될 때의 순환기계 질환자수와 비교한 질환자 수 저감 정도로 도출하였다(Table 5).

정책대안별로 비교하였을 때 전국 순환기계 질환자 수는 전기차 보급을 지원하는 정책대안 1에서 가장 큰 저감 효과를 나타내고 있었다. 이를 수치상으로 비교하면 현재 추세대로 미세먼지가 배출될 때 대비 전국 총 순환기계 질환자 수가 494명 정도 감소하는 것으로 나타났다. 다음으로 산업부문에서의 PM_{10} 배출량을 규제하는 전략인 정책대안 2에서 높은 감소 효과가 나타났으며 이 정책대안이 시행되는 경우 현재 추세대로 유지될 때와 비교해 순환기계 질환자 수는 358명이 감소하는 것으로 나타났다. 그 외로 정책대안 2(디젤차 규제)과 정책대안 4(공원·녹지면적 확대)의 순서로 정책효과가 나타났으며 2030년 기준 각각 289명과 97명의 순환기계 질환자 수 감소 효과를 기대할 수 있었다.

정책별 순환기계 질환자 수 감소 정도는 미세먼지

저감 효과와 비교했을 때 약간의 차이를 보인다. 특히, 순환기계 질환자 수의 측면에서 보면 전기차 지원 전략이 산업 PM_{10} 배출 규제보다 더 큰 정책효과를 나타내고 있다. 이는 특정 지역에 편향된 정책효과를 보인 산업 PM_{10} 배출 규제 정책보다 많은 지역에서 공통적으로 미세먼지 저감 효과를 보인 전기차 지원 전략이 거주민의 건강영향까지 고려했을 때는 더 효과가 크게 나타남을 확인한 것이다.

정책적용에 따른 순환기계 질환자 수의 감소 시물

레이션 결과를 전국 시군구별로 나타내면 Figure 5와 같다. 정책효과가 가장 높게 나타난 전기차 보급 지원 전략에 대한 지역별 질환자 수의 감소 정도를 보았을 때 질환자 수가 20명 이상 감소하는 지역이 3개소, 10~20명인 지역이 3개소 나타났으며 11개의 지역에서 5~10명의 순환기계 질환자 수의 감소 효과가 나타났다. 이를 미세먼지 저감 효과 결과와 비교하면 미세먼지 농도 감소 효과가 높았던 제주 서귀포시, 대구 동구, 경기 여주시 등의 지역에서 모두 순

