

2022 인재양성 프로그램  
연구자 최종 결과보고서

# 대기오염에 미치는 영향분석 : EKC를 중심으로

**Analysis of Impact on Air Pollution: Focusing on EKC**

2023. 3. 31

김 해 동 (특정주제 연구자)

# 제 출 문

재단법인 숲과나눔 이사장 귀하

본 보고서를 “대기오염에 미치는 영향분석 : EKC를 중심으로”의 최종 연구 결과 보고서로 제출합니다.

2023년 3월 31일

연구 원 : 김해동(특정주제연구자)

※ 본 보고서의 내용은 연구자의 의견이며, (재)숲과나눔의 공식적인 견해와는 다를 수 있습니다.

## 결과보고서 초록

연구원	김해동	구분	특정주제연구자
연구제목	한글	대기오염에 미치는 영향분석 : EKC를 중심으로	
	영문	Analysis of Impact on Air Pollution: Focusing on EKC	
연구기간	2022.3.1 ~ 2022.12.31		
색인어	한글	대기오염, EKC, 환경쿠즈네츠 곡선, 영향분석	
	영문	Air pollution, Environmental Kuznets Curve, Impact analysis	

# 연구 결과보고서

성 명	김해동	구분	특정주제연구자
연구주제	한글	대기오염에 미치는 영향분석 : EKC를 중심으로	
	영문	Analysis of Impact on Air Pollution: Focusing on EKC	
연구기간	2022.3.1 ~ 2022.12.31		
색인어	한글	대기오염, EKC, 환경쿠즈네츠 곡선, 영향분석	
	영문	Air pollution, Environmental Kuznets Curve , Impact analysis	

## ○ 결과보고서 요약

### I. 대기오염에 미치는 영향분석 : EKC를 중심으로

#### II. 연구의 목적 및 필요성

국내 대기오염 문제는 대부분 도심지역을 중심으로 나타나는 것으로 여겨졌지만, 최근에는 도심 외에 농촌지역 및 산악지역 등 전국적으로 문제가 되고 있다.

따라서, 본 연구자는 우리나라의 대기오염 물질 농도와 관련하여 국내의 소득 요인을 중점적으로 분석을 진행하고자 한다. 즉, 국내 지역별 경제성장에 따라 대기오염 배출량이 1차적으로 증가한다고 가정하고, 국내 시군구별 자료를 이용하여 실증분석을 진행하고자 한다. 이는 같은 도 단위여도, 시군구별 소득 수준차이가 클 것으로 예상하였기 때문에, 시군구별 단위의 분석을 진행하고자 한다

그러나 지역별 소득수준이 지속적으로 증가할 경우, 대기오염을 포함한 환경오염에 관심도가 높아져 이에 대한 대응이 증가하여 환경오염이 줄어든다는 EKC(Environmental Kuznets Curve) 가설이 존재하기 때문에 본 연구에서 국내 대기오염 물질에 대해 EKC가 성립하는지를 중점적으로 살펴보고자 한다. EKC는 1991년부터 지속적으로 연구되어온 이론으로, 대기오염물질에 관한 EKC 성립 연구가 매우 많이 이뤄지고 있다. 그러나 국내 대기오염물질 관련 EKC 연구는 많지 않은 상황이다. 특히, 기존 선행연구에서는 도 단위로 분석을 진행하여 충분한 표본수로 분석을 진행하지 못했다는 한계점이 존재한다. 따라서 본 연구에서는 시군구별 단위로 이에 대한 경험적 분석을 진행하여, 분석 결과를 정리하고자 한다.

#### III. 연구의 내용 및 범위

본 연구에서는 한국의 대기오염 물질과 관련하여 국내 시군구별 요인의 영향력을 살펴보고자 한다. 국내 미세먼지 요인으로는 화력발전, 자동차, 가정 등 다양한 요소가 존재하며, 바람의 방향, 강수량 등의 기상 요인에 영향을 받는다(이성희 외, 2012; 박순애 & 신현재, 2017).

구체적으로 본 연구의 목적은 국내 시군구별 단위에서 미세먼지의 지역별 소득과의 상관관계 살펴보고, 어떤 관계인지를 분석하고자 하는 것이다.

본 연구에서는 국내 대기오염물질 별로 EKC 형태가 다르게 나타날 것이라는 연구가설을 가지고 소득중심으로 시군구별 대기오염 물질에 대한 영향요인 분석을 진행한다.

이를 위해 시군구 단위의 지역별 데이터 자료를 구축하였다. 우선, 미세먼지 및 초미세먼지 자료를 관측소 위치가 아니라 전국의 모든 읍면동 단위로 재구성하였다. 그러나, 읍면동 단위의 소득자료 산출이 어려워 전국 시군구 단위로 재분류 진행하였다.

본 연구에서는 국내 시군구별 단위의 대기오염 및 기상자료를 크리깅기법으로 도출하는 것이 특징이다. 본 연구에서 가장 주요하게 이용할 시군구별 소득자료의 경우 지역별 의료이용통계에서 제공하는 가구 연평균 건강보험료 자료이다. 지역별의료이용통계에서 제공하는 시군구별 평균 건강보험료 자료를 이용하여 분석을 진행한다. 현재, 지역별 의료이용통계자료에 대한 접근이 2013년부터 2020년까지 가능하여 전체 분석기간 역시 2013~2020년으로 총 8년에 대하여 분석을 진행하였다.

#### IV. 주요 연구 결과

PM10, NO2, SO2, O3에 대해 EKC성립에 대해 분석한 결과는 아래와 같다.

첫째 미세먼지 관련하여 실증분석한 결과, 우리나라 미세먼지에 대해서는 유의성이 약하게 EKC가 성립하는 것으로 나타났다. 미세먼지의 경우, 연강수량이 1% 유의수준에서 음(-)으로 추정치가 나타났으며, 자동차 등록대수는 1% 유의수준에서 양(+)으로 나타난 것이 특징이다.

둘째, NO2에 대해 분석한 결과, EKC가 성립하는 것으로 나타났다. NO2의 경우, 녹지면적비율이 1% 유의수준에서 음(-)으로 추정치가 나타났으며, 자동차 등록대수는 1% 유의수준에서 양(+)으로 나타난 것이 특징이다. 특히, NO2는 특히 녹지지역과 밀접한 관계를 가지는 것으로 선행연구에서 나타났는데, 본 연구결과와 일치함을 확인할 수 있다.

셋째, SO2에 대해 분석한 결과, EKC가 성립하는 것으로 나타났다. SO2의 경우, 녹지면적비율이 1% 유의수준에서 음(-)으로 추정치가 나타났다. 반면, 자동차 등록대수의 경우 전반적으로 통계적 유의성이 낮게 나타났으며, 강수량은 전혀 유의성이 포착되지 않았다.

넷째, O3에 대해 분석한 결과, EKC가 성립하지 않는 것으로 나타났다. O3의 경우, 오히려 소득에 따라 농도가 U자형으로 나타나, 소득이 증가할수록 농도가 증가하는 것으로 나타났다. 이처럼, 대기오염물질에 대해 NO2 및 SO2는 EKC가 매우 유의하게 성립하였고, PM10은 유의성이 약하게 성립하였으며, O3는 성립하지 않는 결과가 나타났다. 따라서, 각 대기오염물질에 대한 대응정책 역시 개별적으로 이뤄질 필요가 있음을 확인하였다.

#### V. 연구 결과의 활용 계획

본 연구에서 얻은 분석결과를 바탕으로 다음과 같이 대기오염별 정책시사점을 도출하였다. 미세먼지의 경우, 해당 시군구의 소득이 지속적으로 증가하더라도 미세먼지 농도는 일정수준을 유지하는 형태로 나타날 것으로 전망된다. 반면, 자동차 등록대수의 경우 매우 유의한 결과를 가져왔기 때문에, 미세먼지 감축을 위해서는 소득측면보다 자동차 운행량을 줄일 수 있는 노력이 필요할 것으로 보인다. 반면, NO2와 SO2는 EKC가 1% 유의수준에서 성립하는 것으로 나타나, 시군구의 소득이 증가함에 따라 대기오염에 대한 관심이 높아져

각각의 농도가 감소할 것으로 나타났다. 또한, 개별 시군구의 녹지면적비율이 두 대기오염 물질의 농도를 감축하는데 큰 기여를 하는 것으로 나타났다. 따라서 NO<sub>2</sub> 및 SO<sub>2</sub>를 감축하기 위해선 녹지면적을 늘리는게 중요하다는 시사점을 얻을 수 있다.

### **I. Air Pollution Impact Analysis: EKC as a Surveillance**

#### **II. Purpose and obligations of research**

The domestic air pollution problem cautiously eclipses most exception areas, but recently it has become a nationwide problem, including bug areas and shallow areas.

Therefore, this researcher intends to conduct a developmental analysis of domestic products in relation to the discovery of air pollutants in Korea. In other words, we intend to conduct an empirical analysis using data by city and county in Korea. Even if it is a unit like this, we want to proceed with the analysis by city and county.

However, since there is an EKC (Environmental Kuznets Curve) hypothesis that if the income level by region continues to increase, interest in environmental pollution, including air pollution, increases, response to it increases, and environmental pollution decreases. Therefore, in this study, domestic air pollutants We will focus on whether EKC holds for . EKC is a theory that has been continuously studied since 1991, and many studies on the establishment of EKC on air pollutants have been conducted. However, there are not many EKC studies on air pollutants in Korea. In particular, there is a limitation in that the previous studies did not conduct the analysis with a sufficient number of samples by conducting the analysis by province. Therefore, in this study, an empirical analysis is conducted on a city-county-by-city basis to organize the analysis results.

#### **III. Content and scope of research**

In this study, we examine the influence of domestic city-county factors on air pollutants in Korea. There are various factors such as thermal power generation, automobiles, and households as domestic fine dust factors, and they are affected by meteorological factors such as wind direction and precipitation. Specifically, the purpose of this study is to examine the correlation of fine dust with income by region in the domestic city, county, and district units, and to analyze what kind of relationship it is.

In this study, with the research hypothesis that the form of EKC will appear differently for each domestic air pollutant, an analysis of the influencing factors for air pollutants by city, county, and district is conducted with a focus on income.

To this end, regional data at the city, county, and district level were established. First of all, fine dust and ultrafine dust data were reconstructed by all eup, myeon and dong units nationwide, not by the location of the observation station. However, it was difficult to calculate income data by eup, myeon, and dong units, so it was reclassified by city, county, and district units nationwide.

This study is characterized by deriving air pollution and meteorological data by city, county, and district in Korea using the kriging method. In the case of the income data by city, county and district that will be used most in this study, the annual average health insurance premium data for households provided by regional medical use statistics. The analysis is performed using the average health insurance premium data by city, county, and district provided by regional medical use statistics. Currently, access to medical use statistics by region is possible from 2013 to 2020, so the entire analysis period was also analyzed for a total of 8 years, from 2013 to 2020.

#### IV. Results

The results of analyzing the establishment of EKC for PM10, NO2, SO2, and O3 are as follows. First, as a result of empirical analysis regarding fine dust, it was found that EKC was established with weak significance for fine dust in Korea. In the case of fine dust, the estimate of annual precipitation was negative (-) at the 1% significance level, and the number of registered cars was characterized as positive (+) at the 1% significance level.

Second, as a result of analyzing NO2, EKC was established. In the case of NO2, it is characteristic that the green area ratio is negative (-) at the 1% significance level, and the number of registered cars is positive (+) at the 1% significance level. In particular, NO2 has been shown to have a close relationship with green areas in previous studies, which is consistent with the results of this study.

Third, as a result of analyzing SO2, it was found that EKC was established. In the case of SO2, the estimate of the green area ratio was negative (-) at the 1% significance level. On the other hand, in the case of the number of registered cars, statistical significance was generally low, and no significance was captured in the amount of precipitation.

Fourth, as a result of analyzing O3, it was found that EKC was not established. In the case of O3, the concentration showed a U-shape according to income, and the concentration increased as income increased. As such, for air pollutants, EKC was very significantly established for NO2 and SO2, while significance was weakly established for PM10, and O3 did not. Therefore, it was confirmed that the response policies for each air pollutant need to be implemented individually.

#### V. Planning to utilize research results

Based on the analysis results obtained in this study, policy implications for each air pollution were derived as follows. In the case of fine dust, it is expected that the concentration of fine dust will remain at a certain level even if the income of the relevant city, county or district continues to increase. On the other hand, since the number of registered cars produced a very significant result, it seems that efforts to reduce the number of cars operated rather than the income aspect are needed to reduce fine dust. On the other hand, for NO2 and SO2, EKC was found to be established at the 1% significance level, and as the income of cities, counties and districts increased, interest in air pollution increased, indicating that the respective concentrations would decrease. In particular, it was found that the green area ratio of individual cities, counties, and districts contributed greatly to reducing the concentration of the two air pollutants. Therefore, in order to reduce NO2 and SO2, the implication that it is important to increase the green area can be obtained.

※ 첨부: 1. 최종 연구결과물(10권)

이와 같이 연구결과보고서를 제출합니다.

2023년 3월 31일

제출자 : 김해동 (인)

(재)숲과나눔 이사장 귀하

# 목차

1. 연구의 배경 및 필요성 .....	1
2. 선행연구 .....	3
2.1. 대기오염 관련 연구 .....	3
2.2. EKC 관련 선행연구 .....	4
3. 자료 구축 .....	9
4. 분석 내용 .....	13
4.1. 기초분석 .....	13
4.2. 정규분포 검정 .....	21
4.3. 분석결과 .....	23
4.2.1. PM10 .....	24
4.2.2. NO2 .....	26
4.2.3. SO2 .....	29
4.2.4. O3 .....	31
4.4. 소결 .....	33
5. 연구 결과의 활용 계획 .....	34
6. 참고문헌 .....	36

## 최종 연구결과물

### 1. 연구의 배경 및 필요성

먼지는 입자의 크기에 따라 10 $\mu$ m 이하의 미세먼지( $PM_{10}$ )와 2.5 $\mu$ m 이하의 초미세먼지( $PM_{2.5}$ )로 구분된다. 우리나라의 경우 1983년 총먼지에 대한 환경기준을 설립한 이후, 1993년에는 미세먼지( $PM_{10}$ )에 대한 기준을 추가하였고, 2011년에는 초미세먼지( $PM_{2.5}$ )에 대한 기준을 추가하였다. 이에 따라 시계열적으로 장기간에 걸친 농도 정보는 미세먼지( $PM_{10}$ )만 제공되고 있으며, 1997년부터 월별 농도를 Air Korea에서 제공하고 있다. 반면 초미세먼지의 경우, 2011년부터 일부 지역에 대하여 Air Korea에서 농도를 제공하고 있다.

특히 입자의 크기가 작을수록 그 해로운 영향 정가 큰 것으로 알려져 있다. 초미세먼지( $PM_{2.5}$ )는 세계보건기구(WHO)가 1급 발암물질로 지정할 정도로, 건강에 치명적이다. 이는 호흡 관련 질환을 포함하여 각종 질병을 유발하고 있음을 밝히는 연구도 나타나고 있다(최종일·이영수, 2015). 특히, 우리나라에서도 2015년 이후 미세먼지에 대한 관심이 매우 높아졌다.

우리나라는 2018년 3월 초미세먼지 예보를 선진국 수준으로 강화했고, 미세먼지 배출 규제 역시 비상저감정책 등을 통하여 강화하고 있다. 우리나라의 미세먼지는 중국의 영향이 매우 클 것이라는 생각이 일반적이지만, 아직 이에 대한 결론이 나지 않고 있다. 중국 환경보호부의 '환경상황공보'는 중국 주요 도시의 초미세먼지가 지속적으로 감소하고 있다고 밝힌 바 있다. 그리고 2018년 1월 우리나라의 국립환경과학원은 수도권 미세먼지가 국외 보다는 국내의 영향이 크다고 밝힌 바 있다. 또한 1차 한·미 협력 국내 대기질 공동 조사(KORUS-AQ) 결과에서도 초미세먼지의 국내 요인이 52%, 중국 내륙이 34%, 북한이 9%, 기타 6%로 발표했다.

본 연구에서는 앞서 다룬 미세먼지 외에 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> 등 주요 대기오염 물질에 대한 요인을 실증분석하고자 한다. 국내 대기오염 문제는 대부분 도심지역을 중심으로 나타나는 것으로 여겨졌지만, 최근에는 도심 외에 농촌지역 및 산악지역 등 전국적으로 문제가 되고 있다. 발생 원인과 관련하여 중국발 대기오염이 주요 발생원으로 언론에서 주목되고 있지만, 발생원인을 모두 중국에 전가할 수는 없다. 중국의 대기오염 물질 농도는 2018년에 이미 감소추세에 있다. 중국 환경보호부는 주요 도시별 일 평균 대기오염 물질 농도를 제공하고 있는데, 중국 주요 도시의 미세먼지 농도는 지속적으로 감소추세에 있다.

