연구논문 「환경정책」 제29권 제3호 2021. 9: 77-111
DOI http://dx.doi.org/10.15301/jepa.2021.29.3.77
pISSN 1598-835X eISSN 2714-0601

도시화 발전 수준이 대기질 개선에 미치는 영향에 관한 연구:
중국 31개 성·직할시(省·直轄市)를 대상으로*

Assessing the Development Level of Urbanization on the Impact of Air Quality Improvement: A Case Study of Provinces and Municipalities Region, China

리멍잉** · 정주철***
Mengying Li · Juchul Jung

요약: 무분별한 도시화로 인해 자원 이용 효율성이 낮아질 뿐만 아니라, 도시환경이 지속적으로 훼손되고 있다. 장기적으로 보다면, 환경 캐링 커패시티(Environmental Carrying Capacity)가 떨어질 때 사회적 공동효과와 이익 및 도시 경제발전 수준도 떨어질 수 있다. 또한, 보건환경이 악화되어 거주민의 건강에 악영향을 미칠 수 있다. 도시화 발전 수준이 대기질에 미치는 영향에 대한 철저한 이해와 대기 환경개선 및 도시환경 거버넌스 정책 수립이 매우 필요하다. 본 연구는 문헌 검토 및 유효데이터를 바탕으로 경제, 에너지, 사회보장, 도시 공간구조와 대중교통 자원, 도시화 발전 효율 및 폐기물 처리와 환경보호 투자 등 6가지 차원에서 도시화 지표를 재구축하였다. 본 연구는 퍼지 통계 방법, 즉 Grey Relational Analysis(GRA)를 활용하여, 도시화 평가지표와 미세먼지(PM_{10})와의 상호작용 관계를 중점적으로 연구하였다. 또한, 패널 데이터 회귀 분석을 활용하여 도시화 평가지표와 대기질의 관계를 계량 분석하였다. 연구 결과를 보았을 때 각 지표가 미세먼지(PM_{10})에 미치는 영향이 다르지만 폐기물 처리와 환경보호 투자는 대기질 개선의 주요 요인일 수 있다. 또한, 경제발전 수준의 차이 및 도시화 발전 속도와 질이 조화를 이루지 못하고 있으므로 대기질에 영향을 미친다는 것을 설명할 수 있다. 따라서 도시화 발전 수준에 대한 정부 차원에서의 관리 감독 및 평가를 제도화 할 필요가 있다. 이러한 제도는 도시화 발전의 속도와 질을 조화롭게 할 뿐만 아니라, 경제 발전 수준과 도시화의 발전 수준이 다른 지역과 차별화된 도시화 발전 관리 정책을 실시할 수 있도록 할 수 있다.
핵심주제어: 도시화 평가지표, 대기질 개선, 그레이 관련도 분석, 패널 데이터 회귀모형

Abstract: Unlimited urbanization has led to low utilization efficiency of resources. The environment is continuously being sacrificed for urban construction. In the long-term, as the environmental carrying capacity decreases the social common benefits, as well as the urban economic development benefits, will also decrease. This could severely impact the health of city residents. A thorough understanding of the influence of urbanization level on air pollution is crucial for the formation of optimal and feasible urban environmental governance. This study analyzes the relationship between measurable urbanization evaluation indicators and particulate matter (PM_{10}), an air pollution indicator, in 27 provinces

* 본 연구는 환경부 「기후변화특성화대학원사업」의 지원으로 수행되었습니다.
** 주저자, 부산대학교 도시공학과 박사수료
*** 교신저자, 부산대학교 도시공학과 교수

and 4 municipalities in China.
In this study, a fuzzy statistical method, the grey relational analysis (GRA), was used to examine the interactions among various urbanization evaluation indicators and air pollutants. The panel data regression model was then employed to quantify the relationships between these indicators and air pollution. Based on integrating literature research and collected data, six categories of urbanization evaluation indicators were identified as the primary indicators: ① economic strength and industrial structure; ② energy utilization efficiency; ③ social security and education expenditure; ④ urban space layout and public transportation resources; ⑤ urbanization efficiency; and ⑥ waste treatment and environmental protection investment. The main conclusions are: (1) These indicators of urbanization have different impacts on air pollution. (2) Waste treatment and environmental protection investment is the main factor affecting air quality improvement. (3) Differences in the economic development level and the uncoordinated speed and quality of urban development affect air quality. Accordingly, the establishment of an evaluation and supervision mechanism for regulating the level of urbanization development is proposed. This mechanism could ensure urban air quality improvement and optimize the coordination of urban development.
Key Words: Urbanization Evaluation Indicators, Air Quality Improvement, Grey Relational Analysis, Panel Data Regression Model

I. 서론

지난 50년 동안 도시는 많은 변화가 일어났다. 이 변화에는 도시 발전 수준과 도시인구 증가뿐만 아니라 도시의 규모 및 수량에 많은 변화도 일어났다(Deshpande et al., 2007). 중국은 1978년 경제개혁개방(Chinese Economic Reform) 이후 도시화 발전 속도가 빨라졌고 도시화율이 높아지고 있다. 1978~2015년 중국의 인구의 도시화율은 17.9%에서 56.1%로 높아졌으며, 증가율이 연간 1.03%이다(Cui et al., 2019). 2011년에 중국 인구의 도시화율은 50%를 넘었고, 2014년에는 세계 평균 수준(54%)에 달했다. OECD의 통계에 의하면 2030년까지 중국의 도시 인구는 6억(2009년 기준 46.6%)에서 9억(70%)으로 증가할 수 있다(Kamal-Chaoui et al., 2009).

미국 지리학자 Northam(1979)의 도시화 S자형 곡선 이론에 따르면 인구의 도시화율이 30~70%에 이르는 도시는 도시화 발전의 중간 단계에 진입한 것으로 보고 있다. 도시화 발전의 중간 단계에서는 도시가 빠르게 발전함으로써 도시의 인구 증가와 산업집중은 도시 지역에서 교통 혼잡,

주택 부족과 환경 악화 등 사회 및 환경에서 다양한 문제가 발생하는 것으로 나타났다(Li et al., 2013). 이와 같이 도시화가 진행되면서 환경 악화 문제가 많이 발생하는데 특히 인구가 밀집된 지역의 대기질 악화 문제가 전 세계 많은 지역에서 발생하고 있다(Deshpande et al., 2007). 대기질 악화로 인한 건강 영향에 초점을 맞춘 연구를 살펴보면 대기오염이 인간의 호흡기 질환과 심장병 발병률을 증가시키는 것을 알 수 있다. 또한, 대기오염으로 인한 사망률과 입원율이 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다(Brunekreef et al., 2002). 중국영토의 28%, 약 2,720,000 ㎢가 대기오염에 노출되어 있으며 이로 인해 중국에서 인구 100만 명 이상이 거주하는 154개 도시 중 75%(약 5억 명)가 미세먼지(PM_{10}) 피해를 겪고 있다(Han et al., 2015; Liu et al., 2017). 이러한 위험성을 존재하기 때문에 대기오염 문제는 최근 몇 년 동안 많은 관심을 끌어왔다.

따라서 도시화가 대기오염에 미치는 영향에 관한 연구를 살펴보면 도시화 과정에서 인구 증가가 대기질을 악화시킨다는 것을 입증하였다(Wang et al., 2020). 사회경제적 요인과 대기오염의 상관성에 관한 연구도 많다. 이와 같은 선행연구들은 급속한 경제 성장이 중국 대기질을 악화시키는 주요 요인임을 밝혔다(Lin et al., 2014; Zhang et al., 2020; Zheng et al., 2020). 도시화에 관한 기존의 연구는 도시화 과정에서 도시 스프롤, 도시 형태, 산업구조, 교통과 에너지 소비가 대기질에 영향을 미치고 있다는 것을 증명하였다. 그러나 대부분의 연구는 도시화의 개별적인 차원에 기초하여 이루어진 것이지, 도시화의 각 차원을 종합하여 연구를 진행한 것이 아니었다. 기존 연구들의 한계점을 보완하여, 경제, 에너지, 사회, 교통과 환경 등의 요인들을 도시화 지표체계를 구축하고, 도시화 발전이 대기질에 미치는 영향을 다 각도로 검토하는 다양한 연구와 시도가 필요하다. 특히, 이들 평가지표를 통해 도시화 과정 중에 반영하는 인구 증가, 경제 발전, 토지확장과 사회생활 등 여러 차원이 대기질에 미치는 영향에 관한 연구목적을 강조하고자 한다. 도시화 과정에서 대기질의 영향 요인에 대한 우선순위를 매기는 것이 필요하다. 이것은 과학적인 평가 및 정량적인

도시화 발전 수준이 대기질에 미치는 영향을 분석하는 데 중요한 의미를 가진다. 또한, 도시 계획가와 의사결정자에게도 도시 대기질을 개선하기 위한 적절한 관리 정책을 수립함에 있어서 효과적인 정보가 될 수 있다.

따라서 본 연구는 다음 과정으로 진행된다. 선행연구를 통해 도시화 수준의 종합 평가 및 대기질 영향 요인을 도출하기 위해 경제력과 산업구조, 에너지이용 효율, 사회보장과 교육투자, 도시 공간구조와 대중교통 자원, 도시화 발전 효율 및 폐기물 처리과와 환경보호 투자 등 6가지 차원에서 도시화 지표를 재구조화하였다. 다음으로 연구 지역인 중국 31개 행정구역에 적용하기 위해 도시화 지표에 대한 자료를 수집하고 미세먼지(PM_{10})의 기초 공간 분석을 위한 공간 정보화 과정을 거친다. 확정된 지표에 대해 11년간(2005~2015) 자료를 기반으로 GRA(Grey Relational Analysis) 분석 및 패널 데이터 모형 분석을 실시하였다. 이를 통해 기존의 도시화로 인한 대기질에 대한 영향 요인보다 더 영향력이 있는 요인을 도출하여, 도시 대기질 개선에 대한 시사점을 제시하고자 한다.

II. 선행연구

1. 도시화와 대기오염에 관한 선행연구

도시화 및 대기질에 관한 연구에 따르면 도시화 및 사회경제적 요인들과 지역 대기질에 관한 연구가 가장 많이 진행되었으며, 도로 교통 및 도시화 발전 수준과 지역 대기질에 관한 연구도 있다. 이 두 가지 연구 분야를 기반으로, 도시화가 지역 대기질에 미치는 영향을 이해하고자 하였다.

인구와 대기질의 관계는 이론적 및 실증적 연구를 통해 이미 광범하게 진행되었다(Park et al., 2011; Lou et al., 2016; Wang et al., 2020). 주로 도시의 인구밀도와 인구 증가율이 대기질에 미치는 영향을 측정하여(Du et al., 2013; Li et al., 2013, 2014), 인구밀도와 대기오염 물질의 농도 사이 연구 결과에 따라 도시화와 관련된 인구 이동 및 산업화는 대기오염

문제를 격화시킨다는 것을 확인했다(Du et al., 2019).