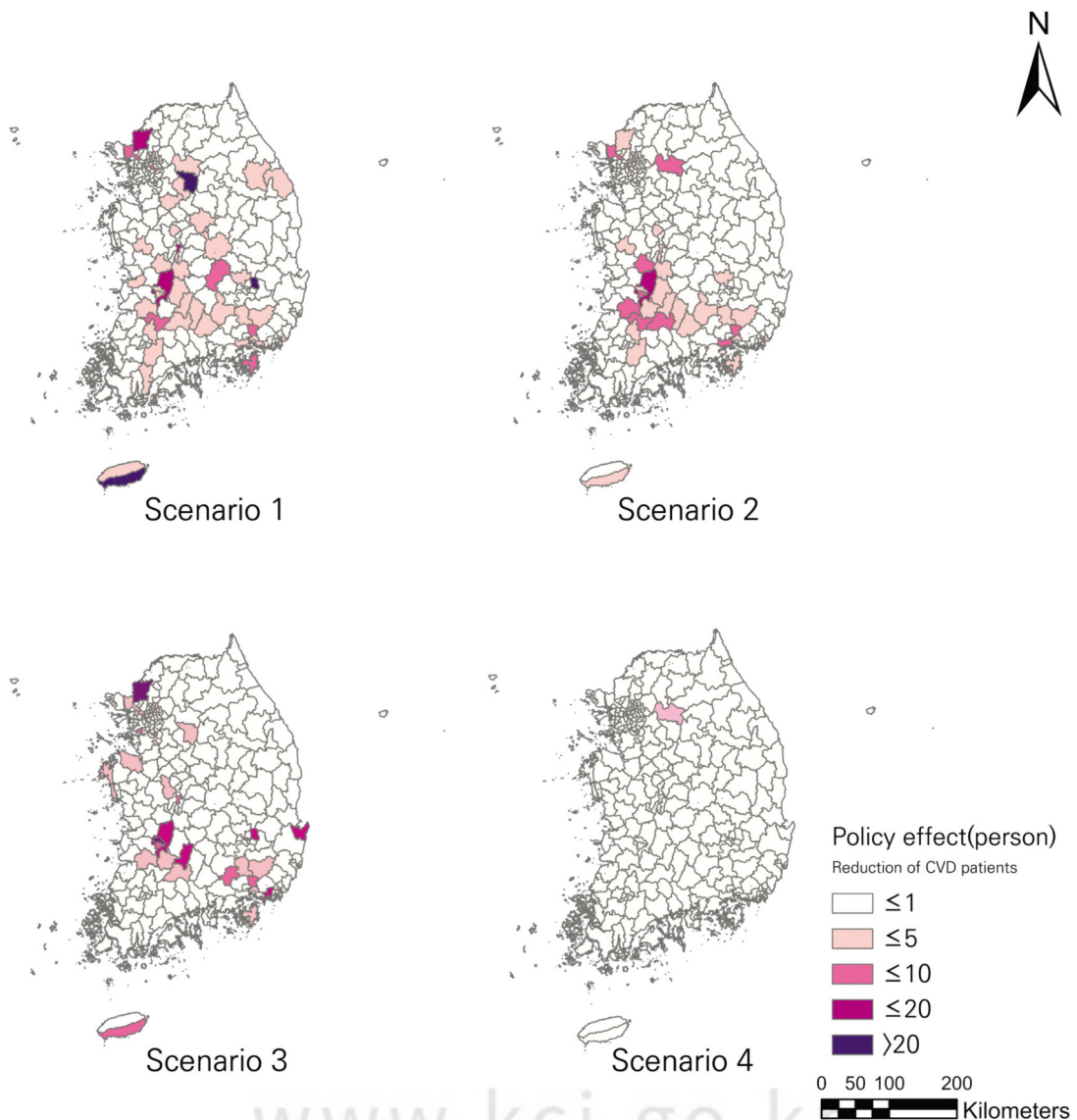


Figure 5. Regional comparison of the effect of reducing cardiovascular patients

환기계 질환자 수의 감소 효과가 높게 나타났다.

두 번째로 높은 정책효과가 나타난 산업부문 PM_{10} 배출량 규제는 20명 이상 감소하는 지역이 2개소, 10~20명인 지역이 5개소 나타났으며 9개의 지역에서 5~10명의 순환기계 질환자 수의 감소 효과가 나타났다. 미세먼지 저감 효과 결과와 비교하면 미세먼지 저감 효과가 높게 나타난 전주시 덕진구, 부산 강서구 등의 지역에서 순환기계 질환자 수가 10명 이상 감소하였음을 확인하였다.

미세먼지 저감 효과가 상대적으로 낮았던 디젤차 규제와 녹지면적 증가의 경우, 디젤차 규제는 1개소(전북 완주군)에서 10~20명의 질환자 수 감소가 나타났으며 14개소에서 5~10명의 질환자 수 감소 효과가 나타났다. 디젤차 규제에 의한 질환자 수 감소가 가장 많이 발생한 전북 완주군은 미세먼지 농도 저감 결과에서도 전국 중 가장 높게 나타났다. 미세먼지 흡수원 확대 전략의 경우 1개소(경기 양평군)에서 2명의 질환자 수 감소 효과가 나타났으며 평균 1명 정도의 순환기계 질환자 수 감소 효과를 나타냈다. 미세먼지 저감 효과 결과와 비교하면 양평군의 미세먼지 저감 효과는 약 $0.37\mu g/m^3$ 로 미세먼지 흡수원 확대에 의한 저감 효과가 나타난 상위 3곳 중 하나인 것을 확인할 수 있다.

