

미세먼지 원인 요소들의 영향력 변화 추정: 경유를 중심으로*

김형진¹

요약

최근 미세먼지에 대한 논란이 크게 불거지고 있다. 원인으로 주목받고 있는 것 중 하나는 수송 부문에서의 연료 소비 그 중에서도 특히 경유이고, 중국으로부터의 영향 역시 많은 논란이 되고 있다. 본 연구에서는 미세먼지에 대한 원인을 간접적으로나마 이해하기 위해 PM_{10} (coarse particulate matter) 농도에 대한 이들 원인 요소들의 영향을 추정하고자 한다. 또한, 본 연구에서는 그간 있었던 정책이나 규제 등의 효과를 간접적으로나마 관찰하기 위해 국내 원인 물질들의 영향력 변화를 시간별로 추정하고자 한다. 이를 위해 2006년 1월에서 2016년 12월까지 서울을 포함한 7개 광역시의 PM_{10} 농도에 대한 취업자 수, 제조업 산업생산지수, 경유 소비, 자동차 등록대수, 강수량, 온도, 풍속, 황사일수의 영향을 추정하였다. 시간에 따라 변화하는 설명변수들의 영향력을 추정하기 위해서는 시변 비모수 고정효과 패널모형을 사용하였다. 추정 결과, PM_{10} 농도에 대한 경유 소비의 영향은 평균적으로는 존재하는 것으로 나타났다. 하지만, 변화의 측면에서 경유 소비의 영향력은 2014년까지 감소하였다는 점이 확인되었고 이후에는 유의한 변화를 보이지 않는다. 이와 같은 결과는 2005년 이후 강화된 경유 규제에 기인한 것으로 추측된다. 경유 이외의 국내적 요인으로는 취업자의 수와 제조업 산업생산지수가 2014년 이후 미세먼지 농도에 미치는 영향을 확대하고 있는 것으로 나타났다. 반면, 대외적 요인이고 볼 수 있는 황사의 영향력은 최근 지속적으로 감소하는 추세에 있는 것으로 추정되었다. 결국, 미세먼지에 대한 국내의 정책적 대응은 아직 충분하지 못하고 향후에도 개선의 여지가 있는 것으로 보인다.

주요용어 : 대기오염, PM_{10} , 경유, 시변 비모수 고정효과 패널모형.

1. 서론

미세먼지에 대한 국민들의 관심은 최근 그 어느 때보다 높아진 상황이다. 이를 반영하듯 2017년 있었던 19대 대선에서는 대부분의 후보들이 미세먼지 대응을 위한 공약들을 내놓았고, 대선 이후에도 미세먼지 줄임에 대한 대응 정책들이 에너지·환경과 관련한 정책들의 큰 틀을 유지하고 있다. 특히, 석탄 발전과 경유 자동차는 미세먼지의 주요 원인으로 지목되어 이들의 사용을 최소화하는 정책들이 연일 논의되고 있다. 발전 부문에서는 석탄 화력발전을 최소화하는 발전 믹스(mix)를 고민하고 있고, 수송용 부문에서는 LPG(liquefied petroleum gas), 천연가스 차량, 전기 자동차와 같은 탈화석 연료를 사용하는 차량들의 보급 정책이 속도를 내고 있다. 건강에 대한 미세먼지의 위해성을 고려하였을 때 미세먼지에 대한 대응 정책에는 누구나 동의할 수 있을 것이다. 하지만, 대응 정책의 효율성까지 함께 고려한다면 미세먼지에 대한 원인 규명이 선행되어야 한다. 미세먼지는 배출을 통해 대기를 오염시키기도 하지만 다른 오염물질들의 대기 반응에 의해 생성되기도 하고 대기에서의 이동을 통해 확산되기도 한다(Kim, 2010). 물론, 석탄 화력발전과 경유 자동차량이

*본 논문은 “2016년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비로 연구하였음(관리번호-520160489)”을 밝힙니다.

¹강원도 춘천시 강원대학길 1, 강원대학교 경제무역학부 조교수. E-mail : kgh@kangwon.ac.kr

[접수 2018년 3월 4일; 수정 2018년 4월 17일; 게재확정 2018년 4월 20일]

미세먼지를 유발하기는 하겠지만, 지난 수십 년간 강화해왔던 대기환경규제와 연료 규제 등의 노력을 감안하였을 때 이들 소비로 인한 미세먼지의 농도는 낮아졌을 가능성이 높다. 만일, 그렇지 못하다면 우리나라의 미세먼지 대응은 모든 기간 동안 잘못되어 온 것이라고 할 수 있다. 혹은, 미세먼지에 대한 1차 배출원에 대한 감축노력도 중요하지만, 외부에서 이동하는 미세먼지를 차단하는 것 역시 1차 배출원의 차단보다 더욱 중요할 수 있다. 특히, 우리나라는 심각한 대기오염을 경험하고 있는 중국과 인접하여 이로 인한 미세먼지의 유입이 다른 나라들에 비해 상대적으로 상당히 클 가능성이 있다. Kim(2010)에 따르면, 불확실성이 크기는 하지만 수도권 미세먼지 농도의 30% 정도는 외부로 인한 영향인 것으로 보고 있다.

