

패널 분위회귀분석을 통한 한국의 미세먼지 국내외 영향요인 분석

김해동* · 김재혁** · 조하현***

요약 : 우리나라의 미세먼지 및 초미세먼지 농도에 대하여 전국 및 지역별 패널 분위회귀분석을 진행하여, 국내 및 중국 요인의 영향력을 분석하였다. 2015년 5월 1일부터 2020년 12월 31일까지 일별 분석을 진행하였으며, 국내 요인으로는 전력수요 및 교통량을, 중국 측 요인으로는 베이징 등 3개 도시의 미세먼지 및 초미세먼지 농도와 서풍의 교차항을 이용하여 패널 분석을 진행하였다. 국내 미세먼지 농도가 높고 낮을 때 국내 요인의 영향력이 다르게 나타났다. 미세먼지 농도가 낮을 때, 전국분석에서 국내 화력발전의 대리변수인 전력수요량은 초미세먼지에 양(+)의 영향력을 미쳤다. 지역별 분석결과, 수도권 및 충청도 지역에서만 전력수요량이 미세먼지 및 초미세먼지에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 반면, 미세먼지 농도가 높을 때, 전력수요량은 미세먼지 및 초미세먼지 농도를 모두 유의하게 상승시키는 것으로 나타났다. 초미세먼지의 경우 그 추정치가 더 높게 나타났다. 반면, 중국 요인의 경우 미세먼지 및 초미세먼지 농도와 관계없이 우리나라에 항상 양(+)의 영향을 미침을 확인하였다. 향후 국내 초미세먼지 문제를 해결하기 위해서는 4계절 항시 국제적 협력이 필요하며, 국내 화력발전으로 인한 초미세먼지 발생분에 대한 감축이 현재보다 강화되어야 함을 확인할 수 있다.

주제어 : 미세먼지, 초미세먼지, 분위회귀분석, 월경성, 지역별 분석, 화력발전, 국제협력, 전력수요

JEL 분류 : L1, D4, Q3, Q53

접수일(2022년 2월 14일), 게재확정일(2022년 2월 28일)

* 연세대학교 경제학과 박사과정, 제1저자(e-mail: vincentius@yonsei.ac.kr)

** 연세대학교 경제연구소 전문연구원, 공동저자(e-mail: safin84@gmail.com)

*** 연세대학교 경제학과 교수, 교신저자(e-mail: hahyunjo@hanmail.net)

Analysis of the Factors Influencing PM10 & PM2.5 in Korea by Panel Quantile-Regression

Haedong Kim*, Jaehyeok Kim** and Hahyun Jo***

ABSTRACT : This study analyzed the influence of domestic and Chinese factors on fine dust (PM10 & PM2.5) in Korea by using the panel quantile regression. Daily analysis was conducted for 11 regions in Korea. For domestic factors, electricity demand and traffic volume, and for Chinese factors, interaction term of Chinese three cities' fine dust and the domestic west wind are used. As a result, the influence of domestic factors was different when the domestic fine dust concentration was high and low. When the fine dust concentration was low, electricity demand had a positive effect only on PM2.5, and didn't affect PM10 in the national analysis. In regional analysis, the amount of electricity demand had a significant effect on fine dust and ultrafine dust only in the capital area and Chungcheong. Electricity demand was found to significantly increase both PM2.5 and PM10 when it was high. On the other hand, it was confirmed that the Chinese factor always had a significant effect regardless of the concentration of PM10 and PM2.5. Therefore, in order to solve the problem of high concentration of fine dust, in addition to international cooperation, the reduction of PM2.5 generated by domestic thermal power generation should also be strengthened compared to the present.

Keywords : PM10, PM2.5, Quantile regression, Panel analysis, Regional analysis, Thermal power generation, International collaboration, Electricity demand

Received: February 14, 2022. Accepted: February 28, 2022.

* Graduate Student, Dept. of Economics, Yonsei University, First author(e-mail: vincentius@yonsei.ac.kr)

** Researcher, Yonsei University, Coauthor(e-mail: safin84@gmail.com)

*** Dept. of Economics, Yonsei University, Corresponding author(e-mail: hahyunjo@hanmail.net)

1. 서론

2000년대에 들어, 한국과 중국은 가파른 경제성장을 이뤘지만, 그 과정에서 막대한 대기오염 배출이 동반되는 문제점이 나타났다. 특히, 중국의 온실가스 배출량은 2007년부터 미국 배출량을 상회하여, 중국은 세계 최대 온실가스 배출국가가 되었다. 그러나 이러한 온실가스 배출문제와 더불어, 미세먼지 등의 대기오염 급증 역시 심각한 문제로 지적되고 있다. 이러한 중국의 심각한 대기오염 문제는 수백만 명의 중국인에게 심각한 건강문제를 야기하고 있다(Ebenstein et al., 2015).

하지만 중국의 미세먼지 문제는 단순히 자국 내에 국한되지 않고, 동북아시아 및 다양한 국가에 상당한 영향을 미치고 있다. 이와 관련하여 다양한 선행연구들이 존재하는데, Lin et al.(2014)는 중국의 미세먼지가 미국 서부 지역까지 영향을 미친다고 과학적으로 분석하였고, Jia & Ku(2019)는 중국의 대기오염이 한국의 노인 및 영유아의 호흡기 및 심혈관 질환으로 인한 사망률을 증가시킨다고 밝힌 바 있다.

우리나라는 2018년부터 고농도 초미세먼지 관련하여 이슈가 크게 증가하고 있다. 그러나 한국의 높은 미세먼지 농도가 중국에 요인에 의해서 결정된다고 단순히 해석하는 것은 어렵다¹⁾. 우선, 국내의 경유 소비량 및 화력발전 과정에서 초미세먼지가 상당히 발생하기 때문이다. 그리고 <표 1>과 같이 중국의 초미세먼지 농도는 2018년에 이미 감소 추세에 있다. 중국 환경보호부는 주요 도시별 일 평균 미세먼지 농도를 제공하고 있는데, 해당 자료에 의하면 중국 주요 도시의 초미세먼지 및 미세먼지 농도는 지속적으로 감소 추세에 있음을 확인할 수 있다.

그러나 중국의 미세먼지 및 초미세먼지 농도가 감소추세에 있지만, 한반도가 중국가 매우 인접해 있기 때문에 국내 초미세먼지의 요인을 중국에서 찾는 연구는 다수 존재한다(장경수·여준호, 2015; 김종희 외, 2016, Bae et al., 2021). 최근 선행연구들의 경우, 풍향을 고려하여 중국 측 요인이 국내 미세먼지에 미치는 영향을 분석하고 있다(박순애·신현재, 2017; 김기환·김오석, 2019; Kim, 2019).

1) 먼지는 입자의 크기에 따라 $10\mu\text{m}$ 이하의 미세먼지(PM_{10} , Particulate Matter 10)와 $2.5\mu\text{m}$ 이하의 초미세먼지($PM_{2.5}$, Particulate Matter 2.5)로 구분된다.

〈표 1〉 중국 3개 도시의 연평균 미세먼지 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

연도	베이징(Beijing)		진안(Jinan)		다례(Dalian)	
	초미세먼지 (PM2.5)	미세먼지 (PM10)	초미세먼지 (PM2.5)	미세먼지 (PM10)	초미세먼지 (PM2.5)	미세먼지 (PM10)
2014	85	116	89	173	52	85
2015	80	101	90	162	48	81
2016	73	97	75	146	39	68
2017	57	84	63	126	33	58
2018	47	73	51	102	29	53
2019	42	67	55	109	35	60

우리나라의 미세먼지 문제는 겨울 및 봄철에 심각해지는데, 국내 미세먼지 농도가 높을 때와 낮을 때를 구분하여 국내 및 중국 요인의 영향력을 분석한 연구는 발견하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 우리나라의 미세먼지 농도가 높고 낮을 때의 국내외 요인 비중의 분포가 서로 다를 것이라고 가정하고 분위회귀분석 방법론을 이용하여 분석을 진행한다. 또한, 중국 측 요인의 설명력을 높이고자 풍향을 고려하며, 우리나라의 미세먼지 및 초미세먼지에 대한 국내외 주요요인들의 영향력에 대하여 통계적으로 분석을 진행하고자 한다. 특히, 국내 요인으로 화력발전의 영향력을 반영하기 위하여 일별 전력사용량을 활용하였고, 일별 교통량을 추가로 반영하였다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 우리나라의 미세먼지에 영향을 주는 국내 요인과 중국 측 요인에 관한 선행연구를 검토하고, 본 연구의 차별점을 정리한다. 제3장에서는 전국 및 지역별 패널 데이터 분위회귀분석으로 국내 및 해외 요인의 영향력을 비교 분석한다. 마지막으로 제4장에서는 분석결과의 결론 및 시사점을 정리한다.

II. 선행연구 및 차별점

우리나라의 경우 1983년 총먼지에 대한 환경기준을 설립한 이후, 1993년에는 미세먼지에 대한 기준을 추가하였고, 2011년에는 초미세먼지에 대한 기준을 추가하였다. 이에 따라 초미세먼지의 경우, 2011년부터 일부 지역에 대하여 Air Korea에서 농도를 제공하고 있다²⁾.

2) <https://www.airkorea.or.kr/web> (검색일: 2021.8.4.)

특히, 미세먼지의 입자의 크기가 작을수록 그 해로운 영향이 큰 것으로 알려져 있으며, 초미세먼지는 세계보건기구(WHO)가 1급 발암물질로 지정할 정도로 건강에 치명적이다. 국내의 경우 2010년대에 들어 초미세먼지 이슈가 부각되었고, 초미세먼지 농도를 감축하기 위한 다양한 정책들이 제안되었다. 우리나라는 2018년 초미세먼지 예보를 강화했고, 미세먼지 배출 규제 역시 비상저감정책 등을 도입하면서 크게 강화하고 있다.

