연구논문 「환경정책」 제34권 제3호 2026. 9: 279-306
DOI http://dx.doi.org/10.15301/jepa.2026.34.3.279
pISSN 1598-835X eISSN 2714-0601

대기관리권역 지정 확대의 성과 평가:
사업장 배출 반응, 지역 총배출량 및 대기질의 비교를 중심으로*

Evaluating the Expansion of Air Quality Management Zones: Facility Emissions, Area-Wide Emissions, and Local Air Quality

최현태**
Hyuntae Choi

요약: 본 연구는 2020년 대기관리권역 지정 확대의 성과를 사업장 배출, 지역 총배출량 및 지역 대기질의 세 수준에서 평가하였다. 국가 도시대기측정망 자료와 굴뚝자동측정 사업장 자료, 국가 대기오염물질 배출량 자료를 활용하여 신규 지정지역과 미지정지역을 비교하는 사건연구모형(event-study model)을 추정하였다. 신규 지정지역의 굴뚝자동측정 사업장에서는 2021~2022년 NOx 배출이 미지정지역 사업장보다 비례적으로 감소하였다. 그러나 이러한 반응은 시군구 단위의 배출지표에서는 재현되지 않았다. 시군구별 사업장 배출 합계와 도로이동오염원 및 지역 총 NOx의 사후기간 평균 변화는 신규 지정지역과 미지정지역 사이에서 통계적으로 구분되지 않았다. PM2.5와 NO2는 신규 지정지역에서 상대적으로 낮아지는 방향을 보였으나, 감소폭이 2024년까지 유지되거나 확대되지는 않았다. PM10은 정책 이전부터 두 집단의 추세가 달라 사후 변화의 해석에 제약이 있었다. SO2는 신규 지정지역에서 상대적으로 감소했지만, 사전 추세와 주요 항만지역의 영향을 고려하면 권역 지정 확대의 성과로 판단하기 어려웠다. 이러한 대비는 동일한 권역 확대라도 사업장 배출, 지역 총배출량 및 대기질 가운데 무엇을 기준으로 삼느냐에 따라 성과에 대한 판단이 달라질 수 있음을 보여준다. 따라서 장소 기반 환경정책을 평가할 때에는 규제대상의 반응, 지역 총배출량 및 지역 대기질을 수준별로 구분하고, 각 수준에서 지정지역과 미지정지역의 변화를 비교할 필요가 있다.
핵심주제어: 대기관리권역, 장소기반 정책평가, 사업장 배출, 지역 총배출량, 지역 대기질

Abstract: This study evaluates the 2020 expansion of Korea's Air Quality Management Zones by examining performance at three levels: emissions from monitored facilities, area-wide emissions, and local air quality. Drawing on national ambient air-quality monitoring, continuous emissions monitoring at industrial facilities, and the national emissions inventory, we estimate event-study models that compare newly designated municipalities with municipalities that remained outside the zones. NOx emissions at monitored facilities in newly designated municipalities fell relative to their counterparts outside the zones in 2021 and 2022. This relative decline, however, was not evident when facility emissions were aggregated at the municipal level. Average post-expansion changes in municipality-level facility emissions, on-road NOx, and area-wide NOx were statistically indistinguishable between the two groups. Event-study estimates for PM2.5 and NO2 were

* 본 연구는 연구재단의 지원(과제번호: RS-2025-02312954, 과학기술정보통신부 재원)을 받아 수행됨.
** 전북대학교 학술연구교수 및 한국과학기술원 박사후 연구원

negative during the early post-expansion years, but the differences did not persist or widen through 2024. PM10 was difficult to interpret because the groups followed different trends before the expansion. SO2 declined relative to the comparison group, but the result was sensitive to pre-existing trends and the inclusion of major port areas. Taken together, the findings show that conclusions about the expansion depend on whether performance is assessed at regulated facilities, across all local emission sources, or in ambient air. Evaluations of place-based environmental policies should distinguish among these outcomes and benchmark changes in designated areas against contemporaneous changes outside the policy boundary.

Key Words: Air Quality Management Zones, Place-Based Policy Evaluation, Facility Emissions, Area-Wide Emissions, Local Air Quality

I. 서론

수도권에서는 2005년부터 권역 단위의 대기환경 관리가 시행되었고, 2007년에는 일정 규모 이상의 사업장에 배출허용총량제가 도입되었다. 정부는 이 체계를 비수도권의 주요 배출지역으로 넓히기 위해 2019년 「대기관리권역의 대기환경개선에 관한 특별법」을 제정하여 이듬해 4월부터 시행하였다. 이에 따라 중부권, 남부권과 동남권의 대상 지역이 대기관리권역으로 일괄 지정되었다.[1] 신규 지정지역에는 사업장 배출허용총량제와 자동차 배출가스 관리, 친환경보일러 보급, 노후 건설기계 관리가 함께 적용되었다. 이로써 수도권에 한정되었던 권역 관리가 비수도권의 주요 배출지역과 여러 배출원으로 확대되었다.

권역 확대의 성과를 평가하기 어려운 이유는 2020년의 개편이 하나의 정책수단을 새로운 지역에 적용한 조치가 아니기 때문이다. 사업장 배출허용총량제는 일정 규모 이상의 사업장을 직접 규제하고, 2020년의 적응기간을 거쳐 감축 부담을 높이도록 설계되었다(환경부, 2020). 자동차와 보일러, 건설기계 대책은 대상과 집행방식이 다르며 지방정부의 예산과 집행 여건에도

1) 중부권은 대전과 세종 전역 및 충북, 충남, 전북 일부 지역, 남부권은 광주 전역과 전남 일부 지역, 동남권은 부산, 대구, 울산 전역과 경북, 경남 일부 지역으로 구성된다. 본 연구는 2020년 시행 당시 시행령 별표 1을 기준으로 신규 지정지역을 정의하였다. 군위군의 대구 편입에 따른 2023년 개정은 신규 지정으로 보지 않았다.

영향을 받는다. 조기폐차와 저공해자동차 보급처럼 전국적으로 시행된 사업과 겹치는 수단도 있다. 이처럼 성격이 다른 정책이 동시에 시행되면 지정지역의 대기질 변화만으로 어떤 수단에서 반응이 나타났는지 알기 어렵고, 전국적으로 진행된 변화와 권역 확대 이후의 변화도 구분하기 어렵다. 따라서 미지정지역과의 차이를 확인하는 동시에 사업장 배출, 지역 총배출량과 대기질을 나누어 평가해야 한다.

해외 선행연구는 규제지역을 비규제지역과 비교하여 지역 지정의 효과를 분석해 왔다. 미국에서는 대기환경기준 미달지역 지정이 오염배출과 산업활동을 변화시키고, 그에 따른 대기질 개선이 주택가격에도 반영된 것으로 나타났다(Chay and Greenstone, 2005; Greenstone, 2002). 중국의 중점관리지역에서도 규제 강화 이후 오염배출과 배출집약도가 감소하였다(Niu, Chen, Zhang and Feng, 2023). 국내 연구는 수도권 대기환경관리계획과 경유차 저감사업, 사업장 배출허용기준, 미세먼지 대책 등 개별 정책수단을 주로 평가하였으나(노상환, 2020; 정상우·김난영, 2021; 한혁·정창훈·금현섭·김용표, 2017; 황인창, 2018), 정책수단과 오염물질에 따라 결론이 엇갈렸고 개별 정책의 효과를 구분한 평가가 충분하지 않다는 지적도 제기되었다(여민주·정창훈·김용표, 2025). 대기관리권역의 형성과 확대를 설명한 제도 연구는 있지만(임충묵·임재빈, 2026), 2020년 확대 이후의 변화를 미지정지역과 비교하면서 사업장 배출부터 지역 대기질까지 함께 분석한 연구는 드물다.

대기질은 권역 전체의 환경상태를 나타내지만 개별 정책수단의 반응을 직접 보여주는 지표는 아니다. 오염물질 농도에는 해당 지역의 배출뿐 아니라 다른 지역에서 이동해 온 오염물질과 기상조건이 함께 영향을 미친다. PM2.5 변화에서 지역 내부 요인과 도시 간 이동의 중요성은 지역마다 달랐고(Seo et al., 2025), 2019년과 2020년 사이에는 계절관리제와 국외 배출 변화, 코로나19의 영향이 겹쳤다(Seo et al., 2026). 배출량이 줄더라도 대기화학 반응에 따라 농도가 같은 비율로 낮아지지 않을 수도 있다(Pendergrass et al., 2025). 그러므로 대기질 변화의 원인을 논하기에 앞서 규제대상과 지역 전체의 배출량에서 신규 지정지역과 미지정지역의 차이가 나타났는지 확인

할 필요가 있다.

이 연구는 2020년 권역 확대 이후 신규 지정지역이 미지정지역과 다른 변화를 보였는지, 그 차이가 사업장 배출과 지역 총배출량, 대기질 가운데 어디에서 나타났는지를 분석한다. 국가 도시대기측정망과 굴뚝자동측정 사업장 자료, 국가 대기오염물질 배출량 자료에 동일한 지역 비교를 적용하였다. 신규 지정지역과 계속 미지정 상태였던 지역의 연도별 변화는 사건연구모형(event-study model)으로 추정하였다. 세 자료가 모두 관찰되는 시군구에서 결과를 다시 추정하고, 평행추세 가정과 비교집단 구성에 따른 민감도도 확인하였다.