아직, 우리나라의 미세먼지에 대한 모든 원인이 정확하게 규명되지는 않았지만 주요 원인에 대한 연구는 이미 일부 이루어진 바 있다. 특히, 국내 연구에서는 미세먼지 농도에 대한 다양한 기상 변수들의 영향이 다양하게 추정된 바 있다. Shin et al.(2007)은 2005년 1월에서 12월까지 인천의 도시대기측정망과 인천기상대 자료를 사용하여 풍향, 풍속, 상대습도, 일기유형, 해륙풍 유무의 기상 인자가 PM_{10} (coarse particulate matter) 농도에 미치는 영향을 추정하였다. 추정결과, 서풍계열의 바람, 6m/s 이하의 풍속, 황사 시, 해풍일 등이 발생할 때 농도가 증가하는 모습을 관찰하였다. Son, Kim(2009)은 1991년에서 2006년까지 부산 지역의 PM_{10} 농도에 대한 기온, 상대습도, 기압, 풍속의 영향을 추정한 바 있는데 분석 결과, 미세먼지 농도의 주기와 기상변수들 간의 다양한 상관관계를 추정하였고 이외에도 황사가 농도 상승의 주요 원인인 것으로 판단하고 있다. Kim, Jin, Kim(2007)은 2000년에서 2005년까지의 환경부 자료를 바탕으로 부산지역의 PM_{10} 농도 변화를 분석한 결과 다양한 기상요인들과 PM_{10} 농도 간의 상관관계를 발견하였고 이들 관계는 시간대 별로 상이하였으며 2차 에어로졸(aerosol)의 생성 역시 중요한 기여를 하는 것으로 결론 내렸다. Cho et al.(2016)이 강원도 춘천과 영월의 미세먼지에 대해 온도, 습도, 안개 및 황사, 풍속 등의 영향을 분석하였고 분석 결과, 두 지역의 상이한 조건으로 기온, 풍속, 상대습도 등 기상요인과 농도 간 관계에 공통성을 뚜렷이 발견하지 못하였다. Sohn, Ha, Lee(2016)은 CMAQ 모형(communitary multiscale air quality model)과 예측치를 사용하여 서울 지역의 PM_{10} 농도를 분석한 바와 있고, Oh et al.(2017)은 서울시의 월별 PM_{10} 농도의 시계열 자료를 다양한 시계열 모형을 통해 분석한 바 있다. 이외에도 Lee, Lee, Yang(2015)은 주택 가격에 미치는 $PM_{2.5}$ 농도의 영향을 바탕으로 $PM_{2.5}$ (fine particulate matter)의 경제적 가치를 추정하였고, Chang, Choi(2009)는 서울지역의 PM_{10} 농도가 사망자 수에 미치는 영향을 비선형 회귀모형을 통해 분석한 바 있다. 그리고 Choi, Park(2016)는 서울시 미세먼지 자료를 축소된 상자그림을 사용하여 지역별로 군집분석을 한 바 있다.

대부분의 국내 선행연구들은 미시적인 차원에서 다양한 실험과 관찰을 통해 미세먼지 농도의 원인과 변화들을 규명하고 있다는 점에서 상당히 의미가 있다. 하지만, 조금 더 거시적인 관점 그리고 에너지·환경 정책의 측면에서 봤을 때에는 최근 미세먼지 농도의 주요 원인으로 지목 받고 있는 석탄 소비나 경유 소비가 미세먼지에 미치는 영향을 추정하는 것 역시 중요한 주제 중 하나일 것이다. Bae, Kim(2016)은 이런 정책적 관점에서의 시사점을 제시하기 위해 2000년에서 2012년까지 16개 시·도의 PM_{10} 에 대한 결정요인을 추정하였다. 동 연구에서는 일반적으로 미세먼지에 대한 결정요인으로 이해되는 황사일수와 연간강수량 이외에도 GRDP(gross regional domestic product), 소비자물가지수 등 다양한 경제변수와 함께 각 지역의 경유 소비량, 화력발전 용량을 설명변수로 사용하여 최근 논란이 되고 있는 경유와 석탄 소비의 영향을 추정하고자 하였다. 추정결과, 지역 내 경유소비, 황사일수, 운송사업체가 통계적으로 유의한 수준에서 PM_{10} 의 농도를 증가

시키는 것으로 나타났다. 그리고 최근 Park, Shin(2017) 역시 국내 초미세먼지($PM_{2.5}$) 농도에 대한 결정요인을 추정하기 위해 2015년 2월에서 2016년 5월까지 16개 시·도의 패널(panel)자료를 사용한다. 종속변수로는 $PM_{2.5}$ 를 사용하였고, 설명변수로는 국내 경유 소비량, 석탄화력 발전량, 화학과 시멘트 산업 제조업 생산지수, 그리고 이외에도 중국 산둥성의 초미세먼지 농도와 서풍계열 풍향의 비율 사용하여 국내적 요인과 중국 요인의 영향력을 비교·관찰하고자 하였다. 추정결과, 국내 초미세먼지의 농도는 산둥성의 초미세먼지 농도와 서풍계열 풍향비율에 통계적으로 유의한 영향을 받는 것으로 나타났다.