서론에서 밝힌 바와 같이, 우리나라 고농도 미세먼지의 주요요인이 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. 반면 우리나라 초미세먼지 원인 중 중국 측 요인의 비중이 높다고 발표한 것에 대해 중국 측 원인을 강조하는 언론 보도³⁾ 역시 다수 존재한다. 국립환경과학원은 국내에서 고농도 미세먼지가 발생할 때 국내외 기여율은 사례마다 다르다고 발표한 바 있으며, 특정 기간 중국 등 국외 요인이 69~82%로 매우 높은 수준인 것으로 나타났다(국립환경과학원, 2019).

국내외 여러 가지 요인을 고려하여 국내 초미세먼지의 원인을 분석한 연구는 다수 이뤄졌지만(이성희 외, 2012; 김종희 외, 2016; 오종민 외, 2017), 중국의 특정 도시를 대상으로 풍향을 함께 고려한 연구는 많지 않다.

박순애·신현재(2017)는 풍향을 설명변수로 추가하여 월별 패널 분석을 한 결과, 중국 산동성의 초미세먼지 농도가 한국의 초미세먼지 농도에 유의미한 영향을 미치고 있음을 밝혔다. 해당 연구는 석탄발전거래량, 경유소비량, 산업 생산지수 등 국내의 다양한 미세먼지 발생 요인에 대하여 분석을 진행한 점이 특징이다. 그리고 풍향을 개별 설명변수로 반영하여 분석하였으며, 월별 자료로 분석을 진행하여 중국의 미세먼지 농도가 한국에 영향을 미치는 시차를 1달로 보았다.

반면 김기환·김오석(2019)은 중국에서 발생한 미세먼지가 서울에 영향을 주는데

3) 국민일보, 2020.08.10. “중국발 미세먼지 줄어드니 韓 ‘ 좋음일수 ’ 61% 늘었다”, 한겨레, 2019.01.28. “중국발 미세먼지 없으면, 인천 ‘ 좋음 ’ 50% 늘었다”

12~30시간이 걸리는 것으로 분석하였다. 따라서, 미세먼지 농도는 일별 패턴 변화가 크기 때문에 월별 분석 시 이러한 특징을 반영하기 어렵다. 김기환·김오석(2019)은 일별 자료로 풍향을 고려하여 베이징과 텐진의 미세먼지와 서울의 미세먼지의 상관관계를 분석하였는데, 해당 연구는 초미세먼지가 아닌 미세먼지를 대상으로 분석을 진행하였다. 그리고 무엇보다 국내 요인을 단순히 대기오염 물질로 분석을 진행하였다는 한계점이 존재한다.

Kim(2019)은 중국의 미세먼지 농도가 우리나라의 미세먼지에 미치는 영향에 대하여 풍향을 중심으로 일별 분석을 진행하였다. 그 결과, 중국 지역에 따라 주요 풍향 방향이 다르지만, 전반적으로 서풍일 경우 중국 측 요인의 영향력이 가장 크다고 분석하였다.

따라서 우리나라의 미세먼지 발생 요인을 보려면, 국내 및 중국의 일별 미세먼지 농도 분석이 진행되어야 한다. 또한, 중국 측 요인을 살펴보려면 풍향을 반영한 분석이 요구된다. 국내 미세먼지 발생 요인을 분석하려면, 석탄화력 발전량, 가스발전량 등을 살펴 봐야 하지만 해당 자료들은 월별 자료 형태로 존재한다. 따라서 일별 자료로 분석 시 국내의 경제적 요인을 반영하는 것이 어려워, 선행연구들의 경우 주별 혹은 월별 자료 중심으로 분석을 진행한 것으로 보인다.

본 연구의 주요 차별점은 아래와 같다.

첫째, 미세먼지 농도는 일별 변화가 크기 때문에, 통계분석을 하기 위해서는 고빈도 자료를 활용해야 적절한 분석이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 일별 자료를 통하여 분석을 진행한다. 예를 들어, 2017년 2월 서울 지역에서 가장 미세먼지가 심했던 날은 PM10이 $178\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 올랐지만, 서울의 2월 평균 PM10은 $46\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 미세먼지 농도의 변동 폭이 매우 크다. 따라서 선행연구와 같이 월별 분석을 진행할 경우, 이러한 일별 변화를 반영하기 어렵다. 그리고 기존 선행연구 가운데 일별 분석을 진행한 경우, 국내 기상변수 외 국내 설명변수를 적절히 반영하지 않고 우리나라의 미세먼지의 국내외 요인 분석을 진행하였다. 이에 따라, 본 연구에서는 국내 주요요인인 지역별 전력수요 및 교통량 등의 일별 자료를 구축하여 활용하였다.

둘째, 중국 측 미세먼지가 날아오는 지리적 방향을 고려하기 위하여, 일별 중국 미세먼지 농도와 국내 서풍의 교차항(interaction term)을 이용하여 분석을 진행하였다. 기존 선행연구들은 풍향을 단순 설명변수로 넣거나 반영하지 않았다. 본 연구에서는 중국의 미세먼지 및 초미세먼지가 서풍이 존재할 때 우리나라에 영향을 미친다고 판단하여 교

차항을 이용하여 분석한 것이 차별점이다.

셋째, 미세먼지 및 초미세먼지 농도가 높을 때와 낮을 때 주요 원인의 영향력이 서로 다를 수 있기 때문에, 이를 계량학적으로 검증하기 위하여 분위회귀분석 방법론(quantile regression)을 이용하였다. 또한, 지리적 특성을 살펴보기 위하여 국내 11개 지역에 대한 전국패널 분석 및 4개 지역(수도권 및 충청도, 전라도, 강원도 및 경북, 경남)에 대한 개별 패널 분석으로 구분하여 분석을 진행하였다.

III. 실증분석

본 연구에서는 미세먼지 및 초미세먼지 농도의 국내외 요인분석을 하는 것을 목표로 한다. 특히, 미세먼지와 초미세먼지가 각각 농도가 높고 낮음에 따라 주요 배출요인의 영향력이 다를 것으로 가정하였다. 따라서 이를 검증하기 위하여 특정 분위(quantile)마다 분포가 다른 경우를 분석하고자 한다.

기존 국내선행연구 가운데, 미세먼지 및 초미세먼지의 농도 분포에 따라 그 특성요인이 바뀌는 경우에 대한 연구는 이뤄지지 않고 있다. 미세먼지 농도의 변화는 월별 패턴으로 포착하기 어렵기 때문에, 본 연구에서는 일별 패널 자료를 구축하여 분석을 진행하고자 한다. 특히, 국내 미세먼지 농도를 설명하는 주요 변수로 예상되는 전력사용량 자료 및 일별 교통량 자료를 중심으로 활용하여 분석의 설명력을 높이고자 한다.

1. 분석자료

본 연구에서 활용한 변수는 <표 2>와 같다. 본 연구에서는 국내 지역을 서울시, 인천시, 부산시, 경기도, 경상북도, 경상남도, 강원도, 전라북도, 전라남도, 충청북도, 충청남도 등 11개 패널로 구분하여 2015년 5월 1일부터 2020년 12월 31일까지의 기간에 대하여 일별 분석을 진행하였다⁴⁾. 이는 한국전력거래소에서 제공하는 국내 전력수요 실적 자료가 위 11개와 같은 한국전력 지부별로 제공되기 때문이다. 본 연구는 국내 주요 발전원인 화력발전의 척도로 지역별 전력수요량을 활용하였다.⁵⁾

4) 4면이 바다로 둘러싸여 있는 등의 섬 지역 특성이 강한 제주도를 제외하고 분석하였다.

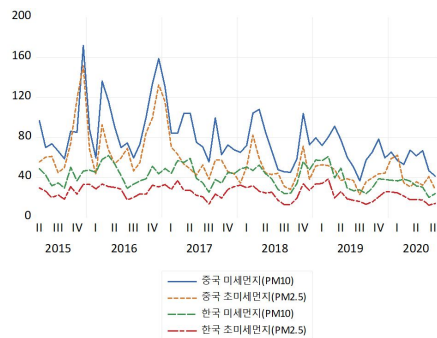
5) 본 연구에서는 국내 지역별 화력발전량의 일별 자료 구축이 어렵기 때문에, 지역별 일별 전력수요량을 대리변수

국내 미세먼지 및 초미세먼지의 경우, 환경부 에어코리아에서 제공되는 자료를 활용하였다. 원자료가 시간대별로 제공되고, 측정소별로 미세먼지 및 초미세먼지 농도 값이 제공된다. 그리고 최다풍향 및 강수량의 경우, 기후정보포털 자료를 활용하였다. 국내 주요 설명변수로는 11개 지역의 전력수요량 및 교통량 자료를 사용하였다. 일부 원자료가 시간대별의 경우 11개 지역의 일 평균 자료로 변환하여, 분석을 진행하였다.

다음으로, 지리적 위치상 중국의 미세먼지 및 초미세먼지가 우리나라에 넘어오는 방향인 서풍을 반영하기 위하여, 서풍 가변수를 생성하였다. 국내 11개 지역의 일별 16방향 위 최다풍향 값이 225~315°로 서풍인 경우, 1의 값을 가지는 서풍 가변수를 구성하였다. 지리학적으로, 서풍에 영향을 받는 베이징, 진안, 다롄 등 중국 3개 도시의 미세먼지 및 초미세먼지 농도에 대하여 중국 환경보호부에서 제공하는 일 평균 도시별 대기오염 자료를 통하여 구축하였다⁶⁾. 김기환·김오석(2019)은 베이징의 미세먼지를, 박순애·신현재(2017)는 산둥반도의 초미세먼지를 중국 측 설명변수로 분석했기 때문에, 본 연구에서도 산둥성의 중심 도시인 지난, 수도 베이징을 중국 측 도시로 선정하였다. 또한, 오세호 외(2017)을 참고하여 한국과 인접한 랴오둥 반도의 주요 공업도시인 다롄을 추가하여 분석을 진행하였다.