분석 결과, 신규 지정지역과 미지정지역의 차이는 사업장 수준에서 제한적으로 나타났다. 굴뚝자동측정 사업장의 NOx 배출은 신규 지정지역에서 2021년과 2022년에 더 큰 폭으로 감소했지만, 이 차이는 이후까지 이어지지 않았다. 지역 단위에서는 배출 인벤토리에 포착된 도로이동오염원 NOx와 모든 배출원을 합한 총 NOx의 사후기간 평균이 두 집단 사이에서 뚜렷하게 다르지 않았다. PM2.5와 NO2에서도 신규 지정지역이 지속적으로 더 개선된 양상은 확인되지 않았다. 지역 총 NOx에서부터 두 집단의 차이가 나타나지 않았으므로, 이 대기질 결과를 배출감축이 농도 개선으로 이어지지 않은 경우로 해석할 근거도 없었다. PM10은 정책 이전 추세가 달랐고, SO2 감소는 기존 추세와 주요 항만지역의 포함 여부에 따라 달라져 권역 확대의 성과로 판단하기 어려웠다. 세 자료의 표본을 일치시켜도 사업장과 지역 수준 사이의 대비는 유지되었다.

본 연구는 2020년 권역 확대를 평가대상으로 삼아 사업장 배출, 지역 총배출량과 대기질에 동일한 지역 비교를 적용하고, 규제대상의 반응과 권역 전체의 성과를 구분했다는 점에서 학문적 의의를 지닌다. 장소 기반 환경정책을 평가할 때에는 지정지역의 개선을 비교지역의 변화와 대조하고, 규제대상과 지역 배출량, 대기질에 맞는 성과지표를 각각 마련할 필요가 있다.

II. 제도적 배경과 정책성과의 측정

1. 대기관리권역의 확대와 정책수단

본 연구는 2020년 4월 중부권, 남부권과 동남권에 새로 편입된 시군구를 처치집단으로 정의한다. 비교집단은 분석기간 동안 대기관리권역으로 지정되지 않은 시군구이다. 수도권은 2020년 이전부터 권역 관리가 시행되었으므로 분석대상에서 제외한다. 따라서 분석대상은 기존 수도권 제도가 아니라 2020년 비수도권 권역 확대이며, 정책 전후의 변화가 두 집단 사이에서 어떻게 달랐는지를 평가한다.

대기관리권역 지정은 하나의 규제를 적용하는 제도가 아니라 여러 배출원을 권역 단위로 관리하는 체계이다. 환경부는 5년마다 권역별 대기환경관리 기본계획을 수립하고, 시도는 이를 바탕으로 시행계획을 마련한다. 사업장에는 배출허용총량제가 적용되며, 자동차 부문에는 제작차와 운행차의 배출가스 관리, 노후차의 저공해조치와 운행관리가 포함된다. 생활오염원과 비도로이동오염원에 대해서는 친환경보일러 보급과 노후 건설기계 관리 등이 시행된다. 각 수단은 규제대상과 집행방식이 다르지만 권역별 계획 안에서 함께 운영된다.

이 가운데 권역 지정과 가장 직접적으로 연결된 수단은 사업장 배출허용총량제이다. 확대권역의 총량관리 대상은 799개 사업장이었으며, 각 사업장은 NOx, SOx와 먼지의 연도별 배출허용총량을 할당받았다. 할당량은 잠정할당과 이의신청을 거쳐 확정되었고, 할당량을 초과하려는 사업장은 배출권 거래로 부족분을 확보해야 했다. 2020년에는 제도 적응을 고려하여 2019년 배출량과 유사한 수준을 할당하고, 이후 2024년까지 감축 부담을 높이도록 설계하였다(환경부, 2020). 반면 자동차와 생활 부문의 수단은 전국 단위 사업, 지방정부의 조례와 예산, 권역별 시행계획이 결합되어 집행된다. 2020년 4월의 법정 지정은 권역정책의 적용이 시작된 공통 시점을 나타내지만, 개별 정책수단의 시행시점과 강도까지 같았음을 의미하지는 않는다.

2. 제도 적용과 정책성과의 관찰 범위

법정 지정은 정책의 적용범위를 정하지만 실제 규제강도는 정책수단의 구체적인 설정에 따라 달라진다. Hall(1993)은 정책목표와 정책수단, 수단의 구체적인 설정을 구분하였고, Cashore and Howlett(2007)은 같은 정책수단도 설정값에 따라 강도가 달라질 수 있다고 설명하였다. 사업장 총량관리의 강도는 할당량과 연도별 감축 부담에 따라 달라진다. 자동차와 생활 부문 정책의 실질적 강도는 지원 규모와 적용대상, 지방정부의 시행방식에 따라 결정된다. 따라서 같은 권역에 지정된 지역이라도 실제 정책강도는 같지 않을 수 있다.

정책수단이 계획대로 시행되고 규제대상의 행동을 변화시키는 데에는 집행조건도 중요하다. Winter and May(2001)는 규제대상의 이행 역량과 동기, 정부의 점검과 집행이 환경규제 순응을 좌우한다고 설명하였다. 국내에서도 지방정부의 현장 실사와 청렴도가 사업장의 규제 순응과 관련되고(박성운·이응균, 2020), 단속 권한과 규제 강화에 따라 점검, 적발 및 처분 성과가 달라지는 것으로 나타났다(심은수·박순애, 2025). 대기관리권역의 실제 성과는 법정 지정만으로 결정되지 않으며, 정책수단의 설정과 지역별 집행, 규제대상의 반응이 함께 작용한다.

정책의 강도와 집행이 지역마다 다를 수 있으므로 권역 확대의 성과를 하나의 지표로 판단하기 어렵다. 사업장 배출은 직접 규제를 받은 대상의 반응을 나타낸다. 지역 총배출량은 사업장뿐 아니라 자동차, 생활오염원과 비도로이동오염원을 합산하므로, 특정 규제대상의 반응을 넘어 권역 전체의 배출 변화가 미지정지역의 배출 변화와 달랐는지를 판단하는 지표가 된다. 지역 대기질은 권역의 환경상태를 나타내지만 도시 간 오염물질 이동과 기상조건의 영향을 받고(Seo et al., 2025), 배출량과 농도의 관계도 대기화학적 조건에 따라 달라진다(Pendergrass et al., 2025). 본 연구는 관찰 범위가 다른 세 지표에 동일한 지역 비교를 적용하여, 권역 확대 이후 신규 지정지역과 미지정지역의 변화가 각각 어떻게 달랐는지를 분석한다.

Ⅲ. 자료와 연구설계

1. 분석대상과 대기질 자료

지역 대기질은 $PM_{2.5}$, PM_{10}, NO_2와 SO_2의 시군구별 연평균 농도로 측정한다. $PM_{2.5}$와 PM_{10}은 권역별 기본계획이 개선목표로 설정한 대표적인 오염물질이다. NO_2와 SO_2는 총량관리 대상인 NOx와 SOx에 대응하는 대기 중 농도지표이지만, 배출량의 변화가 농도에 그대로 반영되는 것은 아니다. 특히 NOx 배출과 $PM_{2.5}$ 농도의 관계는 대기화학적 조건에 따라 달라질 수 있으므로 (Pendergrass et al., 2025), 본 연구는 배출량과 대기질을 구분하여 분석한다.

분석대상은 2020년에 대기관리권역으로 새로 지정된 시군구와 분석기간 동안 미지정 상태였던 시군구이다. 기존 수도권과 제주도는 제외하며, 일부 지역만 지정된 옹진군과 법령상 제외지역인 군위군도 표본에 포함하지 않는다. 측정자료가 2018년 이전부터 존재하고 2016년부터 2024년까지 9개 연도 가운데 8개 연도 이상 관측된 시군구만 사용한다. 이에 따라 $PM_{2.5}$ 분석에는 신규 지정지역 63개와 미지정지역 18개가 포함된다. PM_{10}과 NO_2의 표본은 신규 지정지역 66개와 미지정지역 19개이며, SO_2는 각각 64개와 19개이다(〈표 1〉).

〈표 1〉 오염물질별 대기질 분석표본

오염물질	신규 지정지역수	미지정지역수	전체	분석기간
$PM_{2.5}$	63	18	81	2016~2024년
PM_{10}	66	19	85	2016~2024년
NO_2	66	19	85	2016~2024년
SO_2	64	19	83	2016~2024년

주: 2018년 이전부터 관측되고 전체 9개 연도 가운데 8개 연도 이상 자료가 있는 시군구를 사용함
자료: 한국환경공단 국가 도시대기측정망 월별 확정자료를 바탕으로 저자 작성

대기질 자료는 한국환경공단이 공개하는 국가 도시대기측정망의 월별 확정자료이다. 2016년 1월부터 2024년 12월까지 108개월의 월보에서 측정소별 월평균 농도를 추출하였다. 측정소 식별정보가 연도별로 일관되지 않아 개별 측정소를 장기간 연결한 패널을 구성하기 어려우므로, 측정자료를 시

군구 단위로 집계하여 분석하였다.[2] 같은 시군구에 여러 측정소가 있는 경우에는 측정소별 월평균 농도를 평균하여 해당 시군구의 월별 농도를 산출한 뒤, 월별 농도가 한 해에 9개월 이상 관측된 경우에만 연평균을 계산하여 각 시군구의 연도별 관측값을 구성하였다.