교통 및 도시화 발전 수준과 지역 대기질에 관한 실증연구를 살펴보면 주로 세 가지 연구 결과로 요약된다. 첫째, 중국은 지역이 넓고 지리적 조건이 다르므로 도시화 발전 정도가 서로 달라서 대기오염 물질의 전국 분포 차이가 매우 크다는 것을 보여주었다. 그 연구 결과를 살펴보면 대기오염이 서부 낙후지역에서 동부 경제 발달 지역으로 점차 심해지고 있는 것으로 나타났다(Han et al., 2014). 둘째, 도시화 발전 수준과 대기질의 관계는 일반적으로 도시 경제 성장과 도시 건설로 인해 대기질에 악영향을 끼친다고 증명되었다(Du et al., 2019). 이런 연구들은 도시화가 에너지 소비 증가를 초래함으로써 대기오염을 악화시킨다는 결론을 얻었다(Fang et al., 2009; Chen et al., 2013). 마지막으로 교통과 대기오염 물질 배출 관계에 관한 연구는 주로 배기가스가 대기질을 악화시키는 것으로 나타났다(Colvile et al., 2001; Krzyzanowski et al., 2005).

사회경제적 요인이 대기질에 미치는 영향에 관한 연구를 살펴보면 경제적 차원에서 주로 GDP, 1인당 GDP, GDP 대비 2차 산업 비중 등(Liu et al., 2017; Luo et al., 2017)이 고려되었고 사회적 차원에서 도시화율, 실업률 및 인구 증가 등 지표를 포함하였다(Fang et al., 2015; Jiang et al., 2018). 그러나 이들 사회경제적 자료는 일반적으로 국가 차원에서 기록되기 때문에 지역 단위에서 자료 수집하는 것이 어렵다. 따라서 대다수의 중국을 연구 지역으로 하는 연구는 주로 성·직할시(省·直轄市) 차원에서 분석하였다. 대기질에 미치는 사회경제적 요인의 연구에서 가장 많이 인용한 이론은 환경 쿠즈네츠 곡선(Environmental Kuznets Curve, EKC) 이론이다. 환경 쿠즈네츠 곡선(EKC)은 경제발전이 환경 악화를 초래하지만, 경제가 더욱 성장하여 1인당 GDP 및 시민 이의 환경 질에 대한 요구가 일정한 수준으로 상승할 때 환경오염 문제가 환경오염 문제가 결국에는 완화되리라는 것을 설명하는 이론이다(Selden et al., 1994; Khanna, 2002). 중국 대기오염과 경제발전에 관한 연구에서 쿠즈네츠 곡선과 비슷한 역 "U"자 패턴 관계도 나타났다. 이러한 패턴의 발견은 도시발전이 궁극적으로 대기

질을 개선할 것이라는 환경 쿠즈네츠 곡선 (EKC) 이론의 주요 가설과 일치한다. 또한, 지속적인 도시발전은 초기 산업화로 인한 대기오염을 줄일 수 있다는 것을 예측할 수 있다(Yandle et al., 2002; Kaika et al., 2013).

기존 연구에 따라 인간 활동이 대기질에 직접적인 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 그중에 2차 산업은 3차 산업보다 훨씬 더 대기오염에 기여하는 것으로 증명되었다(Fang et al., 2015; Jiang et al., 2018). 그러나 도시화의 발전 과정에서 도시화의 '질' 및 '양'이 대기질에 미치는 영향에 관한 실증연구는 현재까지 많은 연구가 없어 본 연구에서 도시화 발전 수준이 대기질에 미치는 잠재적 영향을 평가하기 위해 선행연구를 바탕으로 도시화 발전 수준 평가지표 체계를 재구축하였다. 이 지표를 활용하여, 도시화 수준이 연간 대기오염 물질 농도에 미치는 영향을 측정하고 대기질과 가장 밀접한 관련이 있는 지표에 대해 논의하였다.

2. 도시화 발전 수준 측정에 관한 논의

도시화는 오늘날 세계에서 중요한 사회적, 경제적 현상 중 하나이다(Xu et al., 2009). 도시화 발전 수준은 이미 도시의 사회경제적 계획 내 핵심 요소로 여겨지고 있다(Kosovac et al., 2020). 그러나 도시 확장과 도시화 발전 과정에서, 토지 이용 패턴은 일부 사회·환경 문제를 일으켰다.

최근 도시화 발전 수준에 대한 정량적 평가 연구는 도시 인구 비율과 토지 이용에 집중되었다. 유엔 사회부(UN DESA)는 1인당 평균 소득, 출생률, 문맹률과 단백질 소비량 등 19개 사회 경제 지표를 포함하여, 평가지표를 구축하였다. 이들 지표는 선진국 및 개발도상국의 사회, 경제와 인구 통계의 상호 관계를 모두 고려했다(Niu, 2012). 또한, 영국의 지리학자 Cloke은 인구, 직업과 주거 및 도심부의 거리 등 16개 지표를 선택하고 도시화 수준의 지표체계를 수립하며, 분석을 진행하였다(Niu, 2012).

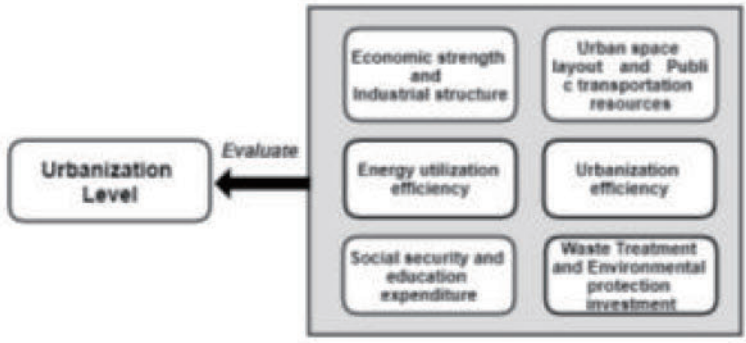
그러나 Friedmann(2006)은 도시화의 여러 방면에 걸친 복잡한 과정을 통해 나타나기 때문에 토지, 사회경제적 소비 패턴, 제도 및 환경 등 여러 차원을 정량화해야만 효과적으로 측정할 수 있다(Bai et al., 2014; Haase et al.,

2018). 중국학자 Fang and Wang(2011)은 사회·경제·공간에 기초한 복합지표 방법으로 도시화 수준에 대한 평가 진행하였다. 또한, 도시화·자원·환경 종합발전지수(URE)를 도출하여 지속 가능한 도시화를 추진할 수 있는 과학적 근거를 마련하였다(Cui et al., 2019). 이 지표는 도시화 발전의 '질' 및 '양'의 조화 정도에 대해 효과적으로 측정하였다. 하지만 도시화의 정의가 다양하고, 범위가 넓으므로 도시화 수준에 관해 측정하기는 쉽지 않다.

선행연구들의 결과를 종합적으로 살펴보면 도시화 수준을 측정하는 방법은 주로 주요 지표 분석방법과 복합지표 방법 2가지가 있다. 주요 지표 분석방법은 도시화의 특징 지표를 통해 도시화 발전 수준을 표현한다. 인구 비율과 토지 이용 현황 지표는 가장 많이 사용한 지표이다(Xu et al., 2009). 복합지표 방법은 도시화 발전의 서로 다른 차원을 고찰하기 위해 다양한 지표를 선택하여 도시의 여러 특징을 종합 분석하는 방법이다. 지속 가능한 발전지표, 도시 경쟁력 지표와 도시화 발전 질 지표 등 도시에 관한 복합지표 방법을 활용하였다(Xu et al., 2009). 지표를 활용한 분석방법은 평가 결과를 쉽게 이해할 수 있을 뿐 아니라 연구 지역 간 차이가 명확하게 나타난다(강정은 등, 2012).

따라서 본 연구는 앞서 선행연구에서 제시한 지표체계를 바탕으로 경제·에너지·사회·교통·도시화·환경 등 6개 차원을 포함한 도시화 발전 수준 평가지표를 구축하였다(〈그림 1〉).

〈그림 1〉 평가지표



3. 연구 질문 및 가설

본 연구에서는 도시화의 경제력과 산업구조, 에너지이용 효율, 사회보장과 교육투자, 도시 공간구조와 대중교통 자원, 도시화 발전 효율 및 폐기물 처리와 환경보호 투자 등 6가지 차원을 종합한 도시화 수준 평가지표를 도출하였다. 첫째, 중국의 도시화가 지속적으로 증가하는 추세에 있으며, 도시화로 경제 성장 및 에너지이용 증가는 대기오염 등 환경적 문제를 발생시킨다. 둘째, 조화로운 도시화의 과정은 도시 문제를 완화할 수 있다. 그래서 도시화 발전 '질' 및 '양'의 균형 발전을 위한 도시화 발전 수준에 대한 평가가 요구된다. 도시화 수준 평가지표를 통해 대기오염 관련 요인을 도출할 수 있으며, 도시화 수준은 대기질에 미치는 영향을 파악할 때 활용될 수 있다. 따라서 본 연구 다음과 같은 연구 질문 및 가설을 수립하였다.

연구 질문: 도시화 평가지표는 대기질 개선에 어떠한 영향을 미쳤는가?
연구 가설 1: 지역 도시화 발전 차이로 인해 대기오염 물질이 공간적 차이가 나타날 것이다.
연구 가설 2: 선행연구 결과에 따라 도시화 발전 효율, 에너지이용 효율 및 폐기물 처리와 환경보호 투자의 수준이 대기질과 높은 GRA 관련도가 나타나고, 대기질 개선에 대한 긍정적인 영향을 미칠 수 있다.

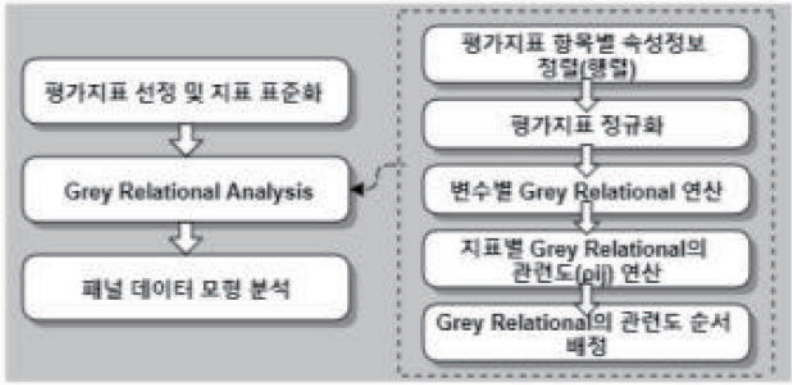
Ⅲ. 연구 방법

1. 도시화 수준 평가 개요

본 연구는 GIS(Geographic Information System)를 이용해 지역 간 도시화 발전 차이로 인한 대기오염 물질의 공간적 분포를 살펴보았다. 도시화 수준 평가 분석이 필요한 지표를 선정하여, 표준화 과정을 거치고, GRA 방법에 따라 도시화 수준 평가지표는 대기질에 주요 영향 요인을 도

출하고 패널 데이터 모형 분석을 실시하였다. 연구 흐름도는 〈그림 2〉에 제시한 것과 같다.