국내 11개 지역 및 중국 3개 도시의 평균 미세먼지 및 초미세먼지 농도의 시계열은 <그림 1>과 같다.

<그림 1> 중국과 한국의 평균 미세먼지 및 초미세먼지 농도



로 활용하였다. 실제로 한국전력공사 월별 전력통계 기준으로 볼 때, 2019년 기준 전체 발전량 가운데 화력발전이 차지하는 비중은 66%로 매우 높다(석탄발전 40.4%, 가스발전 25.6%).

6) PM2.5 历史数据, “空气质量历史数据查询”, <https://www.aqistudy.cn/historydata/>(검색일: 2021.3.1.)

또한, 자연적인 현상인 황사로 인한 효과를 반영하기 위하여, 차성기(2010)을 참고하여 각 지역의 일 평균 PM10이 $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 넘는 경우 황사 가변수를 생성하였다.

〈표 2〉 변수설명

변수	측정지표	출처
한국 지역별 미세먼지 농도	한국 지역별 일 평균 미세먼지 농도	환경부 Air Korea
한국 지역별 초미세먼지 농도	한국 지역별 일 평균 초미세먼지 농도	환경부 Air Korea
중국 지역별 미세먼지 농도	중국 베이징, 진안, 다롄 등 3개 도시의 일 평균 미세먼지 농도	중국 환경보호부(历史数据)
중국 지역별 초미세먼지 농도	중국 베이징, 진안, 다롄 등 3개 도시의 일 평균 초미세먼지 농도	중국 환경보호부(历史数据)
한국 지역별 전력사용량	지역별 일 평균 전력수요	한국전력거래소
한국 지역별 최다풍향	지역별 일별 최다풍향(16방위)	기후정보포털
한국 지역별 강수량	지역별 일 평균 강수량	
한국 지역별 교통량	지역별 일 평균 고속도로 TCS자료	한국도로공사
한국 지역별 황사	지역별 일 평균 PM10이 $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 넘는 경우 1, 아니면 0의 값을 가지는 가변수	환경부 Air Korea

2. 패널 분위회귀분석(panel quantile regression)을 통한 추정

본 연구에서는 미세먼지 및 초미세먼지 농도 분포에 따라 국내외 요인이 달라진 것이라 가정하고, 패널 분위회귀분석 방법론을 검토하였다. 즉, 국내 미세먼지 농도가 높고 낮은 경우 각각에 미치는 주요 국내외 요인 비중이 달라지기 때문에, 분위별 분포가 다른 경우에 대해 분석하는 분위회귀 방법론을 이용하였다.

분위회귀분석은 표본집단의 이질성이 크고, 분위별 결정요인을 추정할 때 적합한 방법론이다. 분위회귀분석의 경우 동일한 손실함수가 아닌, ‘비대칭 손실함수(asymmetric loss function)’에 기반하므로, 종속변수 분포 중 평균이 아닌 특정 분위(quantile)를 잘 설명할 수 있도록 계수를 추정하는 방식이다(Koenker & Bassett, 1978). 또한, 해당 모형은

극단치(outlier)를 배제하기 어렵고 종속변수의 분위수에 따라 분포가 달라지는 경우에 적합하다. 따라서 각 설명변수에 대한 조건부 평균을 추정하는 단순 회귀모형과 달리 조건부 분위수를 추정하는 방식을 사용하기 때문에, 정규분포가 아닌 경우에도 활용 가능하며 극단치에 대한 영향을 배제하고 분위별로 각 추정치를 계산할 수 있다.

고정효과(fixed-effect) 패널 분위회귀모형은 Koenker(2004)에서 연구된 방법으로, 고정효과를 반영한 종속변수의 τ 분위수에 따른 선형모형이다. 이때 τ 는 분위 수준(quantile level)이며, 0과 1 사이의 값을 갖는다.

$$Q_Y(\tau|x_{i,t}) = \alpha_i + x'_{i,t} \beta(\tau) \quad i = 1, \dots, N, t = 1, \dots, T \quad (1)$$

여기서, $Q_{y_{i,t}}(\tau|x_{i,t})$ 는 t 시점의 설명변수 x_i 에 대한 y_i 의 조건부 τ 분위(conditional quantile)를 나타낸다. 이와 같은 기존 고정효과 패널 분위회귀모형은 대부분 단일 효과(single effect)만이 전체 분포가 아닌 종속변수의 분포의 평행 이동(parallel shift)에 영향을 미친다고 가정한다(Koenker, 2004; Canay, 2011). 즉, 해당 모형은 관측되지 않는 이질성(heterogeneity)을 반영하지 못한다(Ike et al. 2020).

본 연구는 각 지역의 주요 설명변수의 변화가 미세먼지 및 초미세먼지 농도 분포에 미치는 영향분석을 목적이기 때문에, 관측되지 않는 분포별 이질적 효과를 반영하는 Machado and Silva(2019)의 MM-QR(Method of Moments Quantile Regression) 방법론을 이용한다. 이는 식 (2)와 같은 구조를 가진다.

$$Y_{i,t} = \alpha_i + x_{i,t}' \beta + (\delta_i + Z_{i,t}' \gamma) U_{i,t} \quad (2)$$

여기서, α_i, δ_i 는 개별 i 의 고정효과를 반영하며, Z' 는 x' 의 식별된 요소들의 k -벡터를 나타내며, $U_{i,t}$ 는 i 와 t 에 대해 i.i.d이며, 적률조건(moment conditions)을 만족한다.

위 식 (2)에서, 조건부 분포는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$Q_Y(\tau|x_{i,t}) = (\alpha_i + \delta_i q(\tau)) + x_{i,t}' \beta + Z_{i,t}' \gamma q(\tau) \quad (3)$$

본 연구에서는 한국의 전반적인 초미세먼지 농도가 높을 때 및 낮을 때의 주요요인이 달

라질 것이라 예상되기 때문에, 종속변수의 조건부 분포에 대한 꼬리(tail) 분위수에 대한 추정을 진행하고자 패널 분위회귀모형을 이용하여 분석을 진행한다. 또한, 국내 지역의 개별 특성을 반영하기 위하여, 고정효과를 이용한다. 본 연구에서는 고정효과를 반영하면서, 이질성으로 인한 내생성 문제를 통제하는 MM-QR 모형을 아래와 같이 활용하였다.

$$Q_{KPM}(\tau|x_{i,t}) = \beta_{1,\tau} \left(\sum_{i=1}^3 CPM_{i,t-1} \times Wind_{d,t} \right) + \beta_{2,\tau} elec_{d,t} + \beta_{3,\tau} trans_{d,t} \quad (4) \\ + \beta_{4,\tau} dust_{d,t} + \beta_{5,\tau} rain_{d,t} + \beta_{6,\tau} Year_t + \beta_{7,\tau} Season + \alpha_d(\tau)$$

여기서, $KPM_{d,t}$ 은 국내 d 지역의 t 일의 일 평균 미세먼지 및 초미세먼지 농도, $CPM_{1,t-1}$, $CPM_{2,t-1}$, $CPM_{3,t-1}$ 는 각각 중국 진안, 다롄, 베이징의 1일 전 미세먼지 및 초미세먼지 농도, $Wind_d$ 는 d 지역의 서풍 가변수, $elec_d$ 는 d 지역의 전력수요, $trans_d$ 는 d 지역의 일 평균 교통량 자료, $dust_d$ 는 d 지역의 황사 가변수, $rain_d$ 는 d 지역의 일 평균 강수량, $Year_t$ 는 연도 가변수, $Season_t$ 는 계절 가변수, $\alpha_d(\tau) \equiv \alpha_d + \delta_d q(\tau)$ 은 d 지역의 τ 분위 고정효과 혹은 τ 분위의 분포효과(distributional effect)를 나타낸다.

특히, 중국과 한국의 지리적 특성상 미세먼지가 날아오는 풍향을 반영하기 위하여, 중국의 1일 전 미세먼지 및 초미세먼지 농도와 서풍의 교차항($CPM_{i,t-1} \times Wind_{d,t}$)을 이용하였다.

본 연구에서는 <표 3>과 같이 모형마다 변수를 다양하게 추가하여 분석을 진행하였다. 모형(1)~(3)은 미세먼지에 대한 분석모형, 모형(4)~(6)은 초미세먼지에 대한 분석모형이다.

모형(1) 및 모형(4)의 경우, 한국에서 가장 지리적 위치가 먼 베이징을 제외하고 분석한 결과이다. 모형(2) 및 모형(5)의 경우, 베이징을 설명변수로 추가한 결과를 나타내며, 모형(3) 및 모형(6)은 황사 가변수를 추가한 결과를 나타낸다. 본 연구에서는 황사로 인한 미세먼지 농도의 자연적인 증가 현상을 고려하기 위하여, 황사 가변수를 추가하였다. 그리고 전력수요량, 미세먼지 및 초미세먼지 농도, 교통량의 경우 자연로그를 취하여 분석을 진행하였다. 미세먼지는 계절별 농도 변화가 뚜렷한 편이기 때문에, 계절 가변수를 모든 모형에 반영하였다.