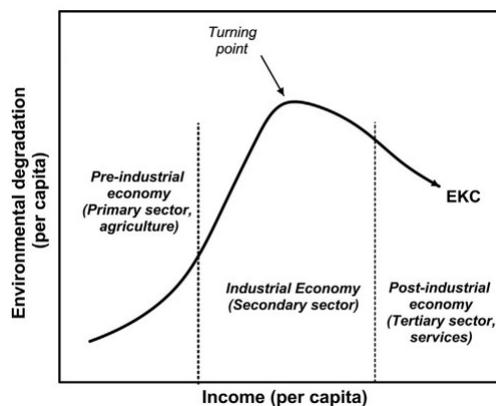
따라서, 본 연구에서는 우리나라의 대기오염 물질 농도와 관련하여 국내의 소득 요인을 중점적으로 분석을 진행하고자 한다. 즉, 국내 지역별 경제성장에 따라 대기오염 배출량이 1차적으로 증가한다고 가정하고, 국내 시군구별 자료를 이용하여 실증분석을 진행하고자 한다.

이는 같은 시·도 단위에 속하고 있더라도, 그 내에서 시군구별 소득 및 대기오염의 수준 차이가 클 것으로 예상하였기 때문에, 시군구별 단위의 분석을 진행하고자 한다. 따라서 시군구별 대기오염 물질 및 소득 변수 관련하여, 상세한 기초분석을 우선적으로 진행하여 소득과 대기오염물질간 특정한 관계가 있는지 살펴볼 필요가 있다.

그러나 지역별 소득수준이 지속적으로 증가할 경우, 대기오염을 포함한 환경오염에 관심이 높아져 이에 대한 대응이 증가하여 환경오염이 줄어든다는 EKC(Environmental Kuznets Curve) 가설이 존재하기 때문에 본 연구에서 국내 대기오염 물질에 대해 EKC가 성립하는지를 중점적으로 살펴보고자 한다. EKC는 1991년부터 지속적으로 연구되어온 이론으로, 대기오염물질에 관한 EKC 성립 연구가 매우 많이 이뤄지고 있다.

대표적으로 EKC는 아래 <그림 1>과 같이, 역 U자형 모습으로 나타난다. 즉, 변곡점(Turning point)까지 1인당 소득이 증가할 때까지는 환경오염도가 증가하지만, 소득이 해당 변곡점을 넘어서는 순간 산업수준이 고도화되고, 환경오염에 대한 관심역시 증가하여 오히려 환경오염도가 감소하는 현상을 의미한다.

<그림 1> EKC모습



출처 : Kaika & Zervas(2013)

그러나 국내 대기오염물질 관련 EKC 연구는 많지 않은 상황이다. 특히, EKC 관련 기존 선행연구에서는 도단위로 분석을 진행하여 충분한 표본수로 분석을 진행하지 못했다는 한계점이 존재한다. 따라서 본 연구에서는 시군구별 단위로 이에 대한 경험적 분석을 진행하여, 국내 대기오염 물질에 대해 EKC가 성립하는지 분석을 진행하고자 한다. 본 연구에서 검증하고자 하는 연구가설은 아래와 같다.

**‘소득이 특정 임계점을 넘을 경우, 대기오염 농도가 낮아질 것이며 그 특징이 대기오염 물질에 따라 다를 것이다’**

---

해당 연구가설을 검정하기 위하여, 국내 시군구별 단위에서 대기오염 물질에 대해 지역별 소득 관의 관계를 계량학적으로 분석을 진행한다.

## 2. 선행연구

### 2.1. 대기오염 관련 연구

본 절에서는 국내 대기오염 관련 선행연구를, 주제별로 나누어 간단히 요약한다. 우선, 국내 PM10, PM2.5, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> 등 대기오염 물질 가운데, 전반적으로 미세먼지에 관한 연구가 가장 많이 이뤄졌다. 이는 미세먼지의 입자의 크기가 작을수록 그 해로운 영향이 큰 것으로 알려져 있으며, 초미세먼지는 세계보건기구(WHO)가 1급 발암물질로 지정할 정도로 건강에 치명적이라고 밝히는 등 사회적 관심도가 높기 때문이다. 이에 따라, 보건학 측면에서 미세먼지가 건강에 미치는 영향에 대해 분석한 선행연구는 굉장히 많이 이뤄졌다. Jia & Ku(2019)는 대기오염이 한국의 노인 및 영유아의 호흡기 및 심혈관 질환으로 인한 사망률을 증가시킨다고 밝힌 바 있다. Ebenstein et al.(2015) 및 이보은(2003) 등 굉장히 많은 선행연구에서, 미세먼지와 건강문제의 관계를 실증분석한 바 있다.

다음으로, 미세먼지 발생요인에 대한 연구도 많이 이뤄졌다. 국내에서도 미세먼지 이슈가 높아진 이후, 발생요인에 대한 선행연구도 다수 존한다(장경수·여준호, 2015; 김종희 외, 2016, Bae et al., 2021). 우리나라의 경우 1983년 총 먼지에 대한 환경기준을 설립한 이후, 1993년에는 미세먼지에 대한 기준을 추가하였고, 2011년에는 초미세먼지에 대한 기준을 추가하였다. 이에 따라 초미세먼지의 경우, 2011년부터 Air Korea에서 자료를 제공하고 있다<sup>1)</sup>.

국내의 경우 2010년대에 들어 초미세먼지 논의가 부각되었고, 초미세먼지 농도를 감축하기 위한 다양한 정책들이 제안되었다. 우리나라는 2018년 초미세먼지 예보를 강화했고, 미세먼지 배출 규제 역시 비상저감정책 등을 도입하면서 크게 강화하고 있다. 우리나라 고농도 미세먼지의 주요 요인이 국내인지 해외인지 여부는 현재까지 연구마다 결과가 상이하다. 2018년 1월 우리나라의 국립환경과학원은 수도권 미세먼지가 국외보다는 국내의 영향이 크다고 밝힌 바 있다. 그리고 1차 한·미 협력 국내 대기질 공동 조사(KORUS-AQ) 결과에서도 초미세먼지의 국내 요인이 52%, 중국 내륙이 34%, 북한이 9%, 기타 6%로 발표했다. 해당 조사는 미세먼지 농도가 낮은 2016년 5~6월에 조사됐기 때문에, 난방 수요가 많은 겨울철의 경우 다른 결과가 나타날 수 있다는 비판이 존재한다. 국립환경과학원은 국내에서 고농도 미세먼지가 발생할 때 국내외 기여율은 사례마다 다르다고 발표한 바 있으며, 특정기간 중국 등 국외 요인이 69~82%로 매우 높은 수준인 것으로 나타났다(국립환경과학원, 2019).

다음으로는 국내 대기오염 관련하여 주기분석을 진행한 연구들이 있다. 손혜영 및 김철희

---

(2009)는 16년 간의 미세먼지농도를 이용하여 주기분석을, 김선영 외(2009)는 바람변수를 통하여 해외에서 유입되는 수송부문 영향을, 장재훈 외(2012)는 인구 및 차량 변수를 통하여 발생주기 분석을 분석함으로써 겨울철 난방사용량 증가 및 황사 영향이 커지는 결론을 내린 바 있다.

이외에도 국내 여러 가지 요인을 고려하여 국내 미세먼지의 원인을 분석한 연구 역시 다수 이뤄졌다(이성희 외, 2012; 김종희 외, 2016; 오종민 외, 2017). 박순애·신현재(2017)는 풍향을 설명변수 넣어 월별 패널 분석을 한 결과, 중국 산동성의 초미세먼지 농도가 한국의 초미세먼지 농도에 유의미한 영향을 미치고 있음을 밝혔다. 해당 연구는 월별 분석을 통하여 석탄발전거래량, 경유소비량, 산업 생산지수 등 국내의 다양한 미세먼지 발생요인에 대하여 분석을 진행한 점이 특징이다. 김기환·김오석(2019)는 일별 자료로 풍향을 고려하여 베이징과 톈진의 미세먼지와 서울의 미세먼지의 상관관계를 분석하였는데, 해당 연구는 초미세먼지가 아닌 미세먼지를 대상으로 분석을 진행하였다. 맹지연(2014)는 인구밀도에 따라 국내 대기오염물질과의 상관관계를 분석한 바 있으며, 박대문(2003) 역시 미세먼지뿐 아니라 국내 주요 대기오염물질을 대상으로 분석을 진행하였다. 다음으로, 노철언(2005) 및 김아름 외(2012)는 시계열 자료를 통하여 국내 미세먼지의 성분분석을 진행한 바 있다.

이상의 미세먼지 관련 다양한 주제의 선행연구에서 살펴봤듯, 미세먼지의 요인은 매우 다양하게 존재함을 확인할 수 있다. 그렇지만, 국내 시군구 단위 등 단위의 자료에서 미세먼지 누출을 살펴본 연구는 많지 않은 상황이다. 이에 따라 선행연구들의 경우 대기오염물질 농도 및 소득에 대하여 시군구별 차이에 대해 반영하지 못한채 분석을 하였다는 한계점을 가진다. 국내 250여개의 시군구별로 동 시점에서 대기오염물질 농도 및 소득수준 차이가 클 수 있기 때문에, 본 연구에서는 시군구별 단위에서 분석을 진행하고자 한다.

## 2.2. EKC 관련 선행연구

본 연구에서는 앞서 살펴봤듯, 소득과 미세먼지의 영향을 핵심적으로 살펴보기 위하여 소득변수의 제곱항 등을 설명변수로 넣어 관계를 분석하고자 한다. 이는 대중적으로 널리 알려진 환경쿠즈네츠 곡선(EKC, Environmental Kuznets Curve)을 CO<sub>2</sub>가 아니라 이외의 주요 대기오염물질에 대해 검증하고자 하는 것이다.

EKC는 경제발전 초기에는 오염물질 배출량이 증가하지만 일정 소득수준을 넘으면 오염이 다시 감소한다는 가설에 관한 내용이다. 즉, 소득이 증가함에 따라 오염물질이 증가하지만, 일정 수준 이후에는 환경오염에 대한 관심도가 증가하여 오염물질이 감소한다.

대표적으로 Dasgupta et al.(2002)는 이러한 환경오염에 대한 인식증가가 역 U자형 관계를 설명할 수 있는 주요 요소라 밝혔다. 해당 연구에서는 각 국가의 소득 수준이 증감하에 따라 사회의 보건 및 교육에 대한 투자가 우선적으로 높아지고, 이후에는 환경에 대한 관

---

심 증가로 대기질 개선에 투자하게 된다. 또한, 대기오염 감축에 대한 기술, 인력, 및 예산도 증가하며 마지막으로 사회 전반적으로 환경오염에 대한 인식 수준 자체가 높아지는 점을 설명하였다.

다만, EKC가 단순히 역 U자형으로 소득이 증가함에 따라 지속적으로 대기오염 농도가 감소하는 지는 아직도 연구가 이뤄지고 있다. 즉, 특정한 경우 기술발전이 체감하여 다시 오염물질이 증가하는 모습이 나타날 수 있다. 이는 선진국이 점차 저성장 단계가 됨에 따라 환경오염 기술 발전이 체감하여 경제성장이 환경오염을 다시 야기하는 결과와 같이 해석할 수 있다.

대표적으로 Grossman and Kruger(1995)가 다양한 오염물질들에 대하여 역 U자형 모습이 나타나는 경향을 실증분석한 바 있다. 본 연구에서도 국내 대기오염물질에 대하여 시군구별 단위에서 소득수준에 따라 역 U자형 모습이 나타나는지 분석을 하고자 한다.

EKC 관련 경험적 선행연구를 정리하면 아래와 같다. EKC를 다루는 최초의 경험적 연구는 1990년대 초반에 시작되었다. Grossman & Krueger(1993)은 북미 자유 무역의 환경적 영향을 분석하는 연구를, Grossman & Krueger(1995)는 소득 및 부의 증가 효과가 4가지 환경지표(분석도시 대기 오염, 강 유역의 산소 체계, 강 유역의 배설물 오염 및 중금속에 의한 강 유역의 오염)에 미치는 영향력을 분석하였다. 오염물질원마다 그 변곡점이 달랐지만, 평균적으로 1인당 소득 \$8,000(1985년 USD)수준이었다. 해당 연구에서는 전 세계에서 가져온 관심 오염 물질에 대하여 1인당 GDP의 다항식으로 회귀분석 하였다. 그리고 해당 회귀분석 결과를 통해 역U자형 곡선(즉, 쿠즈네츠 효과)의 증거를 제시하였고, 환경과 경제성장의 새로운 관계를 밝혔다.

Grossman과 Krueger는 그들의 연구를 통해 몇 가지 이론을 제시하였다. 첫째로, 환경의 질이 정상재라면, 국가의 소득이 증가하면 환경 품질에 대한 수요도 증가한다. 따라서, 사람들이 환경에 대해 더 많이 인식하게 되고, 환경 규제가 더 강력하게 시행되는 점, 둘째로, 국가가 경제 성장을 하면서, 오염 집약적 제품의 생산을 중단하고 대신 다른 곳에서 이러한 제품을 수입하기 시작하는 부분을 설명하였다. 이와 같은 이론을 중심으로 이후의 EKC 관련 연구가 중점적으로 이루어졌다.

다음으로, Dinda(2004)는 Grossman & Krueger(1995)와 마찬가지로 더 높은 소득 수준에서 환경의 질을 더 추구하는 것을 증명함으로써 역 U자형 쿠즈네츠 곡선을 제시하였다. Dinda(2004)는 역U자 형태의 원인이 될 수 있는 다른 여러 요인을 제시하였다. 해당 연구에서는 환경파괴가 줄어드는 변곡점의 소득 수준에 대한 합의가 선행연구들에서 이뤄지지 않고, EKC의 존재에 대한 증거는 결정적이지 않다고 밝혔다. 또한, 다른 연구들에서 사용한 환경지 표를 대기 질, 수질 및 기타 환경 질 등 3가지 범주로 구분하였다.

일부 연구들은 개별 국가가 동일한 모양의 EKC를 가질 것으로 가정하지만, 각 국가의 경

---

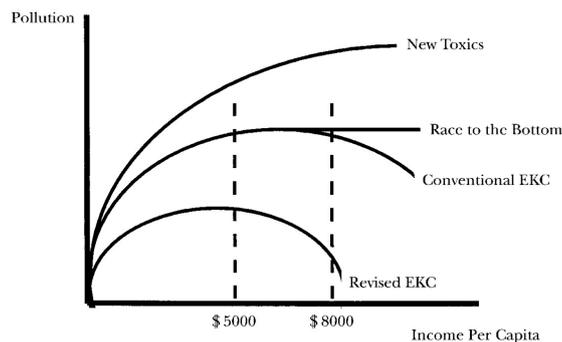
제적 수준에 따라 곡선 모양이 다를 수 있음을 지적한 바 있다. 특히, 경제적 요인 외에 사회·정치적 요소들도 이에 큰 영향을 미친다고 밝혔다. 유사하게 Barrett & Graddy (2000)는 시민들의 정치적 자유가 환경질 개선에 매우 주요한 요소임을 밝혔다.

다음으로, Lieb(2003)은 EKC 관련 문헌을 메타분석으로 정리하였다. 해당 연구는 "세계열 EKC의 네 가지 원인(환경질, 오염물질간 대체, 기술진보, 감축 규모에 대한 수익 증가)은 경험적으로 검증되었습니다"고 밝히고 있다. 저자는 또한 국가가 특정 오염 물질에 대한 쿠즈네츠 효과를 경험하려면 적극적으로 환경 규제 정책을 시행해야 된다고 밝히고 있다.

그러나 모든 오염물질에 대해 EKC가 성립하는지는 여전히 논란이 존재한다. Lieb(2003)는 EKC가 존재하지만 일부 오염 물질에 대해서만 존재하며 모든 오염 물질에는 존재하지 않는다. 해당 연구에서는 대부분의 연구가 이제 EKC에 삼차항을 포함한다고 밝혔다. 이는 각 추정치에 따라 EKC가 어떻게 달라지는지를 나타낸다. 이와 같은 삼차항 다항식은 Shafik & Bandyopadhyay(1992)에서 처음 제안됐다. Lieb(2003)은 대부분의 연구에서 SO<sub>2</sub>, SPM, NO<sub>x</sub>, CO, 납 및 VOC의 오염 물질에 대해 EKC가 존재한다고 밝혔다.