〈그림 2〉 연구의 흐름도



2. 도시화 발전 수준 평가지표 선정

도시화의 개념과 과정의 복잡성 때문에, 단일한 지표로는 도시화의 모든 특징을 포착할 수 없다. 도시화 발전 수준의 측정에 관한 연구는 도시화 현상에 따른 많은 사회 경제 및 환경 문제를 밝히고 있다. 또한, 급속한 도시화 발전과 대기오염의 상관관계는 중국에서 특징적인 현상이 되어 왔다(Li et al., 2013; Van Donkelaar et al., 2016; Jin et al., 2017). 따라서 경제력과 산업구조, 에너지이용 효율, 사회보장과 교육투자, 도시 공간구조와 대중교통 자원, 도시화 발전 효율 및 폐기물 처리와 환경보호 투자 등 6개 차원에서 도시화 발전 수준에 대해 평가하였다. 사용된 6개의 차원의 모든 지표는 〈표 1〉에 요약되어 있다.

(1) 경제: 인간의 다양한 경제 활동은 대기오염의 주요 원인이 되었다(Wu et al., 2018). 경제발전은 환경에 영향을 주는 중요한 요인이다(Li et al., 2016). 공업화는 중국 도시의 대기오염 물질 농도를 높이는 원인으로 작용한다(Li et al., 2016).

그러나 환경 쿠즈네츠 곡선(EKC) 이론 가설에 따르면 도시화 발전 과정 중에 경제발전이 초기에는 환경에 대한 부정적인 영향을 끼치고 일정한 수준으로 넘어서면 긍정적 영향을 끼치는 것으로 예상할 수 있다(Kaika et al., 2013). 즉, 경제발전과 산업 구조조정, 기술 발전 및 환경친화적 에너지 사용 등에 따라 대기오염 물질의 배출량을 줄일 수 있다(Cheng et al., 2016).

경제발전 수준이 대기오염과 정(+)의 상관관계를 보인다는 연구는(Lin et al., 2016; Xu et al., 2020) 대부분이 1인당 GDP를 사용하여, 경제발전 수준을 측정하여, 중국의 공업화 발전에 산업구조가 대기질에 영향을 미치는 중요한 요소임을 밝혔다(Wang et al., 2017; Xu et al., 2020). 첨단 기술 혁신 발전은 환경오염을 제어하는 중요한 수단이라는 연구도 있다(Xu et al., 2020).

따라서 본 연구에서 1인당 GDP, 증가한 3차 산업이 GDP에 차지는 비율과 첨단 산업이 공업에서 차지하는 비중 등 지표를 선정하여, 경제력과 산업구조의 수준을 측정하였다.

(2) 에너지: 중국은 세계에서 에너지 소비가 가장 많은 국가 중 하나이기 때문에 에너지이용 효율은 대기오염에 대한 큰 영향을 미칠 수 있다(Zheng et al., 2019). 높은 에너지이용 효율 및 선진 기술 개발은 더 많은 GDP를 창출할 뿐만 아니라 대기오염 물질 배출도 줄일 수 있다(Chen et al., 2018). 그 결과 에너지 차원에서는 주로 에너지이용 효율을 나타낼 수 있는 GDP 단위당 에너지 소비량, 에너지 생산 탄력성 지수와 에너지 가공 전환율 3개 지표를 활용했다.

(3) 사회: 대기오염을 일으키는 사회적 요인 많이 검증되었다. 인간의 사회활동은 지역의 에너지 소비와 대기오염 물질 배출에 대한 정(+)의 영향을 준다는 사실을 밝혔다(Sun et al., 2019). 상대적으로 대기오염이 인간 건강에 대한 심각한 위해를 끼친다는 것이 확인되어(Lu, 2020) 대기오염이 인간의 호흡기 질환과 심장병 발병률을 증가시키는 것을 알 수 있을 뿐만 아니라 일부 학자들은 건강이 인적 자본 발전의 중요한 요소라고 생

각하였다. 건강한 몸은 생산력의 향상으로 이어지며, 경제성장의 필요한 요소로 확인되었고(Abdullah et al., 2016) 심각한 대기오염이 소득 불평등을 심화시키는 것을 밝혀, Wu et al.(2020)는 대기오염이 사회 안정과 경제 발전에 영향을 끼칠 수 있고, 가난한 사람들은 대기오염의 피해를 더욱 쉽게 받을 수 있다(Lipfert, 2004).

Zanobetti et al.(2000)는 유럽, 아시아와 미국에서 교육 수준이 낮은 사람들이 장기적인 대기오염 노출로 인한 사망 위험이 더 높다는 연구 결과에 따라 실업률, 대학 재학생 수, 인구 만 명당 의사 수, 사회 복지 지출이 재정 총지출에 차지하는 비율, 공공 교육지출이 GDP에 차지하는 비율, 도시화율, 2·3차 산업 종사자 비율 및 사회 부담 계수[1] 등 지표를 선정하여, 대기질에 미치는 간접적인 영향을 연구하였다.

(4) 교통: 자동차 배기가스는 대기오염에 영향을 주는 주요 원인이다(Wu et al., 2018). 도시의 발전은 운수업과 자가용 차량의 증가로 이어지고, 도시 전체의 교통량을 증가시켜 대기오염에 영향을 미친다(Zang et al., 2017).

그러나 대중교통 서비스 증가는 주요 대도시 지역의 대기질을 개선할 수 있다(Stone, 2008). 따라서 도시 교통 차원에서 도로 면적, 인구 만 명당 버스 수와 자가용보유량 지표는 도시 공간구조와 대중교통 자원을 대표하여 사용한다.

(5) 도시화 효율: 인구밀도가 높을수록 도시화 및 산업화 수준이 높아지고 대기오염 물질 배출량이 높아진다(Ding et al., 2019). 반면에 중국의 도시 지역은 중앙난방 공급을 더 많이 사용하므로 인구가 더 집중될 때 에너지 소비를 줄일 수 있다(Shen et al., 2017). 도시 식생은 도시와 대기 환경을 변화시킴으로써, 지역의 대기질에 대한 직간접적인 영향을 줄 수 있으므로(Nowak et al., 2006; Xu et al., 2020) 도시 1인당 주거면적, 시가지화 지역 녹지비율, 1인당 공원 녹지 면적, 인구밀도 및 도시 공공시설 건설 투자비용이 GDP에 차지하는 비율 지표를 활용하여 도시화 효율에 대해 측정하였다.

---

1) 사회 부담 계수 = (14세 이하 인구수 + 65세 이상 인구수)/ 15~64세의 인구수.

〈표 1〉 도시화 발전 수준 평가지표

요소	세부지표
Economic strength and Industrial structure 경제력과 산업구조	X1: GDP per capita
	X2: The share of the Added-value of the tertiary industry in GDP
	X3: Citizen Engel's Coefficient
	X4: Regional economic disparities
	X5: Sustained economic growth
	X6: Added value of new and high technologies as a percent of the added value of industrial output
	X7: Average per capita income elasticity
Energy utilization efficiency 에너지이용 효율	X8: Energy consumption per unit of GDP
	X9: Energy production elasticity
	X10: Energy conversion rate
Social security and education expenditure 사회보장과 교육투자	X11: Urban Unemployment rate
	X12: Number of College students per 10000 population
	X13: Number of doctors per 10000 population
	X14: Expenditure for a social safety net · in general public expenditure rate
	X15: Expenditure for education as a percent of GDP
	X16: Urbanization rate and non-agricultural employment ratio
	X17: Social burden Coefficient
Urban space layout and Public transportation resources 도시 공간구조와 대중 교통자원	X18: Number of buses per 10000 population
	X19: Urban road area
	X20: Number of private cars
Urbanization efficiency 도시화 발전 효율	X21: Urban per capita living space
	X22: Green covered area as %of Completed
	X23: Park green areas per capita
	X24: Population density
	X25: Expenditure for Municipal infrastructure as a percent of GDP
Waste Treatment and Environmental protection investment 폐기물 처리와 환경보호 투자	X26: Industrial waste gas treatment rate
	X27: Life waste harmless treatment rate
	X28: Environment quality-related cost
	X29: Industrial waste material recycle rate
	X30: Total investment in the treatment of environmental pollution as a percent of GDP

Source: China Statistical Yearbook, China Statistical Yearbook of Environment, China Energy Statistical Yearbook, China City Statistical Yearbook(2006-2016)

(6) 폐기물 처리와 환경보호 투자: 도시화는 세계 경제 성장을 촉진하고 세계 및 지역 자원에도 영향을 미치며, 여러 차원에서 자연환경 변화시킨다. 심지어 지역의 생태환경을 근본적으로 바꾸었다(Cui et al., 2019). 지역의 생태환경에서 쿠즈네츠 곡선(EKC) 이론 가설의 타당성이(Cui et al.,

2019) 중국에서 확인되었지만, 일부 연구에서는 단순한 환경 모니터링보다 환경 거버넌스 및 오염 통제가 더 효과적이라고 제시하였다(Cui et al., 2019). 산업 기술과 환경보호 수준이 높으면 환경오염을 개선할 수 있다. 폐기물 처리와 환경보호 투자 차원에서 공업 폐기가스 처리 비율, 생활 쓰레기의 친환경적 처리 비율, 환경보호를 위한 투자비용이 GDP에서 차지하는 비율, 환경관리 비용[2] 및 공업 폐기물의 자원화 비율을 지표로 선정하고 활용하였다.

본 연구는 공간에서 중국의 31개 성·직할시(直轄市)를 연구 대상지로 선정하였다. 중국 환경 생태 환경부에서 2012년에 『대기 환경질 기준(Ambient air quality standards)(2012년)』을 발표하여, 이 시기부터 $PM_{2.5}$, O_3에 대해 측정을 시작하였고, PM_{10}, SO_2, NO_2의 측정 농도 기준치도 조정하였다. 따라서 데이터 수집의 한계로 인해 2005년부터 2015년까지, 11년간의 미세먼지(PM_{10}) 연평균 오염 농도 데이터와 〈표 1〉에 제시한 각 지표 데이터를 수집하여, 대기오염에 영향을 미치는 도시화 수준 평가 요인에 대해 분석하였다. 도시 경제, 에너지, 사회, 교통 및 환경 등 다양한 차원에서 도시화 수준을 측정하고, 도시화 발전의 '질' 및 '양'의 조화 여부를 파악하여, 대기질에 대한 영향 요인을 도출하였다.

