

다중 스케일 지리가중회귀 모형과 KT 측정기 자료를 활용한 대구시 미세먼지에 대한 환경적 형평성 분석*

조은아¹ · 전병운^{2*}

Environmental Equity Analysis of Fine Dust in Daegu Using MGWR and KT Sensor Data*

Euna CHO¹ · Byong-Woon JUN^{2*}

요 약

본 연구는 다중 스케일 지리가중회귀(MGWR: Multi-scale Geographically Weighted Regression) 모형과 KT(Korea Telecom Corporation) 측정기 자료를 활용하여 대구시를 사례로 미세먼지(PM₁₀)에 대한 환경적 형평성을 분석하였다. 미세먼지를 측정하기 위한 기존의 국가 측정망 자료는 넓은 지역에서 드물게 분포하는 적은 수의 관측지점에서 수집된다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 많은 수의 관측지점이 조밀하게 분포하는 KT 측정기 자료를 본 연구에서 사용하였다. MGWR 모형은 미세먼지의 농도와 사회경제적 변수 간의 공간적 관계에 있어서 공간적 이질성과 다중 스케일 맥락 효과를 다루기 위하여 사용되었다. 분석 결과에 의하면, 대구시에서 지가 및 외국인 비율과 관련하여 미세먼지의 분포에 따른 환경적 불형평성이 나타났다. 또한, MGWR 모형이 미세먼지의 농도와 사회경제적 변수 간의 공간적 관계를 설명하는데 있어서 OLS(Ordinary Least Square: 최소자승법)와 GWR(Geographically Weighted Regression: 지리가중회귀) 모형 보다 나은 설명력을 보였다. 본 연구는 미세먼지를 측정하기 위한 기존의 국가 측정망 자료의 보완자료로서 KT 측정기 자료의 가능성을 논증하였다.

주요어 : 미세먼지, 환경적 형평성, 다중 스케일 지리가중회귀, 지리가중회귀, KT 측정기 자료

ABSTRACT

This study attempted to analyze the environmental equity of fine dust(PM₁₀) in Daegu using MGWR(Multi-scale Geographically Weighted Regression) and KT(Korea Telecom Corporation) sensor data. Existing national monitoring network data for measuring fine

2023년 12월 08일 접수 Received on December 08, 2023 / 2023년 12월 20일 수정 Revised on December 20, 2023 / 2023년 12월 22일 심사완료 Accepted on December 22, 2023

* 본 논문은 주저자의 석사학위논문의 일부를 수정 및 보완한 것임.

1 경북대학교 대학원 지리학과 석사 M.A., Department of Geography, Kyungpook National University

2 경북대학교 지리학과 교수 Professor, Department of Geography, Kyungpook National University

※ Corresponding Author E-mail : bwjun@knu.ac.kr

dust are collected at a small number of ground-based stations that are sparsely distributed in a large area. To complement these drawbacks, KT sensor data with a large number of IoT(Internet of Things) stations densely distributed were used in this study. The MGWR model was used to deal with spatial heterogeneity and multi-scale contextual effects in the spatial relationships between fine dust concentration and socioeconomic variables. Results indicate that there existed an environmental inequity by land value and foreigner ratio in the spatial distribution of fine dust in Daegu metropolitan city. Also, the MGWR model showed better the explanatory power than Ordinary Least Square(OLS) and Geographically Weighted Regression(GWR) models in explaining the spatial relationships between the concentration of fine dust and socioeconomic variables. This study demonstrated the potential of KT sensor data as a supplement to the existing national monitoring network data for measuring fine dust.

KEYWORDS : Fine Dust, Environmental Equity, MGWR, GWR, KT Sensor Data

서론

지난 20년간 환경적 형평성 또는 환경정의는 도시 연구에서 반향을 불러일으키는 연구 주제 중의 하나이다. 환경적 형평성은 한 사회에서 사람들이 환경위험을 균등하게 부담하고 있는지에 관심을 가진다(Jun, 2006; Lee, 2008). 환경적 형평성은 결과적인 환경 부담과 편익의 분배 여부에 초점을 맞추고, 환경정책 결정의 과정적 측면에 대해서는 중점을 두지 않는다. 반면에 환경정의는 결과적인 분배와 함께 이루지는 과정이나 노력에도 관심을 가진다. 환경적 형평성과 환경정의의 개념은 흔히 많은 연구에서 혼용되어 사용된다. 최근에 환경정의의 적용 분야가 확장되어 환경위험이 아닌 편의시설(근린공원이나 대중교통 등)의 균등한 분배와 관련된 사례 연구(Seo and Jun, 2011; Jun, 2011; Kim and Jun, 2012)도 나타나고 있다.

요즘을 대기오염 중에서도 직접적인 호흡기 질환이 아닌 다른 중증 질환까지 발생시킬 수 있는 미세먼지(PM₁₀)는 인류 생존의 새로운 위협 요소로 등장하여 전 세계가 이것을 줄이는데 촉각을 곤두세우고 있다. 우리나라에서 2018년 8월 14일에 제정되었고 2019년 2월 15일부터 시행된 '미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법' (약칭 미세먼지법)의 제1항에서 미세먼지

배출과 발생을 관리함으로써 피해를 예방하고 쾌적한 생활환경을 조성할 것을 천명하고 있다. 이러한 미세먼지법은 환경권에 대해 명시한 헌법 35조 제1항 "모든 국민은 건강하고 쾌적한 환경에서 생활할 권리를 가지며, 국가와 국민은 환경보전을 위하여 노력하여야 한다" 는 조항에 근거하고 있다.

하지만, 이러한 법률과 달리 도시에 거주하고 있는 사람들은 모두 동일한 수준의 미세먼지에 노출되지 않는다. 각 국가별로 미세먼지로 인해 사망하는 사람들의 비율이 다르고 한 국가 안에서 서도 도시와 농촌 그리고 공장 등이 밀집된 산업 지역의 미세먼지 발생 수준이 모두 다른 것처럼(Rodríguez *et al.*, 2004), 한 도시 안에서 도 지역에 따라(Kim *et al.*, 2016) 그리고 계절에 따라(Park, 2017) 발생하는 미세먼지의 농도가 다르다. 따라서, 미세먼지의 분포에 따른 환경적 형평성을 실증적으로 연구해 볼 필요성이 있다.

미세먼지에 관한 기존 연구들은 미세먼지 측정소의 최적입지를 선정하고 기존 측정소 입지의 적절성을 평가하는 것에 주로 관심을 두었다(Kim and Jo, 2012; Kim and Kwon, 2016). 또한, 미세먼지에 많이 노출된 지역과 사람들은 어떤 특징을 가지는지를 분석한 연구가 있었다. 국내에서 이와 관련된 연구들은 토지이용 중 주거지역과 미세먼지 분포를 GIS로 중첩하여 미

세먼지 농도에 따른 고노출 주거지역과 저노출 주거지역을 밝혀냈다(Kim *et al.*, 2016; Seo *et al.*, 2018). 그 결과 미세먼지에 많이 노출된 주거지역은 도로변, 유동인구가 많은 지역, 인구 밀집지역, 산업단지 인접지역 등이라는 것을 알 수 있었다. 그리고 도시의 낮은 사회적 계층의 사람들은 대기질이 상대적으로 좋지 않은 곳에서 거주하는 경향이 있었으나 농촌의 경우는 반대로 나타났다(Wheeler and Ben-Shlomo, 2005).

이처럼 한 도시 내에서도 미세먼지 분포 양상은 매우 국지적으로 변화하며 지역에 따라서 거주민 특성이 다르게 나타나기도 한다. 해외에서는 환경적 형평성 관점에서 미세먼지 및 대기오염물질을 연구대상으로 도시·농촌 간 비교 연구(Wheeler and Ben-Shlomo, 2005; Pearce and Kingham, 2008)와 도시 내 연구(Jerrett *et al.*, 2001; Buzzelli *et al.*, 2003; Maantay, 2007) 등 다양한 연구를 해왔다. 하지만 국내는 여전히 측정소의 현황과 최적 입지 연구(Kim and Jo, 2012; Kim and Kwon, 2016)가 대부분이었으며 최근에 이르러 서울과 부산을 연구지역으로 미세먼지 등 대기오염과 사회·경제적 지표, 토지이용 등과의 상관관계를 분석한 연구(Choi and Kim; 2004; Lee *et al.*, 2011; Jeong, 2012; Han, 2014; Kim *et al.*, 2016; Seo *et al.*, 2018, Ryu and Jang, 2019)가 수행되었으나, 환경적 형평성을 고려하여 도시 미세먼지의 분포를 분석한 국내 연구는 거의 없는 실정이다.

국내에는 해외 사례와 같이 미세먼지와 환경적 형평성을 동시에 다룬 연구가 상대적으로 미흡하다. 이러한 연구를 위해서는 환경적 형평성으로서 평가될 사회경제적 지표 등과 함께 미세먼지와 관련된 자료 역시 취득할 수 있어야 한다. 그리고 미세먼지는 공기 중에 부유하는 물질로서 연속적으로 존재하기 때문에 측정소가 설치되지 않은 미관측 지점의 값을 예측하기 위해 공간내삽이 필수적으로 동반되어야 하며, 연구자료와 지역에 따라 가장 정확성이 높은 공간내삽법을 선택해야 한다(Cho and Jeong, 2009).