2. 처치 정의와 추정전략

사업장별 할당량의 감축률이나 자동차 대책의 지역별 집행실적을 이용하면 지역별 정책강도의 차이를 분석할 수도 있다. 그러나 관련 자료가 분석대상 전체에 대해 일관된 형태로 공개되어 있지 않으므로, 본 연구는 2020년의 법정 지정 여부를 처치로 사용한다. 법정 지정은 해당 시군구가 사업장 총량관리와 자동차 및 생활오염원 대책을 포함한 권역 관리체계에 새로 편입되었는지를 모든 지역에서 동일하게 확인할 수 있는 기준이다. 따라서 추정결과는 개별 정책수단의 강도에 따른 효과가 아니라 권역 지정과 함께 적용된 정책묶음의 평균적인 성과를 나타낸다.[3]

이와 같이 정의한 처치는 2020년 4월 모든 신규 지정지역에 동시에 적용되었다. 이에 단일 코호트 사건연구모형(event-study model)을 사용하여 두 집단의 정책 전후 평균 차이와 연도별 변화, 정책 이전의 변화경로를 함께 비교한다. 지역마다 도입 시점이 다른 사건연구에서 문제가 되는 가중치의 왜곡도 발생하지 않는다. 대기질 변화의 추정식은 다음과 같다.

$$Y = \alpha_i + \lambda_t + \sum_{k \neq 2019} \beta_k \left\{ Treated_i I(t = k) \right\} + X\gamma + \epsilon \qquad (1)$$

식 (1)에서 Y는 시군구 i의 t년 평균 오염농도이고, $Treated_i$는 신규 지정

2) 측정소의 신설과 확장이 연평균 농도에 미치는 영향을 확인하기 위해 유효자료획득률이 75% 이상인 관측만 사용한 분석과 측정소 수의 변화가 작은 시군구만 사용한 분석을 함께 실시하였다.

3) 지역별 배출원 구성과 상시측정 사업장의 포괄범위는 정책강도의 대리변수로 사용하지 않고, 성과 차이와 관련된 지역적 조건으로 별도 분석하였다.

지역이면 1, 미지정지역이면 0의 값을 갖는다. 기준연도는 법 시행 직전인 2019년이며, β_k는 각 연도에 나타난 두 집단의 농도 변화 차이를 나타낸다. 시군구 고정효과 α_i는 시간에 따라 변하지 않는 지역 특성을, 연도 고정효과 λ_t는 전국의 공통 변화와 연도별 충격을 통제한다. 기상조건을 통제하는 모형에는 연평균기온, 강수량과 평균풍속을 X에 포함한다.

식 (1)의 계수를 권역 확대의 효과로 해석하려면, 권역 확대가 없었더라면 두 집단의 대기질이 비슷한 경로로 변했을 것이라는 평행추세 가정이 필요하다. 대기관리권역은 산업시설과 발전시설이 밀집하고 오염물질 배출이 많은 지역을 중심으로 지정되었기 때문에, 지정 이전부터 진행된 오염 감소나 평균회귀가 정책 이후의 변화로 나타날 수 있다. 이를 점검하기 위해 2016년부터 2018년까지의 사건연구 계수를 확인하고 공동 Wald 검정을 실시한다. 사전계수의 공동검정이 기각된 결과는 인과효과로 해석하지 않고 두 집단 사이의 기술적 차이로 제시한다.

공동검정만으로 평행추세 가정의 타당성을 판단하기는 어렵다. 사전추세 검정은 결과에 의미 있는 편의를 일으키는 추세 차이를 충분히 찾아내지 못할 수 있고, 검정 결과에 따라 분석사양을 선택하면 추정치가 왜곡될 수 있기 때문이다(Roth, 2022). 이에 사전검정이 어느 정도의 추세 차이를 식별할 수 있는지 검정력을 진단하고, 일정한 평행추세 위반을 허용한 경우에도 결론이 유지되는 범위를 확인한다(Rambachan and Roth, 2023). 신뢰구간과 최소검출효과도 함께 제시하여 자료로 판별할 수 있는 변화의 크기를 밝힌다.

평행추세와 함께 기준연도와 정책 시행 초기의 해석에도 주의가 필요하다. 법률은 2019년 4월 제정되었고 권역 설정안도 같은 해 공개되었으므로, 2019년 자료에는 정책 시행을 예상한 반응이 포함되었을 수 있다. 이에 2018년을 기준연도로 바꾼 분석을 함께 제시한다. 2020년에는 법 시행 이전인 1월부터 3월까지의 관측치가 포함되며, 배출허용총량을 확정하는 절차도 하반기까지 이어졌다. 손규원 등(2020)과 Seo et al.(2026)은 같은 시기의 대기질 변화에 계절관리제, 국외 배출 변화와 코로나19의 영향이 함께 작용한 것으로 분석하였다. 따라서 정책 시행 이후의 변화는 2021년부터 나타난 계수

의 방향과 지속성을 중심으로 판단한다.

비교집단의 적절성은 대기오염의 공간적 이동과도 관련된다. 국내 $PM_{2.5}$ 변화에서 지역 내부 요인과 도시 간 이동의 중요성이 지역마다 다르다는 점을 고려하면(Seo et al., 2025), 신규 지정지역과 맞닿은 미지정지역도 권역 내부의 배출변화에 영향을 받을 수 있다. 이를 확인하기 위해 미지정지역을 신규 지정지역과 경계를 공유하는 지역과 그렇지 않은 지역으로 나누어 비교한다. 인접 시군구 가운데 신규 지정지역이 차지하는 비율과 개수를 이용한 연속형 노출모형도 추정한다. 이 분석은 행정경계를 기준으로 구성한 비교집단에 따라 결과가 달라지는지를 확인하기 위한 것이다.

행정경계에 따라 정한 비교집단에만 의존하지 않도록 합성 이중차분법(synthetic difference-in-differences)도 적용한다(Arkhangelsky, Athey, Hirshberg, Imbens and Wager, 2021). 미지정지역의 정책 이전 경로가 신규 지정지역과 유사해지도록 지역과 연도에 가중치를 부여하고, $PM_{2.5}$와 NO_2의 2021년부터 2024년까지 평균효과를 추정한다. 2020년을 포함한 결과도 함께 제시하고, 가중치가 일부 비교지역에 집중되는지는 유효 대조지역 수와 최대 가중치로 확인한다.

마지막으로 광역시 전역에 동일한 처치가 부여되는 구조를 추론에 반영한다. 주 결과의 표준오차는 시군구 수준에서 군집화하되, 시도 수준의 추론도 병행한다. 시도 수가 14개로 적은 점을 감안해 Webb 가중 wild cluster bootstrap을 적용한다(Webb, 2023).[4] 같은 추론방식은 사업장과 배출량 분석의 주요 결과에도 적용한다. 통계적으로 유의하지 않은 결과는 신뢰구간과 5% 양측 유의수준 및 80% 검정력에 기초한 최소검출효과를 함께 제시하여 해석한다.

3. 사업장 배출자료와 분석

사업장 배출반응은 굴뚝자동측정기기로 연속 측정된 배출량을 공개하는 사업장 대기오염물질관리시스템(CleanSYS) 자료로 분석한다. 사업장의 진

4) 시도 수준의 wild cluster bootstrap은 999회 반복하여 계산하였다.

입과 이탈에 따른 표본 변화를 줄이기 위해 2016년부터 2024년까지 계속 관측된 359개 사업장으로 균형패널을 구성하였다. 주 분석표본은 NOx 334개, SOx 257개, 먼지 313개 사업장이며, 이 가운데 신규 지정지역에 위치한 사업장은 각각 280개, 221개, 255개이다.[5] 식 (1)과 같은 구조의 사건연구모형을 사업장과 연도 고정효과를 포함하여 추정하며, 기준연도와 추론방식도 대기질 분석과 동일하게 적용한다. NOx 표본은 95개 시군구로 구성된다.

사업장 배출량에는 0이 포함되어 있고 전체 배출량이 소수 대형 사업장에 집중되어 있다. 이에 0인 관측을 유지하면서 배출량이 큰 구간에서는 로그값과 비슷하게 해석할 수 있는 역쌍곡사인 변환값을 주된 결과변수로 사용한다. 이 변환값은 사업장별 배출량이 얼마나 큰 비율로 변했는지를 보여주지만, 배출량이 몇 톤 변했는지는 직접 나타내지 않는다. 이를 확인하기 위해 2018년과 2019년의 평균 배출량을 산출할 수 있는 297개 사업장을 사전 배출규모에 따라 상위 10%, 그 다음 10%, 하위 80%로 구분한다. 규모집단별로 사업장당 연간 배출량이 몇 톤 변했는지를 추정하고, 각 집단이 전체 배출량에서 차지하는 비중과 총배출량의 변화도 함께 제시한다. 상위 배출사업장과 영향력이 큰 개별 사업장을 제외한 결과를 비교하여 절대 배출량의 해석이 소수 대형 사업장에 좌우되는지도 점검한다.

CleanSYS에서 관찰되는 변화에는 사업장 총량관리뿐 아니라 전국적인 배출허용기준 강화, 연료전환과 생산량 변화가 함께 반영될 수 있다. 사업장별 할당량과 배출권 거래 및 할당량 초과 내역을 확인할 수 없으므로, 추정결과는 총량관리제만의 효과가 아니라 신규 지정지역에 위치한 상시측정 사업장의 상대적 배출반응으로 해석한다. 총량관리 대상 명단과 연결된 사업장만을 사용한 분석, 석탄발전소 소재지역을 제외한 분석과 코로나19 기간을 제외한 분석도 함께 제시한다. 평행추세 위반에 대한 민감도는 2021년 계수, 2021년과 2022년의 평균, 2021년부터 2024년까지의 평균에 각각 적용하여 초기 반응과 전체 사후기간의 결과를 비교한다.

