creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

도시계획학 석사학위논문

수도권 사업장 대기오염물질총량관리제의 대기오염농도 저감효과 실증분석

2023년 2월

서울대학교 대학원

환경계획학과 환경관리학전공

임 지 원

수도권 사업장
대기오염물질총량관리제의
대기오염농도 저감효과 실증분석

지도교수 홍 종 호

이 논문을 도시계획학 석사학위논문으로 제출함

2023년 2월

서울대학교 대학원

환경계획학과 환경관리학전공

임 지 원

임지원의 석사학위논문을 인준함

2023년 2월

위 원 장	윤 순 진	(인)
부 위 원 장	김 부 열	(인)
위 원	홍 종 호	(인)

국문초록

주요어 : 수도권 사업장 대기오염물질 총량관리제, 고정효과모형, 이중차분법, 실증분석
학 번 : 2021-28420

환경문제에 대한 국민적 관심 증가와 함께 지난 50여 년간 한국의 대기 오염법은 다양하게 발전해왔다. 특히 2003년부터 2019년까지 시행한 수도권 대기환경개선에 관한 특별법은 수도권 지역만을 특정한 지역 단위 환경법이라는 점에서 그 의미가 깊다. 해당 법 하 실시한 수도권 사업장 대기오염물질 총량관리제는 수도권 대기오염물질 배출사업장들의 SOx, NOx, 먼지 배출총량을 규제하는 양적 규제 정책이다. 이는 과거 농도규제 방식의 한계를 극복하기 위한 시범적 정책이었다. 정책 실시 후 20여 년이 지난 현재, 총량제는 그 효과성을 인정받아 전국단위로 확대 실시되고 있다.

정부는 총량제의 대기오염물질 저감효과에 관한 보고서를 다수 발간해왔다. 그러나 해당 보고서들의 정책 후속 평가는 대상 사업장의 대기오염물질 배출량을 단순 관찰하는 방식으로 진행되어 정책 시행과 오염물질 농도 간 인과성을 명확히 보여주지 못하는 한계가 존재한다. 사업장 배출량은 정책 시행 여부뿐만 아니라 해당 연도의 경제성장률, 기술 발전, 시민사회의 환경 인식 등 다양한 외부 요인의 영향을 받을 수 있다. 따라서 정책 시행의 순효과를 평가하기 위해서는 외생 변수의 적절한 통제가 필수적이다.

본 논문은 2007년부터 2019년까지의 장기패널데이터를 구축하여 고정효과모형을 활용한 이중차분방식으로 수도권 총량제의 정책 순효과를 분석하였다. 분석 결과 1, 2차 총량제 할당과 2차 계획연도 시행 이후 수도권 지역의 NOx 농도는 유의수준 1%에서 감소하였다. 또한 배출권 할당량 감소, 참여 사업장 증대 등 강화된 정책 시행과 함께 농도 감소치가 증가하는 양상을 보였다. 단, 선행연구에서 지속적으로 제기한 배출권 과잉 할당, 거래량 저조의 문제는 여전히 일부 존재하여 향후 총량제 시행 성과 향상을 위한 정책적 재고가 필요하다.

목 차

제 1 장 서론 ····· 1

제 1 절 연구 배경 ····· 1

제 2 절 연구 목적 ····· 3

제 2 장 정책 환경 및 선행 연구 ····· 5

제 1 절 국내 대기환경법의 변천 ····· 5

제 2 절 사업장 총량관리제 ····· 8

제 3 절 선행연구 ····· 12

제 3 장 연구 범위와 방법 ····· 17

제 1 절 연구 범위 ····· 17

제 2 절 변수 선정 ····· 20

제 3 절 연구 방법 ····· 23

제 4 장 연구 결과와 고찰 ····· 27

제 1 절 연구 결과 ····· 27

제 2 절 결과 분석 ····· 29

제 5 장 연구 요약 및 결론 ····· 30

제 1 절 연구 요약 및 함의 ····· 30

제 2 절 연구 한계 및 후속 연구 제언 ····· 31

참고문헌 ····· 34

Abstract ····· 38

표 목 차

[표 1] 국내 대기환경법 연혁 ····· 7
[표 2] 수도권 대기관리권역 ····· 9
[표 3] 제1차 계획과 제2차 계획 비교 ····· 11
[표 4] 제1차 계획과 제2차 계획 할당량 대비 배출량 ····· 12
[표 5] 선행연구 요약 ····· 16
[표 6] 분석대상 측정소 및 지역 ····· 19
[표 7] 변수 기술 통계량 ····· 21
[표 8] 변수 설명 ····· 22
[표 9] 이전 연도 이중차분분석 ····· 26
[표 10] 총량제 효과 분석 ····· 28

그 림 목 차

[그림 1] 총량제 할당 시행 연도 ····· 11
[그림 2] 평행추세가설 검정 ····· 24

식 목 차

[식 1] ····· 27
[식 2] ····· 27

제1장 서론

제1절 연구 배경

기후변화에 대한 시민사회의 문제의식이 강화됨에 따라 국내 환경정책 역시 지속적으로 발전하고 있다. 특히 미세먼지와 같이 가시적이고 쉽게 체감할 수 있는 환경문제의 경우 시민들의 관심도가 높은 만큼 관련 정책의 수립과 개정 역시 빈번히 진행되어왔다. 우리나라의 다양한 대기환경 정책 중 수도권 대기환경 개선에 관한 특별법(이하, '수도권 대기법')하 실시된 사업장 대기오염물질 총량관리제(이하, '총량제')는 대기오염물질을 지역 단위의 양적 규제로 관리하였다는 점에서 기존의 질적 규제 방식의 대기 정책과 차별성을 가진다. 또한 시행 초기 수도권만을 대상으로 하였던 동 정책이 2020년 전국지자체로 확대 실시되며 기존의 총량제는 시범 사업의 성격을 띠게 되었다. 대기오염물질의 양적, 지역적 관리와 시범 사업을 실시하였다는 점에서 총량제는 상당히 고무적인 정책적 시도였다.

정책 시행 후 20여 년이 지난 현재, 유관기관은 총량제 시행을 통해 수도권 대기질이 개선되었다고 평가한 보고서를 다수 출간하였다. 그리고 보고서의 주장을 바탕으로 정책을 전국단위로 확대 실시하고 있다. 그러나 해당 보고서의 정책 평가는 대상 사업장의 SOx, NOx 배출량을 시간에 따라 단순 관찰하는 방식으로 진행되어, 정책 시행과 대기오염물질 배출량 사이의 인과성 검증이 미흡하다는 한계가 있다. 사업장의 대기오염물질 배출량은 총량제 시행 여부뿐만 아니라 경제성장률, 기술발전, 시민사회의 환경 인식과 같은 외부 요인의 영향을 받는다. 따라서 정책 시행의 순효과를 관찰하기 위해서는 다양한 외부 요인들을 적절히

통제한 인과성 검증 과정이 필수적이다.

실제로 국내의 총량제와 유사한 지역 단위 대기 정책을 실시한 중국, 미국에서는 인과적 정책 후속 평가 연구가 활발히 진행되고 있다. 중국은 2012년 대기질 기준 강화(National Standard GB 3095-2012), 2013~2017년 대기 오염방지 시행계획(Action Plan for Air Pollution Prevention and Control;APAPPC) 등을 통해 베이징, 톈진, 허베이성(Beijing, Tianjin, Hebei)과 같이 대기오염이 극심한 지역에 대한 지역 단위 대기 정책을 시행해왔다. 해당 대기 정책의 후속 평가 과정에서 준실험적 정책평가 방식인 이중차분법(Difference-in-Difference, DID)을 활용하여 정책 성과의 인과적 규명을 시도하였다(He G. et al., 2016; Wang K. et al., 2019; Wang W. et al., 2022). 미국의 경우, 청정대기법(Clean Air Act, CAA)에 근거하여 특정 지역 발생 대기오염물질이 인근에 영향을 주는 것을 최소화하기 위한 대기오염 정책을 다수 실시하고 있다. 2015년부터 미국 동부 27개 주를 대상으로 실시한 주간 대기오염 규정(Cross-State Air Pollution Rule)이 그 일환이다. 본 규정은 동부 주만을 대상으로 하고 있는데, 이는 풍상(風上) 지역인 동부의 NOx와 SO2 배출량이 남부지역의 오존 농도에 지대한 영향을 미치기 때문이다. 미국은 청정대기법의 선린(good neighbor) 조항에 근거하여 오존의 전구물질을 다 배출하는 25MW 이상 발전소에 대해 배출권 거래제를 시행하였으며, 개인, 정부, 지자체, 환경단체 등 다양한 시장 참여자를 형성하였다. 또한 선물 및 현물경매를 실시하고, 오존 집중 기간과 연중 기간의 오염물질 가격[1]에 차이를 두는 등 시장 메커니즘을 활발히 활용하였다. 그 결과 2017년 기준 2005년 대비 연간 황산화물 87% 감축, 질소산화물 69% 감축, 오존 집중 기간의 질소산화물 53% 감축의 성과를 얻을 수 있었다

1) 오존 집중 기간의 NOx 가격은 톤당 200~750달러. 그 외 기간에는 톤당 2~7.5 달러

(이혜경, 2019). 미국 역시 중국과 같이 정책 시행과 오염물질 감축, 시장 자본 형성 간의 인과성 규명을 위해 다양한 실증 분석을 시도 중이다 (Dorsey, 2019). 중국, 미국과 같은 주요국의 정책 후속 평가 과정에서 인과성 규명의 중요성이 대두되고 있는 만큼, 국내 역시 현행 환경 정책을 엄밀한 환류 과정을 통해 평가할 필요가 있다. 이를 위해 정부와 학계의 지속적 관심이 필수적이다.