하지만 미세먼지, 더 크게 대기오염이라는 주제로 공간내삽을 실시한 연구(Jerrett *et al.*, 2001; Buzzelli *et al.*, 2003; Wong *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2016)들은 공간내삽법 간의 비교에 관한 검토가 부족하거나, 선행 및 관련 연구의 공간내삽법을 그대로 사용하였다. 대구광역시의 미세먼지 연구(대기오염을 포함한)는 선행연구의 사례조차 매우 적은 실정이다. 특히, 이러한 공간내삽법을 이용한 후 통계적 유의성을 확인한 사례는 더욱 적은 편이다(Cho and Jun, 2019).

또한, 정밀한 공간분석을 위해서는 선행연구들(Lee *et al.*, 2011; Jang *et al.*, 2012; Han, 2014; Kim *et al.*, 2016; Seo *et al.*, 2018)처럼 한국환경공단(EnviroKorea)에서 제공하는 대기오염자료를 사용하는 것만으로는 한계가 있다. 특히, 대한민국의 경우 대기오염 측정소가 수도권에 밀집해 상대적으로 다른 지역에는 측정소가 적은 지역 간 불균등이 있다. 대구시 미세먼지 측정소(도시대기 측정소(초미세먼지 측정가능) 11곳, 도로변대기 측정소(초미세먼지 측정 불가능) 2곳)의 '시설수준을 행정면적과 인구수와 함께 고려할 경우 타 대도시에 비해 대구시가 가장 적은 상태'로 '작은 공간 내에서도 편차가 심한 미세먼지 농도를 정확히 측정하기 어려운 실정'이다(Kwon and Nam, 2014; Kwon and Hyun, 2017). 따라서 보다 정밀한 공간분석을 위해서 적절한 입지에 측정소가 추가되어야 하며, 이때 '도로밀도뿐만 아니라 인구밀도, 미세먼지 취약계층 분포, 배출원의 종류, 배출량 등 미세먼지와 밀접한 변수들의 공간적 분포가 종합적으로 고려되어야' 하며 '공간적으로 세분화하여 운영'해야 한다고 제시되었다(Kwon and Hyun, 2017).

이에 몇몇 연구는 국지적으로 직접 대기오염 수준을 측정하는 것으로 한계를 극복하고자 노력했다(Jeong, 2012; Leung *et al.*, 2019). 하지만 최근에는 한국환경공단 이외의 기관에서도 미세먼지 등 대기오염 수준을 측정 및 공개하고 있다. 국내의 대표적 통신업체인 KT(Korea Telecom Corporation)가 기존의 기지국과 통

신사 대리점을 활용하여 기존의 측정소보다 지표면에 가까이, 더 높은 밀도로 대기 현황을 측정하고 있다. 이러한 자료원은 한국환경공단의 측정방법과 차이가 있어 정확도가 상대적으로 낮을 수 있지만, 환경부에서 인증한 성능 평가 정확률이 80% 수준인 측정기를 사용한다는 점에서 어느 정도 신뢰할 수 있다(Cho and Jun, 2019). 대부분의 선행연구는 기존의 국가 측정망 자료를 활용하였지만, KT 측정기 자료와 같은 국지적으로 측정된 미세먼지 자료를 사용한 연구는 지금까지 거의 없는 상황이다. 또한, 모든 현상은 동일한 공간 스케일 상에서 작동한다는 지리가중회귀(GWR: Geographically Weighted Regression) 모형(Fotheringham *et al.*, 2002)의 가정을 완화시킨 대안 모형인 다중 스케일 지리가중회귀(MGWR: Multi-scale Geographically Weighted Regression) 모형(Fotheringham *et al.*, 2017; Hong and Yang, 2021)을 미세먼지의 농도와 사회경제적 변수 간의 공간적 관계에 있어서 공간적 이질성과 다중 스케일 맥락 효과를 탐색하기 위하여 본 연구에서 활용하였다. 따라서 본 연구는 기존 한국환경공단 자료와 KT 측정기에서 수집된 자료를 통합하고 MGWR 모형을 활용하여 대구시를 사례로 미세먼지의 공간적 분포에 따른 환경적 형평성을 분석하고자 한다.

연구자료 및 방법

본 연구의 사례지역은 대구광역시로서 자료의 취득 가능성 때문에 선정되었다. 구체적으로 공간적 범위는 대구광역시의 북구, 동구, 서구, 중구, 수성구, 남구, 달서구 등 총 7개 구의 행정동으로 설정하였다(그림 1). 달성군은 농촌지역으로 본 연구에서 확인하고자 하는 도시 미세먼지의 연구지역으로는 부적합하며, 한국환경공단과 KT(Korea Telecom Corporation) 측정소가 달성군에 많이 설치되어 있지 않아서 연구범위에서 제외하였다.

본 연구에서 사용된 다양한 자료는 다른 시간적 범위를 가진다. 먼저 미세먼지 측정자료는

2019년 5월 오전 10시를 기준으로 전후 30분에 한정되었으며, 국민기초생활수급자 자료를 제외한 센서스 자료와 공시지가 자료는 2018년에 집계되었다. 국민기초생활수급자 자료는 2014년 관련 자료 수집 방식이 변경된 이후 대구시의 최신자료 구축이 미흡하여 부득이하게 남구를 제외한 여섯 개 구의 자료만이 구축된 2015년도의 자료를 사용하였다. 또한, 미세먼지 등 대기오염물질을 배출하는 공업시설과 도로 등에 관한 정보가 포함된 수치지형도는 2019년에 배포된 자료를 사용하였으나, 해당 자료의 세부 속성자료의 기준연도는 2017년으로 실질적으로 수치지형도의 시간적 범위는 2017년이라고 할 수 있다. 즉, 모든 자료를 아우르는 시간적 범위는 2015년부터 2019년 5월까지이다. 대구시 행정동 경계자료와 대기오염물질 배출시설 위치도, 도로 자료, 공시지가는 국가공간정보포털(National Spatial Data Infrastructure (NSDI) Portal)과 통계지리정보서비스(Statistical Geographic Information Service; SGIS)에서 제공되는 자료를 사용하였다.

환경적 형평성 분석이라는 목적에 부합하기 위해서는 미세먼지가 고농도인 시기에 미세먼지 취약계층과 사회적 약자가 노출되는지 여부에 더 관심을 가질 수 밖에 없다. 따라서 미세먼지의 측정 및 수집 시점은 한 해 중 가장 고농도인 시기(월), 하루 중 가장 고농도인 시간에 집중할 필요가 있다. 이에 2015년부터 2018년까지 한국환경공단에서 발표한 최종확정자료를 바탕으로 미세먼지의 평균 농도가 높은 겨울철(12~2월)과 봄철(3~5월) 중에서 해외로부터 유입되는 스모그와 황사의 영향이 적고(Kim, 2013), 비나 원활한 대기 순환으로 인해 미세먼지 농도가 낮은 여름철(6~8월) 이전 시기에 해당하고 다른 월에 비해 상대적으로 국내 요인에 의해 미세먼지 농도가 높을 것으로 기대되는 5월을 수집기간으로 한정하였다. 또한, Kim (2013)에 의하면, 서울시의 경우 기온 상승, 습도 하락, 출근 통행 차량에서 발생한 먼지 누적 등으로 인해 오전 10시부터 12시 사이에 가장 수치가 높았으나, 대구시의 2015년부터 2018