---

5) 자료 정비 과정에서 광주와 전남의 통합 표기를 처리하며 일부 광주 소재 사업장이 비교집단으로 분류된 오류를 확인하였다. 행정구역과 처치 여부를 바로잡은 자료로 관련 분석을 모두 다시 실시하였다.

4. 도로이동오염원과 지역 총배출량

권역 확대 이후 도로부문과 지역 전체의 NOx 배출이 신규 지정지역과 미지정지역에서 어떻게 달라졌는지는 대기정책지원시스템(Clean Air Policy Support System, CAPSS)의 시군구별 배출 인벤토리로 분석한다. CAPSS는 직접 측정한 배출량이 아니라 배출시설과 차량 등록대수, 주행거리 등의 활동자료에 배출계수를 적용하여 산정한 자료이다.

도로이동오염원 NOx는 차종과 연료, 연식, 주행거리와 속도별 배출계수를 이용해 산정된다. 조기폐차와 노후차 대체에 따른 차량 구성의 변화는 등록통계를 통해 반영되고, 배출허용기준의 강화는 연식별 배출계수에 반영된다. 간선도로의 주행활동에는 실측 교통량이 사용된다. 반면 NOx 저감장치 부착과 운행제한에 따른 주행 감소는 산정과정에 직접 반영되지 않는다.[6] 이에 도로부문 분석의 범위는 차량정책 전체가 아니라 CAPSS에 포착된 도로이동오염원 NOx의 변화로 한정한다.

분석에는 동일한 산정체계로 소급 재산정된 2016년부터 2023년까지의 자료를 사용한다. 배출원 분류와 단위, 행정구역 체계가 연도 사이에 일관되게 적용되었는지 확인하고 2019년과 2020년 사이의 자료에 불연속성이 존재하는지도 점검하였다. 2024년 자료는 아직 공표되지 않아 분석에 포함하지 않는다. 대기질 분석과 같은 지역 제외기준을 적용한 뒤 8개 연도에 모두 관측된 신규 지정지역 81개와 미지정지역 82개로 균형패널을 구성하였다.

도로부문의 결과변수는 시군구별 도로이동오염원 NOx의 로그값이며, 지역 전체의 배출변화는 모든 배출원을 합산한 총 NOx의 로그값으로 측정한다. 두 결과 모두 시군구 고정효과와 연도 고정효과를 포함한 사건연구모형으로 추정하고 2019년을 기준연도로 사용한다. 사후기간은 자료가 제공되는 2021년부터 2023년까지이며, 코로나19의 영향을 확인하기 위해 2020년과 2021년을 제외한 분석도 함께 제시한다.

---

6) 국가미세먼지정보센터의 산정방법에 따르면 자동차 저감장치의 저감효율은 먼지, VOC와 CO에 적용되며 NOx에는 별도로 적용되지 않는다. 운행제한에 따른 주행 감소를 반영하는 절차도 편람에서 확인되지 않는다(국가미세먼지정보센터, 2025).

도로이동오염원 NOx 분석에서는 정책 이전의 변화경로가 두 집단 사이에 다르게 나타나므로, 2016년부터 2019년까지의 로그 배출량 경로가 신규 지정지역과 유사해지도록 미지정지역에 엔트로피 균형가중치를 적용하였다 (Hainmueller, 2012).[7] 지역 총 NOx에 대해서는 정책 이전의 변화경로와 사후기간 평균을 함께 검정하였다.

5. 공통표본 분석

대기질 자료와 사업장 배출자료 및 배출 인벤토리는 관측 범위가 달라 분석표본도 서로 다르다. 이러한 표본 차이의 영향을 확인하기 위해 세 자료가 모두 관측되는 85개 시군구에서 같은 기간의 결과를 다시 추정한다.[8]

표본을 일치시킨 다음에는 상시측정 사업장이 있는 신규 지정지역 41개 시군구를 대상으로 사업장 배출량, 지역 총 NOx와 NO_2의 정책 전후 변화를 산출하고 이들 사이의 관계를 상관계수로 분석한다.[9] 이를 통해 사업장 배출량의 변화가 큰 지역에서 지역 총배출량과 대기질도 같은 방향으로 변했는지를 확인한다.

지역별 대응은 상시측정 사업장이 지역 배출에서 차지하는 범위에 따라 달라질 수 있다. 이에 정책 이전의 CleanSYS 사업장의 NOx 배출량을 CAPSS 지역 총 NOx와 비교하여 상시측정 사업장의 상대적 포괄범위를 구성하고, 사업장 보유 여부와 포괄범위에 따라 지역 총 NOx와 NO2의 변화가 달라지는지를 분석한다.[10] 다만 두 자료의 측정방식이 다르므로 이 값은 정확한 배출 점유율

7) 가중치의 집중 여부는 유효표본 크기와 최대 가중치로 확인하였다. 원자료의 총배출량 변화는 도로이동, 산업 및 발전, 비도로이동과 기타 배출원으로 나누어 각 배출원의 기여 비중을 제시하였다.

8) 공통표본의 분석기간은 2016년부터 2023년까지이다. 균형패널 사업장이 없는 시군구의 배출량은 0으로 처리하고, 사업장이 있는 54개 시군구도 별도로 분석하였다. 사업장 배출량은 시군구별로 합산한 뒤 역쌍곡사인 변환을 적용하였다.

9) 정책 전후 변화는 2019년과 2021년부터 2023년까지의 평균을 비교하여 산출하였다. Pearson 상관계수와 Spearman 상관계수를 사용하고, 신뢰구간과 영향력이 큰 지역을 제외한 결과도 함께 제시하였다.

10) 지역별 전체 NOx에서 산업 및 발전 부문과 도로이동오염원이 차지하는 비중도 제시하였다. 산업 및 발전 부문의 배출규모와 비중에 따른 NO2 변화는 직접 차이검정

이 아니라 지역 총배출량과 비교한 사업장 배출량의 상대적 크기로 해석한다.

Ⅳ. 분석 결과

분석결과는 사업장 배출, 지역 총배출량, 지역 대기질과 공통표본 비교의 순서로 제시한다.[11)]

1. 사업장 NOx의 비례적 반응과 절대 배출량

신규 지정지역의 상시측정 사업장에서는 2021년과 2022년에 NOx 배출의 비례적 감소가 나타났다(〈표 2〉). 역쌍곡사인 계수는 2021년 −0.935, 2022년 −0.425였으며, 2021년부터 2024년까지의 평균은 −0.467이었다. 배출량이 충분히 큰 사업장의 비율 변화로 환산하면 약 37%의 감소에 해당한다. 정책 이전 계수는 개별적으로 유의하지 않았고 공동검정도 기각되지 않았다(p=0.360). 총량관리 대상 사업장만 사용하거나 석탄발전소 소재지역과 코로나19 기간을 제외해도 감소 방향은 유지되었으며, 시도 수준의 추론에서도 2021년과 2022년의 유의성은 유지되었다.

〈표 2〉 신규 지정지역 사업장의 오염물질별 배출반응

	(1) NOx	(2) SOx	(3) 먼지
2016년 × 신규 지정지역	−0.213 (0.186)	0.174 (0.334)	−0.181 (0.169)
2017년 × 신규 지정지역	−0.258 (0.181)	1.291*** (0.438)	−0.133 (0.152)
2018년 × 신규 지정지역	−0.134 (0.152)	0.360** (0.164)	0.049 (0.113)
2020년 × 신규 지정지역	−0.322* (0.167)	−0.331 (0.213)	−0.080 (0.108)

과 연속형 분석으로 확인하고, 여러 하위분석의 p값은 Holm 방식으로 보정하였다. 연결분석은 상시측정 사업장이 있는 지역에 한정하여 해석하였다.

11) 이하에서 참조하는 온라인 부록은 다음 주소에서 확인할 수 있다: https://drive.google.com/file/d/1aad2SbjP11QngWlKfmdlH1A_yzUohh4w/view?usp=sharing

2021년 × 신규 지정지역	−0.935*** (0.360)	−0.211 (0.555)	−0.156 (0.132)
2022년 × 신규 지정지역	−0.425** (0.206)	0.237 (0.304)	−0.208* (0.123)
2023년 × 신규 지정지역	−0.265 (0.195)	0.532 (0.333)	0.018 (0.129)
2024년 × 신규 지정지역	−0.245 (0.233)	0.459 (0.365)	0.030 (0.171)
사업장 고정효과	포함	포함	포함
연도 고정효과	포함	포함	포함
사전계수 공동검정 p값	0.360	0.022	0.083
관측치 수	3,006	2,313	2,817
사업장 수	334	257	313
신규 지정지역 사업장 수	280	221	255
시군구 군집 수	95	75	92

주: 1) 종속변수는 사업장별 연간 배출량의 역쌍곡사인 변환값. 2) 2019년 기준임. 3) 괄호 안은 시군구 수준 군집표준오차임. 4) *는 p<0.10, **는 p<0.05, ***는 p<0.01을 의미함. 5) 시도 수준 wild cluster bootstrap 결과는 부록 〈표 A1〉에 제시함