3. 분석 방법

1) Grey Relational Analysis

대기 환경의 복잡성, 대기질의 영향 요인의 다양성 및 도시화 발전의 동적 변화로 인해 변수 간의 연관성, 유사성 및 차이점에 대한 측정이 필요하다. GRA(Grey Relational Analysis) 방법은 다 요소의 통계 방법으로 주요 요인과 기준 요인 간의 상호작용을 명확하지 않은 때 사용하는 방법이다(Yang et al., 2008). 관련 연구들을 통해 GRA 방법을 활용하여 영향 요인의 우선순위를 측정할 수 있다.

---

2) 환경 관리 비용=(환경오염의 경제적 손실 + 환경오염 처리 투자 + 화재 손실)/총 GDP.

그러므로 GRA 방법은 도시화가 대기오염에 미치는 영향에 관한 연구 분야에 적용하여, 경제력과 산업구조, 에너지이용 효율, 사회보장과 교육 투자, 도시 공간구조와 대중교통 자원, 도시화 발전 효율 및 폐기물 처리와 환경보호 투자 등 6차원 지표에 대한 도시화 발전 수준 평가지표 데이터를 수집하였다. 이들 지표는 대기오염에 미치는 영향이 다르므로 주요 및 부차적인 영향 지표를 구분할 필요가 있다. GRA의 이론은 사이버네틱스와 정보 이론에 기초하며, 일정한 수학적 계산을 사용하여 변수 간 연관성의 유사성과 차이점을 측정할 수 있다. 이러한 변수 간의 변화를 측정하여, 동적으로 관련된 서로 다른 연구 대상의 특징을 제시할 수 있다(Deng, 1989). GRA 방법에서 계산된 Grey 관련 계수 값의 범위가 [0,1] 사이이다. Grey 관련 계수 값은 0에 가까울수록 관련도(R)가 낮고, 1에 가까울수록 관련도(R)가 높다는 것을 나타냈고 GRA 방법은 측정 요소와 참조 요소 사이의 상관성의 우선순위도 표시할 수 있다(Cai et al., 2020). Grey Relational 분석 절차는 다음과 같다.

(1) 참조 열 및 측정 열

참조 열(Y_j)는 미세먼지(PM_{10})이다. 측정 열(X_{ij})는 도시화 발전 수준 평가지표이다.

$$Y_j(t) = \begin{Bmatrix} y_1(1), y_1(2), \ldots, y_1(n) \\ y_2(1), y_2(2), \ldots, y2(n) \\ \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \\ y_j(1), y_j(2), \ldots, y_j(n) \end{Bmatrix} \qquad X_{ij} = \begin{Bmatrix} x_{11}, x_{12}, \ldots, x_{1j} \\ x_{21}, x_{22}, \ldots, x_{2j} \\ \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \\ x_{i1}, x_{i2}, \ldots, x_{ij} \end{Bmatrix}$$

(2) 자료의 표준화 및 적응 지표 변화

서로 단위가 다른 변수 간의 분석 및 비교를 위해서는 자료의 표준화 과정이 필요하다. 자료 표준화는 초깃값 변환, 평균값 변환, 백분율변환, Z-SCOR 변환, 최대-최솟값을 이용한 스케일 재조정 등 여러 가지 방법이 있다(Yoon, 2012; 이상혁 등, 2015; Li et al., 2012). 본 연구는 지표의

단위에 있어서 차이를 교정하기 위해 지표 값을 0에서 1 사이로 정규화될 수 있는 최대-최솟값을 이용하여, 데이터에 대한 표준화를 실시했다.

$$Y_j = \frac{y_j - y_j\min}{y_j\max - y_j\min} \tag{1}$$

$$\text{Positive data: } X_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{ij}\min}{x_{ij}\max - x_{ij}\min} \tag{2}$$

$$\text{Negative data: } X_{ij} = \frac{x_{ij}\max - x_{ij}}{x_{ij}\max - x_{ij}\min} \tag{3}$$

표준화를 실시하면, 모든 Y_j값 및 지표 X_{ij}값이 [0,1] 사이로 정규화된다.

(3) Grey Relational 연산

Grey Relational 분석은 주로 데이터 열 곡선의 기하학적 형상의 유사도를 비교함으로써 데이터 열 사이의 연계가 밀접한지를 판단하는 방법이다. 데이터 열의 곡선 모양이 비슷할수록 데이터 간의 연관성이 더 커진다. 데이터 계열의 곡선 모양이 유사하지 않은 경우, 해당 데이터 간의 연관성 정도가 작아진다는 것을 판단할 수 있다.

데이터를 표준화한 후 Grey Relational의 연계 수치를 구하는 과정은 다음과 같다. $\triangle_{ij}$는 종속 변수 열 및 독립변수 열의 차이 값이다. γ_{ij}는 Grey Relational 계수이다. 일반적으로 구별계수(ξ) 값을 0.5로 설정한다.

$$\triangle_{ij} = \left| y_j - x_{ij} \right| \tag{4}$$

$$\gamma_{ij} = \frac{\triangle_{\min} + \xi\triangle_{\max}}{\triangle_{ij} + \xi\triangle_{\max}} \tag{5}$$

(4) Grey Relational의 관련도(ρ_{ij}) 연산

$$\rho_{ij} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\gamma_{ij} \quad (6)$$

(5) Grey Relational의 관련도 순서 배정

마지막으로 앞에 (4) 단계에서 도출된 Grey Relational 계수 값을 통해 관련도에 대한 순서를 배정한다. 참조 요소는 측정 요소에 미치는 영향 정도를 보여줄 수 있다.

2) 패널 데이터 회귀모형

Grey Relational 분석 결과에 따라 지역 연도별 미세먼지(PM_{10})에 대한 그레이 관련도가 높은 도시화 평가지표를 이용하여, 대기질 개선에 미치는 영향을 살펴보기 위해 패널 데이터 회귀모형을 활용하였다. 패널(Panel) 데이터는 횡단면 데이터와 시계열 데이터를 합친 것으로, 표본 집단에서 파악할 수 있는 특성들의 변화추이를 시계열적으로 분석하여 집단의 특성을 알 수 있는 동시에 횡단면 자료에서 다루기 어려운 문제들을 다룰 수 있다는 장점이 있다(이희연 등, 2013). 따라서 패널 데이터 회귀분석 식은 다음과 같다.

$$Yit=\alpha_i+\beta_1 Economy\,it+\beta_2 Energy\,it+\beta_3 Social\,it+\beta_4 Transportation\,it$$
$$+\beta_5 Urbanization\,it+\beta_6 Environmental\,it+\mu it \quad (7)$$

$\mu it = ui + \lambda t + \epsilon it$

i (행정지역): 1, 2, 3, ..., N

t (시간): 1, 2, 3, ..., T

α_i: 관찰되지 않은 개체효과 확률적 교란항

μit : 관찰되지 않은 횡단면(행정 지역)효과

λ_t : 관찰되지 않은 시간 효과 확률적 교란항

ϵit : 확률적 교란항

패널 데이터 회귀 분석을 하기 전에 VIF(Variance Inflation Factor) 지수를 활용하여, 각 변수에 대한 다중 공산성 검정을 실시했고, VIF 값이 10보다 큰 변수를 모형에서 제거하였다. 그리고 모형의 적합성을 판단하기 위해 대기오염 데이터의 공간 이분산성, 자기 상관성 및 시계열 상관관계에 대한 몇 가지 검정이 실시했다(Du et al., 2018; Fang et al., 2019; Liu et al., 2020). 본 연구는 Wald 검정 및 Wooldridge 검정을 활용하여, 집단의 이분산성 및 자기 상관성을 교정하였다.

Ⅳ. 연구 결과

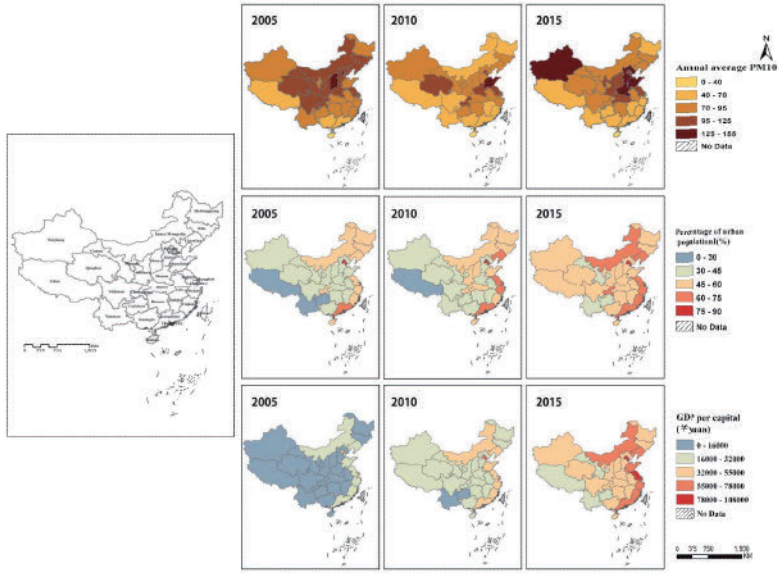
1. 기초 공간 분석

본 연구는 미세먼지(PM_{10}), 인구의 도시화율 및 1인당 GDP에 대한 기초 공간 분석을 수행하였고 분석 결과는 〈그림 3〉에 제시하였다. GIS 프로그램을 이용하여 등급 구간 분류 방법인 자연적 구분 방법(Natural Breaks)으로 5개 등급을 나누어 분석을 수행하여 자연적 구분 방법은 데이터를 자연스러운 등급으로 묶는 분류하는 방법이다. 즉, 같은 등급 내 전체 값들의 평균편차를 최소화하고, 각 등급 간의 분산을 극대화할 수 있다(Jenks, 1967). 색이 옅은 색에서 진해질수록 해당 오염 물질 농도, 인구 도시화 발전 수준 및 경제발전 수준이 낮음에서 높아진다는 것을 의미한다.

중국 지역별 미세먼지(PM_{10}) 연평균 농도, 인구의 도시화 발전 수준 및 경제발전 수준은 뚜렷한 공간 차이가 나타났다. 〈그림 3〉에서 2005년~2015년 미세먼지(PM_{10}) 연평균 농도의 공간적 분포를 살펴보면 초기(2005년)에는 중국 중부 지역 오염 농도가 비교적으로 높은 편이었다. 중부는 석탄자원형 도시가 밀접해 있고 2차 산업이 집중된 지역이다. 선행연구에 따라면 2차 산업은 대기 오염에 크게 기여하는 것으로 실증되었다(Fang et al., 2015; Jiang et al., 2018). 2015년의 미세먼지(PM_{10}) 연평균

농도 높은 지역이 주로 중국 Jing-Jin-Ji(Beijing-Tianjin-Hebei)지역 및 주변 지역이다. 2015년 인구 도시화율 및 1인당 GDP의 높은 지역도 이들 지역에 집중되어있다. 도시 인구 증가와 경제발전은 도시화의 중요한 지표이다. 따라서 도시화 발전 차이로 인한 대기오염 물질이 공간적 차이가 나타났으며, 이 결과는 연구가설 1과 부합하는 결과를 보인다.