Bae, Kim(2016)과 Park, Shin(2017)의 연구는 미세먼지 농도에 대한 기후적 요인 이외에도 경유 소비나 석탄 발전량과 같은 에너지부문의 주요 변수에 대한 영향을 추정하였다는 점에서 정책적으로 큰 의미가 있다. 특히, Park, Shin(2017)은 거기서 더 나아가 중국으로부터의 영향을 통계적으로 추정하였다는 점에서 상당한 정책적 함의를 가지고 있다. 하지만, 기후적 요인과 달리 국내 미세먼지 농도에 미치는 경유 소비의 영향은 시간에 따라 달라질 가능성이 높다. Kim(2010)의 연구에서도 지적한 바 있지만, 우리나라의 경유 자동차는 후처리장치(diesel particulate filter)의 부착으로 미세먼지의 배출이 크게 저감되었다고 평가받는다. 이외에도 2005년 경유 승용차의 국내 허용을 앞두고 경유에 대한 황 함량 기준과 자동차 배기가스 배출 기준에 대한 규제 역시 함께 강화한 바가 있다. 반면, 중국으로부터의 외적 영향은 중국의 경제성장과 해안 지역에 밀집되어 있는 제조업 시설에 의해 최근 더욱 커졌을 가능성이 있다. 본 연구에서는 이와 같은 점을 확인하기 위해 미세먼지 농도에 대해 시간에 의해 변화하는 경유 소비의 영향을 관찰하고자 한다. 석탄 화력발전 역시 경유 소비와 마찬가지로 국내 미세먼지 농도에 영향을 미치는 중요한 요소임은 틀림없다. 하지만, 석탄 화력발전소는 대도시 이외의 지역에 대부분 설치되어 있고, 여기서 만들어진 미세먼지는 지리적, 기후적 영향을 통해 대도시에 도달하게 된다. 미세먼지 경로에 대한 정보가 부정확할 가능성이 높고 이에 대한 수집이 불가능하기 때문에 본 연구에서는 대도시별로 소비에 차별을 보이는 경유 소비의 영향에만 초점을 맞추도록 한다. 이를 위해 본 연구에서는 Bae, Kim(2016)과 Park, Shin(2017)과 유사한 형태의 자료를 시변하는 비모수 고정효과 패널모형(panel model)을 통해 추정하고자 한다. 본 연구의 구성은 다음과 같다. 우선, 2장에서 방법론인 비모수 시변계수 고정효과 패널모형을 설명하고 3장에서 추정에 사용되는 자료와 기초통계량에 대해 설명한다. 그리고 4장에서 추정결과를 해석하고 5장에서 분석에 대한 결론을 내리도록 한다.

2. 모형

본 연구에서는 여러 가지 요인들이 미세먼지 농도에 미치는 영향의 크기 시간에 따라 변화하는지를 살펴보기 위해 Li, Chen, Gao(2011)이 제안한 비모수 시변계수 고정효과 패널모형을 사용하고자 한다. 이 모형은 Cai(2007)가 비선형, 비정상성, 추세적 특징들을 포착할 수 있도록 고안한 시변계수 시계열 모형을 패널자료에 적용하여 확장한 모형이다. 그러므로 본 모형을 사용하는 경우, 미세먼지 농도에 대한 결정요인들의 영향력이 시간에 따라 변화하는 모습을 추정할 수 있을 뿐 아니라 미세먼지 농도의 추세적 특징까지 함께 확인할 수 있다.

또한 본 연구에서는 국내 7개 광역시에 대한 패널 자료를 사용하고자 하기 때문에 본 연구의 목적과 가장 부합한 모형으로 판단하였다. Li, Chen, Gao(2011)에서는 시변계수 모형을 고정효과 패널에 응용하기 위해 평균국지선형과 국지선형더미변수 방법 두 가지를 제안하였는데 본 연구에서는 평균 국지선형(local linear) 방법을 사용하기로 한다. 비모수 추세 시변계수 패널의 기본적인 형태는 다음과 같다.

$$Y_{it} = z_t + X'_{it} \alpha_t + c_i + \epsilon_{it}$$

여기서 $X'_{it} = (X_{it,1}, \dots, X_{it,d})'$, $\alpha_t = (\alpha_{t,1}, \dots, \alpha_{t,d})'$, z_t 는 추세를 나타내는 함수, α_t 는 시변계수, c_i 는 시간불변 개체효과, ϵ_{it} 는 오차항을 나타낸다. 오차항은 안정적(stationary)이고 개별 지역 i 에 대해 독립적이며, $\{X_{it}\}$ 와 $\{\epsilon_{it}\}$ 에 대해 약내생성을 가지고 있다고 가정한다. 그리고 z_t 와 $\alpha_{t,j}$ 는 $t=1, \dots, T$ 일 때, 각각 $z_t(\frac{t}{T})$ 와 $\alpha_j(\frac{t}{T})$ 을 만족하는 시변함수이다. $Y_{it}, X_{it}, \epsilon_{it}$ 의 횡단면적 평균을 각각 $Y_{0t}, X_{0t}, \epsilon_{0t}$ 이라고 표현한다면 시간불변 개체효과 c_i 는 제거되고 평균식은 다음과 같이 표현된다.

$$Y_{0t} = z_t + X'_{0t} \alpha_t + \epsilon_{0t}$$

여기서 $Y = (Y_{01}, \dots, Y_{0T})'$, $z = (z_1, \dots, z_T)'$, $A(X, \alpha) = (X'_{01} \alpha_1, \dots, X'_{0T} \alpha_T)'$, $\epsilon = (\epsilon_{01}, \dots, \epsilon_{0T})'$ 라고 표기하면 식은 더욱 간단하게 다음과 같이 표현된다.

$$Y = z + A(X, \alpha) + \epsilon$$

일반적으로 사용하는 국지선형방법을 사용하여 시변함수들을 추정하기 위해서는 다음의 최적화 문제를 사용한다. 이를 통해 유도된 국지선형추정량 $\hat{\alpha}_*(\tau)$, $0 < \tau < 1$ 은 다음과 같다. 수식을 유도하는 보다 자세한 방법은 Li, Chen, Gao(2011)과 Fan, Gijbels(1996)을 참고하기 바란다.