즉, 해당 연구들의 경우 단순히 쿠즈네츠가 2차 형태가 아니라 3차식의 형태로 소득에 관계있음을 실증분석하였다. 2차 형태 다음으로 많이 쓰이는 3차 형태는 아래 <그림 2>와 같이 N자형으로 나타나는데, 이는 경제 성장이 초기에는 환경 개선을 야기하지만, 오히려 특정 수준 이상으로 발전할 경우 더 심각한 대기 오염을 생성하는 현상을 나타낸다(Bruyn & Opschoor, 1997)

<그림 2> N자형 등 다양한 형태의 EKC



출처 : Dasgupta et al. (2002).

다음으로, Egli & Steger(2007)는 N자형 또는 M자형에 대한 증거를 제시하였다. 해당 연구는 기존 연구와 다르게 동태적 접근방법을 사용하였는데, Andreoni & Levinson(2001)은 분석에서 전통적인 정적 접근 방식에 의존함으로써 단순한 모형을 제안하였다.

Stern(2004)은 EKC에 대해 효율적인 모형들이 전통적인 EKC를 대체할 수 있다고 밝히며, 현재 EKC 결과는 매우 빈약한 통계적 기반이 빈약하다고 밝힌바 있다. 그럼에도 불구하고

Khanna(2002), Khanna & Plassmann(2004), Skaza & Blais (2013) 등 매우 다양한 EKC에 대한 실증분석 연구가 지속적으로 이루어지고 있는 상황이다. 대다수의 연구들은 공통적으로 1인당 GDP 혹은 가구 중위 소득(median household income)을 소득 변수로 이용하여 분석을 진행하였다. EKC 실증분석 관련한 선행연구에 대한 요약은 아래 <표 1>과 같다.

<표 1> 환경쿠즈네츠곡선(EKC) 실증분석연구 요약

연구	분석대상	소득변수	설명변수	결론
Khanna(2002)	CO, ozone, PM10 and NOx	가계 중위소득	인종, 학력, 인구밀집도, 집값, 제조업비율	U자형 (NO)
Khanna & Plassmann (2004)	CO, SO2, O3, PM10, NO	가계 중위소득	인종, 실업률, 제조업비율, 학력, 인구밀집도	역U자형 (PM10)
강희찬(2013)	SO2, CO2	1인당 GDP	환경인식수준, 제조업비율	역 U자형
Skaza & Blais (2013)	PM10, SO2	1인당 GDP	녹지면적	역 U자형 (PM10)
이광훈 · 이춘화(2009)	CO2	1인당 GRDP	인구밀도, 배출원가격	역 U자형
Park & Lee(2011)	CO, NO2, SO2	인구, 자동차수, 광업생산지수, 에너지소비량	인구, 자동차수, 광업생산지수, 에너지소비량	N 및 U자형
배정환 · 김유선(2016)	PM10, SO, NO, CO	GRDP	인구밀도, 석탄화력설비, 강수량, 경유소비	역 U자형
박철웅 · 이용주(2018)	CO2	1인당GDP	냉난방도일, 신재생비중	역 U자형
강희찬(2019)	PM10	1인당 GRDP	석탄화력 발전량, 경유자동차 등록대수, 유연탄 소비량	N자형

위 그림에서 살펴봤듯, EKC 형태 역시 이론적으로 매우 다양함을 확인하였다. EKC의 성립여부를 확인하기 위하여 각 국가별 실제 데이터를 이용한 실증분석연구도 매우 다양하다. 대표적으로, Khanna(2002)는 NO 등 주요 대기오염물질에 대해 EKC를 검정한 결과 NO에서 U자형 EKC가 성립함을 밝혔다. 해당 연구에서는 주요 설명변수로, 인종, 학력, 인구밀집도, 집값, 제조업비율등을 이용하였다. 또한, 국가단위가 아니라 지역별 가구단위로 분석하였으며, 소득 지표로 해당 지역의 가구 중위소득을 이용한 것이 특징이다.

다음으로, Khanna & Plassmann(2004)는 1990년 미국의 지역별 자료를 활용하여 인종, 실업률, 제조업비율 등을 이용하여 미세먼지(PM10)에 대하여 역 U자형 모습이 나타남을 밝혔다. 즉, 미세먼지에 대해서 EKC가 성립함을 보였다. Skaza & Blais (2013)는 국가단위의 거시 차원에서 EKC를 검토하였다. 해당 연구에서는 소득변수로 1인당 실질GDP를 활용

하였고, 녹지면적을 설명변수로 활용하였다. PM10 및 CO2에 대해 검증한 결과 PM10에서 역 U자형 형태가 나타남을 밝혔다. 강희찬(2013)은 SO2 및 NO2에 대해서 분석을 진행하였으며, 3차식 형태로 N자형 EKC를 검증하였다. 설명변수로는 석탄화력발전량 및 경유자동차 등록대수 등을 활용하였으며 소득변수로는 1인당 GRDP를 이용하였다. 해당연구는 World Value Survey의 국가별 환경인식 수준을 설명변수로 하여, 앞서 살펴본 환경인식수준이 대기오염에 영향을 미칠 수 있는지 살펴본 것이 특징이다. Leffel et al.(2022)는 최근 연구로, 서울을 포함한 세계 주요 대도시에 대해 소득과 주요 대기오염물질에 대해 실증분석을 하였다. 그 결과, SO2, PM10, PM2.5, NO2 모두 소득이 증가함에 따라 대기오염 농도가 감소하는 것으로 나타났다.

이상으로 살펴본 연구들은 해외 국가들을 대상으로 실증분석한 연구이며, 우리나라 자료를 이용하여 국내에서도 EKC가 성립하는지에 대해 검증한 관련 연구도 다수 존재한다. 우선, 이광훈·이춘화(2009)는 수도권 지역에 대하여 CO2에 대해 EKC 검정을 진행하였고, 그 결과 EKC가 성립하는 것으로 나타났다. 해당 연구에서는 인구밀도 및 이산화탄소가격을 설명변수로 활용하였다. Park & Lee(2011)는 국내 대기오염물질에 대해 인구, 자동차수, 광업생산지수, 에너지소비량 변수를 바탕으로 EKC를 검정하였는데, CO 및 NO2는 통계적으로 유의하게 U자형으로 나타나 EKC가 성립하지 않는 것으로 나타났다. 반면, SO2는 N자형 EKC로 분석되었다.

배정한·김유선(2016)은 국내 16개 광역시에 대해 지역총생산(rgdp)으로 주요 대기오염물질에 대해 EKC가 성립하는지 살펴보았다. 그 결과, CO를 제외한 다른 대기오염물질 모드 EKC가 성립하는 것으로 나타났다. 박철웅·이용주(2018)는 지역 단위가 아니라 국내 44개 연도에 대한 시계열 자료로 CO2에 대해 분석한결과, 1인당 GDP값과의 관계가 역 U자형으로 나타나 EKC가 성립하는 것으로 나타났다. 해당연구에서는 기온변수로 냉난방도일을 활용한 것이 특징이다. 강희찬(2019)은 PM10에 대해서만 분석을 진행하였으며, 1인당 GRDP를 통한 3차식 형태로 EKC를 검증하였다. 설명변수로는 석탄화력발전량 및 경유자동차 등록대수 등을 활용하였다. 해당 연구에서는 PM10에 대해 EKC가 N자형으로 나타남을 밝혔다.

선행연구들의 경우, EKC에 대한 실증분석시 각 변수에 대해 자연로그(log)를 취한 경우도 있고, 취하지 않은 경우도 존재하였다. Skaza & Blais (2013)에 따르면 자연로그 여부에 따라 패턴이 다르기 때문에, 본 연구에서는 국내 대기오염물질에 대해 다양한 형태로 분석을 진행하여 연구를 진행하고자 한다.

이상의 내용으로 살펴 볼때, 아직까지 EKC에 대한 통일된 결과가 나타나지 않고 있으며, 시군구 단위의 분석은 아직까지 연구된 바 없다. 따라서 본 연구에서는 국내에서도 이와 같은 주요 대기오염물질에 대한 EKC가 성립하는지 세부적으로 살펴보고자 한다.

EKC 관련하여, 기울기의 그래프가 바뀌는 변곡점에 대한 소득 수준에 대해 살펴본 연구도 다양하게 존재한다. 우선 초기연구로는, Seldon & Song(1994)은 PM, SO, NO, CO 등의 대기오염 농도에 대해 분석한 결과, 1인당 소득 변곡점이 9,000 ~ 10,000달러로 밝힌 바 있다. 또한 대표적인 연구인 Grossman & Krueger(1994)에서도 PM, SO 등 환경오염 물질에 대해 실증분석한 결과, 1인당 소득 8000달러를 변곡점으로 조사하였다. Unruh & Moomaw(1998)은 CO배출량을 분석하여 소득 변곡점에 대하여 8,800 ~ 15,400달러로, 평균 11,400달러로 추정하였다. Khanna & Plassmann(2004)는 SO<sub>2</sub>에 대한 1인당 소득 수준 변곡점은 8000달러, pm<sub>10</sub>에 대한 1인당 소득 수준 11000달러로 밝혔으며, 이외 물질은 아직 해당 소득 수준 미달성한 것으로 설명하였다. Park & Lee(2011)는 국내 1인당 GRDP 자료로 소득 변곡점을 추정한 결과, SO<sub>2</sub>에 대해 28,000달러, CO에 대해 26,400~30,000달러, NO<sub>2</sub>에 대해 27,600달러로 U자형 변곡점이 나타난다고 밝힌 바 있다.

### 3. 자료 구축

EKC를 검증하기 위해, 크게 소득변수와 모형의 설명력을 높이기 위한 기타 설명변수에 대해 데이터셋을 구축하고자 하였다.

본 연구에서는 국내 시군구별 소득 수준의 편차가 클 것으로 가정하여 시군구별 단위의 소득 변수를 확보하고자 하였다. 따라서 소득 관련 지역별 변수로는 GRDP, 재정자립도, 건강보험 소득 등 3가지 변수를 검토하였다.

1차적으로 지역별로 GRDP(지역별 총생산) 값이 통계청에서 제공되어, 해당 자료를 기준으로 지역별 소득 변수를 계산하였다. 그러나, GRDP는 생산측면만을 제공하기 때문에, 개별 가구의 소득수준을 대표한다고 보기 어려움이 존재하였다.

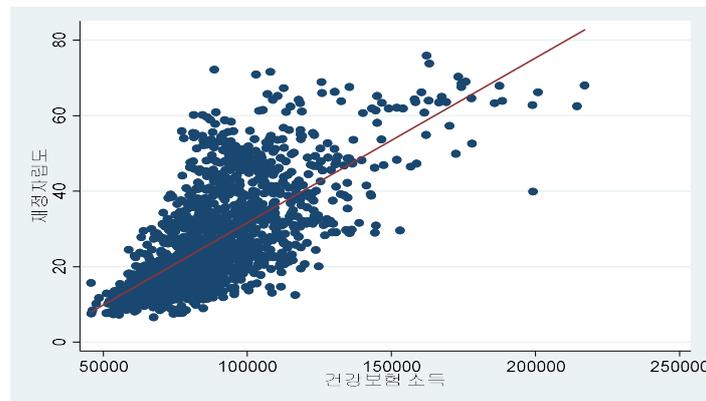
또한, 기초분석 결과, 상식적인 수준과 다르게 화성과 같은 지역은 삼성전자로 인하여 GRDP가 매우높게 나타났다. 경기도에서 일반적으로 소득 수준이 가장 높은 지역은 과천시나 분당구인데, 소득수준에 대한 왜곡이 발생하였다. 이에 대한 원인을 찾아보니, 이는 GRDP의 생산자 측면에서 기인한 것이다. 실제로 2019년 1인당 GRDP의 경우 이천시(하이닉스), 화성(삼성전자)이 상위 1,2를 가져가, 공장지역이 경기도 내 최상위권을 가져가는 것으로 나타났다. 또한, GRDP의 경우 시 단위로만 제공되어, 분당구 등의 세부적인 구분이 어렵기 때문에, 대기오염자료와의 결합이 어렵다.

다음으로, 재정자립도를 시군구별 소득변수 척도로 검토하였다. 기초분석결과, 재정자립도는 시군구별 소득 수준을 상대적으로 잘 나타냈다. 그러나 EKC를 검증하기 위한 최종모형에서 해당 소득 변수를 변형해야하는데, 재정자립도의 경우 0과 1사이의 비율이어서, 해석이 어려우며 일부 시군구에 대해 값이 존재하지 않았다.

따라서 본 연구에서 최종적으로 EKC를 설명하기 위한 소득 변수로, 건강보험공단에서 제공하는 시군구별 가구평균 의료보험료를 선택하였다. 이를 위해 국민건강보험공단에 시군구별 가구당 평균 의료보험료 자료를 요청하여, 해당 자료를 바탕으로 분석을 진행하였다.

즉, 최종적으로 본 연구에서는 건강보험공단에서 조사하는 지역별의료이용통계에서 제공하는 시군구별 평균 건강보험료 자료를 이용하여 분석을 진행한다. 해당 소득 정보 자료는 연도말 기준, 주민등록주소지 기준, 직장은 산정보험료 기준이며, 지역은 부과보험료 기준이다. 현재, 지역별 의료이용통계자료에 대한 접근이 2013년부터 2020년까지 가능하여 전체 분석기간 역시 2013~2020년으로 진행하였다. 실제로, 건강보험료자료와 재정자립도의 상관관계가 매우 높아, 건강보험료 자료가 시군구별 소득 수준 척도로 적합함을 아래 <그림 3>과 같이 확인할 수 있다.

<그림 3> 건강보험료와 재정자립도의 상관관계(시군구)



다음으로는 분석에 있어 종속변수로 활용한 대기오염물질 변수이다. 본 연구에서는 PM10, NO2, SO2, O3에 대해 분석을 진행하고자 한다. PM2.5의 경우 PM10과 매우 상관관계가 높기 때문에, 본 연구에서는 PM10에 대해서만 EKC 검증을 진행한다.

본 연구에서 활용한 대기오염 물질은 환경부 Air Korea의 자료를 활용하였다. 또한, 대기오염물질과 연관성이 높은 강수량의 경우 기후정보포털의 자료를 활용하였다.

그러나 대기오염물질 및 강수량의 경우 관측소 단위로 마이크로 값이 존재하여, 이를 최종분석 단위인 시군구로 매칭이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 대기오염물질 및 기상변수의 GPS를 시군구 단위로 매칭시켜 분석을 진행하였다.

물론 본 모든 시군구에서 대기오염물질 관측소가 존재하지는 않기 때문에, 크리깅 같은 보간법으로 보간하여 자료 구축을 진행하였다. 기상청 자료 역시 대기오염 자료와 마찬가지로 본래 읍면동 단위로 크리깅을 통하여 자료구축을 완료하였다. 그러나, 모든 변수의 단위가 동일해야하기 때문에 최종적으로 전국 시군구 단위로 기상자료도 구축을 완료하였다.

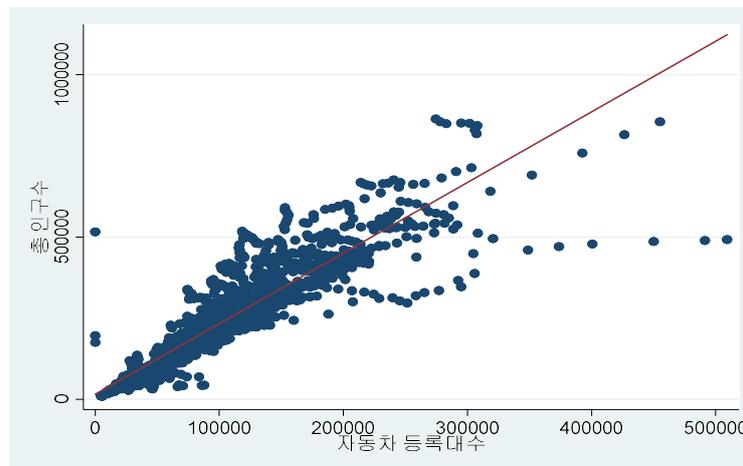
최종모형의 설명력을 위한 기타 설명변수로, 시군구별 단위로 수집가능한 다양한 변수를 후보로 검토하였다. 본 연구에서 수집한 시군구별 기타 인구사회 설명변수 후보자료는 아래와 같다.

<표 2> 인구사회 변수 후보

교육수준	1인가구수	자동차 등록대수	여성가구수	노인가구수
녹지면적(비율)	도시면적(비율)	지역건강지표 (흡연, 음주율 등)	현대식 부엌 및 화장실 수	현대식 화장실 수
아파트 거주비율	업종별 종사자 비율	총인구수	취업인구수	학력수준

본 연구의 목적은 EKC에 대한 대기오염물질별 성립여부를 파악하는 것으로, 기타 인구사회변수는 선행연구에 입각하여 선정하였다. Skaza & Blais (2013)의 기준을 따라 시군구별 녹지면적(비율), 강희찬(2019)를 따라 자동차 등록대수를 활용하였다. 미세먼지 배출관련하여 총인구수도 매우 중요하나, 아래 그림과 같이 자동차 등록대수와 총인구수의 상관관계가 매우 높아 다중공선성 문제가 존재하여 이는 제외하였다.