지역별 순환기계 질환자 수의 감소 효과에 대한 정책 시뮬레이션 결과를 정리하면 전국 평균적으로는 전기차 보급 확대 정책이 가장 높게 나타났으며 지역별로 비교하였을 때도 효과가 높게 나타난 지역이 다수 도출되었다. 지역별 순환기계 질환자 수의 감소 효과 지도(Figure 5)를 지역별 미세먼지 저감 효과 지도(Figure 4)와 비교하면 질환자 수 감소 효과가 높은 상위 지역이 미세먼지 저감 효과가 높은 지역들로 나타났다. 이는 미세먼지 저감과 순환기계 질환자 수 감소가 연계되어 효과가 나타난 것으로 확인할 수 있었다.

V. 결론

본 연구는 미세먼지 농도에 영향을 미치는 변수를 도출하여 이를 조절하는 미세먼지 저감 정책의 적용

에 따른 농도변화와 건강 영향이라는 장기간의 정책 효과를 예측하는 것을 목적으로 진행되었다. 미세먼지 발생원 규명 및 저감정책 효과 분석과 미세먼지의 건강 영향으로 분리된 기존의 연구 방향을 통합하고 통계적 방법론을 활용하여 단선적인 연관성만을 살펴볼 수 있었던 한계점을 해소하고자 본 연구는 현상의 동태적인 흐름을 파악하고 정책적용 결과를 시뮬레이션으로 표현가능한 시스템다이나믹스 모형을 방법론으로 사용하였다. 정책별 목표 변수의 저감 효과를 비교하였으며, 시군구별 정책효과를 비교하여 지역별 특성을 살펴보고자 했다.

시뮬레이션 분석 결과, 전국 평균으로 비교하였을 때 미세먼지 저감에는 산업부문에서의 배출 규제 정책의 효과가 가장 큰 것으로 나타났다. 산업부문의 배출 규제 없이 현재 추세대로 배출되는 것과 비교해 산업부문 배출을 규제하는 경우 $0.22\mu g/m^3$ 의 미세먼지 저감 효과가 나타났다. 다음으로 효과가 높게 나타났던 전기차 보급 지원은 $0.21\mu g/m^3$ 의 저감 효과를 보였으며 그 외에도 디젤차 규제 정책은 $0.08\mu g/m^3$, 녹지면적 확장은 $0.01\mu g/m^3$ 의 효과가 나타났다. 정책대안의 효과는 지역별로 차이가 있는데 특정 정책을 적용할 수 있는 대상의 수가 많거나, 특정 대상의 증가율이 높은 지역에서 그 효과가 큰 것으로 나타났다. 다만 전기차 지원 전략과 산업 배출 규제 정책 적용으로 효과를 본 지역을 도출한 결과를 비교하면 공장이 다수 입지한 지역위주로 높은 저감효과가 나타난 배출 규제와는 달리 전국적으로 존재하는 전기차의 특성상 전기차 지원 정책의 효과가 나타난 지역은 전국적으로 고르게 도출되었다.

정책적용에 따른 순환기계 질환자 수의 변화를 시뮬레이션하면, 두 번째로 미세먼지 저감 효과가 높았던 전기차 보급 지원 전략이 가장 높은 정책효과(494명 감소)를 보이는 것을 확인하였다. 지역별 순환기계 질환자 수 감소 효과 지도를 미세먼지 저감 효과 지도와 비교하였을 때 순환기계 질환자 수의 감소 경향이 높았던 상위 지역들 대부분 미세먼지 저감 효과가 높은 지역으로 도출되었으며 이러한 결과는 순환기계 질환자 수의 감소가 미세먼지 농도의 저감에 상당히 영향을 받은 것으로 나타났다.

주목할 점은 전국 평균 미세먼지 저감 효과가 가장 높았던 산업부문 배출량 규제의 순환기계 질환자 수 감소 효과(358명 감소)는 전기차 지원 정책보다 낮은 것으로 나타났다. 이는 산업부문 배출량 규제는 일부 지역을 중심으로 높게 나타나는 반면, 전기차 지원 정책은 전국적으로 미세먼지 저감 효과를 보이고 있고 이러한 다양한 지역의 농도저감이 건강영향에까지 영향을 미치는 것으로 해석할 수 있다.