〈표 3〉 분석모형별 활용 변수

모형		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
종속변수		미세먼지(PM10)			초미세먼지(PM2.5)		
설명 변수	서풍 × 1일 전 진안 미세먼지	0	0	0			
	서풍 × 1일 전 진안 초미세먼지				0	0	0
	서풍 × 1일 전 다렌 미세먼지	0	0	0			
	서풍 × 1일 전 다렌 초미세먼지				0	0	0
	서풍 × 1일 전 베이징 미세먼지		0	0			
	서풍 × 1일 전 베이징 초미세먼지					0	0
	국내 지역별 전력수요량	0	0	0	0	0	0
	국내 지역별 교통량	0	0	0	0	0	0
	국내 지역별 강수량	0	0	0	0	0	0
	국내 지역별 황사 가변수			0			0
	계절 가변수	0	0	0	0	0	0
	연도 가변수	0	0	0	0	0	0

3. 전국분석결과

미세먼지 및 초미세먼지 농도 하위 10% ($\tau = 10$) 및 농도 상위 10% ($\tau = 90$)에 대한 분석결과는 각각 <표 4> 및 <표 5>와 같다.

〈표 4〉 국내 미세먼지 농도에 대한 분위회귀 분석결과(10분위)

설명변수	미세먼지(PM10)			초미세먼지(PM2.5)		
	모형(1)	모형(2)	모형(3)	모형(4)	모형(5)	모형(6)
서풍 × 1일 전 진안 미세먼지	0.195*** (0.019)	0.154*** (0.021)	0.156*** (0.021)			
서풍 × 1일 전 진안 초미세먼지				0.149*** (0.021)	0.110*** (0.023)	0.113*** (0.023)
서풍 × 1일 전 다렌 미세먼지	0.253*** (0.020)	0.250*** (0.022)	0.251*** (0.022)			
서풍 × 1일 전 다렌 초미세먼지				0.287*** (0.021)	0.262*** (0.023)	0.264*** (0.023)
서풍 × 1일 전 베이징 미세먼지		0.038** (0.017)	0.037** (0.017)			

<표 4> 국내 미세먼지 농도에 대한 분위회귀 분석결과(10분위) (계속)

설명변수	미세먼지(PM10)			초미세먼지(PM2.5)		
	모형(1)	모형(2)	모형(3)	모형(4)	모형(5)	모형(6)
서풍 × 1일 전 베이징 초미세먼지					0.051*** (0.017)	0.051*** (0.017)
전력수요량	0.064 (0.041)	0.059 (0.041)	0.051 (0.041)	0.224*** (0.053)	0.264*** (0.053)	0.266*** (0.053)
교통량	0.236*** (0.036)	0.205*** (0.036)	0.210*** (0.037)	0.228*** (0.045)	0.216*** (0.046)	0.222*** (0.023)
강수량	-0.013*** (0.001)	-0.013*** (0.001)	-0.013*** (0.001)	-0.014*** (0.001)	-0.014*** (0.001)	-0.014*** (0.001)
황사			0.079*** (0.021)			0.082*** (0.026)
봄	0.232*** (0.017)	0.240*** (0.017)	0.246*** (0.017)	0.323*** (0.021)	0.340*** (0.020)	0.345*** (0.020)
가을	-0.067*** (0.016)	-0.045*** (0.016)	-0.045*** (0.016)	-0.030 (0.021)	-0.014 (0.021)	-0.014 (0.021)
겨울	0.177*** (0.017)	0.206*** (0.018)	0.211*** (0.018)	0.262*** (0.022)	0.307*** (0.023)	0.311*** (0.023)
연도 가변수	0	0	0	0	0	0
관측치	18,579	18,139	18,139	18,579	18,524	18,524

주) 괄호 안은 표준오차를 나타내며, ***, **, *는 각각 통계적으로 1%, 5%, 10% 내에서 유의함을 나타냄.

우선, 위 <표 4>와 같이 미세먼지 농도 하위 10%에 대한 추정결과 가운데 중국 측 요인인 진안의 미세먼지가 국내 미세먼지에 미치는 탄력성은 0.154~0.195로 나타났고, 진안의 초미세먼지가 국내 초미세먼지에 미치는 탄력성은 0.110~0.149로 나타났다. 다롄의 미세먼지의 경우 탄력성이 0.250~0.253으로 나타났으며, 초미세먼지의 경우 탄력성이 0.262~0.287로 나타났다. 마지막 베이징의 미세먼지의 경우 탄력성이 0.037~0.038로, 초미세먼지의 경우 0.051로 나타났다. 즉, 중국 요인은 우리나라의 미세먼지 농도가 낮을 때, 미세먼지 및 초미세먼지 구분 없이 항상 상당한 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다. 특히, 다롄의 미세먼지 농도가 1% 상승할 때 우리나라 미세먼지 농도가 약 0.25% 증가하고, 다롄의 초미세먼지 농도가 1% 상승할 때 우리나라의 초미세먼지 농도

가 약 0.27% 증가한다. 베이징의 영향력이 상대적으로 낮게 나타난 것은, 지리적 위치상 베이징의 미세먼지가 국내로 유입되는 경로가 다렌과 중첩됐기 때문인 것으로 보인다⁷⁾.

다음으로 국내 주요 설명변수인 전력수요량이 미세먼지 및 초미세먼지에 미치는 영향을 살펴본다. 본 연구에서는 국내 일별 화력발전량의 대리변수로 국내 전력수요량을 이용하였다. 미세먼지의 농도가 10분위(하위 10%)인 경우, 국내 전력수요량 계수는 모형에 따라 0.051~0.064로 나왔으며, 통계적 유의성이 낮은 것으로 나타났다. 반면, 초미세먼지 농도가 10분위(하위 10%)인 경우, 전력수요량의 계수가 모형에 따라 0.224~0.266으로 나왔으며, 통계적 유의성이 모두 1% 이내로 나타났다. 즉, 국내 초미세먼지 농도가 하위 10%일 때, 우리나라의 전력사용량이 1% 증가할 때 초미세먼지 농도는 약 0.22~0.26% 증가한다.

위와 같이 국내 미세먼지 농도가 매우 낮은 경우에, 국내 전력수요량은 미세먼지에는 유의한 영향을 미치지 못하는 반면, 초미세먼지에는 상당한 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다. 이는 국내 초미세먼지 농도가 낮은 날에도 국내 화력발전으로 인한 초미세먼지 농도 상승이 나타난다고 해석할 수 있다.

국내 교통량의 경우, 모형(1)~(6)에서 탄력성이 0.205~0.236으로 모두 유의하게 나타났다. 즉, 국내 미세먼지 농도가 낮은 경우 국내 교통량은 상당한 미세먼지 및 초미세먼지 배출에 기여하고 있음을 확인할 수 있다.

그리고 모든 분위에서 황사 가변수의 계수는 유의하게 나타났으며, 황사효과를 반영하더라도 모형별 주요 변수의 계수 크기 및 유의성이 크게 달라지지 않음을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 황사효과를 반영한 모형(3) 및 모형(6)을 중심으로 해석을 진행하고자 한다. 계절 더미 가운데 봄의 계수 역시 모든 모형에서 양(+)으로 유의하게 나타났다. 이는 국내 미세먼지 및 초미세먼지 농도가 확연히 다른 계절에 비하여 봄철에 그 수준이 높다는 것을 의미한다.

다음으로 <표 5>는 국내 미세먼지 및 초미세먼지 농도 90분위(상위 10%)에 대한 추정결과이다.

7) 다렌 및 진안을 배제하고 베이징만을 중국 설명변수로 넣은 경우, 베이징의 탄력성이 더 크게 나타남을 확인하였다.

〈표 5〉 국내 미세먼지 농도에 대한 분위회귀 분석결과(90분위)

설명변수	미세먼지(PM10)			초미세먼지(PM2.5)		
	모형(1)	모형(2)	모형(3)	모형(4)	모형(5)	모형(6)
서풍 × 1일 전 진안 미세먼지	0.197*** (0.017)	0.196*** (0.018)	0.189*** (0.018)			
서풍 × 1일 전 진안 초미세먼지				0.189*** (0.017)	0.190*** (0.019)	0.181*** (0.019)
서풍 × 1일 전 다렌 미세먼지	0.350*** (0.017)	0.349*** (0.019)	0.329*** (0.019)			
서풍 × 1일 전 다렌 초미세먼지				0.349*** (0.017)	0.344*** (0.019)	0.333*** (0.019)
서풍 × 1일 전 베이징 미세먼지		0.016 (0.015)	0.017 (0.015)			
서풍 × 1일 전 베이징 초미세먼지					0.006 (0.014)	0.007 (0.013)
전력수요량	0.175*** (0.035)	0.178*** (0.035)	0.189*** (0.035)	0.345*** (0.043)	0.325*** (0.043)	0.329*** (0.043)
교통량	0.156*** (0.031)	0.141*** (0.031)	0.134*** (0.031)	0.070*** (0.037)	0.070* (0.038)	0.061 (0.037)
강수량	-0.005*** (0.001)	-0.005*** (0.001)	-0.005*** (0.001)	-0.007*** (0.001)	-0.007*** (0.001)	-0.007*** (0.001)
황사			0.191*** (0.018)			0.205*** (0.021)
봄	0.161*** (0.014)	0.159*** (0.014)	0.159*** (0.014)	0.067*** (0.016)	0.073*** (0.016)	0.068*** (0.016)
가을	-0.030** (0.014)	-0.027** (0.014)	-0.026* (0.014)	-0.050*** (0.017)	-0.051*** (0.017)	-0.052*** (0.017)
겨울	0.006 (0.015)	0.012 (0.015)	0.020 (0.015)	-0.057*** (0.018)	-0.044** (0.019)	-0.039** (0.019)
연도 가변수	O	O	O	O	O	O
관측치	18,579	18,139	18,139	18,579	18,524	18,524

주) 괄호 안은 표준오차를 나타내며, ***, **, *는 각각 통계적으로 1%, 5%, 10% 내에서 유의함을 나타냄.