본 연구는 다음 두 가지 연구 질문을 설정하였다. 첫째, 수도권 대기의 SOx, NOx 농도는 총량제 시행 이후 감소하였는가. 둘째, 1차 배출권 할당 기간(2008~2013년)과 2차 배출권 할당 기간(2013~2017년)의 SOx, NOx 농도 감소량에 차이가 있는가. 이 두 가지 질문에 답하기 위해 총량제 시행과 대기 오염농도개선 간의 인과성 검증을 실시하였다. 연구 구성은 다음과 같다. 먼저 제1장 서론에서는 연구 배경과 연구 목적을 다룬다. 제2장에서는 국내 대기환경법의 변천과정과 총량제의 정책 환경을 살펴보고, 총량제 관련 기존 선행연구를 분석한다. 제3장은 연구 범위와 방법에 대해 다루며 분석 모델의 선정 이유와 변수 선정의 근거를 설명한다. 제4장은 분석 모델을 통해 도출한 결과에 대해 분석하고, 제5장은 분석 결과의 함의와 연구 한계를 다룬다.

제2절 연구 목적

본 연구의 목적은 수도권 총량제 시행과 수도권 대기오염물질농도 감소의 인과성을 고정효과모형을 활용한 이중차분방식으로 실증 분석하는 것이다. 이를 위해 정책 시행기간인 2003년부터 2019년까지의 전국 89개 도시대기 측정소의 월 별 SOx, NOx 농도 데이터를 수집하여 총량제 시행전후 농도 변화를 관찰하고자 하였다. 구체적으로, 1차 수도권

대기환경관리 기본계획 내 총량제 1차 할당을 실시한 2007년 7월 전후와 총량제 2차 할당을 실시한 2009년 7월 전후, 그리고 2차 수도권 대기환경 관리 기본계획을 실시한 2015년 12월 전후 수도권과 비수도권 대기의 SOx, NOx 농도변화를 이중차분방식으로 분석하는 것이 연구의 목적이다. 2007년 7월 기준 전후 비교는 지난 10년 간 실시한 총량제의 전반적 정책 효과성을 보기 위함이다. 2009년 7월 전후 비교는 배출허용총량 감소, 관리사업장 대상 조정(대기 2종 추가) 등 1차 할당 대비 규제를 강화한 2차 할당 기간이 수도권 SOx, NOx 농도를 더 효과적으로 저감하였는지 분석하기 위함이다. 마지막으로 2015년 12월 전후 비교는 대기관리권역확대 (광주시, 안성시, 여주시, 포천시 포함) 및 관리사업장 대상 조정(대기 3종 추가) 등 강화된 2차 계획 연도의 정책이 수도권 SOx, NOx 농도 저감에 더 효과적이었는지 분석하기 위함이다. 분석모형으로는 고정효과모형을 채택하였다. 고정효과모형은 횡단면 오차항이 상수항이고 시계열에 따른 개체별 변화가 나타날 때 사용하는 모형으로, 개체별 특성치를 통제할 수 있다는 장점이 있다. 연구를 통해 총량제 시행과 수도권 SOx, NOx 농도 변화의 인과성을 엄밀히 분석하고자 하는 만큼 개체 고유 특성 즉, 각 지역의 특성치를 통제할 수 있는 모형을 선정하였다.

본 연구는 다음 두 가지의 기여를 할 수 있다. 첫째, 기존 선행연구와 달리 총량제 시행 성과를 인과적으로 규명하여 정책 후속 평가에 엄밀성을 더한다. 총량제는 2020년부터 전국단위로 확대 실시되고 있으며 향후에도 우리나라의 주요 대기 환경정책이 될 것이다. 국가의 장기 정책인 만큼 명확한 환류과정을 기반으로 정책 성과를 제고해나갈 필요가 있다. 본 연구는 이러한 정책 개선 과정에 학문적 근거를 제공할 것이다. 둘째, 정책 후속 평가 과정 속 인과성 입증의 필요성을 역설한다. 기후 위기에 대한 정부와 시민사회의 문제의식이 증가하며 다양한 제도

적 대응책들이 강구되고 있다. 이에 따라 새로운 정책 시도를 요구하는 목소리는 커진 반면, 시행에 필요한 국가 재원은 여전히 한정적이다. 한정적 자원을 효율적으로 활용하기 위해서는 후속 평가를 통한 정책우선순위선별 과정이 필수적이다. 본 연구에서 활용한 준실험적 정책평가 방법론은 이러한 후속 평가 과정에서 정책의 기여 수준을 정량화할 수 있는 분석 방식이다. 이 연구를 통해 총량제의 시행 성과를 정량적으로 분석해내는 과정을 통해 국내 정책환류 과정 속 인과성 입증 과정이 필수적임을 시사하고자 한다.

제2장 정책 환경 및 선행 연구

제1절 국내 대기환경법의 변천

한국의 대기 환경법은 크게 세 단계로 발전해왔다. 가장 처음 제정된 법은 1963부터 1977년까지 시행한 공해방지법이다. 공해방지법은 대기오염, 수질오염, 소음 및 진동으로 인한 보건위생상의 위해를 방지하여 국민 보건의 향상에 기여하기 위해 제정되었다. 여기서 “공해”는 매연, 분진, 악취 및 가스와 화학적, 물리학적, 생물학적 요인에 의하여 하천을 오염하는 공장폐수, 사업장폐수 및 일반하수와 소음 또는 진동을 의미한다(국가법령정보센터, 1963). 그러나 공해방지법은 이미 배출된 오염물질에 대한 사후교정적 규제였기 때문에 근본적으로 소극적 대응이라

는 비판이 존재한다(고문현, 2009). 또한 당시 공해방지법은 경제개발이라는 시대적 소명으로 인해 정책적 우위를 점하지 못하였다. 그 결과 필요한 예산 및 규제력을 충분히 확보하지 못하였고, 1971년 개정 이후에야 공해법적 구속력을 가질 수 있었다(김동술, 2013).

1977년부터 1990년은 환경보전법의 시대였다. 경제개발 이후 환경오염에 대한 국민적 인식이 증가하였고 이러한 사회적 맥락에서 공해방지법을 개편, 강화한 환경보전법이 등장하였다. 동 법은 종합적이고 적극적인 환경문제 대응을 위해 환경영향평가제도와 같은 사전규제를 도입하였다는 특징이 있다(고문현, 2009). 또한 공해방지법에 비해 법적 구속력을 강화하고 시행규칙을 구체화하였다는 점에서 의의가 있으나 다양한 환경규제 방법(법적 규제, 보조금 규제, 부과금 규제) 중 오롯이 법적 규제에만 의존하였다는 한계가 존재한다(김동술, 2013). 그 후 1980년 환경청 신설, 1990년 환경청의 환경처 승격 및 환경정책기본법 제정 등 우리나라는 보다 적극적인 환경 행정체계 개편을 시작하였고 환경정책기본법을 중심으로 대기환경보전법, 수질환경보전법 등 6개의 개별법 역시 새롭게 제정하였다. 이 중 대기환경보전법은 사업장의 대기오염물질 배출허용기준, 자동차배출가스 규제 등을 기존의 환경법보다 구체적으로 규정하고 있다. 또한 2003년에는 수도권 지역의 심각한 대기오염 수준을 개선하기 위해 수도권 대기환경개선에 관한 특별법을 제정하였다. 동 법은 서울특별시, 인천광역시, 경기도 지역을 대상으로 사업장 총량관리제, 자동차배출가스의 억제를 위한 저공해자동차 보급, 특정경유자동차 관리 및 휘발성 유기화합물 배출 억제 등을 규정하였다. 그 중 사업장 총량관리제는 농도관리에 그쳤던 기존 배출허용총량제한의 한계를 보완하기 위해 출범한 총량 관리 정책으로 수도권 내 대상 사업장에 5년마다 총량관리 대상 오염물질의 배출허용 총량을 할당하는 방식으로 진행되었다.

2019년 이후에는 대기관리권역의 대기환경 개선에 관한 특별법을 제정하여 수도권지역뿐만 아니라 대기환경기준 초과 우려가 있는 타 지역에 대한 광역적 대기환경규제를 시행하였고, 기존의 수도권대기법은 타법 폐지되었다. 아래는 대기환경법 변천 과정을 요약 정리한 표다.