<그림 4> 총 인구수와 자동차 등록대수의 상관관계(시군구)



물론, 미세먼지 노출을 지역별 평균 미세먼지 농도로 정확히 판단할 수 있는지에 대한 비판이 존재할 수 있다. 그러나 개별 가구의 미세먼지 노출 정도를 파악할 수 있는 자료 확보가 어렵고, 소득 수준과 연계하는 부분이 쉽지 않아서, 최종적으로 지역별 평균 미세먼지 농도와 지역별 평균 건강보험료 자료를 이용하여 분석을 진행하고자 한다.

또한, 앞서 언급했듯 이를 위해 시군구 단위의 지역별 데이터 자료를 구축하였다. 우선, 미세먼지 및 초미세먼지 자료를 관측소 위치가 아니라 전국의 모든 읍면동 단위로 재구성하려 하였으나, 읍면동 단위 매칭이 어렵고 이외 변수가 시군구 단위여서 최종적으로 시군구 단위로 재분류 진행하였다.

본 연구에서는 활용 변수에 대해 아래 표와 같이 활용하고자 한다. 해당 데이터셋의 구축 기간은 2013~2020년이며, 제주도를 제외한 모든 시군구이다. 이는 아래 <표 3>과 같이

나타난다.

<표 3> 최종 선정 변수

변수	측정지표	출처
지역별 대기오염 물질농도	시군구별 연평균 대기오염물질 농도 (PM10, SO2, NO2, O3)	환경부 Air Korea
녹지면적비율	용도지역(시군구)-도시지역의 녹지지역 비율	한국국토정보공사 도시계획현황
자동차 등록대수	자동차등록대수현황 시도별 (1,000대)	국토교통부 자동차등록현황보고
한국 지역별 강수량	한국 시군구별 연평균 강수량	기후정보포털
한국 지역별 소득	한국 시군구별 가구 연평균 건강보험료(만원)	건강보험공단

다음으로, 아래 <표 4>는 본 연구에서 활용한 변수의 기초통계량을 나타낸다. 본 연구에서 사용한 자료는 2013~2020년에 대한 연별 값으로 재구성했으며, 시군구별 단위의 값이다. 전체 분석대상 시군구는 244개이다.

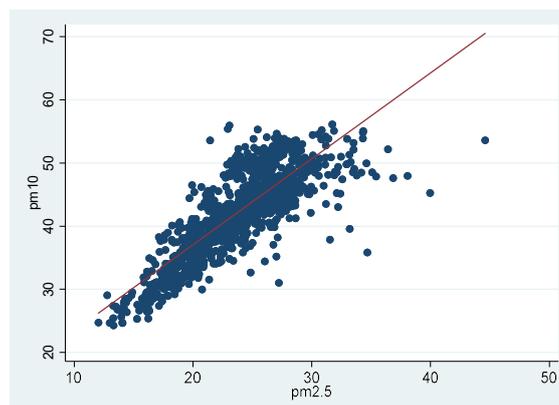
<표 4> 활용한 변수 기초통계량(2013~2020년)

변수명	관측치	평균	표준편차	최소값	최대값
연평균 SO2	1,963	0.00	0.00	0.00	0.01
연평균 NO2	1,963	0.48	0.07	0.21	0.75
연평균 O3	1,963	0.03	0.00	0.02	0.06
연평균 PM10	1,963	0.02	0.01	0.00	0.04
연 강수량	1,963	39.88	10.98	17.54	89.86
자동차등록대수 (단위 : 천대)	1,938	87	66	46	455
의료보험소득 (단위 : 만원)	1,946	8.9	2.2	4.5	21.7
녹지비율 (단위 : %)	1,747	64.61	21.78	0.00*	93.07
시군구	244				

\*예를 들어, 2013년 서울시 중구의 녹지비율은 0으로 나타남

본 연구에서는 아래 <그림 5>와 같이 PM2.5의 정의 및 실제 패턴이 PM10과 유사하다고 판단하여, 별도로 PM2.5에 대해 분석하지 않았다.

<그림 5> PM2.5와 PM10의 상관관계(시군구)



## 4. 분석 내용

### 4.1. 기초분석

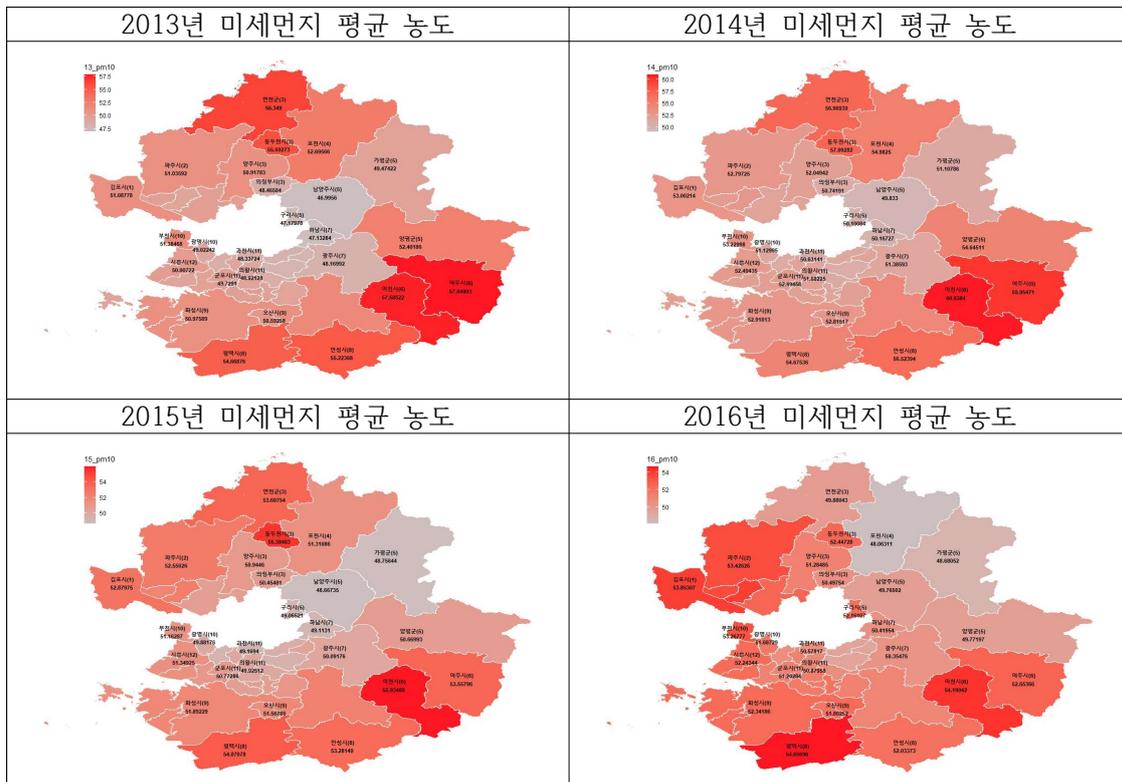
본 연구에서는 1차적으로 이광훈·이춘화(2009)와 같이 국내 최대 인구수를 가지는 경기도 사례에 대해 시각적으로 기초분석을 진행하여, 최대 인구밀집 지역에서 시군구별 단위에서 주요 관심 변수의 격차가 있는지 케이스 분석을 진행하였다.

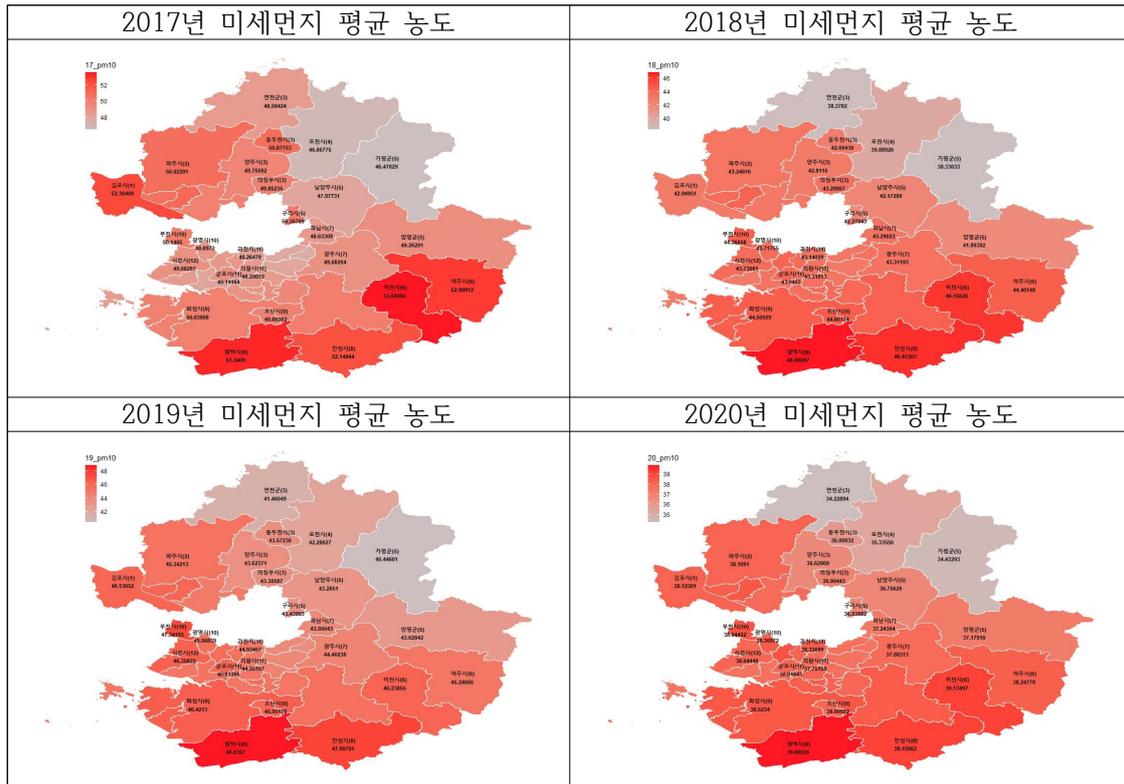
수도권 지역은 국내 전체 면적 대비 11.8%를 차지하지만, 2020년 기준 수도권 인구 비중은 51%이며 2021년 기준 실질 GDP 전국 대비 비중이 52.8%를 차지하고 있어 대기오염을 포함한 환경오염과 지역별 발전 및 소득 수준의 상관관계의 가장 주요 지역으로 볼 수 있다.

국내의 절반 이상의 인구 및 생산활동이 수도권에서 이루어지다보니, 대기오염 배출량 자체도 매우 큰 비중을 차지하고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 전체 시군구를 대상으로 분석하기 앞서, 대표 사례분석으로 경기도의 시군구별 가구당 평균 건강보험료와 미세먼지 농도간의 기초분석을 진행하였다.

이를 시각적으로 나타내면 아래 <그림 6>과 같다. 아래 그림들은 우선, 경기도에 한하여 2013년~2020년 평균 시군구별 평균 미세먼지 농도를 나타낸다. 해당 그림에서 색이 진할수록 농도가 높은 것을 나타내는데, 같은 경기도 내에서도 지역별로 평균 농도 차이가 상당히 발생하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 서로 인접한 지역일지라도 해당 시군구별 특성으로 인하여 농도가 달라진다는 것을 의미한다.

<그림 6> 연도별 경기도 미세먼지 평균 농도

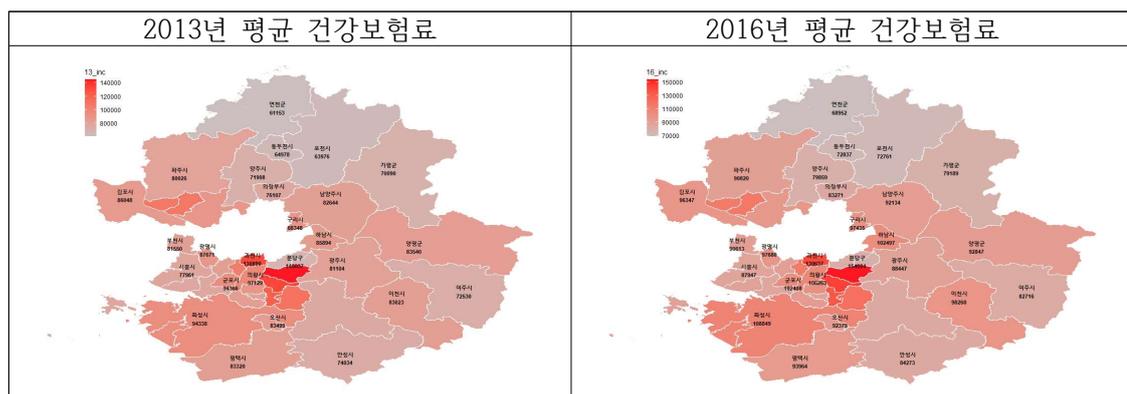


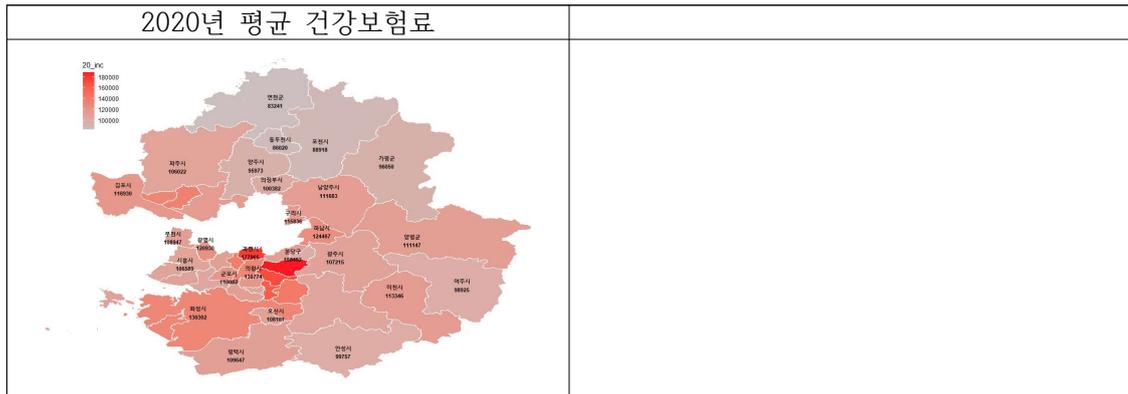


그림에서 보이듯, 평택시, 안성시, 이천시 등의 평균 미세먼지 농도가 가장 높게 나타났다 (진한 붉은색). 또한, 해외 측 요인으로 인하여 상대적으로 동부지역보다 서부지역의 평균 미세먼지 농도가 높게 나타난 것으로 보인다. 본 연구자가 판단하기에, 충남의 화력발전소와 가장 인접한 지역이 평택시, 이천시 등 경기도 남부 지역이기 때문에 이와 같은 결과가 나타난 것 같다. 또한, 경기도 내에서 가장 소득수준이 높은 과천시, 분당구 등은 미세먼지 농도 수준이 인근 지역에 비하여 낮게 나타나고 있음을 확인할 수 있었다.

아래 <그림 7>은 2013년, 2016년, 2020년 경기도의 시군구별 평균 건강보험료 수준을 나타낸다. 경기도 내 시군구별 평균 건강보험료가 아래 그림과 같이 매우 큰 차이를 보이고 있으며, 확연히 과천시와 분당구 및 수지구가 높게 나타났음을 확인할 수 있다.