$$\hat{\alpha}_*(\tau) = [I_{d+1}, 0_{d+1}][M'(\tau)W(\tau)M(\tau)]^{-1}M'(\tau)W(\tau)Y$$

$$\text{여기서 } M(\tau) = \begin{pmatrix} 1 & X'_{01} & \frac{1-\tau T}{Th} & \frac{1-\tau T}{Th} X'_{01} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & X'_{0T} & \frac{T-\tau T}{Th} & \frac{T-\tau T}{Th} X'_{0T} \end{pmatrix}, \quad W(\tau) = \text{diag}[K(\frac{1-\tau T}{Th}), \dots, K(\frac{T-\tau T}{Th})], \text{ 이고 } h \text{가 대}$$

역폭(bandwidth)을 의미한다.

3. 자료 및 기초통계량

분석의 대상이 되는 국내 대도시는 서울특별시를 포함한 7개의 광역시로 설정하였다. 수집이 가능한 대부분의 통계 자료는 광역시를 포함한 16개 도지역의 정보를 포함하고 있다. 하지만, 도지역인 경우 다양한 규모의 도시들을 포함하고 있어 분석에 사용되기에는 너무 넓은 범위라고 판단하였다. 더구나 미세먼지의 경우 대도시가 그 정도가 더욱 심한 것으로 알려져 있다. 2006년 1월에서 2016년 12월까지의 자료를 사용하였고 미세먼지 농도는 국립환경과학원의 배출량 통계, 경유 소비량은 에너지경제연구원, 기상요인에 대한 자료는 기상청, 각 지역의 취업자 수와 제조업 산업생산지수는 통계청, 자동차등록대수는 국토교통부의 통계누리를 통해 수집되었다. 이들 자료들은 모두 광역시의 월간 정보들을 포함하고 있다. 아쉽기는 하지만, 본 연구에서는 자료의 한계로 인해 PM_{10} 에 대한 석탄 화력발전소 발전량의 영향은 배제하였다. 발전용 유연탄 소비량은 우리나라 전체에 해당되는 소비량만이 공개될 뿐 개별 석탄 화력발전소의 월간 소비량에 대한 자료는 공개되지 않는다. 뿐만아니라, 국내 대규모 석탄 화력발전소는 대부분 대도시 외의 지역에 설치되어 있어 이들 발전소들이 특정 대도시에 미칠 수 있는 영향이나 범위 역시 명확하지 않다는 한계가 있다.

분석에 사용된 변수들의 기초통계량은 Table 1에 나타나있다. 2006년에서 2016년까지 우리나라 7개 대도시의 미세먼지 농도의 평균은 $47\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 세계보건기구에서 권고하고 있는 기준이 연평균 $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 훨씬 상회하고 있다. 한국이 설정한 환경기준치인 연평균 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 는 조금 낮은 수치이다.

Table 1. Basic statistics

Variable (units)	Observations	Mean	Standard Deviation	Minimum	Maximum
PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	924	47.04	15.22	13	110
employment (1,000 person)	924	1,607	1,479	472	5,252
maufacturing industrial product index	924	100.90	12.50	49.45	138.50
diesel consumption (1,000 liter)	924	81,606	38,258	22,776	204,036
registered vehicles (fleet)	924	1,094,700	811,492	384,605	3,084,245
precipitation (mm)	924	108.45	130.23	0	1,131
temperature ($^{\circ}\text{C}$)	924	13.86	9.10	-7.2	29
wind velocity (m/s)	924	2.387	0.638	1.1	4.9
yellow dust (number of days in a month)	924	0.626	1.338	0	9

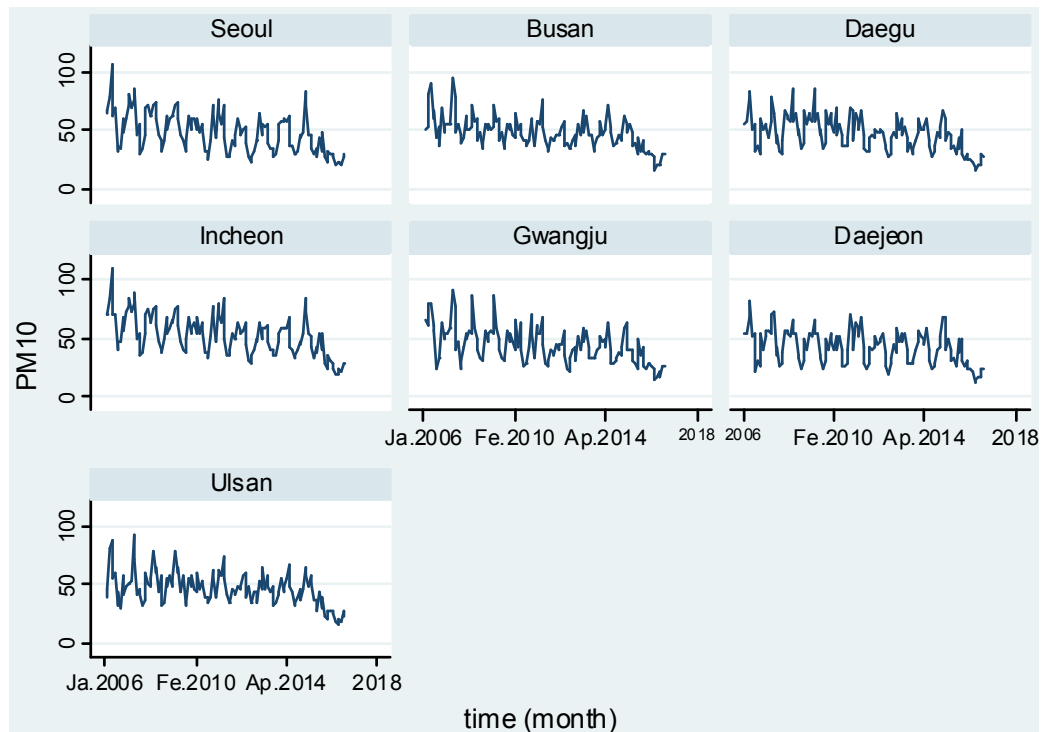
Figure 1. PM_{10} concentration of metropolitans for 10 years