〈그림 3〉 기초 공간 분석 결과



2. GRA 분석결과

GRA 분석의 상세한 계산 결과는 〈표 2〉과 같다. Grey 관련 계수 값이 클수록 측정 열과 참고 열의 관련도가 높음을 나타냈다. 구별계수(ξ)의 값이 0.5로 설정되었을 때, Grey 관련 계수 값이 0.6보다 크면 관련도가 높은 것으로 판단할 수 있다(Deng, 1989). 도시 경제력과 산업구조, 에너지이용 효율, 사회보장과 교육투자, 도시 공간구조와 대중교통 자원, 도시화 발전 효율 및 폐기물 처리와 환경보호 투자 등 6가지 차원에서 도시화 발전 수준의 평가지표 및 미세먼지(PM_{10}) 간의 Grey 관련 계수 값을 산출하였고

그 결과 값은 0.6보다 큰 편이다(〈표 2〉). 전체적으로는 미세먼지(PM_{10})가 도시 경제력(0.6696), 사회보장과 교육투자(0.6505), 도시 공간구조와 대중교통 자원(0.6434), 폐기물 처리와 환경보호 투자(0.6334), 에너지이용 효율(0.6289)과 도시화 발전 효율(0.6154)순으로 높은 Grey 관련 계수 값이 나타났다.

도시화 수준 평가지표별로 주로 Grey 관련 계수 값이 0.6보다 큰 지수(〈표 2〉 중 볼드체로 쓰인 Grey 관련 계수 값)를 관찰하였다. 도시 경제력과 산업구조에 포함되는 지표 중 경제 성장비율의 Grey 관련 계수 값이 가장 크고, 첨단 산업이 공업에서 차지하는 비중, 지역 간 경제발전 차이 및 증가한 3차 산업이 GDP에 차지는 비율 순으로 Grey 관련 계수 값이 크게 나타났으나, 1인당 GDP에서 가장 낮은 Grey 관련 계수 값이 나타났다.

에너지이용 효율에서는 에너지 가공 전환율이 가장 높고, GDP 단위당 에너지 소비량과 에너지 생산 탄력성 지수 순으로 높은 Grey 관련 계수 값이 나타났다. 에너지 가공 전환율은 생산 기술의 선진 및 낙후와 관리 수준의 고저를 반영하는 중요한 지표이다. 대기오염과 기후변화는 화석연료의 사용과 밀접한 관련이 있다. 에너지 가공 전환율이 높을수록 자원을 더 잘 절약하고 환경오염도 감소시킬 수 있다.

사회보장과 교육투자 차원에서 보면, 사회 복지 지출이 재정 총지출에서 차지하는 비율이 대기오염 물질의 Grey 관련 계수 값이 가장 크게 나타났고, 실업률 및 사회 부담 계수 순으로 높게 나타났으며, 공공교육 지출이 가장 낮은 값을 보인다. 선행연구에 따라 중국의 급속한 도시화 발전이 도시화의 '질' 및 '양'의 조화를 갖추지 않았기 때문에 여러 문제를 일으켰다. 예를 들어 중국에서는 호적제도로 인해 외래근로자들이 현지지역 주민과 같은 사회적 복지를 누리지 못했다. 따라서 정부는 도시화를 추진하는 과정에서 도시화의 속도를 지나치게 중시하지 말고 도시화의 효율과 질을 더욱 중시해야 한다. 특히 소득 불평등, 공공기반시설 건설 및 주거환경 개선 등을 중시해야 한다. 또한, 공공교육지출을 늘리는 것은 교육받을 수 있는 인구수를 증가시키는 방법이다. 교육받은 인구가 사회적 가치

에 기여하는 것이 단기적으로는 제한적이지만 장기적으로 볼 때, 첨단 산업 종사자 수를 증가시켜 도시의 발전 및 사회진보 측면에서 더 높은 가치를 창출할 수 있다.

도시 공간구조와 대중교통 자원에 포함되는 지표 중 인구 만 명당 버스 수에서 Grey 관련 계수 값이 가장 컸고, 도시 도로 면적, 자가용보유량 순으로 큰 값을 나타냈다. 자가용보유량 및 버스 수량은 자동차 배기가스와 대기오염의 관련성을 반영하였다. 도시화와 교통 발전으로 인해 자가용 차량의 증가는 도시 내 총 주행거리를 증가시키며, 자동차 배기가스 배출량도 많아지고 도심 지역 교통 혼잡 문제를 심화시켰다(Stone, 2008). 이를 해결하기 위해 스마트 교통 시스템을 구축하여, 보행, 자전거 및 대중교통 등 친환경 교통수단을 유도하여, 도시 내부의 교통 혼잡을 줄이고 도시의 대기질 개선에 도움이 될 수 있다.

마지막으로 폐기물 처리와 환경보호 투자에서 환경 관리 비용에서 Grey 관련 계수 값이 가장 크게 나타나고, 공업 폐기물의 자원화 비율, 환경보호를 위한 투자비용이 GDP에서 차지하는 비율 및 생활 쓰레기 친환경적 처리 비율 순으로 높게 나타났으며, 공업 폐기 처리 비율이 가장 낮은 Grey 관련 계수 값을 보였다. 종합적으로 보면 관련도가 높은 지표는 폐기물의 친환경적 처리와 자원화이다. 따라서 폐기물의 재활용이 대기질 개선에 미치는 영향력이 높다는 것을 알 수 있다.

따라서 선정한 도시화 발전 수준 평가지표가 미세먼지(PM_{10}) 농도에 강한 관련성이 있다. 특히, 에너지 가공 전환율, 경제 성장비율 및 첨단 산업 등 주요 지표는 강한 연관성을 보였다. 효율이 높은 도시화 발전, 과학적인 도시 교통 공간 계획, 효과적인 환경관리 및 오염 통제는 도시환경 개선을 중요한 요인으로 다루어져야 하고, 이를 바탕으로 도시의 지속 가능한 발전도 실현할 수 있다.

〈표 2〉 GRA 분석 결과

Primary indicator	PM_{10} R degree	Secondary indicator variable(units)	PM_{10} R degree
Economic strength and Industrial structure 경제력과 산업구조	0.6696	X1: GDP per capita	0.6435
		X2: The share of the Added-value of the tertiary industry in GDP	0.6573
		X3: Citizen Engel's Coefficient	0.6887
		X4: Regional economic disparities	0.64057
		X5: Sustained economic growth	0.6907
		X6: Added value of new and high technologies as a percent of the added value of industrial output	0.6897
		X7: Average per capita income elasticity	0.6768
Energy utilization efficiency 에너지이용 효율	0.6289	X8: Energy consumption per unit of GDP	0.6109
		X9: Energy production elasticity	0.5839
		X10: Energy conversion rate	0.6918
Social security and education expenditure 사회보장과 교육투자	0.6505	X11: Urban Unemployment rate	0.6822
		X12: Number of College students per 10000 population	0.6513
		X13: Number of doctors per 10000 population	0.6809
		X14: Expenditure for a social safety net · in general public expenditure rate	0.6859
		X15: Expenditure for education as a percent of GDP	0.5927
		X16: Urbanization rate and non-agricultural employment ratio	0.6146
		X17: Social burden Coefficient	0.6460
Urban space layout and Public transportation resources 도시 공간구조와 대중 교통자원	0.6434	X18: Number of buses per 1000 population	0.6621
		X19: Urban road area	0.6433
		X20: Number of private cars	0.6249
Urbanization efficiency 도시화 발전 효율	0.6154	X21: Urban per capita living space	0.6319
		X22: Green covered area as %of Completed	0.6038
		X23: Park green areas per capita	0.6306
		X24: Population density	0.5710
		X25: Expenditure for Municipal infrastructure as a percent of GDP	0.6398
Waste Treatment and Environmental protection investment 폐기물 처리와 환경보호 투자	0.6334	X26: Industrial waste gas treatment rate	0.6159
		X27: Life waste harmless treatment rate	0.6287
		X28: Environment quality-related cost	0.6497
		X29: Industrial waste material recycle rate	0.6439
		X30: Total investment in the treatment of environmental pollution as a percent of GDP	0.6287

Note: The distinguishing coefficient is valued to 0.5.

3. 패널 데이터 회귀모형 분석

GRA 계산 결과(〈표 2〉)에 의해 미세먼지(PM_{10}) 농도와 Grey 관련 계수 값이 0.6보다 높은 도시화 수준 평가지표를 선정하여, 패널 데이터 회귀분석을 실시하였다. 다중공선성 검정결과, 전체 변수의 VIF 값이 10보다 작았다. 〈표 3〉에서 이분산성 검정결과를 살펴보면 Wald 검정결과 유의확률(p 값)이 0.01보다 작은 경우 귀무가설을 기각하고 대립 가설을 채택하기 때문에 이분산성이 존재하였다. 또한, Wooldridge 자기 상관성 검정 결과는 유의확률(p 값)이 0.0000으로 나타나서 패널 데이터 회귀모형은 자기 상관성을 갖고 있었다. 또한, Hausman 검정결과는 1%의 유의수준에서 귀무가설을 기각하므로 고정효과모형을 채택하였다. 이에 따라 본 연구는 Pooled OLS보다 더 효율적이고 정확한 Driscoll-Kraay 표준오차 교정방법을 사용한 Two-way Fixed-Effect 추정 모형을 활용하였다(Lian, 2007).

〈표 3〉의 분석 결과에 의해 도시화 발전 수준이 대기질 개선에 미치는 영향에 대해 논의하여, 다음과 같이 결과를 요약하였다. 첫째, 도시 경제력과 산업구조 차원에서 3차 산업 비중이 높아지면 미세먼지(PM_{10})의 농도가 낮아진다는 결과가 나타났다. 먼저, 산업 기술이 진보하면 대기질을 개선하는 데 도움이 된다는 것을 보여준다. 1인당 GDP는 미세먼지(PM_{10}) 농도에 대한 부(-)의 영향을 보인다. 이 결과는 탈동조화(decoupling) 현상과 일치한다(Guo et al., 2018). 우리는 환경에 대한 사회 경제적 활동의 전반적인 영향이 계속 증가하고 있음을 알고 있다. 그러나 장기적인 경제발전, 환경오염 추세 및 이러한 부정적 영향 결과에 따라 경제와 기술 발전은 경제 및 환경 사이에 탈동조화(decoupling) 현상을 일으킨다. 또한, 이 결과는 경제발전이 환경 악화를 초래하지만, 경제가 더욱 높은 수준에 도달하면 1인당 GDP 및 시민이 환경질에 대한 요구가 일정한 수준으로 상승하여, 환경오염 문제가 완화될 것이라는 것을 뜻한다(Selden et al., 1994; Khanna, 2002). 즉, 절대적 탈동조화(decoupling) 현상이 발생하면 경제 활동이 환경에 미치는 누적 영향이 파크치에 도달하여 그 영향이 감소하기 시작하고 경제 성장이 환경에 부정적인 영향이 줄어들 것이다(Tapio, 2005).