[표 1] 국내 대기환경법 연혁

시행 연도	법명	특징
1963~1977년	공해방지법	대기오염, 수질오염, 소음 및 진동으로 인한 보건위생상의 위해를 방지하여 국민보건 향상에 기여하기 위해 제정
		경제 개발이라는 시대적 소명으로 인해 환경법적 구속력 및 이행력 미비
1977~1990년	환경보전법	공해방지법에 비해 법적 구속력 강화, 시행규칙 구체화
		환경오염의 법적규제 측면만 강조하였다는 한계 존재
1990~현재	대기환경보전법	사업장의 대기오염물질배출 총량규제, 자동차배출가스 규제 등 보다 구체적인 규정 마련
2003~2019년	수도권 대기환경개선에 관한 특별법	서울특별시, 인천광역시, 경기도 지역을 대상으로 사업장 총량관리제, 자동차배출가스의 억제를 위한 저공해자동차 보급, 특정 경유자동차 관리, 휘발성 유기화합물 배출 억제 등을 규정
2019~현재	대기관리권역의 대기환경개선에 관한 특별법	대기환경 집중관리 대상 지역을 전국으로 확대하여 대기환경기준 초과우려가 있는 지역에 대한 광역적 규제 실시

제2절 사업장 총량관리제

본 절에서는 총량제의 도입 배경, 주요 내용 및 운영 현황에 대해 다루고자 한다. 총량제는 수도권대기법에 근거하여 2003년부터 2019년까지 수도권 지역 사업장을 대상으로 실시한 대기 오염물질 배출량 규제 정책이다. 우리나라는 1990년부터 대기환경보전법에 근거하여 전국 단위로 사업장 대상 배출물 농도규제를 실시해왔다. 그러나 2003년 국내 수도권 대기질이 OECD 국가 주요 도시 중 최악으로 기록되며 기존 방식인 농도규제 정책의 개선 필요성이 제기되었다(환경부, 2010). 당시의 농도규제 대기 정책은 배출총량을 제한하지 못해 저농도로 다량 배출되는 대기오염물질을 적법으로 인정하는 한계가 있었다. 또한 사업장 규모에 상관없이 일괄 적용되어 사업장 신설과 증설에 따른 배출량 증가를 제한하지 못하고, 사업장별 특성을 반영하지 못해 오염물질 저감 비용이 크다는 단점 역시 지적되었다. 이를 개선하기 위해 정부는 2003년 수도권대기법을 제정하여 2005년부터 시행하였고 2008년 대기법에 근거한 총량제를 본격 실시하였다.

총량제 대상으로는 수도권 지역 중 대기오염이 심각하거나 해당 지역 배출 대기오염물질이 수도권 대기오염에 큰 영향을 미친다고 인정되는 지역을 선정하였다. 2005년 시행 당시에는 서울특별시 전 지역과 옹진군을 제외한 인천광역시 전 지역, 그리고 경기도 일부 지역이 선정되었고 2015년 2차 계획 연도 시행 후 광주시, 안성시, 여주시, 포천시가 추가되었다. 본래 2차 계획 연도 시행 당시 규제 대상 지역을 연천군, 가평균, 양평군까지 확대할 예정이었으나 세 지역의 반발로 대상 권역에서 제외 조치하였다.

[표 2] 수도권 대기관리권역

지역구분	지역범위
서울특별시	전 지역
인천광역시	옹진군 (옹진군 영흥면은 제외)을 제외한 전 지역
경기도	고양시, 과천시, 광명시, 구리시, 군포시, 김포시, 남양주시, 동두천시, 부천시, 성남시, 수원시, 시흥시, 안산시, 안양시, 양주시, 오산시, 용인시, 의왕시, 의정부시, 이천시, 파주시, 평택시, 하남시, 화성시, **광주시, 안성시, 여주시, 포천시**

주: 굵은 표시는 2005년 시행령 제정 당시에는 미포함되었으나 2015년 재정 후 포함된 지역 의미

수도권대기법 시행에 따라 환경부 장관은 제1, 2차 수도권대기환경관리계획(이하, '제1, 2차 계획')을 통해 배출원별 대기오염물질 배출허용총량, 총량관리 대상이 되는 물질의 범위, 총량 할당 기준 등 세부 이행계획을 수립하였다. 제1차 계획 기간의 관리 대상 물질은 질소산화물(NOx)과 황산화물(SOx)이었고 이후 제2차 계획기간인 2018년 먼지(TSP)[2]가 추가되었다. 배출허용 총량 할당의 경우 배출시설별, 연도별로 산정되며 관리 사업장의 5년간 배출량, 최적방지시설기술[3] 등을 종합적으로 고려하여 총량 할당 계수와 할당 계수 단위량의 곱으로 산출한다. 본 산출 과정을 바탕으로 제1차 계획에서는 106개 사업장에 질소산화물 65,308톤, 59개 사업장 황산화물 22,809톤을, 제2차 계획에서는 250여 개 사업장에 질소산화물 약 40,000톤, 80여 개 사업장에 황산화물 약 12,000톤을 할당하였다. 이 할당량은 대상 사업장 배출량의 평균 60% 수준이다. 특히 1차 계획 기간 초기 할당량은 배출량의 2배를 상회하며 과다

2) 먼지는 입자 크기에 따라 총먼지(Total Suspended Particle, TSP), 미세먼지(PM_{10}), 초미세먼지(PM2.5)로 나뉜다. 총먼지는 입자 지름이 50㎛ 이하, 미세먼지는 10㎛ 이하, 초미세먼지는 2.5㎛ 이하인 먼지이다. 총량제는 이 중 총먼지를 규제 대상으로 삼았다.

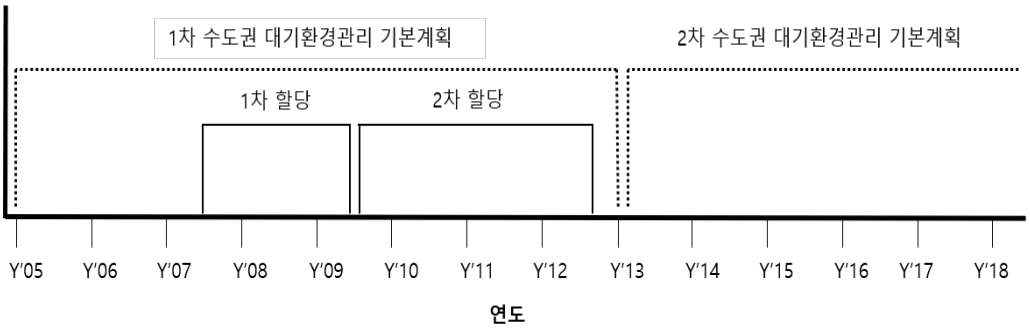
3) 최적방지시설기술(Best Available Control Technology, BACT)은 「대기환경보전법」 제2조제10호에 따른 대기오염방지시설 중 현재 사용 중인 기술과 미래의 기술 발전 가능성을 고려하여 적용 가능한 환경오염물질의 배출저감기술 중 우수한 효율의 기술을 의미한다(국가법령정보센터, 2007).

할당문제가 제기되기도 하였다(박민하, 2019; 이혜경, 2019).

총량제의 대상 업체 선정 기준은 사업 진행과 함께 지속적으로 강화되었다. 제1차 계획 기간인 2007년 7월에는 1종 사업장 중 NOx, SOx 배출량이 각각 30톤, 20톤을 초과하는 사업장만을 대상으로 하여 1차 할당을 진행하였으나 이후 1·2종 사업장 중 NOx 또는 SOx 배출량이 4톤을 초과하는 사업장으로 할당 대상이 확대되었고, 이에 따라 2차 할당을 실시하였다. 제2차 계획기간인 2015년 12월에는 배출량이 4톤을 초과하는 1~3종 사업장 및 대기관리권역 확대(광주시, 안성시, 여주시, 포천시 추가)를 통해 규제 대상 범위를 더욱 확장하였다. 제1차 계획에서는 NOx 배출 106개 사업장과 SOx 배출 59개의 사업장을, 제2차 계획에서는 250여 개와 80여 개 사업장을 각각 선정하였다. 사업 시행 당시의 각 지역 1~3종 사업장의 개수는 자료의 한계로 알 수 없으나 통계청 공시 자료에 따르면 2015년 기준 수도권의 1~3종 사업장은 총 501개였다. 이에 따라 2013년 실시한 2차 계획 기준 약 64%의 사업장이 총량제에 참여한 것을 알 수 있다[4]. 정부는 할당량을 초과한 사업장에 대해서는 초과 과징금을 부과하는 한편 총량제 대상 사업장에 최적방지시설 및 굴뚝 자동측정기 설치 및 운영에 필요한 재정과 기술을 지원하는 등 사업장의 규제 이행을 독려하기 위한 인센티브를 제공하였다. 또한 배출권 거래제와 연계하여 사업장 배출허용치 잉여분을 배출 총량 초과 사업장이 구매할 수 있도록 하였다. 정부 보고서는 총량제의 지속적인 강화와 기술 지원을 통해 대상 사업장의 배출량이 감소하였고 이에 따라 수도권 대기질 역시 개선되었을 것이라 평가한다(이혜경, 2019). 아래 [그림 1]과 [표 3]은 위 내용을 요약 정리한 것이다.

4) 단, 이는 NOx와 SOx 모두 총량제 규제 대상이 된 사업장은 고려하지 않은 추산치이다.