종합하면, 미세먼지 저감정책의 효과는 지역별 도시특성에 따라 저감 수준이 다르게 나타났으며 미세먼지 저감 정책의 영향으로 지역 주민의 건강증진 효과를 관찰할 수 있었다. 연구 결과를 고려하면 산업단지가 입지한 지역에서 배출량 규제 정책이 효과적인 것과는 달리 다른 지역에서는 전기차 지원 정책의 효과가 높게 나타난 것을 볼 수 있다. 이는 효과적인 미세먼지 저감을 달성하기 위해서는 지역별 미세먼지 발생 영향 요인을 고려하여 지역에 맞는 정책을 적용할 필요가 있다는 정책적인 제언을 할 수 있다. 또한 미세먼지 개선이 이루어지는 지역에서 순환기계 질환자 수 감소도 뚜렷하게 나타나 미세먼지 저감 노력이 주민 건강 향상에 기여하는 것을 확인하였다.

본 연구가 지니는 연구적 의의는 다음과 같다. 우선 그간 미세먼지 농도 저감을 위한 도시공간 특성 연구, 미세먼지의 건강 영향 연구 등으로 분리되어 이루어진 연구를 미세먼지 발생원, 저감정책, 미세먼지 농도, 건강 영향을 통합적으로 고려해 분석하여 도시민 건강을 고려한 효과적인 미세먼지 저감정책을 논의할 필요가 있는 당위성을 제시하였다. 또한 지역별로 정책효과를 살펴보고 전국 평균과 비교하여 각 지역에서 정책효과가 가장 높은 저감정책을 선정하여 지역별로 적절한 미세먼지 개선 전략을 제시할 수 있었다. 마지막으로 본 연구에서 구축한 시스템 흐름도는 미세먼지 농도를 예측하는 지원 도구의 역할로 정책요소에 따른 효과를 시뮬레이션할 수 있으며 시뮬레이션을 통한 결과로 정책 의사결정에 시사점을 제공한다. 이는 정책 의사결정이 요구되는 다른 분야에서도 활용이 가능해 향후 정책 결정을 위한 새로운 방법론을 제시할 수 있는 점에서 의의를 가진다.

본 연구는 다양한 연구적 의의를 지님에도 한계점

도 존재한다. 우선 미세먼지 발생 요인을 기반으로 정책 요소를 발굴하고 정책 시나리오를 선정하였기 때문에, 포함된 정책 시나리오에 한계가 있었다. 또한, 현재 국내 고농도 미세먼지 발생에 국외 미세먼지 유입이 높은 비중을 차지함에도 이에 대한 고려가 충분하게 이루어지지 못한 점은 한계점으로 지적될 수 있다. 추후 국외 미세먼지 유입을 고려할 수 있는 데이터의 구축과 다양한 정책 방안의 제시가 이루어진다면 한계점을 보완할 수 있는 추가적인 연구의 진행이 가능할 것이다.

사사

본 연구는 환경부 「기후변화특성화대학원사업」과 한국환경산업기술원의 환경보건디지털 조사기반 구축기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2021 003330002).

References

- Maeng JY. 2014. A Study on the Correlations between Urban Variables and Air Pollutants: Focused on SO₂, NO₂ and PM₁₀. Ph.D. dissertation. Gachon University, Seongnam-si, Gyeonggi-do. [Korean Literature]
- Ahn HS, Lee JW, Andy H. 2022. Urban form and air pollution: Clustering patterns of urban form factors related to particulate matter in Seoul, Korea, Sustainable Cities and Society, 81: 103859.
- Ahn SE, Jeon HC. 2018. National Environmental Consciousness Survey, Korea Environment Institute (KEI). [Korean Literature]
- Airkorea. 2021. Annual Report of Air Quality in Korea, 2021, Ministry of Environment (ME). [Korean Literature]
- Bae HJ. 2014. Effects of Short-term Exposure to PM₁₀ and PM_{2.5} on Mortality in Seoul,