<그림 7> 연별 경기도 내 평균 건강보험료





이상으로 수도권인 인구 최대 거주지역인 경기도에 대해 살펴본 결과, 같은 도 내에서도 미세먼지 및 소득 수준의 차이가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

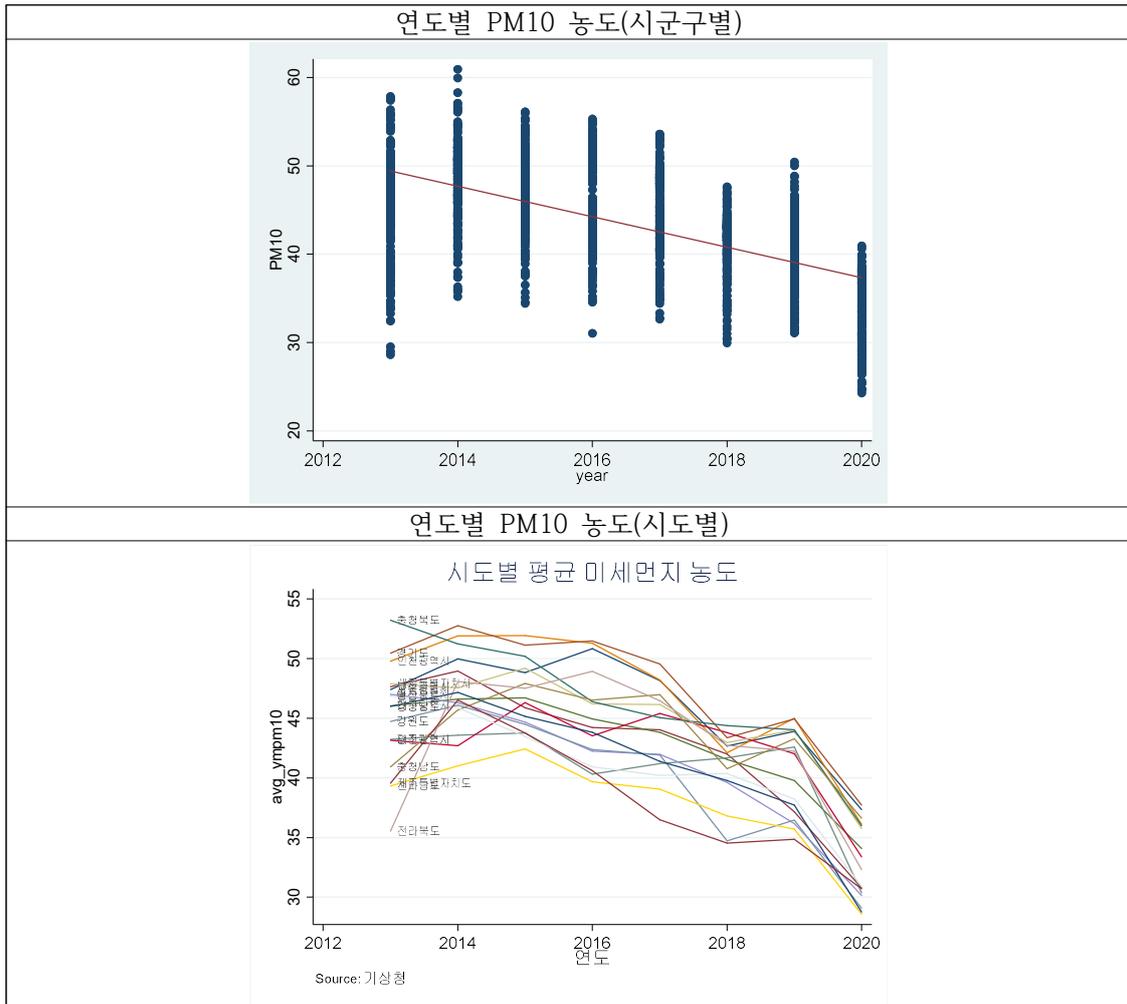
본 연구에서는 최종적으로 제주도를 제외한 전국 시군구를 단위에서 분석을 진행하고자 한다. 따라서 다음으로, 전국 시군구별 주요 대기오염물질에 대하여 연도별 값을 아래와 같이 비교하고자 한다.

우선, 아래 <그림 8>은 연도별 시군구 및 시도별 PM10 현황을 나타낸다. 그림에서 동일 연도에 대해 위와 아래에 꼬리가 길게 나타난 것을 통하여, 국내 같은 시점의 시군구라 하더라도 평균 PM10 농도 차이가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그리고 첫 번째 그림의 회귀선(빨간색 실선)을 통해 평균적으로 PM10 농도가 지속적으로 하락하고 있음을 확인할 수 있다.

그리고 <그림 8>의 두 번째 그림은 좀 더 시각적으로 확인이 쉽도록 시군구 단위가 아닌 시도별 단위의 PM10 현황을 나타낸다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 2013년 기준으로 충북, 경기도, 인천광역시 순으로 평균 PM10 농도 높았으며, 전라북도가 가장 PM10 농도가 낮게 나타났다. 그리고 경기도, 인천광역시 및 서울 등 수도권의 경우 시도 중에 항상 평균 PM10 농도 상위권을 차지하고 있음을 확인하였다. 또 하나의 특징은, 매해 시도별 편차가 조금씩 줄어들고 있다는 점이다. 마지막으로, 2020년도의 경우에 COVID-19의 영향을 인하여 PM10 평균 농도가 매우 낮게 나타났다.

1) <https://www.airkorea.or.kr/web>  
 2) 본 연구에서는 미세먼지 외에 SO2, CO, O3, NO2 등의 대기오염 물질을 주요 통제변수로 보고 기초분석을 진행하였다. 그 결과, SO2 및 NO2가 영향력이 가장 높아 최종 통제변수로 선정하였다. 이는 맹지연(2013)등의 연구결과와도 부합한다.  
 3) 건강보험공단에서 제공하는 평균 건강보험료 통계자료에 따르면, 2019년의 경우 다른 연도와 다르게 용인시 처인구가 시군구별 평균 건강보험료가 가장 높게 나타났다.

<그림 8> 연도별 PM10 현황(시군구 및 시도별)

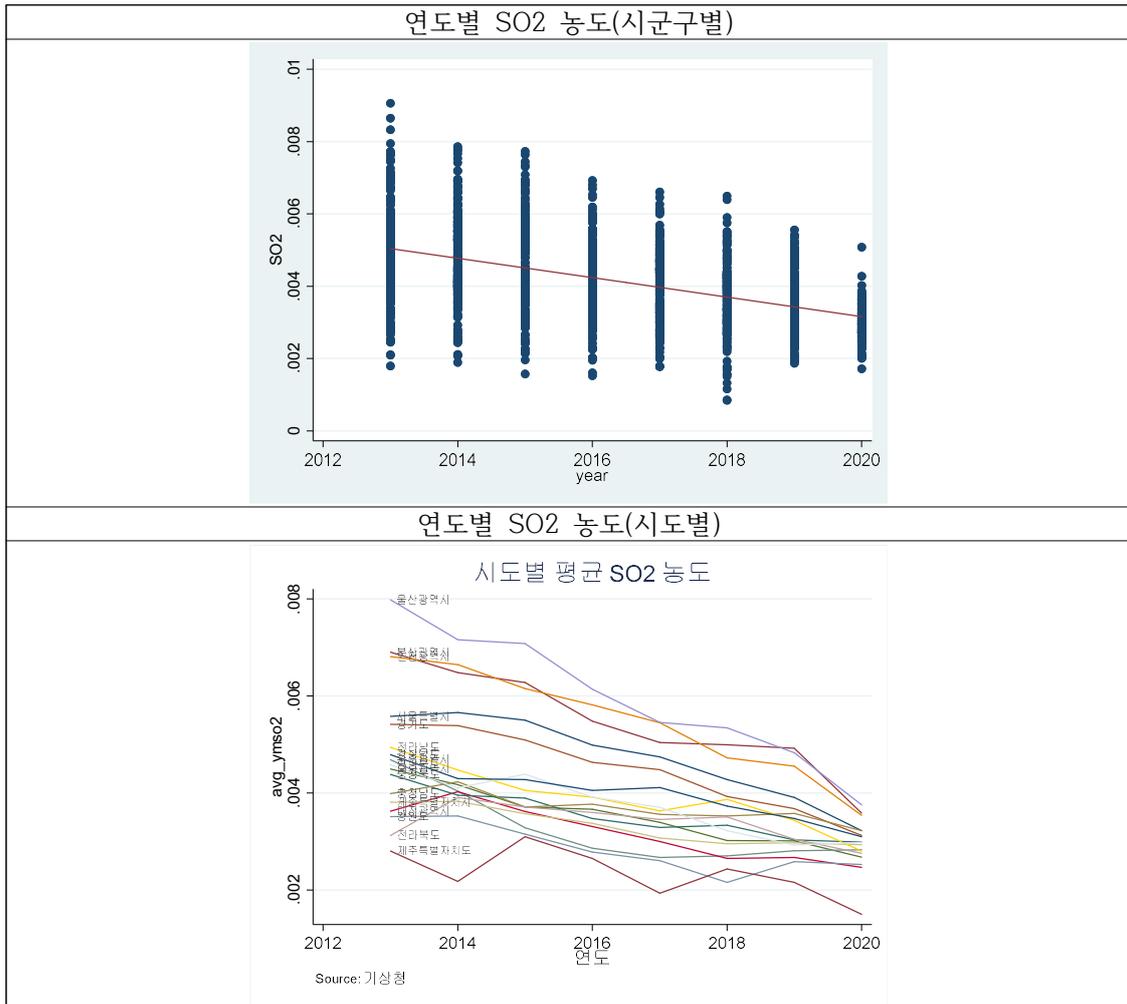


다음으로 아래 <그림 9>는 연도별 NO2 시군구 및 시도별 값을 나타낸다. NO2의 경우 다른 대기오염 물질에 비하여 시군구별로 편차가 상대적으로 가장 큰 것을 확인할 수 있다. 따라서 평균 농도상위 그룹과 하위그룹의 차이가 존재하는 것을 확인할 수 있다. NO2의 경우에도 PM10과 유사하게 서울시, 경기도, 인천시 등 수도권 지역에서 평균적으로 가장 높게 나타난 것을 확인할 수 있다. 그러나 PM10에 비하여 해당 현상이 더욱 뚜렷하게 나타났으며, 서울시가 평균 NO2 농도가 월등히 높다는 것이 가장 큰 특징이다.

앞서 살펴본 PM10의 경우 충북, 경기도, 인천광역시 순으로 나타났는데 화력발전소 등이 존재하는 충청도 지역이 상대적으로 높게 나타나, 대기오염 물질에 따라 지역별 편차가 존재하는 것을 비교 및 확인할 수 있다.



<그림 10> 연도별 SO2 현황(시군구 및 시도별)



반면 아래 <그림 11>은 연도별 시군구 및 시도별 O3에 대한 값을 나타내는데, 첫 번째 그림의 빨간색 추세선에서 보이듯 시간이 흐를수록 평균 추세가 상승하는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서 살펴본 PM10, SO2, NO2와는 정반대의 패턴이다.

그리고 전라도, 강원도, 경상도에서 O3의 평균 농도 수준이 높았고, 앞의 대기오염 물질들과 다르게 서울특별시 및 경기도 등 수도권 지역에서 그 평균 수준이 가장 낮게 나타난 것이 다른 주요 대기오염 물질들과 다른 점이다. 즉, O3의 경우 앞에서 살펴본 PM10, NO2, SO2와 연별 패턴 및 지역별 특징이 매우 상이함을 확인할 수 있다.



		정읍시		청원시		완산구		영주시
2014	39.9	강원도 정선군	86.5	강원 원주시	0.0020	전북 무주군	0.0157	경북 봉화군
2015	29.4	경남 울릉군	70.7	강원 원주시	0.0022	경북 울릉군	0.0200	경북 봉화군
2016	29.0	경북 경주시	67.2	경기 일산서구	0.0017	강원 평창군	0.0140	경북 봉화군
2017	32.8	전남 여주시	74.9	강원 원주시	0.0014	전북 무주군	0.0149	경북 봉화군
2018	26.3	경남 함양군	66.8	전남 남원시	0.0009	경남 함양군	0.0076	경북 영주시
2019	39.0	전남 고흥군	76.9	충북 흥덕구	0.0011	경북 청송군	0.0086	경북 봉화군
2020	21.2	경남 울릉군	51.7	충북 서북구	0.0014	경북 청송군	0.0081	경북 봉화군

<표 5> 주요 대기오염물질의 시군구별 최소 및 최대값(계속)

연도	NO2				O3			
	최소값	해당 시군구	최대값	해당 시군구	최소값	해당 시군구	최대값	해당 시군구
2013	0.0007	경북 청송군	0.0505	경기 수정구	0.0104	경기 수정구	0.0386	강원 속초시
2014	0.0020	인천 옹진군	0.0473	경기 중원구	0.0083	서울 강동구	0.0468	강원 속초시
2015	0.0022	강원 양양군	0.0428	경기 분당구	0.0097	대전 중구	0.0415	경북 울릉군
2016	0.0017	강원 속초시	0.0410	서울 강남구	0.0112	경기 중원구	0.0363	경북 양양군
2017	0.0014	인천 옹진군	0.0427	경기 영통구	0.0109	경기 영통구	0.0441	경북 울릉군
2018	0.0009	강원 양구군	0.0409	경기 팔달구	0.0108	경기 팔달구	0.0383	강원 속초시
2019	0.0011	인천 옹진군	0.0478	경기 수정구	0.0099	경기 수정구	0.0350	인천 옹진군
2020	0.0014	강원 고성군	0.0385	서울 성북구	0.0116	경기 팔달구	0.0385	경북 울릉군

앞에서 시각적으로 살펴본 결과와 동일하게, 대기오염별 연평균 농도에 대한 최소 및 최대값의 격차가 매우 크게 나타난 것을 확인할 수 있다. 시군구별 자료의 경우 지역별로 편차가 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

PM10의 경우 최대값이 지속적으로 감소하고 있음을 통해, 연도별로 농도 수준이 개선되고 있음도 확인할 수 있다. PM10의 경우 울릉군과 같이 섬 지역이 미세먼지 농도가 가장 낮게 나타났고, 충북 지역 및 강원도 원주가 미세먼지 농도가 높게 나타났음을 확인할 수 있다. 국내 최대 화력발전소가 위치한 충남보다 충북이 PM10 농도의 연평균 및 최대값이 모두 높게 나타났다는 것도 특징이다.

다음으로, SO2의 경우 전북 및 울릉 지역이 평균 농도가 낮게 나타났으며, 경북 봉화군

및 경북 영주시에서 매해 가장 높은 수준의 농도를 기록한 것이 특징이다. NO<sub>2</sub>의 경우, 강원 및 인천 지역에서 연별 최소값을 기록하였고, 경기 및 서울의 고소득 지역에서 높은 값을 기록한 것이 특징이다. O<sub>3</sub>의 경우 NO<sub>2</sub>와 최소값 및 최대값이 반비례하여 나타난 것이 특징이다. NO<sub>2</sub>에서 최대값을 기록한 지역이(경기도 영통구, 수정구 등) 해당 동일 연도의 O<sub>3</sub>에서는 최저값을 기록하였다.

김득수 외(2016)에 따르면 일반적으로 NO<sub>2</sub>의 경우 오전 출근 시간대인 오전 6시~ 10시에 높게 관측되었으며, O<sub>3</sub>의 경우 오후 1~4시에 가장 높은 경향을 보이며, O<sub>3</sub>값이 높을수록 NO<sub>2</sub>의 값은 낮게 나타났다. 즉, NO<sub>2</sub>와 O<sub>3</sub>의 농도 수준이 반비례하는 것은 선행연구 결과와 일치한다. 이는 도심 지역에서 광화학 오존생성과정의 특성에 따른 현상으로 보인다.

이상으로, 본 연구에서 PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>에 대해 기초분석한 내용을 정리하면 다음과 같다.

첫째, 주요 대기오염물질의 경우 같은 연도내에서도 각 시군구에 따라 편차가 크게 존재하였다. 따라서, 시군구별 단위로 분석이 필요함을 확인할 수 있다.

둘째, 전반적으로 연도가 지날수록 O<sub>3</sub>를 제외한 PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>의 평균 및 최대 농도가 지속적으로 감소추세에 있다.

셋째, 대기오염별로 최대 농도 및 최소 농도 지역이 상이하였으며, O<sub>3</sub>와 나머지 3가지 대기오염 물질의 공간적 특성이 매우 다른 것이 특징이다.

## 4.2. 정규분포 검정

앞서 정리한 EKC 관련 실증분석 선행연구들의 경우, 종속변수인 대기오염 농도와 주요 설명변수인 소득 수준에 대해 자연로그(log)를 취한 경우도 있고, 취하지 않은 경우도 존재하였다.

Skaza & Blais (2013)에 따르면 자연로그 여부에 따라 패턴이 다르기 때문에, 본 연구에서는 국내 대기오염물질에 대해 다양한 형태로 분석을 진행하여 연구를 진행하고자 한다. 해당 연구에서는 아래와 같이 모형을 세워 자연로그 여부에 따른 EKC 성립을 살펴보았다.

$$\text{식 (1)} \quad P = \beta_0 + \beta_1 Y + \beta_2 Y^2 + \mu$$

$$\text{식 (2)} \quad P = \beta_0 + \beta_1 \log(Y) + \beta_2 \log(Y)^2 + \mu$$

$$\text{식 (3)} \quad \log(P) = \beta_0 + \beta_1 Y + \beta_2 Y^2 + \mu$$

$$\text{식 (4)} \quad \log(P) = \beta_0 + \beta_1 \log(Y) + \beta_2 \log(Y)^2 + \mu$$

실증분석시, 변수에 자연로그를 취하는 이유는 데이터 간 편차를 줄여 왜도(skewness)와 첨도(kurtosis)를 줄임으로써 정규성을 확보할 수 있기 때문이다. 즉, 해당 변수의 극단치들을 조정함과 동시에 단위를 조정함으로써 회귀분석의 정규분포 가정을 충족시키기 위해

로그변형을 진행하는 것이다.