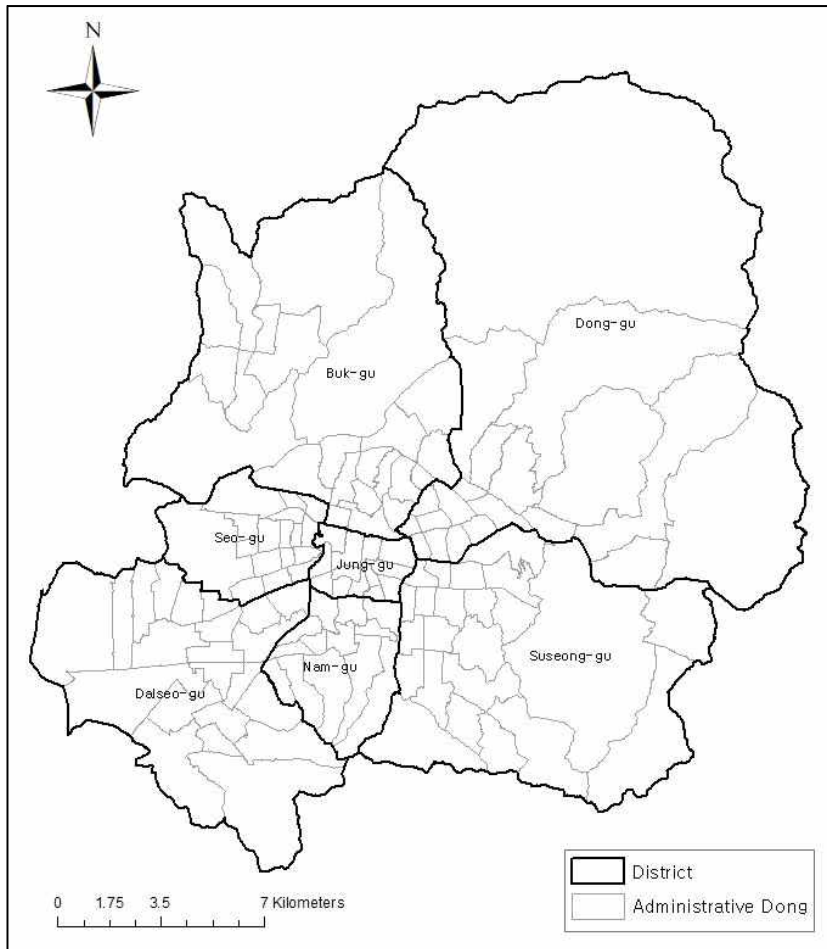


FIGURE 1. Location of study area

년까지의 일일 미세먼지 농도 최고치를 기록한 시간대의 빈도를 분석한 결과, 미세먼지는 오전 9시, 10시, 12시 순으로 자주 최고치를 기록했다. 즉 대구시의 경우 오전 9시와 10시에 미세먼지의 수치가 가장 높은 경향이 있었으며, 2구간 평균치에 의하면 9시와 10시 사이에 일일 최고치를 기록한 빈도가 가장 높았다. 따라서 수집 자료의 측정 시간은 오전 10시로 한정하였다.

세부적으로, 미세먼지 측정자료는 달성군을 제외한 대구시 내에 설치된 한국환경공단이 설치한 측정소 14곳(도시 대기 12곳, 도로변 대

기 2곳)과 KT가 설치한 측정소 26곳(171곳 중 약 15%, 무선표집, 국가망 중첩 제외)를 포함한 총 40곳에서 2019년 5월 오전 10시 내외에 측정된 자료를 사용하였다. 다만, 한국환경공단은 수집된 측정자료를 1차 정제 후 매시 정각에 갱신하지만, KT는 10분 간격으로 매 5분에 측정치를 갱신하기 때문에 두 측정자료 간의 정확한 시점 일치 가능성이 불가능하여, 본 연구에서 사용된 각 미세먼지의 측정자료는 한국환경공단 자료의 경우 오전 10시, KT 자료의 경우 오전 9시 45분에서 10시 45분 사이에 수집된 수치를 사용하였다. 각 측정소는 한국환경공단의 경

우 관련 홈페이지인 에어코리아(<http://www.airkorea.or.kr>)에서 확인 가능한 좌표와 주소로 위치 자료를 수집했으며, KT는 전용 어플리케이션(AirMapKorea)에서 확인 가능한 측정소 위치를 디지털라이징, 장소명과 주소지 등으로 상호보완해 위치 자료를 구축하였다.

한국환경공단과 KT 측정소는 측정 위치, 측정 고도(10~20m vs. 2~3m), 측정 방식(중량법 vs. 베타선법), 측정 시간 등에 있어 차이가 있기 때문에 두 자료 간의 통계적 차이를 먼저 확인하기 위해 SPSS 26에서 독립표본 t검증을 이용하여 집단 간 평균 차이에 대한 통계적 유의성을 검증하였다. 또한, 미세먼지 등 대기물질은 국지적인 수치에 불과하기 때문에 미관측지점의 값을 통계적인 방법에 따라 추정한다. 미세먼지 등 대기물질의 미관측지점 추정을 위해 주로 사용되는 방법은 IDW(Inverse Distance Weighted: 역거리 가중치 내삽법)와 Kriging 공간내삽법이다. 공간내삽 방법에 따라 수치와 시각적 결과가 다르게 나타나고, 통계적 정확성 역시 지역이나 사용 자료에 따라 다르게 나타나기 때문에(Cho and Jun, 2019), 본 연구에서는 ArcGIS 10.5를 사용하여 IDW와 세 가지 Kriging(Simple Kriging(SK): 단순 크리깅; Ordinary Kriging(OK): 정규 크리깅; Universal Kriging(UK): 일반 크리깅) 모형으로 미세먼지의 공간내삽을 각각 실행하고, 실제값과 추정값 간의 차이가 얼마인가를 의미하는 RMSE(Root Mean Square Error: 평균 제곱근 오차)값을 계산하여 본 연구에서 통계적으로 가장 정확한 공간내삽 결과를 환경적 형평성 분석에 활용하였다(식 1). 공간내삽에 사용된 측정소 자료는 33곳이고, 각 구별로 무작위 층화추출된 7곳의 측정소 자료는 공간내삽에서 제외하여 그 추정치와 관측치를 비교 검증하여 RMSE값을 산출하였다(그림 2).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i - u_i)^2} \quad (1)$$

n : 사례수, z_i : 관측치, u_i : 추정치

인구 및 센서스 자료(인구밀도, 여성 인구, 외국인 인구, 15세 미만 유소년 인구, 65세 이상 노년 인구, 국민기초생활 수급자 인구)는 통계청과 대구통계 홈페이지에서 제공되는 행정동별 자료를 수집하였다. 한국의 환경정의 및 환경적 형평성 연구에서 주로 이용되는 인구 자료는 선행연구(Seo and Jun, 2011; Kim and Jun, 2012)를 바탕으로 선정되었다. 외국인 인구 자료는 21세기 다문화·다인종 사회로 변화되어 가는 한국 사회의 변화를 반영하여, 과거 ‘단일민족사회’ 라는 전제를 두지 않고 미국 사회에서 다뤄진 환경적 인종주의의 개념을 포함하고자 사용했다(Seo and Jun, 2011; Kim and Jun, 2012). 또한, Buzzelli *et al.*(2003)의 캐나다 해밀턴 대기오염과 환경정의 연구 결과 사회경제적 지표 중 주택 가치가 매년 대기오염 총 수치를 지속적으로 예측할 수 있었던 사례가 있어, 표준지 공시지가를 바탕으로 대구광역시의 지가와 미세먼지 간의 연관성을 분석하고자 한다. 주택 가격 등의 주택가치와 표준지 공시지가는 동일한 개념이 아니며, 한국의 주택시장 특성상 공시지가와 실제 주택 가격 간의 차이가 있다는 한계가 있지만 두 수치 간에는 정적 상관성이 있다는 전제하에 경향성을 확인하고자 했다. 이에 법정동 기준으로 수집된 공시지가 자료를 사용하였다.

선택된 공간내삽 결과를 바탕으로 행정동 단위로 구역 통계를 산출하여 공간 단위를 표준화하고, 행정동별 사회경제적 변수와 미세먼지 평균 농도의 상관분석 및 회귀분석을 실시하였다. 먼저, SPSS 26을 사용하여 지리적 요소를 반영하지 않은 상관분석을 실시하여 독립변수 간의 상관성을 확인하였다. Oshan *et al.*(2019)에 의해 개발된 MGWR 2.2를 사용하여 OLS(Ordinary Least Squares: 최소자승모형)와 GWR(Geographically Weighted Regression: 지리가중회귀모형) 및 MGWR(Multi-scale Geographically Weighted Regression: 다중

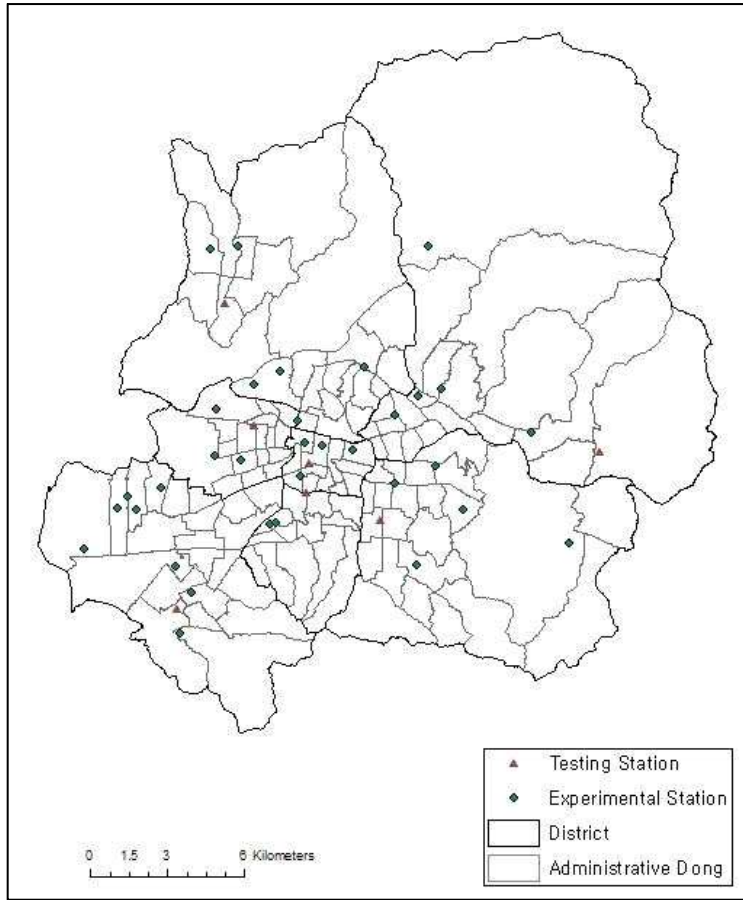


FIGURE 2. Location of fine dust measuring stations

스케일 지리가중회귀모형) 분석을 실시하여 회귀 모형의 설명력과 공간적 이질성, 다중공선성, 다중 스케일 맥락효과를 확인하고, 각 변수들의 회귀계수를 바탕으로 환경적 형평성을 분석하였다(식 2, 식 3, 식 4). 식 4에서처럼, MGWR은 종속변수와 독립변수들 간의 국지적 관계가 동일한 공간 스케일에서 작동한다는 GWR 모형의 전제를 확장시킨 것으로서, 종속변수와 독립변수들 간의 조건부 관계가 상이한 공간 스케일에서 작동하기 때문에 GWR 분석에서 독립변수들 간의 다중공선성 문제와 다중 스케일 맥락효과를 해결할 수 있는 대안적 모형이다(Fotheringham and Ohsan, 2016; Fotheringham *et al.*, 2017; Ohsan *et al.*, 2019).