[그림 1] 총량제 할당 시행 연도



[표 3] 제1차 계획과 제2차 계획 비교

	제1차 계획	제2차 계획
대상물질	NOx, SOx	NOx, SOx, TSP
대상사업장	연간 배출량 4톤 초과 1·2종 사업장	연간 배출량 4톤 초과 1~3종 사업장 (단, 먼지의 경우 연간 0.2톤 초과 사업장)
배출허용총량	지역배출허용총량 범위 내에서 할당	최적방지시설 기준을 강화하여 감축
할당방식	배출허용총량 범위 내에서 무상할당	단계적 유상할당 지향

[표 4] 제1차 계획과 제2차 계획 할당량 대비 배출량

(단위: %)

	제1차 계획					제2차 계획				
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
NOx	45.5	48.1	64.2	69.6	83.5	91.0	71.9	62.5	65.6	60.6
SOx	47.1	57.3	58.2	61.4	59.3	98.7	70.5	85.4	85.4	68.4

주: 1단계(2008년)부터 총량제 참여 중인 사업장(NOx 80개, SOx 21개)을 대상으로 한 이혜경(2019)의 조사자료 바탕으로 저자 재정리

제3절 선행연구

총량제 성과 관련 선행연구는 크게 대기 오염물질 농도 저감 관점과 배출권거래제도 관점에서 진행되고 있다. 선행연구들은 정책의 성공 여부를 공통적으로 수도권 대기 오염물질 농도의 저감 여부에 따라 평가하고 있다. 박민하, 김용표(2019)는 정부 보고서 자료를 바탕으로 총량제 시행 이후 수도권의 NOx 배출량이 감소하였다고 평가한다. 그러나 감축의 원인으로 총량제 시행이 아닌 NOx 배출량이 큰 발전시설의 연료 사용량 변화를 주목하고 있으며, 2014년 경기지역 복합화력 발전시설의 LNG 연료 사용량 감소를 근본적 요인이라 주장한다. 또한 수도권 배출량 대비 정책 대상 사업장의 배출량 비율이 낮아 (2007~2017년 평균 NOx 8.5%, SOx 28.0% 차지) 총량제 시행에 유의미한 저감효과가 없었을 것이라 분석한다. 본 연구는 총량제 시행성과에 대한 정부 평가 자료를 면밀히 분석하고, NOx 주 배출원인 발전시설 배출량 변동에 주목하

였다는 점에서 연구적 의의가 있다. 하지만 주장한 NOx 배출량 감소의 요인과 배출량 간의 인과성 실증이 부재하다는 한계가 존재한다. Jiang et al.(2020)은 중국과 한국의 경제성장률에 따르는 지역별 오염물질 농도를 비교하였고 한국의 수도권 대기 오염농도 증가율이 비수도권에 비해 낮았음을 실증한다. 다만 이 결과는 수도권 특별법 하 시행한 다양한 세부 정책의 전반적 효과를 의미하며 총량제만의 정책 효과를 시사하지는 않는다. 이혜경(2019)은 1차 총량제 대상 사업장과 비수도권 TMS 장치 부착 사업장의 2007~2017년 배출량 저감 추이를 비교하여 수도권 지역의 NOx 배출이 비수도권에 비해 대폭 감소하였음을 주장한다. 반면 SOx 배출의 경우 수도권 지역과 비수도권 지역이 흡사한 감소율(2007년 대비 2017년 감소율 각 7%, 8%)을 보이는데 이는 2009년 영흥화력 3～4호기 가동, 2015～2016년 영흥화력 5～6호기 가동, 저유가로 인한 평택발전 가동률 증가 때문이라고 지적한다. 본 보고서는 대상 사업장 배출구의 오염물질농도 추이에 대한 기술통계 분석방식으로 작성되어, 외생변수들의 영향을 제외한 총량제 순효과를 보여주지 못하는 한계가 있다. 이러한 한계는 총량제 정책 효과를 다룬 다른 정부 보고서에서도 동일하게 관찰된다(환경부, 2007; 환경부, 2013).

배출권거래제도 관점에서는 주로 배출허용량 과다 할당에 대한 비판이 존재한다. 권태형(2011)은 규제 대상 사업장의 배출권 과다 할당이 규제자와 피규제자간의 정보 비대칭성으로 인해 발생하였다고 분석한다. 이러한 정보 비대칭성은 자가측정 방식으로 배출량을 산정 및 보고하는 TMS 미부착 사업장의 경우 더욱 두드러진다. 박민하, 김용표(2019)는 1, 2차 할당 기간의 NOx, SOx 거래량이 할당량의 10%도 되지 않음을 지적하며 과잉 할당이 정책 시행의 본질을 훼손했음을 주장한다. 또한 NOx, SOx 최대 거래가가 0.324$/kg, 0.269$/kg이었으며 이는 동일시기 미

국의 배출거래 시장 RECLAIM[5] (REgional Clean Air Incentives Market) 평균단가인 31.942$/kg, 81.677$/kg에 비해 600배 이상 낮은 수치임을 비판하였다. 배출허용량 과잉 할당으로 인한 규제 유인 약화는 정부 보고서에서도 동일하게 지적되는 문제이다(이혜경, 2019).

한국의 총량제와 비슷하게 지역 단위 대기 오염농도 규제의 전국 확장을 실시 중인 국가는 중국, 미국 등이 있는데 이 중 중국에서 최근 정책 순효과 관찰을 위한 실증분석이 활발히 시도되고 있다. Wang K. et al.(2019)는 2012년 중국의 대기환경기준(GB3095-2012) 강화와 강화기준 적용 지역의 순차적 확장이 지역 미세먼지와 SOx 농도 변화에 주는 영향을 이중차분법으로 분석하였다. 동 정책은 파일럿 프로그램으로 2012년 베이징, 톈진, 허베이성 73개 지역에서 최초 시행되었으며 그 후 주요 환경 보호 대상 도시 113개, 현(县)단위 지역, 국가 전체로 단계적 확대 시행되었다. 저자들은 최초 정책 시행지 50개 지역을 처치집단, 그 외 53개 지역을 통제집단으로 선정하여 대기질 변화를 이중차분분석을 진행하였고 그 결과 대기환경기준 강화가 최초 정책 시행지 미세먼지와 황산화물 농도를 단장기적으로 감축시켰음을 보였다. 본 논문 결과에 따르면 강화된 대기환경기준을 국가 전체를 대상으로 확장한 중국 정부의 결정은 합리적인 것으로 판단된다. Wang W. et al. (2022)는 2013~2017년 시행된 대기오염방지시행계획(Action Plan for Air Pollution Prevention and Control;APAPPC)의 주요 관리 도시로 선정된 베이징, 톈진, 허베이성(Beijing, Tianjin, Hebei; BTH), 양쯔강 삼각주(Yangtze River Delta Region; YRD), 진주강삼각주(Pearl River Delta Region; PRD) 지역의 정책 전후 미세먼지와 NOx, SOx 등 주요 대기오염물질 농도를 이중

5) 미국 캘리포니아 지역의 대기 오염개선을 위해 1993년 도입된 이산화황(SO2) 및 NOx 거래제도이다.

차분분석하였다. 실증 분석 결과 규제 도시들은 비규제 도시에 비해 미세먼지와 주요 대기오염물질 농도가 저감 되었다. Wang K. et al.(2019)와 Wang W. et al.(2022)가 중국 대기 환경정책 시행지역과 비시행 지역을 통제집단과 처치집단으로 구분하여 정책 효과성을 준실험적 정책평가 방식으로 관찰하였다는 점은 본 연구의 가능성을 시사한다. He et al.(2016)은 2008년 베이징 올림픽 직전 실시한 단기 대기환경 규제 정책의 효과성을 사망률과 연관 지어 분석한다. 중국 정부는 올림픽 기간 맑은 대기질을 유지하기 위해 베이징과 인접 도시의 석탄화력발전소, 이동형 오염원, 천연가스 가격 등에 대한 환경 규제를 실시한다. 도구 변수를 활용한 실증 분석 결과 대기 중 PM10 농도 10% 감소는 사망률을 8% 감축시키는 것으로 나타났다. 위 연구는 기후변수를 주요 통제변수로 설정하고, 지역 측정소 단위 패널 자료를 구축하였다는 점에서 본 연구의 가능성을 시사한다.

국내 농도 저감 관점 연구는 아직 대상 사업장 배출구의 배출물질 농도 저감 관찰 수준에서 진행되고 있다. 이와 같은 접근은 정책 시행이 대상 사업장 배출량 저감에 미치는 영향을 명시적으로 보일 수 있으나, 감축 정도가 실제 대기질 개선에 주는 영향을 포착할 수 없다는 한계가 있다. 또한 배출량 및 대기질에 영향을 주는 다양한 사회경제학적, 기후적 요인들을 고려하지 못해 정책 시행과 오염물질 농도 간 인과성을 주장할 수 없다. 이러한 문제의식을 바탕으로 본 논문은 총량제의 정량적 효과를 이중차분법으로 실증 분석하였다. 구체적으로, 1차 수도권 대기환경 관리 기본계획 내 총량제 1차 할당을 실시한 2007년 7월 전후 수도권과 비수도권 대기의 SOx, NOx 농도변화와 총량제 2차 할당을 실시한 2009년 7월 전후 수도권과 비수도권 대기 SOx, NOx 농도변화, 그리고 2차 수도권 대기환경 관리 기본계획을 실시한 2015년 12월 전후

를 이중차분법으로 분석하였다. 이를 통해 총량제의 단장기적 정책효과를 살펴보았다.