우선, 중국의 진안 및 다렌의 1일 전 미세먼지 및 초미세먼지는 6개 모형에서 모두 국내에 유의한 영향을 끼치고 있음을 확인할 수 있다. 미세먼지 농도 상위 10%에 대한 추정결과 가운데 진안의 미세먼지가 국내 미세먼지에 미치는 탄력성은 0.189~0.197로 나

타났고, 진안의 초미세먼지가 국내 초미세먼지에 미치는 탄력성은 0.181~0.190로 나타났다. 다렌의 미세먼지의 경우 탄력성이 0.329~0.350으로 나타났으며, 초미세먼지의 경우 탄력성이 0.333~0.349로 나타났다. 마지막 베이징 미세먼지의 경우 탄력성이 0.016~0.017로, 초미세먼지의 경우 0.006~0.007로 나타났다.

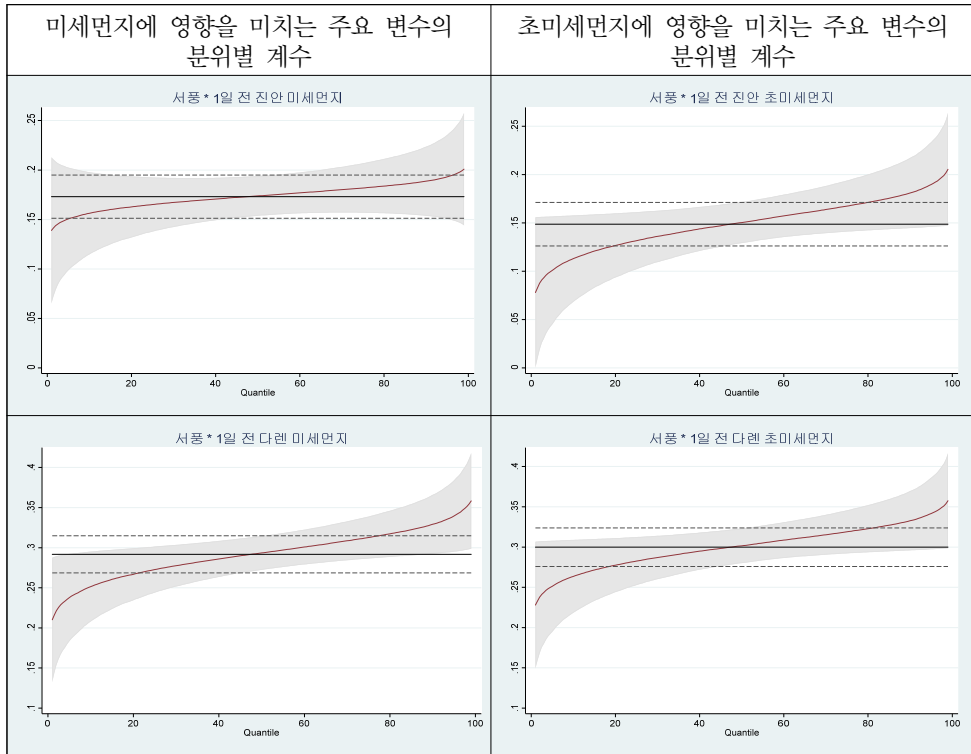
즉, 중국 요인은 우리나라의 미세먼지 농도가 높을 때도, 미세먼지 및 초미세먼지 구분 없이 항상 상당한 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다. 특히, 다렌의 미세먼지 및 초미세먼지 농도의 영향력이 가장 높게 나타났으며, 베이징의 경우 통계적 유의성이 매우 낮게 나타났다.

다음으로 국내 화력발전의 대리변수인 전력수요량의 경우, 미세먼지에 대한 탄력성은 0.175~0.189, 초미세먼지에 대한 탄력성은 0.325~0.349로 유의하게 나타났다. 미세먼지의 경우, 앞서 10분위에서는 전력수요량의 계수가 유의하지 않았지만, 90분위에서는 1% 수준에서 유의하게 나타난 것이 주요 특징이다. 초미세먼지의 경우, 전력수요량의 탄력성이 미세먼지의 경우보다 약 2배가량 높게 나타난 것이 특징이다.

국내 교통량의 경우, 10분위와 다르게 계수 값이 절반 수준으로 떨어졌으며 초미세먼지에 대해 분석한 모형(5)~(6)에서는 통계적 유의성이 매우 낮은 것으로 나타났다. 즉, 국내 초미세먼지 농도가 높은 경우에는, 상대적으로 교통량에서 발생하는 기여분이 적고 국내 석탄화력발전 및 중국의 영향이 크다고 해석할 수 있다. 그리고 10분위와 마찬가지로 황사 및 봄의 계절효과는 모두 양(+)으로 유의하게 나타났다.

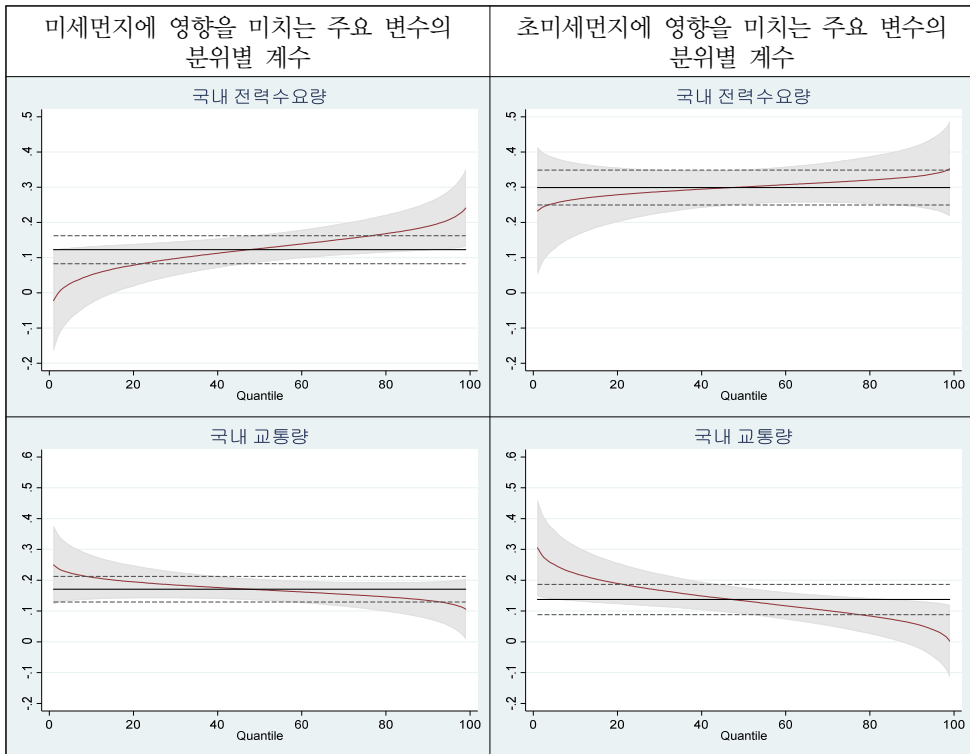
<그림 2>와 <그림 3>은 각각 중국 및 국내 주요 변수에 대한 분위(quantile)별 계수를 나타낸다. 여기서, 미세먼지에 대한 분석결과는 모형(3), 초미세먼지에 대한 분석결과는 모형(6)으로 추정됐다. 그림에서 붉은색 실선은 각 변수의 계수 값을, 회색 음영은 신뢰구간을 나타낸다. 가로축은 종속변수의 분위기를, 세로축은 해당 설명변수의 계수를 나타낸다. 또한, 회색 음영은 분위회귀분석 추정결과에 대한 신뢰구간을, 가운데 검은색 실선은 OLS(Ordinary Least Square) 분석으로 추정한 결과를, 점선은 OLS 추정결과에 대한 신뢰구간을 나타낸다.

<그림 2> 미세먼지 및 초미세먼지에 영향을 미치는 중국 측 변수의 분위별 계수



우선 <그림 2>와 같이 중국 요인의 경우, 미세먼지와 초미세먼지 모두에서 계수가 전반적으로 비슷한 수준 및 패턴을 보이고 있다. 진안과 다렌 지역의 1일 전 미세먼지 및 초미세먼지 농도의 계수는 분위가 낮을 때에도 계수 값이 모두 유의한 것을 확인할 수 있다. 또한, 국내 미세먼지 및 초미세먼지 농도가 높을 때 중국 측 요인의 계수가 확연히 커지는 것을 확인할 수 있다. 특히, 다렌 지역의 경우 미세먼지 및 초미세먼지의 모든 분위에서 전반적으로 높은 계수를 유지하고 있음을 확인할 수 있다. 즉, 중국 측 요인은 국내 미세먼지 및 초미세먼지 농도와 관계없이 항상 국내에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 다만, 분위가 매우 낮을 때 진안의 1일 전 미세먼지의 경우 계수 값이 0.14로, 계수 값이 0.07로 나타난 초미세먼지의 경우보다 상대적으로 크게 나타났다.

〈그림 3〉 미세먼지 및 초미세먼지에 영향을 미치는 국내 주요 변수의 분위별 계수



다음으로, <그림 3>의 국내 전력수요량의 분위별 계수를 살펴볼 때, 미세먼지와 초미세먼지에 대한 국내 전력수요량의 계수 수준(level)이 상당히 크게 차이나는 것을 확인할 수 있다. 미세먼지의 경우, 분위에 따라 국내 전력수요량의 계수가 약 -0.01~0.23으로 나타났으나, 20분위보다 작은 경우 통계적 유의성이 없음을 확인할 수 있다. 반면, 초미세먼지의 경우, 분위에 따라 0.2~0.35 정도로 계수 값이 상대적으로 훨씬 높게 나타났다. 즉, 농도 수준에 상관없이, 전반적으로 전력수요량이 미세먼지보다 초미세먼지에 미치는 영향력이 훨씬 크게 나타났다. 반면, 국내 교통량 분위별 계수의 경우 미세먼지와 초미세먼지에서 유사하게 나타났다.