$$y_i = \alpha + \beta_1 x_{1,i} + \beta_2 x_{2,i} + \dots + \beta_k x_{k,i} + \epsilon_i \quad (2)$$

- y_i : 종속변수, $i=1\dots n$
- $x_{1,i}\dots x_{k,j}$: 독립변수
- α : 상수
- $\beta_1\dots\beta_k$: 회귀계수

$$y_i = \alpha(u_i, v_i) + \beta_1(u_i, v_i)x_{1,i} + \beta_2(u_i, v_i)x_{2,i} + \dots + \beta_k(u_i, v_i)x_{k,i} + \epsilon_i \quad (3)$$

- y_i : 종속변수, $i=1\dots n$
- $x_{1,i}\dots x_{k,j}$: 독립변수
- (u_i, v_i) : 지리적 위치의 좌표

α : 상수
 $\beta_1 \dots \beta_k$: 회귀계수

$$y_i = \alpha(u_i, v_i) + \beta_{bw1}(u_i, v_i)x_{1,i} + \beta_{bw2}(u_i, v_i)x_{2,i} + \dots + \beta_{bwk}(u_i, v_i)x_{k,i} + \epsilon_i \quad (4)$$

y_i : 종속변수, $i=1 \dots n$
 $x_{1,i} \dots x_{k,i}$: 독립변수
 (u_i, v_i) : 지리적 위치의 좌표
 α : 상수
 $\beta_{bw1} \dots \beta_{bwk}$: 회귀계수

bw : k 번째 조건부 관계를 보정하기 위해 사용된 커널의 범위

결과 및 고찰

1. 미세먼지의 공간내삽 및 정확성 평가

한국환경공단과 KT에서 수집한 미세먼지 자료를 통합하여 공간내삽을 시행하기에 앞서 각 측정소별 측정 방법과 측정 위치, 측정 고도 등의 차이가 실제 측정 자료에 어떠한 차이를 발생시키는지 확인하기 위해 SPSS 26를 이용하여 독립표본 t 검증을 실시하였다. 표 1은 각 미세먼지 측정 자료를 한국환경공단과 KT 두 집단으로 나눠 독립표본 t 검증을 실시한 통계적 결과를 정리한 것이다. 5일, 6일, 13일을 제외한 날들의 평균 차이가 양수로 나와 KT에서 측정한 자료의 평균값이 한국환경공단에서 측정한 자료의 평균값보다 높은 것으로 나타났다. 이러한 두 집단 간의 차이가 통계적으로 유의미한 날은 총 24일 중 8일로, 약 33%였다. 따라서, 한국환경공단 측정 자료와 KT 자료는 세부

TABLE 1. Results for independent t test of PM₁₀ estimates

Date(May)	Mean Difference	t value	p value
3	12.82	2.30	0.03*
4	13.14	2.24	0.03*
5	-1.86	-0.31	0.75
6	-6.35	-0.88	0.38
7	2.77	0.72	0.48
8	8.46	1.15	0.26
9	6.58	1.12	0.27
10	9.64	1.86	0.07
11	1.00	0.13	0.90
12	4.02	-0.84	0.41
13	-0.74	-0.15	0.88
15	16.81	2.71	0.01*
16	6.31	1.06	0.29
18	8.66	2.22	0.03*
20	24.98	3.89	0.00*
21	12.03	2.28	0.03*
22	2.69	0.44	0.66
24	7.77	0.90	0.37
25	7.32	1.07	0.29
26	1.86	0.38	0.70
27	11.96	3.55	0.00*
28	10.02	2.77	0.01*
30	9.24	1.80	0.08
31	5.39	1.00	0.326

* Statistically significant at $p < 0.05$

TABLE 2. Accuracy assessment of PM₁₀ estimates by spatial interpolation method

Interpolation Methods	RMSE
IDW	11.78
SK	14.84
OK	15.22
UK	15.22

적인 개별 측정치에서는 차이가 존재하였으나 통계적으로는 유사한 측정 경향을 보였다. 이는 이들 자료가 본 연구에서 서로 보완이 가능한 자료라는 것을 의미한다.

위에서 검증된 미세먼지 자료를 이용하여 IDW, SK, OK, UK 공간내삽을 실시한 후 각각의 RMSE 값을 산출한 결과는 표 2와 같다. 대구시를 사례로 한 미세먼지 추정에서 IDW 공간내삽법이 통계적으로 가장 정확한 것으로 확인되었다.

2. 미세먼지의 공간적 분포 특성

2019년 5월에 측정 및 수집된 한국환경공단과 KT 미세먼지 자료에 대한 가장 높은 정확도를 나타낸 IDW 공간내삽 결과를 바탕으로 대구시 미세먼지의 공간적 분포 특성을 파악해 보았다. 표 3은 IDW 공간내삽 결과를 총 130개의 행정동별로 평균 농도를 계산한 후 세계보건기구(WHO: World Health Organization)의 일일 미세먼지 권고 기준에 해당하는 행정동의 수를 정리한 것이다. 좋음에 해당하는 미세먼지 수치를 가진 행정동은 2개로 대구시 전체 행정동의 1.5%에 불과했다. 보통에 해당하는 행정동은 14개이고, 나쁨에 해당하는 행정동은 114개로 나타났다. 이는 대구시 전체 행정동의 약 87.7%에 해당하는 지역의 미세먼지 농도가 나쁨으로 추정되었다는 것을 의미한다.

그림 3은 미세먼지 농도의 IDW 공간내삽 결

과를 행정동별로 구역 평균을 산출하여 미세먼지 등급 기준별로 지도화한 것이다. 지도화 결과를 살펴보면, 좋음에 해당하는 행정동 2개가 모두 중구에 있는 것으로 나타났다. 중구의 2개 행정동을 제외한 나머지 주변지역, 서구 비산4동과 내당2·3동, 남구 대명2동과 대명3동, 수성구 지산1동의 미세먼지 농도가 보통으로 추정되었다. 그 외의 지역은 모두 나쁨(미세먼지 등급 기준 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 초과)에 근접한 수치를 보였다. 매우 나쁨(미세먼지 기준 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 초과)에 근접한 수치를 보이는 지역은 없는 것으로 나타났다. 중구 남산2동과 남산4동은 다른 지역에 비해 미세먼지 수치가 적게 추정되었다. 반면에 달서구 이곡2동은 다른 지역에 비해 수치가 높게 추정되었다.

3. MGWR을 이용한 환경적 형평성 분석

IDW 공간내삽법을 적용하여 도출된 미세먼지 추정치를 바탕으로 행정동별로 산출된 평균 농도와 행정동별 사회경제적 변수에 대하여 각각 SPSS 26을 이용한 상관분석과 MGWR 2.2를 이용한 OLS, GWR 및 MGWR 분석을 실시하였다. 표 4는 독립변수들 간의 다중공선성을 탐색하기 위하여 상관분석을 실시한 결과이다. 여성 비율과 외국인 비율은 통계적으로 유의한 중간 정도의 부적 상관관계를 가지고 있는 것으로 나타났다. 15세 이하 인구 비율과 65세 이상 인구 비율은 통계적으로 유의한 강한 부적

TABLE 3. Number of administration dong by fine dust class

Class Criteria	Good(0~30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Moderate(31~50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Bad(51~100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Number of Administrative Dong	2	14	114
Ratio of Administrative Dong	1.5%	10.8%	87.7%