- Journal of Environmental Health Sciences (JEHS), 40(5): 346-354. [Korean Literature]
- Bae JH, Kim YS. 2016. Policy Effects and Causes of Air pollution in Korea, Environmental and Resource Economics Review, 25(4): 545-564. [Korean Literature]
- Busan. 2018. Comprehensive Measures for Fine Dust Management in Busan. [Korean Literature]
- Chang MJ, Choi KH. 2009. Mortality for PM₁₀ in Seoul by using Nonlinear Regression Model, Journal of the Korean Data Analysis Society, 11(5): 2425-2436. [Korean Literature]
- Cheongju. 2021. Master Plan for Fine Dust Management in Cheongju (2021~2025)". [Korean Literature]
- Cho IH, Ju HJ, Kwon GH. 2013. The Impact Analysis of Air Pollutants on Increasing Environmental Disease : Focusing on Allergic Rhinitis and Asthma in Seoul Metropolitan City, Seoul Studies, 14(2): 97-114. [Korean Literature]
- Choi KC, Chung YM, Jung EH, Sim CS, Lee SM, Jeon HC, Kim YH. 2022. Predicting Particulate Matter Concentration in 2030 and Setting the Policy Direction for its Simultaneous Reduction in Line with the Carbon Neutrality Strategy (I), Sejong: KEI. [Korean Literature]
- Choi NH. 2003. A System Dynamics Approach in Analyzing the Dynamics of Seoul Metropolitan and Finding Policy Leverages: Causal Loop Structures and System Behaviors, Korean Public Administration Review, 37(4): 329-359. [Korean Literature]
- Daegu. 2016. Measures to reduce PM_{2.5} by 20%. [Korean Literature]
- Doherty RM, Heal MR, O'Connor FM. 2017. Climate change impacts on human health over Europe through its effect on air quality, Environmental Health, 16(1): 33-44.
- Forrester JW. 1994. System dynamics, systems thinking, and soft OR, System dynamics review, 10(2-3): 245-256.
- Korea Forest Service. 2018. How to Build Green Infrastructure to Reduce Fine Dust and Create Quality Cities [Korean Literature]
- Hong MG, Ban YU, Choi NH. 2019. Building a Causal Loop of Disaster Management Process for Fine Dust Considering a Dynamic Life Cycle, Crisisonomy, 15(6): 45-58. [Korean Literature]
- Hosseinabad ER, Moraga R. 2017. A System Dynamics Approach in Air Pollution Mitigation of Metropolitan Areas with Sustainable Development Perspective: A Case Study of Mexico City, Journal of Applied Environmental and Biological Sciences, 7(12): 164-174.
- Hur YG, Kang MG. 2022. The Effects of Urban Spatial Structure and Meteorological Factors on the High Concentration of Fine Dust Pollution, Journal of Korea Planning Association, 57(1): 145-160. [Korean Literature]
- Hwang IC. 2019. Aging and Health effect of PM_{2.5}, Policy report, Seoul : The Seoul Institute. [Korean Literature]
- Jeong JC, Lee SH. 2018. Spatial distribution of particulate matters in comparison with land-use and traffic volume in Seoul, Republic of Korea, Journal of Cadastre & Land InformatX, 48(1): 123-138. [Korean Literature]
- Jung JU, Kim HS. 2007. A Study on Ensuring Validity and Increasing Power of Expression on Causal Maps, Korean System Dynamics Review, 8(1): 97-115. [Korean Literature]
- Jung YH. 2010. The Effect of Health Promotion