이상의 전국분석을 통하여, 미세먼지 및 초미세먼지 농도가 높고 낮을 때 그 주요 설명 변수들의 영향력이 확연히 다른 것을 확인할 수 있었다. 또한, 초미세먼지 농도가 높을 수록 국내 화력발전 및 중국 측 요인의 영향력이 커졌으며, 초미세먼지 농도가 낮을 때에도 국내 전력수요량은 초미세먼지 농도 상승에 양(+)¹⁾의 영향을 미치고 있다.

즉, 우리나라의 초미세먼지 농도가 낮을 때에도, 화력발전이 초미세먼지 농도 상승의 주요요인 중 하나인 것으로 나타났다. 따라서 단순히 우리나라 초미세먼지 농도가 높을 때뿐만 아니라, 농도가 낮은 시기에도 화력발전으로 인한 초미세먼지 발생분에 대해 추가적인 감축 노력이 필요하다는 시사점을 얻을 수 있다.

박순애 · 신현재(2017)는 국내 석탄화력 발전거래량의 경우 초미세먼지 농도에 유의한 영향을 미치지 못한다고 분석하였는데, 이는 본 연구 결과와 상반된다. 본 연구에서는 초미세먼지 농도에 상관없이 국내 석탄화력발전 대리변수인 전력수요량의 계수가 항상 유의하게 양(+)²⁾으로 나타났다. 박순애 · 신현재(2017)는 제주도를 포함하였으며, 월별 분석을 진행하였기 때문에, 일별 발전량 패턴을 반영한 본 연구와 다른 결과가 나타난 것으로 보인다.

반면, 전국분석에서 미세먼지의 경우 농도가 매우 낮을 때는, 국내 화력발전이 유의하게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 반면 국내 미세먼지 농도가 20분위 이상으로 커지면, 국내 화력발전이 국내 미세먼지에도 유의한 영향을 미치고 있음을 확인하였다.

국내 교통량은 국내 미세먼지 및 초미세먼지 농도가 높을 때 그 영향력이 상대적으로 작게 나타났다. 반면, 미세먼지 및 초미세먼지 농도 수준이 낮은 경우 다른 국내외 요인에 비하여 상당한 영향을 미치고 있다. 다만, 본 연구에서 활용한 교통량 자료는 미세먼지 배출 주요요인으로 꼽히는 노후경유차가 아니라 지역별 전체 교통량을 의미한다. 따라서, 해당 결과를 통해 노후경유차 운행을 중단하는 미세먼지 비상저감조치를 완화하는 결론으로 이어지는 것은 어려울 수 있다.

서풍을 고려한 중국 측 요인의 경우 미세먼지 및 초미세먼지 농도에 상관없이 상시 우리나라에 상당한 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 관련하여 박순애 · 신현재(2017)는 중국 산둥성 지역의 초미세먼지가 우리나라 초미세먼지에 양(+)³⁾의 영향을 미치고 있다고, 김기환 · 김오석(2019)은 베이징과 톈진의 미세먼지가 서울의 미세먼지 농도 상승에 양(+)⁴⁾의 영향을 미친다고 분석하였다. Kim(2019) 역시 중국 측 미세먼지가 풍향에 따라

우리나라 미세먼지 농도 상승에 양(+)¹⁾의 영향을 미친다고 밝히고 있다.

이는 중국 측 요인이 항시 우리나라의 미세먼지 및 초미세먼지에 영향을 주고 있다는 본 연구 결과와 부합한다. 본 연구에서는 단순히 국내 미세먼지 및 초미세먼지 농도 평균치가 아니라, 농도의 분위별로 분석을 진행하였다. 그 결과, 국내 미세먼지 및 초미세먼지 농도가 매우 높을 때 중국 측 영향력은 더욱 크게 나타났다. 그러나 국내 농도가 낮은 경우에도 중국 측 요인은 그 수준(level)은 상대적으로 낮지만, 국내 미세먼지 농도 상승에 유의한 양(+)²⁾의 영향을 미치고 있다. 따라서 중국과의 대기오염에 대한 공조가 단순히 국내 미세먼지 문제가 심각한 봄철뿐 아니라 다른 계절에도 모두 이뤄질 필요가 있다는 시사점을 얻을 수 있다.

4. 지역별 분석

이상의 패널 회귀분석결과에 대한 강건성 확인을 위하여 본 절에서는 우리나라 전체 지역이 아니라, 지역별로 패널 분위회귀분석을 진행하고자 한다. 따라서 전체 분석 대상인 11개 지역을 수도권(서울·인천·경기) 및 충청도권(충남·충북), 전라도권(전남·전북), 강원 및 경북권, 경남권(부산·경남)으로 구분하여 분석을 진행하였다.

박재우·황병덕(2017)은 제주도를 제외한 수도권(서울·인천·경기), 충청도권(대전·충북·충남·강원도), 전라도권(광주·전북·전남), 경상도권(대구·경북·부산·울산·경남)의 네 개의 권역으로 분류하여 대기오염 물질이 호흡기질환에 미치는 영향을 분석하였다.

본 연구에서는 국내 최대전력 수요지인 수도권의 전력이 상당수 충청도 지역에서 공급되며, 지리적 위치상 중국 측 요인이 두 지역에 미치는 영향력이 비슷할 것으로 판단하여, 수도권 및 충청도권을 함께 분석하였다. 그리고 국내 및 중국 측 미세먼지 요인이 태백산맥 등의 지리적 영향을 받을 것이라 가정하여 강원 및 경북 지역을 별도로 분석을 진행하였다.

<표 6>과 <표 7>은 각각 10분위 및 90분위에 대한 국내 지역별 미세먼지와 초미세먼지에 대한 분위회귀분석 결과를 나타낸다. 미세먼지의 경우 모형(3)을, 초미세먼지의 경우 모형(6)을 이용하였다. 지역별 분석의 경우에서도, 전국과 동일하게 계절 및 연도별 가변수를 모두 반영하였다.

우선 <표 6>과 같이 하위 10분위에 대한 추정결과에서, 지역별로 미세먼지 및 초미세먼지 주요요인의 영향력이 상당히 다른 것을 확인할 수 있다. 국내 최대 화력발전지역인 충남이 포함된 수도권 지역의 경우 미세먼지 및 초미세먼지 두 가지 모두 화력발전의 대리변수 전력수요량의 계수가 1% 유의수준에서 0.261, 0.413로 매우 높게 나타났다. 즉, 수도권은 미세먼지 농도가 하위 10% 수준일 때, 다른 지역에 비하여 상대적으로 화력발전으로 인한 미세먼지 및 초미세먼지 농도 상승이 크다는 것을 통계적으로 확인할 수 있다.

<표 6> 국내 지역별 미세먼지 농도에 대한 분위회귀 분석결과(10분위)

설명변수	미세먼지(PM10)				초미세먼지(PM2.5)			
	수도권 및 충청도	전라도	강원도 및 경북	경남	수도권 및 충청도	전라도	강원도 및 경북	경남
서풍 × 1일 전 진안 미세먼지	0.201*** (0.034)	0.205*** (0.050)	0.112*** (0.041)	0.052 (0.046)				
서풍 × 1일 전 진안 초미세먼지					0.147*** (0.037)	0.164*** (0.053)	0.080* (0.044)	0.041 (0.050)
서풍 × 1일 전 다렌 미세먼지	0.266*** (0.035)	0.293*** (0.053)	0.183*** (0.043)	0.240*** (0.049)				
서풍 × 1일 전 다렌 초미세먼지					0.301*** (0.037)	0.262*** (0.054)	0.240*** (0.043)	0.223*** (0.051)
서풍 × 1일 전 베이징 미세먼지	0.057** (0.027)	-0.043 (0.040)	0.081** (0.034)	0.020 (0.039)				
서풍 × 1일 전 베이징 초미세먼지					0.064** (0.027)	-0.005 (0.037)	0.078** (0.032)	0.033 (0.038)
전력수요량	0.261*** (0.072)	0.041 (0.105)	-0.007 (0.096)	-0.031 (0.080)	0.413*** (0.093)	0.257* (0.132)	0.215* (0.122)	-0.059 (0.101)
교통량	0.182*** (0.060)	0.300*** (0.079)	0.166* (0.088)	0.190** (0.088)	0.189** (0.077)	0.425*** (0.091)	0.093 (0.106)	0.151 (0.106)
강수량	-0.016*** (0.001)	-0.015*** (0.002)	-0.012*** (0.002)	-0.009*** (0.001)	-0.018*** (0.002)	-0.016*** (0.002)	-0.013*** (0.002)	-0.008*** (0.001)
황사	0.115*** (0.033)	0.042 (0.048)	0.044 (0.039)	0.082* (0.047)	0.112*** (0.042)	0.045 (0.058)	0.055 (0.047)	0.082 (0.058)
관측치	8,245	3,298	3,298	3,298	8,420	3,368	3,368	3,368

주) 괄호 안은 표준오차를 나타내며, ***, **, *는 각각 통계적으로 1%, 5%, 10% 내에서 유의함을 나타냄.

특히, 미세먼지보다 초미세먼지의 계수 값이 더욱 크게 나타난 것이 특징이다.

반면, 다른 지역의 경우 국내 미세먼지 및 초미세먼지 농도가 하위 10%로 낮을 때, 전력수요량의 통계적 유의성이 매우 낮게 나타났다.

중국의 1일 전 미세먼지 및 초미세먼지 농도의 경우 수도권, 충청도, 전라도에서 계수 값의 합이 가장 크게 나타났다. 반면, 강원도, 경북 및 경남의 경우 상대적으로 중국 요인의 계수 값의 합이 상대적으로 낮았다. 특히 경남지역은 베이징과 진안 지역의 미세먼지 농도는 유의성이 매우 낮게 나타났으며, 5개 지역 가운데 중국 측 요인의 계수가 가장 작게 나타났다.