자료: CleanSYS 사업장 배출량 자료를 이용하여 저자 작성

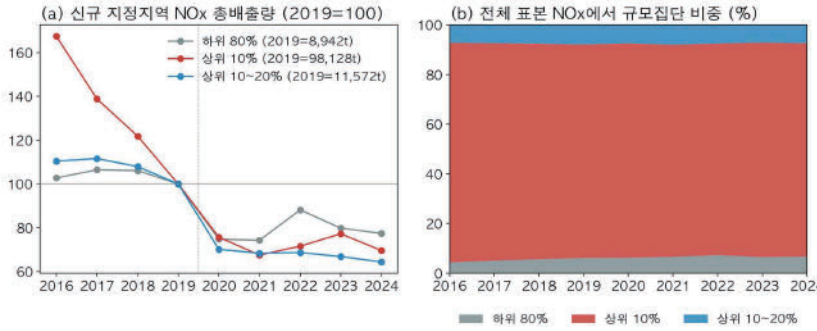
NOx 감소는 시행 초기인 2021년과 2022년에 집중되었다. 평행추세 위반을 허용한 민감도 분석에서 2021년 계수와 2021년부터 2022년까지의 평균은 정책 이전 최대 변동의 각각 80%와 50%에 해당하는 위반을 허용해도 0과 구분되었다. 반면 2021년부터 2024년까지의 평균은 10%를 넘는 위반을 허용하면 0과 구분되지 않았다. 시도 수준 추론에서는 2023년 계수도 유의했지만 2024년 계수는 유의하지 않았다(부록 〈표 A1〉과 〈표 A5〉). 이를 종합하면 사업장 NOx 감소는 2021년과 2022년의 초기 반응에서 가장 뚜렷하다. SOx는 정책 이전 변화경로가 달랐고, 먼지에서는 일관된 사후 변화가 나타나지 않았다.

이러한 비례적 반응이 특정 규모의 사업장에 집중되었는지도 확인하였다. 사전 NOx 배출량의 86.4%는 상위 10%인 30개 사업장에서 발생했고, 상위 1%인 3개 사업장의 비중도 20.7%였다. 그러나 상위 10%와 하위 80%의 비례적 반응은 통계적으로 다르지 않았다(p=0.548). 따라서 앞서 확인한 감소가 소규모 사업장에만 집중되었다고 보기는 어렵다.

비례적 반응과 별도로 연간 배출량이 몇 톤 변했는지도 비교하였다. 모든 미지정 사업장을 비교대상으로 삼으면 신규 지정지역 상위 사업장의 배출량

이 정책 시행 이후 사업장당 연평균 923톤 더 감소했지만, 두 집단은 정책 이전부터 서로 다른 변화경로를 보였다(p=0.005). 사전 배출규모가 비슷한 사업장끼리 비교하면 신규 지정지역의 감소폭이 오히려 930톤 작았고, 이 경우에도 정책 이전 경로가 달랐다(p=0.012). 비교대상에 따라 감축 방향이 반대로 나타난 것이다. 원자료에서도 신규 지정지역 사업장의 총 NOx는 2019년 118,642톤에서 2021년부터 2024년까지 평균 85,052톤으로 감소했지만, 상위 배출사업장의 감소는 정책 시행 이전부터 진행되고 있었다. 따라서 사업장별 비례적 감소와 달리, 절대 배출량에서 나타난 집단 간 차이는 권역 확대의 성과로 구분하기 어려웠다.

〈그림 1〉 사전 배출규모별 신규 지정지역 사업장의 NOx 총배출량 경로



주: 1) (a) 규모집단별 총배출량 경로(2019년=100). 2) (b) 전체 배출량 중 각 집단의 비중. 3) 2018년과 2019년 평균 NOx 배출량 기준임. 4) 총배출량 경로는 기술통계임
자료: CleanSYS 사업장 배출량 자료를 이용하여 저자 작성

2. 도로이동오염원과 지역 총배출량의 변화

CAPSS에 포착된 도로이동오염원 NOx는 2019년부터 2023년까지 신규 지정지역에서 35.4%, 미지정지역에서 34.0% 감소하였다. 두 집단 모두 큰 폭으로 감소했지만, 사건연구모형에서 신규 지정지역의 사후기간 평균은 미지정지역보다 0.4% 더 감소한 수준이었고 통계적으로 유의하지 않았다(p=0.81). 코로나19 영향기간을 제외한 추정치는 −2.0%(p=0.25)였다. 정책 이전 배출경로에 엔트로피 균형가중치를 적용해도 사후 평균은 −0.02%(p=0.99)였으

며, 코로나19 영향기간을 제외한 결과도 −2.3%(p=0.17)로 비슷했다. 연도별 계수도 2021년의 양의 값에서 2023년의 음의 값으로 바뀌어 신규 지정지역에서 감축폭이 지속적으로 커지는 양상은 나타나지 않았다.

모든 배출원을 합한 지역 총 NOx에서도 두 집단의 차이는 뚜렷하지 않았다. 원자료에서 2019년부터 2023년까지 총 NOx는 신규 지정지역에서 21.4%, 미지정지역에서 27.1% 감소하였다. 미지정지역의 변화를 기준으로 추정한 신규 지정지역의 사후 평균계수는 +0.4%로, 신규 지정지역의 감소폭이 평균 0.4% 작았던 방향이지만 통계적으로 유의하지 않았다(p=0.87). 정책 이전 계수의 공동검정도 기각되지 않았다(p=0.205). 사후 평균의 95% 신뢰구간은 −4.8%에서 +5.6%로, 신규 지정지역의 총 NOx가 미지정지역보다 약 5% 이상 더 감소했다는 해석과는 부합하지 않았다(〈표 3〉).

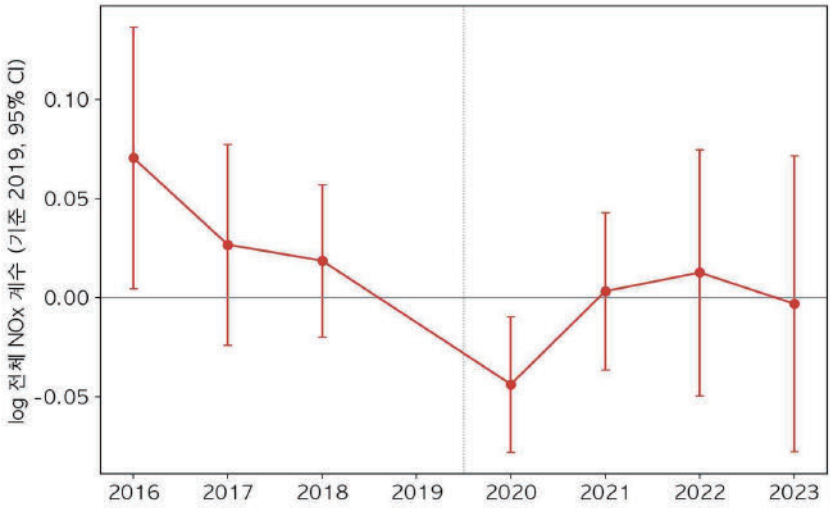
〈표 3〉 도로이동오염원과 지역 총 NOx의 변화

	(1) 도로이동오염원 NOx	(2) 지역 총 NOx
2016년 × 신규 지정지역	−0.014 (0.020)	0.071** (0.034)
2017년 × 신규 지정지역	0.004 (0.011)	0.027 (0.026)
2018년 × 신규 지정지역	0.018** (0.008)	0.019 (0.020)
2020년 × 신규 지정지역	0.007 (0.012)	−0.044** (0.018)
2021년 × 신규 지정지역	0.029* (0.017)	0.003 (0.020)
2022년 × 신규 지정지역	−0.004 (0.017)	0.013 (0.032)
2023년 × 신규 지정지역	−0.036** (0.018)	−0.003 (0.038)
2021~2023년 평균	−0.004 (0.016)	0.004 (0.027)
시군구 고정효과	포함	포함
연도 고정효과	포함	포함
사전계수 공동검정 p값	0.030	0.205
관측치 수	1,304	1,304
시군구 수	163	163
신규 지정지역 수	81	81

주: 1) 종속변수는 CAPSS 시군구별 연간 NOx 배출량의 로그값임. 2) 2019년 기준임. 3) 괄호 안은 시군구 수준 군집표준오차. 4) *는 p<0.10, **는 p<0.05, ***는 p<0.01을 의미함. 5) 도로이동오염원은 정책 이전 배출경로를 재가중한 결과를 함께 제시함. 6) 시도 수준 wild cluster bootstrap 결과는 부록 〈표 A1〉에 제시함

자료: CAPSS 시군구별 배출 인벤토리를 이용하여 저자 작성

〈그림 2〉 대기관리권역 확대 전후 지역 총 NOx의 상대적 변화



주: 1) 2019년 기준. 2) 모든 배출원을 합한 시군구별 NOx 배출량의 로그값. 3) CAPSS 배출량은 활동자료와 배출계수에 기초한 산정치
자료: CAPSS 시군구별 배출 인벤토리를 이용하여 저자 작성

두 결과의 관계를 이해하려면 지역의 배출원 구성을 함께 볼 필요가 있다. 신규 지정지역에서 도로이동오염원은 전체 NOx의 중앙값 51.9%를 차지한 반면, 굴뚝자동측정 사업장과 관련성이 높은 산업 및 발전 부문의 비중은 중앙값 7.1%였다. 2019년부터 2023년까지 총 NOx 감소분에서 도로이동오염원이 차지한 비중은 신규 지정지역 47.9%, 미지정지역 51.9%였고, 산업 및 발전 부문은 각각 33.9%와 31.3%였다. 지역 배출에서 비중이 큰 부문의 감소가 두 집단에서 비슷하게 진행된 것이다.