Figure 1은 우리나라 각 대도시의 PM_{10} 농도의 추세를 보여준다. 우선, 지역적으로 가까운 서울과 인천, 부산과 울산이 거의 유사한 형태를 나타내고 있다는 점이 눈에 띈다. 나머지 대도시 역시 유사한 패턴(pattern)을 보이고 있으나 대전 지역이 전반적으로 PM_{10} 의 농도가 낮은 것으로 보인다. 각 도시의 PM_{10} 시계열만으로 판단하였을 때에는 계절성이 굉장히 강하고 예전에 비해 점차적으

로 농도가 낮아지고 있다는 점도 알 수 있다. 또한, 대도시 별로 큰 차이를 보일 수 있는 각 도시의 취업자 수, 제조업 산업생산지수, 자동차등록대수, 경유 소비 등의 영향이 어느 정도 제한될 수 있다는 점 역시 어느 정도 짐작해볼 수도 있다.

4. 추정 결과

본격적으로 시변계수모형을 추정하기 전에 가장 기초적인 합동통상자승법(pooled ordinary least square model)과 동적 패널에 기초적으로 사용하는 도구변수(IV; instrument variable) 1차 차분(first-differenced) 모형을 사용하여 먼저 추정하였다. 모든 변수들은 자연대수로 전환하였다. Table 2는 그 결과를 나타낸다. 모형에 따라 통계적 유의성이 다른 변수는 취업자 수와 제조업 산업생산지수이고 자동차의 등록대수는 모든 모형에서 유의하지 않은 결과가 나타났다. 합동통상자승모형에서는 제조업 산업생산지수가 통계적으로 유의하게 미세먼지 농도에 양(+)의 영향을 미치는 것으로 나타난 반면 도구변수 1차 차분모형에서는 취업자의 수가 양(+)의 영향을 통계적으로 유의하게 미치는 것으로 나타났다. 그리고 반대의 결과를 나타내는 풍속을 제외한 나머지 변수의 추정계수들은 모두 유사한 결과를 나타낸다. 경유의 소비는 예상하였던 바와 같이 통계적으로 유의하게 미세먼지의 농도를 증가 시키고, 기후변수 중에서는 강수량과 온도가 미세먼지에 음(-)의 영향을 미치고 황사는 양(+)의 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Table 2. Estimated results from pooled OLS and first-differenced IV

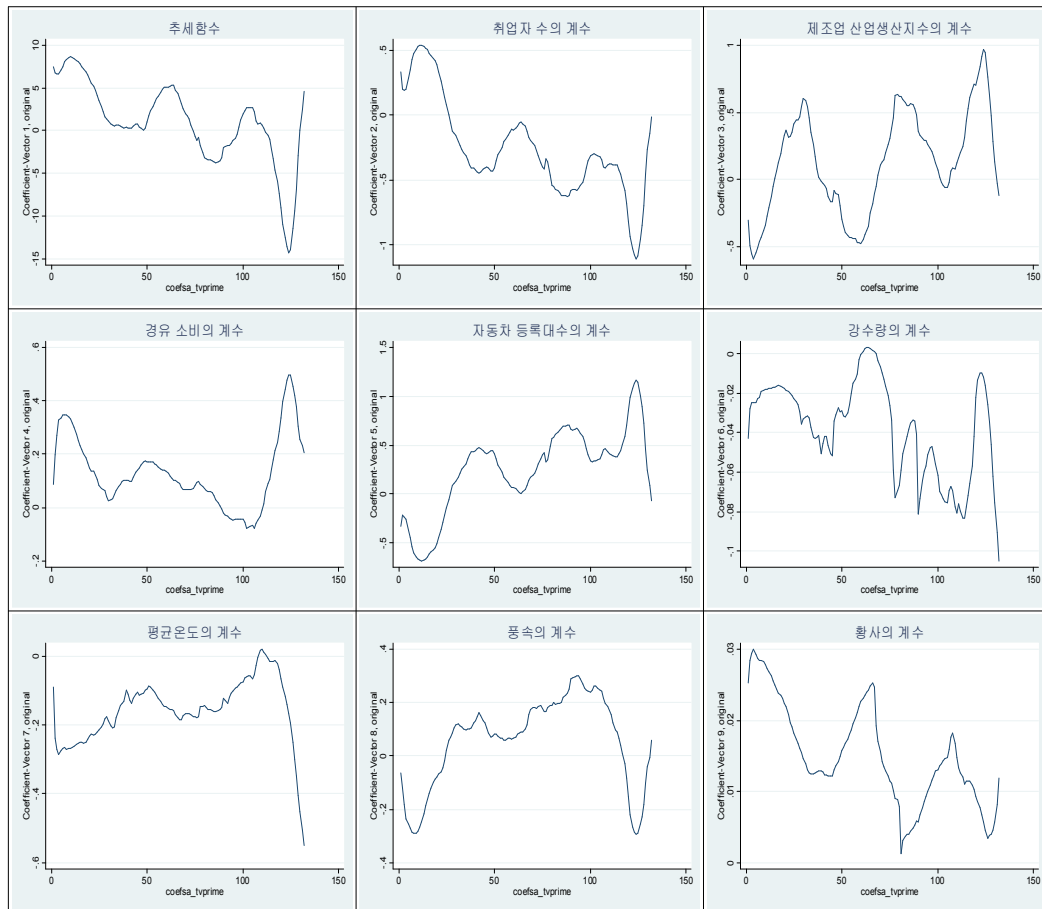
dependent: $\ln(PM_{10})$	coefficient	dependent: $\Delta \ln(PM_{10})$	coefficient
constant	110.643 (7.396)***	constant	-0.014 (0.008)
$\ln(\text{employment})$	0.010 (0.122)	$\Delta \ln(\text{employment})$	3.060 (0.953)***
$\ln(\text{product index})$	0.384 (0.075)***	$\Delta \ln(\text{product index})$	0.082 (0.092)
$\ln(\text{diesel})$	0.066 (0.032)**	$\Delta \ln(\text{diesel})$	0.201 (0.074)***
$\ln(\text{vehicle})$	-0.051 (0.140)	$\Delta \ln(\text{vehicle})$	0.735 (0.851)
$\ln(\text{rain})$	-0.019 (0.008)**	$\Delta \ln(\text{rain})$	-0.011 (0.003)***
$\ln(\text{temperature})$	-0.144 (0.022)***	$\Delta \ln(\text{temperature})$	-0.152 (0.040)***
$\ln(\text{windvelocity})$	0.124 (0.040)***	$\Delta \ln(\text{windvelocity})$	-0.283 (0.066)***
$\ln(\text{yellowdust})$	0.014 (0.001)***	$\Delta \ln(\text{yellowdust})$	0.011 (0.001)***
year	-0.054 (0.004)***	$\Delta \ln(PM_{10})$ at t-1	-0.264 (0.117)**
month	-0.020 (0.002)***	Instruments: all explanatory variables + $\ln(PM_{10})$ at t-2	
R^2 : 0.5499		Wald $\pi^2(9)$: 315.93	