즉, 미세먼지 농도가 하위 10% 수준일 때, 수도권, 충청도 및 전라도는 중국 미세먼지 및 초미세먼지의 영향을 상대적으로 크게 받지만, 경남지역은 지리적인 위치 등으로 중국 측 영향을 가장 적게 받는 것을 확인할 수 있다. 이를 통하여 우리나라의 미세먼지 및 초미세먼지 농도가 매우 낮을 때에도 중국 측 요인은 국내 모든 지역의 미세먼지 및 초미세먼지에 유의한 영향을 미치며, 특히 서부권(수도권, 충청도, 전라도)에서 그 영향력이 더 큰 것을 확인할 수 있다.

다음으로 <표 7>과 같이 90분위에서도, 지역별로 미세먼지 주요요인의 영향력이 상당히 다른 것을 확인할 수 있다.

우선 중국 측 요인의 경우, 10분위에 비하여 전반적으로 계수 값이 커진 것을 확인할 수 있다. 즉, 미세먼지 및 초미세먼지가 매우 높을 경우, 중국 측 요인의 영향력은 우리나라의 서부권뿐 아니라 전 지역에 영향을 강하게 미치는 것을 확인할 수 있다. 물론, 90분위에서도 상대적으로 경남이 중국 측 요인의 영향력이 상대적으로 가장 작게 나타났다.

다음으로 국내 요인의 경우 10분위와 마찬가지로 미세먼지와 초미세먼지 모두 수도권 및 충청도에서 화력발전의 대리변수 전력수요량의 계수가 가장 높게 나타났다. 그러나, 10분위와 다르게 초미세먼지 90분위에서는 전력수요량의 계수가 5개 지역 모두에서 유의하게 나타났다. 즉, 전력수요량의 경우 초미세먼지 농도가 높을 때 국내 주요요인임을 다시 확인할 수 있다. 다만, 경남지역의 전력수요량은 미세먼지의 경우 유의성이 매우 낮게 나타났으며 초미세먼지의 경우 10% 수준에서 유의성이 나타나는 등 전력수요량의 영향력이 전국에서 가장 작게 나타났다.

이상의 지역별 분석결과를 전국분석결과와 비교했을 때, 주요 결과는 다음과 같다.

우선 중국 측 요인의 경우, 전국 및 지역별 분석 모두에서 분위에 상관없이 국내 미세먼지 및 초미세먼지 농도에 항상 유의하게 영향을 미치는 결과가 나타났다. 특히, 미세먼지 및 초미세먼지 농도가 높을 때, 중국 측 요인은 국내 모든 지역에 광범위하게 영향을 미치고 있음을 지역별 분석을 통하여 확인하였다. 반면, 농도가 낮은 경우에는 상대적으로 우리나라의 서부권에 영향을 더 크게 미쳤다.

다음으로 국내 요인의 경우, 전국 결과와 동일하게 지역별 분석에서도 국내 화력발전

〈표 7〉 국내 지역별 미세먼지 농도에 대한 분위회귀 분석결과(90분위)

설명변수	미세먼지(PM10)				초미세먼지(PM2.5)			
	수도권 및 충청도	전라도	강원도 및 경북	경남	수도권 및 충청도	전라도	강원도 및 경북	경남
서풍 × 1일 전 진안 미세먼지	0.194*** (0.025)	0.213*** (0.044)	0.152*** (0.038)	0.221*** (0.046)				
서풍 × 1일 전 진안 초미세먼지					0.193*** (0.028)	0.219*** (0.044)	0.136*** (0.037)	0.169*** (0.048)
서풍 × 1일 전 다렌 미세먼지	0.344*** (0.026)	0.319*** (0.047)	0.361*** (0.040)	0.277*** (0.050)				
서풍 × 1일 전 다렌 초미세먼지					0.357*** (0.028)	0.311*** (0.045)	0.352*** (0.037)	0.293*** (0.049)
서풍 × 1일 전 베이징 미세먼지	0.016 (0.020)	0.030 (0.035)	0.028* (0.032)	-0.012 (0.039)				
서풍 × 1일 전 베이징 초미세먼지					0.006 (0.020)	0.020 (0.031)	0.004 (0.027)	-0.029 (0.036)
전력수요량	0.283*** (0.054)	0.102 (0.093)	0.187** (0.089)	0.146* (0.081)	0.402*** (0.070)	0.306*** (0.110)	0.376*** (0.104)	0.169* (0.091)
교통량	0.160*** (0.045)	0.133* (0.070)	0.012 (0.081)	0.253*** (0.089)	0.023 (0.058)	0.126* (0.076)	-0.038 (0.091)	0.180* (0.101)
강수량	-0.007*** (0.001)	-0.008*** (0.002)	-0.005*** (0.002)	-0.004*** (0.001)	-0.009*** (0.001)	-0.011*** (0.002)	-0.006*** (0.002)	-0.005*** (0.001)
황사	0.210*** (0.025)	0.185*** (0.043)	0.112*** (0.036)	0.161*** (0.048)	0.233*** (0.032)	0.173*** (0.049)	0.109*** (0.040)	0.159*** (0.056)
관측치	8,245	3,298	3,298	3,298	8,420	3,368	3,368	3,368

주) 괄호 안은 표준오차를 나타내며, ***, **, *는 각각 통계적으로 1%, 5%, 10% 내에서 유의함을 나타냄.

이 미치는 영향력이 미세먼지보다 초미세먼지에서 전반적으로 더 크게 나타났음을 확인할 수 있다.

전국분석에서는 미세먼지 농도가 10분위로 낮을 때 국내 전력수요량 계수가 유의하지 않게 나타났으며, 초미세먼지의 경우 전력수요량 계수가 유의수준 1%에서 추정됐다. 반면, 지역별 분석의 미세먼지 및 초미세먼지 모두 수도권과 충청도 지역만 전력수요량 계수가 유의수준 1%에서 양(+)으로 추정됐다. 즉, 미세먼지 및 초미세먼지 농도가 매우 낮을 때, 전국적으로는 국내 화력발전이 초미세먼지 상승에만 영향을 미쳤지만, 이는 상대적으로 수도권 및 충청도 지역의 영향이 매우 크기 때문인 것으로 나타났다.

이외의 지역에서 화력발전이 미세먼지에 미치는 영향력이 유의하지 않았기 때문에, 전국분석에서 전력수요량의 계수가 통계적 유의성이 없게 나타난 것으로 보인다. 반면, 초미세먼지의 경우 개별 지역의 전력수요량 계수가 미세먼지보다 상대적으로 크고 통계적 유의성이 높았기 때문에 전국에서도 유의하게 나타난 것으로 해석된다.

그리고 초미세먼지 농도가 매우 높은 경우, 전국분석에서는 전력수요량이 1% 수준에서 유의하였다. 그러나 지역별 분석에서 경남지역의 전력수요량의 영향력은 10% 수준으로 유의수준이 낮았고 그 계수도 0.169로 이외의 지역에 비해 절반 수준으로 낮게 나타났다.

경남지역은 미세먼지 및 초미세먼지 농도가 높을 때 다른 지역에 비하여 교통량의 영향력이 모두 크게 나타났다. 이는 경남지역이 상대적으로 다른 지역에 비하여 중국 측 요인과 국내 측 요인인 전력수요량의 영향력이 작게 나타났기 때문에, 교통량이 상대적으로 미세먼지 및 초미세먼지의 주요요인으로 나타났다.

IV. 결론 및 시사점

본 연구는 중국의 3개 도시 및 국내 11개 광역시의 미세먼지 및 초미세먼지 농도에 대하여 전국 및 지역별 패널 분위회귀분석을 진행함으로써, 미세먼지 농도가 높고 낮을 때의 국내 및 중국 요인의 영향력을 분석하고자 하였다.

우리나라의 미세먼지 및 초미세먼지 농도가 높고 낮을 때에 따라, 국내외 주요 설명요인들의 영향력이 다른 것을 확인하였다. 우선 전국분석에서 국내 초미세먼지 농도가 하

위 10% 수준으로 낮을 경우, 국내 화력발전의 척도로 활용한 전력수요량은 초미세먼지에 양(+)의 영향을 미치는 것을 확인하였다. 지역별 분석결과, 수도권 및 충청도 지역에서만 전력수요량이 미세먼지 및 초미세먼지에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 국내 최대화력발전소가 충남지역에 위치하기 때문인 것으로 보인다.

반면, 국내 미세먼지 및 초미세먼지 농도가 높은 경우에는 전력수요량이 미세먼지 및 초미세먼지에 모두 양(+)으로 유의한 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 국내 미세먼지 및 초미세먼지 농도가 상위 10% 수준 등으로 높을 때, 농도가 낮을 때보다 화력발전의 영향력은 미세먼지와 초미세먼지 모두에서 크게 나타났다. 특히, 상위 10% 수준에서 국내 전력수요량이 1% 증가할 때 초미세먼지 농도는 0.33% 상승하였지만, 미세먼지 농도는 0.19% 상승하였다. 즉, 국내 화력발전 가동에 따라 발생한 초미세먼지 농도 상승 기여분이 미세먼지 상승 기여분보다 약 75% 높게 나타났다. 지역별 분석 결과, 농도가 높을 때 수도권 및 충청도 외에 모든 국내 지역에서 전력사용량이 중국 측 요인과 함께 주요요인임을 확인하였다.

중국 측 요인의 경우, 중국의 1일 전 미세먼지의 경우 국내 미세먼지 농도가 높고 낮음에 관계없이 항상 양(+)의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 국내 미세먼지 및 초미세먼지 농도가 매우 높을 때 중국 측 영향력은 더욱 크게 나타났으며, 농도가 낮은 경우에도 중국 측 요인은 그 수준은 상대적으로 낮지만, 국내에 영향을 미치고 있음을 확인하였다.