[표 5] 선행연구 요약

저자 및 연도	주요 내용	한계
박민하, 김용표(2019)	수도권 배출량 대비 정책 대상 사업장의 배출량 비율이 작아 총량제 시행에 유의미한 저감 효과가 없음	대상 사업장 배출 오염물질량에 대한 단순 비교로 정책시행의 순효과를 보이지 못함
이혜경(2019)	총량제 시행 후 NOx는 유의미하게 감소, SOx는 영흥화력발전소로 인해 정책효과 미비	
Jiang et al.(2020)	중국, 한국의 경제성장률에 따른 지역별 SOx, NOx 농도 비교 결과 한국의 수도권이 비수도권에 비해 오염물질농도 증가량이 적음	총량제의 단일 효과를 보이지 못함
권태형(2011)	1차 총량제는 배출량을 과잉할당하였으며 이는 피규제자와 규제자 간 정보비대칭성에 의함	구체적인 개선방안 미제시
K. Wang et al.(2019)	GB3095-2012의 단계적 강화 및 확산은 지역 미세먼지 및 황산화물을 저감 시킴	국내 데이터를 활용한 분석 필요
W. wang et al.(2022)	대기오염방지시행계획 대상 지역의 오염물질농도 감소 실증분석	
He et al.(2016)	베이징 올림픽 시행 전 베이징 및 인근 도시에 대한 대기환경 규제는 기인성 사망률을 낮춤	

제3장 연구 범위와 방법

제1절 연구 범위

분석 대상은 대기오염물질 농도 측정소와 기후 측정소가 공통으로 존재하는 지역을 선정하였다. 기후 측정소 존재 여부를 기준으로 삼은 이유는 기온, 강수량과 같은 기후 변수가 대기 오염물질 농도에 영향을 주는 주요 인자이므로(Wang et al. 2019; He et al. 2016; 배정환, 김유선, 2016) 인과성 분석 시 통제하기 위함이다. 대기오염물질 측정소 존재 여부는 환경부「대기환경연보」의 측정소별 오염물질 농도자료의 도시 대기 측정망 자료를 통해 확인하였다. 기후 측정소의 위치는 기상청의 기상자료개방 포털자료를 활용하였다. 「대기환경연보」는 환경부 및 지방자치단체에서 운영 중인 574개의 일반대기오염 측정망을 통해 1시간 주기로 연속 측정한 농도의 연평균 수치를 보여준다. 일반대기 오염망은 측정 목적에 따라 도시 대기 측정망, 도로변 대기 측정망, 국가 배경농도 측정망, 교외 대기 측정망으로 구분할 수 있다. 이 중 도시지역의 평균 대기질 농도를 파악하여 환경 기준 달성 여부를 판정하는 도시 대기 측정망이 473개소로 가장 많아 본 논문의 자료로 활용하였다.[6)]

선정 결과 수도권에서는 3개의 도시와 35개의 측정소를, 비수도권에서는 16개의 도시와 44개의 측정소를 선별하여 총 19개 도시, 89개의 측정소를 연구 대상으로 지정하였다. 측정소 단위로 관찰 지역을 세분한 이유는 개체 수를 늘려 다량의 패널자료를 확보하고 이를 통해 분석 결과의 신뢰도를 높이기 위함이다. 시계열은 2007년부터 2019년까지

6) 2020년 12월 말 기준

로 각 연도 월 단위 자료를 수집하여 장기 패널자료를 구축하였다. 3차 할당이 이루어진 2019년 이후는 할당 이후의 시계열이 짧으며 2020년 초 코로나 발발로 인한 공장 가동 일시 중지, 국내외 이동량 감소 등으로 대기질이 일시적으로 개선되었을 가능성이 있어 분석 범위에서 제외하였다. 위와 같은 기준으로 변수별 약 18,156개(17*12*28)의 패널자료를 구축하였다.[7)]

7) 다만 결측치(missing value)가 일부 존재하여 실제 수집 데이터는 이보다 적다.

[표 6] 분석대상 측정소 및 지역

권역	도시	오염물질 측정소 위치
수도권	서울	서소문동, 효제동, 면목동, 용두동, 불광동, 대흥동, 당산동, 사당동, 신림동, 대치동, 시흥동, 천호동, 번동, 길음동, 한남동, 구의동, 성수동, 남가좌동, 구로동, 반포동, 화곡동, 방이동, 신정동, 상계동
	수원	신풍, 영통, 천천
	인천	신흥, 숭의, 부평, 연희, 석남, 송해,논현, 검단
비수도권	부산	광복동, 대연동, 덕천동, 장림동, 전포동, 연산동, 대저동, 기장읍, 부곡동
	대구	수창동, 이현동, 대명동, 노원동, 만촌동, 지산동, 태전동
	광주	농성동, 두암동
	대전	읍내동, 문창동, 구성동, 문평동, 성남동
	울산	성남동, 부곡동, 여천동, 야음동, 신정동, 덕신리, 화산리, 대송동, 무거동, 삼산동
	창원	명서, 웅남, 경화, 회원, 봉암
	구미	공단동, 원평동, 형곡동
	서산	독곶리, 동문동
	포항	장흥동, 대도동
	여수	월내
	목포	용당
	진주	상봉
	춘천	중앙로
	강릉	옥천동
	원주	중앙동
	청주	송정동

주: 측정소 명칭은 2019년을 기준으로 한다.

제2절 변수 선정

총량제 실시와 수도권 대기 오염물질 농도 간 인과관계를 살펴보기 위해서는 오염도에 영향을 주는 다른 인자들을 적절히 통제할 필요가 있다. 본 연구에서는 대기오염물질 농도 영향 인자를 크게 기후요인와 사회경제요인으로 구분하였다. 사회경제요인의 경우 한 경제의 발전 정도와 대기오염도는 밀접한 상관성이 있고, 기후요인 역시 대기오염도 변화에 영향을 줄 수 있어 통제 변수로 선정할 필요가 있다.

먼저 기후인자의 경우 선행연구를 참고하여 월평균 기온(Liu et al., 2020; Wang et al., 2019; He et al., 2016)과 월평균 강수량(Liu et al., 2020; He et al., 2016; 배정환, 김유선, 2016)을 통제 변수로 선정하였다. 사회경제인자 선정과정에서는 수도권 대기환경청의 SOx, NOx 배출원 자료를 활용하여 오염물질별 최대 배출원의 배출량을 반영할 수 있는 변수들을 선정하여 통제해주었다. SOx의 최대 배출원은 에너지산업이며 그 중 석탄의 배출량은 여타 에너지원에 비해 압도적으로 많다. 따라서 각 지역 석탄화력발전소 발전량을 SOx 농도에 대한 통제변수로 선정하였다. NOx의 최대 배출원은 도로이동오염원이다. 따라서 지역별 자동차등록대수를 NOx 농도에 대한 통제변수로 선정하였다. 도로이동오염원에서 기인한 NOx 배출량의 대리변수로는 지역별 자동차 주행거리가 더 직접적인 지표일 것이나 2012년부터 자료가 존재하는 한계가 있어 자동차등록대수로 대리하였다. 선행연구에 따르면 지역의 인구 및 경제변수는 대기오염물질 농도와 직접적인 상관관계가 있다(Jiang et al., 2020; Seo et al., 2018; Stem & Van Dijk, 2017; Tong et al., 2016; M.Vrekoussis et al., 2013). 따라서 지역별 1인당 GRDP를 통제변수로 추가하였다. 석탄화력발전소 발전량, 월평균 자동차 등록대수, 1인당 실질

GRDP는 도시 및 지역 단위 자료가 부재하여 모두 도단위 자료를 활용하였다. 이는 본 연구의 한계일 수 있으나 지역의 발전량과 자동차수, GRDP는 평균적으로 해당 지역이 위치한 권역과 그 증감률이 흡사하므로 대리변수로 활용하였다. 아래는 선정한 변수들의 기술 통계량을 정리한 표다.

[표 7] 변수 기술 통계량

Variable	Obs	Mean	Std. dev.	Min	Max
SOx	17,685	0.0056895	0.0029836	0.001	0.032
NOx	17,636	0.0254266	0.009735	0	0.07
lngdprealper	18,156	11.36931	0.8755496	9.690604	12.98523
lngeneration	18,156	3.511708	6.364687	0	15.75109
lncar	17,684	14.02027	0.7001703	12.48496	15.56744
lntem	16,612	2.422807	0.9459857	-2.302585	3.367296
lnpre	18,055	4.103752	1.210266	-2.302585	7.030857

[표 8] 변수 설명

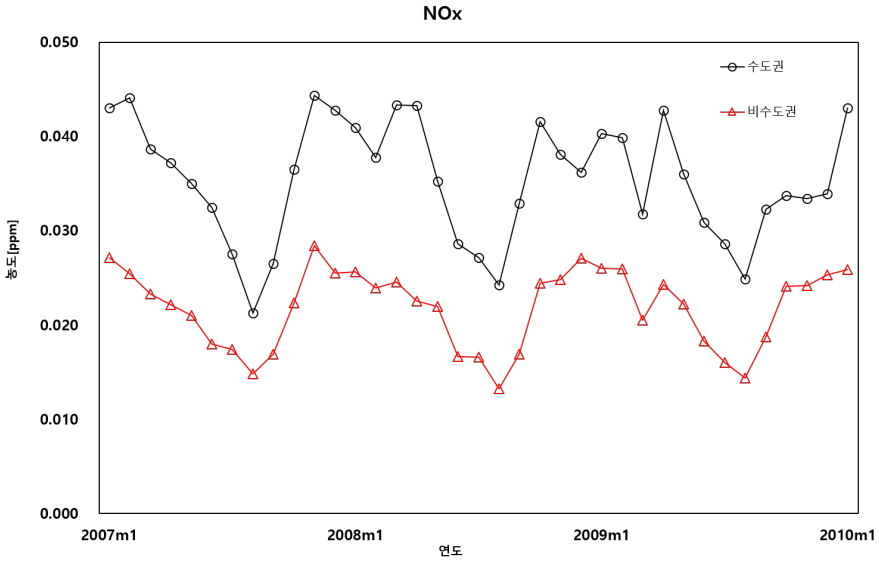
변수 종류	변수명	변수설명	선행연구
종속	SOx	측정소 월평균 SOx 농도	-
	NOx	측정소 월평균 NOx 농도	-
독립(더미)	Effect1	1차 총량제 시행여부	-
	Effect2	2차 총량제 시행여부	-
통제	lngeneration	석탄화력발전소 총발전량	He etal., 2016
	lncar	월평균 자동차 등록대수	Wang et al., 2022 임준현 외., 2018 배정환, 김유선 2016 He et al. 2016 Almond et al. 2009
	lngdprealper	1인당 실질 GRDP	Wang et al., 2022 He et al., 2016 Almond et al., 2009
	lntem	월평균 기온	Wang et al., 2019 He et al., 2016
	lnpre	월평균 강수량	He et al., 2016 배정환, 김유선, 2016