둘째, 에너지이용 효율 차원에서 GDP 단위당 에너지 소비량이 많아지면 미세먼지(PM_{10}) 농도도 높아진다는 결과가 선행연구와 일치 한다(Zheng et al., 2020). 중국은 세계에서 에너지 소비가 가장 많은 국가 중 하나이기 때문에 에너지이용 효율을 향상하게 시키는 것은 대기질 개선에 도움이 될 수 있다.

셋째, 사회보장과 교육투자 차원에서 실업률은 미세먼지(PM_{10}) 농도에 대한 정(+)의 영향이 나타났다. 선행연구에 의해 대기오염은 사람의 수명을 단축하게 하고, 호흡기 질환의 발병률도 증가시켜 공공건강에 위협을 주고 있다(Schlenker et al., 2016; Deryugina et al., 2019; Holub et al., 2020).중국 대기질에 관한 연구에 의해 중국 화이허(淮河) 북쪽 지역은 겨울철의 집중적인 석탄 난방 정책으로 인해 총 부유분진(TSPs) 및 미세먼지(PM_{10})의 연평균 오염 농도가 각각 184 $\mu g/m^3$와 47.1 $\mu g/m^3$씩 증가했다. 이로 인해 이 지역 주민들의 기대 수명은 5.5년 및 3.1년이 감소하였다(Chen et al., 2013; Ebenstein et al., 2017). 또한 건강이 인적 자본 발전의 중요한 요소로 건강한 몸은 생산력의 향상으로 이어지며, 경제 성장의 필요한 요소로 확인되었다(Abdullah et al., 2016). 그러나 대기오염은 생산력 저하한 것을 통해 경제 손실을 초래뿐만 아니라 인적 자본 축적도 방해함으로써 추가적인 피해를 주었다. 이러한 부정적인 영향은 나날이 누적되어, 결국 사람들의 고용 상황에 영향을 미쳐 개인 노동 생산성의 하락을 초래한다(Wei et al., 2017). 동시에 고용 공급에 대한 영향을 끼치고 실업률을 높일 수 있다(Li et al., 2014).

본 연구에서 사용한 사회보장 지출 지표는 주로 취업 보조금, 도시 주민 최저 생계 수당 및 자연재해 생활 지원금을 합산한 것이다. 패널 분석 결과에 따라 사회보장 지출은 미세먼지(PM_{10}) 농도에 대한 정(+)의 영향이 나타났다. 이 결과는 대기오염 및 소득 불평등에 관한 연구 결과와 일치하였다. 즉, 날로 심각해지는 대기오염이 확실히 소득 불평등을 심화시켰고 가난한 사람들은 일반 사람들 보다 대기오염의 피해를 받는 경우가 더욱 많았다(Lipfert, 2004; Wu et al., 2020). 또한, 대기오염은 주민의 신체적

건강뿐만 아니라, 주민의 외부활동, 소비와 이동 습관, 업무 효율성과 정신적 및 심리적 건강에도 악영향을 끼칠 수 있다(Zheng et al., 2016). 따라서 도시화 발전은 도시화의 속도에만 초점을 맞추어, 도시화 발전의 '질' 및 '양'이 조화를 고려하지 않았고, 이는 도시에 여러 문제를 일으키는 것을 확인하였다.

넷째, 도시화 발전 효율 차원에서 시가지화 지역 녹지 비율이 미세먼지(PM_{10}) 농도에 대한 부정적 영향을 주었다. 이 결과는 선행연구의 도시 식생은 도시와 대기 환경을 변화시킴으로써, 지역의 대기질 개선에 대한 직간접적인 영향을 줄 수 있는 결과와 일치한다(Xu et al., 2020). 도시 식생은 중요한 도시 기반 시설로써, 도시 생태계를 복원하는 기능이 가지고 있다(Roy et al., 2012). 동시에 도시 식생은 급속한 공업화 및 도시화로 인한 오염을 완화하는 기능이 있고, 특히 도시 미기후 개선, 수토 유실 방지와 열섬효과 완화 등에 중요한 역할도 하고 있다(Zhang et al., 2018). 또한, 도시 식생은 대기오염 물질을 조절하고 차단하는 기능도 있으므로 도시 미세먼지를 줄일 수 있다(Nguyen et al., 2015). 도시녹화는 살기 좋은 도시환경을 만드는 중요한 요수이다(Xu et al., 2020).

마지막으로 폐기물 처리와 환경보호 투자 차원에서 공업 폐기물의 자원화 비율 및 환경보호를 위한 투자비용 증가는 대기질 개선에 정(+)의 영향이 나타났다. 하지만 미세먼지(PM_{10}) 오염 증가는 환경관리 비용 증가를 초래할 수 있다. 따라서 폐기물의 재활용이 쓰레기 매립과 소각으로 인한 2차 오염을 줄이는 데 도움이 된다. 그래서 효과적인 환경 거버넌스와 오염 통제는 도시 대기질을 개선하는 데 단순한 환경 모니터링보다 더 효과적이다.

〈표 3〉 패널 분석 결과

Dependent Variable			PM_{10}		
Analysis Model			(1)	(2)	(3)
Independent Variable	Economic strength and Industrial structure	X1	0.00004	−0.0005	−0.0005***
		X2	−0.3301*	0.2359	0.2359
		X3	−191.3728***	−66.6989	−66.6989**
		X4	0.5652*	−0.3058	0.6767
		X5	0.7921	0.5401	0.5401
		X6	−0.6134	0.0136	0.0136
		X7	−2.3889	−2.1734	−2.1734
	Energy utilization efficiency	X8	3.6553*	15.0275***	15.0275***
		X10	−0.0054	0.1974	0.1974
	Social security and education expenditure	X11	−0.0326	0.0316	0.0316*
		X12	0.0964***	−0.0089	−0.0089
		X13	0.3173	−0.2304	−0.2304
		X14	1.4281***	0.6235	0.6235*
		X16	−0.5906***	0.0100	0.0100
		X17	100.8588***	61.9726**	61.9726
	Urban space layout · and · public transportation resources	X18	2.1254***	0.3058	0.3058
		X19	0.0003	−0.00003	−0.00003
		X20	1.29E−06	2.53E−06	2.53E−06***
	Urbanization efficiency	X21	−0.1571	0.1396	0.1396
		X22	−1.2528***	−0.6319**	−0.6319***
		X23	−0.3205	1.6126	1.6126**
		X25	1.0611	0.4439	0.4439
	Waste treatment and environmental protection investment	X26	0.0063	0.0349	0.0349*
		X27	0.0232	0.0826	0.0826
		X28	714.0715***	441.5111***	441.5111**
		X29	0.0197	−0.3169***	−0.3169***
		X30	−0.2969	−3.9161**	−3.9161***
_cons			117.3336***	66.3827	66.3827
R-squared			0.6080	0.4084	0.4084
Modified wald test			chi2 (31)	1525.01	
			Prob〉chi2	0.0000	
Wooldridge test			F(1, 30)	119.869	
			Prob 〉F	0.0000	

Note1: Significant levels ~p〈0.1* ~p〈0.05** ~p〈0.01***

Note2: Model(1): Pooled OLS; Model(2): Two-way Fixed-effect; Model(3): Two-way Fixed-effect regression with Driscoll-Kraay standard errors

V. 결론

본 연구는 GRA 방법 및 패널 데이터 회귀모형 분석을 활용하여, 중국 31개 성·직할시에 대한 경제력과 산업구조, 에너지이용 효율, 사회보장과 교육투자, 도시 공간구조와 대중교통 자원, 도시화 발전 효율 및 폐기물 처리와 환경보호 투자 등 6개 차원에서 도시화 발전 수준 평가지표가 대기질 개선에 미치는 영향에 관해 연구하였다. 이와 같은 연구 방법은 도시화의 발전 평가지표를 도출하고, 정량적으로는 지표 및 미세먼지(PM_{10}) 농도의 Grey 관련 계수 값 및 우선순위를 탐색하였다.

연구 결과에 따라 다음과 같은 요점을 제시하고자 한다.

- 지표 정의가 명확하지 않고 데이터 수집이 어렵고 관련 정보가 부족한 상황에서 GRA는 효과적이고 편리한 연구 방법이다.
- 각 지표의 변화를 보면, 중국 도시화 발전 속도가 매우 빠르다는 것을 알 수 있다. 그러나 도시화 발전의 '질' 및 '양'이 조화롭지 않다. 도시화 발전 수준의 각 평가지표와 미세먼지(PM_{10})의 농도는 일정한 관련성이 있다. 나아가 도시화 발전 속도 및 질이 조화롭지 않기 때문에 도시화 발전 수준이 대기질에 영향을 미친다는 것을 설명할 수 있다. 따라서 정부가 도시화 발전의 질을 더 중시하여 자원이 효율적으로 이용되고 환경의 질이 개선되어야 한다고 제안한다. 또한, 도시 교통 공간의 효율적 이용이 필요하여, 스마트 교통을 발전시키는 것도 중요하다.
- 지역 도시화 발전 차이로 인해 미세먼지(PM_{10}) 농도의 공간적 차이가 나타나, 연구 가설 1과 부합하는 결과를 확인하였다.
- 본 연구는 GRA 방법 및 패널 데이터 회귀모형 분석 결과를 통해 미세먼지(PM_{10})가 도시 경제력과 산업구조, 사회보장과 교육투자, 도시 공간구조와 대중교통 자원 및 폐기물 처리와 환경보호 투자와 비교적 높은 Grey 관련 계수 값이 나타남을 실증 분석하였다. 또한, 폐기

물 처리와 환경보호 투자가 대기오염 개선에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 보아, 연구 가설 2와 부합하는 결과를 확인하였다.

그러므로 대기오염은 많은 영향 요인을 다루기 때문에 데이터 수집의 제한도 고려한다면, 그 영향 요인의 인과관계를 단일하게 입증할 수 없다. 본 연구는 GRA 방법을 통해 여러 변수의 변화를 고려하여, 도시화 발전 평가지표와 대기오염 물질 사이에 Grey 관련도를 구축했다. 그러나 이러한 관련성은 도시화 발전 수준 및 대기오염 물질 간의 인과관계에 대한 양자 간의 인과관계에 관한 분석의 한계가 있었다.