Note: Fine dust classes based on 24 hours criteria recommended by WHO

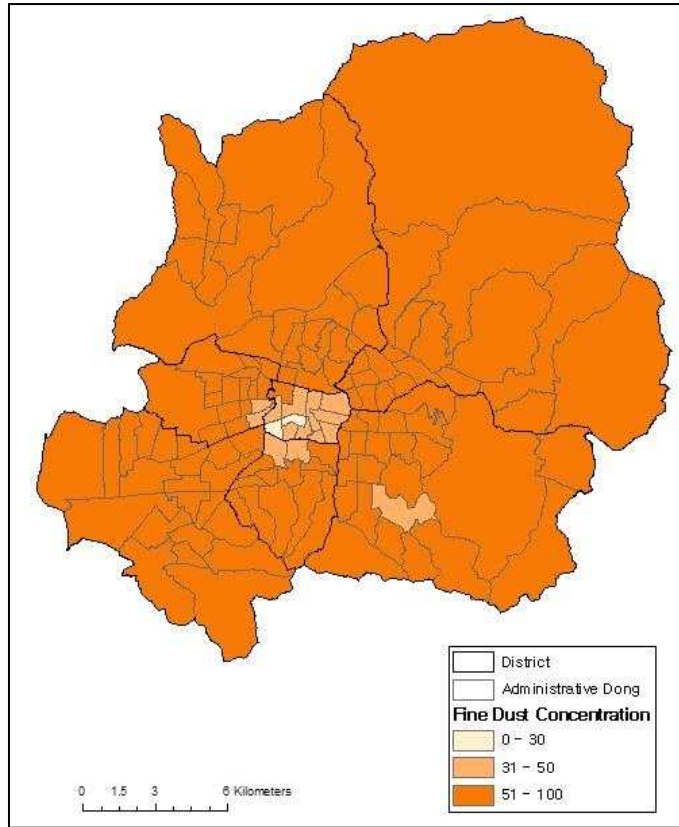


FIGURE 3. Mean concentration of fine dust by administrative dong

상관관계가 있는 것으로 나타났다. 이는 OLS나 GWR을 이용하여 환경적 형평성을 분석할 때 독립변수들 간의 다중공선성 문제가 발생할 가

능성이 있다는 것을 암시한다.

다음으로, 행정동별 미세먼지의 농도와 socioeconomic 변수 간의 공간적 관계를 파악하여 환경

TABLE 4. Correlation matrix among independent variables

Variables	Female	Foreign	Under15	Over65	Poverty	Popd	Land
Female	-						
Foreign	-0.516***	-					
Under15	0.267**	-0.335***	-				
Over65	0.048	0.002	-0.759***	-			
Poverty	-0.132	0.205*	-0.416***	0.422***	-		
Popd	0.254**	-0.199*	0.141	-0.076	-0.155	-	
Land	0.324***	0.054	-0.119	0.178*	0.020	0.256**	-

Female: Female Ratio; Foreign: Foreigner Ratio; Under15: Ratio of Population under 15 Ages; Over65: Ratio of Population over 65 Ages; Poverty: Ratio of Population below Poverty Line; Popd: Population Density; Land: Land Value

* Statistically significant at $p < 0.05$

** Statistically significant at $p < 0.01$

*** Statistically significant at $p < 0.001$

적 형평성을 분석하기 위해 OLS, GWR 및 MGWR 분석을 실시하였다(표 5). 먼저, 모형의 적합도를 평가하기 위하여 모형의 정보소실량을 간접적으로 보여주는 AICc(Akaike Information Criterion with a Correction)값과 모형의 설명력을 보여주는 R^2 값을 비교하였다. 그 결과 OLS와 GWR 보다 MGWR의 AICc값이 적어져 OLS와 GWR 모형 보다 MGWR 모형이 가장 적합하다는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 분산 분석 검정을 위한 F값과 Monte Carlo 검증을 통해 공간적 이질성을 확인하였으며, GWR과 MGWR 모형의 R^2 값이 OLS에 비해 상승하여 설명력이 향상되었다. 특히, MGWR은 모든 현상이 동일한 스케일에서 작동한다는 것을 전제하는 GWR을 확장한 모형으로서 각 독립변수별로 커널의 크기가 일정하지 않고 상이하하여 다중 스케일 맥락효과를 다룰 수 있어서 모형의 R^2 값이 OLS와 GWR에 비해 많이 상승하여 설명력이 더욱 향상되었다. 또한, OLS, GWR, MGWR 모형에서 독립변수들 간의 다중공선성을 진단한 결과, 전역적 상태지수(27.625)와 국지적 상태지수가 모두 30이하의 수치를 보여서 다중공선성의 문제가 없는 것으로 확인되었다(그림 4). 따라서, AICc와 R^2 값의 비교를 통해 OLS와 GWR 보다 공간적 이질성과 다중 스케일 맥락효과를 고려하는 MGWR 모형이 행정동별 미세

먼지의 농도와 사회경제적 변수 간의 관계를 설명하는 데에 가장 적합했다.

MGWR 모형의 평균 R^2 값은 0.783이었다. 국지적 R^2 값을 행정동별로 지도화한 것은 그림 5와 같다. 대체로 대구시의 도심부와 그 인접지역 그리고 달서구에 위치한 행정동에서 상대적으로 모형의 설명력이 높았다.

표 6과 그림 6에서 각 독립변수의 회귀계수를 살펴보면, 대구시 미세먼지의 분포와 관련하여 외국인 비율과 지가에 대한 통계적으로 유의한 환경적 불형평성 패턴을 확인할 수 있었다. 여성 비율, 15세 미만 인구 비율, 65세 이상 인구 비율 등과 같은 다른 변수들에서는 통계적으로 유의한 회귀계수들은 있었지만, 미세먼지의 분포에 따른 환경적 불형평성 패턴을 보여 주지는 않았다. 인구밀도와 기초생활수급자 비율은 대구시 전 지역에서 미세먼지의 분포와 관련하여 통계적으로 유의한 회귀계수조차도 존재하지 않았다. 이들 사회경제적 독립변수들 중에서 지가가 대구시 미세먼지의 분포에 따른 환경적 불형평성을 가장 잘 설명해 주었다. 즉, 대구시에서 지가가 높은 지역에서는 미세먼지의 농도가 낮았고, 반면에 지가가 낮은 지역에서는 미세먼지의 농도가 높았다. 또한, 외국인 비율은 대구 도심부에서 미세먼지의 분포에 따른 환경적 불형평성 패턴을 보였지만, 그림 3에서 보는

TABLE 5. Analytical results for OLS, GWR and MGWR

Variables and Statistics	OLS	GWR	MGWR
Constant	120.030*	120.921	-0.009
Female Ratio	-0.925*	-0.952	-0.209
Foreigner Ratio	0.269	0.303	0.145
Ratio of Population under 15 Ages	-0.405*	-0.364	-0.195
Ratio of Population over 65 Ages	-0.394*	-0.357	-0.154
Ratio of Population below Poverty Line	-0.025	-0.038	-0.051
Population Density	0.000043	0.000014	0.053
Land Value	-0.000008*	-0.000008	-0.549
Number of Cases	130	130	130
AICc	272.303	267.659	242.562
R^2	0.591	0.636	0.783
Adjusted R^2	0.567	0.597	0.725
F		2.116*	

* Statistically significant at $p < 0.05$

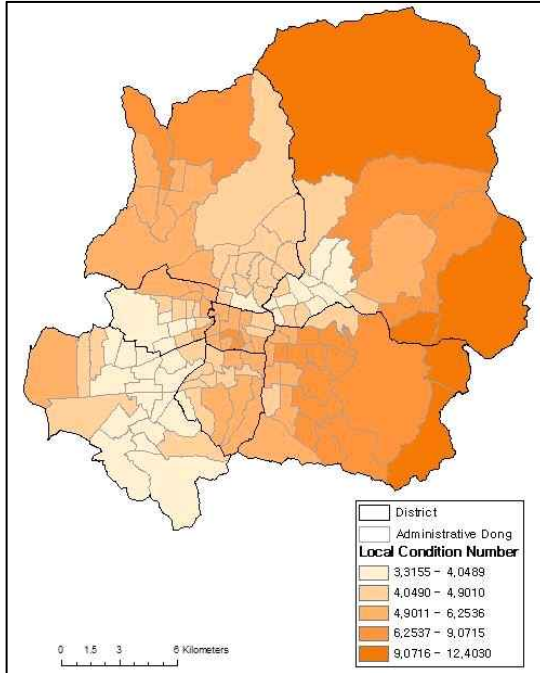


FIGURE 4. Local condition number of MGWR

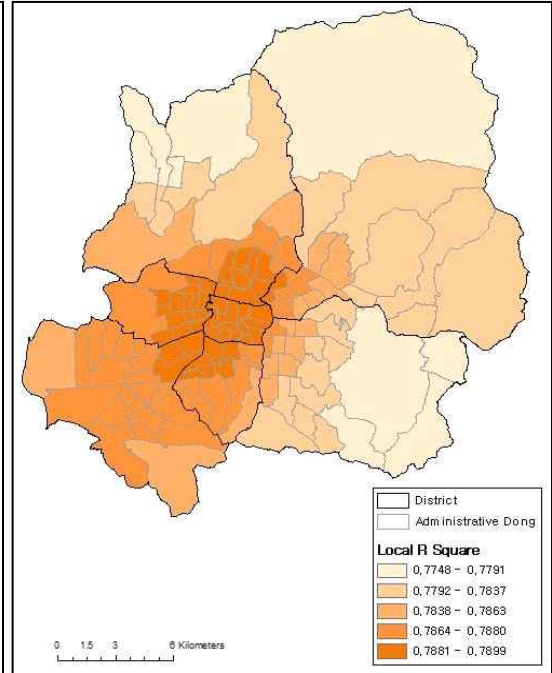


FIGURE 5. Local R² of MGWR

TABLE 6. Summary statistics for MGWR parameter estimates

Variables	Mean	STD	Min	Median	Max
Intercept	-0.009	0.214	-0.490	-0.002	0.498
Female	-0.209	0.148	-0.656	-0.156	0.008
Foreign	0.145	0.237	-0.197	0.049	0.895
Under15	-0.195	0.010	-0.208	-0.198	-0.161
Over65	-0.154	0.015	-0.201	-0.153	-0.124
Poverty	-0.051	0.012	-0.070	-0.054	-0.019
Popd	0.053	0.011	0.040	0.049	0.087
Land	-0.549	0.082	-0.711	-0.553	-0.366