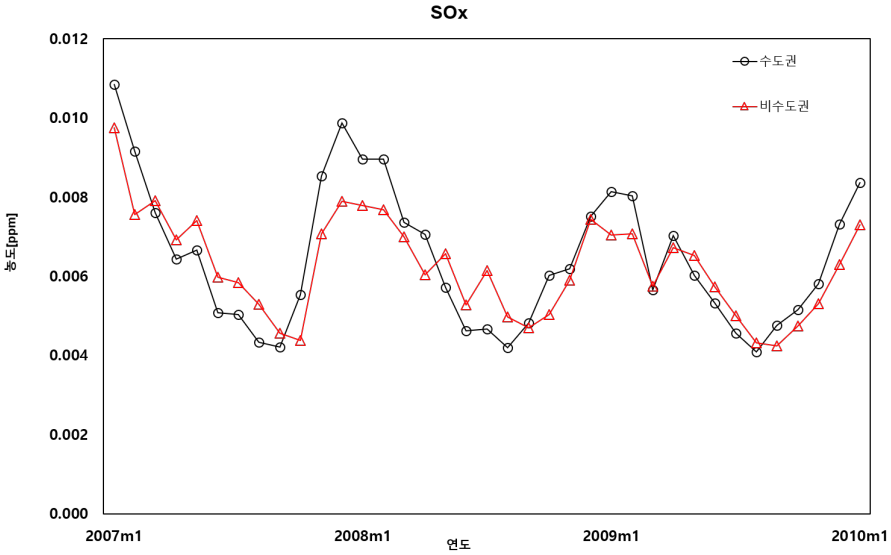
제3절 연구 방법

본 연구의 목적은 수도권과 비수도권의 대기 오염물질 농도비교를 통해 해당 정책의 시행 효과를 인과적으로 실증하는 것이다. 이를 위해 고정효과모형을 활용한 이중차분분석법(Difference in Difference, DID)을 사용하였다.

이중차분분석은 정책 시행에 따른 인과적 효과를 측정하기 위해 널리 활용되는 준실험 연구설계 기법이다. 본 기법을 활용한 대표적인 연구로는 이민자 증가와 국내 노동자의 실업문제를 다룬 연구, 최저임금 제도와 실업률에 관한 연구(Card, 1990; Card and Kruger, 1994)가 있다. 인과추론의 가장 중요한 쟁점은 설명변수의 외생성(exogeneity)을 확보하는 것인데 이를 위해 식별가정(identification assumption)에 대한 검정이 필요하다(손호성, 이재훈, 2018). 이중차분분석 추정량의 식별조건은 평행추세 가정(Common Trend Assumption)에 대한 검증을 통해 만족 여부를 파악할 수 있다. 이 가정은 “만약 정책이 시행되지 않았다면 정책 수혜 집단과 정책 비수혜 집단의 결과 변수의 값이 정책 시행 전후로 비슷한 추세를 보였을 것”이라는 가정이다(손호성, 이재훈, 2018). 즉, 총량제 시행 전 연도 대상 집단인 수도권과 비대상 집단인 비수도권의 대기 오염물질 농도가 비슷한 추세를 보여야만 이중차분법을 적용할 수 있으며, 이를 통해 정책 시행이 수도권 SOx, NOx 농도 저감에 끼친 인과적 영향을 확인할 수 있는 것이다. 따라서 아래 [그림 3]과 같이 2007년 1월부터 2010년 1월까지 SOx, NOx 농도변화를 살펴보았고 두 오염물질 모두 1차 할당 시행 직전 연도인 2007년 7월 전까지 동일추세를 가지는 것으로 확인되었다.

[그림 2] 평행추세가설 검정





위와 같은 추세선 비교는 두 오염물질 농도의 평행추세 여부를 가시적으로 확인할 수 있다는 장점이 있으나 수치화하여 분석할 수 없다는 한계가 있다. 따라서 1차 할당 최초 시행 연도인 2007년 이전까지의 각 연도를 기준으로 이중차분분석을 하여 평행추세가설 만족 여부를 추가적로 검증하였다. 만약 오염물질 농도와 2007년 이전 연도 간 통계적으로 유의한 상관관계가 존재한다면 2007년 이후 분석값은 정책 시행 여부뿐만 아니라 연도 특성 또는 교란변수(compound factor)에 영향을 받았을 가능성이 있다. 각 연도 분석 결과 SOx의 경우 2005년부터 정책 시행 더미와 연도 교차항이 오염물질 농도와 5~10% 유의수준에서 양의 상관관계를 가졌다. 반면 NOx의 경우 정책을 실시한 2007년 7월 이후인 2008년부터 10% 유의수준에서 음의 상관관계를 가졌다.

위 결과에 따르면 2007년 7월 이후 SOx 농도변화는 정책 시행 여부가 아닌 교란변수에 영향을 받았을 수 있다. 반면 NOx 농도는 2007년 이전에는 유의한 상관관계가 포착되지 않았고, 정책 시행 이후인 2008년부터 음의 상관관계가 포착되어 동일 추세 가정이 성립한다. 따라서 연구의 초기 설계와 달리 NOx만을 종속변수로 채택하여 이중차분 분석을 하였다.

[표 9] 이전 연도 이중차분분석

Policy	Year	*SOx (ppm)*	*NOx (ppm)*
N	2004	0.000519 (0.0004279)	-0.0021238 (0.0013026)
N	2005	0.0006786** (0.0003119)	-0.0002755 (0.0009564)
N	2006	0.0006282** (0.000264)	-0.0002821 (0.0008104)
N	2007	0.0004345* (0.0002386)	-0.0006071 (0.0007299)
Y	2008	0.0004169* (0.0002229)	-0.0011299* (0.0006802)

*** p <0.001, ** p <0.05, *p <0.1

고정효과모형은 아래 [식 1]과 같다. Y와 X는 각각 종속변수와 설명변수이며 μ_i는 개별효과, $\epsilon_{i,t}$는 고유오차로 구분한다. 이 모형은 변수 간 [식 1]의 관계가 성립하고 독립변수가 $\epsilon_{i,t}$에 대해서는 강외생적이지만 개체 고유특성을 의미하는 μ_i와는 상관될 수 있음을 인정한다. 즉 μ_i를 횡단면 특성에 따른 상수항 차이로 취급하여 패널 개체 간 차이를 비관측된 오차로 흡수한다. 본 연구는 서로 다른 지역 내 관측소를 개체로 선정하여 지역 및 관측소 시간 불변 특성을 통제할 필요가 있으므로 개체 고유특성과의 상관성을 인정하는 고정효과모형을 선택하였다. 모형의 적절성을 높이기 위해 Hausman 검정을 활용하여 고정효과모형과 확률효과모형 중 어느 모형이 추정량 일치성이 높은지 추가로 확인하였다. 분석 결과 종속변수와 오차항의 공분산이 0이라는 귀무가설을 유의수준 1%로 기각하여 고정효과모형의 추정량 일치성이 더 높았고 따라서 고정효과모형을 최종 채택하였다.

$$Y_{i,t} = \alpha + \beta X_{i,t} + \mu_i + \epsilon_{i,t}$$ [식 1]

고정효과모형을 활용하여 이중차분분석을 시행하기 위해 종속변수에 지역과 월 더미변수의 교차항을 포함하였다. 본 연구에 최종적으로 사용된 분석모형은 [식 2]와 같다. 아래 [식 2]의 β_2가 정책시행의 순효과를 포착하는 항이다.

$$Y_{i,t} = \alpha + \beta_1 year_t + \beta_2 Effect_{i,t} + \beta_3 X_{i,t} + \mu_i + \epsilon_{i,t}$$ [식 2]

제4장 연구 결과와 고찰

제1절 연구 결과

연구 결과는 다음과 같다. [표 9]의 (1), (2) 열은 1차 할당 시행 후 NOx 농도의 변화를 보여주며 (3), (4) 열은 2차 할당 시행 후의 NOx 농도 변화를 보여준다. (5), (6) 열은 2차 계획 연도 실시 후 NOx 농도 변화를 보여준다. (1), (3), (5) 열은 통제변수를 제외하였을 경우의 결과값이며 (2), (4), (6) 열은 통제변수를 추가하였을 때의 결과값이다. 통제변수를 추가하기 전과 후 정책 시행 결과값의 유의수준과 상관계수가 일정한 것으로 보아 본 연구 결과가 일정 수준의 강건성을 확보한 것을 알 수 있다.