따라서 추후연구에서는 양자 간의 인과관계에 관한 분석이 필요하다. 이를 위해 기존의 공개된 데이터를 활용하여, 더 효율적인 도시화 발전 평가지표 체계를 모색해야 하고 도시를 관리함으로써 환경을 개선하기 위해서는 도시 계획가와 의사결정자가 도시화 발전의 각 단계에 있어서 우선순위를 이해해야 한다.

또한, 도시화 발전 수준에 대한 정부 차원에서의 관리 감독 및 평가를 제도화할 필요가 있다. 이러한 제도는 도시화 발전의 속도와 질을 조화롭게 할 뿐만 아니라, 경제발전 수준 및 도시화의 발전 수준이 다른 지역과 차별화된 도시화 발전 관리 정책을 실시할 수 있도록 할 수 있다.

▌참고문헌 ▐

강정은·이명진, 2012, "퍼지모형과 GIS를 활용한 기후변화 홍수취약성 평가-서울시 사례를 중심으로," 『한국지리정보학회지』, 15(3), pp.119-136.

이희연·노승철, 2013, 『고급통계분석론』, (제2판), 서울: 문우사.

이상혁·강정은·배현주·윤동근, 2015, "엔트로피 가중치를 활용한 대기오염 취약성 평가: 오존을 중심으로," 『한국지역지리학회지』, 21(4), pp.751-763.

Abdullah, H., M. Azam, and S. K. Zakariya, 2016, "The impact of environmental quality on public health expenditure in Malaysia," *Asia Pacific Journal of Advanced Business and Social Studies*, 2(2), pp.365-379.

Bai, X., P. Shi, and Y. Liu, 2014, "Society: Realizing China's urban dream," *Nature*

News, 509(7499), pp.158-160, DOI: 10.1038/509158a.

Brunekreef, B. and S. T. Holgate, 2002, "Air pollution and health," *The Lancet*, 360 (9341), pp.1233-1242, DOI: 10.1016/S0140-6736(02)11274-8.

Cai, Z., V. Cvetkovic, and J. Page, 2020, "How does ICT expansion drive "smart" urban growth? A case study of Nanjing, China," *Urban Planning*, 5(1), pp.129-139, DOI: 10.17645/up.v5i1.2561.

Chen, Y., A. Ebenstein, M. Greenstone, and H. Li, 2013, "Evidence on the impact of sustained exposure to air pollution on life expectancy from China's Huai River policy," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(32), pp.12936-12941.

Chen, J., C. Zhou, S. Wang, and S. Li, 2018, "Impacts of energy consumption structure, energy intensity, economic growth, urbanization on $PM_{2.5}$ concentrations in countries globally," *Applied Energy*, 230, pp.94-105, DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.08.089.

Cheng, J., S. Dai, and X. Ye, 2016, "Spatiotemporal heterogeneity of industrial pollution in China," *China Economic Review*, 40, pp.179-191, DOI: 10.1016/j.chieco.2016.07.001

Colvile, R. N., E. J. Hutchinson, J. S. Mindell, and R. F. Warren, 2001, "The transport sector as a source of air pollution," *Atmospheric Environment*, 35(9), pp.1537-1565.

Cui, X., C. Fang, H. Liu, and X. Liu, 2019, "Assessing sustainability of urbanization by a coordinated development index for an Urbanization-Resources-Environment complex system: A case study of Jing-Jin-Ji region, China," *Ecological Indicators*, 96, pp.383-391, DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.09.009.

Deng, J. L., 1989, "Introduction to grey system theory," *The Journal of Grey System*, 1(1), pp.1-24.

Deryugina, T., G. Heutel, N. H. Miller, D. Molitor, and J. Rief, 2019, "The mortality and medical costs of air pollution: Evidence from changes in wind direction," *American Economic Review*, 109(12), pp.4178-4219, DOI: 10.1257/aer.20180279.

Deshpande, A. and P. Mishra, 2007, "Urbanization, air pollution and human health," *Journal of Environmental Research and Development*, 1(3), pp.305-317.

Ding, Y., M. Zhang, X. Qian, C. Li, S. Chen, and W. Wang, 2019, "Using the geographical detector technique to explore the impact of socioeconomic factors on $PM_{2.5}$ concentrations in China," *Journal of Cleaner Production*, 211, pp.1480-1490, DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.11.159.

Du, W. and K. Feng, 2013, "Does urbanization cause air pollution? Empirical evidence from emerging economies," *Comparative Economic & Social Systems*, 5, pp.91-99.

Du, Y., T. Sun, J. Peng, K. Fang, Y. Liu, and Y. Yang et al., 2018, "Direct and spillover effects of urbanization on $PM_{2.5}$ concentrations in China's top three urban agglomerations," *Journal of Cleaner Production*, 190, pp.72-83, DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.290.

Du, Y., Q. Wan, H. Liu, H. Liu, K. Kapsar, and J. Peng, 2019, "How does urbanization influence $PM_{2.5}$ concentrations? Perspective of spillover effect of multi-dimensional urbanization impact," *Journal of Cleaner Production*, 220, pp.974-983, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.02.222.

Ebenstein, A., M. Fan, M. Greenstone, G. He, and M. Zhou, 2017, "New evidence on the impact of sustained exposure to air pollution on life expectancy from China's Huai River policy," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(39), pp.10384-10389.

Fang, C. and X. Liu, 2009, "Temporal and spatial differences and imbalance of China's urbanization development during 1950-2006," *Journal of Geographical Sciences*, 19, pp.719-732, DOI: 10.1007/S11442-009-0719-3.

Fang C. L. and D. L. Wang 2011, "Comprehensive measures and improvement of Chinese urbanization development quality," *Geographical Research*, 30(11), pp.1931-1946, DOI: 10.11821/yj2011110001.

Fang, C., X. Guan, S. Lu, M. Zhou, and Y. Deng, 2015, "Input-output efficiency of urban agglomerations in China: An application of data envelopment analysis (DEA)," *Urban Studies*, 50(13), pp.2766-2790, DOI: 10.1177/0042098013477707.

Fang, C. and Z. Wang, 2015, "Quantitative diagnoses and comprehensive evaluations of the rationality of Chinese urban development patterns," *Sustainability*, 7(4), pp.3859-3884, DOI: 10.3390/su7043859.

Fang, D., B. Chen, K. Hubacek, R. Ni, L. Chen, and K. Feng et al., 2019, "Clean air for some: Unintended spillover effects of regional air pollution policies," *Science Advances*, 5(4), eaav4707, DOI: 10.1126/sciadv.aav4707.

Friedmann, J., 2006, "Four theses in the study of China's urbanization," *International Journal of Urban and Regional Research*, 30(2), pp.440-451, DOI: 10.1111/j.1468-2427.2006.00671.x.

Guo, S., M. Chen, and H. Liu, 2018, "Coupling procedure and decoupling analysis of urbanization and resource environment: The study of Beijing," *Geographical*

Research, 37(8), pp.1599-1608, DOI: 10.11821/dlyj201808010.

Han, L., W. Zhou, W. Li, and L. Li, 2014, "Impact of urbanization level on urban air quality: A case of fine particles ($PM_{2.5}$) in Chinese cities," *Environmental Pollution*, 194, pp.163-170, DOI: 10.1016/j.envpol.2014.07.022.

Han, L., W. Zhou, and W. Li, 2015, "City as a major source area of fine particulate ($PM_{2.5}$) in China," *Environmental Pollution*, 206, pp.183-187, DOI: 10.1016/j.envpol.2015.06.038.

Haase, D., B. Güneralp, B. Dahiya, X. Bai, and T. Elmqvist, 2018, Chapter 1: Global urbanization, In T. Elmqvist, X. Bai, N. Frantzeskaki, C. Griffith, D. Maddox, and T. McPhearson et al. (Eds.), *The urban planet: Knowledge towards sustainable cities*, (pp.326-339), Cambridge: Cambridge University Press.

Holub, F., L. Hospido, and U. J. Wagner, 2020, *Urban air pollution and sick leaves: Evidence from social security data*, (Banco de Espana Working Paper No. 2041), Madrid: BANCO DE ESPAÑA.

Jiang, L. and L. Bai, 2018, "Spatio-temporal characteristics of urban air pollutions an d their causal relationships: Evidence from Beijing and its eighboring cities," *Scientific Reports*, 8(1), pp.1-12, DOI: 10.1038/s41598-017-18107-1.

Jin, Q., X., Fang, B. Wen, and A. Shan, 2017, "Spatio-temporal variations of $PM_{2.5}$ emission in China from 2005 to 2014," *Chemosphere*, 183, pp.429-436, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.05.133.

Jenks, G. F., 1967, "The data model concept in statistical mapping," *International Yearbook of Cartography*, 7, pp.186-190.

Kaika, D. and E. Zervas, 2013, "The Environmental Kuznets Curve (EKC) theory—Part A: Concept, causes and the CO_2 emissions case," *Energy Policy*, 62, pp.1392-1402, DOI: 10.1016/j.enpol.2013.07.131.

Kamal-Chaoui, L. and A. Robert, 2009, *Competitive cities and climate change,* (OEC D regional development working papers N° 2), Paris: OECD publishing, R etrieved from http:// forum15.org.il/en/uploaded_files/documents/COMP ETITIVE-CITIES-CLIMATE-CHANGE_U1816.pdf.

Khanna, N., 2002, "The income elasticity of non-point source air pollutants: Revisiting the environmental Kuznets curve," *Economics Letters*, 77(3), pp.387-392, DOI: 10.1016/S0165-1765(02)00153-2.

Kosovac, A., M. Acuto, and T. L. Jones, 2020, "Acknowledging urbanization: A survey of the role of cities in UN frameworks," *Global Policy*, 11(3), pp.293-304, DOI: 10.1111/1758-5899.12783.

Krzyżanowski, M., B. Kuna-Dibbert, and J. Schneider, 2005, *Health effects of transport-related air pollution,* Copenhagen: WHO Regional Office Europe.

Li, Y., Y. Li, Y. Zhou, Y. Shi, and X. Zhu, 2012, "Investigation of a coupling model of coordination between urbanization and the environment," *Journal of Envir onmental Management*, 98, pp.127-133, DOI: 10.1016/j.jenvman.2011.12.025.

Li, Q., J. P. Song, J. H. Zhang, W. Yu, and H. Hu, 2013, "Dynamics in the effect of China's urbanization on air quality," *Acta Scientiae Cirvumstantiae*, 33(9), pp.2402-2411.

Li, B. and T. Li, 2014, "An empirical study of the environmental Kuznets curve for China's air pollution: By GMM model and threshold effect with dynamic panel data," *On Economic Problems*, 4, pp.17-22.