Note: Values in the parentheses indicate standard errors; ***, ** indicate the significance at 1%, 5% levels, respectively.

추가적으로 년도 더미(dummy)가 통계적으로 음(-)의 값을 보여 미세먼지가 점차 감소하는 것으로 나타났고, 1차 차분 도구변수 모형에서 미세먼지의 시차변수가 음(-)의 값을 나타내 전기의 미

세먼지의 농도가 1% 증가하면 현재의 미세먼지 농도는 0.264% 감소하는 것으로 나타났다. 강수량은 미세먼지를 저감, 경유 소비는 미세먼지를 증가시키고, 황사일수가 많아질수록 미세먼지의 농도가 높아진다는 결과는 선행연구들의 결과나 일반적인 기대에 부합하는 결과로 보인다. 두 모형 간에 상이한 추정결과들은 경제학적으로 차분이 되지 않은 장기 현상과 1차 차분된 단기의 현상으로 구분하여 해석할 수 있을 것이다. 취업자의 수는 장기적으로 미세먼지의 농도에 영향을 미치지 않으나 단기적으로는 양(+)의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 반면 제조업의 산업생산지수는 장기적으로 양(+)의 영향을 미치나 단기적으로는 미세먼지에 영향을 미치지 않는다. 이와 같은 결과는 미세먼지의 공기 중 생성과 관련한 것으로 짐작된다. 일반적으로 제조업 부문에서는 질소산화물을 발생시킨다. 질소산화물은 이후 공기 중에서의 반응을 통해 미세먼지화가 된다. 때문에 미세먼지 농도에 대한 취업자의 수나 제조업의 산업생산지수의 장·단기 영향은 각각 다르게 추정될 수 있을 것이다.

마지막으로 Figure 2는 본 연구에서의 주요 목적인 비모수 추세 시변계수 패널로 추정한 각 변수의 추정계수들을 나타내고 있다. 미세먼지의 추세함수는 점차적으로 감소하는 것으로 보이지만



Note: lines indicate coefficients and gray bands around the lines indicate 95% confidence interval using bootstrap standard errors.

Figure 2. Estimated time varying coefficients

유의한 수준은 아니었다. 그리고 취업자 수와 제조업 산업생산지수는 최근 미세먼지 농도에 대한 영향이 지속적으로 증가하여 2014년 이후 통계적으로 유의한 수준을 나타내고 있다. 자동차 등록대수와 평균 풍속은 통계적으로 유의한 수준의 변화를 보이고 있지 않고 있다. 본 연구에서 나타난 가장 흥미로운 결과 중 하나는 경유 소비에 대한 계수가 2014년 정도에 가장 작은 모습을 보인 뒤 그 이후 점차 증가한다는 점과 취업자 및 제조업 산업생산지수의 계수 역시 점차 증가하는 모습을 보인다는 점이다. 이들 변수들은 국내에서 미세먼지를 발생시키는 주요 원인들이다. 미세먼지에 대한 이들 변수들의 영향력이 최근 점차 커지고 있다는 사실은 중국 등지의 영향 이외에도 우리나라 내에서 발생시키는 미세먼지에 대한 대응이 충분하지 않다는 반증이 된다. 다만, 2014년 이후 증가하는 경유 소비의 영향력이 통계적으로 유의한 수준은 아니기 때문에 경유에 대한 영향력에 대해서는 향후 추가적으로 연구해볼 필요가 있다. 하지만, 취업자 수와 제조업 산업생산지수는 국내 경기를 나타내는 대표적인 지표들이다. 이로 인한 미세먼지 농도의 증가율이 점차 확대되고 있다는 점은 미세먼지에 대한 국내 대응 역시 아직 개선의 여지가 있다는 점을 보여준다. 반면 중국으로부터의 영향이 분명한 황사로 인한 국내 미세먼지의 농도는 점차 감소하는 추세로 나타나고 있다.