(1), (2) 열의 값이 보이듯 1차 할당 시행 후 NOx 농도는 감소하였다. 통제변수인 기온, 강수량의 경우 유의수준 1% 수준에서 음의 상관관계를 보였다. 1인당 GRDP의 경우 NOx와 1% 수준에서 강한 양의 상관관계를 보였다. 2차 할당 시행 후의 NOx 농도변화 분석 결과는 1차 할당과 동일하다. NOx 농도는 정책 시행 여부와 유의수준 1% 수준에서 음의 상관관계를 가졌다. 통제변수인 1인당 GRDP는 유의수준 1% 수준에서 양의 상관관계를 가졌으며 기온과 강수량은 1차 할당과 동일하게 1% 유의수준에서 음의 상관관계를 보였다.

[표 10] 총량제 효과 분석

NOx (ppm)	*1차 할당 기간*		*2차 할당 기간*		*2차 계획 연도*	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Effect1	-0.0020*** (0.0002)	-0.0021*** (0.0001)	-0.0030*** (0.0002)	-0.0032*** (0.0002)	-0.0030*** (0.0002)	-0.0036*** (0.0002)
lngdprealper		0.0104*** (0.0011)		0.0103*** (0.0011)		0.0103*** (0.0011)
lngeneration		0.0001 (0.0001)		0.0001*** (0.0001)		-0.0000 (0.0001)
lncar		-0.0001 (0.0002)		-0.0001 (0.0002)		-0.0002 (0.0002)
lntem		-0.0014*** (0.0001)		-0.0014*** (0.0001)		-0.0015*** (0.0001)
lnpre		-0.0004*** (0.00008)		-0.0005*** (0.0008)		-0.0004*** (0.0001)
Constant	0.0301*** (0.0006)	-0.0838*** (0.0116)	0.03010*** (0.0006)	-0.1068*** (0.0146)	0.0301*** (0.0005784)	-0.1068*** (0.0146)
City FE	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Time FE	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Observations	17,636	16,084	17,636	16,084	17,636	16,084
R^2	0.1845	0.3990	0.1668	0.3917	0.2272	0.3748

*** p <0.001, ** p <0.05, *p <0.1

(5), (6) 열은 총량제 2차 계획 연도 시행 이후의 NOx 농도 변화량을 보여준다. 2차 계획 연도에는 대기관리권역 확대, 대기 3종 사업장 추가 조치 등 1차 계획 연도 대비 강화된 대기 정책이 실시되었다. 2차 계획은 2013년 12월 수립되었으나 실제 법령 개정에 따른 정책 실시는 2015년 12월에 이루어져 본 연구에서는 출범 연도가 아닌 시행 연도를 기준으로 분석하였다. 정책 시행 이후 NOx 농도는 유의수준 1%에서 감소하여 1차 계획 연도 분석과 동일한 결과를 보였다. 통제변수인 월평균 강수량 및 월평균 기온 역시 1% 수준에서 음의 상관관계를 가져 1차 계획 연도와 동일한 결과를 보였다. 강수량 및 기온과 오염물질 농도가 음의 상관관계를 갖는 것은 배정환, 김유선(2016)의 연구와도 일치한다.

제2절 결과 분석

총량제 시행에 따른 수도권 NOx 농도 변화 분석 결과, 동 정책의 시행과 수도권의 NOx 저감은 통계적으로 유의하게 음의 관계를 가졌다. 또한 1차 할당, 2차 할당, 2차 계획 연도를 거쳐 정책이 강화됨에 따라 농도 감소치가 -0.0021ppm, -0.0032ppm, -0.0036ppm으로 증가하여 정책의 강화가 대기질 개선에 긍정적인 영향을 준 것을 알 수 있다. 이는 2007~2019년의 NOx 농도 최댓값과 비교하였을 때 3~5%의 감소에 해당한다. 농도 최솟값과 비교한다면 감소치는 21~36%까지 증가한다. 또한 농도 감소치가 정책 시행에 따라 감소한 것으로 보아 1차 계획 연도에서 지속적으로 제기되어왔던 배출권 과잉 할당과 참여 기업 수 부족의 문제가 2차 계획 연도에서 일부 해결되었음을 알 수 있다. 실제로 수도권 내 총량제 참여 대형 대기 사업장은 2007년 대비 2017년 2배가량 증가하였으며, 배출권 할당량도 배출량 대비 평균 70% 수준으로 1차 계획 기간

에 비해 감소하였다. 다만 앞서 언급한 감소치는 기존 NOx 감축 목표인 BAU 대비 47%에는 도달하지 못한 값으로 배출권 할당량 감축, 오염물질 거래가 상승 등 추가적인 정책적 재정비가 필요하다.

SOx의 경우 농도의 추세가 동일추세가정을 만족하지 않아 본 연구에서는 분석을 실시하지 못하였다. 하지만 박민하, 김용표(2019)와 이혜경(2019)이 주목하듯 수도권 내 영흥화력발전소 가동률 증가로 인해 그 감소치가 크지 않을 것으로 예상된다. 실제로 영흥화력발전소는 2004년 1, 2호기 준공을 시작으로 2014년 5, 6호기까지 준공하며, 지난 20여년간 그 수가 꾸준히 증가해왔으며, 발전소가 위치한 옹진군의 SOx 배출량은 인천 전체의 32.2%를 차지하며 SOx 최다 배출지역이 되었다. 따라서 향후 총량제의 SOx 농도 감축목표 달성 귀추에 발전소가 주요 인자로 작용할 가능성이 크고 이를 반영한 정책 설계가 필요하다.

제5장 연구 요약 및 결론

제1절 연구 요약

본 연구는 고정효과모형을 활용하여 수도권 사업장 대기오염물질 총량관리제의 NOx 농도 개선 효과를 이중차분방식으로 실증 분석하였다. 기존 선행연구, 정책분석 보고서와 달리 수도권의 대기 오염농도 데이터를 사용하여 정책 시행과 NOx 농도 변화 간 인과성 분석을 시도하였다는 점에서 그 의의가 있다.

이중차분분석 결과 총량제는 1, 2차 할당기간과 2차 계획기간 모

두에서 수도권 NOx 농도를 감소시켰다. 또한 감소치가 -0.0021ppm, -0.0032ppm, -0.0036ppm으로 감소하여 참여 대상 사업장 수 증대, 할당량 감축과 같은 지속적인 정책 강화가 시행 성과를 높인 것으로 보인다. 다만 배출권 거래량 저조, 과잉할당량 등의 문제는 여전히 존재하고, 정부의 기존 감축 목표를 달성하지 못하여 추후 정책 설계 시 해당 문제점을 보완할 필요가 있다. SOx의 경우 농도가 평행추세를 만족하지 않아 이중차분분석을 하지 못하였다. 다만 SOx 최다 배출원인 석탄화력발전소가 지난 20여 년간 수도권 내 주기적으로 증설되었다는 점을 고려하였을 때 그 감축치가 크지 않을 것이라 예상된다. 따라서 향후 SOx 감축에 대한 동 정책의 기여도는 석탄화력발전소 배출량을 얼만큼 관리하는지에 따라 결정될 것이다.

제2절 연구 한계 및 후속 연구 제언

본 연구의 한계는 다음과 같다. 첫째, 통제변수 수집의 한계가 존재한다. 통제변수인 1인당 GRDP의 경우, 도시 및 월 단위 자료 수집이 불가하여 도 단위 및 년 단위 자료로 대체하였다. 또한 자동차 대수는 도시별 자료가 존재하지 않아 월별 도 단위 자동차 대수 자료로 대리하였다. 이렇듯 서로 다른 층위의 변수를 사용하는 것은 해당 통제변수의 종속변수에 대한 영향 정도를 왜곡할 가능성이 있다. 이를 보완하기 위해 다층 모형(multilevel model, MLM)을 사용할 수 있으나 이는 후속 연구로 남겨두고자 한다. 둘째, 규제 대상 사업장 배출량 정보가 부재하다. 본 연구는 총량제 시행의 오염물질 저감효과를 인과적으로 살펴보기 위해 수도권 대기의 NOx 농도를 살펴보았다. 하지만 앞서 언급하였듯 NOx 농도에 영향을 주는 요인은 기후, 경제, 시민 인식 등 다양하다. 외

적 요인을 통제하기 위해 고정효과모형과 이중차분방식의 분석을 적용하였으나, 본 연구 내에서 다루지 못한 추가적인 교란 변수가 존재할 가능성이 있다. 총량제 시행 성과를 조금 더 직접적으로 분석할 방법으로는 규제 대상 사업장의 총량제 시행 전후 오염물질 배출량을 살펴보는 것이다. 그러나 현재 사업장 배출 오염물질의 양은 사업장 정보보호를 위해 공시되어 있지 않다. 2015년부터 TMS 부착 사업장을 대상으로 의무 공시 제도가 실시되고 있으나, 이는 총량제 시행 초기 연도를 분석할 수 없다는 한계가 존재한다. 따라서 본 연구에서는 사업장 배출이 아닌 대기 중의 NOx 농도를 종속 변수로 활용하였다. 다만 이는 지역 간 대기 오염물질의 이동은 고려하지 않는다는 연구적 한계가 존재한다. 셋째, 다양한 분석 방식을 활용하여 추가 분석이 가능하다. 본 연구에서 다루지 못하였지만, 인천, 충남 지역과 같이 석탄 화력 발전소 밀집 지역을 대상으로 오염물 도피처 가설을 검증하는 분석을 진행할 수 있다. 오염도피처가설 (Pollution Heaven Hypothesis)은 오염 집약적 제품의 생산 또는 투자활동이 환경규제가 상대적으로 느슨한 지역으로 이전되는 현상을 말한다(김홍균 외. 2013). 이 가설에 따르면 선진국의 환경 규제 강화가 자국 내 기업의 환경 규제 이행비용을 증가시키기 때문에 기업은 생산비용을 최대한 낮추기 위해 상대적으로 환경기준이 느슨한 개도국이나 최빈국으로 기업을 이전시킨다. 또한 개도국과 최빈국은 국제무역과 투자에서 경쟁력을 높이기 위해 “매력적인” 오염 도피처가 되기 위해 노력할 것이고 결과적으로 “환경 기준을 경쟁적으로 낮추는 바닥으로의 경쟁”(race to the bottom)에 빠지게 되는 것이다(김홍균 외. 2013). 오염도피처가설의 실증분석은 그동안 외국인직접투자(Foreign direct investment, FDI)의 관점에서 선진국과 개도국, 최빈국을 대상으로 진행되어왔다. 하지만 최근 환경문제에 대한 세계적 관심이 증가함에 따라