Female: Female Ratio; Foreign: Foreigner Ratio; Under15: Ratio of Population under 15 Ages; Over65: Ratio of Population over 65 Ages; Poverty: Ratio of Population below Poverty Line; Popd: Population Density; Land: Land Value; STD: Standard Deviation

것처럼, 이들 지역에서 미세먼지의 농도는 상대적으로 양호한 편이었다.

4. 결과에 대한 고찰

대구시의 미세먼지 분포를 설명하는 요인을 추가적으로 분석하기 위해 행정동별 도로와 측정소 간의 최근린 거리, 대기오염물질 배출시설의 면적, 대기오염물질 배출시설 면적 비율 등

과 같은 기타 환경변수들과 미세먼지의 농도 간의 상관분석을 실시한 결과는 표 7과 같다. 각 변수별로 살펴보면, 도로와 측정소 간의 최근린 거리는 상관성이 매우 적으며 통계적으로도 유의하지 않은 것으로 나타났다. 대기오염 배출시설의 면적과 면적 비율은 모두 약한 정적 상관 관계를 보였고 통계적으로 유의했다. 면적 비율의 경우가 면적을 기준으로 했을 때보다 미세먼

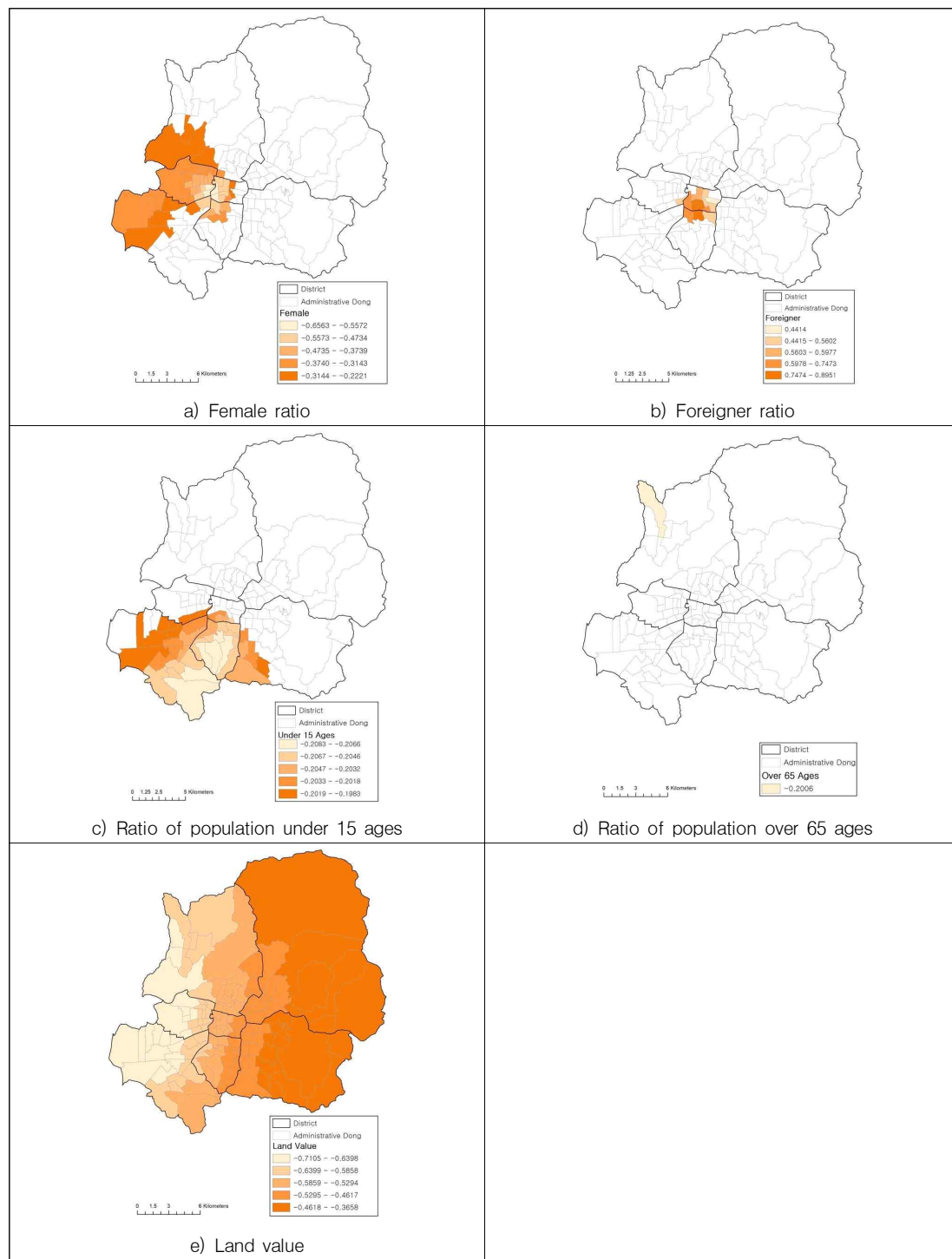


FIGURE 6. Statistically significant regression coefficients by independent variables

TABLE 7. Results of correlation analysis between PM₁₀ and other environmental variables

Variables	PM10
Nearest distance between measurement station and road	0.048
Area of air pollutant release facility	0.191*
Area ratio of air pollutant release facility	0.283**

* Statistically significant at $p < 0.05$ ** Statistically significant at $p < 0.01$

지의 농도와 상관성이 조금 더 높은 것으로 나타났다. 즉, 행정동별 미세먼지의 농도는 도로와 측정소 간의 최단거리보다 대기오염 배출 시설과 상대적으로 더 높은 상관성을 보이는 것으로 나타났다.

본 연구에서 한국환경공단 측정자료와 KT 측정자료를 통합한 미세먼지 자료와 MGWR 모형을 활용하여 대구시 미세먼지의 분포에 따른 환경적 형평성을 분석한 결과, 지가와 외국인 비율과 관련하여 국지적으로 환경적 불형평성을 확인하였다. 또한, 대구시 행정동별 미세먼지의 농도와 사회경제적 변수 간의 공간적 관계에서 공간적 이질성과 다중 스케일 맥락 효과를 탐색할 수 있었다. 하지만, 향후에 미세먼지의 분포에 따른 환경적 형평성 분석에서 고려되어야 할 몇 가지 방법론적 이슈들이 있다.

첫째, 본 연구는 미세먼지의 공간적 자기상관성 문제를 배제한 채 분석을 실시하였다. 미세먼지는 인접한 지역 간에 영향을 미치고 유사한 값을 가지는 공간적 자기상관성을 본질적으로 가지고 있는 종속변수이다. 향후 미세먼지의 공간적 자기상관을 고려하는 대안적 공간회귀 모형을 적용할 필요가 있다.

둘째, 서로 다른 공간 단위(행정동 또는 집계구)에서 미세먼지에 관한 환경적 형평성 분석을 하면 공간 단위에 따라 다른 결과가 나타날 수 있다. 즉, 미세먼지에 대한 환경적 형평성 분석에서 공간 단위가 분석 결과에 영향을 미치는 공간 단위 수정 가능성의 문제(MAUP: Modifiable Areal Unit Problem)를 탐색할 필요가 있다.

셋째, 미세먼지는 각 지점별 측정자료를 이용하여 공간내삽을 수행하고 공간내삽을 통해 얻

은 래스터 파일을 각 행정동별 벡터 파일에 입력하기 위해서 구역 통계를 산출하였는데 이 과정에서 평균화로 인한 국지적 정보가 손실되는 문제가 있었다. 따라서, 향후에 미세먼지에 관한 환경적 형평성 분석의 보다 국지적이고 미시적인 연구와 자료의 손실 최소화를 위해서는 행정 구역 단위가 아닌 격자 단위의 래스터로 분석하는 방법을 적용하여 연구 결과를 개선시킬 필요가 있다.