- on Economic Growth: A Literature Review, Health and Welfare Forum, 2010(4): 66-77. [Korean Literature]
- Kim BS, Moon TH. 2014. A Study on the Effect of Urban Spatial Structure Characteristics on CO₂ Emission from Transport Sector: Using System Dynamics Simulation Method, Journal of the Korean Regional Development Association 26(5): 75-94. [Korean Literature]
- Kim HD, Kim JH, Jo HH. 2022. Analysis of the Factors Influencing PM₁₀ & PM_{2.5} in Korea by Panel Quantile-Regression, Environmental and Resource Economics Review, 31(1): 85-112. [Korean Literature]
- Kim HG. 2018. Estimating Changes of Causative Factors' Influences: Focusing on Diesel, Journal of the Korean Data Analysis Society, 20(2): 747-757. [Korean Literature]
- Kim JH, Kang SW. 2018. Analysis of Factors Influencing PM₁₀ Pollution in Korea, Korea Environmental Economics Association 2018 collection of papers at a summer academic conference, pp. 779-791 [Korean Literature]
- Kim KR, Lee SH, Ban YU. 2021. Causal Map of Fine Dust (PM₁₀) Using System Dynamics: Focused on the Policy Variables in Seoul and Cheongju, Crisisonomy, 17(8): 25-46. [Korean Literature]
- Kim SI, Kang BU. 2020. An Analysis of the Effect of Fine Dust Reduction Policy in Power Generation and Transportation Sector, Ulsan: Korea Energy Economics Institute. [Korean Literature]
- Kim WS. 2022. Integrated management between carbon neutrality and fine dust, and what is the choice of symbiosis strategy for cities, Monthly public policy 200, pp. 65-68. [Korean Literature]
- Korea Disease Control and Prevention Agency (KDCA), Korean Medical Association (KMA). 2018. Health Effects of Fine Dust and Patient Guidance, KDCA. [Korean Literature]
- Lee HJ, Jeong YM, Kim ST, Lee WS. 2018. Atmospheric Circulation Patterns Associated with Particulate Matter over South Korea and Their Future Projection, Journal of Climate Change Research, 9(4): 423-433. [Korean Literature]
- Lee HM, Kim YP. 2007. Analysis on the Effects of Traffic Control Program on the Air Quality in Seoul, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 23(4): 498-506. [Korean Literature]
- Lee KS. 2008. Spacio-temporal Analysis of Urban Population Exposure to Traffic-Related air Pollution, Journal of the Economic Geographical Society of Korea, 11(1): 59-77. [Korean Literature]
- Lee SH, Kang JE. 2022. Impact of particulate matter and urban spatial characteristics on urban vitality using spatiotemporal big data, Cities, 131: 104030.
- Lewis DC. 1982. Industrial and Business Forecasting Method, Butterworth.
- Lipsett MJ, Ostro BD, Reynolds P, Goldbert D, Hertz A, Jerrett M, Smith DF, Garcia C, Chang ET and Bernstein L. 2011. Long-term exposure to air pollution and cardiorespiratory disease in the California teachers study cohort, American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 184(7): 828-835.
- Ministry of Environment (ME). 2019. Comprehensive Plan for Fine Dust Management (2020-2024). [Korean Literature]
- Moon TH. 2002. Issues and Methodological Status of System Dynamics, Korean System Dynamics

- Review, 3(1): 61-77. [Korean Literature]
- Moon TH. 2007. System Dynamics, Perspective & Applications, Korean Association for Policy Studies Spring Academic Presentation Papers; 1-21. [Korean Literature]
- Oh KS, Koo JH, Cho CJ. 2005. The Effects of Urban Spatital Elements on Local Air Pollution, Journal of Korea Planning Association, 40(3): 159-170. [Korean Literature]
- Park CS. 2017. Variations of PM₁₀ concentration in Seoul during 2015 and relationships to weather condition, Landscape and geography (JAKPG), 27(2); 47-64. [Korean Literature]
- Park SK. 2021. How much the energy source, GRDP, population change contribute to the emission of particulate matter?, Journal of Regional Studies and Development, 30(1): 157-188. [Korean Literature]
- Pope III CA, Dockery DW. 2006. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect, Journal of the Air & Waste Management Association, 56(6): 709-742.
- Schwartz J. 2001. Air pollution and blood markers of cardiovascular risk, Environmental health perspectives, 109(suppl 3): 405-409.
- Seo HJ, Lee HS. 2019. How air pollutants influence on Environmental diseases? : Focused on Seoul Metropolitan Area, Seoul Studies, 20(3): 39-49. [Korean Literature]
- Seoul. 2021. Measures for Fine Dust Mesh in the Living Area of Seoul. [Korean Literature]
- Shin DC. 2007. Health Effects of Ambient Particulate Matter, Journal of the Korean Medical Association, 50(2): 175-182. [Korean Literature]
- Statistics Korea. 2022. Causes of Death Statistics in 2021. [Korean Literature]
- World Health Organization. 2023. WHO ambient air quality database, 2022 update: status report, World Health Organization.
- Yang WH. 2019. Changes in Air Pollutant Concentrations Due to Climate Change and the Health Effect of Exposure to Particulate Matter, Health and Welfare Forum, 269: 20-31. [Korean Literature]
- Zhao S, Liu S, Hou X, Beazley R, Sun Y. 2019. Identifying the contributions of multiple driving forces to PM₁₀-PM_{2.5} pollution in urban areas in China, Science of The Total Environment, 663: 361-368.