본 연구에서는 선행연구에서 로그변형에 따라 EKC 성립이 해외사례에서 다르게 나타난 점에 착안하여, 국내 자료로 로그변형에 따른 EKC 성립을 확인하고자 한다.

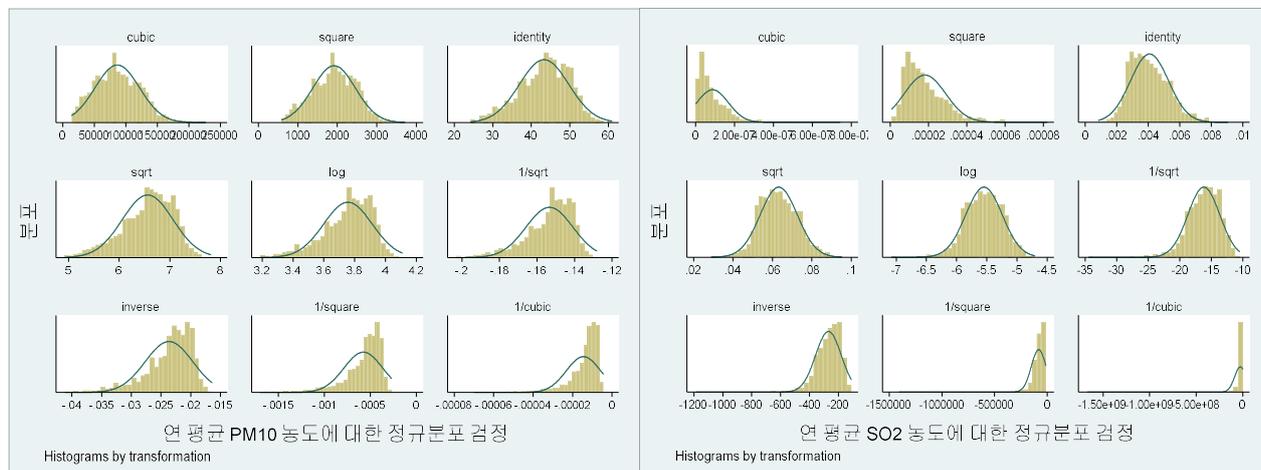
그러나, 로그변형을 취하지 않은 원자료(level)에서 극단적으로 정규분포 형태가 나타나지 않을 경우에는 회귀분석 시 원자료를 사용하기 어렵다. 정확히는 이론적으로 회귀분석 시 잔차항이 정규분포를 나타내는지 가장 중요하다. 그러므로 본 연구에서는 원자료와 로그형태를 시각적으로 비교하여, 적절성을 판단하고자 한다.

따라서 본 절에서는 종속변수인 대기오염 물질 4종과 주요 설명변수인 시군구별 연평균 건강보험료 수준에 원자료와 로그변환한 결과값에 대해 시각적으로 살펴보고, 그 적절성을 판단하여 실증분석에 활용하고자 한다.

먼저, 아래 <그림 12>는 연평균 PM10 및 SO2 농도에 대해 다양한 변형에 따른 정규분포 검정결과를 그래프로 나타낸 것이다. 그림에서 나타나듯, 변형에 따라 분포의 형태가 바뀌는 것을 확인할 수 있다. PM10의 경우 원자료(identity)와 로그변환(log)의 경우에 변화에 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다.

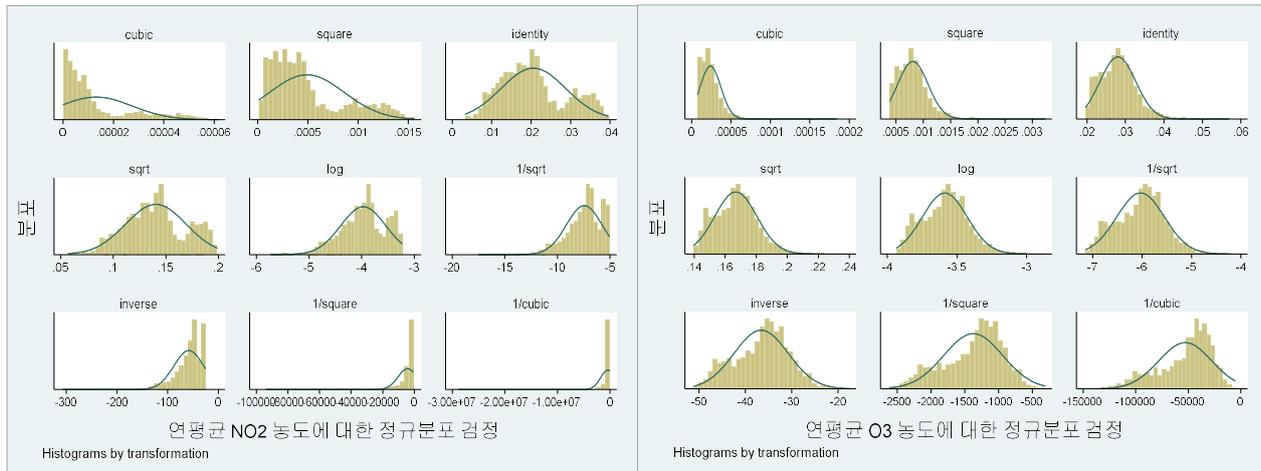
다음으로 SO2의 경우 그림과 같이 로그변환 시, 원자료보다 정규형태의 모습으로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 단, PM10 및 SO2 원자료 및 로그변환 모두 1% 유의수준에서 정규분포 검정에 대한 귀무가설을 기각하였다.

<그림 12> 연평균 PM10 및 SO2 농도에 대한 정규분포 검정비교



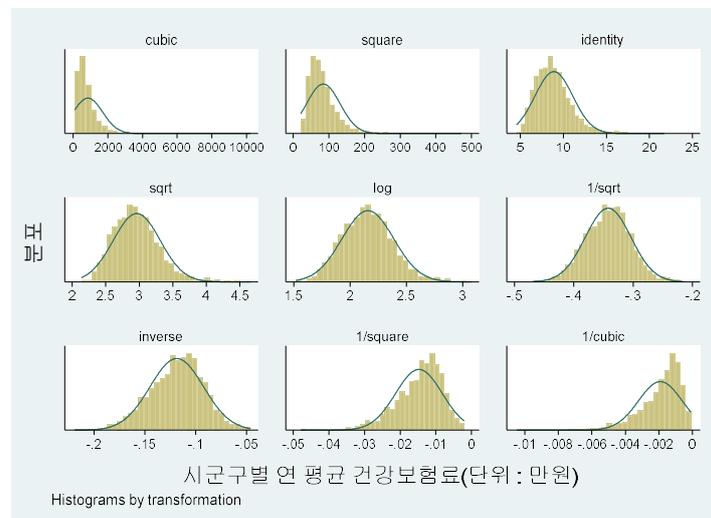
다음으로 아래 <그림 13> 연평균 NO2 및 O3 농도에 대해 다양한 변형에 따른 정규분포 검정결과를 그래프로 나타낸 것이다. NO2의 경우, 로그변환을 할 경우 보다 편차가 작아짐을 확인할 수 있지만, 상대적으로 큰 차이는 없음을 확인할 수 있다. 반면, O3의 경우 로그변환시 상대적으로 정규분포 형태에 근접함을 확인할 수 있다. 단, NO2 및 O3 원자료 및 로그변환 모두 1% 유의수준에서 정규분포 검정에 대한 귀무가설을 기각하였다.

<그림 13> 연평균 NO2 및 O3 농도에 대한 정규분포 검정



마지막으로, 관심 설명변수인 연평균 건강보험료의 경우 아래 <그림 14>와 같이 분포가 나타나는데, 원자료에 비해 로그변환시 정규분포에 보다 근접함을 확인할 수 있다. 단, 연평균 건강보험료의 원자료 및 로그변환 모두 1% 유의수준에서 정규분포 검정에 대한 귀무가설을 기각하였다.

<그림 14> 연평균 건강보험료(단위 : 만원)



### 4.3. 분석결과

본 연구에서도 앞서 서술한 Skaza & Blais(2013)의 연구결과를 토대로, 로그변환 등 유무에 따라 앞서 살펴본 식(1)~식(4)와 같이 총 4가지 모형으로 주요 대기오염물질 PM10, SO2, NO2, O3에 대해 패널회귀분석을 진행하여, EKC가 각각 성립하는지 살펴보고 이에 대한 시사점을 도출하고자 한다.

본 분석은 2013~2020년 연간자료에 대해 제주도를 제외한 244개 시군구를 대상으로 이루어졌다.

### 4.3.1. PM10

우선 EKC에 대한 검증을 하기 위해, 아래 <그림 15>와 같이 연별로 PM10과 시군구별 평균 건강보험료의 관계를 살펴보았다. X축 단위는 원이며, Y축 단위는  $\mu g/m^3$ 이다.

<그림 15> 연도별 시군구 건강보험 평균소득과 미세먼지 관계



앞서 언급했듯이 EKC가 성립하려면 X축(가구별 평균 건강보험 소득변수)과 Y축(미세먼지 평균 농도)의 관계가 역 U자형으로 나타나야 한다. 해당 그림에서 보이듯, 단순히 건강보험료와 미세먼지 평균 농도가 선형적으로 1차형태로 비례하지는 않는 것을 확인할 수 있다. 가구당 평균 건강보험료가 가장 높은 수준인 강남구 및 서초구의 경우 물론 미세먼지 농도 수준이 전체 244개 시군구 평균 수준보다는 높지만, 역 U자형의 변곡점과 같이 기울기가 평평한 것을 확인할 수 있다. 또한, 앞서 기초분석에서 살펴봤듯, Y축 단위에서 확인할 수 있듯이 시간이 흐름에 따라 전반적인 PM10 평균 농도는 낮아지고 있음을 확인할 수 있다.

아래 <표 6>은 2013~2020년 PM10에 대해 시군구별 단위로 모형(1)~모형(4)를 바탕으로 패널회귀분석한 결과를 나타낸다. EKC가 성립하려면, 소득 및 소득의 제곱항이 모두 통계적으로 유의해야 하며, 소득 제곱항의 계수가 음(-)으로 나타나야 한다. 앞 <그림 15>에서 봤듯, PM10에 대해서는 EKC가 뚜렷하게 나타나지는 않았다. 그리고 분석결과, 모형(1)~모형(4) 가운데 오직 종속변수 및 설명변수 모두 원자료를 사용한 모형(1)에서만 소득 및 소득의 제곱항의 추정치가 통계적으로 모두 유의했으며, 소득 제곱항의 계수가 음(-)으로 나타났다. 따라서 PM10의 경우 4개 모형 가운데, 모형(1)에서만 EKC가 성립함을 확인하였다.

<표 6> PM10에 대한 패널회귀분석 추정결과

변수	모형(1)	모형(2)	모형(3)	모형(4)
	노말-노말	노말-로그	로그-노말	로그-로그
	추정치			
소득(만원)	0.93***	3.65	0.02**	-0.19
소득 <sup>2</sup>	-0.024**	-0.17	-0.0002	0.05*
연강수량	-0.05***	-7.00***	-0.001***	-0.14***
녹지면적비율	-0.01	-0.44	-0.0003	-0.01
자동차 등록대수 (1,000대)	0.12***	1.46***	0.0003***	0.03***
2013	13.26***	13.18***	0.33***	0.33***
2014	14.84***	14.75***	0.37***	0.37***
2015	13.52***	13.46***	0.34***	0.34***
2016	12.68***	12.65***	0.32***	0.32***
2017	10.79***	10.83***	0.28***	0.28***
2018	7.79***	7.79***	0.21***	0.21***
2019	6.84***	6.95***	0.19***	0.19***
R-sq	0.61	0.62	0.63	0.63
N	1,739	1,729	1,739	1,729

소득 외의 변수에 대한 분석결과는 아래와 같다. 먼저, 연강수량의 경우 모든 모형에서

1% 유의수준에서 음(-)으로 추정치가 나타났다. 즉, 강수는 미세먼지 농도를 낮추는데 매우 유의한 변수임을 확인할 수 있다. 안숙희 외(2014)에 따르면 PM, NO, CO, SO<sub>2</sub> 등 다양한 대기오염 물질 가운데 강수로 인한 농도감소 효과가 PM에서 가장 크게 나타나, 이는 선행연구와 동일한 결과임을 확인할 수 있다.

다음으로, 시군구별 녹지면적비율은 모든 모형에서 통계적 유의성이 없게 나타났다. 즉, 시군구별 녹지면적 비율이 증가하더라도, 통계적으로 미세먼지 저감효과가 유의하게 나타나지 않은 것이 특징이다.

다음으로, 시군구별 자동차 등록대수는 모든 모형에서 1% 유의수준에서, 미세먼지에 양(+)의 효과를 미치는 것으로 나타났다.

이상의 내용을 종합할 때, 시군구 내에 공원등 녹지면적이 증가하더라도 미세먼지 저감 자체에는 유의한 영향을 미치지 못했지만, 자동차 등록대수의 증가는 미세먼지 농도 증가에 매우 유의한 영향을 미치는 것을 확인하였다. 따라서, 이와 같은 분석결과는 미세먼지 저감을 위해 시행중인 비상저감조치 가운데 자동차 운행 제한 등의 정책효과를 뒷받침하는 근거로 이용될 수 있다.

그리고 EKC 관련하여 종합하자면, 미세먼지의 경우 추세가 꺾이는 변곡점이 4개 모형 중 1개에서만 포착되었고, 그 유의성이 5%수준으로 나타났다. 앞서 살펴보았듯 선행연구들의 경우, 해당 변곡점이 어느 수준에서 나타나는지에 대해서도 분석을 많이 진행하였다. 본 연구에서도 모형(1)을 바탕으로 소득 변곡점을 계산한 결과, 건강보험료 19.5만원으로 나타났다. 즉, 해당 시군구의 평균 19.5만원이 될 때까지는 미세먼지 평균 농도가 증가하지만, 19.5만원이 넘어설 경우 대기오염에 대한 관심 수준 등이 높아져 평균 미세먼지 농도가 꺾이는 현상이 나타났다고 해석할 수 있다. 그러나 아직 국내 244개 시군구 가운데 평균 건강보험료가 19.5만원을 넘는 곳은 강남구, 서초구, 분당구 등 매우 소수 지역만이 존재하여 아직까지 변곡점 이후에 대한 관측치는 거의 존재하지 않는 상황이다.

#### 4.3.2. NO<sub>2</sub>

우선 NO<sub>2</sub>에 대해서, EKC에 대한 검증을 하기 위해 아래 <그림 16>과 같이 연별로 NO<sub>2</sub>와 시군구별 평균 건강보험료의 관계를 살펴보았다. X축 단위는 원이며, Y축 단위는 ppm이다.

앞서 살펴보았듯, EKC가 성립하려면 X축(가구별 평균 건강보험 소득변수)과 Y축(NO<sub>2</sub> 평균 농도)의 관계가 역 U자형으로 나타나야 한다. 해당 그림에서 보이듯, 단순히 건강보험료와 NO<sub>2</sub> 평균 농도가 선형적으로 1차 형태로 비례하지는 않았다. 특히 앞 <그림 15>에서 살펴본 미세먼지의 경우와 다르게 보다 선명하게 역 U자형 관계가 있음을 확인할 수 있다. 가구당 평균 건강보험료가 가장 높은 수준인 강남구 및 서초구와 같은 경우, 역 U자형의 변곡점과 같이 기울기가 평평한 것을 확인할 수 있다. 또한, 앞서 기초분석에서 살펴보았듯, Y축 단위에서 확인할 수 있듯이 시간이 흐름에 따라 전반적인 NO<sub>2</sub> 평균 농도는 낮아지고 있음을 확인할 수 있다.