또한, 향후 연구에서 보완해야 할 몇 가지 연구의 한계점도 있다. 첫째, 본 연구에서 활용된 미세먼지 측정자료와 사회경제적 변수 간의 시간적 범위가 일치하지 않았다. 미세먼지 측정자료는 2019년 5월을 기준으로 수집되었으나, 사회경제적 변수 등이 추출된 센서스 자료는 2018년을 기준으로 배포된 자료였다. 특히, 국민기초생활수급자 자료는 2014년 관련 항목의 수집방식이 행정적으로 변동된 이후 최신자료 구축이 미비하여 수집 가능한 국민기초생활수급자 자료 중 가장 최신인 2015년 기준으로 제작된 자료를 사용하였다. 즉, 미세먼지 측정자료와 사회경제적 자료 간의 시간적 격차가 최소 약 1년에서 최대 약 4년의 차이가 나타나며, 사회경제적 자료 간에서 시간적 범위가 달라 이러한 시간적 범위의 차이가 연구에 미칠 수 있는 영향을 배제하지 못했다.

둘째, 한국환경공단 측정소와 KT 측정소 간의 차이가 본 연구 결과에 미칠 수 있는 영향을 배제하지 못했다. 한국환경공단 측정소와 KT 측정소는 측정 고도, 측정 방식, 농도의 측정 및 자료 수집·공지 간격에서 차이가 있었다. 이 때문에 두 자료는 통계적으로도 일부 유의한 평

균 차이가 존재하는 것을 확인할 수 있었으며, 공간적으로도 핫 스팟(hot spot)과 콜드 스팟(cold spot) 경향이 다르게 나타났다. 그러나 본 연구에서는 이러한 차이를 확인했지만 이에 대한 보정 없이 그대로 분석에 사용했다. 향후에 이를 보정하기 위한 후속 연구가 필요하다.

셋째, 본 연구에서는 기상요인과 지형요인을 통제하지 않았다. 실제로 2019년 5월에는 황사가 발생한 날이 있었으며, 기상 현상이 다양하게 나타났다. 이에 따른 습도와 풍속, 풍향 자료를 한국환경공단 자료에서는 수집할 수 있었으나 KT 자료에서는 수집할 수 없어 연구에 반영하지 않았다. 또한, 대구시는 평지, 하천, 산지 지형이 다양하게 나타나 분지성 기후가 나타나는 등 지형적 영향이 적지 않음에도 본 연구에서는 반영되지 않았다.

후속 연구에서 이러한 한계점들과 방법론적 이슈를 개선한 연구를 진행한다면, 더 정확하고 신뢰할 수 있는 연구 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 앞으로 미세먼지의 환경적 형평성 관련 많은 실증적 사례연구가 필요하다.

결론

미세먼지는 사람들의 기관지뿐만이 아닌 심혈관 건강에까지 악영향을 주는 오염물질로 모든 사람들에게 최소한으로 노출되어야 한다. 즉, 미세먼지와 사회경제적 특성의 공간적 분포에 따른 환경적 불형평성이 발생하지 않도록 해야 한다. 현재 우리나라에는 미세먼지 및 대기오염과 관련된 법률이 제정되어 있어 최대한 미세먼지 발생을 줄이고 사람들이 미세먼지에 노출되지 않도록 노력해야 하며 미세먼지에 취약한 노약자의 경우 더욱 주의를 해야 한다는 것이 명시되어 있다. 하지만 이와 관련하여 실제로 미세먼지와 관련된 불형평성이 발생하고 있는지의 여부를 규명한 국내 연구가 미비한 실정이어서 연구의 필요성이 있었다.

본 연구에서는 시간적 범위를 사회경제적 지표의 경우 2015~2018년, 미세먼지 측정 자료의 경우 2019년 5월 오전 10시로 두고, 공간적

범위는 달성군을 제외한 대구시의 7개 구로 설정하여 SPSS 26, ArcGIS 10.5, MGWR 2.2 등을 사용하여 미세먼지의 공간내삽과 MGWR 기반의 환경적 형평성 분석을 실시하였다. 먼저, 독립표본 t 검증으로 한국환경공단과 KT 자료를 비교한 결과 약 33%의 통계적 차이만을 가지고 있었다. 이는 기상요인과 지형요인을 통제하지 않았지만, 각각 중첩되지 않는 측정소 위치를 가지고 있어 서로 보완이 가능한 자료로써 활용 가능한 것을 의미했다.

한국환경공단과 KT 자료를 통합한 대구시 미세먼지의 공간내삽에서는 IDW와 Kriging (SK, OK, UK) 공간내삽법을 사용하였다. 산출된 RMSE값을 기준으로 가장 정확도가 높은 공간내삽법으로 IDW를 선정하였다. IDW 공간내삽법을 이용하여 미세먼지 자료를 지도화한 결과, 중구 남산동을 중심으로 콜드 스팟(cold spot)과 달서구 이곡동을 중심으로 핫 스팟(hot spot)이 나타났다. WHO의 미세먼지 권고 기준에 따라 행정동별 평균 농도의 등급을 분류하였을 때는 130개의 행정동 중 114개(약 87.7%)의 행정동이 나쁨에 해당하였다.

다음으로, 행정동별 사회경제적 변수와 미세먼지 농도 간의 공간적 관계를 파악하고 환경적 형평성을 분석하기 위해 OLS, GWR, MGWR 모형을 적용하였다. 모형의 적합성을 분석한 결과, MGWR에서 AICc 값이 감소하고 R²값이 증가하여 MGWR이 OLS나 GWR 보다 모형의 설명력이 높았다. 또한, OLS나 GWR과 달리, MGWR 모형은 독립변수들 간의 다중공선성, 종속변수와 독립변수 간의 공간적 이질성과 다중스케일 맥락 효과를 효율적으로 다룰 수 있었다. MGWR 모형에서 산출된 회귀계수에 의하면, 대구시에서 외국인 비율과 지가와 관련하여 미세먼지의 분포에 따른 통계적으로 유의한 환경적 불형평성 패턴이 나타났다. 특히, 지가가 대구시 미세먼지의 분포에 따른 환경적 불형평성 패턴을 가장 잘 설명해 주었다. 추가적으로 환경적 형평성 분석에서 다루지 못한 기타 다른 요인 중에서 도로와 측정소 간의 최근린거리, 대기오염물질 배출시설 면적과 면적 비율은 미

세먼지의 농도와 약한 정적 상관관계를 가지는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 선행연구에서 사용되던 한국환경공단원의 미세먼지 자료에서 지속적으로 제기된 측정소의 개수 부족과 측정 고도의 부적절성 문제를 보완하기 위해 지표면과 가까운 곳에 설치되어 있으며 측정소 개수가 다수 확보된 KT 측정소의 자료를 추가로 사용하였다. 본 연구에서는 달성군 외 대구시 지역에 설치된 171곳의 KT 측정소 중 약 15%에 해당하는 26곳의 측정소를 무선표집하여 사용하였지만, 향후 연구에서 모든 KT 측정 자료 및 기타 민간 업체의 측정소 자료까지 모두 활용한다면, 더욱 양질의 미세먼지 연구가 가능할 것으로 기대된다. 또한, 본 연구의 결과들은 미세먼지의 저감 및 관리 등과 같은 대구시 미세먼지 관련 정책을 수립하는데 시사점을 제시해 줄 수 있을 것이다. **KAGIS**

REFERENCES

- Buzzelli, M., M. Jerrett, R. Burnett and N. Finklestein. 2003. Spatiotemporal perspectives on air pollution and environmental justice in Hamilton, Canada, 1985-1996. *Annals of the Association of American Geographers* 93(3):557-573.
- Cho, E.A. and B.W. Jun. 2019. Visual and statistical comparison of fine dust data collected by KT and Airkorea. *Proceedings of Annual Conference of the Korean Geographical Society*. 72pp (조은아, 전병운. 2019. KT와 에어코리아 미세먼지 측정 자료의 시각적 및 통계적 비교 분석: 대구시를 중심으로. *대한지리학회 학술대회논문집*. 72쪽).
- Cho, H.L. and J.C. Jeong. 2009. The distribution analysis of PM₁₀ in Seoul using spatial interpolation methods. *Journal of Environmental Impact Assessment* 18(1):31-39 (조홍래, 정중철. 2009. 공간
- 내삽기법에 의한 서울시 미세먼지(PM₁₀)의 분포 분석. *환경영향평가* 18(1):31-39).
- Choi, B.G. and K.B. Kim. 2004. Correlation analysis of land used pattern and air pollution using GIS. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography* 22(3):293-301 (최병길, 김기범. 2004. GIS를 이용한 토지이용 상태와 대기오염의 상관성 분석. *한국측량학회지* 22(3):293-301).
- Fotheringham, A.S., C. Brunsdon and M. Charlton. 2002. *Geographically Weighted Regression: The Analysis of Spatially Varying Relationships*. John Wiley & Sons Inc.: Hoboken, NJ, USA. p.282.
- Fotheringham, A.S. and T.M. Ohsan. 2016. Geographically weighted regression and multicollinearity: dispelling the myth. *Journal of Geographical Systems* 18:303-329.
- Fotheringham, A.S., W. Yang and W. Kang. 2017. Multiscale geographically weighted regression(MGWR). *Annals of the Association of American Geographers* 107(6):1247-1265.
- Han, S.W. 2014. Analysis of the properties of particle matter in Busan and Daegu. M.A. Thesis, Graduate School of Environmental Studies, Pusan National University. Pusan, Korea. 54pp (한승욱. 2014. 부산과 대구지역의 용도별 미세먼지의 특성 분포. 부산대학교 환경대학원 석사학위논문. 54쪽).
- Hong, S.C. and B.Y. Yang. 2021. A comparative analysis of GWR and MGWR on the COVID-19 diffusion in Seoul, South Korea. *Journal of the Korean Cartographic Association* 21(3):77-91 (홍석찬, 양병운. 2021. 코로나-19 확산에 대한 GWR과 MGWR의 비교분석: 서울시를 배경으로. 한국