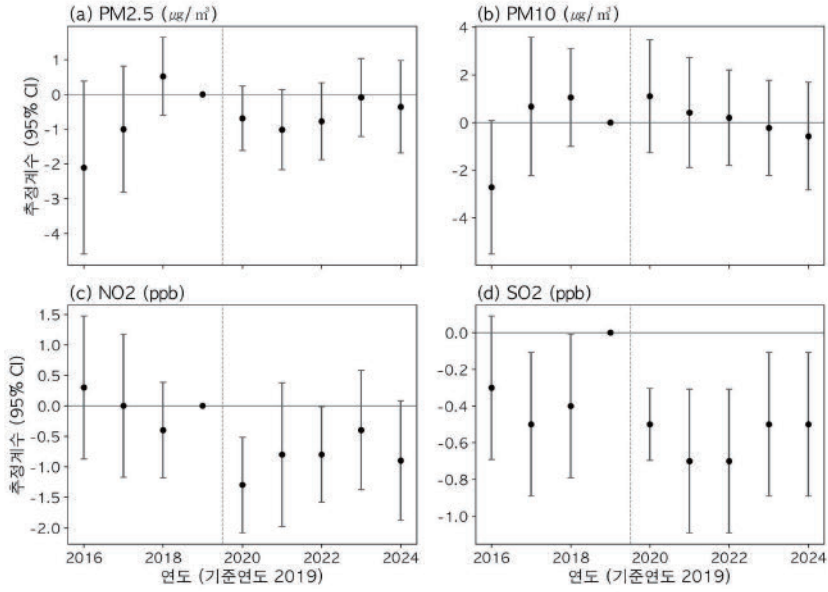
상시측정 사업장의 배출량을 지역 총 NOx와 비교한 상대적 규모의 중앙값은 신규 지정지역에서 0.74%였다.[12] 이는 사업장 단위 분석이 지역 전체 배출량 가운데 제한된 범위를 관찰하고 있음을 보여준다. 즉, 일부 사업장에서 관찰된 비례적 감소와 지역 총 NOx의 변화는 서로 다른 배출 범위를 반영한다.

12) CleanSYS 사업장 NOx를 CAPSS 지역 총 NOx로 나누어 산출. 상시측정 사업장이 없는 신규 지정지역 포함. 두 자료의 측정방식이 달라 정확한 배출 점유율이 아닌 상대적 규모로 해석.

3. 대기관리권역 확대와 지역 대기질

분석기간 동안 주요 대기오염물질의 농도는 신규 지정지역과 미지정지역에서 모두 대체로 낮아졌다. $PM_{2.5}$ 평균은 2016년 신규 지정지역 25.3㎍/㎥, 미지정지역 27.5㎍/㎥에서 2024년 각각 15.1㎍/㎥와 14.3㎍/㎥로 감소하였다. 권역 확대의 성과는 이러한 공통적인 개선을 제외한 두 집단의 상대적 변화로 판단한다. 정책 이전 계수의 공동검정은 $PM_{2.5}$와 NO_2에서 기각되지 않았지만, PM_{10}과 SO_2에서는 기각되었다. 이에 $PM_{2.5}$와 NO_2는 사건연구 결과를 중심으로 살펴보고, PM10과 SO_2는 두 집단 사이의 기술적 차이로 제시한다.

〈그림 3〉 대기관리권역 확대 전후의 오염물질별 상대적 농도 변화



주: 1) (a) $PM_{2.5}$. 2) (b) PM10. 3) (c) NO_2. 4) (d) SO_2. 5) 2019년 기준. 6) 점은 사건연구 계수. 7) 수직선은 95% 신뢰구간. 8) 점선은 제도 전환 경계
자료: 한국환경공단 국가 도시대기측정망 월별 확정자료를 이용하여 저자 작성

$PM_{2.5}$는 2020년부터 2022년까지 신규 지정지역에서 상대적으로 더 낮아지는 방향을 보였지만, 5% 수준에서 유의하지 않았고 2023년과 2024년에는 계수가 0에 가까워졌다. PM_{10}의 사후계수도 모두 유의하지 않았으며, 정책

이전 변화경로가 달라 인과효과로 해석하지 않는다. NO_2는 코로나19가 시작된 2020년에 신규 지정지역에서 1.3ppb 더 감소했지만, 2021년부터 2024년까지는 두 집단의 차이가 5% 수준에서 유의하지 않았다. 2020년은 계절관리제와 국외 배출 변화 및 코로나19의 영향이 겹친 시기이므로(Seo et al., 2026), 본 연구는 이 시점의 감소를 권역 확대의 성과로 해석하지 않는다. $PM_{2.5}$와 NO_2에서 신규 지정지역의 상대적 개선은 일부 연도에 나타났지만 이후까지 지속되지는 않았다(〈표 4〉).

〈표 4〉 대기질 사건연구의 주 추정결과

연도	PM2.5	PM10	NO2	SO2
2016	−2.11* (1.27)	−2.72* (1.43)	0.3 (0.6)	−0.3 (0.2)
2017	−1.00 (0.92)	0.67 (1.48)	0.0 (0.6)	−0.5** (0.2)
2018	0.51 (0.57)	1.05 (1.05)	−0.4 (0.4)	−0.4** (0.2)
2019	기준연도	기준연도	기준연도	기준연도
2020	−0.69 (0.47)	1.10 (1.21)	−1.3*** (0.4)	−0.5*** (0.1)
2021	−1.01* (0.59)	0.41 (1.18)	−0.8 (0.6)	−0.7*** (0.2)
2022	−0.78 (0.57)	0.20 (1.02)	−0.8* (0.4)	−0.7*** (0.2)
2023	−0.09 (0.57)	−0.23 (1.02)	−0.4 (0.5)	−0.5*** (0.2)
2024	−0.36 (0.68)	−0.58 (1.16)	−0.9 (0.5)	−0.5*** (0.2)

주: 1) 괄호 안은 시군구 수준 군집표준오차임. 2) $PM_{2.5}$와 PM_{10}은 $\mu g/m^3$. 3) NO_2와 SO_2는 ppb 단위임. 4) *는 $p<0.10$, **는 $p<0.05$, ***는 $p<0.01$을 의미함
자료: 한국환경공단 국가 도시대기측정망 월별 확정자료를 이용하여 저자 작성

4. 대기질 결과의 민감도와 SO_2 해석

미지정지역 19개 가운데 9개는 신규 지정지역과 경계를 공유한다. 비인접 미지정지역을 기준으로 비교하면 PM2.5의 2021년부터 2024년까지 평균계수는 신규 지정지역 −1.43$\mu g/m^3$, 인접 미지정지역 −1.74$\mu g/m^3$로 비슷한 하락

을 보였다. 그러나 신규 지정지역의 정책 이전 계수와 신규 지정지역과 인접지역 사이의 사전 동질성 검정이 모두 기각되었다. NO_2는 세 집단의 정책 이전 변화경로가 유사했지만, 인접지역의 동반 하락이나 신규 지정지역의 일관된 상대적 감소는 나타나지 않았다. 따라서 인접지역을 비교집단에 포함하는지에 따라 $PM_{2.5}$와 NO_2의 추정결과가 달라지지만, $PM_{2.5}$의 동반 하락을 공간적 파급의 결과로 해석하기에는 정책 이전 경로의 차이가 컸다(부록 〈그림 A2〉).[13]

$PM_{2.5}$ 결과는 기준연도와 측정망 구성에도 영향을 받았다. 기준연도를 2018년으로 바꾸면 2021년과 2022년 계수가 유의하게 나타났다. 정책 이후 측정소 수는 신규 지정지역에서 더 빠르게 증가했으며, 측정소 수의 변화가 1개 이내인 지역만 사용하면 2021년부터 2024년까지 평균계수는 $-0.56\mu g/m^3$에서 $-0.24\mu g/m^3$로 감쇠(attenuation)하였다. 반면 유효자료획득률이 75% 이상인 관측만 사용한 결과는 주 분석과 거의 같았다. $PM_{2.5}$의 음의 추정치는 자료의 품질보다 기준연도의 선택과 측정망의 변화에 더 민감했던 것이다(부록 〈표 A6〉).

추론방식과 비교집단 구성방식을 바꾸어도 주된 판정은 유지되었다. 시도 수준의 wild cluster bootstrap에서 $PM_{2.5}$, PM_{10}과 NO_2의 사후계수는 모두 5% 수준에서 유의하지 않았다. 합성 이중차분법의 사후 평균도 $PM_{2.5}$ $-0.28\mu g/m^3$, NO_2 -0.53ppb로 주 모형과 비슷한 방향과 크기를 보였고 신뢰구간은 0을 포함하였다(부록 〈표 A1〉과 〈표 A3〉). 따라서 대기질 결과가 특정 군집추론이나 대조지역의 가중방식 때문에 나타난 것으로 보기는 어렵다.

이러한 결과의 해석 범위는 최소검출효과를 통해 구체화하였다. 80% 검정력을 기준으로 한 최소검출효과는 $PM_{2.5}$ $1.7\mu g/m^3$, PM_{10} $3.1\mu g/m^3$, NO_2 1.4ppb로, 신규 지정지역의 2019년 평균농도 대비 약 7.4%에서 8.2%였다. 즉, 신규 지정지역과 미지정지역의 차이가 이보다 작으면 현재 표본으로 명확히 구분하기 어렵다. 최소검출효과 규모의 편의를 낳는 선형 사전추세 위

13) 시도 수준의 wild cluster bootstrap에서는 공간 비교의 사후 유의성이 유지되지 않았다. 인접지역의 비율과 개수를 이용한 연속형 노출모형에서도 일관된 관계가 나타나지 않았다.