<그림 16> 연도별 시군구 건강보험 평균소득과 NO2 관계



아래 <표 7>은 2013~2020년 NO<sub>2</sub>에 대해 시군구별 단위로 모형(1)~모형(4)를 바탕으로 패널회귀분석한 결과를 나타낸다. EKC가 성립하려면, 소득 및 소득의 제곱항이 모두 통계적으로 유의해야 하며, 소득 제곱항의 계수가 음(-)으로 나타나야 한다. 앞 <그림 16>에서 봤듯, NO<sub>2</sub>의 경우 EKC 형태가 PM<sub>10</sub>에 비해서는 뚜렷하게 나타났다. 분석결과, 모형(1)~모형(4) 가운데 모형(4)를 제외한 3개의 모형에서 소득 및 소득의 제곱항의 추정치가 통계적으로 모두 유의했으며, 소득 제곱항의 계수가 음(-)으로 나타났다. 따라서 NO<sub>2</sub>의 경우 4개 모형 가운데, 총 3개에서 EKC가 성립하였는데, 이는 미세먼지의 경우 모형(1) 1개만 성립한 것과 대조된다.<sup>3)</sup>

<표 7> NO<sub>2</sub>에 대한 패널회귀분석 추정결과

변수	모형(1)	모형(2)	모형(3)	모형(4)
	노말-노말	노말-로그	로그-노말	로그-로그
	추정치			
소득(만원)	0.004***	0.05***	0.10***	0.06
소득 <sup>2</sup>	-0.0001***	-0.01***	-0.003***	0.04
연강수량	-2.31E-06	-0.002***	0.0004	-0.03
녹지면적비율	-0.00008***	-0.003***	-0.005***	-0.14***
자동차 등록대수 (1,000대)	3.56E-09	0.002***	0.0008***	0.15***
2013	0.0094***	0.0087***	0.46***	0.41***
2014	0.0090***	0.0083***	0.46***	0.42***
2015	0.0078***	0.0070***	0.41***	0.37***
2016	0.0070***	0.0063***	0.37***	0.34***
2017	0.0058***	0.0051***	0.32***	0.29***
2018	0.0045***	0.0040***	0.25***	0.22***
2019	0.0032***	0.0028***	0.18***	0.16***
R-sq	0.51	0.55	0.50	0.56
N	1,739	1,729	1,739	1,729

NO<sub>2</sub>와 관련하여 소득 외의 변수에 대한 결과는 아래와 같다. 먼저, 연강수량의 경우 모형(2)에서만 1% 유의수준에서 음(-)으로 추정치가 나타났고, 나머지 모형의 경우 통계적 유의성이 포착되지 않았다. 즉, 강수는 미세먼지와 다르게 NO<sub>2</sub>의 경우 통계적 상관관계가 낮게 나타났다. 안숙희 외(2014)에서도 NO<sub>2</sub>의 경우 태풍기간 때 다른 대기오염물질과 다르게 NO<sub>2</sub>가 감소하지 않았음을 밝히고 있다.

다음으로, 시군구별 녹지면적비율은 모든 모형에서 1% 유의수준에서 NO<sub>2</sub> 농도 감소에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 즉, 미세먼지와 다르게, 시군구별 녹지면적 비율이 증가하면, 통계적으로 미세먼지 저감효과가 유의하게 나타난 것이다. 이는 NO<sub>2</sub>가 녹지지역과 밀접한 관계를 가지는 것에 대해 분석한 선행연구 결과와 일치한다(홍재선 외, 2007).

다음으로, 시군구별 자동차 등록대수는 모든 모형(1)을 제외한 3개 모형에서 1% 유의수준에서, NO<sub>2</sub>에 양(+의 효과를 미치는 것으로 나타났다. 이는 자동차에서 배출되는 물질이 NO<sub>2</sub> 농도 증가에 미친다는 선행연구 결과와 동일하다(전병일, 2018; 김운수, 2013).

그리고 연별 더미변수를 통해 살펴봤을 때 PM<sub>10</sub>과 마찬가지로 NO<sub>2</sub>역시 시간이 흐를수

록 평균 농도가 지속적으로 감소추세임을 확인할 수 있다.

또한, 본 연구에서 모형(1)을 바탕으로 NO<sub>2</sub> 소득 변곡점을 계산한 결과, 건강보험료 13.8만원으로 나타났다. 즉, 해당 시군구의 평균 13.8만원이 될 때까지는 미세먼지 평균 농도가 증가하지만, 13.8만원이 넘어설 경우 대기오염에 대한 관심 수준이 높아지고 관련 시설 투자 등이 증가하여 평균 NO<sub>2</sub> 농도가 감소하는 현상이 나타났다고 해석할 수 있다. <그림 16>에서 확인할 수 있듯이, 2019년의 경우 용인시 처인구, 경기 부천시 등의 지역은 평균 건강보험료가 약 20만원에 육박하였고 다른 지역들과 다르게 역 U자형으로 꺾이는 형태로 나타난 것을 확인할 수 있다.<sup>4)</sup>

### 4.3.3. SO<sub>2</sub>

우선 SO<sub>2</sub>에 대해서, EKC에 대한 검증을 하기 위해 아래 <그림 17>과 같이 연별로 SO<sub>2</sub>와 시군구별 평균 건강보험료의 관계를 살펴보았다. X축 단위는 원이며, Y축 단위는 ppm이다.

앞서 살펴봤듯, EKC가 성립하려면 X축(가구별 평균 건강보험 소득변수)과 Y축(SO<sub>2</sub> 평균 농도)의 관계가 역 U자형으로 나타나야 한다. 해당 그림에서 보이듯, 단순히 건강보험료와 SO<sub>2</sub> 평균 농도가 선형적으로 1차 형태로 비례하지는 않았다. SO<sub>2</sub>의 경우에도 앞 <그림 15>에서 살펴본 미세먼지의 경우보다 역 U자형 관계가 좀 더 뚜렷하게 나타났다. 또한, 앞서 기초분석에서 살펴봤듯, Y축 단위에서 확인할 수 있듯이 시간이 흐름에 따라 전반적인 SO<sub>2</sub> 평균 농도는 낮아지고 있음을 확인할 수 있다.

아래 <표 8>은 2013~2020년 SO<sub>2</sub>에 대해 시군구별 단위로 모형(1)~모형(4)를 바탕으로 패널회귀분석한 결과를 나타낸다. EKC가 성립하려면, 소득 및 소득의 제곱항이 모두 통계적으로 유의해야 하며, 소득 제곱항의 계수가 음(-)으로 나타나야 한다. 분석결과, 모형(1)~모형(4) 가운데 4개의 모형 모두에서 소득 및 소득의 제곱항의 추정치가 통계적으로 모두 유의했으며, 소득 제곱항의 계수가 음(-)으로 나타났다. 따라서 SO<sub>2</sub>의 경우 4개 모형 모두 EKC가 성립하였는데, 이는 미세먼지 1개 모형, NO<sub>2</sub> 3개 모형과 대비된다. 무엇보다, SO<sub>2</sub>의 경우 4개 모형 모두 소득변수에 대한 추정치가 1% 유의수준으로 나타나, 앞서 살펴본 다른 대기오염물질보다 EKC가 가장 잘 성립하는 것을 통계적으로 확인하였다.

SO<sub>2</sub>와 관련하여 소득 외의 변수에 대한 결과는 아래와 같다. 먼저, 연강수량의 경우 모든 모형에서 통계적 유의성이 확보되지 않았다. 즉, 강수는 SO<sub>2</sub>와 통계적 상관관계가 낮게 나타났다. 따라서 강수량은 PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> 가운데 PM<sub>10</sub> 농도만 통계적으로 유의하게 낮추는 변수였다.

다음으로, 시군구별 녹지면적비율은 모든 모형에서 1% 유의수준에서 통계적으로 SO<sub>2</sub> 농도를 낮추는 것으로 나타났다. 즉, 앞서 살펴본 NO<sub>2</sub>와 마찬가지로, 시군구별 녹지면적 비율이 증가하면, 통계적으로 SO<sub>2</sub> 저감효과가 유의하게 나타난 것이다.



<표 8> SO2에 대한 패널회귀분석 추정결과

변수	모형(1)	모형(2)	모형(3)	모형(4)
	노말-노말	노말-로그	로그-노말	로그-로그
	추정치			
소득(만원)	0.0007***	0.014***	0.14***	2.28***
소득 <sup>2</sup>	-0.00003***	-0.003***	-0.005***	-0.46***
연강수량	-1.53E-06	-0.0004	0.0002	-0.03
녹지면적비율	-0.00002***	-0.0004***	-0.004***	-0.09***
자동차 등록대수 (1,000대)	-1.41E-06*	0.00008	-9.44E-07	0.05***
2013	0.002419***	0.002431***	0.577378***	0.563342***
2014	0.002143***	0.002118***	0.526402***	0.508243***
2015	0.001816***	0.001764***	0.455058***	0.432464***
2016	0.001392***	0.001343***	0.357863***	0.339482***
2017	0.001088***	0.00103***	0.289638***	0.268514***
2018	0.000839***	0.000804***	0.207443***	0.193559***
2019	0.000528***	0.000495***	0.151461***	0.138858***
R-sq	0.46	0.46	0.46	0.46
N	1,739	1,729	1,739	1,729

다음으로, 시군구별 자동차 등록대수는 모형(4)에서만 1% 유의수준에서, SO2에 양(+의) 효과를 미치는 것으로 나타났다. 이는 NO2와 대비되는 결과이다. 즉, 자동차 등록대수의 경우 PM10, NO2, SO2 순으로 통계적으로 유의함을 확인할 수 있다.

그리고 연별 더미변수를 통해 살펴봤을 때 다른 대기오염물질과 동일하게 SO2도 시간이 흐를수록 평균 농도가 지속적으로 감소추세임을 확인할 수 있다.

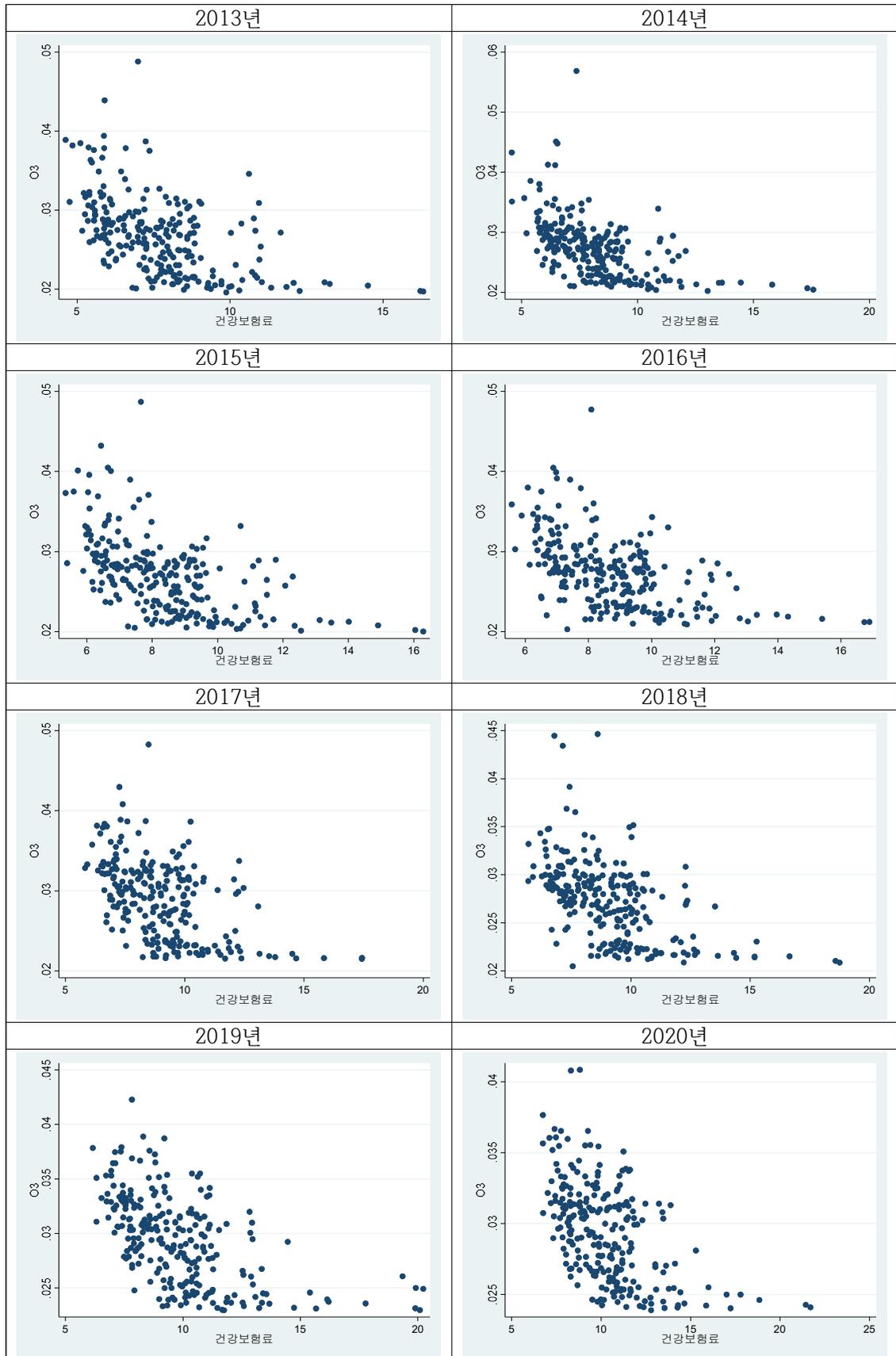
또한, 본 연구에서 모형(1)을 바탕으로 SO2 소득 변곡점을 계산한 결과, 건강보험료 13.2만원으로 나타났다. 즉, 해당 시군구의 평균 13.2만원이 될 때까지는 미세먼지 평균 농도가 증가하지만, 13.2만원이 넘어설 경우 SO2 농도가 감소하는 현상이 나타났다고 해석할 수 있다.

#### 4.3.4. O3

우선 O3에 대해서, EKC에 대한 검증을 하기 위해 아래 <그림 18>과 같이 연별로 O3와 시군구별 평균 건강보험료의 관계를 살펴보았다. X축 단위는 원이며, Y축 단위는 ppm이다.

앞서 살펴봤듯, EKC가 성립하려면 X축(가구별 평균 건강보험 소득변수)과 Y축(SO2 평균 농도)의 관계가 역 U자형으로 나타나야 한다. 그러나 앞서 살펴본 PM10, SO2, NO2와 다르게 O3의 경우 건강보험료와 O3 농도의 관계가 상당히 다름을 확인할 수 있다. 즉, 두 변수의 관계가 음(-)으로 나타나 역 U자형이 아니라 오히려 U자형으로 나타났다. 또한, 앞서 기초분석에서 살펴봤듯, 시간이 흐름에 따라 앞서 살펴본 3개 대기오염 물질과 다르게 전반적인 O3 평균 농도는 낮아지지 않음을 확인할 수 있다.

<그림 18> 연도별 시군구 건강보험 평균소득과 O3 관계



<표 9> O3에 대한 패널회귀분석 추정결과

변수	모형(1)	모형(2)	모형(3)	모형(4)
	노말-노말	노말-로그	로그-노말	로그-로그
	추정치			
소득(만원)	-0.003***	-0.034***	-0.097***	-1.38***
소득 <sup>2</sup>	0.00008***	0.006***	0.003***	0.26***
연강수량	-0.00004***	-0.005***	-0.001***	-0.16***
녹지면적비율	2.72e-06	0.0006**	0.0002	0.26
자동차 등록대수 (1,000대)	-2.60e-06	-0.001***	-0.00007	-0.03
2013	-0.006***	-0.005***	-0.21***	-0.19***
2014	-0.004***	-0.004***	-0.16***	-0.15***
2015	-0.005***	-0.004***	-0.17***	-0.16***
2016	-0.004***	-0.003***	-0.13***	-0.11***
2017	-0.002***	-0.002***	-0.08***	-0.07***
2018	-0.003***	-0.003***	-0.12***	-0.11***
2019	-0.001***	-0.001***	-0.04***	-0.03***
R-sq	0.32	0.37	0.35	0.39
N	1,739	1,729	1,739	1,729

위 <표 9>는 2013~2020년 O3에 대해 시군구별 단위로 모형(1)~모형(4)를 바탕으로 패널회귀분석한 결과를 나타낸다. EKC가 성립하려면, 소득 및 소득의 제곱항이 모두 통계적으로 유의해야 하며, 소득 제곱항의 계수가 음(-)으로 나타나야 한다. 분석결과, O3의 경우 앞에서 살펴본 PM10, NO2, SO2와 다르게 모든 모형에서 EKC가 성립하지 않는 것을 확인할 수 있다. 오히려 4가지 모형에서 1% 유의수준에서 역 U자가 아닌 U자형의 모습이 나타났다. 즉, 소득 임계점을 넘는 경우 오히려 O3 농도가 증가한다는 뜻이다.

O3와 관련하여 소득 외의 변수에 대한 결과는 아래와 같다. 먼저, 연강수량의 경우 모든 모형에서 1% 유의수준에서 O3 농도를 낮추는 것으로 나타났다. 이는 PM10과 동일한 결과로, 강수량은 PM10과 O3의 농도저감에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

다음으로, 시군구별 녹지면적비율은 4개 모형에서 통계적 유의수준이 나타나지 않았다. 시군구별 자동차 등록대수 역시 3개의 모형에서 모두 통계적 유의성이 잡히지 않아, O3의 경우 강수량 및 자동차 등록대수 모두 유의미한 영향을 미치지 못하였다.