5. 결론

최근 크게 불거진 국내 미세먼지 PM_{10} 에 대한 논란과 정부의 대응은 처음 있는 일이 아니다. 미세먼지에 대한 대응을 위해 경유에 대한 규제나 경유 자동차에 대한 규제 등 다양한 정책들이 이전부터 실시되어 왔다. 하지만, 최근 환경, 건강, 안전 등에 대한 관심이 급격하게 증가하면서 미세먼지에 대한 여러 가지 논란들이 제기되고 있다. 그 중 가장 대표적인 것 중 하나가 국내에서의 직접적인 환경오염 정도의 비중이다. 미세먼지는 환경오염 물질에 의해 1차적으로 생성되기도 하지만 대기 중에서 2차적으로 생성되기도 하고 기후에 따라 그 정도가 변화하기도 한다. 우리나라와 인접한 중국의 경제 성장은 간접적으로 우리나라의 대기환경에 영향을 미칠 수밖에 없다. 그러므로 미세먼지 대응을 위한 정책을 마련하기에 앞서 국내에서 직접적으로 생성되는 미세먼지, 외부로부터 유입되는 미세먼지, 그리고 기후로 인한 영향 등을 종합적으로 파악할 필요가 있다. 이와 같은 원인 규명을 위한 노력은 미시적인 관점에서 다양한 실험, 관측, 분석 등이 필요하다.

본 연구에서는 미세먼지에 대한 직접적인 원인 규명에 앞서 거시적인 측면에서 국내에서의 원인, 외부로부터의 원인, 기후로 인한 영향 등이 시간에 따라 변화하는 모습을 관찰한다. 특히, 경유 자동차를 포함한 자동차들은 그간 기술발전으로 인해 동일한 연료를 소모하더라도 엄격해진 황 규제와 후처리장치의 장착 의무화 정책 등으로 오염물질을 적게 배출할 가능성이 높다고 평가받는다. 마찬가지로, 개선된 환경 정책의 적용을 받는 제조업 생산 역시 동일한 규모의 생산을 할 때 미세먼지의 배출이 적어질 가능성이 높다. 그러므로 미세먼지 농도에 대한 이들의 영향을 시간별로 비교하고 추가적으로 외부로부터 유입되는 영향들을 함께 분석한다면 그간 있었던 기술의 진보와 환경정책들의 효과에 대한 간접적인 관찰이 가능할 것이다.

이를 위해 본 연구에서는 2006년 1월에서 2016년 12월까지 서울을 포함한 광역시 7개의 월간 평균 PM_{10} 농도에 대한 여러 가지 요소들의 영향을 살펴보았다. 생산과 관련해서는 제조업 생산산업지수와 취업자 수가 미세먼지 농도에 미치는 영향을 살펴보았고, 수송부문과 관련해서는 경유소비와 자동차등록대수의 영향 그리고 기후적인 측면에서는 강수량, 온도, 풍속의 영향을 살펴보았다. 그리고 마지막으로 월간 황사일수를 통해 미세먼지에 대한 외부로부터의 영향을 살펴보았다. PM_{10} 농도에 대한 이들 요소들의 영향력이 시간에 따라 변화하는 모습을 관찰하기 위해서는 시변 비모

수 고정효과 패널모형을 사용하였다. 추정결과, PM_{10} 의 추세함수는 일반적인 생각과는 달리 통계적으로 유의한 변화를 보이지 않고 있다. 하지만, 국내에서의 발생 원인으로 감안할 수 있는 취업자 수와 제조업 산업생산지수의 경우에는 미세먼지 농도 증가에 대한 영향이 더욱 커지고 있는 반면 외부의 영향이라고 할 수 있는 황사의 경우 미세먼지에 대한 영향이 낮아지고 있는 추세인 것으로 나타났다. 결국, 국내 산업 부문에서의 미세먼지 정책들이 아직도 충분하지 않고 향후 개선의 여지도 많은 것으로 보인다. 미세먼지에 대한 경유 소비의 영향은 2014년까지 감소하는 추세를 보이다가 이후 증가하기 시작한다. 하지만, 2014년 이후의 증가에 대해서는 통계적으로 유의한 수준은 아니었다. 경유에 대한 대부분의 규제가 2005년에 시작된 점을 감안하면 그간 규제에 의한 효과가 2014년까지 나타난 것으로 사료된다. 국내 자동차 중 경유 자동차의 비중은 꾸준히 증가하여 2011년 약 36%, 2014년에 약 40%에 이른다. 산업 부문에서의 소비가 많은 경유의 특성상 산업 부문에서 미세먼지에 대한 영향이 더욱 커졌을 가능성이 많겠지만 도로 부문에서 경유 차량이 높아진 것 역시 하나의 원인이 될 수 있을 것으로 추측한다. 미세먼지 배출량이 축소된 대신 2차 미세먼지를 생성하는 질소산화물(NO_x)의 배출량이 크게 증가한 사실을 은폐하려 했던 Volkswagen의 사태를 감안하면 향후 경유 소비에 대한 환경규제는 더욱 엄격해질 뿐 아니라 지속적인 모니터링이 필요한 것으로 보인다.