Li, G., C. Fang, S. Wang, and S. Sun, 2016, "The effect of economic growth, urbanization, and industrialization on fine particulate matter ($PM_{2.5}$) concentrations in China," *Environmental Science & Technology*, 50(21), pp.11452-11459, DOI: 10.1021/acs.est.6b02562.

Lin, G., J. Fu, D. Jiang, W. Hu, D. Dong, and Y. Huang et al., 2014, "Spatio-temporal variation of $PM_{2.5}$ concentrations and their relationship with geographic and socioeconomic factors in China," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11(1), pp.173-186, DOI: 10.3390/ijerph110100173.

Lin, X. and D. Wang, 2016, "Spatiotemporal evolution of urban air quality and socioeconomic driving forces in China," *Journal of Geographical Sciences*, 26(11), pp.1533-1549, DOI: 10.1007/s11442-016-1342-8.

Lipfert, F. W., 2004, "Air pollution and poverty: Does the sword cut both ways?," *Journal of Epidemiol and Community Health,* 58(1), pp.2-3, DOI: 10.1136/jech. 58.1.2.

Liu, X., B. Zou, H. Feng, N. Liu, and H. Zhang, 2020, "Anthropogenic factors of $PM_{2.5}$ distributions in China's major urban agglomerations: A spatial-temporal analysis," *Journal of Cleaner Production,* 264, 121709, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121709.

Liu, Y., J. Wu, and D. Yu, 2017, "Characterizing spatiotemporal patterns of air pollution in China: A multiscale landscape approach," *Ecological Indicators*, 76, pp.344-356, DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.01.027.

Lou, C. R., H. Y. Liu, Y. F. Li, and Y. L. Li, 2016, "Socioeconomic drivers of $PM_{2.5}$ in

the accumulation phase of air pollution episodes in the Yangtze River Delta of China," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(10), 928, DOI: 10.3390/ijerph13100928.

Lu, J. G., 2020, "Air pollution: A systematic review of its psychological, economic, and social effects," *Current Opinion in Psychology*, 32 pp.52-65, DOI: 10.1016/j.copsyc.2019.06.024

Luo, J., P. Du, A. Samat, J. Xia, M. Che, and Z. Xue, 2017, "Spatiotemporal pattern of $PM_{2.5}$ concentrations in mainland China and analysis of its influencing factors using geographically weighted regression," *Scientific Reports*, 7(1), pp.1-14.

NBSC, 2006-2016, *China statistical yearbook*, Beijing: China Statistics Press.

_____, 2006-2016, *China statistical yearbook on environment*, Beijing: China Statistics Press.

_____, 2006-2016, *China energy statistical yearbook*, Beijing: China Statistics Press.

Nguyen, T., X. Yu, Z. Zhang, M. Liu, and X. Liu, 2015, "Relationship between types of urban forest and $PM_{2.5}$ capture at three growth stages of leaves," *Journal of Environmental Sciences*, 27, pp.33-411, DOI: 10.1016/j.jes.2014.04.019.

Niu, W. Y., 2012, *Annual report on the development of China's new urbanization 2012*, Beijing: Chian Science Publishing & Media.

Northam, R. M., 1979, *Urban geography*, New York: John Wiley & Sons.

Nowak, D. J., D. E. Crane, and J. C. Stevens, 2006, "Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States," *Urban Forestry & Urban Greening*, 4(3-4), pp.115-123, DOI: 10.1016/j.ufug.2006.01.007.

Park, S. and Y. Lee, 2011, "Regional model of EKC for air pollution: Evidence from the Republic of Korea," *Energy Policy*, 39(10), pp.5840-5849, DOI: 10.1016/j.enpol.2011.06.028.

Press, C. S., 2006-2016, *China city statistical yearbook*, Beijing: Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China.

Roy, S., J. Byrne, and C. Pickering, 2012, "A systematic quantitative review of urban tree benefits, costs, and assessment methods across cities in different climatic zones," *Urban Forestry & Urban Greening*, 11(4), pp.351-363, DOI: 10.1016/j.ufug.2012.06.006.

Schlenker, W. and W. R. Walker, 2016, "Airports, air pollution, and contemporaneous health," *The Review of Economic Studies*, 83(2), pp.768-809, DOI: 10.1093/restud/rdv043.

Selden, T. M. and D. Song, 1994, "Environmental quality and development: Is there a

Kuznets curve for air pollution emissions?," *Journal of Environmental Economics and Management*, 27(2), pp.147-162.

Shen, K., G. Jin, and X. Fang, 2017, "Does environmental regulation cause pollution to transfer nearby?," *Journal of Economic Research*, 52, pp.44-59.

Stone Jr, B., 2008, "Urban sprawl and air quality in large US cities," *Journal of Environmental Management*, 86(4), pp.688-698, DOI: 10.1016/j.jenvman.2006.12.034.

Sun, H., X. Y. Hu, and F. F. Nie, 2019, "Spatio-temporal evolution and socio-economic drivers of primary air pollutants from energy consumption in the Yangtze River Delta," *Chinese Journal of Environmental Management*, 11(4), pp.71-78, DOI: 10.16868/j.cnki.1674-6252.2019.04.071.

Tapio, P., 2005, "Towards a theory of decoupling: Degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001," *Transport Policy*, 12(2), pp.137-151, DOI: 10.1016/j.tranpol.2005.01.001.

Van Donkelaar, A., R. V. Martin, M. Brauer, N. C. Hsu, R. A. Kahn, and R. C. Levy et al., 2016, "Global estimates of fine particulate matter using a combined geophysical-statistical method with information from satellites, models, and monitors," *Environmental Science & Technology*, 50(7), pp.3762-3772, DOI: 10.1021/acs.est.5b05833.

Wang, S., C. Zhou, Z. Wang, K. Feng, and K. Hubacek, 2017, "The characteristics and drivers of fine particulate matter ($PM_{2.5}$) distribution in China," *Journal of Cleaner Production*, 142, pp.1800-1809, DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.11.104.

Wang, S., S. Gao S. Li, and K. Feng, 2020, "Strategizing the relation between urbanization and air pollution: Empirical evidence from global countries," *Journal of Cleaner Production*, 243, 118615, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118615.

Wei, X. H., T. Lin, N. Zhang, and H. Y. Liu, 2017, 'The pain that people cannot breathe: Effects of air pollution on individual productivity-micro evidence from Chinese professional soccer players," *Journal of Finance and Economics*, 43(07), pp.4-19, DOI: 10.16538/j.cnki.jfe.2017.07.001.

Wu, J., H. Zheng, F. Zhe, W. Xie, and J. Song, 2018, "Study on the relationship between urbanization and fine particulate matter ($PM_{2.5}$) concentration and its implication in China," *Journal of Cleaner Production*, 182, pp.872-882, DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.060.

Wu, J. and Y. Pu, 2020, "Air pollution, general government public-health expenditures and income inequality: Empirical analysis based on the spatial Durbin model," *PloS One*, 15(10), pp.1-24, DOI: 10.1371/journal.

pone.0240053.

Xu, X. Q., Y. X. Zhou, and Y. M. Ning, 2009, Chapter 4: Urbanization theory, In X. Q. Xu, Y. X. Zhou, and Y. M. Ning (Eds.), *Urban geography*, (2th Ed.), (pp.54-82), Beijing: Higher Education Press.

Xu, C., L. Dong, C. Yu, Y. Zhang, and B. Cheng, 2020, "Can forest city construction affect urban air quality? The evidence from the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration of China," *Journal of Cleaner Production*, 264, 121607, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121607.

Yandle, B., M. Vijayaraghavan, and M. Bhattarai, 2002, *The environmental Kuznets curve: A primer*, (PERC Research Study 02-01), Bozeman, MT: PERC.

Yang, F., G. Zeng, C. Du, L. Tang, J. Zhou, and Z. Li, 2008, "Spatial analyzing system for urban land-use management based on GIS and multi-criteria assessment modeling," *Progress in Natural Science*, 18(10), pp.1279-1284, DOI: 10.1016/j.pnsc.2008.05.007.

Yoon, D. K., 2012, "Assessment of social vulnerability to natural disasters: A comparative study," *Natural Hazards*, 63(2), pp.823-843, DOI: 10.1007/s11069-012-0189-2.

Zang, X., T. Zhao, J. Wang, and F. Guo, 2017, "The effects of urbanization and household-related factors on residential direct CO_2 emissions in Shanxi, China from 1995 to 2014: A decomposition analysis," *Atmospheric Pollution Research*, 8(2), pp.297-309, DOI: 10.1016/j.apr.2016.10.001.

Zanobetti, A. and J. Schwartz, 2000, "Race, gender, and social status as modifiers of the effects of PM_{10} on mortality," *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 42(5), pp.469-474, DOI: 10.1097/00043764-200005000-00002.

Zhang, Y. J., X. F. Li, and B. D. Cheng, 2018, "Review on research progress of forest cities in China (in Chinese)," *Forestry Economics*, 40(9), pp.92-96.

Zhang, F., N. Xu, L. Wang, and Q. Tan, 2020, "The effect of air pollution on the healthy growth of cities: An empirical study of the Beijing-Tianjin-Hebei region," *Applied Sciences*, 10(11), 3699, DOI: 10.3390/app10113699.

Zheng, S. Q., X. M. Zhang, Z. D. Song, and C. Sun, 2016, "Influence of air pollution on urban residents' outdoor activity: Empirical study based on dining-out data from the dianping website," *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 56(1), pp.89-96, DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2016.23.018.

Zheng, W. and P. P. Walsh, 2019, "Economic growth, urbanization and energy consumption—A provincial level analysis of China," *Energy Economics*, 80,

pp.153-162, DOI: 10.1016/j.eneco.2019.01.004.

Zheng, L. and M. Na, 2020, "A pollution paradox? The political economy of environmental inspection and air pollution in China," *Energy Research & Social Science*, 70, 101773, DOI: 10.1016/j.erss.2020.101773.

Lian, Y. J., 2007, "Estimation with STATA [EB/OL]," https://wendang.xuehi.cn/doc/8ce0e7ecf8c75fbfc77db2fa.html, [2020.1.16]

리멍잉: 부산대학교 도시공학 석사학위를 취득하고 현재 부산대학교 도시공학과 박사과정을 수료하였다. 주요 관심 분야는 대기오염, 기후변화, 도시 지속 가능성 등이다 (limengying@pusan.ac.kr).

정주철: The University of Texas at Austin에서 도시 및 지역계획 박사학위를 취득하였으며, 현재 부산대학교 도시공학과 교수로 재직 중이다. 주요 관심 분야는 토지이용계획, 환경계획 및 정책, 스마트 성장관리정책 등이다(jcjung@pusan.ac.kr).

투 고 일: 2021년 03월 30일
심 사 일: 2021년 04월 19일
게재확정일: 2021년 07월 03일