그리고 연별 더미변수를 통해 살펴봤을 때 다른 대기오염물질과 정반대로 O3의 경우 2020년을 기준으로 지속적으로 평균 농도가 상승추세임을 확인할 수 있다.

#### 4.4. 소결

이상의 PM10, NO2, SO2, O3 등 4가지 대기오염물질에 대해 시군구별 평균 건강보험료와 역 U자형 모습의 EKC가 성립하는지에 대해, 실증분석한 주요 결과는 아래와 같이 요약할 수 있다.

첫째 미세먼지 관련하여 실증분석한 결과, 우리나라 미세먼지에 대해서는 유의성이 약하게 EKC가 성립하는 것으로 나타났다. 미세먼지의 경우, 연강수량이 1% 유의수준에서 음(-)으로 추정치가 나타났으며, 자동차 등록대수는 1% 유의수준에서 양(+)으로 나타난 것이 특징이다.

둘째, NO<sub>2</sub>에 대해 분석한 결과, EKC가 성립하는 것으로 나타났다. NO<sub>2</sub>의 경우, 녹지면적비율이 1% 유의수준에서 음(-)으로 추정치가 나타났으며, 자동차 등록대수는 1% 유의수준에서 양(+)으로 나타난 것이 특징이다. 특히, 녹지면적 비율이 NO<sub>2</sub> 감축에 매우 유의한 영향을 미쳤고, 강수량은 NO<sub>2</sub> 농도에 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다.

셋째, SO<sub>2</sub>에 대해 분석한 결과, EKC가 성립하는 것으로 나타났다. SO<sub>2</sub>의 경우, 녹지면적 비율이 1% 유의수준에서 음(-)으로 추정치가 나타났다. 반면, 자동차등록대수의 경우 전반적으로 통계적 유의성이 낮게 나타났으며, 강수량은 전혀 유의성이 포착되지 않았다.

넷째, O<sub>3</sub>에 대해 분석한 결과, EKC가 성립하지 않는 것으로 나타났다. O<sub>3</sub>의 경우, 오히려 소득에 따라 농도가 U자형으로 나타나, 소득이 증가할수록 농도가 증가하는 것으로 나타났다. 이처럼, 대기오염물질에 대해 NO<sub>2</sub> 및 SO<sub>2</sub>는 EKC가 매우 유의하게 성립하였고, PM<sub>10</sub>은 유의성이 약하게 성립하였으며, O<sub>3</sub>는 성립하지 않는 결과가 나타났다. 따라서, 각 대기오염물질에 대한 대응정책 역시 개별적으로 이뤄질 필요가 있음을 확인하였다.

## 5. 연구 결과의 활용 계획

본 연구에서는 개별 시군구의 소득수준과 주요 대기오염 농도간의 상관관계를 살펴봄으로써, EKC가 성립하는지를 실증분석하고자 하였다. 그리고 본 연구에서 얻은 실증분석 결과를 바탕으로 다음과 같이 대기오염별 정책시사점을 도출할 수 있었다.

우선 미세먼지의 경우, EKC형태가 약하게 나타나 국내 시군구의 소득수준이 증가하더라도 미세먼지 농도 증가 기울기가 크게 꺾여 감소하는 형태는 나타나지 않고 일정 수준을 유지하는 형태로 나타날 것으로 전망된다. 미세먼지의 경우 해당 소득 변곡점이 평균 건강보험료 19.5만원으로 나타나, 그 기준치가 상당히 높음을 확인하였다. 반면, 자동차 등록대수의 경우 미세먼지 농도 증가에 매우 유의한 결과를 가져왔기 때문에, 미세먼지 감축을 위해서는 소득측면보다 자동차 운행량을 줄일 수 있는 노력이 필요할 것으로 보인다.

반면, NO<sub>2</sub>와 SO<sub>2</sub>는 EKC가 1% 유의수준에서 성립하는 것으로 나타나, 국내 시군구의 소득이 증가함에 따라 대기오염에 대한 관심이 높아져 각각의 농도가 감소할 것으로 나타났다. 따라서 미세먼지에 비하여 NO<sub>2</sub> 및 SO<sub>2</sub>는 향후 국내 시군구의 소득 증대로 인한 농도 개선효과가 보다 뚜렷하게 나타날 것으로 기대한다. 실제, 분석결과 두 대기오염물질의 소득 변곡점은 약 13~14만원으로 나타나, 이미 일부 시군구의 경우 역 U자형 모습이 나타나고 있다. 또한, 미세먼지의 경우 녹지면적증가가 큰 개선효과를 나타내지 못했지만, NO<sub>2</sub> 및 SO<sub>2</sub>의 경우 녹지면적비율이 두 대기오염물질의 농도를 감축하는데 큰 기여를 하는 것으로 나타났다. 따라서 NO<sub>2</sub> 및 SO<sub>2</sub>를 감축하기 위해선 녹지면적을 늘리는게 중요하다는 시사점을 얻을 수 있다.

앞서 살펴본 3개의 대기오염물질과 다르게 O<sub>3</sub>의 경우 소득과 U자형으로 나타나, 시군구의 건강보험료 수준이 올라갈수록 오히려 O<sub>3</sub> 농도가 증가하는 패턴이 나타났다. 따라서

---

향후 O<sub>3</sub> 농도를 감축하고자 한다면, 소득수준 증가로 인한 O<sub>3</sub> 증가분까지 고려하는 정책 대응이 필요할 것으로 보인다.

그리고 본 연구에서 핵심적으로 다룬 부분은 주요 대기오염별로 시군구별 편차였다. 분석 결과, PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub>의 경우 특히 시군구별 해당 오염물질의 농도 편차가 크게 나타났다. 따라서 개별 시군구의 소득수준 및 대기오염 수준에 따른 정책대응이 차별화될 필요가 있다. 반면, SO<sub>2</sub>의 경우 시간이 흐를수록 시군구별 농도 편차가 크게 줄어들었다. 따라서 다른 대기오염물질에 비해 상대적으로 공통되는 정책으로 감축 대응을 할 수 있다는 시사점을 얻을 수 있다.

본 연구는 기존 선행연구들과 다르게, 국내 시군구 단위의 자료로 실증분석을 하였다는 것이 특징이다. 그러나 시군구 단위로 분석을 진행하였기 때문에, 화력발전소 등에서 배출되는 물질량을 제대로 반영하지 못하였고, 시군구별 전체 자동차 등록대수로만 활용하여 경유자동차 등의 세부 구분을 하지 못했다는 한계점이 존재한다. 따라서 추후 이와 같은 데이터 측면을 보완하고, 국내 시군구별 군집효과를 반영한 연구가 진행된다면 더욱 구체적인 정책적 시사점을 도출할 수 있을 것으로 기대한다.

## 6. 참고문헌

- 김기환, & 김오석. (2019). 시계열 분석을 활용한 한·중 월경성 미세먼지 연구. 한국지리학회지, 8(1), 33-46.
- 김득수, 정진상, & 안준영. (2016). 서울 도심대기의 NO, NO<sub>2</sub>와 O<sub>3</sub> 사이의 대기화학적 특성 연구. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 32(4), 422-434.
- 김운수. (2013). 서울시 경유자동차의 배출특성 (PM · NO<sub>x</sub>) 을 고려한 단계별 관리방안. 정책리포트, (140), 1-22.
- 김종희, 최대련, 구윤서, 이재범, & 박현주. (2016). 2014 년 2 월 서울의 고농도 미세먼지 기간 중에 CMAQ-DDM 을 이용한 국내외 기여도 분석. 한국대기환경학회지, 32(1), 82-99.
- 김진옥, 엄영숙, & 안소은. (2018). 방어적 행위 접근법을 적용한 대기오염으로 인한 건강피해비용 추정: 호흡기계 외래환자를 중심으로. 한국환경경제학회 경제학 공동학술대회논문집, 2018, 135-152.
- 김철현. (2014). 에너지경제연구원. 혼합주기 자료를 이용한 전력수요 예측모형 구축. 기본 연구보고서 14-06
- 박순애, & 신현재. (2017). 한국의 초미세먼지 (PM 2.5) 의 영향요인 분석: 풍향을 고려한 계절성 원인을 중심으로. 환경정책, 25(1), 227-248.
- 박철웅, & 이용주. (2018). 기온효과를 반영한 한국의 환경쿠즈네츠가설 검증. 에너지경제연구, 17(1), 67-94.
- 박추환. (2013). 패널분석을 이용한 6 대 권역별 대기오염물질에 대한 환경규제와 경제성장 간의 상호 관계분석: EKC (환경쿠즈네츠곡선) 가설을 중심으로. 환경정책연구, 12(2), 59-86.
- 배정환, & 김미숙. (2012). 생산함수 접근법을 적용한 온실가스에 대한 환경쿠즈네츠곡선 검증: 우리나라 시·군단위를 중심으로. 한국산업경제학회 정기학술발표대회 초록집, 2012, 73-92.
- 배정환, & 김유선. (2016). 우리나라 대기오염배출 원인과 저감 정책 효과 분석. 자원. 환경경제연구, 25(4), 545-564.
- 서영수. (2016). 한국의 지리적 특성을 이용한 대기오염 실증 연구. 유라시아연구, 13(4), 89-110.
- 신동희 외. (2015), "폭염 발생에 따른 취약계층의 사망률 변화와 사회적 비용 추정: 7대 광역시의 65세 이상 고령층을 중심으로", 「환경정책연구」, 14(1), 3-32.
- 안소은 외. (2015), 「빅데이터를 이용한 대기오염의 건강영향 평가 및 피해비용 추정 (I)」, 한국환경정책·평가연구원.
- 안숙희, 박소연, 김정윤, & 김백조. (2014). 태풍 내습 시 강수에 의한 대기오염물질 (PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>) 의 농도 변화 분석. 한국대기환경학회지, 30(2), 128-138.
- 오종민, 신현수, 신예슬, & 정형철. (2017). 시계열 분석을 활용한 서울시 미세먼지 예측. Journal of The Korean Data Analysis Society, 19(5), 2457-2468.
- 이광훈 · 이춘화. (2009). "수도권 지역 이산화탄소 배출에 대한 환경 쿠즈네츠 곡선 탐색 및 정책적 함의", 서울도시연구, 제10권 제3호, 83-95
- 이보은. (2003). 서울지역의 대기오염과 저체중아 출산에 관한 연구. 이화여자대학교 의학과 박사학위 논문
- 이성희, 강병욱, 연익준, 최준락, 박현필, 박상찬, ... & 조병렬. (2012). 충주시 미세입자 (PM 2.5) 농도특성에 대한 사례 연구. 한국대기환경학회지, 28(5), 595-605.

- 
- 전병일. (2018). 부산 지역 도로변과 주거지역의 NO 와 NO<sub>2</sub> 농도 특성. *한국환경과학회지*, 27(7), 587-595.
- 홍재선, 김학열, & 이승주. (2007). 도시특성요소가 서울시 대기 중 이산화질소 오염에 미치는 영향. *서울도시연구*, 8(3), 117-130.
- 홍한음. (2018). 서울 미세먼지 (PM<sub>10</sub>) 농도의 시공간 통계분석 활용방안 연구. *기초연구보고서*, 2018, 1-57.
- Anderson, D., & Cavendish, W. (2001). Dynamic simulation and environmental policy analysis: beyond comparative statics and the environmental Kuznets curve. *Oxford Economic Papers*, 53, 721-746.
- Andreoni, J., & Levinson, A. (2001). The simple analytics of the environmental Kuznets curve. *Journal of Public Economics*, 80, 269-286.
- Andreou, E., Ghysels, E., & Kourtellis, A. (2010). Regression models with mixed sampling frequencies. *Journal of Econometrics*, 158(2), 246-261.
- Bae, M., Kim, B. U., Kim, H. C., Kim, J., & Kim, S. (2021). Role of emissions and meteorology in the recent PM<sub>2.5</sub> changes in China and South Korea from 2015 to 2018. *Environmental Pollution*, 270.
- Baek, J. S., (2016), "The Effect of Subway Openings on Air Quality," *Korea Review of Applied Economics*, 18(2), 53-76.
- Barrett, S., & Graddy, K. (2000). Freedom, growth, and the environment. *Environment and Development Economics*, 5, 433-456.
- Beckerman, W. (1992). Economic growth and the environment: whose growth? Whose environment? *World Development*, 20, 481-496.
- Bruyn, S.M., Opschoor, J.B. (1997). Development in the throughput-income relationship: theoretical and empirical observation. *Ecological Economics* 20, 255-268.
- Copeland, B. R. (1996). Pollution content tariffs, environmental rent shifting, and the control of cross-border pollution. *Journal of International Economics*, 40, 459-476.
- Buchinsky, M. (1998). Recent advances in quantile regression models: a practical guideline for empirical research. *Journal of human resources*, 88-126.
- Clements M, Galvao A. (2008). "Macroeconomic Forecasting with Mixed Frequency Data: Forecasting US Output Growth." *Journal of Business and Economic Statistics*, 26, 546-554.
- Dasgupta, S., Laplante, B., Wang, H., & Wheeler, D. (2002). Confronting the Environmental Kuznets Curve. *The Journal of Economic Perspectives*, 16(1), 147-168.
- Dijkgraaf, E., & Vollebergh, H. (1998). ESEE conference. Growth and environment—is there a Kuznets curve for carbon emissions? University of Geneva.
- Dinda, S. (2004). Environmental Kuznets Curve Hypothesis: A Survey. *Ecological Economics*, 49, pp. 431-455.
- Egli, H., & Steger, T. M. (2007). A Dynamic Model of the Environmental Kuznets Curve: Turning Point and Public Policy. *Environmental & Resource Economics*, 36, 15-34.
- Ebenstein, A., Fan, M., Greenstone, M., He, G., Yin, P. and Zhou, M., "Growth, pollution, and life
-

- 
- expectancy: China from 1991–2012,” *American Economic Review*, 105(5), 2015, pp. 226 ~ 31.
- Ghysels, E., Kvedaras, V., & Zemlys, V. (2016). Mixed frequency data sampling regression models: the R package midasr. *Journal of statistical software*, 1-35.
- Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1993). Environmental impacts of the North American Free Trade Agreement. Garber, P. (Ed.), *The U.S. –Mexico Free Trade Agreement*.
- \_\_\_\_\_. (1995). Economic Growth and the Environment. *Quarterly Journal of Economics*, 110, pp. 353-378. Electronic copy available at: <https://ssrn.com/abstract=2346173>
- Heerink, N., Mulatu, A., & Bulte, E. (2001). Income inequality and the environment: aggregation bias in environmental Kuznets curves. *Ecological Economics*, 38(3), 359-367.
- Jia, R. & Ku, H. (2019). Is China's Pollution the Culprit for the Choking of South Korea? Evidence from the Asian Dust, *The Economic Journal*.
- Kaika, D., & Zervas, E. (2013). The Environmental Kuznets Curve (EKC) theory—Part A: Concept, causes and the CO2 emissions case. *Energy policy*, 62, 1392-1402.
- Khanna, N. (2002). The income elasticity of non-point source air pollutants: revisiting the environmental Kuznets curve. *Economics Letters*, 77(3), 387-392.
- Kim, M. J., (2019), “The effects of transboundary air pollution from China on ambient air quality in South Korea,”. *Heliyon*, 5(12).
- Koenker, R. & Bassett Jr, G. (1978). “Regression quantiles”. *Econometrica: journal of the Econometric Society*, 33-50.
- Koenker, R. (2004). Quantile regression for longitudinal data. *Journal of Multivariate Analysis*, 91(1), 74-89.
- Lieb, C. M. (2003). The environmental Kuznets curve: a survey of the empirical evidence and of possible causes (No. 391). Discussion paper series.
- Park, S., & Lee, Y. (2011). Regional model of EKC for air pollution: Evidence from the Republic of Korea. *Energy Policy*, 39(10), 5840-5849.
- Powell, D. (2016). Quantile treatment effects in the presence of covariates. *Review of Economics and Statistics*, 1-39.
- Rosen, A. M. (2012). Set identification via quantile restrictions in short panels. *Journal of Econometrics*, 166(1), 127-137.
- Shafik, N., & Bandyopadhyay, S. (1992). Economic growth and environmental quality: time-series and cross-country evidence (Vol. 904). World Bank Publications.
- Stern, D. I., & Common, M. S. (2001). Is there an environmental Kuznets curve for sulfur?
-

본 연구보고서의 내용은 연구자의 의견이며,  
(재)숲과나눔의 공식적인 견해와는 다를 수 있습니다.