- 지도학회지 21(3):77-91).
- Jang, J.H., H.W. Lee and S.H. Lee. 2012. Spatial and temporal features of PM10 evolution cycle in the Korean peninsula. *Journal of the Environmental Sciences* 21(2):189-202 (장재훈, 이화운, 이순환. 2012. 한반도내 미세먼지 발생주기의 시공간 분포 특징. *한국환경과학회지* 21(2):189-202).
- Jeong, D.J. 2012. A study on the distribution characteristics of air pollutants and their impacts on the operation of a coal-fired power plant. M.A. Thesis, Keimyung University, Daegu, Korea. 78pp (정동진. 2011. 화력발전소 가동에 따른 대기오염물질의 분포 특성 및 영향에 대한 연구. *계명대학교 대학원 석사학위논문*. 78쪽).
- Jerrett, M., R.T. Burnett, P. Kanaroglou, J. Eyles, N. Finkelstein, C. Giovis and J.R. Brook. 2001. A GIS-environmental justice analysis of particulate air pollution in Hamilton, Canada. *Environment and Planning A* 33:955-973.
- Jun, B.W. 2006. GIS-based environmental equity assessment in the Atlanta Metropolitan Area, 1990. *Journal of the Korean Urban Geographical Society* 9(2):139-152 (전병운. 2006. GIS를 이용한 1990년 애틀란타 대도시권의 환경적 형평성 분석. *한국도시지리학회지* 9(2):139-151).
- Jun, B.W. 2011. Exploring the spatial relationships between environmental equity and urban quality of life. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 14(3):223-235 (전병운. 2011. 환경적 형평성과 도시 삶의 질의 공간적 관계에 대한 탐색. *한국지리정보학회지* 14(3):223-235).
- Kim, A.Y. and B.W. Jun. 2012. Environmental equity analysis of the accessibility to public transportation services in Daegu city. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 15(1):76-86 (김아연, 전병운. 2012. 대구시 대중교통서비스의 접근성에 대한 환경적 형평성 분석. *한국지리정보학회지* 15(1):76-86).
- Kim, A.Y. and C.H. Kwon. 2016. A study on optimal location of air pollution monitoring networks in urban area using GIS : focused on the case of Seoul city. *Journal of The Korean Society of Disaster Information* 12(4):358-365 (김아영, 권창희. 2016. GIS를 이용한 도심지 대기오염 측정망 최적위치 선정에 대한 연구: 서울특별시를 대상으로. *한국재난정보학회논문집* 12(4):358-365).
- Kim, D.Y. 2013. Fine dust to threaten our health: cause and policy measure. *Issue & Diagnosis* 121:25. 21pp (김동영. 2013. 건강을 위협하는 미세먼지, 원인과 대책. *이슈&진단* 121:25. 21쪽).
- Kim, M.Y., Y.B. Song and E.J. Kim. 2016. A study on the distribution and change of PM10 for urban livability: focused on Daegu metropolitan city. *Proceedings of Fall Conference of the Korean Housing Association* 2. 173-178pp (김명연, 송영빈, 김은정. 2016. 도시 거주성 증진을 위한 미세먼지(PM10) 분포 추이에 관한 연구 -대구광역시를 중심으로-. *한국주거학회 학술대회논문집* 2. 173-178쪽).
- Kim, Y.J. and W.K. Jo. 2012. Assessment of PM-10 monitoring stations in Daegu using GIS interpolation. *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science* 20(20):3-13 (김효정, 조완근. 2012. 공간내삽법을 이용한 도시지역 미세먼지 측정소의

- 배치 적절성 평가. 한국지형공간정보학회지 20(20):3-13).
- Kwon, Y.S. and J.Y. Hyun. 2017. Policy measure for fine dust: scientific monitoring is the starting point. Daekyung CEO Briefing 519. 8pp (권용석, 현준용. 2017. 미세먼지 대책, 과학적 모니터링이 출발점. 대경 CEO Briefing 519. 8쪽).
- Kwon, Y.S. and K.H. Nam. 2014. Let's protect citizen's health from fine dust. Daekyung CEO Briefing 384. 10pp (권용석, 남광현. 2014. 미세먼지로부터 시민 건강 지키자!. 대경 CEO Briefing 384. 10쪽).
- Lee, I.H. 2008. An analytical review of environment justice research. Space and Environment 29:32-67 (이인희. 2008. 환경 불평등에 관한 이론적 고찰 : 환경정의 연구의 연구쟁점과 연구경향. 공간과 사회 29:32-67).
- Lee, W.D., J.S. Won and C.H. Joh. 2011. A study on the air pollution index and the characteristics of urban space structure in Seoul. Proceedings of Annual Conference of the Korean Geographical Society. 267-272pp (이원도, 원종서, 조창현. 2011. 서울시 대기오염지수와 도시공간구조 특성에 관한 연구. 대한지리학회 학술대회논문집. 267-272쪽).
- Leung, Y., Y. Zhou, K. Lam, T. Fung, K. Cheung, T. Kim and H. Jung. 2019. Integration of air pollution data collected by mobile sensors and ground-based stations to derive a spatiotemporal air pollution profile of a city. International Journal of Geographical Information Science 33(11):2218-2240.
- Maantay, J. 2007. Asthma and air pollution in the Bronx: Methodological and data considerations in using GIS for environmental justice and health research. Health & Place 13:32-56.
- Oshan, T.M., Z. Li, W. Kang, L. Wolf and A.S. Fotheringham. 2019. mgwr: A Python implementation of multiscale geographically weighted regression for investigating process spatial heterogeneity and scale. ISPRS International Journal of Geo-Information 8(6), 269; <https://doi.org/10.3390/ijgi8060269>.
- Park, S.Y. 2017. Distributional characteristics of PM₁₀ concentration in Pusan and local temperature variation. Proceedings of Winter Conference of the Korean Association of Regional Geographers. pp.25 (박선엽. 2017. 부산광역시 PM10 농도의 분포 특징과 국지적 기온 변화. 한국지역지리학회 학술대회발표집. 25쪽).
- Pearce, J. and S. Kingham. 2008. Environmental inequalities in New Zealand: A national study of air pollution and environmental justice. Geoforum 39:980-993.
- Rodríguez, S., X. Querol, A. Alastuey, M. Viana, M. Alarcón, E. Mantilla and C.R. Ruiz. 2004. Comparative PM₁₀-PM_{2.5} source contribution study at rural, urban and industrial sites during PM episodes in Eastern Spain. Science of The Total Environment 328(1-3):95-113.
- Ryu, H.W. and D.H. Jang. 2019. A study on the conformity assessment of GWR model through analyzing the correlation between fine particles(PM₁₀) concentration and land-cover. Journal of the Association of Korean Photo-Geographers 29(1):73-84 (류형원, 장동호. 2019. 미세먼지(PM₁₀) 오염농도와 토지피복간의 상관성 분석을 통한 GWR 모델의 적합성 평가. 한국사

- 진지리학회지 29(1):73-84).
- Seo, H.D., A.Y. Lim, J.Y. Park and S.L. Jo. 2018. GIS analysis of residential location of the elderly and the ill: focused on air pollution. Proceedings of Annual Conference of the Korean Geographical Society. 149-151pp (서현동, 임아영, 박진영, 조상래. 2018. 노약자, 병약자 주거입지분석 GIS 분석(대기오염을 중심으로). 대한지리학회 학술대회논문집. 149-151쪽).
- Seo, H.J. and B.W. Jun. 2011. Environmental equity analysis of the accessibility of urban neighborhood parks in Daegu city. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 14(4): 221-237 (서현진, 전병운. 2011. 대구시 도시근린공원의 접근성에 따른 환경적 형평성 분석. 한국지리정보학회지 14(4):221-237).
- Wheeler, B.M. and Y. Ben-Shlomo. 2005. Environmental equity, air quality, socioeconomic status, and respiratory health: a linkage analysis of routine data from the Health Survey for England. Journal of Epidemiol Community Health 59:948-954.
- Wong, D.W., Yuan, L. and S.A. Perlin. 2004. Comparison of spatial interpolation methods for the estimation of air quality data. Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology 14:404-415.
- Zoest, V., F.B. Osei, G. Hoek and A. Stein. 2020. Spatio-temporal regression kriging for modeling urban NO₂ concentrations. International Journal of Geographical Information Science. International Journal of Geographical Information Science 34(5):851-865. **KAGIS**