본 연구에서의 방법론은 거시적인 측면에서의 시변하는 계수(영향력) 추정으로 미시적인 관점에서 통제된 환경 내에서 직접적인 관찰을 통한 분석에 비해서는 한계가 있을 수밖에 없다. 특히, 미세먼지에 대한 직접적인 원인 규명에 있어서는 더욱 의미가 떨어질 수 있다. 그럼에도 불구하고, 본 연구를 통해 미세먼지에 대한 다양한 원인들의 영향이 시간에 따라 변화하는 모습을 관찰하는 것 역시 또 다른 관점에서 우리나라 미세먼지 문제에 대한 이해를 넓히는데 도움이 될 것이다.

References

- Bae, J. H., Kim, Y. S. (2016). Causes of air pollution and effects of mitigation policy in Korea, *Environmental and Resource Economics Review*, 25, 545-564. (in Korean).
- Cai, Z. (2007). Trending time-varying coefficient time series models with serially correlated Errors, *Journal of Econometrics*, 136, 163-188.
- Chang, M., Choi, K. (2009). Mortality for PM_{10} in Seoul by using nonlinear regression model, *Journal of the Korean Data Analysis Society*, 11, 2425-2436. (in Korean).
- Cho, S. H., Kim, H. W., Han, Y. J., Kim, W. J. (2016). Characteristics of fine particles measured in two different functional areas and identification of factors enhancing their concentrations, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32, 100-113. (in Korean).
- Choi, H., Park, C. (2016). Clustering analysis of particulate matter data using shrinkage boxplot, *Journal of the Korean Data Analysis Society*, 18, 2435-2443. (in Korean).
- Fan, J., Gijbels, I. (1996). *Local polynomial modelling and its applications*. London: Chapman and Hall.
- Kim, Y. P. (2010). Analysis of the trend of atmospheric PM_{10} concentration over the Seoul metropolitan area between 1999 and 2008, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 19, 59-74. (in Korean).
- Kim, J. A., Jin, H. A., Kim, C. H. (2007). Characteristics of time variations of PM_{10} concentrations in Busan and interpreting its generation mechanism using meteorological variables, *Journal of the Environmental Sciences*, 16, 1157-1167.
- Lee, J. S., Lee, Y. S., Yang, H. S. (2015). The implicit price of $PM_{2.5}$ by using hedonic model : The case of Incheon and Gyunggido, *Journal of the Korean Data Analysis Society*, 18(5), 2357-2363.
- Li, D., Chen, J., Gao, J. (2011). Non-parametric time-varying coefficient panel data models with fixed effects, *Econometrics Journal*, 14, 387-408.

- Oh, J., Shin, H., Shin, Y., Jeoun, H. C. (2017). Forecasting the particulate matter in Seoul using a univariate time series approach, *Journal of the Korean Data Analysis Society*, 19, 2457-2468. (in Korean).
- Park, S., Shin, H., (2017). Analysis of the factors influencing PM2.5 in Korea: focusing on seasonal factors, *Journal of Environmental Policy and Administration*, 25, 227-248. (in Korean).
- Shin, M. K., Lee, C. D., Ha, H. S., Choe, C. S., Kim, Y. H., (2007). The influence of meteorological factors on PM10 concentration in Incheon, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 23, 322-331. (in Korean).
- Son, H. Y., Kim, C. H. (2009). Interpretating the spectral characteristics of measured particle concentrations in Busan, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 25, 133-140. (in Korean).
- Sohn, K. T., Ha, M., Lee, S. H., (2016). Prediction model of PM10 concentration over Seoul using CMAQ forecasts, *Journal of the Korean Data Analysis Society*, 18, 3001-3009. (in Korean).

Estimating Changes of Causative Factors' Influences: Focusing on Diesel

*Hyung-Gun Kim*¹

Abstract

In this study, influences of causative factors for PM_{10} concentration are estimated. In addition, changes of the influences are also estimated in order to observe the indirect effects of government regulations and policies. For that, monthly data from January 2006 to December 2016 on PM_{10} , employment, manufacturing industrial product index, diesel consumption, registered vehicles, precipitation, temperature, wind velocity, yellow dust days for seven biggest cities in Korea are employed. For the estimating the changes of causative factors' influences, the study uses the non-parametric time-varying coefficient panel model with fixed effects. As a result, the study finds that level of PM_{10} concentration in Korea actually is not changing significantly apart from our expectation. Also, the study finds the influence of diesel demand which has statistically significant effect on PM_{10} decreased until around year 2014 and since then not changing significantly. The influences of domestic factors such as employment and manufacturing industrial product index have been increasing since the year of 2014 while the influence of yellow dust has been decreasing recently. These estimated results imply that the efforts of Korean government to reduce PM_{10} concentration are still not enough and there is still room for improvement.

Keywords : Air pollutants, PM_{10} , Diesel, non-parametric time-varying coefficient panel model.

¹Assistant Professor, Division of Economics and Information Statics, Kangwon National University, 1 Kangwondeahak-gil, Chuncheon-si, Kangwon-do, 24341, Korea. E-mail : kgh@kangwon.ac.kr
[Received 4 March 2018; Revised 17 April 2018; Accepted 20 April 2018]