반에 대한 검정력도 14%에서 34%에 그쳤다. 이에 대기질 결과는 사전계수의 공동검정만으로 판단하지 않고, 최소검출효과와 기준연도, 측정망 구성 및 대안적 비교설계에 대한 민감도를 함께 고려하였다(부록 〈표 A4〉).

SO2는 주 모형에서 정책 시행 이후 모든 연도에 유의하게 감소했지만, 정책 이전인 2017년과 2018년에도 유의한 음의 계수가 나타났고 사전계수 공동검정도 기각되었다. 부산, 울산, 여수, 광양과 당진을 제외하면 2021년부터 2024년까지 평균계수는 -0.2ppb로 줄고 유의한 사후연도가 사라졌다. 시도 수준의 추론에서도 유의성은 2021년과 2022년에만 유지되었다. SO_2 감소가 정책 이전의 변화경로와 주요 항만지역의 포함 여부에 크게 영향을 받은 것이다.

사업장 총량관리가 SO_2 감소의 주된 요인이었다면, 총량관리 대상 사업장이 확인되는 지역에서 그렇지 않은 지역보다 더 큰 감소가 나타났을 것이다. 그러나 두 지역의 변화는 통계적으로 다르지 않았다(p=0.390). 2020년에는 선박연료의 황함유량 규제와 항만지역 대기질 관리도 함께 시행되었다(이민우·이향숙·이정욱, 2023). 이러한 결과를 종합하면 SO2 감소를 대기관리권역 확대, 특히 사업장 총량관리만의 성과로 해석하기는 어렵다.

5. 공통표본에서의 결과 비교

세 자료가 모두 관측되는 85개 시군구에서 다시 추정해도 사업장 단위와 지역 단위 결과의 대비는 유지되었다. NO_2는 기존 분석과 표본이 같아 결과가 변하지 않았다. 지역 총 NOx의 사후 평균계수는 전체표본의 +0.4%에서 공통표본의 +2.8%로 바뀌었지만, 신규 지정지역과 미지정지역의 변화는 통계적으로 구분되지 않았다(p=0.20, 95% 신뢰구간 -1.4%에서 +6.9%). CleanSYS 배출량을 시군구별로 합산한 결과도 사업장이 있는 54개 시군구에서 -0.055(p=0.49), 사업장이 없는 지역을 포함한 85개 시군구에서 -0.014(p=0.84)로 두 집단의 차이가 뚜렷하지 않았다.

개별 사업장을 단위로 분석했을 때에는 NOx의 비례적 감소가 나타났지만, 사업장 배출량을 시군구별로 합산하면 같은 차이가 나타나지 않았다. 개

별 사업장 분석은 각 사업장의 비례변화를 동일하게 반영하는 반면, 시군구별 합계는 소수 대형 사업장의 절대 배출량에 크게 좌우되기 때문이다. 이러한 차이가 공통표본에서도 유지되었다는 점에서 사업장별 반응과 지역 단위 배출성과의 대비를 자료별 표본 구성만으로 설명하기는 어렵다.

같은 지역 안에서 사업장 배출량과 지역 지표가 함께 변했는지도 확인하였다. 상시측정 사업장이 있는 신규 지정지역 41개 시군구에서 사업장 배출량과 지역 총 NOx의 변화는 양의 상관을 보였지만 통계적으로 뚜렷하지 않았다. 사업장 배출량 또는 지역 총 NOx의 변화와 NO_2 변화 사이에도 일관된 관계가 나타나지 않았다. 사업장 보유 여부와 상시측정 사업장의 상대적 포괄범위에 따른 차이도 확인되지 않았다. 이 표본에서 상시측정 사업장의 배출반응은 지역 총배출량과 대기질의 변화를 일관되게 반영하지 않았다. 구체적인 결과는 부록 〈표 A2〉와 〈그림 A1〉에 제시한다.

6. 분석결과의 종합

분석결과는 사업장 단위와 지역 단위에서 서로 다르게 나타났다. 신규 지정지역의 상시측정 사업장에서는 2021년과 2022년에 NOx 배출의 비례적 감소가 확인되었다. 그러나 사업장 배출량을 시군구별로 합산하면 두 집단의 차이가 뚜렷하지 않았고, 도로이동오염원과 지역 총 NOx에서도 신규 지정지역의 감축폭이 지속적으로 더 커지는 양상은 나타나지 않았다. $PM_{2.5}$와 NO_2의 상대적 개선도 일부 연도에 그쳤으며, PM_{10}과 SO_2는 정책 이전 변화 경로의 차이로 인해 권역 확대의 성과로 판단하기 어려웠다.

이러한 차이는 각 분석이 포착하는 배출범위와 측정방식에서 이해할 수 있다. 사업장 분석은 개별 사업장의 비례변화를 동일하게 반영하지만, 시군구별 배출량은 소수 대형 사업장의 절대 배출량과 다른 배출원의 변화까지 포함한다. 상시측정 사업장이 지역 총배출량에서 차지하는 상대적 범위가 제한적이고, 비중이 가장 큰 도로이동오염원도 두 집단에서 비슷하게 감소하였다. 공통표본에서도 이러한 차이가 유지된 점을 고려하면 일부 사업장의 배출반응을 권역 전체의 배출성과와 같은 의미로 해석할 수는 없다.

지역 총 NOx의 신뢰구간은 신규 지정지역에서 약 5%를 넘는 상대적 감축이 있었다는 해석과 부합하지 않았다. 대기질 분석은 2019년 평균농도의 약 7%에서 8%를 넘는 두 집단의 차이를 판별할 수 있었으며, 그보다 작은 변화의 가능성은 남아 있다. 따라서 미지정지역과 구분되는 변화는 일부 상시측정 사업장의 시행 초기 배출반응에서 확인되었으며, 권역 전체의 총배출량과 대기질에서는 지속적인 차이가 관찰되지 않았다.

V. 결론 및 정책적 함의

본 연구는 2020년 대기관리권역 확대의 성과를 사업장 배출, 지역 총배출량과 지역 대기질로 나누어 평가하였다. 신규 지정지역의 상시측정 사업장에서는 2021년과 2022년에 NOx 배출의 비례적 감소가 나타났다. 반면 사업장 배출량을 시군구별로 합산하거나 지역 총 NOx와 대기질을 비교하면 미지정지역과 구분되는 지속적인 변화는 나타나지 않았다. 이러한 차이는 세 자료의 표본을 일치시켜도 유지되었다. 규제대상의 반응과 권역 전체의 성과를 구분해야 한다는 것이 분석의 핵심 결과이다.

대기과학 연구는 우리나라 $PM_{2.5}$ 변화에서 도시 간 이동의 중요성이 지역별로 다르고(Seo et al., 2025), 2019년과 2020년 사이에는 계절관리제와 국외 배출 변화 및 코로나19의 영향이 겹쳤음을 보여주었다(Seo et al., 2026). NOx 배출과 $PM_{2.5}$ 농도의 관계도 대기화학적 조건에 따라 달라질 수 있다(Pendergrass et al., 2025). 본 연구는 이러한 진단과 구분하여 신규 지정지역과 미지정지역의 차이를 기준으로 권역 확대의 성과를 평가하였다. 지역 총 NOx에서부터 두 집단의 차이가 나타나지 않았으므로 대기질 결과를 배출량은 줄었지만 농도가 반응하지 않은 사례로 해석하지 않았으며, 기존 연구를 장소 기반 정책평가의 관점에서 보완하였다.

첫째, 장소 기반 환경정책의 성과는 지정지역 내부의 개선만으로 판단해서는 안 된다. 전국적인 배출기준 강화, 자동차 교체와 연료전환은 지정 여부

와 관계없이 여러 지역에 함께 영향을 미친다. 따라서 지정지역과 적절한 비교지역의 변화를 대조하고, 두 지역 사이의 차이가 어느 성과지표에서 나타나는지를 제시해야 한다. 대기오염은 행정경계를 넘어 이동하므로 비교지역의 공간적 관계도 평가설계에 반영할 필요가 있다. 인접지역을 구분하고 배출원과 측정지점의 거리, 풍향 및 대기 이동을 고려한 공간 단위를 함께 사용하면 정책의 영향 범위와 비교집단을 보다 적절하게 설정할 수 있다.

둘째, 정책수단의 작동방식에 맞는 성과지표가 필요하다. 지역 평균농도만으로는 사업장 총량관리, 자동차 배출관리와 생활오염원 대책 가운데 어느 수단에서 변화가 나타났는지 알기 어렵다. 사업장 총량관리에 대해서는 할당량의 구속성과 실제 배출량, 배출권 거래, 행정처분 및 대형 배출원의 절대 감축량을 함께 평가해야 한다. 특히 사전 NOx 배출량의 86.4%가 상위 10% 사업장에 집중되어 있었으므로 사업장 평균의 비례변화만으로 총량성과를 판단하기 어렵다. 자동차 대책은 조기폐차, 저공해조치, 운행제한과 교통량 자료를 지역별로 연결해야 한다. 이러한 수단별 지표를 권역의 배출원 구성과 총배출량 목표에 연결하면 개별 수단과 정책묶음 전체의 성과를 함께 관리할 수 있다. 국외 유입으로 인해 국내 정책수단이 달성할 수 있는 대기질 개선의 범위가 제한될 수 있다는 점도 권역별 목표에 반영되어야 한다(배민아·우정헌·김순태, 2023).