결론적으로 국내 요인의 경우, 우리나라의 미세먼지 문제가 심각할 때 국내 화력발전에서 나오는 대기오염물질은 미세먼지 및 초미세먼지 농도를 유의하게 상승시킨다. 특히, 국내 화력발전으로 인한 초미세먼지 발생 문제가 미세먼지보다 더 심각함을 확인할 수 있다. 반면, 중국 요인의 경우 미세먼지 및 초미세먼지 농도가 높고 낮음에 관계없이 우리나라에 상시 상당한 영향을 미치고 있다.

본 연구의 분석결과를 종합한 시사점은 다음과 같다.

첫째, 중국과의 미세먼지에 대한 공조가 단순히 미세먼지 및 초미세먼지 농도가 높을 때뿐 아니라 낮을 때에도 항시 이뤄질 필요가 있다는 시사점을 얻을 수 있다. 우리나라는 이미 2015년부터 ‘한중 기후변화 협력에 관한 정부 간 협정’, ‘2018~2022 한중 환경협력 계획’, ‘미세먼지 예보 정보 및 기술교류 협력사업 업무계획 양해각서’ 등의 중국과의 대기분야 환경협정을 체결하고 있다(최기철, 2019). 그러나 본 연구의 분석결과에 따르면

중국 측 미세먼지가 우리나라 전 지역에 상시 영향을 미치고 있기 때문에, 국내 미세먼지 문제를 해결하기 위하여 더욱 적극적인 국제적 협력이 필요할 것으로 보인다.

둘째, 주로 봄철에 발생하는 고농도 미세먼지 문제 해결을 위해 국내 화력발전으로 인한 초미세먼지 발생분에 대한 감축이 현재보다 강화되어야 함을 확인할 수 있다. 우리나라의 주택용 전력사용량은 지속적으로 증가하는 추세이기 때문에, 단기간에 화력 발전량 자체를 크게 감축하는 것은 쉽지 않다. 이에 따라 국내 화력발전시설에서 배출되는 미세먼지 및 초미세먼지를 감축할 수 있는 기술개발에 더욱 노력을 기울여야 한다. 본 연구의 분석결과, 화력발전으로 인한 초미세먼지 상승이 미세먼지보다 더 높았기 때문에, 초미세먼지 감축에 더욱 집중할 필요가 있다. 다만, 초미세먼지 농도가 매우 낮을 때에도 화력발전으로 인한 초미세먼지 농도 증가가 유의하게 나타났기 때문에, 초미세먼지 농도가 낮은 기간에도 화력발전에서 발생하는 초미세먼지 감축에 대응이 지속적으로 이뤄질 필요가 있다.

셋째, 국내 지역별로 국내외 요인들의 영향력 차이가 존재하기 때문에, 지역별로 미세먼지 대응 정책의 우선순위를 다르게 설정할 필요가 있다. 경남지역은 다른 요인보다 교통량의 영향력이 상대적으로 크기 때문에 보다 도로주행 등에서 발생하는 미세먼지 및 초미세먼지 감축에 대한 정책이 필요하다. 수도권 및 충청도 지역의 경우 중국 측 요인의 영향도 강하게 받지만, 국내 화력발전에 의한 초미세먼지 상승이 국내 지역 가운데 가장 크게 나타났다. 반면, 국내 교통량은 유의수준이 매우 낮게 나타났으며, 화력발전의 영향력은 미세먼지보다 더 크게 나타났으며 1% 수준에서 유의했다. 따라서 수도권 및 충청도 지역은 월경성 미세먼지 문제뿐 아니라 국내 화력발전으로 인한 초미세먼지 발생분에 대한 감축이 현재보다 강화되어야 함을 확인할 수 있다.

석탄화력발전과 가스발전이 전체 발전량 가운데 차지하는 비중이 약 65% 되는 상황이기 때문에, 본 연구에서는 국내 화력발전의 척도로 지역별 전력수요량을 활용하였다. 그러나 향후 연구에서 일별 지역별 전력수요량 대신 일별 지역별 석탄화력 발전량 및 가스발전량 자료를 확보하여 국내 요인을 분석한다면 국내 화력발전량이 미세먼지에 미치는 영향을 더욱 정확하게 분석할 수 있을 것으로 기대한다.

[References]

- 국립환경과학원, “동북아 장거리이동 대기오염물질 국제공동연구 요약 보고서”, 2019.
- 김기환·김오석, “시계열 분석을 활용한 한·중 월경성 미세먼지 연구”, 『한국지리학회지』, 제 8권 제1호, 2019, pp. 33~46.
- 김종희·최대련·구운서·이재범·박현주, “2014년 2월 서울의 고농도 미세먼지 기간 중에 CMAQ-DDM 을 이용한 국내외 기여도 분석”, 『한국대기환경학회지』, 제32권 제1호, 2016, pp. 82~99.
- 박순애·신현재, “한국의 초미세먼지(PM 2.5)의 영향요인 분석: 풍향을 고려한 계절성 원인을 중심으로”, 『환경정책』, 제25권 제1호, 2017, pp. 227~248.
- 박재우·황병덕, “지역별 대기오염물질(PM10, O3, CO)이 호흡기질환에 미치는 영향”, 대한보건연구, 제43권 제3호, 2017, pp. 53~66.
- 서석준·임용재·서영교·정동희·정해진·이민도·박진수·홍유덕, “고농도 미세먼지 및 황사 발생사례에 대한 백령도 지역의 미세먼지 입경분포 특성”, 『한국도시환경학회지』, 제 15권 제3호, 2015, pp. 241~250.
- 오세호·이태형·박태현·안준영·박진수·최진수·박규태·배민석, “백령도에서 관측된 장거리 유입 PM 1.0 의 주성분 공간 분포: PSCF 및 군집분석 관계”, 『한국대기환경학회지』, 제 33권 제4호, 2017, pp. 411~423.
- 오종민·신현수·신예슬·정형철, “시계열 분석을 활용한 서울시 미세먼지 예측”, 『Journal of The Korean Data Analysis Society』, 제19권 제5호, 2017, pp. 2,457~2,468.
- 이성희·강병욱·연익준·최준락·박현필·박상찬·이학성·조병렬, “충주시 미세먼지(PM 2.5) 농도특성에 대한 사례 연구”, 『한국대기환경학회지』, 제28권 제5호, 2012, pp. 595~605.
- 장경수·여준호, “한국과 중국의 경제성장이 한국의 미세먼지에 미치는 영향분석”, 『환경정책』, 제23권 제1호, 2015, pp. 97~117.
- 차성기, “황사의 건강영향-역학문헌 비교”, 과학기술정보분석, 2010.
- 최기철, “중국의 대기관리정책 분석 및 한중협력 강화 방안”, 한국환경정책 평가연구원, 정책 보고서, 2019.
- Andreou, E., E. Ghysels, and A. Kourtellos, “Regression Models with Mixed Sampling Frequencies,” *Journal of Econometrics*, Vol. 158, No. 2, 2010, pp. 246~261.
- Bae, M., B. U. Kim, H. C. Kim, J. Kim, and S. Kim, “Role of Emissions and Meteorology in the Recent PM2. 5 Changes in China and South Korea from 2015 to 2018,” *Environmental Pollution*, 2021, p. 270.
- Baek, J. S., “The Effect of Subway Openings on Air Quality,” *Korea Review of Applied*

- Economics*, Vol. 18, No. 2, 2016, pp. 53~76.
- Canay, I. A., "A Simple Approach to Quantile Regression for Panel Data," *The Econometrics Journal*, Vol. 14, No. 3, 2011, pp. 368~386.
- Clements, M., and A. Galvao, "Macroeconomic Forecasting with Mixed Frequency Data: Forecasting US Output Growth," *Journal of Business and Economic Statistics*, Vol. 26, 2008, pp. 546~554.
- Ebenstein, A., M. Fan, M. Greenstone, G. He, P. Yin, and Zhou, M., "Growth, Pollution, and Life Expectancy: China from 1991-2012," *American Economic Review*, Vol. 105, No. 5, 2015, pp. 226~231.
- Ghysels, E., V. Kvedaras, and V. Zemlys, "Mixed Frequency data Sampling Regression Models: the R Package Midasr," *Journal of Statistical Software*, 2016, pp. 1~35.
- Ike, G. N., O. Usman, and S. A. Sarkodie, "Testing the Role of Oil Production in the Environmental Kuznets Curve of Oil Producing Countries: New Insights from Method of Moments Quantile Regression," *Science of the Total Environment*, Vol. 711, 2020, p. 135208.
- Jia, R., and H. Ku, "Is China's Pollution the Culprit for the Choking of South Korea? Evidence from the Asian Dust," *The Economic Journal*, Vol. 129, No. 624, 2019, pp. 3154~3188.
- Kim, M. J., "The Effects of Transboundary Air Pollution from China on Ambient Air Quality in South Korea," *Heliyon*, Vol. 5, No. 12, 2019, p. e02953.
- Koenker, R., and G. Bassett Jr, "Regression Quantiles," *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 1978, pp. 33~50.
- Koenker, R., "Quantile Regression for Longitudinal Data," *Journal of Multivariate Analysis*, Vol. 91, No. 1, 2004, pp. 74~89.
- Lin, J., D. Pan, S. J. Davis, Q. Zhang, K. He, C. Wang, D. G. Streets, D. J. Wuebbles, and D. Guan, "China's International Trade and Air Pollution in the United States," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 111, No. 5, 2014, pp. 1736~1741.
- Machado, J. A., and J. S. Silva, "Quantiles via Moments," *Journal of Econometrics*, Vol. 213, No. 1, 2019, pp. 145~173.
- Powell, D., "Quantile Treatment Effects in the Presence of Covariates," *Review of Economics and Statistics*, 2016, pp. 1~39.
- Rosen, A. M., "Set Identification via Quantile Restrictions in Short Panels," *Journal of Econometrics*, Vol. 166, No. 1, 2012, p. 137.