특정 지역에만 시범적 환경 규제를 실시하는 국가가 증가하며 지역적 맥락에서 오염도피처 가설을 실증하려는 연구도 등장하고 있다. 이러한 연구는 추후 지역 간 환경 정의(Environmental Justice)로 그 논의가 확산할 수 있다. 그 외에도 총량제 시행 이후 각 연도 별 정책 시행 효과가 어떻게 변해가는지 사건 연구(event study)방식을 활용할 수도 있다. 해당 방법론을 활용하여 정책 시행 연도와 그 효과가 나타나는 연도 간의 지연 효과(lagged effect)와 시행 연도 별 규제 강도의 차이 등 조금 더 세밀한 정책 분석이 가능하다. 이와 같은 분석은 추후 후속 연구로 진행할 것이다.

■ 참고문헌

고문현(2009), 환경정책기본법 제31조 무과실책임규정의 개정방안, 「환경정책연구」, 8(4):123-147.

김동술(2013), 우리나라 대기오염 역사, 규제의 변천, 현행 규제제도의 개선방안, 「한국대기환경학회지」, 29(4):353-368.

권태형(2011), 거래비용접근에 의한 배출권거래제도 평가: 수도권 사업장 대기오염총량관리 배출권거래제도를 중심으로, 「행정논총」,49(1):167~187.

박민하, 김용표(2019), 수도권 대기오염물질 배출권거래제에 대한 고찰 및 총량제 확대 시행을 위한 제언, 「한국입자에어로졸학회지」, 15(4):159-171.

배정환, 김유선(2016), 우리나라 대기오염배출 원인과 저감 정책 효과 분석, 「자원환경경제연구」, 25(4):545~564.

손호성, 이재훈(2018), 행정학정책학 연구에서의 이중차분 추정기법의 활용과 쟁점,「현대사회와 행정」, 8(3): 1-31.

이비안 (2007). 배출권거래제도에서 자발적 협약의 필요성－일본의 단체협약(공해방지협정)과 관련하여. 「법학연구」, 47(2): 219-250.

이혜경(2019), 사업장 대기오염 총량관리제 현황과 개선방안, 「입법, 정책보고서」, 36.

임준혁, 곽격규, 김정, 장영기(2018), 권역별 대기오염물질의 연도별 배출특성 분석, 「한국대기환경학회지」,34(1):76-86.

천성남(2018), 화력발전소 미세먼지 배출현황과 저감, 한국전력공사 기획시리즈:발전분야 미세먼지 대책 기술.

한화진(2002), 대기오염물질 총량관리 및 배출권 거래제도 시행을 위한 정책방향에 관한 연구, 정책과제 연구보고서, 한국환경정책평가연구

원.
환경부(2005), 수도권 대기환경관리 기본계획.
환경부(2010), 「환경 30년사」.
환경부(2013), 2차 수도권 대기환경관리 기본계획.
환경부(2020), 대기환경연보.
환경부(2020), 수도권 대기총량관리제도 운영 현황.
Card, D. (1990). The Impact of the Mariel Boatlift on the Miami Labor Market. Industrial and Labor Relations Review. 43(2): 245-257.
Card, D., & Krueger, A. B. (1994). Minimum Wages and Employment: A Case Study of the Fast-Food Industry in New Jersey and Pennsylvania. American Economic Review. 84(4): 772-793.4
Dorsey, J. (2019). Waiting for the Courts: Effects of Policy Uncertainty on Pollution and Investment. Environ Resource Econ 74: 1453-1496
He, Guojun, Maoyong Fan, Maigeng Zhou. (2016). The effect of air pollution on mortality in China: Evidence from the 2008 Beijing Olympic Games, Journal of Environmental Economics and Management, 79:18-39
Ho, Chang-Hoi Jin-Woo Heo, Minhee Chang, Woosuk Choi, Jinwon Kim, Sang-Woo Kim, Hye-Ryun Oh (2021), Regulatory measures significantly reduced air-pollutant concentrations in Seoul, Korea. Atmospheric Pollution Research, 12(7):101098
Jiang, Min, Euijune Kim and Youngjin Woo.(2020), The Relationship between Economic Growth and Air Pollution–A Regional Comparison between China and South Korea, Int. J. Environ. Res. Public Health, *17*(8):2761.

Liu, Y., Zhou, Y. & Lu, J. (2020), Exploring the relationship between air pollution and meterological conditions in China under environmental governance, Sci Rep, 10:14518

M.Vrekoussis, A.Richter, A.Hilboll, J.P. Burrows, E. Gerasopoulus, J.Lelieveld, L.Barrie, C. Zerefos, N. Mihalopoulos(2013), Economic crisis detected from space: Air quality observations over thens/Greece. Geophysical Research Letters, 40(2): 458-463

Seo, Jihoon, Doo-Sun R. Park, Jin Young Kim, Daeok Youn, Yong Bin Lim, and Yumi Kim(2018), Effects of meteorology and emissions on urban air quality: a quantitative statistical approach to long-term records(1999-2016) in Seoul, South Korea. Atmospheric Chemistry and Physics,18(21):16121-16137

Shon, Zang-Ho and Ki-Hyun Kim (2011) Impact of emission control strategy on NO2 in urban areas of Korea, Atmospheric Environment,45(3):808-812.

Stern, D.I., van Dijk, J.(2017), Economic growth and global particulate pollution concentrations. Climatic Change 142: 391-406

Tong, Daniel, Li Pan, Weiwei Chen, Lok Lamsal, Pius Lee, Youhua Tang, Hyuncheol Kim (2016), Impact of the 2008 Global Recession on air quality over the United States: Implications for surface ozone levels from changes in NOx emissions Geophysical Research Letters, 43(17): 9280-9288

Wang, Kunlun, Hongchun Yin, Yiwen Chen (2019), The effect of environmental regulation on air quality: A study of new ambient air quality standards in China, Journal of Cleaner Production,

215:268-279.
Wang Wenhuan, Congyu Zhao, Cong Dong, Huajun Yu, Yutao Wang, Xiaoguang Yang (2022), Is the key-treatment-in-key-areas approach in air pollution control policy effective? Evidence from the action plan for air pollution prevention and control in China, Science of The Total Environment, 843:156850.
국가법령정보센터, 대기관리권역의 대기환경개선에 관한 특별법, 2021.
국가법령정보센터, 공해방지법, 1963.
국토교통부 통계누리, 자동차등록현황보고.
기상청, 기상자료개방포털.
에너지경제연구원, 에너지수급통계.
탄소중립녹색성장위원회, 2030 국가온실가스 감축목표, 2021.
한국전력공사, 한국전력통계.
KOSIS, 시도별 경제활동별 지역내총생산.

Abstract

An Empirical Study on Effects of the Cap-and-Trade System on Air Pollutants in the Seoul Metropolitan Area Industrial Settings

Jiwon Im

City Planning in Environmental Studies

Graduate School of Environmental Studies

Seoul National University

With the growing public interest in environmental issues, South Korea's air pollution regulations have developed in various ways over the past 50 years. In particular, the Cap-and-Trade system on air pollutants in the Seoul metropolitan area industrial settings is meaningful in that it is the first air quality regulation conducted at the regional level and controls the total amount of SOx, NOx, and TPS emitted by industrial settings. More than 20 years after the implementation, the system is being expanded nationwide in recognition of its effectiveness.

The government has published a number of papers regarding the achievements of the regulation. However, these papers have limitations in showing the causal relationship between policy implementation and air quality improvement in the Seoul metropolitan

area. Air quality can be affected not only by policy implementation, but also by various external factors such as economic growth rate for the year, technological progress, and environmental awareness of people. Therefore, appropriate control of exogenous variables is essential to evaluate the net effect of policy implementation.

This paper empirically investigates the net effect of the Cap-and-Trade system on air quality improvement in the Seoul metropolitan area industrial settings using the fixed effect model with difference-in-difference. The results reveal that the concentration of NOx in the Seoul metropolitan area decreased after the first and second credit allocation and the implementation of the second year plans at the significance level of 1%. In addition, the decrease levels were increased which implies strengthening measures such as gradual reduction in credit allocation improves political efficiency. Nevertheless, several limitations are remained, so continuous improvement is still needed.

keywords : Cap-and-Trade system on air pollutants in the Seoul metropolitan area, fixed effect model, difference-in-difference, empirical study

Student Number : 2021-28420