셋째, 정책 시행과 함께 평가자료와 분석계획을 마련해야 한다. 사업장별 할당량과 거래 및 집행자료를 공개하면 총량관리가 실제 배출행태를 어떻게 변화시켰는지 평가할 수 있다. 자동차 대책도 지역별 시행실적을 배출 인벤토리와 연결할 수 있는 형태로 공개할 필요가 있다. 분석계획에는 비교집단과 주요 성과지표, 평가시점을 미리 정하고 검정력과 신뢰구간 및 최소검출효과를 함께 제시하는 절차가 포함되어야 한다. 평행추세 위반에 대한 민감도 분석과 사전경로 재가중 및 대안적 비교설계도 결과의 안정성을 확인하는 데 활용할 수 있다. 여기에 공간분해와 대기화학 분석을 결합하면 정책의 공간적 영향과 배출량 및 농도 사이의 관계를 더 정밀하게 평가할 수 있다.

본 연구는 사업장별 할당량과 거래 및 집행자료를 관찰할 수 없어 사업장

NOx 변화에서 총량관리만의 영향을 분리하지 못하였다. CAPSS 역시 활동자료와 배출계수에 기초한 산정치로, 운행제한과 일부 저감조치의 실적을 직접 반영하지 않는다. 고배출지역을 중심으로 이루어진 권역 지정, 제한된 미지정 비교지역, 측정망 구성의 변화와 지역 간 대기오염 이동도 인과적 해석의 범위를 제한한다. 이러한 조건에서 본 연구가 평가한 것은 개별 정책수단의 독립적인 효과가 아니라 2020년 권역 확대 이후 신규 지정지역에서 나타난 평균적인 변화이다. 대기관리권역의 성과관리는 지역 평균농도에만 의존하기보다 각 정책수단이 어떤 배출원을 얼마나 변화시켰고, 그 변화가 권역 전체의 배출량과 대기질에서 어떻게 나타났는지를 함께 제시하는 방향으로 발전할 필요가 있다.

▮참고문헌▮

국가미세먼지정보센터, 2025, 『국가 대기오염물질 배출량 산정방법 편람(Ⅶ)』, 청주: 국가미세먼지정보센터.

노상환, 2020, "사업장 배출허용기준 강화가 대기오염도에 미치는 영향," 『환경정책』, 28(1), pp.51-70.

박성운·이응균, 2020, "환경 규제 순응의 사회정치적 요인에 관한 연구: 지방 정부의 규제 집행, 정부 신뢰도, 윤리적 호혜성," 『한국정책학회보』, 29(2), pp.29-57, DOI: 10.33900/KAPS.2020.29.2.2.

배민아·우정헌·김순태, 2023, "미세먼지 계절관리제: (II) PM2.5 농도 얼마나 낮출 수 있는가?," 『한국대기환경학회지』, 39(1), pp.9-23, DOI: 10.5572/KOSAE.2023.9.1.9.

손규원·배민아·유승희·김은혜·강윤희·배창한 등, 2020, "미세먼지 계절관리제 기간 동안 PM2.5 농도에 대한 기상과 배출 영향 분석: 2019년 12월~2020년 3월," 『한국대기환경학회지』, 36(4), pp.442-463, DOI: 10.5572/KOSAE.2020.36.4.442.

심은수·박순애, 2025, "환경규제 집행 성과 분석: 지방이양 전후 대기오염물질 배출시설 단속사무를 중심으로," 『환경정책』, 33(4), pp.79-103, DOI: 10.15301/jepa.025.33.4.79.

여민주·정창훈·김용표, 2025, "미세먼지: 과거, 현재, 미래," 『한국대기환경학회지』, 41(2), pp.219-253, DOI: 10.5572/KOSAE.2025.41.2.219.

이민우·이향숙·이정욱, 2023, "항만지역등 대기질 개선에 관한 특별법 도입에 따른 대

기오염물질 배출량 변화 분석: 인천항을 중심으로," 『한국항만경제학회지』, 39(3), pp.107-122, DOI: 10.38121/kpea.2023.9.39.3.107.

임충묵·임재빈, 2026, "대기오염물질 총량관리제 정책변동과정에 관한 연구: Mucciaroni의 이익집단위상변동모형을 중심으로," 『환경정책』, 34(1), pp.83-131.

정상우·김난영, 2021, "수도권 대기환경관리정책의 효과와 관리위험 분석: 운행 경유차 저공해화 사업의 미세먼지(PM10) 및 이산화질소(NO_2) 저감 효과를 중심으로," 『감사논집』, 37, pp.5-36.

한혁·정창훈·금현섭·김용표, 2017, "미세먼지(PM10) 저감 정책의 비판적 검토: 1차 수도권 대기환경관리 기본계획의 정책 대상, 수단, 효과를 중심으로," 『환경정책』, 25(1), pp.49-79, DOI: 10.15301/jepa.2017.25.1.49.

황인창, 2018, "서울시 미세먼지 관리 정책의 성과와 한계," 『한국정책학회보』, 27(2), pp.27-50.

Arkhangelsky, D., S. Athey, D. A. Hirshberg, G. W. Imbens, and S. Wager, 2021, "Synthetic difference-in-differences," *American Economic Review*, 111(12), pp.4088-4118.

Cashore, B. and M. Howlett, 2007, "Punctuating which equilibrium? Understanding thermostatic policy dynamics in Pacific Northwest forestry," *American Journal of Political Science*, 51(3), pp.532-551.

Chay, K. Y. and M. Greenstone, 2005, "Does air quality matter? Evidence from the housing market," *Journal of Political Economy*, 113(2), pp.376-424.

Greenstone, M., 2002, "The impacts of environmental regulations on industrial activity: Evidence from the 1970 and 1977 Clean Air Act Amendments and the Census of Manufactures," *Journal of Political Economy*, 110(6), pp.1175-1219.

Hainmueller, J., 2012, "Entropy balancing for causal effects: A multivariate reweighting method to produce balanced samples in observational studies," *Political Analysis*, 20(1), pp.25-46, DOI: 10.1093/pan/mpr025.

Hall, P. A., 1993, "Policy paradigms, social learning, and the state: The case of economic policymaking in Britain," *Comparative Politics*, 25(3), pp.275-296.

Niu, S., Y. Chen, R. Zhang, and Y. Feng, 2023, "How does the Air Pollution Prevention and Control Action Plan affect sulfur dioxide intensity in China?," *Frontiers in Public Health*, 11, 1119710, DOI: 10.3389/pubh.023.1119710.

Pendergrass, D. C., D. J. Jacob, Y. J. Oak, R. Dang, L. H. Yang, E. Beaudry, et al., 2025, "Wintertime trends of fine particulate matter (PM2.5) in South Korea, 2012–2022: Response of nitrate and organic components to decreasing

NOx emissions," *Geophysical Research Letters*, 52(19), e2025GL116091, DOI: 10.1029/2025GL116091.

Rambachan, A. and J. Roth, 2023, "A more credible approach to parallel trends," *Review of Economic Studies*, 90(5), pp.2555-2591.

Roth, J., 2022, "Pretest with caution: Event-study estimates after testing for parallel trends," *American Economic Review: Insights*, 4(3), pp.305-322, DOI: 10.1257/aeri.20210236.

Seo, J., A. Lee, D.-S. R. Park, D. Youn, K. H. Kim, C.-E. Park, et al., 2025, "An evaluation approach to PM2.5 policy effectiveness over South Korea based on a newly proposed scalable spatial decomposition method," *Environmental Research Letters*, 20(1), 014069, DOI: 10.1088/748-326/ada2b2.

Seo, J., D. Youn, S.-W. Kim, D.-S. R. Park, H.-R. Oh, K. H. Kim, et al., 2026, "Intercity-scale linkage of cold-season PM2.5 and emissions over South Korea: Structural diagnostics from scalable spatial decomposition," *Environmental Research Letters*, 21(1), 014025, DOI: 10.1088/1748-9326/ae2ee9.

Webb, M. D., 2023, "Reworking wild bootstrap-based inference for clustered errors," *Canadian Journal of Economics/Revue canadienne d'économique*, 56(3), pp.839-858, DOI: 10.1111/caje.12661.

Winter, S. C. and P. J. May, 2001, "Motivation for compliance with environmental regulations," *Journal of Policy Analysis and Management*, 20(4), pp.675-698.

웹사이트

환경부, 2020.10.20., "사업장 대기오염물질 총량관리제 본격 가동," 보도자료, https://www.korea.kr/news/pressReleaseView.do?newsId=156416265,[2026.7. 24.].

최현태: 서울대학교에서 정책학 박사학위를 취득하고 한국과학기술원 메타어스 연구센터에서 박사후 연구원을 거쳐, 현재 전북대학교 전북인문사회연구원에서 학술연구교수로 재직 중이다, "High-ambition climate action in all sectors can achieve a 59% greenhouse gas emissions reduction in Korea by 2035" 등의 논문을 발표하였으며, 통합평가모형과 계량경제모형을 활용한 기후변화와 지속가능한 전환에 관한 연구를 주로 수행하고 있다. (hyuntae.choi.iam@gmail.com).

투 고 일: 2026년 07월 28일
심 사 일: 2026년 08월 05일
게재확정일: 2026년 08월 20일